

Η παρούσα έκδοση χρηματοδοτήθηκε από το
Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης

Επιμέλεια έκδοσης:
Γ. Μπάμνιος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης

Η οργανωτική επιτροπή του Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2004 και το Διοικητικό Συμβούλιο του ΕΛ.ΙΝ.Α. επιθυμούν να ευχαριστήσουν το Τμήμα Μουσικών Σπουδών του ΑΠΘ για τη φιλοξενία του συνεδρίου στις εγκαταστάσεις του, τους χορηγούς του συνεδρίου Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, ΜΕΤΑΧΙΟΤΙΣ Κέντρο Δομικών Υλικών, ΚΕΜ Electronics και Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ. καθώς και τις εταιρίες ALTO, ΕΡΓΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ, FIBRAN ΗΧΟΠΑΡΕΜΒΑΣΗ, ISELCO, ΜΕΤΑΧΙΟΤΙΣ, ΜΙΡΕCO, που συμμετείχαν στην έκθεση προϊόντων.

Επιστημονική Επιτροπή

Ευθυμιάτος Διονύσιος, Καθηγητής ΕΜΠ
Ιωαννίδης Στυλιανός, Καθηγητής, Πρόεδρος ΤΕΙ Θεσσαλονίκης
Κεραμίδης Δημήτρης, Μηχανικός Ήχου ΕΡΤ
Κοκκινάκης Γεώργιος, Καθηγητής ΠΣΠΠ
Μουρτζόπουλος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής ΠΣΠΠ
Παπαδάκης Ιωάννης, Καθ. , Παν. Κρήτης & ΙΤΕ
Παπανικολάου Γεώργιος, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ
Προβατίδης Χριστόφορος, Αν. Καθηγ. ΕΜΠ
Σκαρλάτος Δημήτρης, Επικ. Καθηγητής ΠΣΠΠ
Σπυρίδης Χαράλαμπος, Καθηγητής Π. Αθηνών
Ταρουδάκης Μιχάλης, Αν. Καθ. Παν. Κρήτης & ΙΤΕ
Τροχίδης Αθανάσιος, Καθηγητής ΑΠΘ
Τσινίκας Νικόλαος, Καθηγητής ΑΠΘ

Οργανωτική Επιτροπή

Κουτσοδημάκης Χρήστος, Μηχανικός Ακουστικής
Μουρτζόπουλος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής ΠΣΠΠ
Μπάμνιος Γεώργιος, Αν. Καθηγητής ΤΕΙ Θεσσαλονίκης
Παπαδέλης Γεώργιος, Λέκτορας ΑΠΘ
Παπανικολάου Γεώργιος, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ
Παστιάδης Κωνσταντίνος, Δρ. Ηλ/γος Μηχ. ΑΠΘ
Σκαρλάτος Δημήτρης, Επικ. Καθηγητής ΠΣΠΠ
Ταρουδάκης Μιχάλης, Αν. Καθηγητής Π. Κρήτης
Τροχίδης Αθανάσιος, Καθηγητής ΑΠΘ
Τσινίκας Νικόλαος, Καθηγητής ΑΠΘ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Δ Ε Υ Τ Ε Ρ Α 2 7 / 9 / 2 0 0 4

Προσκεκλημένη Ομιλία

R. J. Pinnington

Tyre road interaction noise. 1

Ακουστική χώρων, Κτιριακή Ακουστική

Διονύσιος Ευθυμιάτος

Μερικές παρατηρήσεις για τη σχέση αντήχησης-ευκρίνειας.
Εφαρμογή σε χώρους αυξημένης αντήχησης. 13

Christos Tsakostas

An efficient variation of the "Image Source Model" for
the case of multiple sound sources and a single receiver. 19

Νίκος Κ. Μπάρκας

Σχεδιασμός υπαίθριου θεάτρου σε αστικό κέντρο:
Το Θέατρο Κήπου του Δήμου Θεσσαλονίκης. 25

Γεώργιος Καμπουράκης, Ιωάννης Σαρρής, Νικόλαος Στεφανάκης

Η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας και οι επιπτώσεις της στην
επικοινωνία. 31

Gottfried Schubert

Ακουστική άνεση σε ξενοδοχεία. 37

Ανδρέας Ρουσούνελος, Gottfried Schubert

Λογισμικό για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης αιθουσών. 45

Μουσική ακουστική

Παναγιώτης Τζεβελέκος, Γεώργιος Κουρουπέτρογλου

Acoustical analysis of woodwind musical instruments for
virtual instrument implementation by physical modeling. 49

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης

Το μουσικό διάστημα κατά τον Αριστόξενο. 61

Μαρία Χ. Παπαδοπούλου, Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης

Το όργανο "Ελικών" εις την κατανομή του κανόνος. 69

Ελίνα Νικολίτσα

Η ποιότητα της τραγουδιστικής φωνής πριν και μετά την αμυγδαλεκτομή:
Ακουστική ανάλυση και αντίληψη, λειτουργία και καλλιτεχνικά
χαρακτηριστικά. 77

Απόστολος Σκουρουπάθης, Χάρης Παναγόπουλος

Η φυσική των πνευστών μουσικών οργάνων: Αγραμμικότητα
και αριθμητική μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών τους. 85

**Σ. Γυμνόπουλος, Σ. Κουζούπης, Μ. Μπακαρέζος, Γ. Ορφανός, Μ. Ταταράκης
και Ν. Α. Παπαδογιάννης**

Μελέτη δονήσεων καπακιών ελληνικών παραδοσιακών εγχόρδων
μουσικών οργάνων: Προκαταρκτικά αποτελέσματα με χρήση μηχανικών
και οπτικών τεχνικών. 93

Ακουστική χώρων, Κτιριακή Ακουστική**Ι. Γ. Μαλαφής, Παν. Ε. Χατζημανολάκης, Χρ. Ε. Παναγιωτάκου, Χαρ. Χ.
Σπυρίδης**

Μελέτη και εικονική διαμόρφωση ακουστικής σε αίθουσα διδασκαλίας. 101

Χ. Κουτσοδημάκης

Μικροδιάτρητες ηχοαπορροφητικές μεμβρανές για την
βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης αιθουσών. 109

Ηλίας Κωστάζος, Μιχάλης Παντελάκης, Βλάσσης Σέργης

Νέα ηχοαπορροφητικά υλικά από θερμοσυγκολλητές πολυεστερικές
ίνες. 115

Χ. Γούσιος, Χ. Σεβαστιάδης, Γ. Παπανικολάου, Γ. Καλλίρης

Ακουστική αρχαίων ωδείων. Μελέτη περίπτωσης:
Το ωδείο της Αρχαίας Αγοράς Θεσσαλονίκης. 123

Δημήτριος Κεραμίδης

Ραδιοφωνικά στούντιο, παρελθόν – παρόν – μέλλον. 129

Θ. Τιμαγένης

Ακουστικός σχεδιασμός του Βασιλικού Θεάτρου Θεσσαλονίκης. 135

Ψυχοακουστική**Αναστάσιος Βασιλειάδης, P.A. Nelson**

Subjective evaluation of the importance of the ringing frequency
in virtual acoustic imaging. 143

Christos Tsakostas

Binaural simulation applied to typical stereo audio signals broadcasted by media (Radio/TV), for the enhancement of the listening experience. 149

Γεράσιμος Ξύδας, Βασίλης Αργυρόπουλος, Θεοδώρα Καρακώστα, Γεώργιος Κουρουπέτρογλου

An open platform for conducting psycho-acoustic experiments in the auditory representation of web documents. 157

Γεώργιος Παπαδέλης, Κων/νος Παστιάδης

Μελέτη χαρακτηριστικών της αντίληψης της χροιάς μουσικών ήχων με τη βοήθεια μοντέλων προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας. 165

Γεώργιος Παπαδέλης, Αιμίλιος Καμπουρόπουλος, Κων/νος Παστιάδης, Ιωάννης Ταρνανάς

Ευφυή υπολογιστικά συστήματα ηχοδιάδρασης για την καλλιέργεια μουσικών ρυθμικών δεξιοτήτων. 173

Χαράλ. Δημούλας, Χαράλ. Καρδαράς, Γ. Καλλίρης, Κων/νος Αβδελίδης, Γ. Παπανικολάου

Ανάπτυξη εφαρμογής για διεξαγωγή προληπτικής ακουομετρικής εξέτασης από απόσταση. 181

Επεξεργασία Ήχου / Σήματος**K. Voutsas, J. Adamy**

Pitch extraction using spiking neurons. 187

Αναστασία Γεωργάκη

Vox ex machina: Στην αναζήτηση ενός δυναμικού ψηφιακού συνθετητή τραγουδιστής φωνής. Τεχνικά προβλήματα και προοπτικές έρευνας. 195

Κων/νος Παστιάδης, Γεώργιος Παπανικολάου

Ανάλυση και απεικόνιση των διαταραχών ακουστικών σημάτων μουσικών οργάνων ή/και φωνής. 207

Ηλεκτροακουστική**Ιωάννης Σαρρής, Νίκος Στεφανάκης, Γεώργιος Καμπουράκης**

Ισοστάθμιση ηχητικής πίεσης σε μεγάλη συνεχή περιοχή παραλληλεπίπεδου χώρου. 213

Σωτήρης Κουτσομήτσος, Νικόλαος – Αλέξανδρος Τάτλας, Ιωάννης Μουρτζόπουλος

Υλοποίηση πρωτοτύπου πλήρως ψηφιακού ενισχυτή ηχητικών σημάτων. 219

Ανδρέας Φλώρος

Τεχνολογίες ασύρματης οικιακής δικτύωσης για ηχητικές εφαρμογές. ..227

Τ Ρ Ι Τ Η 2 8 / 9 / 2 0 0 4**Περιβαλλοντικός Θόρυβος, Περιβαλλοντική Ακουστική****Μανώλης Μαντάκης, Ιωάννα Μαντάκη**

Πρόβλεψη κυκλοφοριακού θορύβου: Μια στατιστική προσέγγιση.233

Ι. Ζήσιμος

Ηχητική συμπεριφορά οδικών κατασκευών.241

Ι. Ζήσιμος

Κατασκευαστική αξιολόγηση των προσφάτως ανεγερθέντων ηχοπετασμάτων στην περιοχή Αθηνών.247

Bertrand Masson, Χρυσάνθη Ναθαναήλ

Παράμετροι που επηρεάζουν την υποκειμενική εκτίμηση του θορύβου των αυτοκινητοδρόμων.253

Τ. Ζακινθινός, Δ. Σκαρλάτος

Παραγοντική ανάλυση της επίδρασης των συνθηκών οδήγησης και της κατάστασης του δρόμου στον συντελεστή άνεσης αυτοκινήτων.259

Γ. Μπάμνιος, Α. Τροχίδης

Σχεδίαση ηχοπετασμάτων.265

Υποβρύχια Ακουστική**Παναγιώτης Παπαδάκης**

Μελέτη της ανάκλασης ακουστικών κυμάτων από πυθμένα με επικλινή διεπιφάνεια.273

E. Skarsoulis, A. Frantzis, M. Kalogerakis

Underwater acoustic localization of pulsed sources with a 2-hydrophone configuration.279

Μ. Ταρουδάκης, Γ. Τζαγκαράκης

Χαρακτηρισμός ενός υποβρυχίου ακουστικού σήματος με χρήση της στατιστικής κατανομής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων.285

Ευστράτιος Δουκάκης, Σταυρούλα Πετρουτσέα

Παρακολούθηση της οριζόντιας μετατόπισης των υποθαλάσσιων ρηγμάτων με συνδυασμό τεχνικών DGPS/ακουστικών συστημάτων. ...293

Γενική, Θεωρητική και Εφαρμοσμένη Ακουστική

A Skarlatos, M. Clemens, T. Weiland

Extrapolation techniques for the solution of the wave equation
in time domain using implicit schemes. 303

Ioannis Touloupoulos, John A. Ekaterinaris

High-order discontinuous-Galerkin discretizations for
computational aeroacoustics in complex domains. 309

Μιχ. Δοσχόρης, Π. Κακκαβάς, Ε. Παπαδέας, Δ. Σκαρλάτος

Επίδραση της κίνησης του αναβολέα στην ωοειδή θυρίδα,
στο χώρο των τριών διαστάσεων. 321

Βασίλειος Καππάτος, Ευστράτιος Λυμπέρτος, Ευάγγελος Δερματάς

Προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού και θέσεων αισθητήρων
για τον υπολογισμό της θέσης ακουστικής εκπομπής. 329

Αριστείδης Δ. Κώτσης, Ιωάννης Α. Ρουμελιώτης

Ακουστική σκέδαση από διαπερατό σφαιροειδές. 337

Αρχιτεκτονική Ακουστική

N. Τσινίκας

Η ακουστική ως συνδετικός κρίκος ανάμεσα στη μουσική και την
αρχιτεκτονική. 343

Καλλιόπη Χουρμουζιάδου

Ακουστική εξέλιξη αρχαίου θεάτρου και επίδραση σκηνικού χώρου. 351

**Σταμάτης Βασιλαντωνόπουλος, Τηλέμαχος Ζακυνθινός, Παναγιώτης
Χατζηαντωνίου, Νικόλαος Τάτλας, Δημήτρης Σκαρλάτος, Ιωάννης
Μουρτζόπουλος**

Μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του θεάτρου της Επιδαύρου. ... 359

Σταμάτης Βασιλαντωνόπουλος, Ιωάννης Μουρτζόπουλος

Ακουστική προσομοίωση και ανάλυση ανοιχτών θεάτρων της αρχαιότητας.
..... 367

Στέλιος Θ. Κουζελέας

Εφαρμογές ακουστικής και γεωμετρικής προσομοίωσης αιθουσών με τη
βοήθεια πλατφόρμας ακουστικής προσομοίωσης προσαρμοσμένης σε
σύστημα cad. 375

Έλεγχος Θορύβου και Δονήσεων

Χριστόφορος Προβατίδης, Σπυρίδων Μουζακίτης, Γεώργιος Χαραλαμπόπουλος

Απόδοση ηλεκτρονικά ελεγχόμενων τοίχων ακουστικής σκιάς για τον ενεργό έλεγχο θορύβου μίας κινούμενης ηχητικής πηγής. 383

Michael Rümmerle, Andreas Stofleth, Dimitris Fragos, Maria Pavlidou

Ελαστική προστασία πολιτιστικού μνημείου με τη χρήση του ελαστομερούς υλικού SYLOMER®. 391

Σπύρος Κουζούπης, Α. Τροχίδης

Απώλεια μετάδοσης διπλών τοιχωμάτων με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz ή συνηχητές μεμβράνης. 399

Θεόδωρος Αργουδέλης

Μελέτη και σχεδιασμός ειδικών σεισμικών αναστολέων. 407

Εύα Βαφάκη, Γιώργος Παλάντζας, Δημήτριος Ναλμπάντης

Η διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στους λιμένες. Η περίπτωση του λιμένα της Θεσσαλονίκης. 413

Γ. Καλλίρης, Κ. Αβδελίδης, Ν. Βαγιόκας, Χ. Γούσιος, Χ. Δημούλας, Γ. Παπανικολάου, Κ. Παστιάδης, Χ. Σεβαστιάδης

Θόρυβος και Δονήσεις σε εργασιακούς χώρους: εκτίμηση – πρόβλεψη, μέτρα προστασίας. 421

Ευρετήριο 433

Road and Tyre Interaction Noise

R. J. Pinnington

I.S.V.R., University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, U.K.

Abstract

An overview is presented of the research into mechanisms for tyre noise interior and exterior to a moving road vehicle. The end objective of the research is to predict the noise in terms of the tyre and road material and geometric parameters. To achieve this four different types of model are required. These are: dynamic tyre belt and sidewall models, models of the various road-tyre interaction mechanisms, a description of the road surface consistent with these models, and finally an acoustic radiation model. There are three basic noise mechanisms: the first is from the belt vibration due to rolling over the rough surface, the second is the 'air -pumping' of air expelled from the closing road-tyre interface, last there is 'tyre-squeal' due to slip-stick motion in braking, acceleration and cornering. Some consideration is given to the relative contributions of the road and tyre with a view to giving direction for future noise reduction.

1. Introduction

When a rotating tyre interacts with the road surface, the time varying deformations are transmitted and radiated, causing noise interior and exterior to the vehicle. The main exterior noise occurs between 500Hz and 3000Hz, and is caused by sound radiated from the tyre 'belt' and the tyre-road interface. The interior noise is predominately below 500Hz and arises from the transmission of vibrations through the tyre 'sidewall.' The interior noise above this frequency comes from the 'exterior' sound radiation. The vehicle handling, ride comfort and gross rolling tyre deformations are at frequencies between 0-50Hz. To calculate this interaction with the road and also to determine the resulting vibration of the tyre surface it is first necessary to make a dynamic model of the tyre that can manage all dynamic behaviour of the tyre-road over the whole frequency range between 0-3000Hz.

The tyre belt is excited by the profile of the road surface rather in the manner of a mechanical gramophone. The road profile is the recorded disc, the needle and mechanical amplification system is the tyre carcass. Therefore as the vehicle speeds increase the velocity amplitude and frequency increase proportionally. The third component of the 'gramophone' is the horn. There is also such a horn formed between the belt and the road that serves to amplify the air volume fluctuations near the junction of the belt and road. Predictions of sound radiation will therefore require some mathematical description of the road profile and a model for the 'horn effect'.

The road description must be as simple as possible but include enough information to allow predictions of radiated sound from all the road-tyre interaction mechanisms. There are three main groups of interaction mechanisms. The first is mechanical deformation of the belt as it rolls over the road profile. These deformations are transmitted around the belt in the form of vibration waves. The amplitudes are greatest at the edge of the contact zone, where the 'horn' is most effective for sound radiation.

The second mechanism is known as ‘air pumping’, in which the rolling tyre expels or sucks in air at the front and back faces of the contact zone. This is not a smooth continuous process because of friction and the surface roughness causes the air to be moved in discrete packets. The impulsive nature of the air movement will give a broad frequency excitation which is most obvious in the vicinity of the horn ‘cut-on’ frequencies between 700Hz-3kHz, for car and lorry tyres.

The third mechanism is ‘tyre squeal’ due to partial or total slip of the tyre relative to the road noticeable during sharp braking, acceleration of cornering. However there is always relative slip at the contact edges during constant speed rolling because of the finite length contact zone. For a non-slip surface only the line directly beneath the wheel axis does not slip. Furthermore the rubber friction mechanism only operates because of relative slip, and so in fact there is always some continuous slip over the whole tyre/road contact zone. On a dry road this slip speed is around 2% of the driving speed. During ABS braking this rises to 20%, a complete tyre lock gives 100% slip.

The objective therefore is to model the dynamics of these three interaction mechanisms. The input parameters are: the material and geometric properties of tyre and the road (including friction, porosity and tortuosity) the quasi-static loads on the tyre/road interface, and the vehicle speed. The outputs are the interface forces, the belt vibration, the force transmitted to the wheel hub and the radiated sound.

To achieve this four different types of model are required. These are: dynamic tyre belt and sidewall models, models of the various road-tyre interaction mechanisms, a description of the road surface consistent with these models, and finally an acoustic radiation model.

In the brief description given here some of the progress made to achieve these steps will be reported, as the final objects have not been reached. This is not an overview of current work but rather represents some of the efforts of the RATIN and ITARI projects funded by the EC fifth and sixth frameworks.

2. Belt and Sidewall models

The belt is modelled as a curved tensioned Mindlin plate or wave-guide [1], seen in Figure 1. This means that curvature, rotary inertia, tension and axial stiffness, shear stiffness are added to the bending stiffness and mass of a straight Euler beam. The main effect of curvature is to couple transverse and longitudinal motion. The waves in the air cavity are also included, although the full coupled equations are not used. Rather it is assumed that the carcass vibration drives the air volume which in turn applies a force on the hub. The tyre rotation is included but only the centrifugal forces, as these significantly effect the belt tension. The Coriolis forces can be included but cause some added complexity that is not welcome at this stage. The outcome of the analysis is to give the transverse and in-plane response at any point on the tyre due to an input transverse or in-plane point or line force.

Figure 1 shows a segment of length ds and width dz , in a tyre belt of radius a and width b , displaying the sign convention for positive directions, rotations, forces and moments. The belt is subjected to a net static pressure P which causes a static tension/length N_s , N_z in the circumferencial and transverse directions s , z . Q_s , Q_z are the shear forces/length. N is the total static and dynamic circumferencial force/width. M_s , M_z are the bending moments/length. The accompanying displacements are u, w , in the circumferencial and radial directions, j_s is the element rotation. q describes the angular position and is related to the circumferencial co-

ordinate s as: $s=aq$. The tyre rotates in the positive q direction with angular velocity W . The belt is restrained either side by a side-wall of stiffnesses/ belt length of K_s , K_r in the circumferential and radial directions.

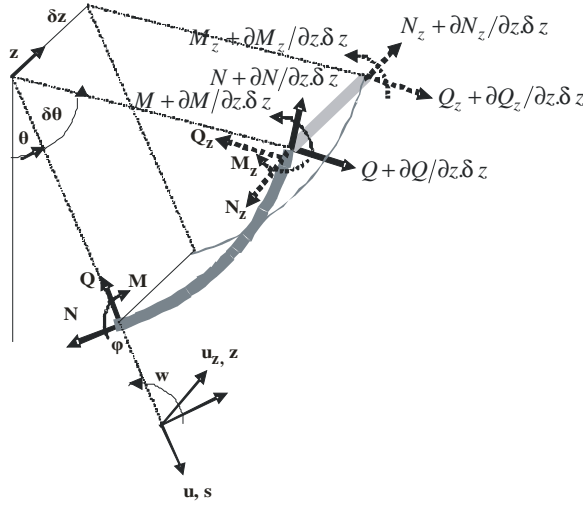


Figure 1. Sign convention for belt element

The equilibrium of dynamic radial forces taken in line with the circumferential shear force/width Q_s yields:

$$p(s, z) + \frac{\partial Q_s}{\partial s} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} - N \left(\frac{1}{a} + \frac{\partial \Phi_s}{\partial s} \right) + N_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \left(\frac{P}{a} + m \Omega^2 \right) w \quad (1)$$

$p(s, z)$ is the dynamic pressure due to the side-wall and external radial force. m is the belt mass/area. The circumferential force/width N has a static component N_s and a dynamic component arising from the circumferential strain e_s :

$$N = N_s + A_s e_s, \quad N_s = Pa \left(1 - \frac{l_s \sin f_1}{b f_c} \right) + m \Omega^2 a^2, \quad N_z = \frac{1}{2} \frac{Pl_s}{f_c} \quad (2)$$

where A_s is the belt axial stiffness/width. The static tensions N_s, N_z calculated in [1], are determined from the static equilibrium with the pressure P and the centrifugal force $mW^2 a$. f_c is the angle subtended by the side-wall, f_1 is the angle the angle between side-wall and the ground. The equation for dynamic circumferential equilibrium are obtained by resolving forces in the s direction, including the external tangential stress is t :

$$t(s, z) + \frac{\partial N}{\partial s} + Q_s \left(\frac{1}{a} + \frac{\partial \Phi_s}{\partial s} \right) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2m \frac{c}{a} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{2K_s}{b} u \quad (3)$$

Using the equations for radial and circumferential equilibrium a sixth order wave equation is constructed. The solution is three pairs of roots or wavenumbers k_m at each frequency. The solution selected here is a harmonic solution for a wave travelling in the positive s direction with m transverse half wavelengths. Each wave has a radial and circumferential component of the form $w_m \exp(-ik_m s), u_m \exp(-ik_m s)$.

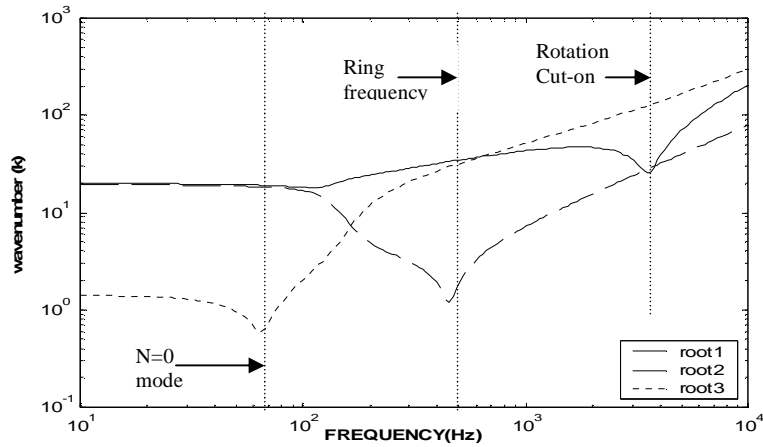


Figure 2: Wavenumber Modulus against frequency

These waves can then be added to satisfy the chosen boundary conditions at the excitation zone. These boundary conditions can be displacements, rotations, forces or moments. Figure 3 shows the input mobility for line force, and the transfer mobility at opposite side of the circumference.

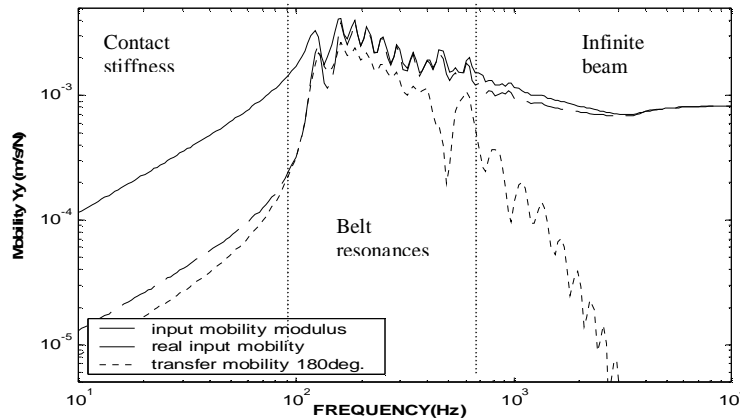


Figure 3: Input and Transfer Mobility for radial line excitation

It can be seen that the tyre behaves as a spring at the frequencies below 100Hz. Between 100Hz and 500Hz belt resonances are observed, while at higher frequencies there is no resonant behaviour and the belt behaves as if of infinite extent. The tangential response for a line force on the surface is given in Figure 4. The belt translation modes $n=0$, $n=1$ are seen at 60Hz and 100Hz. The next significant mode is around 3kHz and is the cut on of the belt rotation waves, seen also in Figure 2.

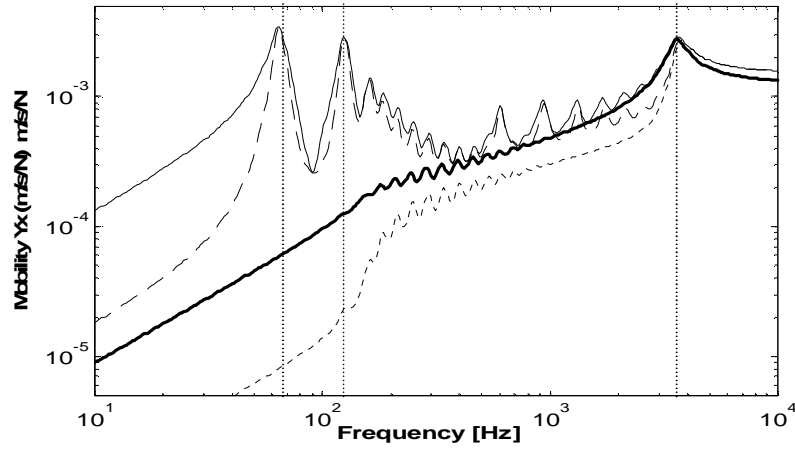


Figure 4. Input Mobility for tangential line excitation --- and line moment — real parts - - - -

The sidewall shown schematically in Figure 5 was analysed in the same way as the belt[2], with the same equation of motion but with different geometric material properties and boundary conditions.

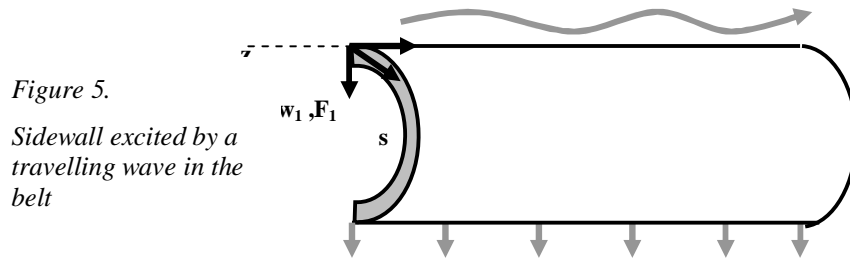


Figure 5.
Sidewall excited by a travelling wave in the belt

The sidewall is excited by a travelling wave in the belt, seen on the top edge. The displacement of the belt w_1 causes an input force F_1 and transmitted force F_2 . The input stiffness F_1/w_1 , and transfer stiffness F_2/w_1 are shown below in Figure 6. The sidewall behaves as a simple stiffness until about 200Hz. The sidewall tension N_z in equation 2, is the dominant stiffness mechanism.

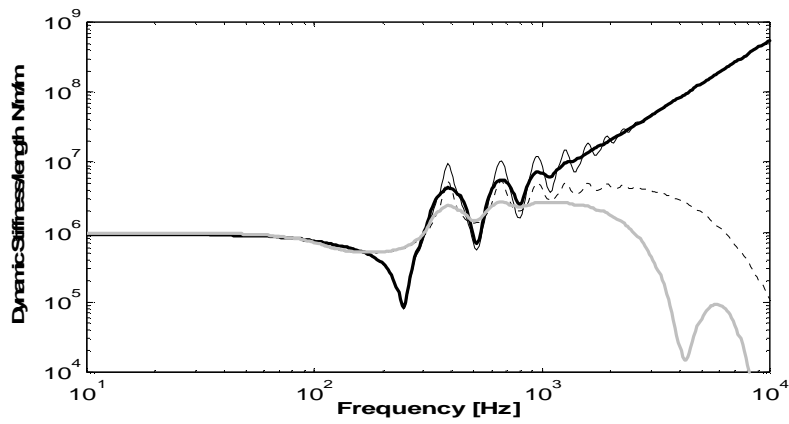


Figure 6. The input stiffness F_1/w_1 — , and transfer stiffness F_2/w_1 - - -

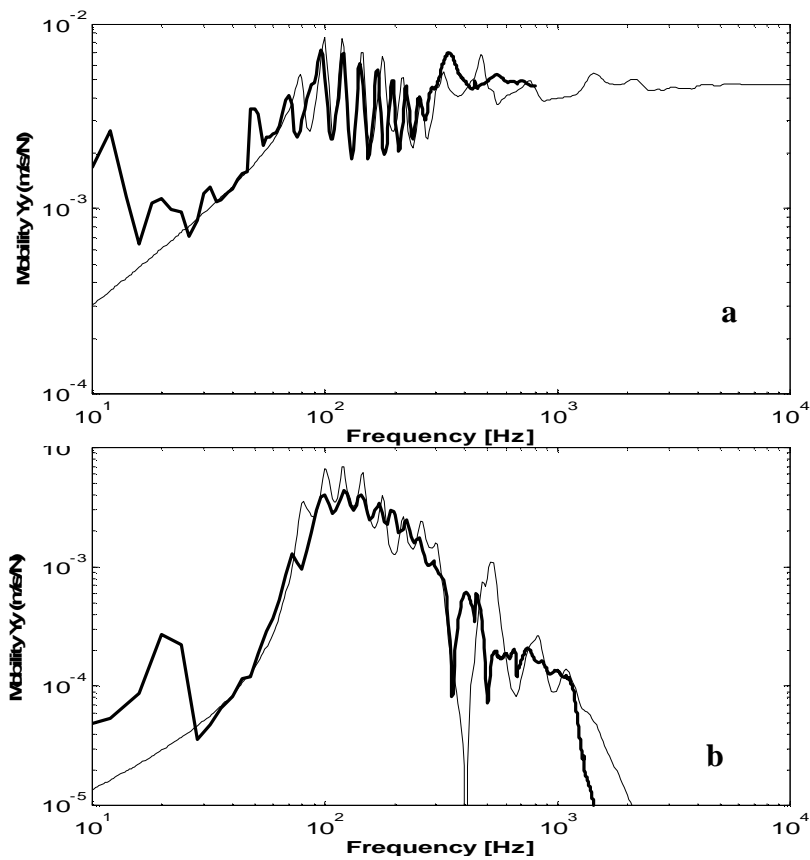


Figure 7a,b. — Measured — and predicted mobility: a. Point, b. Transfer at 180°

Some experimental tests were made on a tyre with a fixed hub, to check the theoretical tyre model. The first test shown in Figure 7 gives the measured and predicted point mobility.

The second test gives the transfer mobility to the opposite side of the circumference. Inspection of the curves show that the model is satisfactory.

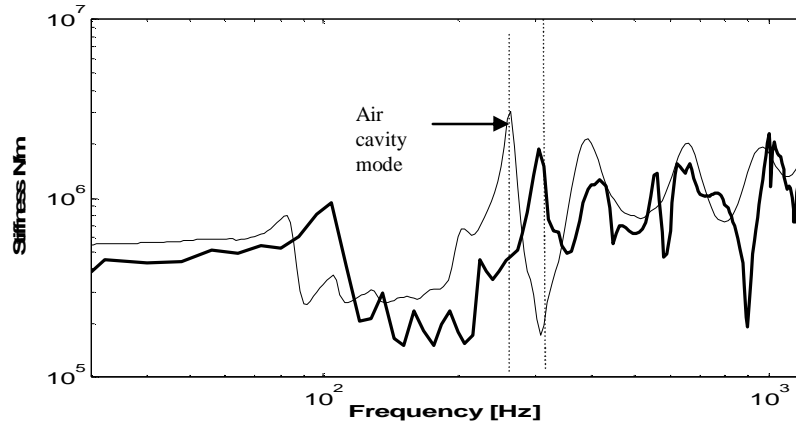


Figure 8 Predicted and measured transfer stiffness from the belt to the hub from a 10cm long contact on the belt

The measured and predicted force transmitted to the hub is also shown in Figure 8. There is a 20Hz shift, but otherwise the agreement is quite good. The transmitted force is responsible for the interior vehicle sound. A noticeable feature of which is the air cavity resonance seen around 250Hz. Apart from this cavity mode the sidewall transmits most of the force..

3. Sound Radiation models: horn effect

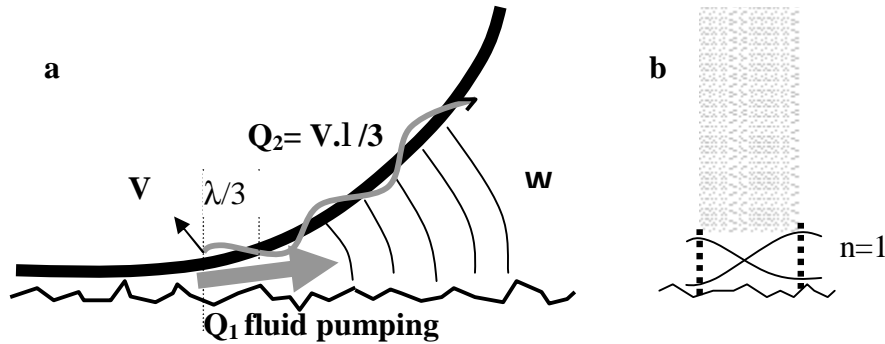


Figure 9. Schematic side view (a) and front view (b) of tyre belt and road

Figure 9 shows a schematic side view of a tyre belt and road surface, including the two sources of acoustic volume velocity. The first source is the vibration waves of the belt emerging from the contact patch. Generally these waves are ‘acoustically slow’ and are not expected to radiate well. However there is a phenomena called the ‘horn effect’ as the tyre and road form a side-less horn, that radiates the volume velocities with increasing efficiency towards the tyre road junction, enabling the good sound radiation of the vibration waves. There is a second mechanism, ‘air

pumping 'involving the expulsion of air into the horn by the closing surfaces, from which it is subsequently radiated.

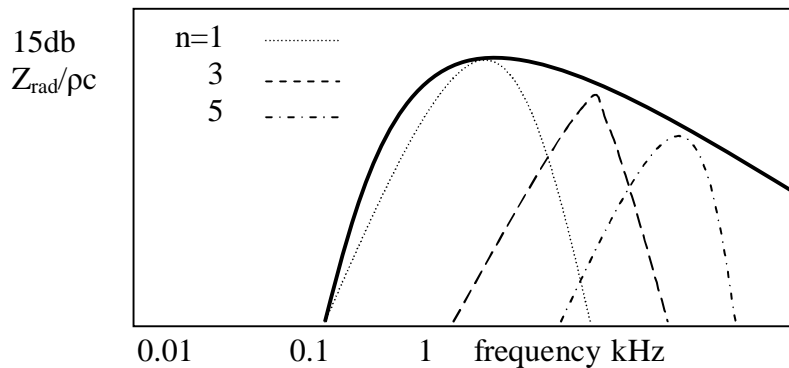


Figure 10. Radiation impedance of the horn effect

Figure 10 shows the added amplification due to the horn compared to a plane surface. This is about 20-15db and peaks at about 1kHz when the $n=1$ acoustic wave cuts on across the belt width, as shown in Figure 9b. There are further contributions from higher order modes as seen in Figure 10. This radiation been successfully modelled by boundary element methods and ray tracing methods. The results were very sensitive to the roughness depth of the road surface, and reflects the true physical situation.

4. Road Contact model

The tyre vibrations are caused by the movement of the static vehicle load over the road profile, rather like a needle of a gramophone moving over a record. The profile therefore requires an adequate description for all the interaction mechanisms while keeping simplicity. One scheme is shown in Figure 11, where the profile has four levels.

The first level or 'mean road surface' is a flat line passing through the tips of the surface. This is the datum of zero line when the tyre just touches the road. Increased penetration causes the loading on the tyre. The tyre deforms on this first flat surface to give the static load pressure profile. This deformation is the main cause of hysteretic rolling loss. The second level is the envelope of the peaks, which will be responsible for the low frequency vibration and interior vehicle noise below 500Hz. The third level is the spacing and shape of the individual stones which causes the exterior rolling noise between 500Hz-3kHz. The fourth level is the micro texture less than 1mm, this is responsible for the friction, which apart from providing traction is the main influence in stick-slip noise.

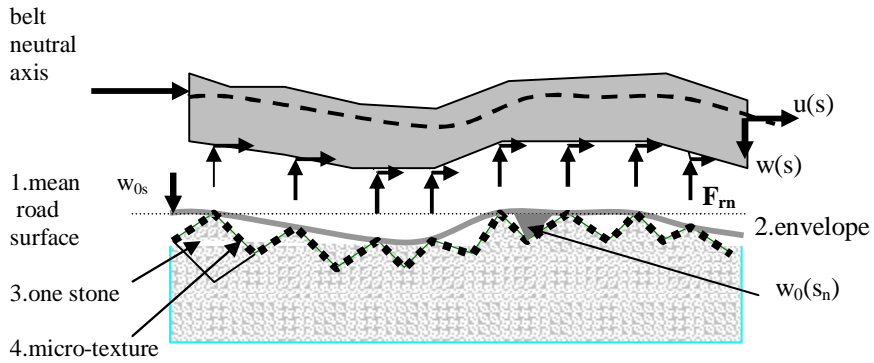


Figure 11. Four level representation of the road surface

4.1. Force distributions on the tyre

The actual force applied to the tyre can be seen in Figure 12. First there is the overall pressure profile which is a function of the static load, the contact stiffness and the tyre properties. The contact stiffness is a function of the rubber stiffness and the stone spacing and sharpness. A smooth road has a high contact stiffness 10^9 N/m^2 in the figure. A rough road gives lower contact stiffness, as seen in the curves. The actual force applied to the tyre is divided between the contact points, indicated by the arrows, and this fluctuation from the roughness causes the vibration and noise.

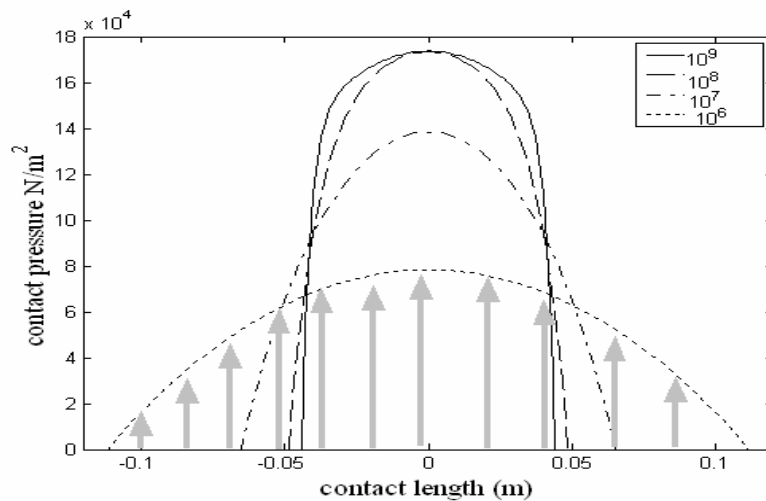


Figure 12. Pressure envelopes in contact zone, for varying contact stiffness in N/m^2 . Lower curve: actual distribution due to point loads from the stones.

5. Rolling Noise

The problem of tyre vibration and sound radiation can now be solved by combining the tyre transfer functions, with the force functions and the radiation model. This can be done in two basic ways, in the time-space domain or in the frequency-wavenumber domain. It is much more efficient in the frequency domain

but the present computers can manage the time-space calculations adequately, and this what is done at present [3].

A schematic version of the radiated sound predicted and measured is given in Figure 13. Between about 100Hz and 1kHz the present rolling model is giving adequate results. A rough road with a large stone spacing gives a higher output at low frequencies than a smooth road. The position is reversed for frequencies above 1kHz with a larger response from smooth roads. This is expected as the smooth road has smaller stones giving higher frequencies. However there is also a difference between the prediction and measurement at high frequencies that suggests that the current rolling model does not include all of the sound producing mechanisms. Two other possible mechanisms are air pumping and slip-stick noise.

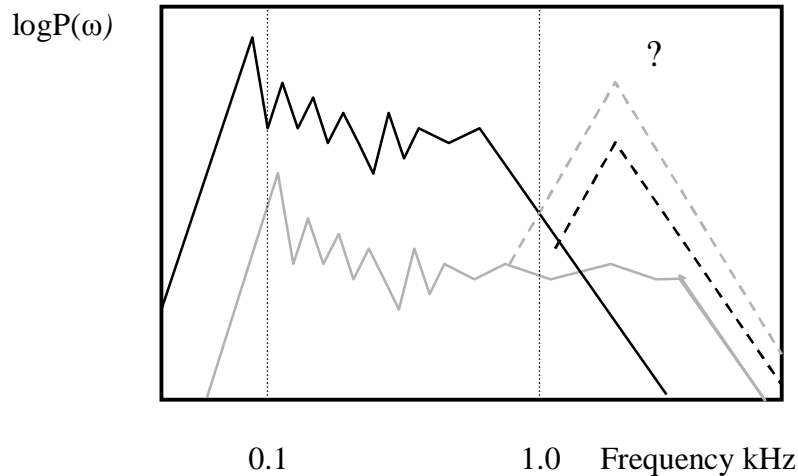


Figure 13. Sound radiation for: a smooth road — a rough road — High frequency measurement - -

It has been suggested that air-pumping noise is everything that cannot be explained at present. However a possible mechanism is shown in Figure 14. The figure shows the tyre closing or opening on a rough surface. As the tyre closes on the surface the applied pressure, shown above, increases suddenly. The pressure is distributed between the contact points and the trapped fluid. The pressure gradient forces the fluid out of the gap with a velocity that is inversely proportional to the depth of the fluid layer. This is not a smooth process and has rapid time variations due to the entrapment and sudden release of air. This is controlled by the surface shape, rubber elasticity and the interface friction.

It is postulated that the sound generation mechanism is the same as for a hand clap. The release rate of air pulses will be related to the stone spacing giving a strong spectrum around 1-2kHz where the horn effect is also at its largest. The mechanism is heard as a hiss as the car passes.

6. Air-pumping

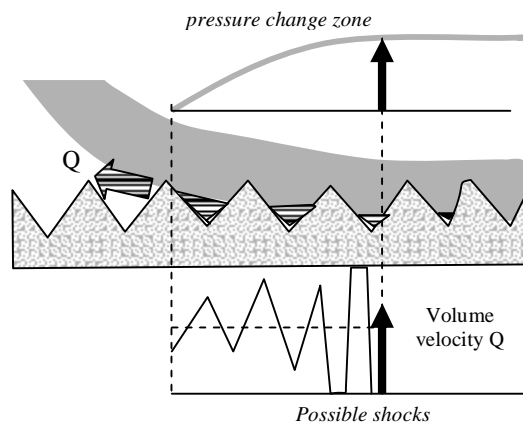


Figure 14. Possible mechanism for air-pumping noise

7. Tyre squeal

Tyre squeal is a self-excited vibration generated by stick –slip action. The stick slip action requires a single degree of freedom system sliding on a surface with friction that decreases with slip speed. The road-tyre interface has such a characteristic at high slip speeds and smooth surfaces. The observed frequency is around 2-3kHz making the rotational wave cut-on, seen in Figure 4, as a likely candidate.

8. Conclusions

A personal view has been given of the state of the art in road/tyre noise. Successful tyre models and sound radiation models are now available. Predictions can be made below 1kHz for tyre rolling noise, but above this frequency the sound producing mechanisms are not yet fully understood. The modelling of the road surface, friction and of the air pumping mechanism are therefore a current subject for research.

References

1. R.J.Pinnington. A wave model for a circular tyre (i) Belt modelling. Accepted by the *Journal of Sound and Vibration*.
2. R.J.Pinnington. A wave model for a circular tyre (ii) sidewall and force transmission modelling. Accepted by the *Journal of Sound and Vibration*.
3. K.Larsson, W. Kropp. A high frequency tyre model based on two coupled elastic layers. *Journal of Sound and Vibration*, 253,(4) 889-908, (2001).

Acknowledgement

The support of the EC fifth and sixth frameworks is acknowledged. I also wish to thank my team members on the RATIN and ITARI projects for their help and encouragement.

Μερικές παρατηρήσεις για την σχέση αντήχησης-ευκρίνειας. Εφαρμογή σε χώρους αυξημένης αντήχησης

Διονύσιος Ευθυμιάτος
Καθηγητής Ε.Μ.Π., Δημοκρίτου 4,
152 36 Πεντέλη
defthymi@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριος στόχος της εργασίας αυτής είναι η βελτίωση της καταληπτότητας ομιλίας σε χώρους αυξημένης αντήχησης ($T_{Sabine} > 2s$ στις ζώνες με κεντρικές συχνότητες από 125 - 4000Hz), με την διερεύνηση του βαθμού επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στην ευκρίνεια. Αυτή είναι κρίσιμη όταν είναι πρακτικά αδύνατη η δραστική μείωση της αντήχησης. Διερευνάται η επίδραση της εντοπισμένης ηχοαπορρόφησης, του είδους της πηγής και της απόστασης πηγής-ακροατή. Εξετάζονται η έννοια της αντήχησης, ο βαθμός εξάρτησης των κριτηρίων D_{50} και RASTI από τις παραπάνω συνθήκες και παραμέτρους καθώς και άλλες επιπτώσεις της αυξημένης αντήχησης. Ακολουθεί συνοπτική διερεύνηση της αξιοπιστίας των κριτηρίων αυτών. Η εργασία στηρίζεται σε πρόσφατα άρθρα, σε ομοιώματα H Y. και σε μετρήσεις πραγματικών αιθουσών. Αναφέρονται ορισμένες πρακτικές εφαρμογές των συμπερασμάτων.

ABSTRACT

Objective of this presentation is the improvement of speech intelligibility in rooms with increased reverberation ($T_{Sabine} > 2s$ in the octave bands with central frequencies 125-4000Hz) analyzing the degree of influence of various factors to the definition. This is critical, if it is practically difficult to reduce drastically the reverberation. It is analysed the influence of the localised absorption, the kind of the source and the distance source-listener. There are examined the concept of the reverberation, the dependence of D_{50} and RASTI upon the above parameters, as well as other effects of the increased reverberation. It follows a short analysis of the credibility of the above criteria. This work is based on recent papers, computer models and existing rooms' measurements. Some practical applications are mentioned

1. Εισαγωγή

Επί πολλά χρόνια γίνονται προσπάθειες διερεύνησης του φαινομένου της καταληπτότητας της ομιλίας σε κλειστούς χώρους. Οι προσπάθειες αυτές έγιναν σε δύο κατευθύνσεις: Η μία ακολούθησε την οδό της εξεύρεσης καταλλήλων τεστ, με στόχο την πειραματική διαπίστωση των συνθηκών αντίληψης της ομιλίας [1-3]. Η άλλη είχε ως στόχο τον ορισμό δεικτών που θα μπορούσαν να υπολογισθούν και να μετρηθούν και χρησιμοποίησε την πρώτη για πειραματική επαλήθευση. Κύριες παράμετροι από τις οποίες θεωρήθηκε ότι εξαρτάται η καταληπτότητα, είναι η αντήχηση και ο θόρυβος. Παρ' όλη την καθιέρωση των παραπάνω δεικτών και παραμέτρων (π.χ. [4]), διάφορα προβλήματα εξακολουθούν να υπάρχουν. Αυτά, π.χ., αφορούν την παράμετρο «αντήχησης», που θα ληφθεί υπ' όψη, την αξιοπιστία των δεικτών αυτών, την σημασία άλλων παραγόντων, τους οποίους οι δείκτες δεν αξιολογούν, το σχετικό βάρος κάθε ενός παράγοντα κ.λ.π. Επί πλέον, σε χώρους

μικρής δυνατότητας ρύθμισης της αντήχησης, είναι σημαντική η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος αίθουσας-πηγής-ακροατή για την μέγιστη καταληπτότητα.

Στην εργασία αυτή, εξετάζεται η «ευκρίνεια», με την γενικότερη (και όχι την στενή του δείκτη D_{50}) έννοιά της. Γίνεται μία συνοπτική αλλά και κριτική παράθεση των προτάσεων (που δεν είναι πάντοτε συμβατές μεταξύ τους) αλλά και των επιφυλάξεων για την χρήση διαφόρων κριτηρίων, όπως των τιμών του χρόνου αντήχησης, του D_{50} και του STI. Ιδιαίτερα όσον αφορά την αντήχηση, διατυπώνεται μία πρόταση για τις παραμέτρους της, που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη. Δίνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων σε ένα απλό χώρο, καθώς και τα αποτελέσματα υπολογισμών με H.Y. με διάφορους συνδυασμούς θέσεων και είδους πηγών και θέσεων ακροατών. Διατυπώνονται προτάσεις και αναφέρονται εφαρμογές σε συγκεκριμένες αίθουσες.

2. Αντήχηση και καταληπτότητα

Μετά τον Sabine [5], άλλοι ακουστικοί [6,7] πρότειναν τύπους υπολογισμού του χρόνου αντήχησης. Η εισαγωγή του μεγέθους του πρώιμου χρόνου αντήχησης-EDT δημιούργησε διχογνωμίες ως προς την μέθοδο υπολογισμού του [8,9], ιδιαίτερα από τα αποτελέσματα μετρήσεων. Αν και συνήθως λαμβάνεται ως κριτήριο μέτρησής του η μείωση στάθμης κατά 10dB, έχουν προταθεί και οι τιμές των 5, 15 ή και 20 dB. Παράλληλα, διατυπώθηκε η πρόταση να λαμβάνεται υπόψη για την μέτρησή του μάλλον η μείωση στάθμης σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα παρά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για συγκεκριμένη μείωση της στάθμης. Ως τέτοιο διάστημα, προτάθηκαν αρχικά τα 160ms.

Συνδέοντας τον χρόνο με την αίσθηση της αντήχησης, διαπιστώθηκε, σύμφωνα με μία έρευνα, συσχέτιση μεταξύ αυτής και του EDT που μετρείται στα 160ms [10]. Αφετέρου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ίδιας έρευνας, αν εξετασθεί η συσχέτιση του λόγου της πρώιμης προς την καθυστερημένη ηχητική ενέργεια στην αίσθηση της αντήχησης, ο βέλτιστος συντελεστής συσχέτισης αντιστοιχεί σε όριο για την πρώτη τα 40ms και για την δεύτερη τα 160ms. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε αίθουσες συναυλιών με χρόνο αντήχησης τουλάχιστον 1,7s. Σε παλαιότερη έρευνα είχε εξετασθεί η επίδραση του λόγου U_{t_0} του ωφέλιμου προς τον επιβλαβή ήχο, όπου ως ωφέλιμος λαμβάνεται το συνδυασμένο αποτέλεσμα του απ' ευθείας ήχου και πρώτων ανακλάσεων ενώ ως επιβλαβής το συνδυασμένο αποτέλεσμα του θορύβου και καθυστερημένων ανακλάσεων. Ο δείκτης t_0 αντιστοιχεί στο χρόνο διαχωρισμού πρώτων και καθυστερημένων ανακλάσεων. Οι έρευνες που έγιναν σε ορισμένους τύπους μικρών αιθουσών [11], έδειξαν μεγάλη εξάρτηση της καταληπτότητας ομιλίας από το U_{50} .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται ότι κατάλληλη παράμετρος αντήχησης για την εκτίμηση της καταληπτότητας είναι ο EDT, ο οποίος εξαρτάται και από τις σχετικές θέσεις πηγής-ακροατή αλλά και από την κατευθυντικότητα της πηγής. Σε αίθουσες με μεγάλο χρόνο αντήχησης, στις οποίες, μάλιστα, λόγω της απουσίας ηχοαπορροφητικών επιφανειών υπάρχουν έντονες ανακλάσεις, είναι ασφαλέστερη η εκτίμηση του EDT_{10} ή και του EDT (160ms).

Σε χώρο συνεδρίων περίπου 2400 m^3 της Ακαδημίας Αθηνών, που μελετήθηκε, σε απόσταση 4m περίπου εμπρός από την πηγή, στην ζώνη οκτάβας των 1000Hz, βρέθηκαν, πριν από τις παρεμβάσεις, τα εξής αποτελέσματα:

Με μη κατευθυντική πηγή: $EDT_{10}= 3,0\text{s}$ - $EDT_{20}=2,9\text{s}$ - $EDT(160\text{ms})= 3,15\text{s}$

Με κατευθυντική πηγή: $EDT_{10}= 2,3\text{s}$ - $EDT_{20}=2,1\text{s}$ - $EDT(160\text{ms})= 2,15\text{s}$

Η ύπαρξη ειδικών συνθηκών, δίνει τέτοιες ανωμαλίες στην καμπύλη στάθμης/χρόνου, που τα αποτελέσματα, με την μέθοδο διαφοράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για χονδροειδή εκτίμηση. Παρ' όλα αυτά, όταν υπάρχουν αυτές οι τιμές, ο χρόνος μέτρησης του EDT_{10} είναι 400-500ms, δηλαδή πολύ μεγαλύτερος των 160 ms. Αφετέρου, συχνά, παρεμβαίνουν στην καμπύλη στάθμης/χρόνου και άλλα φαινόμενα, όπως ηχώ, συνεζευγμένοι χώροι κλπ.

Σε πολλές περιπτώσεις αιθουσών για ομιλία, δίνεται έμφαση στην μείωση και όχι στην βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης, για επίτευξη υψηλής τιμής δείκτη STI και μέγιστης καταληπτότητας. Για τον λόγο αυτό, μεγάλες επιφάνειες επικαλύπτονται με ηχοαπορροφητικές επενδύσεις, με αποτέλεσμα την μείωση των πρώτων ανακλάσεων. Σε πειράματα, που έγιναν[12], διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση στην καταληπτότητα πρώτων ανακλάσεων, που φθάνουν με καθυστέρηση 50 ms σε σχέση με τον απ' ευθείας ήχο. Είναι αυτονόητο ότι η επίδραση αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη όταν το απ' ευθείας πεδίο είναι ασθενές.

Οι ανακλάσεις αλλά και η αντήχηση μπορεί να συμβάλουν σημαντικά στην μετάδοση αλλά και την ενίσχυση του θορύβου. Συνήθως, ο θόρυβος εξετάζεται ως ανεξάρτητη παράμετρος, ακόμη και στους χώρους υψηλής αντήχησης[13]. Η σύζευξη αντήχησης (ή ακόμη και μεμονωμένων ανακλάσεων) με τον θόρυβο και την καταληπτότητα, ως ενιαίο σύνολο, θα επέτρεπε την ακριβέστερη πρόγνωση, ιδιαίτερα σε κρίσιμες καταστάσεις. Επίσης, θα πρέπει να εξετάζεται η επίδραση στην καταληπτότητα του θορύβου με πληροφορία, ώστε αυτή να ελαχιστοποιείται. Στην εργασία αυτή αναφέρονται σχετικά μέτρα, που έχουν ληφθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

3. Ο δείκτης ευκρίνειας D_{50}

Ο Δείκτης Ευκρίνειας (Definition Coefficient - D) εκφράζει την ενέργεια που φθάνει σε ένα σημείο του χώρου από τις πρώτες ανακλάσεις. Ορίζεται ως η αναλογία σε ένα σημείο της ηχητικής ενέργειας κατά την διάρκεια των πρώτων t_1 (ms) προς τη συνολική ενέργεια. Συνήθως, λαμβάνεται $t_1 = 50$ ms (D_{50}). Ο δείκτης αυτός, όπως υπολογίζεται, λαμβάνει υπόψη του τις ειδικές συνθήκες και ιδιότητες των επιφανειών ανάκλασης.

Ο δείκτης αυτός είναι άμεσα συνδεδεμένος με το δείκτη U_{50} (που περιλαμβάνει και το θόρυβο), μολονότι ο τελευταίος στον παρονομαστή περιλαμβάνει την καθυστερημένη ενέργεια, όπως ο δείκτης διαύγειας C_{12} , όπου ως t_2 λαμβάνονται συνήθως τα 80 ms. Επίσης, σύμφωνα με τα παραπάνω, το όριο των 50 ms συμφωνεί με την αίσθηση της αντήχησης και την καταληπτότητα, όμως δεν αντιστοιχεί στο EDT_{10} κυρίως σε χώρους μεγάλης αντήχησης με μη ομαλή καμπύλη στάθμης/χρόνου. Επομένως, είναι αυτονόητο ότι μία απλή γεωμετρική εξέταση του αντιστοίχου χώρου είναι εντελώς ανεπαρκής. Επί πλέον, άλλες έρευνες απέδειξαν [14] ότι ακόμη και η κατανομή των πρώτων ανακλάσεων μέσα στο διάστημα των 50 ms επηρεάζει την καταληπτότητα. Τέλος, δεν λαμβάνεται υπόψη ο θόρυβος. Επομένως και η χρήση του D_{50} είναι ανεπαρκής.

Στην παραπάνω αίθουσα, στην ζώνη οκτάβας των 1000Hz, με την παρατήρηση ότι τα αποτελέσματα είναι απλώς ενδεικτικά, μετρήθηκαν πριν από τις παρεμβάσεις, τιμές του D_{50} με μη κατευθυντική πηγή 12 και με κατευθυντική πηγή 28.

4. Ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI

Ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο την φασματική κατανομή ενέργειας της ομιλίας όσο και την διαμόρφωση συχνότητας της φωνής. Η εκτίμησή του απαιτεί

τον υπολογισμό 98 τιμών της συνάρτησης μεταφοράς της διαμόρφωσης, δηλαδή ενός πίνακα τιμών του δείκτη m , που είναι συνάρτηση των 7 κεντρικών συχνοτήτων ζωνών οκτάβας (125-8000Hz) και των 14 συχνοτήτων διαμόρφωσης (0,63-12,5 Hz). Το γεγονός αυτό δημιουργεί, πολλές φορές, αδυναμία υπολογισμών στο επίπεδο μελέτης. Για την μείωση του αριθμού των τιμών και επομένως, απλούστευση των υπολογισμών, περιορίζονται αυτές σε ένα μικρότερο αριθμό χαρακτηριστικών συχνοτήτων (Rapid Speech Transmission Index- RASTI)

Ο δείκτης αυτός θεωρήθηκε ως ένα στιβαρό μέσο εκτίμησης της καταληπτότητας, γεγονός που υποστηρίχθηκε σε σειρά δημοσιεύσεων [15-17]. Όμως, πέραν της δυσχέρειας του υπολογισμού του, η χρήση του παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα. Π.χ. δεν λαμβάνει υπόψη την καμπύλη κατανομής της καταληπτότητας στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων, λαμβάνει την ίδια τιμή για θετικές και αρνητικές τιμές καθυστέρησης, θεωρήθηκε ότι υπο-εκτιμά την επίδραση της αντήχησης, ότι το φάσμα συχνοτήτων διαμόρφωσης πρέπει να διευρυνθεί [3]. Το STI μετρά μόνο την συγκέντρωση ή διασπορά ενέργειας στο πεδίο του χρόνου. Επομένως, οποιαδήποτε τέτοια συγκέντρωση, ανεξάρτητα από την διαφορά φάσης, αυξάνει την τιμή του. Αφετέρου διάφορα πειράματα [18,19] αμφισβήτησαν την αξιοπιστία του.

Στην παραπάνω αίθουσα, στην ζώνη οκτάβας των 1000Hz, με την παρατήρηση ότι τα αποτελέσματα είναι απλώς ενδεικτικά, μετρήθηκαν, πριν από τις παρεμβάσεις, τιμές του STI, με μη κατευθυντική πηγή 8 (σύνολο 36) και με κατευθυντική πηγή 12 (σύνολο 48).

5. Διερεύνηση με ομοίωμα σε Η.Υ.

Η αίθουσα έχει χαρακτηριστικά επικαλύψεων όμοια με της παραπάνω, αλλά είναι απλό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διπλάσιο όγκο (4800m^3), προκειμένου οι αποστάσεις να είναι μεγαλύτερες. Η οροφή είναι γυάλινη, το δάπεδο με λεπτή μοκέτα και καθίσματα. Οι πλάγιοι τοίχοι είναι ανακλαστικοί με ελάχιστο συντελεστή διάχυσης 0,3, προκειμένου να έχουν νόημα οι υπολογισμοί [20]. Ο χρόνος αντήχησης κατά Sabine στις ζώνες 250-2000 Hz περίπου 4s. Ως πηγές θεωρήθηκαν αφενός ομιλητής αφετέρου κατευθυντική πηγή. Εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί αποστάσεων ακροατών- πηγών καθώς και η επίδραση του είδους της επιφάνειας πίσω από αυτά. Ως πρόγραμμα υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το CATT

Ανεξάρτητα από τις θέσεις πηγών/ακροατών, ο χρόνος αντήχησης T_{30} είναι πρακτικά ίσος με τον υπολογιζόμενο κατά Sabine. Όσον αφορά τον EDT_{10} παρατηρούνται μεταβολές, όπως: 1) Σε απομακρυσμένο σημείο και όχι απέναντι από την πηγή, αυτός είναι αυξημένος κατά 20% περίπου ως προς τον κατά Sabine, με αμελητέες μεταβολές ως προς το είδος της επιφάνειας που το περιβάλλει και το είδος της πηγής. Στο σημείο αυτό η συνολική στάθμη μειώνεται σημαντικά όταν οι περιβάλλουσες επιφάνειες είναι απορροφητικές 2) Σε απόσταση 2m απέναντι από την πηγή, στην περίπτωση ηχοαπορροφητικής επιφάνειας πίσω από την πηγή (και επομένως όχι μακριά από το σημείο μέτρησης), ο EDT_{10} είναι μειωμένος κατά 25% (ομιλητής) ή κατά 50% (κατευθυντική πηγή) περίπου ως προς τον υπολογιζόμενο κατά Sabine. Οι τιμές αυτές αυξάνουν στην περίπτωση ανακλαστικής επιφάνειας. 3) Σε απόσταση 14m απέναντι από την πηγή, είναι αυξημένος κατά 10% περίπου ως προς τον κατά Sabine, με μικρές μεταβολές ως προς το είδος της επιφάνειας που το περιβάλλει και το είδος της πηγής.

Όσον αφορά τους D_{50} και RASTI, 1) Σε απομακρυσμένο σημείο και όχι απέναντι από την πηγή είναι εξαιρετικά χαμηλά ($D_{50}=8-20$), χωρίς να παίζει ρόλο το

είδος της επιφάνειας που το περιβάλλει, κυρίως όταν η πηγή είναι κατευθυντική. Οι μεταβολές, στα πλαίσια αυτά, εξαρτώνται από την θέση του σημείου ως προς την πηγή και το είδος αυτής, ενώ οι αντίστοιχες μεταβολές RASTI είναι πολύ μικρότερες (24-31). 2) Σε απόσταση 2m απέναντι από την πηγή, οι τιμές είναι κάπως μεγαλύτερες στην περίπτωση κατευθυντικής πηγής ($D_{50}=78/88$ - RASTI=65/74). 3) Σε απόσταση 14m απέναντι από την πηγή, οι παραπάνω είναι πιο έντονες

6. Συμπεράσματα-πρακτικές εφαρμογές

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των κριτηρίων, που συνήθως χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της καταληπτότητας, αποτελούν ένα οδηγό, αλλά δεν πρέπει να θεωρούνται ως απόλυτα αξιόπιστα. Όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες, γενικά οι δείκτες μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση, αλλά όχι ομοιόμορφα. Σημαντικός παράγοντας τόσο για την αίσθηση αντήχησης όσο και για την καταληπτότητα είναι η απόσταση πηγής ακροατή. Στους χώρους μεγάλης αντήχησης, η αύξηση της στάθμης έχει δυσμενείς επιπτώσεις. Η χρήση κατευθυντικών πηγών αυξάνει την καταληπτότητα σε ορισμένες περιοχές, αλλά προκαλεί προβλήματα σε άλλες, κυρίως όταν επιλέγονται τα χαρακτηριστικά τους τέτοια, που να μην απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός (όταν μάλιστα το είδος της αίθουσας το επιβάλλει), καθώς και μικροφωνισμούς. Η ιδανική λύση φαίνεται να είναι πυκνό δίκτυο πηγών (πυκνότερο από αυτό που συνήθως χρησιμοποιείται σε χώρους μεγάλης αντήχησης, όπως είναι οι καθεδρικοί ναοί), που εκπέμπουν σε χαμηλή στάθμη.

Οι αρχές αυτές εφαρμόστηκαν σε διάφορες περιπτώσεις ειδικών αιθουσών και συγκεκριμένα: 1) Στην αίθουσα συνεδριάσεων της Βουλής, με $T_{30,1000\text{Hz}}=1,8\text{s}$ με επιλογή απόστασης πηγής-ακροατή (στις θέσεις Βουλευτών περίπου 0,6m) και απώλεια συμφώνων περίπου 3%. 2) Στην αίθουσα συνεδριάσεων της Ακαδημίας Αθηνών, με $T_{30,1000\text{Hz}}=2,1\text{s}$, με κατάλληλη τοποθέτηση ηχείων, στις θέσεις των Ακαδημαϊκών, $EDT_{10}=1,8\text{s}$, $D_{50,\mu}=60$, RASTI=58-66. 3) Στην αίθουσα συνεδρίων της Ακαδημίας Αθηνών, με $T_{30,1000\text{Hz}}=2,9\text{s}$, RASTI=45-59 με επιβεβαίωση της αρχής της απόστασης. Μελετάται στην φάση αυτή πρακτική εφαρμογή, της οποίας τα αποτελέσματα σύντομα θα δημοσιευθούν, στην οποία υπάρχουν πολλοί ομιλητές, εκ των οποίων μόνο του ενός η πληροφορία είναι χρήσιμη και, επομένως, επιδιώκεται μικρή καταληπτότητα των άλλων.

Αναφορές

- [1] Plomb,R., Mimpfen,A. "Improving the reliability of testing the speech reception threshold for sentences" *Audiology* 1979, t18, p. 43-52
- [2] Versfeld,N.J., Daalder,J., Festen,J.M., Houtgast,T. "Method for the selection of sentence materials for efficient measurement of the speech reception threshold" *J.Acoust.Soc.Am.* 2000, t107, p. 1671-1684
- [3] van Wijngaarden,S.J., Houtgast,T. "Effect of talker and speaking style on the speech transmission index" *J.Acoust.Soc.Am.* 2004, t115, p. 38-41
- [4] IEC "Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index", 1998, IEC 60268-16, 2nd edition
- [5] Sabine, W.C., "Collected papers on acoustics", 1922, Harvard University Press, Cambridge, Mass, p. 3-68
- [6] Eyring,C.F, "Reverberation times in dead rooms", *J.Acoust.Soc.Am.*, 1929, t1, p. 217-241
- [7] Kuttruff, H "Room Acoustics" 1973, Applied Science Publ, London

- [8] Schroeder, M.R., "New method for measuring reverberation time", *J. Acoust. Soc. Am.* 1965, t37, p. 409-412
- [9] Griesinger, D., "Quantifying musical acoustics through audibility", 1993, 128th ASA conv., Denver
- [10] Kahle, E., Jullien, J.-P., "Some new considerations on the subjective impression of the reverberance and its correlation with objective criteria", 1994, W.C. Sabine centennial symposium, Cambridge, Mass., p.239-242
- [11] Brandley J.S., "Intelligibility Studies in Classrooms", 1986, *J. Ac. Soc. Am.*, t80, 3, p.846 – 854
- [12] Brandley J.S., Sato H., Picard M. "On the importance of early reflections for speech in rooms", 2003, *J. Ac. Soc. Am.*, t113, 6, p.3233-3244
- [13] Morimoto M., Kobayashi M., Hakamada A., Sato H "Effects of background noise on speech listening difficulty in reverberant sound fields", 2001, 142nd Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J. Ac. Soc. Am.*, t110,5
- [14] Fischetti A., Jouhaneau J. "The influence of first reflection distribution on the quality of concert halls", 1992, *Appl. Acoust.*, t35, p.233
- [15] Brandley J.S "Comparisons of measures of speech intelligibility in rooms", 1997, 133rd Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J. Ac. Soc. Am.*, t101,2
- [16] Houtgast T., Steeneken H. "Diagnostic assessment of speech intelligibility in auditoria with the STP", 1997, 133rd Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J.A.S.A.*, t101,2
- [17] Barnett P.W. "Review of speech intelligibility indicators: Their relationship and applications", 1997, 133rd Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J. Ac. Soc. Am.*, t101,2
- [18] Mapp P. "Limitations of speech intelligibility assessment methods", 1997, 133rd Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J. Ac. Soc. Am.*, t101,2
- [19] Sato H., Yoshino H. "Relationship between speech transmission index and easiness of speech perception in reverberatory fields" 1998, 135th Meeting, *Ac. Soc. Am.*, *J. Ac. Soc. Am.*, t103,5
- [20] Hodgson M. "Evidence of diffuse reflections in rooms", 1991, *J. Ac. Soc. Am.*, t89, 2, p. 765-771

“Image Receiver Model”: An efficient variation of the “Image Source Model” for the case of multiple sound sources and a single receiver

Christos Tsakostas, Electrical Engineer,
tsakostas@holistiks.com
HOLISTIKS
<http://www.holistiks.com>
Digeni Akrita 29, 12243, Athens, Greece
Tel.: +30 210 5317955, Fax: +30 210 5317956

ABSTRACT

“Image source method” (ISM) is an often used technique for the acoustic modelling of enclosed or open spaces. Although ISM is straightforward and simple to use, its main drawback is the exponential increase of the computational time in proportion to the reflections order. Additionally, computational time is further increased when acoustic modelling takes place for multiple sound sources. Consequently, the applicability of ISM becomes problematic when real-time acoustic modelling is considered.

The goal of the approach presented in this work is based on an effort to reduce the computational time of the method, in order to increase its efficiency for real-time applications. The applications which are considered here are focused on the case of multiple moving sound sources and a single receiver. The approach presented, emanates from a variation of ISM and it indicates the redundancy of applying the full ISM for each pair sound source – receiver separately.

«Μέθοδος Ειδώλων Δέκτη»: Μια αποδοτική παραλλαγή της «Μεθόδου Ειδώλων Πηγών» για την περίπτωση πολλαπλών πηγών ήχου και ενός δέκτη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η «Μέθοδος Ειδώλων Πηγών» (ΜΕΠ) είναι μία από τις συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τη ακουστική μοντελοποίηση κλειστών ή ανοιχτών χώρων. Αν και η ΜΕΠ είναι απλή στη χρήση, το μεγαλύτερο της μειονέκτημα είναι η εκθετική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου σε αναλογία με την τάξη των ανακλάσεων. Επιπρόσθετα, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται περαιτέρω όταν η ακουστική μοντελοποίηση λαμβάνει χώρα για πολλαπλές πηγές ήχου. Συνεπώς η εφαρμογή της ΜΕΠ γίνεται προβληματική για εφαρμογές ακουστικής μοντελοποίησης πραγματικού χρόνου.

Ο στόχος της εργασίας που παρουσιάζεται βασίζεται σε μία προσπάθεια μείωσης του υπολογιστικού χρόνου της μεθόδου, με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας του για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Οι εφαρμογές που λαμβάνονται υπόψη εδώ, είναι αυτές που επικεντρώνονται σε πολλές κινούμενες πηγές ήχου και ένα δέκτη. Η προσέγγιση που παρουσιάζεται πηγάζει από μία παραλλαγή της ΜΕΠ και επιδεικνύει τον πλεονασμό της πλήρους εφαρμογής της ΜΕΠ για κάθε ζεύγος πηγής-δέκτη ξεχωριστά.

1. Introduction

Sound Field Models (SFM) are the tools that facilitate the modelling of acoustics of enclosed or open spaces. This modelling is necessary mostly for the fields of acoustical consulting, education, training and entertainment. The desire for faster, or even better real-time, computation of the sound field models on modern PCs is the motivation of the work presented here.

For the discussion that follows only the case of multiple moving sound sources and one stationary receiver is considered, unless otherwise noticed. More specifically, we are interested in re-calculating the room impulse response for these cases that the sound sources change position.

2. Brief overview of Sound Field Models (SFM)

Mathematically the sound propagation is described by the wave equation, also known as Helmholtz equation. A room impulse response for a listener position can be obtained by solving the equation but it can seldom be performed in an analytic manner. Therefore, the solution must be approximated by one, or combination, of the four fundamental approaches for the computational modelling of a room (Fig. 1): (a) Digital Audio Signal Processing, (b) Ray based, (c) Wave based and (d) Statistical.

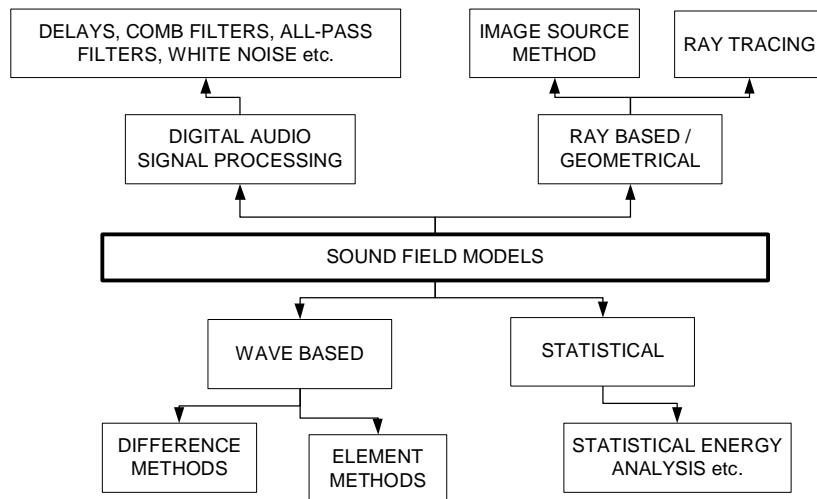


Figure 1: Sound Field Models

Digital audio signal processing techniques are suitable only for real-time applications, whereas the acoustics of a room are roughly approximated.

The ray-based methods are the most often used modelling techniques, because of their simplicity and accuracy.

Wave-based techniques are suitable mainly for simulation of low frequencies. Their limitation is that they cannot be used for real-time applications.

The statistical modelling methods are mainly applied to prediction of noise levels in coupled systems.

3. Image Source Method (ISM)

For the case of the ray-based image source method, image rooms with image sources are formed which in turn have further image rooms and image sources. The summation of all image sources with corresponding delays and attenuations provides the estimated impulse response.

The procedure of estimating a single reflection with the image source method is depicted at Fig. 2, for one sound source, one receiver and one surface. The algorithm is summarized in the following four steps:

Step 1: Estimate the image of the source.

Step 2: Draw a line by connecting the image source point with the receiver point.

Step 3: Find the intersection point between the line and the surface and connect it with the sound source position.

Step 4: Validate the reflection (i.e. confirm that the intersection point lies within the boundaries of the surface, visibility from the receiver, etc.).

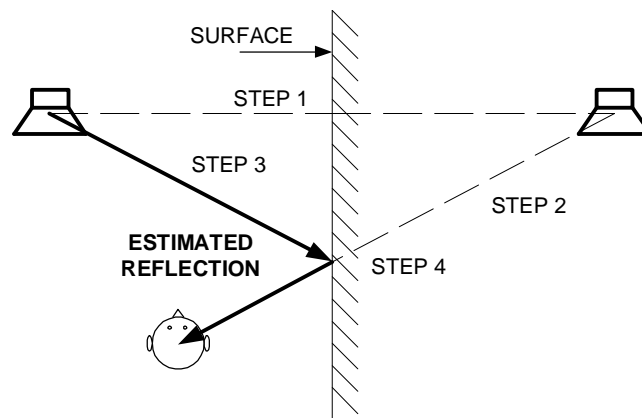


Figure 2: The basic four steps to calculate a reflection with the image source method.

It is important to notice that after a complete calculation of the reflection, if the listener changes position the new reflection can be calculated starting with step 2. It is redundant to re-calculate the image source point, with the prerequisite that it has been previously been stored (memory, hard disk, etc). On the other hand, if the sound source changes position then the new reflection must be recalculated starting with step 1.

In general, when multiple moving sound sources are present the above steps are performed consecutively for each pair of the sound source - receiver (Fig. 3).

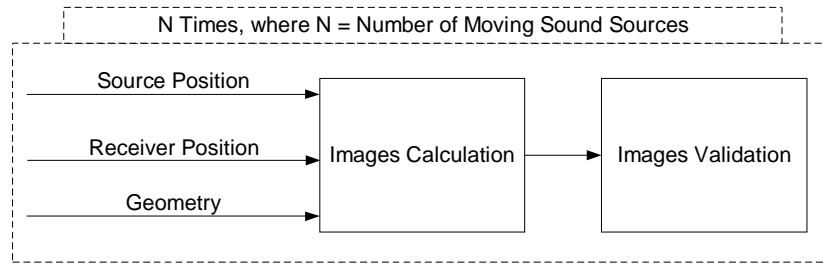


Figure 3: Images calculation and validation is performed consecutively for each pair of sound source - receiver.

4. Image Receiver Method (IRM)

Image receiver method proposed here, suggests working with the images of the receiver instead of the images of the sound source. From a mathematical point of view there is absolutely no difference at the geometrical results.

The procedure of estimating a single reflection with the image receiver method is depicted at Fig. 4. It is identical with the one described for the case of ISM, except that the image is calculated for the receiver instead of the source.

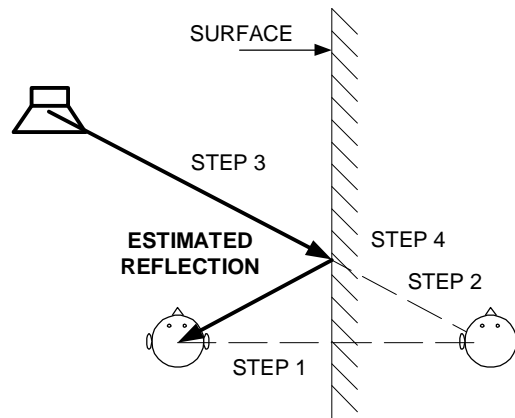
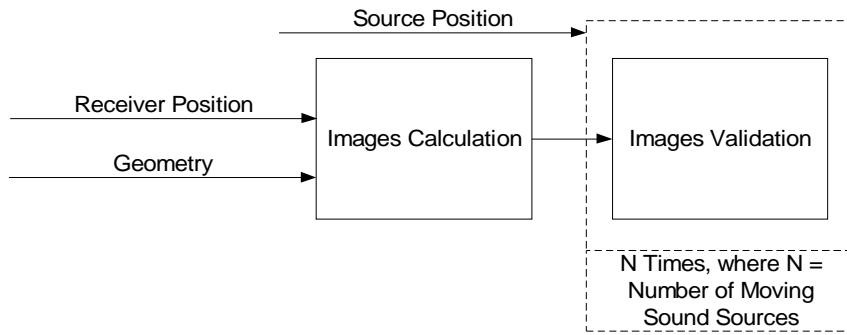


Figure 4: The basic four steps to calculate a reflection with the image receiver method.

Note that if the sound source moves then for the recalculation of the reflection step 1 can be omitted, in contrast to the ISM. Fig. 5 depicts the way that the calculations are affected, in comparison with the ones depicted in Fig. 3, when IRM is applied. The images are calculated only for the receiver, saving significant computational time as the number of sound sources increases.

In a similar way, if N sound sources exist in the auditory scene, for the $N-1$ of them the calculation process starts from step 2. Consequently, the saved time is $N-1$ times the image calculation time.



$$\text{Time_saved} = (N-1) * \text{Time_images_calculation}$$

Figure 5: Images calculation is performed once, whilst validation is performed consecutively for each pair of sound source - receiver.

5. Image Source Method vs. Image Receiver Method

So far the discussion was limited to the case of multiple moving sound sources and one stationary receiver. It has been shown that for this case, IRM saves computational time over ISM. The following table (Fig. 6) summarizes when each method should be used. It is worthy to mention that for the case that both the sound sources and the receiver move there is no difference in the computational time.

		RECEIVER	
		Moving	Stationary
S O U R C E S	Moving	ISM or IRM	IRM
	Stationary	ISM	IRM

Figure 6: ISM vs. IRM depending on the mobility of the sound sources and the receiver.

6. Synopsis

A new variation of the image source method is introduced, the so-called “Image Receiver Method”. IRM is capable of saving a significant amount of computational time for the case of multiple (moving or not) sound sources and a stationary receiver. When IRM is suitably combined with ISM optimal results can be obtained as far as the reduction of the computational time is concerned.

Σχεδιασμός υπαιθρίου θεάτρου σε αστικό κέντρο: Το Θέατρο Κήπου του Δήμου Θεσσαλονίκης

Νίκος Κ. Μπάρκας
δρ. πολιτικός μηχανικός Δ.Π.Θ.
duar ακουστικής Le Mans France,
επίκουρος καθηγητής, Τμήμα
Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
e-mail : nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Θέατρο Κήπου λειτουργεί από δεκαετίες στο κέντρο της Θεσσαλονίκης. Ο διαχρονικά εντεινόμενος κυκλοφοριακός θόρυβος οδήγησε στην ακουστική υποβάθμιση και τη σταδιακή συρρίκνωση των λειτουργιών του. Με την ευκαιρία της διοργάνωσης της Πολιτιστικής Πρωτεύουσας της Ευρώπης (1997), μελετήθηκε ο επανασχεδιασμός του Θεάτρου, με βάση τις προτάσεις του συγγραφέα, στο πλαίσιο ενός ευρύτερου πολεοδομικού – κυκλοφοριακού ανασχηματισμού στο ιστορικό κέντρο της πόλης, ο οποίος όμως δεν υλοποιήθηκε ποτέ.

Κατά τη διάρκεια της μελέτης και της κατασκευής του Θεάτρου Κήπου, το μέγεθος των προβλεπόμενων ακουστικών παρεμβάσεων περιορίστηκε εξαιτίας ποικίλων προβλημάτων και περικοπών του προϋπολογισμού. Η ανακοίνωση διαπραγματεύεται τις παραμέτρους σχεδιασμού που βελτιστοποιούν την ακουστική λειτουργία και μεγιστοποιούν την ηχοπροστασία ενός αστικού υπαιθρίου θεάτρου (χωροθέτηση, θεατρική μορφή, ηχοφράγματα). Η διαπραγμάτευση περιλαμβάνει την ανάλυση της αρχικής κατάστασης, τις ακουστικές προτάσεις και την αξιολόγηση των τελικών εφαρμογών.

ABSTRACT

The Garden Theatre has for decades been located in the centre of Thessaloniki. The intensification of traffic noise over the years led to the degradation of its acoustics and its use dwindled. In 1997, the organisation of the Cultural Capital of Europe served as a springboard for a study conducted by the author on redesigning the theatre (as part of a more general restructuring of the buildings and traffic in the city's historical centre, which was never implemented). Various problems and budget cuts experienced during the design and construction of the Garden Theatre led to restricted execution of the planned acoustic interventions.

This paper deals with the design parameters that optimise acoustic function and maximise sound protection in an urban open-air theatre (location, theatre form, sound barriers) and includes an analysis of the theatre's initial state, acoustic proposals and an assessment of the final applications.

Εισαγωγή

Το σύγχρονο πλαίσιο αστικής οργάνωσης και κυκλοφορίας ασκεί ασφυκτικές πιέσεις στον επίζηλο χώρο και στην ακουστική άνεση των υπαίθριων θεάτρων. Συνήθως οι διαθέσιμοι χώροι δεν επαρκούν για να διαμορφωθούν φυσικά αναχώματα (γήλοφοι, πρανή) και συχνά, το μέγεθος των απαιτούμενων επεμβάσεων τείνει να αναιρέσει την ανοικτή, υπαίθρια μορφή του χώρου. Η αναγκαστική εξάρτηση από τα συστήματα ηλεκτρακουστικής ενίσχυσης συρρικνώνει σταδιακά το φάσμα των

δραστηριοτήτων, περιορίζει το θεατρικό ρεπερτόριο, οδηγεί σε αδυναμία συντήρησης και ανακαίνισης, καταλήγει στην απαξίωση υποδομών και εξοπλισμού.

Ο σχεδιασμός νέων υπαίθριων θεάτρων ανατρέχει στα θετικά πρότυπα αντίστοιχων μνημείων που διασώθηκαν μέσα στο σύγχρονο αστικό ιστό, ενώ η ηχοπροστασία ανάγεται σε βασική παράμετρο του θεατρικού σχεδιασμού. [1]. Κοινός τόπος των συντελεστών μιας παράστασης είναι η απρόσκοπτη θεατρική επικοινωνία, η άνετη οπτική επαφή, η ζωντάνια του χώρου, η καταληπτότητα και διαύγεια του θεατρικού λόγου. Μακρόχρονες ακουστικές έρευνες σε υπαίθριους χώρους, έδειξαν ότι οι βασικές αρχές σχεδιασμού είναι :

- η εξουδετέρωση /ο υποβιβασμός των εξωτερικών θορύβων (ηχοπροστασία, ακουστική άνεση),

- η αρμονική ανάπτυξη των λειτουργικών στοιχείων του θεατρικού χώρου στα μέτρα της ανθρώπινης φωνητικής και ακουστικής κλίμακας (θεατρική μορφή, μέγεθος, χωρητικότητα),

- η ευχερής ανάδειξη του κατευθειάν ήχου και η ενίσχυση του με έγκαιρες ηχοανακλάσεις (ένα αυτοδύναμο φυσικό μεγάφωνο από το δάπεδο, το σκηνικό βάθος και το συνδυασμό τους),

- ο έλεγχος /η υποβάθμιση των ύστερων ηχοανακλάσεων (περιορισμός της αντήχησης, εξαφάνιση της ηχούς) [2], [3].

Για τη βελτιστοποίηση του ακουστικού σχεδιασμού υπαίθριων θεάτρων (ι-δίως σε περιπτώσεις δυσμενούς ηχητικού περιβάλλοντος) απαιτείται η συνδυασμένη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων μιας ανοικτής κάτοψης και ο περιορισμός των ορίων του θεατρικού χώρου. Σε αυτή την κατεύθυνση, επιλογές που ανάγονται στην οικεία μορφή του ελληνο-ρωμαϊκού θεάτρου περιλαμβάνουν :

- ελάττωση της χωρητικότητας και του αξονικού αναπτύγματος, με την προώθηση του προσκηνίου στο εσωτερικό της ορχήστρας (κατά το μισό ή τρίτο της ακτίνας),

- προσομοίωση μιας κλειστής κάτοψης από το κοίλο και το κτίριο της σκηνής, με περιορισμό των ανοιγμάτων στις παρόδους,

- κατάλληλη διαμόρφωση του σκηνικού βάθους και των πλευρικών του απολήξεων (παρασκήνια) για την εξουδετέρωση των βλαπτικών, πλαγιών ηχοανακλάσεων [2], [4].

Η υπαίθρια ηχοπροστασία στοχεύει στην εκμετάλλευση της ακουστικής περίθλασης, με την παρεμβολή φυσικών ή τεχνητών ηχοφραγμάτων ανάμεσα στις πηγές θορύβου και την προστατευόμενη περιοχή. Η έκταση, και η οριακή συχνότητα της ακουστικής σκιάς, καθώς και η απομείωση του θορύβου, ως συνάρτηση του ενεργού ύψους και της θέσης του ηχοφράγματος, υπολογίζονται αναλυτικά με τον τύπο του Bruckmayer, σύμφωνα με τη θεωρία των Huygens-Fresnel, για σφαιρικό ή επίπεδο κύμα (οριακές συνθήκες κατά Fresnel ή Sommerfeld) [5], [6].

Στον Ελληνικό Κτιριοδομικό Κανονισμό, όπου τα επιτρεπόμενα όρια ακουστικής άνεσης αναφέρονται σε μέσες, ωριαίες ηχοστάθμες, δεν περιλαμβάνονται ειδικά κριτήρια για Θέατρα. Η διεθνής πρακτική, για την ηχοπροστασία της θεατρικής λειτουργίας υιοθετεί στις καμπύλες NC-25 ως 30 (Noise Criteria), ενώ για πολιτιστικούς χώρους υψηλής σπουδαιότητας, προτείνεται η διόρθωση των στατιστικά ισοδύναμων μεγεθών, με τη μέγιστη, αναμενόμενη τιμή θορύβου [6], [7].

Βασικό κριτήριο της αρχιτεκτονικής ακουστικής είναι ο λόγος S/N (σήμα προς θόρυβο) [8], [9]. Σε μια εύχρηστη μέθοδο ακουστικής αξιολόγησης ενός χώρου, διερευνάται η χωρική κατανομή αυτού του κριτηρίου, υπολογίζοντας τα παράγωγα μεγέθη της «Ανάδυσης» και της «Φασματικής Πυκνότητας» (Emergence / Densite Spectrale, δηλαδή η ευδιάκριτη διαφορά στάθμης μεταξύ μηνύματος και θορύβου

βάθους σε σφαιρικές-συχνοτικές τιμές), σύμφωνα με τα βαθμονομημένα όρια : άριστη (>25 dB), καλή (20-25 dB), μέτρια (15-20 dB), μη ικανοποιητική (<15dB) [10].

1. Το Θέατρο Κήπου πριν την ανακατασκευή

Το Δημοτικό Θέατρο Κήπου είναι ο μοναδικός υπαίθριος πολιτιστικός χώρος στο κέντρο της Θεσσαλονίκης (παραλία Λευκού Πύργου), όπου ιστορικά φιλοξενήθηκαν πολυάριθμοι, υπαίθριοι χώροι αναψυχής. Ύστερα από διαδοχικές μετατροπές, ο θεατρικός χώρος αναπτύχθηκε σε έκταση περίπου τριών στρεμμάτων (στο βόρειο τμήμα του πάρκου, δυτικά της κεντρικής αλέας) με πρόσβαση επί της οδού Ν. Γερμανού, σε απόσταση περίπου 80 μέτρων νοτιοδυτικά του κόμβου της ΧΑΝΘ.

Την τελευταία περίοδο λειτουργίας (μετά την ανακαίνιση της δεκαετίας του '80) το Θέατρο Κήπου, με χωρητικότητα 630 θέσεων, εμφάνισε σοβαρά μειονεκτήματα όπως η διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου, η διάταξη των λειτουργικών στοιχείων (περιορισμένη ορατότητα, δυσχερής επικοινωνία σκηνης-παρασκηνίων), η έλλειψη ασφάλειας και βοηθητικών χώρων. Ωστόσο το σημαντικότερο πρόβλημα, ως αποτέλεσμα της ανύπαρκτης ηχοπροστασίας του χώρου, ήταν η φτωχή ακουστική άνεση :

- ο θόρυβος βάθους κυμαινόταν στα 66 dB(A) (συχνοτικό ακρότατο 81dB στα 50 Hz), με σημαντικές υπερβάσεις [69 ως 75 dB(A)] από τη βαριά κυκλοφορία στη Ν. Γερμανού, τη λειτουργία των αναψυκτηρίων και την παράνομη διέλευση μοτοσικλετών,

- το σκηνικό βάθος (κοίλο ως προς το χώρο) συγκέντρωνε ένα τμήμα των θορύβων του περιβάλλοντος και το αντανάκλούσε προς το προσκήνιο και την πλατεία,

- το εκτεταμένο αξονικό ανάπτυγμα και η χαμηλή κλίση της πλατείας προκαλούσαν σε μεγάλο τμήμα των θέσεων εξασθένηση του κατευθείαν ήχου και φτωχές γωνίες ακρόασης (< 5⁰),

- η διάταξη των λειτουργικών στοιχείων (πλατεία, ορχήστρα, προσκήνιο, σκηνικό βάθος) δεν προσέφερε στο χώρο φυσική, μεγαφωνική ενίσχυση.

Όπως φαίνεται στη 1^η στήλη του Πίνακα 1, η ανάδυση υπολειπόταν κατά 5-10 dB του θορύβου βάθους σε μεγάλο μέρος της πλατείας, καθιστώντας υποχρεωτική τη λειτουργία μιας ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης (τρία μικρόφωνα ισχυρού βάθους-περιορισμένης ζώνης στο όριο του προσκηνίου και δύο ηχοστήλες μεγαφώνων στις άκρες της σκηνης). Αυτή η εξέλιξη περιόριζε τις κινήσεις των ηθοποιών και αλλοίωνε τα χαρακτηριστικά της φωνής τους, αυξάνοντας την απόσταση του κοινού από τα δρώμενα. Συχνά μέσα από το ηλεκτρακουστικό σύστημα ενισχυόταν ο θόρυβος βάθους, ενώ αναπόφευκτα, η κατανομή των ηχητικών εντάσεων και η καταληπτότητα της ομιλίας εμφάνιζαν έντονες αποκλίσεις (>10dB μεταξύ των ακραίων θέσεων).

Πίνακας 1 : Αξιολόγηση της ακουστικής λειτουργίας του χώρου

Πηγή : ηθοποιός (85dB στο 1m)	ΠΡΟ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΤΑ
Ενίσχυση (dB)	15 - 20	5,5 - 6,5	3,5 - 4,5
Μέση απόσταση θεατών (m)	16	27	22
Απομείωση λόγω απόστασης (dB)	-24	-28,5	-26,5
Θόρυβος βάθους (dB)	66	40 - 45	48 - 52
Ανάδυση (dB)	~ 10	~ 20	10 - 15
Απόκλιση ακραίων σειρών (dB)	` +/- 5	` +/- 2,5	` +/- 1,5

2. Προτάσεις σχεδιασμού – Ακουστική μελέτη

Η ηχητική χαρτογράφηση της περιοχής και η διεξοδική ανάλυση των ηχομετρήσεων (11-12/1995) έδειξαν το μέγεθος της παρενόχλησης από τη συνεχή κυκλοφορία του κόμβου (στάθμες μέχρι 81dB), τη σοβαρή επίδραση της περιορισμένης διάρκειας του πράσινου ρεύματος στους βασικούς άξονες (μόνο το 42% της περιόδου των φαναριών, συχνό φρενάρισμα-μαρσάρισμα), καθώς και την ανατροφοδότηση του θορύβου εξαιτίας της τοπογραφίας (άξονες ανάντι, απομειώσεις μικρότερες της ηχοδιάδοσης κυλινδρικού κύματος, αντανάκλασεις από το κτίριο της ΧΑΝΘ).

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού, όπως προτάθηκαν στην προκαταρκτική μελέτη σκοπιμότητας (9/1994), διαμορφώθηκαν στο πλαίσιο της μελετητικής ομάδας (1-6/1996) και εγκρίθηκαν από τον Κύριο του Έργου προέβλεπαν :

α) την ανάπλαση της ευρύτερης περιοχής προς όφελος των δραστηριοτήτων αναψυχής και πολιτισμού (ενοποίηση οικοδομικών τετραγώνων ΕΜΣ-ΧΑΝΘ με το πάρκο, επανασχεδιασμός κεντρικής αλέας, επαναχάραξη του κόμβου)

Το σύνολο αυτών των προτάσεων εγκαταλείφθηκε.

β) την πεζοδρόμηση της οδού Ν. Γερμανού, την απαγόρευση λειτουργίας ηλεκτρακουστικών συστημάτων στα γειτονικά αναψυκτήρια και την αστυνόμευση της περιοχής

Η πεζοδρόμηση (ή έστω η μερική διακοπή της κυκλοφορίας, όπως ίσχυε πριν την ανακατασκευή) δεν εφαρμόζεται.

γ) την οριακή μετακίνηση του θεατρικού χώρου, με παράλληλη ενσωμάτωση ενός αριθμού δέντρων

Η νέα χωροθέτηση προέκυψε με ολίσηση του χώρου στη σκιά του κτιρίου της ΧΑΝΘ, την απομάκρυνση της εισόδου από την κεντρική αλέα και την περιστροφή του κεντρικού θεατρικού άξονα (το βασικό σώμα των προστατευτικών μέτρων) προς το κύριο μέτωπο του κόμβου,

δ) ένα σύνολο ηχοπροστατευτικών μέτρων ενεργού ύψους 7,5m, το είδος και μέγεθος των οποίων αποτέλεσε πεδίο διαρκών διαπραγματεύσεων και τροποποιήσεων (από την προκαταρκτική μελέτη μέχρι και την κατασκευή)

Η πρόταση καταβύθισης του θεατρικού χώρου κατά 4-4,5m μειώθηκε αρχικά στα 3,36m, λόγω της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Εκτός του περιμετρικού θώρακα ύψους 3,5m, η ηχοπροστασία ενισχύθηκε με ένα κλειστό περιστύλιο στη στέψη του κοίλου (ύψους 4,5m για την προστασία της εισόδου των θεατών) και ένα οριζόντιο στέγαστρο (ύψους 8,5m για την σκίαση του κοίλου και της ορχήστρας, το οποίο τελικά περιορίστηκε στο ημικύκλιο πίσω από το κοίλο). Η αναλυτική παρουσίαση του υπολογιστικού μοντέλου και της χάραξης των ηχοπροστατευτικών διατάξεων θα αποτελέσει αντικείμενο άλλης διαπραγματεύσεως,

ε) τον πλήρη επανασχεδιασμό ενός θεατρικού χώρου κλειστής κάτοψης σε διάταξη ελληνο-ρωμαϊκού τύπου

Ο ακουστικός σχεδιασμός προέβλεπε τη συρρίκνωση του αξονικού αναπτύγματος (κοίλο, ορχήστρα, προσκήνιο) σε μια σκιασμένη περιοχή 33-36m. Η ορχήστρα (ακτίνας 10m) στο κέντρο της σύνθεσης περικλείεται από το αμφιθέατρο (σε άνοιγμα 225⁰, με 12 βαθμίδες, κλίση 23⁰, χωρητικότητα περίπου 1050 θέσεων και γωνίες ακρόασης 11⁰-15⁰) και το σκηνικό πλαίσιο (πλάτος 20m) με τις πλευρικές του πτέρυγες (πλάτος 4-6m) μπροστά από το κτίριο της σκηνής. Ο προσκήνιος χώρος στην κατώτερη στάθμη (ωφέλιμου βάθους 7,5m) εισχωρούσε στο εσωτερικό της περιφέρειας (κατά 3,8m), εξασφαλίζοντας θετικές ηχοανακλάσεις (από την ορχήστρα, το σκηνικό πλαίσιο και το συνδυασμό τους) και

σκιασμό των παρόδων (λοξοί διάδρομοι ανάμεσα στις άκρες του κοίλου και το κτίριο της σκηνής προς τις εξόδους κινδύνου).

Όπως φαίνεται στη 2^η στήλη του Πίνακα 1 (το υπολογιστικό μοντέλο της ακουστικής πρότασης), ο αναμενόμενος θόρυβος βάθους θα κυμαινόταν από NC-30 ως 35 (απομείωση 21dB) και η προβλεπόμενη ανάδυση θα υπερέβαινε τα 20 dB (αποκλίσεις +/-2,5 dB στις ακραίες βαθμίδες).

3. Τροποποιήσεις – αξιολόγηση της εφαρμογής

Η ελάττωση του επιτρεπόμενου αμφιθεατρικού ύψους (7 βαθμίδες, χωρητικότητα 800 θέσεων, λόγω της μικρής καταβύθισης) έτεινε σε δυσανάλογο περιορισμό της έκτασης του θεατρικού χώρου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος οι αρχιτεκτονικές επιλογές οδηγήθηκαν στην υιοθέτηση μιας σύνθετης διαμόρφωσης βαθμίδων (διατηρώντας την κλίση του κοίλου και τις διαστάσεις της σκηνής, δηλαδή αυξάνοντας τον κεντρικό και τον εγκάρσιο άξονα του χώρου).

Μετά την έναρξη των εκσκαφών, ο εντοπισμός αρχαιολογικών ευρημάτων έθεσε σε μεγάλη καθυστέρηση και οικονομική επιβάρυνση το πρόγραμμα της κατασκευής. Μπροστά στον κίνδυνο της ματαίωσης του Έργου, αλλά και της οριστικής εξαφάνισης του Θεάτρου Κήπου, η ομάδα επίβλεψης των Τεχνικών Υπευθύνων προχώρησε σε τροποποιήσεις της Μελέτης (ανύψωση της ορχήστρας κατά 70cm μέχρι τη στάθμη -2,70m, κατάργηση της 1^{ης} βαθμίδας, διατήρηση της έκτασης του θεατρικού χώρου).

Μέσα από μια διαδικασία διαδοχικών τροποποιήσεων (περιορισμό του σκιασμένου αναπτόματος, επέκταση της ορχήστρας και του προσκηνίου χώρου), η ακουστική λειτουργία του Θεάτρου Κήπου οδηγήθηκε σε ακυρώσεις (ποιοτικά κρίσιμες και ποσοτικά οριακές) των προβλέψεων του ακουστικού μοντέλου :

- η μείωση της καταβύθισης περιόρισε την ηχοπροστασία του προσκηνίου, ωθώντας τους ηθοποιούς στο χώρο της ορχήστρας,

- η τροποποίηση των γεωμετρικών αναλογιών συνέτεινε στη μετακίνηση του σκηνικού χώρου προς το κέντρο (έξω από τα προβλεπόμενα όρια της ζώνης Haas, σε σχέση με το σκηνικό πλαίσιο),

- η ανάδυση του ωφέλιμου σήματος δεν ενισχύθηκε από την αναμενόμενη ακουστική συνεισφορά των λειτουργικών στοιχείων του θεατρικού χώρου.

Όπως φαίνεται στη 3^η στήλη του Πίνακα 1, οι μετρήσεις αξιολόγησης (7/98) εμφανίζουν το θόρυβο βάθους μεταξύ NC-35 και NC-40 (περίπου +3 dB ως προς τον αναμενόμενο, με σημαντικές υπερβάσεις 7-11dB λόγω της συνεχιζόμενης κυκλοφορίας στη Ν. Γερμανού) και την ανάδυση περίπου 15 dB (-6 dB ως προς το αναμενόμενο, με αποκλίσεις +/-1,5 dB στις ακραίες βαθμίδες). Αυτή η εξέλιξη έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία διαρκούς εξασφάλισης σταθερά ικανοποιητικών συνθηκών ακουστικής άνεσης κατά τη διάρκεια των παραστάσεων.

4. Ταυτότητα του Έργου

Το Έργο χρηματοδοτήθηκε με 440εκ. δρχ. από το ΥΠΕΧΩΔΕ και κατασκευάστηκε από την κοινοπραξία ΔΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ – Ζ. ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗΣ ΑΤΕ. Διοίκηση και Τεχνικός Υπεύθυνος του Έργου ήταν η ομάδα ΣΑΡΙΣΑ με τους Γ. Γαϊτανάκη, Ι. Λεβέντη, Ε. Νούλη, Α. Ξυροτύρη, Ν. Σιπητάνο και Χ. Τοκατλίδη.

Η Αρχιτεκτονική Μελέτη του Έργου εκπονήθηκε από τους αρχιτέκτονες Γ. Αθανασόπουλο, Α. Βανό, Γ. Βλάχο, Τ. Βασιλειάδη, Γ. Παπακώστα, Ε. Σταύρακα, Μ. Φρύσσα με σύμβουλο το συγγραφέα. Η Στατική Μελέτη από τον Κρ. Σαλπικτή με

συνεργάτη τον Γ. Γιαντσίδη και σύμβουλο τον Ι. Παπαδόπουλο. Η Η/Μ Μελέτη από τον Δ. Σακιζλή με συμβούλους τους Δ. Κεραμίδα και Γ. Ταρκάση[11].

Η αρχική ιδέα της ανακατασκευής του Θεάτρου Κήπου ανήκει στο συγγραφέα. Διατυπώθηκε στη Προκαταρκτική Μελέτη Σκοπιμότητας, που εκπονήθηκε από τους αρχιτέκτονες Γ. Αικατερινάρη, Α. Βανό και Μ. Φρύσσα, με σύμβουλο το συγγραφέα. Η συμπληρωματική Μελέτη Ηχοπροστασίας – Ακουστικής είναι προϊόν συνεργασίας του Α. Βανού και του συγγραφέα. Η ηχητική χαρτογράφηση της περιοχής σχεδιάστηκε από τους Α. Βανό, Δ. Κεραμίδα και το συγγραφέα και υλοποιήθηκε από το συγγραφέα.

5. Αναφορές

- [1] Αθανασόπουλος Χ.Γ. «Προβλήματα στις Εξελίξεις του Συγχρόνου Θεάτρου», Ι. Σιδέρης, 1976, Αθήνα
- [2] Canac Fr. «L' Acoustique des Theatres Antiques», CNRS, 1967, Paris
- [3] Μάρκας Ν.Κ. «Η Ακουστική ως Παράμετρος Σχεδιασμού στο Αρχαίο Ελληνικό Θέατρο» Μνημείο & Περιβάλλον, τεύχος 2, 1994, Θεσσαλονίκη
- [4] Izenour G. «Theater Design» Mc Graw-Hill, 1977, New York
- [5] Bruneau M. «Introduction aux Theories de l' Acoustique», 1984, Le Mans.
- [6] Stryjenski J. «L' Acoustique Appliquee a l' Urbanisme», 1975, Geneve.
- [7] Αθανασόπουλος Χ. «Προστασία Κτιρίων» 1991, Αθήνα.
- [8] Vian J.V. «Criteres Acoustiques d' une Salle» CSTB, 1983, Grenoble
- [9] Liepp E. « Qualites Acoustiques des Lieux d' Ecoute», CNRS, 1981, Paris
- [10] Storm S. «Room Acoustical Parameters with High Correlation to Subjective Preference», ELAB 1982, Trondheim
- [11] «Μετασχηματισμοί του Αστικού Τοπίου», Οργανισμός Θεσσαλονίκης, ΥΠΕΧΩΔΕ, επιμελητής Λ. Παπαδόπουλος, Α. Λιβάνης

Η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας και οι επιπτώσεις της στην επικοινωνία

Γεώργιος Καμπουράκης
Λέκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
gcamb@cs.ntua.gr

Ιωάννης Σαρρής
Υποψ. Διδάκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
jsarris@central.ntua.gr

Νικόλαος Στεφανάκης
Υποψ. Διδάκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
stefanik6@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από την ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει αβίαστα το συμπέρασμα ότι η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας είναι *terra incognita* όσον αφορά στις κατασκευαστικές διαδικασίες με πολύ λίγα αντιπαραδείγματα παγκοσμίως. Το ίδιο ισχύει και για την Ελλάδα. Όμως η κακές ακουστικές συνθήκες στις αίθουσες διδασκαλίας ενοχοποιούνται για μαθησιακές δυσκολίες των παιδιών και σε πολλές περιπτώσεις για χαμηλές επιδόσεις στις εξετάσεις που γίνονται σε θορυβώδεις αίθουσες. Σε αυτό το άρθρο θα αναφερθούμε στα προβλήματα που αποδεδειγμένα ταλαιπωρούν τους μαθητές και τους φοιτητές και των δύο φύλλων που σπουδάζουν σε θορυβώδεις αίθουσες ή αίθουσες με κακή ακουστική.

ABSTRACT

By studying the international literature the conclusion that the acoustics of teaching classes is terra incognita concerning the building process with a few counterexamples worldwide can be drawn. The same applies for Greece. It seems though that the bad acoustic conditions in teaching classes are responsible for the learning difficulties of students and in many cases for the low results in exams that take place in noisy classes. In this paper we will refer to the problems that the students who study in noisy classes or classes with bad acoustics face.

Εισαγωγή

Από την ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει αβίαστα το συμπέρασμα ότι η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας είναι *terra incognita* όσον αφορά στις κατασκευαστικές διαδικασίες με πολύ λίγα αντιπαραδείγματα παγκοσμίως. Το ίδιο ισχύει και για την Ελλάδα. Όμως η κακές ακουστικές συνθήκες στις αίθουσες διδασκαλίας ενοχοποιούνται για μαθησιακές δυσκολίες των παιδιών και σε πολλές περιπτώσεις για χαμηλές επιδόσεις στις εξετάσεις που γίνονται σε θορυβώδεις αίθουσες. Σε αυτό το άρθρο θα αναφερθούμε στα προβλήματα που αποδεδειγμένα ταλαιπωρούν τους μαθητές και τους φοιτητές και των δύο φύλλων που σπουδάζουν σε θορυβώδεις αίθουσες ή αίθουσες με κακή ακουστική. Φαίνεται ότι δικαιολογημένα συνδέονται οι κακές επιδόσεις στο σχολείο με τις εργονομικές συνθήκες που επικρατούν στις αίθουσες διδασκαλίας. Το παράδοξο είναι ότι ενώ σχεδόν σε κάθε χώρα υπάρχει ολόκληρο σώμα νομοθετημένων κανονισμών για την προστασία των ενηλίκων από τον θόρυβο στον χώρο εργασίας τους για τα παιδιά τους υπάρχει ένα μεγάλο κενό. Ο πιθανότερος λόγος για αυτήν την έλλειψη κανονισμών είναι η ευθεία σύνδεση του νεαρού πληθυσμού με θορυβώδεις δραστηριότητες και κατά συνέπεια η άποψη πως είναι μάταιη κάθε κανονιστική προσπάθεια για την προστασία του από τον θόρυβο. Αποδεικνύεται όμως ότι οι

εκπαιδευτικές διαδικασίες είναι ευαίσθητες στον θόρυβο όπως και η εν γένει ψυχική υγεία του νεαρού πληθυσμού.

Από την εμπειρία που αποκτήθηκε από ερευνητικές επισκέψεις σε σχολεία μπορούμε να πούμε ότι τόσο οι διδάσκοντες όσο και οι διδασκόμενοι υποφέρουν από τις συνθήκες θορύβου που επικρατούν στις αίθουσες διδασκαλίας αλλά και στα αμφιθέατρα πολλών σχολών της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Στα ιδιωτικά εκπαιδευτήρια η κατάσταση είναι εν γένει παρόμοια ή και χειρότερη από εκείνη της δημόσιας εκπαίδευσης. Παρ' όλον ότι το πρόβλημα του θορύβου στην εκπαίδευση είναι παγκόσμιο, το κοινό δεν έχει καμμία πληροφόρηση περί αυτού [1]. Εν γένει θα μπορούσαμε να πούμε ότι δίνεται πολύ μεγαλύτερη έμφαση στις κοινωνικές συνθήκες και τους ψυχο-κοινωνικούς τύπους συμπεριφοράς στην εκπαίδευση από ότι στους φυσικούς παράγοντες οι οποίοι εν πολλοίς αγνοούνται.

1. Στα νηπιαγωγεία και παιδικούς σταθμούς

Η αίσθηση της ακοής και η ικανότητα λόγου αναπτύσσεται πολύ ενωρίς στα νήπια και απαιτούν προσοχή όσον αφορά στην ενθάρρυνση τους ή την πιθανή ανάσχεση τους. Οι Allen, Wightman, Kistler και Dolan κατάφεραν να αποδείξουν ότι η δυνατότητα των νηπίων να διακρίνουν συχνότητες αναπτύσσεται προς το τέλος του τρίτου έτους της ζωής τους [2]. Κατά συνέπεια το περιβάλλον θορύβου σε αυτήν την ηλικία παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση των παιδιών στις προσπάθειές τους να μάθουν τους αριθμούς ή ακόμα και να δοκιμάσουν να διαβάζουν αλλά κυρίως να αναπτύξουν την ικανότητα ομιλίας. Από σχετικές μελέτες σε νηπιαγωγεία φαίνεται ότι τα παιδιά ενοχλούνται από τον θόρυβο ιδιαίτερα όταν παίζουν. Σε μερικά νηπιαγωγεία μετρήθηκαν στάθμες θορύβου με Leq στην περιοχή των 80-85 dB(A) κατά τις ώρες λειτουργίας, στάθμες που στους χώρους εργασίας ενηλίκων οι κανονισμοί συνιστούν την χρήση ωτασπίδων [3]. Παρόμοιες παρατηρήσεις υπέδειξαν ότι το ηλικιακό όριο για τον υπολογισμό του συνολικού ακουστικού άγχους ενός ατόμου θα έπρεπε να μειωθεί συμπεριλαμβάνοντας την σχολική και προσχολική ηλικία.

Από ερευνητικές επισκέψεις μας σε νηπιαγωγεία και παιδικούς σταθμούς του Λεκανοπεδίου Αττικής, διαπιστώσαμε ότι το ζήτημα των ακουστικών συνθηκών έχει την χαμηλότερη προτεραιότητα στην κλίμακα αναγκών κατά την συγκρότηση αυτών των δραστηριοτήτων, στις περισσότερες περιπτώσεις αγνοείται τελείως ενώ παραβλέπεται και η εφαρμογή έστω των σχετικών άρθρων του κτιριοδομικού κανονισμού.

2. Στην πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση

Όσον αφορά στην πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση είναι σκόπιμο πριν αναφερθούμε στα συμβαίνοντα στον Ελληνικό χώρο, από την άποψη της ακουστικής επάρκειας των αιθουσών διδασκαλίας, να δούμε τι συμβαίνει σε άλλες χώρες.

Από την διεθνή βιβλιογραφία [4] προκύπτει ότι σε πολλές περιπτώσεις ο θόρυβος έχει δυσμενείς συνέπειες στις σχολικές επιδόσεις των παιδιών και την μαθησιακή τους ανάπτυξη ενώ επιδρά κυρίως στις λειτουργίες λόγου. Στις ΗΠΑ υπό την αιγίδα της Ακουστικής Εταιρείας (Acoustical Society of America) συνετάχθη σύνολο προτύπων και οδηγιών προς περαιτέρω επεξεργασία, για την βελτίωση μεγάλου αριθμού σχολείων με ανεπαρκή ακουστική. Είχαν προηγηθεί σχετικές δημοσιεύσεις όπου φαινόταν η ότι η ακουστική των περισσότερων αιθουσών ήταν ανεπαρκής, π.χ. [5]. Στην σχετική έκθεση των Picard και Bradley [6]

αναφέρεται ότι οι τιμές θορύβου στις αίθουσες υπερβαίνουν τη βέλτιστη τιμή κατά 4 έως 38 dB(A).

Στην Γερμανία ο Loewe ιδρυτής της παιδικής ακουστικολογίας (paedaudiology) εξεδήλωσε παράπονα για τους μεγάλους χρόνους αντηχήσεως των αιθουσών διδασκαλίας αλλά και την γενικότερη ακουστική συμπεριφορά τους [7]. Τα παράπονα αυτά δημιουργούν ερωτηματικά δεδομένου ότι στη Γερμανία υπάρχουν αρκετά πρότυπα σχετικά με την προστασία από τον θόρυβο αλλά και για την ακουστική των χώρων συνάθροισης κοινού [8,9,10]. Η ενδεχόμενη εξήγηση είναι ότι μερικά από αυτά είχαν μακρά διαδρομή (π.χ. το DIN 4109 εγκρίθηκε σε τελική μορφή 30 χρόνια μετά την αρχική έκδοση του) με αρκετές αλλαγές καθ' οδόν και προφανώς σε αυτήν την περίοδο οι αίθουσες που κατασκευάστηκαν δεν υπακούουν στο τελικό πρότυπο. Έτσι ενώ το όριο θορύβου σε χώρους εργασίας είναι 55 dB(A) μετρήσεις σε δημοτικά σχολεία του Βερολίνου έδωσαν στάθμες L_{eq} 76 dB(A) (διάρκεια μέτρησης 8 ώρες). Η γνωστή Γερμανική εταιρεία Sennheiser έκανε μετρήσεις θορύβου σε αίθουσες Γερμανικών σχολείων πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης και βρήκε ότι στις κενές αίθουσες η στάθμη θορύβου κυμαινόταν από 42.5 έως 46.6 dB ενώ όταν τα παιδιά ήταν μέσα στην αίθουσα ο θόρυβος ήταν 75 dB στις αίθουσες με παιδιά 5-6 ετών, 65.3 dB (6-11 ετών) και 64.5 dB (11-16 ετών). Οι μετρήσεις αυτές δεν είναι συστηματικές αλλά απλά ενδεικτικές.

Στην Ολλανδία ο Houtgast ανέπτυξε την μέθοδο RASTI για την αντικειμενική μέτρηση της καταληπτότητας σαν απάντηση στην αντιμετώπιση των προβλημάτων θορύβου στις αίθουσες [11]. Μέθοδος με διεθνή απήχηση πλέον. Στην Αγγλία [12] αναφέρονται στάθμες θορύβου σε εκπαιδευτικά ιδρύματα που φθάνουν τα 100 dB(A), ενώ σε 60 δημοτικά παρατηρήθηκε βελτίωση στην απόδοση των μαθητών όταν βελτιώθηκαν οι ακουστικές συνθήκες των αιθουσών [13]. Στην Πολωνία υπάρχει σημαντική δραστηριότητα σχετική με την έρευνα της ακουστικής στα σχολεία [14]. Τα ευρήματα δείχνουν στάθμες της τάξεως των 86 dB(A) στα σχολεία πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης ενώ στις αίθουσες της δευτεροβάθμιας μειώνονται κατά 9 dB(A). Οι ίδιοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το μέγιστο όριο μαθητών ανά αίθουσα είναι 25, ώστε να εξασφαλίζονται καλές ακουστικές συνθήκες. Όταν ο αριθμός των μαθητών υπερβαίνει τους 30 η στάθμη θορύβου από τις δραστηριότητες τους αναμένεται να αυξηθεί κατά 3 dB(A). Η μέση στάθμη θορύβου που προέκυψε από τις μετρήσεις στην Πολωνία είναι 80 dB(A), 85 dB(A) στα δημόσια και 72 dB(A) στα ιδιωτικά.

Στον Ελληνικό χώρο δεν έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις που να επιτρέπουν την εκτίμηση της κατάστασης των αιθουσών όσον αφορά στην ακουστική τους επάρκεια. Από σποραδικές μετρήσεις του εργαστηρίου σε σχολεία όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης, δημόσιας και ιδιωτικής, αρχίζει να στοιχειοθετείται βάσιμη υποψία πως τα σχολεία έχουν σοβαρό πρόβλημα θορύβου και χαμηλής καταληπτότητας. Άλλωστε οι προδιαγραφές με τις οποίες κατασκευάστηκε η πλειονότητα των αιθουσών δεν περιείχαν ειδικές κατευθύνσεις που να αφορούν την ακουστική τους. Τέλος στο ΕΜΠ το εργαστήριο έκανε μετρήσεις (2002) όπου αναδείχθηκαν τα προβλήματα των αιθουσών και των αμφιθεάτρων και ελήφθησαν ορισμένα μέτρα για την βελτίωση της ακουστικής τους.

3. Πρακτικά μέτρα για αίθουσες με καλή καταληπτότητα

Το 1993 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) υιοθέτησε μια σειρά μέτρων για την σχεδίαση νέων αιθουσών ή την βελτίωση των υφισταμένων βασισμένων σε σχετικές έρευνες [15, 16]. Τα μέτρα αυτά είναι:

- Βραχύς χρόνος αντήχησης < 0.6 s στην περιοχή συχνοτήτων από 125 έως 4000 Hz. Η οκτάβα των 125 Hz είναι πολύ σημαντική για τα παιδιά με μειωμένη ακοή δεδομένου ότι έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό επιβάλλει την χρήση της καμπύλης C κατά την μέτρηση του θορύβου (σε συνδυασμό με την καμπύλη A). Τα παιδιά έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στον μεγάλο χρόνο αντήχησης από τους ενήλικες [17]. Υπάρχουν αναφορές που υποστηρίζουν ότι ακόμα και άτομα με μικρή απώλεια ακοής 10-15 dB(A) έχουν σημαντικά μεγαλύτερα προβλήματα καταληπτότητας από τα άτομα με κανονική ακοή [18].

- Το υπόστρωμα θορύβου (background noise level) δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 30 dB(A), Leq τα 50 dB(C). Η τιμή αυτή προβλέπεται στο πρότυπο DIN 4109 αλλά δεν εφαρμόζεται πάντα. Για λόγους οικονομικούς θα μπορούσαμε να δεχθούμε τιμές μεταξύ 35 dB(A) και 40 dB(A) [19]. Το μέτρο αυτό επιβάλλει ειδική μελέτη ηχομόνωσης όπου θα εκτιμηθούν όλοι οι επιβαρυντικοί παράγοντες μέσα και έξω από την αίθουσα.

- Εγκατάσταση ηλεκτρικής υποβοήθησης του ομιλητή με ασύρματο μικρόφωνο ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιθουσών που φιλοξενούν παιδιά με προβλήματα ακοής.

Στους πίνακες 1 και 2 δίνεται η απαιτούμενη μέση απορρόφηση ώστε να επιτυγχάνεται χρόνος αντήχησης 0.4 s για μια σειρά διαστάσεων που απαντώνται εν γένει στις αίθουσες. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τον τύπο του Eyring.

4. Συμπεράσματα

Φαίνεται ότι η αρχή του ήσυχου σχολείου επανέρχεται σαν ανάγκη στις σύγχρονες κοινωνίες. Η αρχή αυτή εντάσσεται «στο δίκτυο ήσυχων σχολείων» [20] που διατυπώθηκε το 1998 σαν μέρος της προσπάθειας μείωσης θορύβου στην Ευρώπη. Για να εκπληρωθεί η αποστολή του σχολείου ως το μέρος απόκτησης γνώσεων και ψυχο-κοινωνικής ανάπτυξης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση περιβαλλοντικής ηρεμίας [21, 22]. Η μείωση της επίδρασης του θορύβου κυκλοφορίας στις αίθουσες είναι σημαντικός παράγοντας προς αυτήν την κατεύθυνση. Εκτός όμως από τους εξωτερικούς θορύβους σημαντικό ρόλο παίζουν και οι εσωτερικές πηγές θορύβου και ιδιαίτερα οι ανθρωπογενείς [23].

Προφανώς το εντελώς ήσυχο σχολείο δεν είναι η επιθυμητή κατάσταση, όμως η αύξηση της ελευθερίας στην μάθηση οδηγεί σε αύξηση του θορύβου. Οι οπαδοί της ενθάρρυνσης της δημιουργικότητας στο σχολείο επιμένουν ότι αυτό συνεπάγεται και την δυνατότητα θορυβωδών δραστηριοτήτων [24] στις οποίες όμως η ακουστική των αιθουσών θα πρέπει να δρα καταπραυντικά και όχι ενισχυτικά.

5. Αναφορές

- [1] A.L. Bronzaft, "The effect of a noise abatement program on reading ability", J. of Environmental Psychology, 1981, 1, 215-222
- [2] P. Allen, F. Wightman, D. Kistler, T. Dolan, "Frequency resolution in children", J. of Speech and Hearing, 1989, 32(2), 317-322
- [3] P. Nilsson, "Noise-induced hearing loss and tinnitus in kindergarten teachers", Seventh Intern. Congress on Noise as a Public Health Problem, Sydney, 1998, 1, 47-50
- [4] D.M. DeJoy, "Environmental noise and children: Review of recent findings", J. of Auditory Research, 1983, 23(3), 181-194
- [5] M.A. Gold, H.W. Lee, M. Siebein Lehde, J. Asby, M.J. Hasell, P. Abott, C.C Crandell, "Classroom acoustics II: Acoustical conditions in elementary school

classrooms”, Proceedings 16th International Congress on Acoustics and 135th Meeting of ASA, 1998, 4, 2723-2724

[6] M. Picard, “Speech interference by noise in classrooms and remedial solutions”, J. Acoustical Society of America, 1997, 101(5), 133rd Meeting of the ASA

[7] A. Löwe, “Hörerziehung für hörgeschädigte Kinder. Geschichte – Methoden Möglichkeiten”, Heidelberg: Schindele, 1990

[8] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau. Anforderungen und Nachweise, 1989

[9] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, 1968

[10] DIN 18032-2: Sporthallen, Hallen für Turnen, Spiele, Sportböden, Anforderungen, Prüfungen, 1991

[11] T. Houtgast, “The effect of ambient noise on speech intelligibility in classrooms”, Applied Acoustics, 1981, 14, 15-25

[12] S.L. Airey, D.J.M. MacKenzie, R.J.M. Craik, “Can you hear me at the back? Effective communication in classrooms”, Seventh Int. Congress on Noise as a Public Health Problem, Sydney, 1998, 1, 195-198

[13] D.J. MacKenzie, R.J.M. Craik, S. Airey, “Speech intelligibility in classrooms”, Proceedings of the Institute of Acoustics, 1996, 18(9), 299

[14] Z. Koszarny, D. Jankowska, “Determination of acoustic climate inside high schools in comparison with elementary schools”, Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny, 1996, 47 (4), 423-439

[15] C.C. Crandell, “Pilot studies of speech communication in elementary school classroom”, J. Acoustical Society of America, 1997, 101(5), 133rd Meeting of the ASA

[16] E. Pekkarinen, V. Viljanen, “Effect of sound-absorbing treatment on speech discrimination in rooms”, Audiology, 1990, 29(4), 219-227

[17] W.S. Yacullo, D.B. Hawkins, “Speech recognition in noise and reverberation by school-age children”, Audiology, 1987, 26(4), 235-246

[18] C.C. Crandell, J.J. Smaldino, “An update of classroom acoustics for children with hearing impairment”, Volta Review, 1994, 96(4), 291-306

[19] C. Ruhe, “Günstige Raumakustik hilft Hörgeschädigten”, Beratende Ingenieure, 1998, 11/12, 132-137

[20] P. Paulus, “Netzwerk Gesunde Schule: Übertragbare Erfahrungen und Empfehlungen”, Vortrag bei: Lärminderung in Europäischen Kommunen, Strategien, Konzepte und Ansätze für eine zukünftige Lärmschutzpolitik, Tagung, Berlin und Potsdam, 1998

[21] M. Bergk, “Yoga mit schwierigen Kindern”, Westermanns Pädagogische Beiträge, 1984, 36(10), 492-503

[22] L.G. Rivlin, C.S. Weinstein, “Educational issues, school settings, and environmental psychology”, J. of Environmental-Psychology, 1984, 4(4), 347-364

[23] E. Essa, “A Practical Guide to Solving Preschool Behavior Problems”, Nevada: Delmar Publ., Third Edition 1995

[24] C.P. Edwards, K.W. Springate, “Encouraging Creativity in Early Childhood Classrooms”, ERIC Digest, ERIC Clearinghouse on Elementary and Early Childhood Education, Urbana, Ill. 1995

Πίνακας 1. Απαιτούμενη μέση απορρόφηση για αίθουσες με ύψος 3.8 m

Πλάτος (m)	Μήκος (m)								
	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
6	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32
6,5	0,29	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33
7	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
7,5	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34
8	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34
8,5	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35
9	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
9,5	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35
10	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36

Πίνακας 2. Απαιτούμενη μέση απορρόφηση για αίθουσες με ύψος 2.8 m

Πλάτος (m)	Μήκος (m)								
	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
6	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28
6,5	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28
7	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29
7,5	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29
8	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30
8,5	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30
9	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30
9,5	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30
10	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31

Ακουστική άνεση σε ξενοδοχεία

Gottfried Schubert
Σύμβουλος Ακουστικής
Απόλλωνος 22, 15351 Κάντζα Παλλήνης
E-mail: schubert@ath.forthnet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της προετοιμασίας της Ελλάδας για την Ολυμπιάδα 2004 κατασκευάστηκαν νέα και ανακαινίστηκαν υφιστάμενα ξενοδοχεία, ίσως και για πρώτη φορά, με συγκεκριμένες απαιτήσεις για την ακουστική άνεση των πελατών. Οι ακουστικές απαιτήσεις για ξενοδοχεία προκύπτουν από τον Ελληνικό Κτιριοδομικό Κανονισμό (Κ.Κ.). Τα θέματα τα οποία δεν καλύπτονται από τον Κ.Κ. αντιμετωπίζονται με την χρήση του γερμανικού προτύπου DIN4109. Οι μεγάλες ξενοδοχειακές εταιρείες διαθέτουν ξεχωριστές προδιαγραφές για την εξασφάλιση της ακουστικής άνεσης. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει κατασκευαστικές λύσεις για την ικανοποίηση υψηλών ακουστικών απαιτήσεων για τα δομικά στοιχεία των ξενοδοχείων. Ιδιαίτερα θα σχολιάζεται η αρνητική συμπεριφορά της ηχομονωτικής ικανότητας χωρισμάτων με την τοποθέτηση ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και θα προταθούν μέτρα για τον περιορισμό της απώλειας της ηχομονωτικής ικανότητας.

Acoustic comfort in hotels

Gottfried Schubert
Acoustical Consultant
Apollonos 22, 15351 Kantza Pallinis
E-mail: schubert@ath.forthnet.gr

ABSTRACT

Within the framework of the preparations for the Olympic Games 2004 many new hotels have been built and some of the already existing ones have been under renovation. It is maybe the first time that the demand for acoustical comfort of the clients seems to reach such a high importance level. The acoustical requirements specifically for hotels are been put by the Greek Building Code (K.K.), whereas the German standard DIN 4109 is been used, for those acoustical issues that the regulations of the K.K. fail to cover. Big hotel companies follow separate specifications to ensure the acoustical comfort. The following study presents constructional solutions for the guarantee of high acoustical demands concerning the hotel's structural elements. Especially the negative acoustical output of partitions after the location of electrical installations will be commented and measures will be proposed for the reduction of loss of the sound-insulating capacity.

1. Εισαγωγή

Οι ακουστικές απαιτήσεις για ξενοδοχεία περιγράφονται από τον Ελληνικό Κτιριοδομικό Κανονισμό [1] και άλλους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς όπως π.χ. το Γερμανικό DIN4109 [2]. Οι μεγάλες ξενοδοχειακές εταιρείες διαθέτουν ξεχωριστές προδιαγραφές για την εξασφάλιση της ακουστικής άνεσης. Οι ακουστικές απαιτήσεις για χωρίσματα μεταξύ των δωματίων του ξενοδοχείου φαίνονται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Προδιαγραφές της ηχομονωτικής ικανότητας χωρισμάτων για ξενοδοχεία

R'_w	Υψηλή ακουστική άνεση	Κανονική ακουστική άνεση
Κ.Κ. § 12 Προσωρινή διανομή	54 dB	50 dB
DIN 4109, (1989)	52 dB	47 dB
Προδιαγραφές «SOVITEL»	54 dB	
Προδιαγραφές «HILTON»	50 dB	

Ο Ελληνικός Κτιριοδομικός Κανονισμός προδιαγράφει για τα χωρίσματα υψηλές τιμές οι οποίες είναι κοντά στις τιμές του DIN και των προδιαγραφών των ξενοδοχειακών εταιρειών.

2. Εσωτερικά χωρίσματα ξηράς δόμησης

2.1 Η ηχομονωτική ικανότητα των χωρισμάτων στο εργαστήριο

Η ακόλουθη εργασία ασχολείται με την ηχομόνωση χωρισμάτων ξηράς δόμησης για την ικανοποίηση των ακουστικών απαιτήσεων για ξενοδοχεία. Η ηχομονωτική ικανότητα διαφόρων τύπων χωρισμάτων ξηράς δόμησης αναφέρεται στα πιστοποιητικά [3] των εταιρειών οι οποίες κατασκευάζουν γυψοσανίδες. Μια κατασκευή η οποία μπορεί να ικανοποιεί της ακουστικές απαιτήσεις περιγράφεται ως εξής:

Γυψοσανίδες	2 x 12,5 mm
Ορθοστάτης, ορυκτοβάμβακας 40mm, 40kg/m ³	50 mm
Ταινία	5 mm
Ορθοστάτης, ορυκτοβάμβακας 40mm, 40kg/m ³	50 mm
Γυψοσανίδες	2 x 12,5 mm

Η τιμή υπολογισμού του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης κατά DIN 4109 [2], είναι

$$R_{w,R} = 59 \text{ dB} (R_w = 61 \text{ dB}).$$

2.2 Η πλευρική μετάδοση του ήχου

Η ηχομονωτική ικανότητα του χωρίσματος περιορίζεται από την πλευρική μετάδοση του ήχου. Ο φαινόμενος σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης υπολογίζεται σύμφωνα με το EN 12354-1 [4]. Τα πλευρικά δομικά στοιχεία ενός τυπικού χωρίσματος ξενοδοχειακού δωματίου περιγράφονται ως εξής:

Οροφή

Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με πάχος 200 mm

Δάπεδο

Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με πάχος 200 mm

Τοίχος πρόσοψης

Τουβλοδομή, σοβατισμένη, με επιφανειακή μάζα $m' \geq 165 \text{ kg/m}^2$

Ο τοίχος επενδύεται με διπλές γυψοσανίδες σε μεταλλικό σκελετό και ορυκτοβάμβακα στο διάκενο

Τοίχος διαδρόμου

Τοίχος ξηράς δόμησης με μονό σκελετό και αμφίπλευρα δύο γυψοσανίδες και ορυκτοβάμβακα στο διάκενο

Ο φαινόμενος σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης υπολογίζεται με τα αναφερόμενα δεδομένα ως $R'_{w,R} = 53 \text{ dB} (R_w = 55 \text{ dB})$.

2.3 Μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας λόγω των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων

Σε ξενοδοχειακά δωμάτια τοποθετούνται οι περισσότερες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (μπρίζες, διακόπτες κλπ.) στον διαχωριστικό τοίχο. Λόγω της συμμετρίας της επίπλωσης των δωματίων, τοποθετούνται και τα κουτιά των μπριζών και διακοπών σε συμμετρικές θέσεις στον τοίχο με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας του τοίχου. Για τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στην ηχομόνωση του τοίχου πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερα κατασκευαστικά μέτρα. Δοκιμάστηκαν δύο λύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια.

2.3.1 Ξενοδοχείο Α

Μετά από στενή συνεργασία με τους αρχιτέκτονες του έργου αποφασίστηκε η τοποθέτηση των κουτιών των μπριζών και των διακοπών να γίνει σε πρόσθετες ξύλινες επενδύσεις του τοίχου (σταθερό προσκέφαλο του κρεβατιού, πλάτη του γραφείου ως επένδυση του τοίχου) και να γίνει η διάτρηση του τοίχου μόνο με τα ανάλογα καλώδια. Το κενό γύρω από τα καλώδια σφραγίζεται ελαστικά.

Λόγω κάποιων ανωμαλιών στην οροφή, τοποθετήθηκε σε αυτήν μια διπλή λωρίδα από γυψοσανίδες για την ομαλοποίηση της επιφάνειας, για την τοποθέτηση των στρωτήρων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πιλοτικά δωμάτια και σε έτοιμα δωμάτια του ξενοδοχείου είναι (βλέπε «Μετρήσεις στο ξενοδοχείο Α»):

Μέτρηση σε πιλοτικά δωμάτια	$R'_w = 57 \text{ dB}$
Μέτρηση σε έτοιμα δωμάτια	$R'_w = 60 \text{ dB}$

2.3.2 Ξενοδοχείο Β

Στο ξενοδοχείο αυτό έπρεπε για λόγους εσωτερικής διαμόρφωσης των δωματίων, να τοποθετηθούν οι μπρίζες και οι διακόπτες μέσα στους τοίχους (Εικόνα 1). Πρώτες μετρήσεις σε πιλοτικά δωμάτια φανέρωσαν τα προβλήματα της ηχομόνωσης αυτής της κατασκευής. Η ηχομόνωση του τοίχου χωρίς μπρίζες και διακόπτες μετρήθηκε σε $R'_w = 56 \text{ dB}$. Με την τοποθέτηση δέκα κουτιών από τις δύο πλευρές μειώθηκε η ηχομονωτική ικανότητα του τοίχου σε $R'_w = 49 \text{ dB}$ (βλέπε «Μετρήσεις στο ξενοδοχείο Β-1»).



Εικόνα 1: Όψη του διαχωριστικού τοίχου

Η χαμηλή τιμή της ηχομονωτικής ικανότητας του τοίχου δεν μπορούσε να γίνει αποδεκτή για ένα ξενοδοχείο υψηλών απαιτήσεων. Για τον λόγο αυτό δοκιμάστηκε μία κατασκευή με μια επιπλέον γυψοσανίδα μεταξύ των δύο ορθοστατών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαίωσαν την ορθότητα της πρότασης (βλέπε «Μετρήσεις στο ξενοδοχείο Β-2»).

Τοίχος χωρίς μπρίζες και διακόπτες	$R'_w = 56 \text{ dB}$
Τοίχος με μπρίζες και διακόπτες	$R'_w = 55 \text{ dB}$

3. Συμπέρασμα

Η ηχομονωτική ικανότητα χωρισμάτων ξηράς δόμησης σε ξενοδοχεία μειώνεται σημαντικά με την τοποθέτηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στον τοίχο. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή των λεπτομερειών σε συνεργασία με τον αρχιτέκτονα και τον ακουστικό σύμβουλο. Επίσης πρέπει να γίνουν έγκυρα ακουστικές μετρήσεις σε πιλοτικά δωμάτια για την επιβεβαίωση της ηχομόνωσης των δομικών στοιχείων στις συνθήκες του έργου. Μόνο έτσι υπάρχει ο απαραίτητος

χρόνος για πιθανές προσαρμογές των λεπτομερειών στις ιδιαιτερότητες του έργου.

4. Αναφορές

- [1] “Κτιριοδομικός Κανονισμός”, Απόφαση 3046/304 της 30.1/3.2.1989, ΦΕΚ 59Δ
- [2] DIN 4109, “Sound insulation in buildings; requirements and verifications”, 1989
- [3] Knauf, “Συστήματα εσωτερικής τοιχοποιίας”, Τεχνικό φυλλάδιο W11, Ιανουάριος 2004
- [4] EN 12354-1, “Building acoustics, Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms”, 1999

Μετρήσεις στο ξενοδοχείο Α

Περιγραφή τοίχου

Τοίχος ξηράς δόμησης τύπου W115 με συνολικό πάχος 155 mm

Περιγραφή δομικών στοιχείων

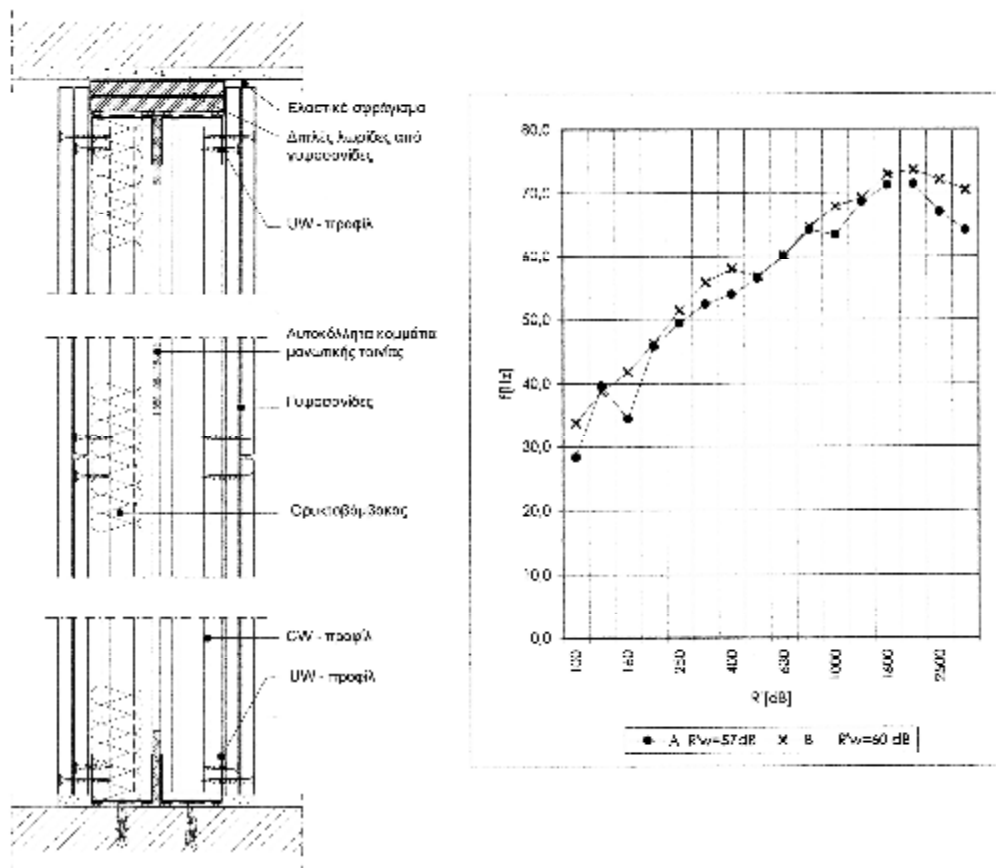
Οροφή / Δάπεδο	Οπλισμένο σκυρόδεμα 250 mm
Τοίχος πρόσοψης	Τουβλοδομή με επιφανειακή μάζα 250 kg/m ² Επένδυση με διπλές γυψοσανίδες, ορυκτοβάμβακας στο διάκενο
Τοίχος διαδρόμου	Τοίχος τύπου W112 με συνολικό πάχος 125 mm

Περίπτωση Α

Χώρος δοκιμής στο εργοτάξιο του ξενοδοχείου Α

Περίπτωση Β

Ολοκληρωμένο δωμάτιο στο ξενοδοχείο Α



Μετρήσεις στο ξενοδοχείο Β-1

Περιγραφή τοίχου

Τοίχος ξηράς δόμησης τύπου W115 με συνολικό πάχος 155 mm

Χώρος δοκιμής του ξενοδοχείου Β

Περιγραφή δομικών στοιχείων

Οροφή / Δάπεδο Οροφή Zoellner με τούβλα

Τοίχος πρόσωσης Τουβλοδομή με επιφανειακή μάζα 180 kg/m²
Επένδυση με διπλές γυψοσανίδες, ορυκτοβάμβακας
στο διάκενο

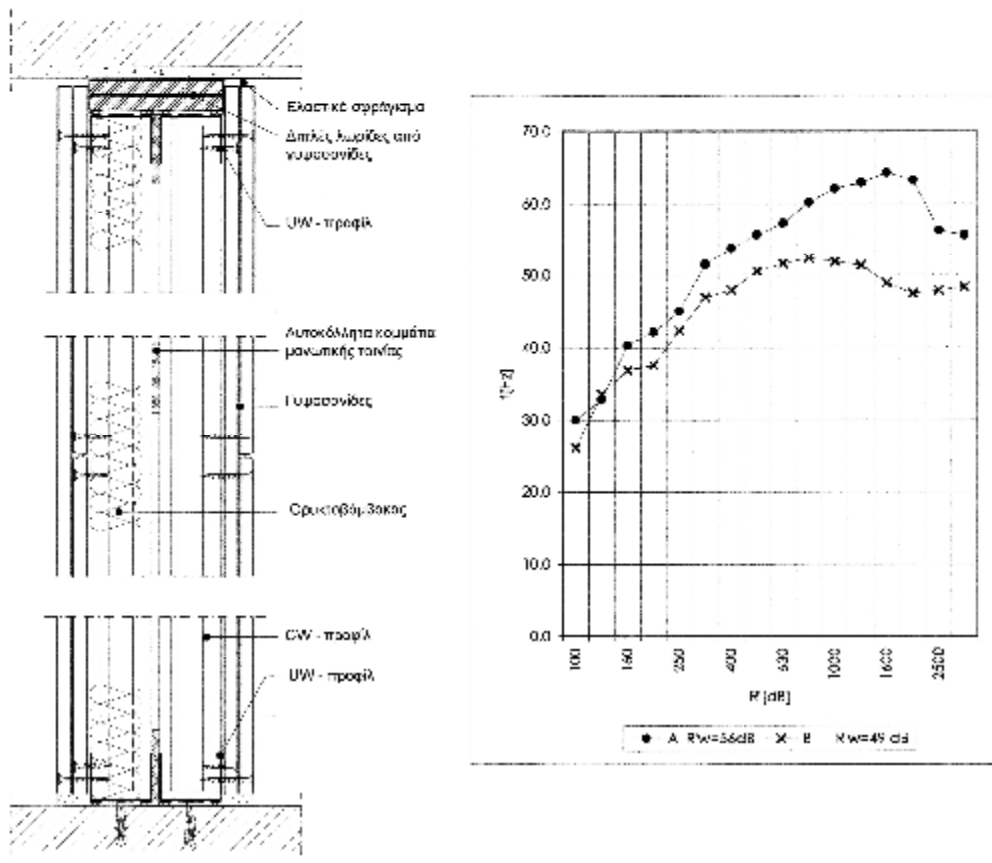
Τοίχος διαδρόμου Τοίχος τύπου W112 με συνολικό πάχος 125 mm

Περίπτωση Α

Χωρίς ηλεκτρικές εγκαταστάσεις

Περίπτωση Β

Με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις



Μετρήσεις στο ξενοδοχείο B-2Περιγραφή τοίχου

Τοίχος ξηράς δόμησης τύπου W115 με συνολικό πάχος 155 mm

Με επιπλέον μια γυψοσανίδα στον άξονα συμμετρίας του τοίχου

Χώρος δοκιμής του ξενοδοχείου B

Περιγραφή δομικών στοιχείων

Οροφή / Δάπεδο Οροφή Zoellner με τούβλα

Τοίχος πρόσοψης Τουβλοδομή με επιφανειακή μάζα 180 kg/m²

Επένδυση με διπλές γυψοσανίδες, ορυκτοβάμβακας στο διάκενο

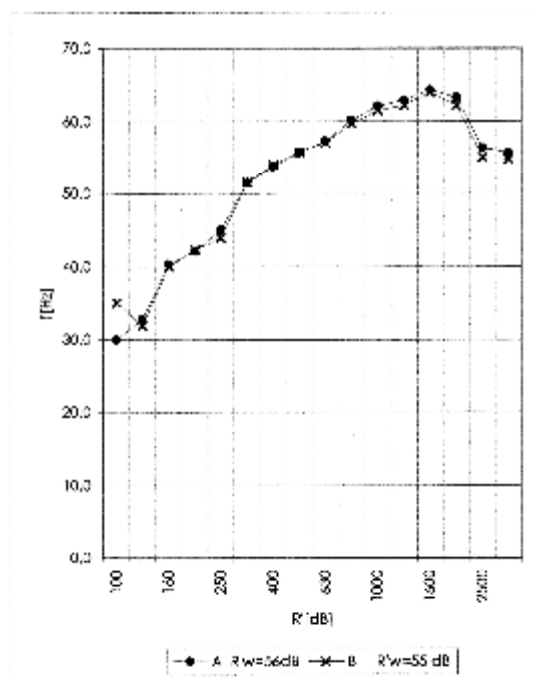
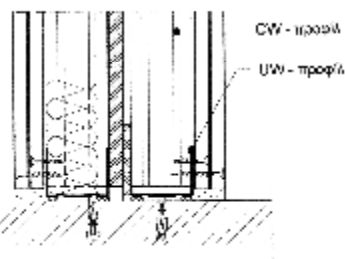
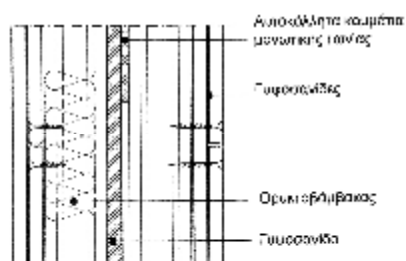
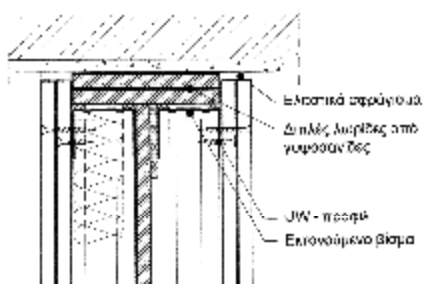
Τοίχος διαδρόμου Τοίχος τύπου W112 με συνολικό πάχος 125 mm

Περίπτωση A

Χωρίς ηλεκτρικές εγκαταστάσεις

Περίπτωση B

Με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις



Λογισμικό για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης αιθουσών

Ανδρέας Ρουσούνελος
Απόφοιτος ΤΕΙ Μουσικής
Τεχνολογίας και Ακουστικής
rous_adr@hotmail.com

Gottfried Schubert
Σύμβουλος Ακουστικής
schubert@ath.forthnet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το λογισμικό *Simple RT*, είναι ένα εργαλείο για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης ενός χώρου σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά αυτού, όπως ο όγκος του, η συνολική του επιφάνεια και οι ακουστικές ιδιότητες της κάθε μίας επιφάνειας ξεχωριστά. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει τον τύπο υπολογισμού του χρόνου αντήχησης, είτε κατά Sabine, είτε κατά Norris-Eyring. Υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής του αποτελέσματος σε μορφή .doc, το οποίο περιλαμβάνει πίνακα με τις επιφάνειες του χώρου και την ηχοαπορροφητική ικανότητα τους, κατάλογο με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη και γραφήματα με τον χρόνο αντήχησης και τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται ο χώρος. Το πρόγραμμα συνοδεύεται από μια βάση δεδομένων με πολλά ηχοαπορροφητικά υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους προς μελέτη χώρους.

ABSTRACT

Simple RT is a useful tool that calculates the reverberation time of auditoria regarding to their characteristics: volume, total area and acoustical properties of each surface. The user has the capability to select between the formula of Sabine or Norris-Eyring. The calculated data can be printed on the screen, paper and also can be exported as word file (doc file). Output data contains list of the surfaces with their absorption, list of the materials that are used in the project and graphs of the reverberation time versus time. The optimum reverberation according to DIN standards relevant to the use of auditorium is shown. The software has a database with many sound absorbing materials that can be used in the projects.

Εισαγωγή

Το λογισμικό *Simple RT* είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης (Reverberation Time – RT) ενός κλειστού χώρου. Το πρόγραμμα λειτουργεί σε περιβάλλον MS Windows (98 και νεότερο) χωρίς να έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και μνήμης. Έχει αναπτυχθεί με την γλώσσα προγραμματισμού C++ στο ολοκληρωμένο αναπτυξιακό περιβάλλον Borland C++ Builder 6 [1].

Σκοπός της ανάπτυξης του λογισμικού ήταν η εύκολη πραγματοποίηση ακουστικών μελετών σύμφωνα με την εμπειρία επαγγελματιών του χώρου. Ευχρηστία στο πρόγραμμα προσφέρει η εύκολη εισαγωγή δεδομένων σχετικά με τον προς μελέτη χώρο αλλά και η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων αυτών και των αποτελεσμάτων, αναλυτικά με γραφήματα, σε μορφή .doc του MS Word. Τα αποτελέσματα υπολογίζονται για τις οκτάβες 125Hz-4KHz.

Τέλος το πρόγραμμα συνοδεύεται από μια βάση δεδομένων με δομικά υλικά των οποίων οι ακουστικές ιδιότητες έχουν δοθεί από τις κατασκευάστριες εταιρίες ή βιβλιογραφία. Το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα ούτως ώστε να καλύψει τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη.

1. Θεωρητικά στοιχεία

Ο χρόνος αντήχησης είναι ο χρόνος που χρειάζεται, ώστε η ηχοστάθμη σε ένα χώρο να μειωθεί κατά 60 dB και γι' αυτό συμβολίζεται RT_{60} . Ο Sabine όρισε αυτό το μέγεθος για πρώτη φορά σύμφωνα με την γεωμετρία και τις ακουστικές ιδιότητες του κάθε χώρου, με έναν εμπειρικό μαθηματικό τύπο που έχει πάρει το όνομα του.

$$RT_{60} = \frac{0,163 \cdot V}{A} \quad (1.1)$$

όπου:

RT_{60} = ο χρόνος αντήχησης σε sec

V = ο όγκος του χώρου σε m^3

A = η συνολική απορρόφηση όλων των επιφανειών σε sabines

Η συνολική απορρόφηση είναι το γινόμενο της συνολικής επιφάνειας επί το μέσο συντελεστή απορρόφησης όλων των υλικών του δωματίου.

$$A = S \bar{a} \quad (1.2)$$

Όπου ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζεται ως εξής:

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 + \dots + a_n s_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n} \quad (1.3)$$

Ένας άλλος χρήσιμος τύπος είναι αυτός που προτάθηκε από τους Norris-Eyring και αφορά χώρους με μεγάλη απορρόφηση.

$$RT_{60} = \frac{0,163 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{a})} \quad (1.4)$$

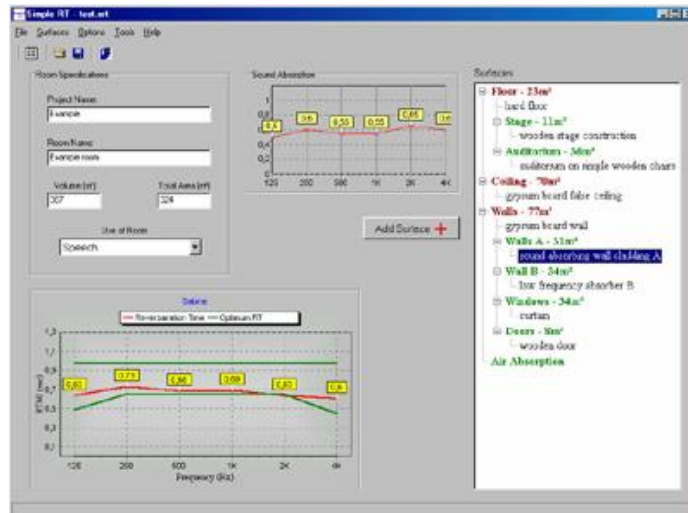
2. Το περιβάλλον της εφαρμογής

Το κυρίως περιβάλλον της εφαρμογής (Σχήμα 1) χωρίζεται λειτουργικά σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος ο χρήστης εισάγει τα χαρακτηριστικά του προς μελέτη χώρου όπως το όνομα, η χρήση για την οποία προορίζεται, ο όγκος και η συνολική επιφάνεια του, καθώς και το όνομα της εργασίας. Στο δεύτερο μέρος εμφανίζονται σε μια δενδροειδή λίστα όλες οι επιφάνειες, οι υποεπιφάνειες, το εμβαδόν και τα υλικά αυτών. Επίσης τοποθετώντας τον κέρσορα πάνω σε ένα από τα υλικά των επιφανειών εμφανίζεται η αντίστοιχη καμπύλη ηχοαπορρόφησης. Στο τελευταίο τμήμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα, αν έχουν εισαχθεί βεβαίως δεδομένα, του χρόνου αντήχησης καθώς και του βέλτιστου χρόνου αντήχησης σύμφωνα με την χρήση του χώρου αν αυτή έχει οριστεί.

Εισαγωγή επιφανειών γίνεται απλά μέσω μιας φόρμας στην οποία μπορούμε να καθορίσουμε το όνομα, το εμβαδόν και το υλικό της επιφάνειας αυτής όπως επίσης και τις υποεπιφάνειες που περιέχει. Υλικά για κάθε επιφάνεια μπορούμε να διαλέξουμε μέσα από την βάση δεδομένων. Για να γίνεται πιο εύκολη η αναζήτηση

των υλικών μπορούμε να ορίσουμε φίλτρα σύμφωνα με τον τύπο, την εταιρία παραγωγής και τη φασματική απόκριση του υλικού, όπως επίσης να ψάξουμε ένα υλικό σύμφωνα με το όνομα του.

Η βοηθητική εφαρμογή (Σχήμα 2) που σχετίζεται με την διαχείριση της βάσης δεδομένων και εκτελείται σαν ανεξάρτητο πρόγραμμα ή μέσω του Simple RT, επιτρέπει την προσθήκη νέων υλικών και την κατηγοριοποίηση τους, την διαμόρφωση υπαρχόντων υλικών καθώς επίσης και την διαγραφή τους.

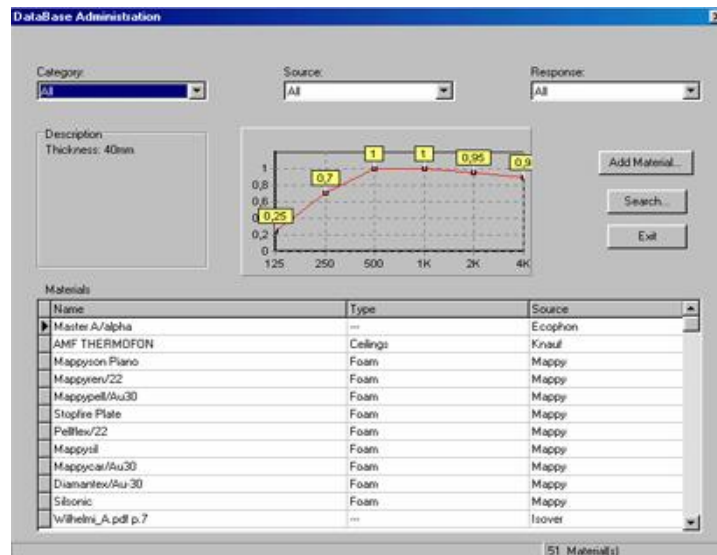


Σχήμα 1. Κυρίως πλαίσιο της εφαρμογής

3. Ακουστική μελέτη

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να εξάγει τα δεδομένα κάθε έργου σε αρχείο εγγράφου του MS Word πραγματοποιώντας μια ολοκληρωμένη ακουστική μελέτη. Το εξαγόμενο αρχείο περιλαμβάνει το εξώφυλλο, που αποτελείται από το λογότυπο του προγράμματος και στοιχεία για τον μελετητή και το έργο, λίστα με όλες τις επιφάνειες του χώρου (επιμέτρηση), λίστα των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο έργο με τις αντίστοιχες καμπύλες ηχοαπορρόφησης τους, πίνακα με τα ακουστικά δεδομένα των επιφανειών του χώρου (calculation sheet) και τέλος γράφημα του χρόνου αντήχησης του χώρου της μελέτης.

Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το κείμενο σύμφωνα με τις ανάγκες του απλά μέσω του κειμενογράφου Word. Αυτό προσφέρει ευελιξία στο μελετητή ο οποίος μπορεί να προσθέσει κείμενο ή να αλλάξει την εμφάνιση του υπάρχοντος. Η εκτύπωση της μελέτης γίνεται μέσω του Word.



Σχήμα 2. Διαχείριση της βάσης δεδομένων

Συμπεράσματα

Το Simple RT είναι ένα λογισμικό το οποίο υπολογίζει τον χρόνο αντήχησης μίας αίθουσας, εισάγοντας τα γεωμετρικά στοιχεία της καθώς επίσης και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη. Γίνεται χρήση βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει της ακουστικές ιδιότητες πολλών κοινών καθώς και ηχοαπορροφητικών υλικών. Η βάση δεδομένων συνεχώς ανανεώνεται ούτως ώστε να μπορεί να καλύψει μεγάλο φάσμα των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε ακουστικές μελέτες. Από τις γραφικές παραστάσεις του χρόνου αντήχησης μπορούμε να επιλέξουμε τα κατάλληλα υλικά ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης. Η χρήση του προγράμματος έδειξε ότι πρόκειται για ένα εύχρηστο εργαλείο για τους μελετητές ώστε γρήγορα, εύκολα και με ακρίβεια να εξάγουν συμπεράσματα για την ακουστική του χώρου.

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε πολύ τον κύριο Χρήστο Κουτσοδημάκη για την πολύτιμη συμβολή του στην ανάπτυξη του λογισμικού.

Αναφορές

- [1] Borland Software Corporation, "Borland C++ Builder 6 Developer's Guide", 2002
- [2] DIN 18041:1968-10, "Acoustical quality in small to medium-sized rooms", May 2004

Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modeling

Panagiotis Tzevelekos and Georgios Kouroupetroglou
National and Kapodistrian University of Athens
Department of Informatics and Telecommunications
{koupe, taktzev}@di.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε την ανάπτυξη ενός πλαισίου μεθοδολογιών, οι οποίες επιτρέπουν αφενός τη δημιουργία ακουστικών αναλύσεων από corpora ηχογραφήσεων ξύλινων πνευστών μουσικών οργάνων και, αφετέρου, την υλοποίηση αντίστοιχων εικονικών μουσικών οργάνων με τη μέθοδο της φυσικής μοντελοποίησης. Έμφαση δίδεται στα παραδοσιακά μουσικά όργανα, ξεκινώντας από τον ζουρνά. Η ανάλυση υπολογίζει τις κατάλληλες ακουστικές παραμέτρους του οργάνου (χρόνοι ανάκρουσης-ελευθέρωσης, κατανομή φασματικών αρμονικών, καμπύλες τονικού ύψους και έντασης κ.ά.). Επίσης, σε συνδυασμό με μετρήσεις από λαρυγγόγραφο, προσδιορίζονται χωριστά στοιχεία τεχνοτροπίας του εκτελεστή. Οι παράμετροι που εξάγονται από τις ακουστικές μετρήσεις είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη αντίστοιχων εικονικών οργάνων με τη μέθοδο της φυσικής μοντελοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της προσέγγισης των ψηφιακών κυματοδηγών, με την οποία προσομοιώνεται η διάδοση του ηχητικού κύματος στο όργανο.

ABSTRACT

In the present paper, we present the development of a framework of methodologies, which allow the creation of acoustic analysis, by woodwind musical instrument recordings corpora, as well as the implementation of virtual instruments, by physical modeling. We emphasize on traditional instruments, starting with the zournas. By analysis, acoustical aspects of the instrument are derived (attack-release time, spectral harmonic distribution, pitch and intensity contours et.c.). Moreover, in conjunction with measurements by a laryngograph, features of the player's performance style are recovered. The parameters extracted are necessary for developing virtual instruments by physical modeling. To be more precise, digital waveguide models will be used to simulate the sound wave propagation in the instrument.

1. INTRODUCTION

Woodwind instruments have a long tradition in many countries. A wide range of scientists, from physicists to musicologists, conducted research on their acoustics [1,2,3]. However, most studies refer to classical western instruments. Research on traditional non-western instruments begun not many years ago [4] and the results are considered valuable for musicological scopes, as well as for the sound synthesis industry.

The *shawm* was the most widespread woodwind double reed instrument of the Middle Ages and is still found throughout Europe, North Africa, Middle East, India and China. It is considered to be the ancestor of the oboe. The Greek shawm-like instrument is called *zournas* and is considered to derive from the Ancient Greek

aulos. There are several types of zournas, which differ in size, number of holes and other characteristics.

In this paper, we present acoustical properties of a certain type of zournas, which derived from recordings of performance by an expert player. They are presented and commented in section 2. In section 3, we discuss about characteristics of the player's performance and how they are related to measurements taken. Last, we suggest the steps necessary for virtual instrument implementation.

2. ACOUSTICAL ASPECTS OF THE ZOURNAS

2.1 Technical Issues

Zournas, as most woodwind instruments, consists of three major parts as shown in Fig. 1. The mouthpiece is shown in Fig. 2. The cane double reed acts as a pressure controlled valve. Through the connector, which is covered with fiber, the embouchure connects to the instrument bore. The cylindrical part, some times conical, at the end of the mouthpiece, as shown in Fig. 2, is usually made of cork, and is entered inside the instrument bore.

The bore is conical, like the one of the oboe. The number of toneholes depends on the type of zournas. The one that we used for the recordings had 7 toneholes and a register tonehole on its back side. It was tuned in *Sib Uşşac* mode.

The bore ends up at a bell. The flare of the bell also depends on the type of zournas. However, in most types the flare is bigger compared with the bell of an oboe. Round the bell, one can usually find small holes. These are not toneholes, but are made for better air flow inside the bore, which leads to a better overall tuning of the instrument.

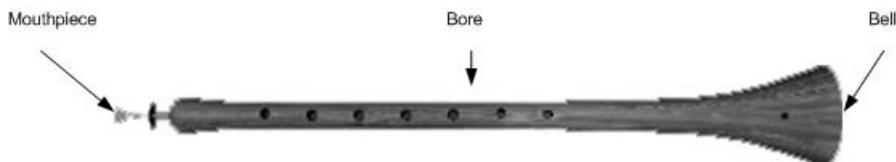


Fig. 1. The zournas consists of three parts: the mouthpiece/reed assembly, the instrument bore and the bell.

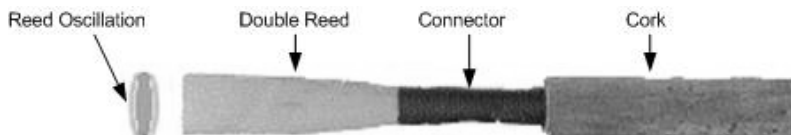


Fig. 2. The zournas mouthpiece and reed assembly.

Some facts for the zournas we used are presented in Table 1 and Table 2.

Table 1: Geometrical and technical features for the zournas used.

Mouthpiece		Bore		Bell	
Reed length	1,5 cm	Bore diameter	2 cm	Bell diameter	8 cm
Connector length	1,9 cm	Tonehole diameter	0,6 cm		
Cork length	1,9 cm	Total instrument length		34,5 cm	
Diameter at the end	0,6 cm				
Reed opening at rest	0,1 cm				

Table 2: Tonehole distance from bore start.

Tonehole Number	Distance (cm)
1	6,2
2	8,7
3	11,2
4	13,7
5	16,4
6	18,6
7	21,4
Register tonehole	7,5
Bell holes	27

2.2 Recording the zournas

For the recordings of the zournas, an LCM 85 LP microphone, by SD Systems, was used. This microphone attaches to the bell of the zournas and is considered to be a good choice for recording woodwind instruments. Sound recorded into a Yamaha AW16G Audio Workstation with a sampling frequency $f_s = 44,1$ KHz .

During the performance, a Field Electro-Laryngograph by Laryngograph LTD was used, in order to register the vocal folds' motion. A pair of electrodes is positioned on the player's neck, in front of the wings of the thyroid cartilage and connects to laryngograph's main body. Laryngograph outputs a signal, which is recorded in synchronisation with the signal from the zournas. By analysis of the laryngograph's waveform, one can find out whether the player's vocal folds were used during the performance and with what way.

The player who performed was a professional zournas player. He used his own zournas, described in paragraph 2.1. He started by playing a melodic up and a melodic down *Sib Uşşac* mode, the tune mode of the zournas. Then, we asked him to play separately every note, covering the instrument's whole range. Due to the double reed excitation mechanism, pitch of the note played is greatly determined by the blowing pressure. Hence, for every fingering, two recordings took place. At the first, the player tried to produce the correct pitch which corresponds to the certain fingering. At the second, the player kept the same fingering, while altering the blowing pressure from a minimum to a maximum and, thus, altering the pitch. The second set of notes is only used for pitch and harmonic deviation measurements. 15 notes were played and recorded with both ways. Last, the player performed a traditional music piece named *Makrynitsa*.

During the performing, temperature and humidity conditions did not change appreciably.

2.3 Measurements and results

Each recording was saved as a .wav sound file and analyzed. The time domain waveform was used to obtain data about the attack and release time, the intensity envelope and the pitch deviation of each note. For these calculations the Sony Sound Forge 7.0 and the Praat 4.2.06 software was used. Although the Praat software is usually used for speech synthesis and phonetics analysis, we found that is also suitable for musical acoustic analysis.

In Table 3, the attack and release time for every note, as well as their mean values and standard deviations. For naming the notes we use the latin system (la³ = 440 Hz). The symbol ↓ shows a note lowered by an interval of 1/4 tone (U_{ssac} mode). The notes correspond to the fingering and not the actual pitch. From the statistic results, the sol³↓ data were excluded, according to Chauvenet's criterion.

By the results, it is obvious that the zournas has relatively quick attack and release, which is common for woodwind instruments. Comments on specific notes will be made later on, as they arrive from performance issues.

Table 3: Attack and release time for blowing pressure every note

Note	Attack (sec)	Release (sec)
Sol ³ ↓	0,057	0,027
Sol# ³	0,034	0,026
Sib ³	0,031	0,025
si ³	0,035	0,028
do ⁴ ↓	0,023	0,022
do ⁴	0,023	0,022
Do# ⁴	0,017	0,023
re ⁴	0,017	0,020
re# ⁴	0,020	0,020
mi ⁴	0,014	0,015
fa ⁴	0,016	0,014
fa# ⁴	0,027	0,023
Sol ⁴ ↓	0,025	0,023
Sol# ⁴	0,018	0,020
Sib ⁴	0,038	0,022
Average \bar{x}	0,024	0,022
Average Deviation		
$S_{\bar{x}}$	0,006	0,003

Table 4: Pitch variations for variable levels, during certain fingerings.

Note Fingering	Reference Pitch (Hz)	Min Pitch (Hz)	Max Pitch (Hz)	Max-Min Difference (Hz)
sol ³ ↓	380,84	372,8	412,0	39,20
sol# ³	415,31	406,8	446,8	40,00
si ^{b3}	466,16	387,4	489,3	101,9
si ³	493,88	458,0	545,6	87,60
do ⁴ ↓	508,35	437,0	556,0	119,0
do ⁴	523,25	465,2	661,8	196,6
do# ⁴	554,36	487,5	625,7	138,2
re ⁴	587,34	560,1	743,0	182,9
re# ⁴	622,26	550,5	749,7	199,2
mi ⁴	659,26	626,9	783,7	156,8
fa ⁴	698,46	644,7	842,7	198,0
sol ⁴ ↓	761,68	679,7	863,2	183,5
sol# ⁴	830,62	759,8	953,2	193,4
si ^{b4}	932,32	780,6	1127,4	346,8

Perhaps the most characteristic feature of the zournas is the ability that gives the player to significantly change the pitch of the note played by changing the air pressure blown. This is also true for all reed woodwinds [5], but for the zournas the effect is so drastic that prohibits the player from playing the same note in different volume levels. The second set of recordings, described in paragraph 2.2, was held to examine this effect.

On Table 4, a list of pitch variation data is given for various fingerings. The reference pitch corresponds to the certain fingering, using the equally tempered tuning. The minimum and maximum frequency values derived from a pitch contour that Praat software provides. It is seen, that is more difficult to change pitch with blowing pressure for lower notes, lower frequencies, while higher notes tend to be more flexible in pitch variation. For the highest note si^{b4} a pitch shift of 348,8 Hz was measured. The spectrogram and the pitch contour of this note are shown in Fig. 3. The deviation is obvious in both graphs. The high leap in the pitch contour at the end of the recording is due to the fact that strong overblowing caused sound to “crack”. This happened in many recordings of this set.

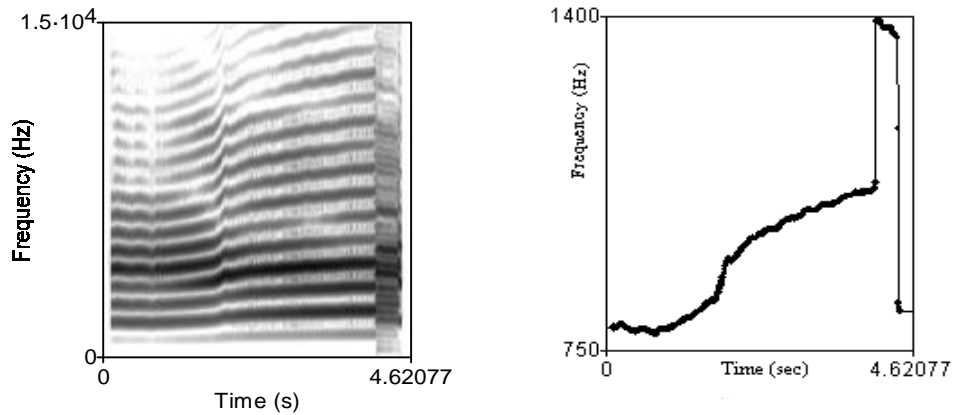
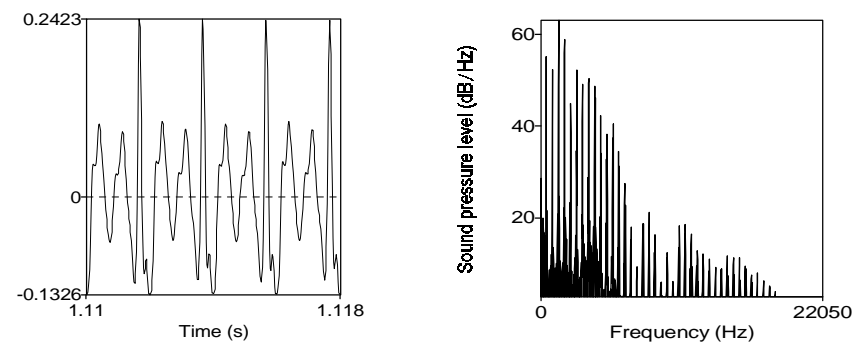
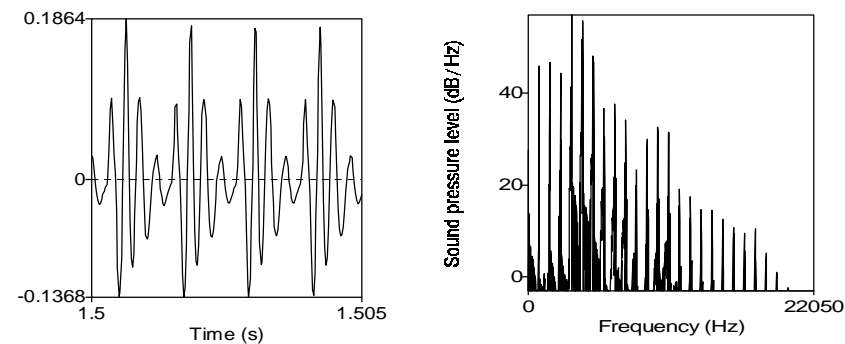


Fig. 3. Spectrogram and pitch contour graph for note sib^4 while changing the blown air pressure. The pitch shift is obvious.



(a) sib^3



(b) $sol\#^4$

Fig. 4. (a) Waveform and spectrum for note sib^3 and (b) similar for note $sol\#^4$.

In Fig. 4(a), the waveform of note sib^3 and the corresponding spectrum are presented, as given by Praat software, and in Fig. 4(b) the same graphs for note

sol#⁴. The spectrums were produced by Praat's FFT (Fast Fourier Transform) algorithm.

By examining the spectrum in these examples, as well as the spectrum of every note, it is clear that the sound output of the zournas exhibits a very rich harmonic distribution. First of all, the spectrum contains both odd and even harmonics, as expected for an instrument with conical bore. We come across strong harmonics up to the region of 8-10 KHz, depending on the note. In both examples is obvious, that the prominent harmonic is not the fundamental one. This is common for woodwinds with conical bores e.g. the oboe. It is due to the fact that such bores show peaks rising in height with increasing frequency, in their impedance graphs. Therefore, the radiated spectrum initially rises with increasing frequency until, above cutoff, it typically falls [6].

The double reed effects are seen both in the waveforms and the spectrums. The reed channel in the double reed is long and narrow (though not as narrow as in oboe's) and, as well as introducing inhibiting flow separation and inducing a Bernoulli effect, this long channel introduces appreciable flow resistance and cause the reed to be always in beating mode [6]. All harmonics of the flow are reinforced by resonances. This means, that the waveforms can be quite asymmetrical, which was obvious in most of them. Reed harmonics strongly shape the rich spectrum of zournas.

The flared bell of the zournas is also of great importance. As in horns, the flared bell acts like a highpass filter, meaning that the reflection point for waves of low frequency is further inside the mouth of the bell than for those of high frequency [3,6].

All the features mentioned above give the zournas a bright, strong and reedy timbre. The relatively short-lengthened bore, the flared bell and the wider reed make its sound not as warm as oboe's but acute and strident.

3. THE PLAYER'S MUSIC PERFORMANCE

Unfortunately, recovering physical playing parameters from the sound analysis to characterize a performance or a performer is still an open problem [7]. In this paper, we use the results discussed in the later section in conjunction with the signal from the laryngograph to obtain information about the player's performance tendencies and style.

Attack and release time issues were discussed in paragraph 2.3. Data on Table 3 showed that attack and release time for the zournas are quite short. However, by taking a closer look in these data, one can spot some differences from note to note which are not accidental, but have to do with the performer. Longer attack times are noticed in notes difficult to play, such as very high or very low notes (e.g. sol³↓, sol#³, sib⁴) and notes not belonging in the natural tuning of the instrument (e.g. fa#⁴). For these notes, it is harder for the player to attain the right pitch. He needs more time to adjust the blowing pressure, or the position of his fingers over the toneholes, in order to tune. Thus, in the time necessary to build up the correct sound, that is the attack time, few milliseconds are added. This argument was confirmed by the player. Release times are not affected in that way, and thus show smaller deviation.

The fact that the pitch of a note is easily bended by the blowing pressure, forces the player to use the same level of dynamic throughout a note. He can't change from a *pp* to an *f* without changing the pitch of the note played. To get the right pitch he

played rather loud. He usually accented his attacks, at both the note by note recordings and the music piece recordings. This was either because of the pitch problem mentioned, or because he set the reed beating quite abruptly. It was also observed that he stored a great amount of air in his mouth, in order to maintain a convenient air flow in the reed and easily adjust the pitch.

The results taken from the laryngograph's signal were of great importance. It was found that throughout most of the player's performances, there was no movement of its arytenoids, aryepiglottic fold or vocal folds in an oscillating manner, as during speech or singing. The signal of the laryngograph is in this case aperiodic. This was observed at the first and second recorded set of the 15 separate notes. However, the signal recorded during the performance of the piece *Makrynitsa* had some very interesting aspects. Even though, in the biggest part of the piece, the signal showed that the player breathed and blew without using his vocal folds, there were very short instances where the laryngograph's signal came periodic, revealing an oscillating motion of the player's vocal folds.

In Fig. 5 such a point is presented. The figure contains three graphs. The upper is the sound waveform. The middle shows the pitch (bold) and the intensity (normal) contours. The lower is the signal obtained by the laryngograph. All graphs are drawn for the same time window of 551 ms. In the laryngograph's signal, at approximately 11,85 s and 12,02 s, periodic forms arise which, as mentioned above, imply a periodic movement of the player's vocal folds. It is interesting that at the exact time points, similar oscillations are observed in the pitch and intensity contours, while the amplitude in the sound waveform falls.

Fast periodic pitch variations are common in singing and instrument performances and produce the *vibrato* effect. Practically, vibrato is usually followed by *tremolo*, a periodic amplitude variation. Both vibrato and tremolo are present in our example. Oscillation of the vocal folds during vibrato means that the player used throat vibrato. Vibrato is generally believed to be produced on woodwind instruments by using one of three sets of muscles: those of the abdomen and diaphragm, of the throat, and of the lip of jaw. It appears that the air column was modulated by movement of the vocal folds [8]. This caused changes in the speed and amount of air reaching the reed of the zournas, and resulted in changes in the intensity of the sound. Assuming constant pressure from the abdominal muscles, the volume and intensity of the air would decrease as the vocal folds are approximated. As they are opened, the volume and intensity would increase. Research on woodwind vibrato is found for western instruments [8].

The player stated that he didn't use vibrato willingly nor did he realize doing it. He believed that he might have used it spontaneously, due to the nature of the notes played at the time. Similar vibrato evidence was found in rather long valued non legato notes throughout his performance. Therefore, short vibrato in similar points can be considered as a characteristic feature of his performance.

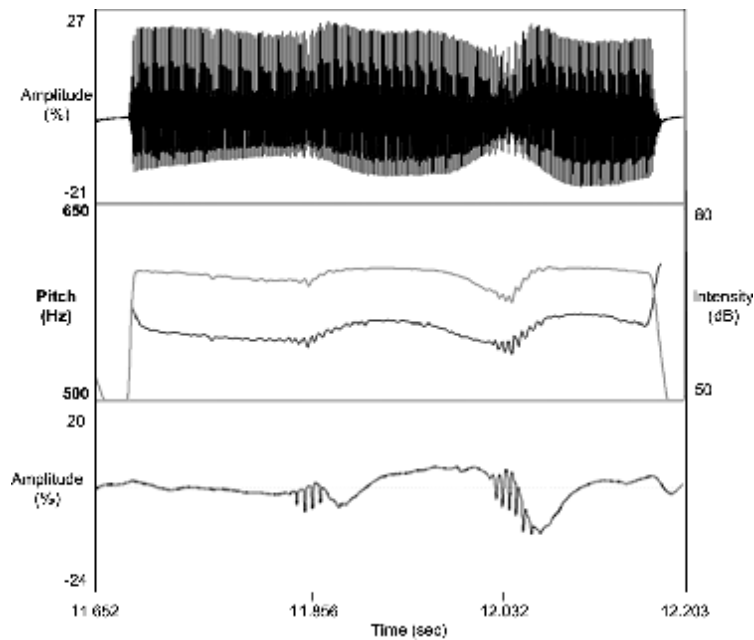


Fig. 5. From top to bottom, the waveform, the pitch (bold) and intensity contours and the laryngograph's signal for a time window of 511 ms of the music piece *Makrynitsa* are shown. Vocal fold oscillation and vibrato effect are evident.

4. VIRTUAL MUSIC INSTRUMENTS

4.1 Physical Models

Physical models describe the mechanism that the instrument uses to produce and propagate sound. They are based on mathematical models than can describe the physical acoustics of the instrument. That is, if it is likely to collect all the equations corresponding to sound generation and render them by computing means, then the sound output would have great resemblance with the one of the real instrument.

Hence, modeling involves the decomposition of the instrument in several components and the generation of a mathematical description of each component. The combination of these descriptions yields a complete model that can be used in virtual instrument implementation and real-time performance. Fig. 6 (after [9]) shows a typical model of single-reed woodwind instrument. The advantage of this approach is that libraries of components can be built and attached in a favorable way [10].

An important class of physical models is the digital waveguide models. These are essentially discrete-time models resulting from the generic solution of the wave equation that describes the system, often combined with models of lumped elements. The frequency-domain analysis of musical instrument acoustic behavior provides much information regarding the linear components of these systems. Nonlinear behavior, however, is best examined and determined in the time-domain. Digital waveguide techniques provide efficient time-domain simulation (wave propagation), while permitting frequency-domain features to be incorporated into the model in a straight-forward manner [10].

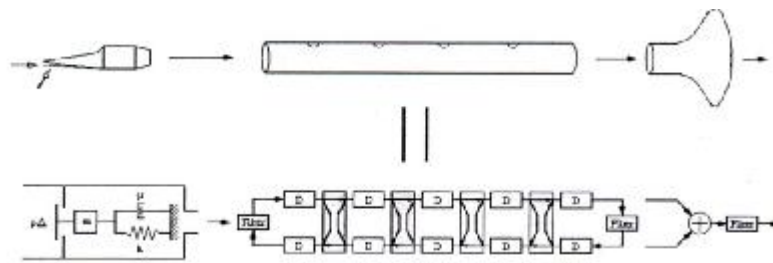


Fig. 6. Typical physical model for woodwind instrument. From left to right one sees the nonlinear excitation mechanism (reed), the instrument bore and the bell. The filters and the delay lines form the digital waveguide.

4.2 Physical Model of the Zournas

To build the physical model of the zournas, one must follow the steps described above, that is to design digital components for the major parts of the zournas: the embouchure, the bore and the bell. To begin with, one must derive the equations that describe the sound generation and propagation in each of the parts, as well as those that describe their connection.

The first part to describe would be the embouchure. Despite the research in single reeds, little is known about double reeds and the aero-acoustic effects that take place during a blow. As in all reed instruments, the reed itself behaves as an oscillator driven by the pressure difference between its inner and outer sides. The two reeds oscillate synchronously, so one could argue that the double reed model could be described by the single-reed model, with few changes. However, the timbre difference between single and double reeds is so great, that is rather logical not to use a single-reed model.

In contrast with single reeds, in a double reed a difference exists between the pressure at the beginning of the reed and the acoustic pressure at the beginning of the bore. This difference is due to the geometry of the canal downstream of the reed, which cause flow perturbations. The flow is restricted to a smaller section of the reed, due to the *Vena Contracta* effect. Such aspects make the modeling of the reed perhaps the most significant part of the entire zournas's model. Models of double reeds were recently proposed, but all scientists agree that more research is to be done for a realistic double reed model [11].

After describing the embouchure, one must continue with the bore. The bore behaves as a linear resonator, which takes input by the excitation mechanism (the embouchure). Delay lines connect to form the digital waveguide in which samples travel, simulating the acoustic wave propagation. Wave phenomena, like reflection, transmission, and viscous-elastic losses that take place in the real instrument, are modeled using filters. In order to calculate reflection coefficients, the acoustic impedance of the mouthpiece and the bore needs to be found.

As far as the bell is concerned, in similar projects the bell filtering effect was included in the bore model. However, since the zournas has a flared bell, a highpass filter added before the output could represent its effect.

Results by recordings and measurements of the real instrument are very important for designing and testing the virtual instrument. On one hand, since waveguides form filters, processing the signal of the real instrument can give transfer functions, impedances and other signal related quantities of the instrument

parts, essential for developing the filters. On the other hand, several acoustical aspects can be used after the implementation process, for testing and calibrating the model [10].

5. CONCLUSION

The results from the analysis presented in this paper can hardly cover all the acoustic aspects of the zournas, nor can they give all the information required for building a virtual zournas. However, this systematic acoustic analysis made for this instrument and both the methodology used and the data gained are very important for continuing the measurements and expanding them.

Further research will include recordings of different types of zournas, played by different players. New data, such as acoustic impedance, air pressure blown and reed signal will be measured. Hopefully, all results gathered, will allow as suggesting a complete model describing the main features of the double-reed, the bore and the bell behavior. Finally, with a complete model of the zournas and the current knowledge about the modeling of waveguides, we hope to achieve implementing a virtual zournas.

By applying the same methodology for other traditional instruments, we target to build a virtual orchestra of traditional Greek instruments, capable of reproducing the sound of real instruments and being controlled in a straight-forward manner by the performer.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Institute of Research of Musical Acoustics (IEMA) and its Director Dr Kostas Moschos for offering technical support and valuable advices, as well as Alexandros Arkadopoulos for performing the zournas. This research was partially supported by the POLYMNIA project of the Operational Programme ANTAGONISTIKOTITA of the Hellenic Secretariat for Research and Technology under the 3rd European Community Support Framework for Greece.

7. REFERENCES

- [1] N. Fletcher, T. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, chapter IV: Wind Instruments, New York, Springer-Verlag, 1998.
- [2] C. Nederveen, *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*, Northern Illinois University Press, DeKalb, 1998.
- [3] G. Scavone, *An Acoustic Analysis of Single-Reed Woodwind Instruments With an emphasis on design and performance issues and digital waveguide modelling techniques*, PhD thesis, CCRMA-Stanford University, 1997.
- [4] A Cyzewski, B Kostek, *Waveguide modelling of the Panpipes*, in *Proceedings of SMAC 03 Stockholm Music Acoustics Conference August 6-9, 2003*, pp. 259-262.
- [5] S. Carral, D. Campbell, T. Rossing, *Relationship Between Blowing Pressure, Pitch and Timbre of Scottish Bellows Blown Bordered Bagpipe*, in *Proceedings of SMAC 03 Stockholm Music Acoustics Conference August 6-9, 2003*, pp. 251-254.
- [6] N. Fletcher, T. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, pp. 491-494, New York, Springer-Verlag, 1998.
- [7] P. Guillemain and T. Voinier, *Characterization of Musical Performance Using Physical Sound Synthesis Models*, in *CMMR 2003, LNCS 2771*, pp. 64-73, 2004, Springer-Verlag, Berlin, 2004.

[8] A. Brown, A Cinefluorographic Pilot Study of the Throat while Vibrato Tones are Played on Flute and Oboe, article on the Internet, URL: <http://www.zainea.com/vibrato.htm>

[9] J. O. Smith III, Physical Modeling Using Digital Waveguides, in *Comp. Music J.*, vol. 16, no. 4, pp. 74-91, 1992.

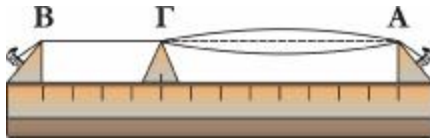
[10] A. Nackaerts, B. de Moore, R. Lauwereins, A Formant Filtered Physical Model for Wind Instruments, in *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 11, no. 1, January 2003.

[11] A. Almeida, C. Vergez, R. Causse, X. Rodet, Experimental Research on Double Reed Physical Properties and its Application to Sound Synthesis, in *Proceedings of SMAC 03 Stockholm Music Acoustics Conference August 6-9, 2003*, pp. 243-246.

Το μουσικό διάστημα κατά τον Αριστόξενο

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης
Καθηγητής Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής
Διευθυντής Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών
hspyridis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ



Στη χορδή ενός εγχόρδου οργάνου διακρίνονται τρία χαρακτηριστικά σημεία: Το ένα πακτωμένο άκρο της Α στον χορδοκράτη, το άλλο πακτωμένο άκρο της Β στο κλειδί και το σημείο Γ του δεσμού (τάστου) επί

του οποίου πατάει το δάκτυλο του μουσικού.

Κατά την Πυθαγόρειο άποψη, τη λογαριθμική, δηλαδή των αριθμητικών λόγων, (6^{ος} αι. π.Χ.) το μουσικό διάστημα αντιμετωπίζεται βάσει του δονουμένου τμήματος ΑΓ της χορδής. Κατά την Αριστοξένειο άποψη, τη γραμμική, (4^{ος} αι. π.Χ.) το μουσικό διάστημα αντιμετωπίζεται βάσει του ακινήτου τμήματος ΒΓ της χορδής.

Η Άλγεβρα, βάσει της οποίας διαχειριζόμεθα τα μουσικά διαστήματα κατά την Πυθαγόρειο άποψη μας είναι γνωστή από του αρχαίους Έλληνες αρμονικούς.

Στην παρούσα εργασία για πρώτη φορά παρουσιάζεται η Άλγεβρα για τη διαχείριση των μουσικών διαστημάτων κατά την Αριστοξένειο άποψη.

ABSTRACT

On the string of a string instrument three characteristic points are defined. Point A is fastened on the bridge, B is fastened on the key, and point Γ on the fret, point on which the musician presses the string. According to the Pythagorean views, the logarithmic i.e. of the ratios, (6 B.C.) the musical interval is faced based on the vibrating part ΑΓ of the string. According to the Aristoxenean views, the linear, (4 B. C.) the musical interval is faced based on the static part ΒΓ of the string.

The Algebra, on which we handle the musical intervals according to the Pythagorean views, is known to us from the ancient Greek Kanonikoi.

In the present paper for the first time is presented the Algebra for the handling of the musical intervals by the Aristoxenean view.

1. Ο δυϊσμός του μουσικού διαστήματος

Στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Αθηνών στα πλαίσια μαθήματος ελεύθερης επιλογής διδάσκω την Ευκλείδειο «Κατατομή Κανόνος». Πρόκειται για μια πυθαγόρεια πραγματεία, η οποία πραγματεύεται τη σχέση που συνδέει μαθηματικές και ακουστικές αλήθειες, αποτελώντας, έτσι, τη βάση για την ακουστική επιστήμη του Δυτικού κόσμου.

Με την έννοια Κανών υπονοείται το μονόχορδο. Είναι το όργανο πειραματισμού και έρευνας των «κανονικών», δηλαδή αυτών που στις μελέτες και τις έρευνές τους χρησιμοποιούσαν τον κανόνα.

Κατατομή σημαίνει την υποδιαίρεση με μουσικομαθηματικές διαδικασίες του μήκους του κανόνος και την τοποθέτηση δεσμών, δηλαδή τάστων, επ' αυτού, προκειμένου να αποδίδονται κατά το ηρμωσμένον τα σύμφωνα μουσικά διαστήματα της τότε μουσικής θεωρίας.



Εντυφώντας κι εμβαθύνοντας στην πραγματεία «Κατατομή Κανόνος», διεπίστωσα ότι ο Ευκλείδης αντιμετωπίζει την έννοια «μουσικό διάστημα» από δύο εντελώς διαφορετικές οπτικές και για την κάθε μια οπτική, μάλιστα, χρησιμοποιεί με μεγάλη αυστηρότητα μια εντελώς διαφορετική ορολογία.

Αυτήν την Ευκλείδειο αντιμετώπιση του μουσικού διαστήματος ονόμασα «δυϊσμό του μουσικού διαστήματος» και πραγματεύομαι στο ομώνυμο σύγγραμμά μου (Εικόνα 1).

Εικόνα 1:

Το σύγγραμμά του καθηγητού Χ. Χ. Σπυρίδη που πραγματεύεται τον δυϊσμό του μουσικού διαστήματος.

Δυϊσμός είναι επιστημονικός και φιλοσοφικός όρος που δηλώνει σε γενική έννοια κάθε διδασκαλία, η οποία σε κάποιο τμήμα του επιστητού ή σε κάποιο θέμα –οποιοδήποτε και αν είναι αυτό– παραδέχεται την ύπαρξη δύο αρχών κατ' ουσίαν διαφορετικών, που δεν μπορεί να αναχθεί απ' ευθείας η μία στην άλλη, παρά μόνον με κάποιον μετασχηματισμό.

Με δυϊσμό λ.χ. αντιμετωπίζεται ο χαρακτήρας του φωτός στην Οπτική. Κυματικός χαρακτήρας κατά τη θεωρία Huygens (17^{ος} αιώνας) και την Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία του Maxwell (μέσον 19^{ου} αιώνα), σωματιδιακός χαρακτήρας κατά τη θεωρία του Newton (17^{ος} αιώνας) και τη θεωρία των φωτονίων του Planck (20^{ος} αιώνας).

Συγκεκριμένα, στην πραγματεία «Κατατομή Κανόνος» ο Ευκλείδης ασχολείται διεξοδικώτατα με τον δυϊσμό του μουσικού διαστήματος, αντιμετωπίζοντας το μουσικό διάστημα αφενός μεν ως μία σχέση δύο αριθμών προς αλλήλους, αφετέρου δε ως μία απόσταση μεταξύ δύο σημείων επί του κανόνος. Δικαιολογείται η ενέργειά του αυτή από δύο σχόλια του Πορφυρίου στην περί της αρμονίας διδασκαλία του Πτολεμαίου, τα οποία αναφέρουν «καὶ τῶν κανονικῶν δὲ καὶ πυθαγορείων οἱ πῆγους τὰ διαστήματα ἀντὶ τῶν λόγων ἡέγουσιν» και «τὸν λόγον καὶ τὴν σχέσιν τῶν πρὸς ἀλλήλους ὄρων τὸ διάστημα καθοῦσι». Αυτά μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην Πυθαγόρειο μουσική θεωρία οι έννοιες «διάστημα» και «λόγος (αριθμητική σχέση ή αναλογία)» είναι ταυτόσημες.

Πρέπει να διευκρινισθεί ότι η σχέση των δύο αριθμών προς αλλήλους εκφράζει το λόγο των μηκών δύο **δονουμένων** τμημάτων χορδής επί του κανόνος, τα οποία ακουστικά υλοποιούν το μουσικό διάστημα.

Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων επί του κανόνος εκφράζει το μήκος του **σιγού-ντος** (=μη ηχούντος) τμήματος χορδής μεταξύ των δύο δεσμών (=τάστων) επί του κανόνος δια των οποίων υλοποιείται ακουστικά το μουσικό διάστημα.

Η πρώτη αντιμετώπιση του μουσικού διαστήματος είναι η Πυθαγόρειος και πραγματοποιείται με λόγους αριθμητικούς. Η δεύτερη αντιμετώπιση του μουσικού διαστήματος είναι η Αριστοξένειος και θεάται το μουσικό διάστημα ως ένα ευθύγραμμο ακίνητο τμήμα μιας τεντωμένης χορδής. Αμφότερες εμπεριέχουν στη φύση τους τη λογαριθμικότητα κατά τη σημερινή Άλγεβρα.

Η με τους αριθμητικούς λόγους αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων είναι περισσότερο «εύπλαστη» κατά τη μαθηματική της επεξεργασία και προτιμητέα από τους γνωρίζοντες Μαθηματικά. Η με τις αποστάσεις μεταξύ δύο σημείων αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων είναι περισσότερο «κατανοητή» από τους μουσικούς εκτελεστές, που δεν κατέχουν μαθηματικές γνώσεις.

Για την κατανόηση του παραπάνω δυϊσμού, θεώρησα καλό να παραθέσω ένα δείγμα εκ των δυϊκών εκφράσεων για το μουσικό διάστημα από την Ευκλείδειο πραγματεία «Κατατομή Κανόνος».

Ἐὰν ἀπὸ ἡμιολίου διαστήματος ἐπίτριτον διάστημα
ἀφαιρεθῆ, τὸ λοιπὸν καταλείπεται ἐπόγδοον.
(Πρόταση η, 1-3)

ἐὰν δὲ ἀπὸ τοῦ διὰ πέντε τὸ διὰ τεσσάρων
ἀφαιρεθῆ, τὸ λοιπὸν τονιαῖόν ἐστι διάστημα τὸ ἄρα
τονιαῖον διάστημά ἐστιν ἐπόγδοον.
(Πρόταση 13, 5-7)

Στην Ευκλείδειο πραγματεία «Κατατομή Κανόνος» από τη χρησιμοποιούμενη διαφορετική ορολογία για την ονομασία των μουσικών διαστημάτων (Πίνακας 1) αντιλαμβανόμεθα την οπτική με την οποία αντιμετωπίζονται από τον Ευκλείδη αυτά.

Πίνακας 1: Ονομασία των μουσικών διαστημάτων με βάση την Πυθαγόρειο ή την Αριστοξένειο οπτική αντιμετώπισέως τους.

Μουσικό Διάστημα	Πυθαγόρειος οπτική	Αριστοξένειος οπτική
$\frac{4}{1}$	τετραπήσιον	δὶς διὰ πασῶν
$\frac{2}{1}$	διπήσιον	διὰ πασῶν
$\frac{3}{2} = 1 + \frac{1}{2}$	ἡμίοηλον	διὰ πέντε
$\frac{4}{3} = 1 + \frac{1}{3}$	ἐπίτριτον	διὰ τεσσάρων
$\frac{9}{8} = 1 + \frac{1}{8}$	ἐπόγδοον	τονιαῖον

Οι πράξεις μεταξύ των μουσικών διαστημάτων στην Πυθαγόρειο αντιμετώπιση του μουσικού διαστήματος διέπονται από μια ιδιαίτερη Άλγεβρα, λογαριθμικού χαρακτήρα, ακατανόητη από τον νου του τότε μη μαθηματικού μουσικού εκτελεστή. Κατ' αυτήν η πρόσθεση μουσικών διαστημάτων πραγματοποιείται με πολλαπλασιασμό των αριθμητικών τους λόγων, ενώ η αφαίρεση μουσικών διαστημάτων

πραγματοποιείται με διαίρεση του αριθμητικού λόγου του μειωτέου δια του αριθμητικού λόγου του αφαιρετέου.

Ο απλός μουσικός οργανοπαίχτης έχει μάθει ότι τα μεγέθη αθροίζονται με πρόσθεση και όχι με πολλαπλασιασμό και η διαφορά τους προκύπτει με αφαίρεση και όχι με διαίρεση. Με αυτή τη φιλοσοφία πραγματοποιούνται οι πράξεις των διαστημάτων κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων, ο βασικότερος λόγος που επεκράτησε ανάμεσα στους μουσικούς εκτελεστές εκείνου του καιρού.

Ο Αριστοξένος τον 4^ο αιώνα π.Χ. επιβάλλει τη «γραμμικότητα» των μουσικών διαστημάτων. Καταργεί τις όποιες Πυθαγόρειες ανισότητες μεταξύ των συνωνύμων διαστημάτων, εισηγούμενος για πρώτη φορά στην ιστορία της Μουσικής τον ίσο συγκερασμό. Κατά τον Αριστοξένο το διάστημα της διαπασών (=οκτάβας) διαιρείται σε έξι ίσους μεταξύ τους τόνους και ο τόνος διαιρείται σε δύο ίσα μεταξύ τους ημιτόνια, σε τρία ίσα μεταξύ τους τρίτα και σε τέσσερα ίσα μεταξύ τους τέταρτα. Σήμερα θα λέγαμε ότι ο Αριστοξένος εισηγήθηκε τους συγκερασμούς στα 6, στα 12, στα 18 και στα 24, δηλαδή τον χωρισμό της οκτάβας σε 6 (κλίμακα ολόκληρων τόνων), σε 12 (κλίμακα 12 ίσων ημιτονίων, όπως τα ισχύοντα ευρωπαϊκά ημιτόνια), σε 18 και σε 24 ίσα μεταξύ τους μουσικά διαστήματα. Η γραμμικότητα σε όλο της το μεγαλείο!

Κακώς διδάσκεται ότι εισηγητής του ίσου συγκερασμού είναι ο J. S. Bach το έτος 1722.

Ο Αριστοξένος ονομάζει μουσικό διάστημα την **απόσταση** ανάμεσα σε δύο φθόγγους διαφορετικού μουσικού ύψους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η έννοια φθόγγος είναι συνώνυμη και της θέσεως του δεσμού που πατάει στο μάνικο μουσικού οργάνου το δάκτυλο του μουσικού εκτελεστού, προκειμένου να παραχθεί ένας ήχος συγκεκριμένου μουσικού ύψους. Κατά τον Κλεονίδη, τον Βακχείο και τον Ανώνυμο του Bellermann μουσικό διάστημα είναι η απόσταση που περιλαμβάνεται ανάμεσα σε δύο φθόγγους, δηλαδή δεσμούς, διαφορετικούς στο ύψος και στο βάθος.

Ο Νικόμαχος γράφει «**διάστημα δ' έστι δυοίν φθόγγων μεταξύτης**», δηλαδή διάστημα είναι ό,τι μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο πατήματα επί του μάνικου.

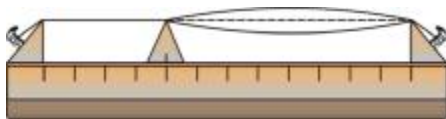
Σε αυτούς τους ορισμούς, θεωρώντας την έννοια φθόγγος με τη σημασία «θέση πατήματος επί του μάνικου του μουσικού οργάνου», το διάστημα αποκτά τη σημασία ενός ακινήτου ευθυγράμμου τμήματος κατά μήκος της χορδής του μονοχόρδου μουσικού οργάνου.

Κρίνω σκόπιμο στο σημείο αυτό να παραθέσω μια εξαιρετικά εύστοχη παρατήρηση του Νεοπυθαγορείου και Νεοπλατωνικού φιλοσόφου Θέωνος του Σμυρναίου (1^{ος}-2^{ος} μ.Χ. αι.) ότι δηλαδή η ταυτοφωνία δεν αποτελεί μουσικό διάστημα, αφού δεν υφίσταται μήκος μη ηχούντος τμήματος της χορδής του κανόνος ή, με άλλα λόγια, το μήκος του μη ηχούντος τμήματος της χορδής του κανόνος είναι μηδενικό («*των κατά το μαθηματικόν χρησίμων εις την Πλάτωνος ανάγνωσιν*», λ, 1-4).

2. Πυθαγόρειο πείραμα Ακουστικής κατά Γαυδέντιο.

Η ενασχόληση του Πυθαγόρα με τη μουσική τον κατέστησε ευτυχί, διότι με την εφαρμογή των Μαθηματικών στο χώρο της Μουσικής και με την πραγματοποίηση «ψυχοακουστικών» πειραμάτων οδηγήθηκε στη σπουδαία και πολύ γόνιμη ανακάλυψη ότι το μουσικό ύψος των φθόγγων εξαρτάται από το δονούμενο μήκος των χορδών. Η ανακάλυψη αυτή προέκυψε από πειράματα, που πραγματοποίησε ο Πυθαγόρας επάνω στον «κανόνα» ή «μονόχορδο» (Εικόνα 2). Με τη βοήθεια κινητού

καβαλάρη (υπαγωγέως ή μαγαδίου) ήταν δυνατόν να υποδιαιρεθεί η χορδή σε δύο τμήματα, ένα δονούμενο (=ηχούν) κι ένα ακίνητο (=σιγούν). Η δόνηση των ηχούτων τμημάτων χορδής παρήγαγε ήχους διαφορετικών μουσικών υψών.



Εικόνα 2: Το μονόχορδο για τη μελέτη των νόμων των χορδών.

Στην εικόνα 3 φαίνεται κατά τον Γαυδέντιο¹ ο τρόπος, που πιθανώς πειραματίστηκε ο Πυθαγόρας επάνω στον κανόνα κι ανεκάλυψε τις αριθμητικές σχέσεις των συμφωνιών.

Διήρесе τη χορδή του μονοχόρδου σε δύο ίσα τμήματα με τη βοήθεια ενός κινητού καβαλάρη, του υπαγωγέα. Έθεσε σε ταλάντωση ολόκληρο το μήκος της χορδής και στη συνέχεια το μισό μήκος αυτής. Διεπίστωσε ότι από τους παραχθέντες δύο ήχους σχηματίσθηκε το διπλάσιο διάστημα $\left(\frac{2}{1}\right)$. Το διάστημα αυτό κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπιση παριστάνεται από το μήκος του ακινήτου τμήματος της χορδής του κανόνας (Εικόνα 3-2^ο μονόχορδο) και ονομάζεται διάστημα διαπασών.

Κατόπιν διήρесе κι αριθμήσε ολόκληρο το μήκος της χορδής του κανόνας σε τρία ίσα τμήματα. Έθεσε σε ταλάντωση ολόκληρο το μήκος της χορδής και στη συνέχεια τα $\frac{2}{3}$ του μήκους αυτής. Διεπίστωσε ότι από τους παραχθέντες δύο ήχους

σχηματίσθηκε το ημιόλιον διάστημα $\left(\frac{3}{2}\right)$. Το διάστημα αυτό κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπιση παριστάνεται από το μήκος του ακινήτου τμήματος της χορδής του κανόνας (Εικόνα 3-3^ο μονόχορδο) και ονομάζεται διάστημα διαπέντε.

Τέλος, διήρесе κι αριθμήσε ολόκληρο το μήκος της χορδής του κανόνας σε τέσσερα ίσα τμήματα. Έθεσε σε ταλάντωση ολόκληρο το μήκος της χορδής και στη συνέχεια τα $\frac{3}{4}$ του μήκους αυτής. Διεπίστωσε ότι από τους παραχθέντες δύο ήχους σχηματίσθηκε το επίτριτον διάστημα $\left(\frac{4}{3}\right)$. Το διάστημα αυτό κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπιση παριστάνεται από το μήκος του ακινήτου τμήματος της χορδής του κανόνας (Εικόνα 3-4^ο μονόχορδο) και ονομάζεται διάστημα διατεσσάρων.

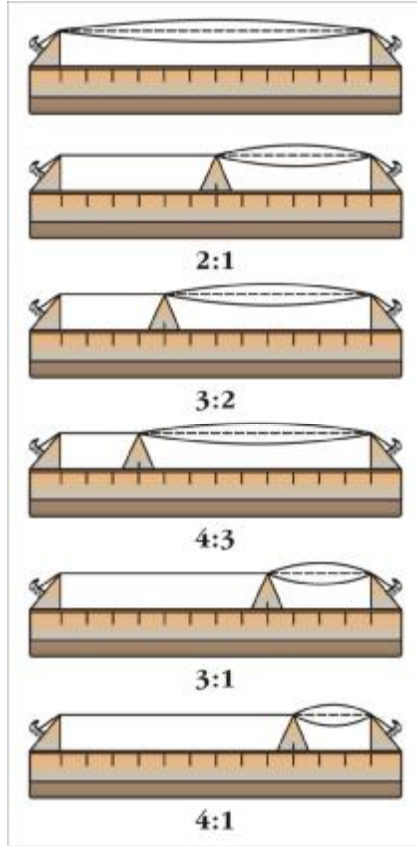
Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ονομασίες των συμφώνων διαστημάτων κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπισή τους προκύπτουν αβίαστα, διότι το μήκος του μη

σχηματίσθηκε το επίτριτον διάστημα $\left(\frac{4}{3}\right)$. Το διάστημα αυτό κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπιση παριστάνεται από το μήκος του ακινήτου τμήματος της χορδής του κανόνας (Εικόνα 3-4^ο μονόχορδο) και ονομάζεται διάστημα διατεσσάρων.

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ονομασίες των συμφώνων διαστημάτων κατά την Αριστοξένειο αντιμετώπισή τους προκύπτουν αβίαστα, διότι το μήκος του μη

¹ Γαυδέντιος ο φιλόσοφος, θεωρητικός της μουσικής. Τοποθετείται από άλλους μεν στον 2^ο με 3^ο αιώνα μ.Χ. από άλλους δε στον 5^ο μ.Χ. αιώνα. Συνέγραψε το βιβλίο «Αρμονική Εισαγωγή», το οποίο αναφέρεται στους ήχους, τα διαστήματα, τα συστήματα, τα γένη κ.λπ. ακολουθώντας άλλοτε τις πυθαγόρειες και άλλοτε τις αριστοξένειες αντιλήψεις.

ηχούντος τμήματος της χορδής καθορίζεται στην περίπτωση της δια τεσσάρων συμφωνίας με τους αριθμούς 12 και 9 (ανάμεσα σε 4 τάστα) και στην περίπτωση της δια πέντε συμφωνίας με τους αριθμούς 12 και 8 (ανάμεσα σε 5 τάστα) (Εικόνα 3).

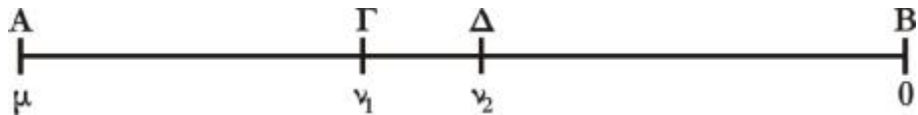


Εικόνα 3: Προσδιορισμός των αριθμητικών σχέσεων των μουσικών συμφωνιών στο μονόχορδο.

3. Η Αλγεβρα για τα μουσικά διαστήματα με βάση τα μη ηχούντα τμήματα χορδής

3.1. Πρόσθεση δύο συνημμένων μουσικών διαστημάτων

Σε κανόνα, που φέρει χορδή μήκους AB διηρημένη σε μ ίσα τμήματα, λαμβάνονται δύο συνημμένα διαστήματα, των οποίων τα μη ηχούντα τμήματα της χορδής είναι τα ΑΓ (m, n_1) και ΓΔ (n_1, n_2) ($m > n_1 > n_2$). Το μήκος του μη ηχούντος τμήματος της χορδής του διαστήματος του αθροίσματός των ισούται με το άθροισμα των μηκών των μη ηχούντων τμημάτων χορδής των δύο δοθέντων διαστημάτων (σχήμα 1)



Σχήμα 1: Πρόσθεση Μουσικών Διαστημάτων

$$|A\Delta| = |A\Gamma| + |\Gamma\Delta| = (m - n_1) + (n_1 - n_2) = m - n_1 + n_1 - n_2 = m - n_2$$

Στην περίπτωση κατά την οποία τα δύο συνημμένα μουσικά διαστήματα είναι ίσα μεταξύ των, τότε τα αντίστοιχα μήκη των μη ηχούντων τμημάτων της χορδής ΔΕΝ είναι ίσα μεταξύ των, δηλαδή $(m, n_1) \neq (n_1, n_2)$ ¹.

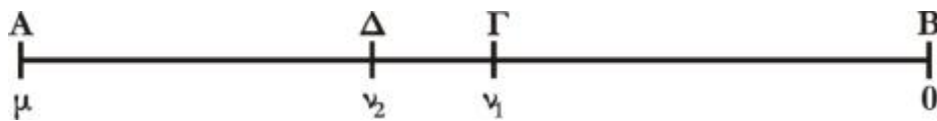
Πράγματι, οι λόγοι των ηχούντων τμημάτων της χορδής των δύο διαστημάτων είναι ίσοι μεταξύ των.

$$\frac{n_1 - 0}{m - 0} = \frac{n_2 - 0}{n_1 - 0} \Rightarrow \frac{n_1}{m} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1^2 = m \cdot n_2 \Rightarrow n_2 = \frac{n_1^2}{m}$$

Η μη γραμμική σχέση αυτή μας δίνει την υποδιαίρεση της χορδής του κανόνος εις την οποία καταλήγει το μήκος του μη ηχούντος τμήματος του δευτέρου (εκ των ίσων) διαστήματος.

3.2. Αφαίρεση δύο μουσικών διαστημάτων με κοινή αρχή

Σε κανόνα που φέρει χορδή μήκους AB διηρημένη σε μ ίσα τμήματα (σχήμα 3), λαμβάνονται δύο διαστήματα κοινής αρχής, των οποίων τα μη ηχούντα τμήματα της χορδής είναι ΑΓ (m, n_1) και ΑΔ (m, n_2) ($m > n_2 > n_1$).



Σχήμα 3: Αφαίρεση δύο Μουσικών Διαστημάτων κοινής αρχής.

Το μήκος του μη ηχούντος τμήματος της χορδής του διαστήματος της διαφοράς των ισούται με τη διαφορά των μηκών των μη ηχούντων τμημάτων χορδής του μειωτέου και του αφαιρετέου. Δηλαδή:

$$|\Delta\Gamma| = |A\Gamma| - |A\Delta| = (m - n_1) - (m - n_2) = m - n_1 - m + n_2 = n_2 - n_1$$

3.3. Μετατροπή Αριστοξενείου εκφράσεως του μουσικού διαστήματος σε Πυθαγόρειο

Δίδεται λ.χ. η ακολουθία των ακεραίων αριθμών 13824 15552 17496, η οποία εκφράζει τρεις δεσμούς επί υποθετικού κανόνος μεταξύ των οποίων καθορίζονται δύο συνημμένα μουσικά διαστήματα (Αριστοξενείος αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων). Ζητείται να εκφραστούν τα εν λόγω διαστήματα υπό μορφήν επιμορίων σχέσεων δύο αριθμών (Πυθαγόρειος αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων).

¹ Περί της προσθέσεως k το πλήθος συνημμένων διαστημάτων επί της χορδής κανόνος, περί του ακεραίου εν δυνάμει «πολλαπλασίου» διαστήματος και περί του ακεραίου εν δυνάμει «υποπολλαπλάσιο» διαστήματος ανατρέξατε στο προμνημονευθέν σύγγραμμά μου, λόγω του επιβεβλημένου περιορισμού του αριθμού των σελίδων.

Το μουσικό διάστημα μεταξύ των αριθμών 13824 15552 κατά την Πυθαγόρειο αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων εκφράζεται από το λόγο

$$\begin{aligned} \frac{15552}{13824} &= \frac{I}{1} \Rightarrow \frac{15552 - 13824}{13824} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \frac{1728}{13824} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{\frac{1}{8} \cdot 13824}{13824} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \frac{1}{8} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow 1 = 8I - 8 \Rightarrow 9 = 8I \Rightarrow \\ &\Rightarrow I = \frac{9}{8} \end{aligned}$$

Άρα $\frac{15552}{13824} = I = \frac{9}{8}$ (διάστημα επογδίου τόνου)

Το μουσικό διάστημα μεταξύ των αριθμών 15552 17496 κατά την Πυθαγόρειο αντιμετώπιση των μουσικών διαστημάτων εκφράζεται από το λόγο

Άρα $\frac{17496}{15552} = I = \frac{9}{8}$ (διάστημα επογδίου τόνου)

$$\begin{aligned} \frac{17496}{15552} &= \frac{I}{1} \Rightarrow \frac{17496 - 15552}{15552} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \frac{1944}{15552} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{\frac{1}{8} \cdot 15552}{15552} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow \frac{1}{8} = \frac{I - 1}{1} \Rightarrow 1 = 8I - 8 \Rightarrow 9 = 8I \Rightarrow \\ &\Rightarrow I = \frac{9}{8} \end{aligned}$$

Το όργανο «Ελικών» εις την κατατομή του κανόνος

Μαρία Χ. Παπαδοπούλου Μαθηματικός, Μουσικολόγος,
υποψήφια διδάκτωρ Τμήματος Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών
Ευάνδρου 1 Ζωγράφου, 157 72 Αθήνα
mages@otenet.gr

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης
Καθηγητής Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής
Διευθυντής Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, hspyridis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν σκοπό να παρουσιάσει τον Ελικώνα, έναν από τους δύο γεωμετρικούς τρόπους κατατομής του κανόνος, δηλαδή τρόπους με τους οποίους οι αρχαίοι Έλληνες αρμονικοί υπολόγιζαν τα μήκη των ταλαντουμένων τμημάτων χορδής για την επίτευξη μουσικών συμφωνιών κατά την αρχαία ελληνική αρμονία.

Ο ένας τρόπος περιγράφεται από τον Ευκλείδη (3^{ος} αι π.Χ.) στην πραγματεία του Κατατομή Κανόνος και ο Ελικών περιγράφεται από τον Κλαύδιο Πτολεμαίο (2^{ος} αι μ.Χ.) στα Αρμονικά του (Βιβλίο II Κεφάλαιο 2), τον Αριστείδη Κοϊντιλιανό (1^{ος}/3^{ος} αι μ.Χ.) στο σύγγραμμά του Περί Μουσικής (Βιβλίο III κεφ.3), τον Πορφύριο (3^{ος} αι. μ.Χ.) στα Σχόλια του στα Αρμονικά του Πτολεμαίου (Βιβλίο II Κεφάλαιο 2) και τον Γεώργιο Παχυμέρη (13^{ος} -14^{ος} αι. μ.Χ.) στην πραγματεία του Περί αρμονικής (κεφάλαιο ΙΖ').

Στην κατατομή κανόνος του Ευκλείδη προσδιορίζονται τα μήκη των χορδών για το τέλειο αμετάβολο σύστημα των αρχαίων Ελλήνων και στον Ελικώνα οι συμφωνίες στο διατονικό γένος.

Ο Ελικών μας εκτίθεται με δύο γεωμετρικές παραλλαγές, τις οποίες αναλύουμε και συγκρίνουμε τα αποτελέσματά τους στην περιοχή της συχνότητας (frequency domain).

ABSTRACT

This paper aims to present the Helicon, one of the two geometrical ways of dividing the canon, ways with which the Ancient Greek Kanonikoi used to measure the lengths of the vibrated sections of a string, to achieve musical consonances, according to the Ancient Greek Harmony.

One of these two ways is presented by Euclid (3rd cent. B.C.) in his treatise Sectio Canonis and descriptions of the Helicon are found in Claudius Ptolemaeus Harmonics (2nd cent. A.D.), in Aristides Quintilianus' De Musica (Book III, chapter 3), in Porphyry's (3rd cent. A.D.) Commentary on Ptolemaeus' Harmonics (Book II, chapter 2) and in the treatise of George Pachymeres, Harmonics (Chapter XVII).

In Euclidean Sectio Canonis, the lengths of the strings for the "Teleion Ametabolon" system of the Ancient Greeks are defined, while in the Helicon, the consonances in the diatonic genus are examined.

The Helicon is presented with the form of two geometrical variations. Our main goal is to analyse them and then, compare their results in the area of the frequency domain.

Η μουσική ήταν μία από τις υψηλότερες εκφράσεις του αρχαίου ελληνικού πνεύματος. Αποτελούσε αναπόσπαστο μέρος της θρησκευτικής και κοινωνικής ζωής των αρχαίων Ελλήνων, όπως και του αθλητικού ιδεώδους. Φυσικά, δεν απουσίαζε και από τις απλές καθημερινές εργασίες, καθώς οι αρχαίοι Έλληνες είχαν συνειδητοποιήσει την αξία της μουσικής ως αρωγού στην εργασία, στη σωματική άσκηση και ιδιαίτερα στην ενασχόληση εκείνη που η φύση της ήταν επαναληπτική ή ρυθμική (θερισμός, τρύγος, πάτημα σταφυλιών, οικοδομικές εργασίες) και γνώριζαν την δύναμή της στο να μεταβάλλει τη διάθεση των ανθρώπων (π.χ. διατήρηση της ακμαιοτήτας του ηθικού και της ενότητας του ρυθμού των ανδρών που προήλθαν στη μάχη). Στον ιδιωτικό βίο, η μουσική διαπότιζε τα γεγονότα της καθημερινής ζωής είτε χαρμόσινα ήταν αυτά, είτε δυσάρεστα, όπως συμπόσια, νίκες αθλητών, γάμοι, κηδείες, κ.α. Κατά την αρχαιότητα, η μουσική, ως μία από τις τέσσερις αδελφές επιστήμες, Αριθμητική, Γεωμετρία, Μουσική, Αστρονομία, βρισκόταν σε μεγάλη εξέλιξη και θεωρητικά και πρακτικά.

Οι πρωτογενείς πηγές – αρχαία κείμενα – της ελληνικής γραμματείας, η τέχνη, οι αγγειογραφίες, τα θραύσματα πραγματικών μουσικών οργάνων και οι άλλες μαρτυρίες που μας έδωσαν τα ευρήματα της αρχαιολογίας, μας βοήθησαν στο να μορφώσουμε γνώμη για το πλήθος και το είδος των μουσικών οργάνων (έγχορδα, πνευστά, κρουστά), που χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι Έλληνες.

Ένα όργανο-εργαλείο, που χρησιμοποιούσε στη μέτρηση, τις δοκιμές και την απόδειξη των διαστημάτων με ποικίλους λόγους, δηλαδή αριθμητικές σχέσεις, ήταν το μονόχορδο. Ονομάζεται και "Πυθαγόρειος κανών", διότι η εφεύρεση του οργάνου αυτού αποδόθηκε στον μεγάλο φιλόσοφο του 6^{ου} αι π.Χ. Πυθαγόρα. Το μονόχορδο είχε μία μόνο χορδή που ταυνόταν πάνω σε ένα βαθμονομημένο κανόνα και ένα κινούμενο υπαγωγέα δηλ. γέφυρα ή καβαλάρη, ο οποίος διαιρούσε το μήκος της χορδής, επιτρέποντας μόνο ένα τμήμα της να ταλαντώνεται και, κατά συνέπεια, μεταβαλλόταν το τονικό ύψος του παραγόμενου ήχου. Η μακρόχρονη και επίπονη ενασχόληση του Πυθαγόρα με τη μουσική και οι πειραματισμοί του στο μονόχορδο, έφεραν ως αποτέλεσμα την υποταγή του κατ' εξοχήν φευγαλέου και ασύλληπτου μουσικού ήχου στον άτεγκτο νόμο των αριθμών. Η ανακάλυψη της σχέσης μεταξύ του μήκους του παλλόμενου τμήματος χορδής και του τονικού ύψους, που παράγεται από αυτό, οφείλεται στον Πυθαγόρα, ο οποίος, σύμφωνα με τον Πausανία, ήθελε «πὴν οὐσίαν τοῦ παντὸς διὰ μουσικῆς συκειμένην». Ο Πυθαγόρας γνώριζε εξάλλου ότι οι αριθμοί αποτελούν την αρχή «πάντων τῶν ὄντων» και επομένως, το χάωδες πλήθος των ήχων μπορεί να μεταβάλλεται σε μουσική, όταν του επιβάλλεται αναλογία, ρυθμός και μελωδία. Οι Πυθαγόρειοι επινόησαν την ιερά τετρακτύ και απέδιδαν σ' αυτήν πολλές ιδιότητες. Έτσι ο,τιδήποτε μουσικοθεωρητικό εξέφραζαν, το συνέδεαν με τους αριθμούς 1,2,3,4. Αυτός, άλλωστε, ήταν ο λόγος που ο Πυθαγόρειος κανών είχε 4 υποδιαίρέσεις. Αργότερα ο Πλάτων (4^{ος} αι. π.Χ.) πειραματίστηκε πάνω σε κανόνα με 12 υποδιαίρέσεις. Για τον υπολογισμό των μουσικών διαστημάτων πάνω στον κανόνα εργάσθηκαν πολλοί θεωρητικοί, οι οποίοι έφεραν και την προσωνυμία «κανονικοί».

Ο Ευκλείδης (3^{ος} αι π.Χ.) στα δύο τελευταία θεωρήματα (ιθ και κ) της πραγματείας του «Κατατομή Κανόνος»¹, δίνει οδηγίες για τη διαίρεση του κανόνος

¹ Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδη, *Ευκλείδου Κατατομή Κανόνος*, Εκδόσεις Γεωργιάδης, Αθήνα 1998.

με γεωμετρικό τρόπο έτσι, ώστε να κατασκευασθεί ένα διατονικό σύστημα εύρους μιας δις διαπασών.

Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (2^{ος} αι μ.Χ.) στα Αρμονικά του (βιβλίο II, κεφάλαιο 13), αναφέρει ότι ο Δίδυμος ο Αλεξανδρεύς (1^{ος} αι μ.Χ.) πειραματίστηκε πάνω στον κανόνα, χρησιμοποιώντας τα τμήματα εκατέρωθεν του υπαγωγέα, προκειμένου να πάρει τους λόγους του ενός τμήματος προς το άλλο και των δύο τμημάτων προς ολόκληρο το μήκος. Ο Πτολεμαίος θεωρούσε το μονόχορδο ανεπαρκές όργανο και ανέδειξε τις αδυναμίες του ως σολιστικό όργανο, προτείνοντας καλύτερους τρόπους κατασκευής του. Στο 2^ο βιβλίο των Αρμονικών του, κεφ. 2, παρουσιάζει τον επονομαζόμενο *Ελικώνα*, μια εφεύρεση – κατασκευή, γεωμετρικής φιλοσοφίας, που εχρησιμοποιείτο από ορισμένους θεωρητικούς. Ο Ελικών, ως μετεξελιγμένος μηχανισμός του μονόχορδου, χρησιμοποιήθηκε για επίδειξη των αρμονικών σχέσεων των μουσικών συμφωνιών¹ και του τόνου. Ο Ελικών περιγράφεται επίσης από τον Αριστείδη Κοϊντιλιανό (1^{ος}/3^{ος} αι μ.Χ.) στο σύγγραμμά του *Περί Μουσικής* (Βιβλίο III κεφ.3), τον Πορφύριο (3^{ος} αι. μ.Χ.) στα *Σχόλια του στα Αρμονικά του Πτολεμαίου* (Βιβλίο II κεφάλαιο 2) και τον Γεώργιο Παχυμέρη (13^{ος} -14^{ος} αι. μ.Χ.) στην πραγματεία του *Περί αρμονικής* (κεφάλαιο ΙΖ'). Το εργαλείο αυτό πήρε την ονομασία του από το ομώνυμο όρος των Θηβών, όπου κατοικούσαν οι Ελικωνιάδες Μούσες. «Ελικώνα φασίν άπ' όρουσ Έλικώνος, όπου Μούσαι μυθεύονται χορεύειν» αναφέρει ο Πορφύριος (αυτόθι, κεφ.2). Επίσης, ο Παχυμέρης κάνει την ίδια αναφορά: «Ελικών έκλήθη άπό Έλικώνος του όρουσ των Μουσών» (αυτόθι, κεφ.ΙΖ').

Ο Ελικών ήταν μία γεωμετρική κατασκευή κατατομής κανόνος. Διέθετε 4 χορδές και μια διαγώνια γέφυρα. Τα ανάλογα μήκη για τις συμφωνίες κατασκευάζονταν με γεωμετρικές διαδικασίες επί δεδομένου τετραγώνου πλευράς ίσης με 12 μονάδες μήκους. Ο Πτολεμαίος παραθέτει αναλυτικά τον τρόπο κατασκευής του Ελικώνα ως εξής: στο τετράγωνο ΑΒΓΔ² (σχήμα 1) βρίσκουμε τα μέσα των πλευρών ΑΒ και ΒΔ, Ε και Ζ, αντίστοιχα. Φέρουμε τη διαγώνιο ΒΓ και από το σημείο τομής των ΑΖ και ΒΓ, το Η, φέρουμε την ΛΜ παράλληλη προς την ΑΓ. Στη συνέχεια από το Ε φέρουμε την ΕΚ παράλληλη προς την ΑΓ. Δεχόμαστε το μήκος της πλευράς του τετραγώνου ίσο με 12, επειδή διευκολύνει στη διαχείριση των μουσικών συμφωνιών. Από ομοιότητες κατάλληλων τριγώνων (ΑΒΖ και ΑΕΘ, ΓΒΔ και ΓΗΜ, ΑΒΖ και ΑΛΗ) προκύπτει ότι ΑΓ = 12, ΘΚ = 9, ΗΜ = 8, ΒΖ=ΖΔ=6, ΛΗ=4, ΕΘ =3, ΕΛ=2.³

¹ Συμφωνία: το ταίριασμα δύο φθόγων, συμφωνία (με την έννοια όχι της συνήχησης αλλά της αρμονικής σχέσης δύο φθόγων), από το ρήμα συμφωνέω-ώ: φωνῶ ἄμω, ἐνώνω τὴ φωνή μου με ἄλλη, εἶμαι ὁμόφωνος, ὁμόηχος, ὁμόφθογγος, μελωδῶ συμφώνως, συνάδω. Οι συμφωνίες που αναγνώριζαν οι αρχαίοι Έλληνες ήταν η διά τεσσάρων (4:3), η διά πέντε (3:2), η διά πασών (2:1), η διά πασών και διά τεσσάρων (8:3), η διά πασών και διά πέντε (3:1) και η δις διά πασών (4:1). Οι Πυθαγόρειοι θεωρούσαν ότι όλες οι συμφωνίες εξεφράζοντο δια των αριθμών 1,2,3,4 της ιεράς τετρακτύος.

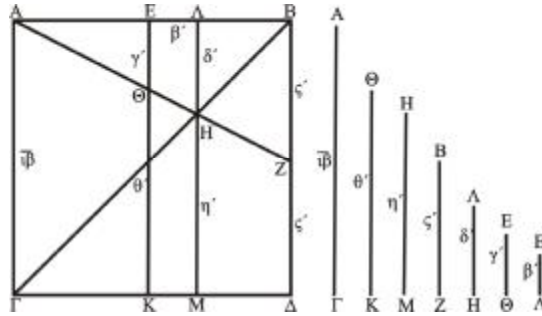
² Έτσι ορίζει το τετράγωνο ο Πτολεμαίος.

³ Εφόσον το Ζ είναι μέσον της ΒΔ, προκύπτει ότι ΑΓ = 2 ΒΖ = 2ΖΔ ⇒ ΒΖ = ΖΔ = 6.

Επειδή τα τρίγωνα ΑΒΖ και ΑΕΘ είναι όμοια, προκύπτει η σχέση:

$AB/EB=BZ/E\Theta \Rightarrow 12/6=6/E\Theta \Rightarrow E\Theta=3$. Επομένως $\Theta K=EK-\Theta K=12-3=9$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι ΑΓ=2ΒΖ=4ΕΘ και ΑΓ=4/3 ΘΚ. Δηλαδή, η ΑΓ είναι τετραπλάσια της ΕΘ και επίτριτος της ΘΚ. Από την ομοιότητα των τριγώνων ΓΒΔ και ΓΗΜ, ΑΒΖ και ΑΛΗ προκύπτουν αντίστοιχα οι σχέσεις: ΓΔ/ΓΜ=ΒΔ/ΗΜ και ΑΒ/ΑΛ=ΒΖ/ΛΗ.



Σχήμα 1. Ο Ελικών (1^{ος} τρόπος, με σταθερή γέφυρα)

Όταν, λοιπόν, τοποθετηθούν τέσσερις ισότονες χορδές στις θέσεις των ΑΓ, ΕΚ, ΑΜ και ΒΔ ευθειών¹ με εφαρμοσμένο σ' αυτές κανόνιον (=γέφυρα) στη θέση της ΑΖ και εφαρμοσθούν οι αριθμοί, στην ΑΓ ο 12, στη ΘΚ ο 9, στη ΗΜ ο 8, σε κάθε μία από τις ΒΖ και ΖΔ ο 6, στη ΛΗ ο 4, στην ΕΘ ο 3, παράγονται όλες οι μουσικές συμφωνίες και ο τόνος. Υπογραμμίζεται ότι ως μήκη ηχούντων τμημάτων χορδών χρησιμοποιούνται όλα τα τμήματα εκατέρωθεν του υπαγωγέα.

Η διά τεσσάρων, σε επίτριτο λόγο,² συνίσταται από τις ΑΓ και ΘΚ, ΗΜ και ΖΔ, ΛΗ και ΕΘ. Η διά πέντε, σε διπλό ημιόλιο,³ από τις ΑΓ και ΗΜ, ΘΚ και ΖΔ, ΒΖ και ΛΗ. Η διά πασών, σε διπλάσιο λόγο, από τις ΑΓ και ΖΔ, ΗΜ και ΛΗ, ΒΖ και ΕΘ. Η διά πασών και διά τεσσάρων σε διπλασιεπιδιμερή λόγο, από τις ΗΜ και ΕΘ. (Αξίζει να σημειωθεί ότι το διάστημα διά πασών και διά τεσσάρων, το οποίο εκφράζεται με την πολλαπλασιεπιμερή αριθμητική σχέση 8:3, για τους Πυθαγόρειους θεωρείται διάφωνο⁴.) Η διά πασών και διά πέντε, σε τριπλάσιο λόγο, από τις ΑΓ και ΛΗ, ΘΚ και ΕΘ. Η δις διά πασών, σε τετραπλάσιο λόγο, από τις ΑΓ και ΕΘ. Και, επιπλέον, ο τόνος σε επόγδοο λόγο⁵, από τις ΘΚ και ΗΜ.

Ο Πτολεμαίος στη συνέχεια, μας δίνει μια παραλλαγή του Ελικώνα, παραθέτοντας το ίδιο τετράγωνο (σχήμα 2), στο οποίο προεκτείνοντας την ΓΔ, λαμβάνουμε $ΓΔ=ΔΕ$. Διαιρούμε την ΓΔ, όπως παραπάνω, σύμφωνα με τους γνωστούς λόγους των συμφωνιών και στα σημεία τομής πάνω στην ΓΔ τοποθετούμε ισότονες χορδές, ώστε να είναι παράλληλες προς την ΑΓ. Σε αυτές τις χορδές τοποθετούμε κοινό υπαγωγέα, τον ΑΖΕ, που ενώνει τα σημεία Ε, Α. Οι ΑΓ και ΖΔ ορίζουν δονούμενα μήκη τμημάτων χορδής που παράγουν τη συμφωνία μιας διά πασών, διότι ο λόγος τους είναι διπλάσιος. Αυτό προκύπτει από το ότι τα τρίγωνα ΑΕΓ και ΖΕΔ είναι όμοια.⁶

Επειδή $ΒΔ=2 ΒΖ$ (Ζ μέσον) προκύπτει ότι $ΗΜ=2 ΛΗ$. Αφού $ΛΗ+ΗΜ=12 \Rightarrow ΛΗ=4$ και $ΗΜ=8$.

Άρα ΑΓ είναι ημιόλιο της ΗΜ και τριπλάσια της ΗΛ. Επίσης προκύπτει ότι $ΕΛ=2$.

¹ Ο Πτολεμαίος χρησιμοποιεί τον όρο «ευθειών» αντί «ευθυγράμμων τμημάτων».

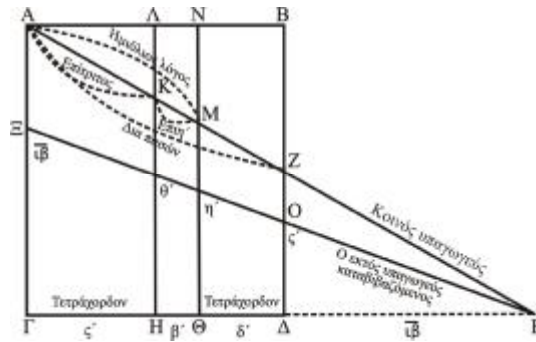
² Επίτριτος λόγος = $1+1/3 = (3+1)/3$.

³ Ημιόλιος λόγος = $1+1/2 = (2+1)/2$.

⁴ Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδη, *Ενκλείδου Κατατομή Κανόνος*, Εισαγωγή, στιχ. 23-24.

⁵ Επόγδοος = $1+1/8 = (8+1)/8$.

⁶ Τα τρίγωνα ΑΕΓ και ΖΕΔ είναι όμοια, οπότε: $ΓΕ/ΔΕ=ΑΓ/ΖΔ \Rightarrow ΑΓ/ΖΔ=2$.



Σχήμα 2. Ο Ελικών (2^{ος} τρόπος, με κινούμενη γέφυρα)

Ο Πτολεμαίος προτείνει να πάρουμε την ΓΗ κατά το $\frac{1}{4}$ της ΓΕ, την ΓΘ κατά το $\frac{1}{3}$ αυτής και να ανυψώσουμε διά των σημείων Η και Θ, τις χορδές ΗΚΛ και ΘΜΝ, ισότονες προς τις πρώτες χορδές. Έτσι η ΑΓ γίνεται επίτριτος της ΚΗ και ημιόλιος της ΜΘ, η ΜΘ επίτριτος της ΖΔ, η ΚΗ ημιόλιος της ΖΔ και επιπλέον η ΚΗ επόγδοος της ΜΘ. Συνεπώς, ο θεμελιώδης ήχος¹ δίνεται από την ΑΓ, η διά τεσσάρων από την ΚΗ, η διά πέντε από την ΜΘ και η διά πασών από την ΖΔ.

Είναι δυνατόν να αντικατασταθεί το υποστήριγμα ΑΕ από ένα άλλο ΞΕ. Η νέα θέση του υπαγωγέα (ΞΕ), θα συνεπάγεται ότι τα μήκη των χορδών που ηχούν θα γίνονται σταδιακά μικρότερα, καθώς η διαγώνια γέφυρα, περιστρεφόμενη γύρω από το σημείο Ε, θα κατεβαίνει από το σημείο Α προς το σημείο Ξ και οι προαναφερθέντες ήχοι θα μεταφερθούν σε μεγαλύτερα τονικά ύψη. Εάν ληφθεί το Ξ μέσον της ΑΓ και η γέφυρα φτάσει στη θέση ΕΞ, οι συμφωνίες εντός μιας δια πασών και ο επόγδοος, θα ηχούν μια οκτάβα ψηλότερα, αφού τα μήκη όλων των χορδών (που είναι αντιστρόφως ανάλογα των παραγομένων συχνοτήτων), θα έχουν υποδιπλασιαστεί.

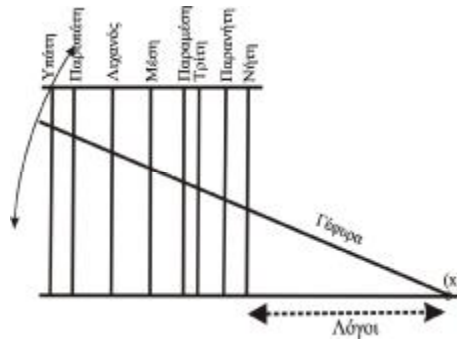
Η δεύτερη αυτή κατασκευή του Ελικώνος, η οποία αποτελεί παραλλαγή της πρώτης, έχει τη δυνατότητα, λόγω του κινητού υπαγωγέα να καθιστά όλους τους φθόγγους ενός συστήματος οξύτερους, ενώ διατηρείται η διαίρεση της διά πασών. Οι διαστηματικοί λόγοι διατηρούνται² κατά την οποιαδήποτε θέση της γέφυρας, διότι τα οριζόμενα δονούμενα τμήματα χορδών αποτελούν ανάλογες πλευρές ομοίων ορθογωνίων τριγώνων. Θεωρητικώς οι οριακές θέσεις της γέφυρας είναι: ΑΕ, οπότε η ΑΓ ισούται με το δονούμενο μήκος ολόκληρης της χορδής του οργάνου και ΓΕ χωρίς, όμως, πρακτικό ενδιαφέρον λόγω του μηδενικού μήκους των δονουμένων τμημάτων της χορδής. Μεταξύ αυτών των δύο θεωρητικών οριακών θέσεων της γέφυρας υπάρχει πληθώρα θέσεων της με πρακτικό ενδιαφέρον.

Ο Πτολεμαίος στη συνέχεια, προτείνει έναν ευφυή συνδυασμό της αρχής του Ελικώνος με τον οκτάχορδο κανόνα³ (σχήμα 3).

¹ Δηλαδή ο ήχος που παράγεται από την ταλάντωση ολοκλήρου του μήκους της χορδής ΑΓ.

² Πράγματι, όπως η ΑΓ είναι προς την ΖΔ διπλάσια, έτσι είναι και η ΞΓ προς την ΟΔ και ομοίως συμβαίνει και με τις υπόλοιπες.

³ Ο οκτάχορδος κανόνας στο διατονικό γένος είναι διηρημένος σε λείμμα, τόνο, τόνο, τόνο, λείμμα, τόνο, τόνο.



Σχήμα 3. Η πτολεμαϊκή διασκευή του Ελικώνος

Αυτό το επιτυγχάνουμε με το να μοιράσουμε τις αποστάσεις ΓΗ και ΘΔ (σχήμα 4) και να παρεμβάλλουμε νέες χορδές, ώστε να έχουμε όλους τους λόγους ενός τετραχόρδου συγκεκριμένου γένους. Ο Ελικών δίνει τα μήκη των δονουμένων τμημάτων χορδών για τους εστώτες φθόγγους: υπάτη, μέση, παραμέση, νήτη. Αν θέλαμε, να παρεμβάλλουμε χορδές για τους κινούμενους φθόγγους των τετραχόρδων, παρυπάτη, λιχανό, τρίτη, παρανήτη, ώστε να δημιουργηθεί μια κλίμακα διά πασών π.χ. στο διατονικό γένος, τότε η ρύθμιση των αποστάσεων μεταξύ των χορδών γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα μήκη τους να σχηματίσουν τους επιθυμητούς εκ του ηρμωμένου διαστηματικούς λόγους. Τα ταλαντούμενα μήκη ΑΓ της υπάτης και ΥΠ της παρυπάτης θα βρίσκονται σε λόγο 256:243, λόγος που εκφράζει το λείμμα. Επίσης, τα ταλαντούμενα μήκη ΥΠ της παρυπάτης και ΡΦ της λιχανού θα βρίσκονται σε λόγο 9:8, λόγος που εκφράζει τον τόνο. Λόγω των σχέσεων αυτών και δεδομένου ότι το μήκος της υπάτης είναι 12 μονάδες μήκους, προκύπτουν μήκη 11,39 και 10,124 για την παρυπάτη και την λιχανό αντίστοιχα.¹

Οι χορδές υπάτη και παρυπάτη στο όργανο του Ελικώνα, θα απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με το διπλάσιο της διαφοράς των μηκών της παρυπάτης από την υπάτη, δηλαδή $2(ΑΓ - ΥΠ)$,² οι χορδές παρυπάτη και λιχανός θα απέχουν μήκος $2(ΥΠ - ΡΦ)$. Αυτό ισχύει και για τις υπόλοιπες χορδές. Ομοίως εργαζόμαστε για τα μήκη ΧΣ και ΨΤ των χορδών τρίτης και παρανήτης παίρνοντας ως αφετηρία το μήκος ΜΘ της παραμέσης το οποίο είναι 8 μονάδες μήκους. Προκύπτει ότι ΧΣ=7,6 και ΨΤ= 6,75. Αυτό θα συνεπάγεται ότι τα ταλαντούμενα τμήματα των 8 χορδών θα έχουν μήκος, αντίστοιχα:

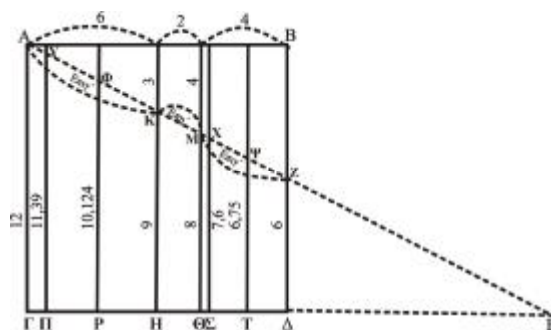
Υπάτη Παρυπάτη Λιχανός Μέση Παραμέση Τρίτη Παρανήτη Νήτη

12 11,39 10,124 9 8 7,6 6,75 6 (μονάδες μήκους)

Επίσης, προκύπτει ότι η ΓΕ θα είχε υποδιαιρεθεί στα κάτωθι ευθύγραμμα τμήματα με μήκη: ΓΠ=1,22 ΓΡ=3,752 ΓΗ=6 ΓΘ=8 ΓΣ=8,8 ΓΤ=10,5 ΓΔ=12 (μονάδες μήκους)

¹ $ΑΓ/ΥΠ=256/243 \Rightarrow ΥΠ = 243 ΑΓ/256$ (1) $ΥΠ/ΡΦ=9/8 \Rightarrow ΡΦ = 8ΥΠ/9$ (2) Επειδή θεωρήσαμε ότι $ΑΓ = 12$, τότε λόγω των σχέσεων (1) και (2) προκύπτει ότι $ΥΠ = 11,39$ και $ΡΦ = 10,124$.

² $ΓΠ = ΓΕ - ΠΕ \Rightarrow ΓΠ = 2ΑΓ - 2ΥΠ \Rightarrow ΓΠ = 2(ΑΓ - ΥΠ)$.



Σχήμα 4. Καθορισμός δονουμένων τμημάτων χορδής κινουμένων φθόγγων μιας διά πασών στο διατονικό γένος

Με παρόμοιο τρόπο θα μπορούσαμε να διαιρέσουμε την ΓΕ ώστε να επιτύχουμε επιθυμητούς εκ του ηρισμένου λόγους που να αντιστοιχούν είτε στο χρωματικό, είτε στο εναρμόνιο γένος της αρχαίας ελληνικής μουσικής.

Σε μια τέτοια κατασκευή οποιοδήποτε σύνολο των λόγων θα πρέπει να ελέγχεται για την ακριβεία του και να ταιριάζει με τις «προσδοκίες» του αυτιού. Ο Πτολεμαίος προτείνει να ελέγξουμε εμείς όλους τους λόγους οι οποίοι αποδίδονται στις διαιρέσεις των γενών (Βιβλίο Ι, κεφ. 15-16).

Μαρτυρίες σχετικά με την πανδουρίδα,¹ δείχνουν ότι επάνω στο μάνικο του οργάνου υπήρχε ταστιέρα για την ακριβή απόδοση συγκεκριμένων φθόγγων.² Σε τέτοιου είδους όργανα, ο Ελικών δίνει την δυνατότητα καθορισμού των θέσεων όπου θα έπρεπε να τοποθετηθούν οι δεσμοί επί του μάνικου, ώστε να παράγονται επιθυμητά μουσικά διαστήματα. Στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή τετραγώνου, πλευράς ίσης με το ολικό μήκος της χορδής του οργάνου, δηλαδή το μήκος το οποίο ορίζεται από τη γέφυρα ως το σημείο πρόσδεσης της χορδής. Βρίσκοντας τα μήκη των τμημάτων του Ελικώνος, πραγματοποιείται με τη χρήση διαβήτη η προβολή των μηκών αυτών πάνω στη χορδή του οργάνου.

Με αυτό το γεωμετρικό εργαλείο, τον Ελικώνα, αφ' ενός μεν διεξάγονται ακουστικά πειράματα περί των συμφωνιών των ήχων, αφετέρου δε, καθίσταται εφικτή η ακριβής τοποθέτηση των δεσμών επί του μάνικου των εγχόρδων από εμπειροτέχνες κατασκευαστές οργάνων.

Συνοψίζοντας τις παραλλαγές με τις οποίες μας δίδεται ο Ελικών, καταλήγουμε:

1ος τρόπος

Με ακίνητη γέφυρα: καθορισμός μηκών δονουμένων τμημάτων χορδής εστών φθόγγων εντός μιας δις διά πασών (υπάτη: σταθερού τονικού ύψους).

2ος τρόπος

Με κινούμενη γέφυρα καθορισμός μηκών δονουμένων τμημάτων χορδής εστών φθόγγων εντός μιας διά πασών (υπάτη: μεταβλητού τονικού ύψους).

Συνδυασμός του 2ου τρόπου με τον οκτάχορδο κανόνα

¹ Αρχαίο έγχορδο μουσικό όργανο της οικογένειας του λαούτου, πρόγονος του ταμπούρα.

² Ο Νικόμαχος Γερασινός (2^{ος} αι.μ.Χ.) ταυτίζει την πανδουρίδα με το μονόχορδο του Πυθαγόρα, γεγονός που οδηγεί στη ιδέα ότι είχε υπόψη του μονόχορδα λαούτα.

Με κινούμενη γέφυρα: καθορισμός μηκών δονουμένων τμημάτων χορδής εστώτων και κινουμένων φθόγγων εντός μιας διά πασών (υπάτη: μεταβλητού τονικού ύψους).

Η ποιότητα της τραγουδιστικής φωνής πριν και μετά την αμυγδαλεκτομή: ακουστική ανάλυση και αντίληψη, λειτουργία και καλλιτεχνικά χαρακτηριστικά.

Νικολίτσα Ελίνα
Εργαστηριακός Συνεργάτης ΤΕΙ Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και
Ακουστικής
Υποψήφια διδάκτωρ και υπότροφος του University of Gent του Βελγίου
Λυρική τραγουδίστρια
elinanikolitsa@stef.teicrete.gr, elinanikolitsa@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εισήγηση αυτή έχει ως στόχο την παρουσίαση της μεταπτυχιακής έρευνας όπως υποστηρίχθηκε στο πανεπιστήμιο Paris-8-Saint-Denis της Γαλλίας. Ασχολείται με ένα θέμα το οποίο έχει μελετηθεί ελάχιστα στους τομείς της ακουστικής, της αντίληψης, της φυσιολογίας και της αισθητικής της φωνής : την φωνητική ποιότητα μιας λυρικής φωνής πριν και μετά την αμυγδαλεκτομή. Η έρευνα μας είναι ποιοτική και στρέφεται στην φωνητική ποιότητα μίας και μόνο γυναικείας φωνής. Η ιδιαιτερότητα αλλά και η επιτυχία, κατά τη γνώμη μας, της έρευνας είναι ότι ερευνήτρια και τραγουδίστρια είναι το ίδιο πρόσωπο. Η ιδέα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας προέκυψε στα πλαίσια της προσωπικής της αναζήτησης, για την αλλοίωση ή όχι της φωνητικής ποιότητας / χροιάς μετά από μία επικείμενη χειρουργική αφαίρεση των αμυγδαλών, γεγονός που η ιατρική επιστήμη δεν μπορεί να απαντήσει με βεβαιότητα. Θέλοντας να απαντήσουμε στο ερώτημα αν υπάρχει επίδραση στο ηχητικό αποτέλεσμα με τη διαφοροποίηση του φωνητικού οργάνου μέσω της αφαίρεσης των αμυγδαλών, πραγματοποιήσαμε ένα πρωτόκολλο ηχογράφησης πριν και μετά την εγχείρηση και προχωρήσαμε σε αναλύσεις αυτού.

ABSTRACT

As part of the D.E.A. dissertation at the Paris-8-Saint-Denis University, in France, this project presents the vocal quality of a lyrical female voice before and after a tonsillectomy, examined in the fields of acoustics, cognition, physiology, and aesthetics. The research focuses on a single person which happens to be the researcher herself. The idea for this project began when the researcher – a lyrical singer – had to go through a tonsillectomy operation, a fact which inevitably rose the question of the impact that such operation could have on the vocal quality of the human voice. A recording protocol has been developed in order to collect data between the two stages and further analysis has been carried out seeking all possible differences.

Εισαγωγή

Η φωνή ως λεκτικό και επικοινωνιακό μέσο έχει μελετηθεί πάρα πολύ σε γλωσσολογικό πεδίο έρευνας. Στην παρούσα έρευνα, αναζητώντας τη λειτουργία της ως φυσικού φαινομένου και ακόμη περισσότερο ως μουσικού οργάνου, την προσεγγίζουμε από την πλευρά της ακουστικής ανάλυσης και αντίληψης. Παραμένει βέβαια ένα μουσικό όργανο δύσκολα προσεγγίσιμο τόσο από πλευράς τραγουδιστικής τεχνικής, όσο και ακουστικής ανάλυσης αφού ουσιαστικά οι μόνες

ενδείξεις για το χειρισμό και το παίξιμο του είναι μέσω ακοής και αισθήσεων, άρα υποκειμενικές. Επιπλέον η φωνή είναι υπό την επίδραση διαφορετικών ανθρώπινων λειτουργιών όπως η φυσιολογία, η ψυχολογία, τα ακουστικά ερεθίσματα και η μνήμη, χωρίς να παραβλέπουμε βέβαια και την επίδραση του περιβάλλοντος στο οποίο μεγαλώνουμε και ζούμε.

Το όργανο της φωνής είναι το σώμα. Σύμφωνα με την ακουστική, η παραγωγή ενός ήχου είναι ένα γεγονός διαδοχικών ενεργειών, ξεκινώντας από την αρχική ταλάντωση του ήχου έως την πρόσληψη του από το αυτί μας. Διατυπωμένο διαφορετικά, η παραγωγή της φωνής αξιώνει το συνδυασμό τριών παραγόντων: την διοχέτευση του αέρα, την ταλάντωση του και την αντήχηση του δια μέσω των κοιλοτήτων αντήχησης. Ο αέρας που εκπνέεται, τίθεται σε ταλάντωση από τις φωνητικές χορδές και εν συνεχεία ο ήχος διαμορφώνεται από τις κοιλοτήτες αντήχησης άνωθεν του λάρυγγα. Έτσι, το ηχητικό σύστημα της φωνής καλύπτει τέσσερις λειτουργίες ανεξάρτητες αλλά συμπληρωματικές για τη φωνητική παραγωγή: 1) το σύστημα διοχέτευσης του αέρα (*αναπνοή*), που αποτελεί απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία του οργανισμού, 2) το σύστημα παραγωγής του ήχου (*φωνητικές χορδές*), 3) το σύστημα αντήχησης του ήχου (*στοματική και ρινική κοιλότητα*), και 4) την *ακοή*.

Μια ακουστική μελέτη καλείται να λαμβάνει υπόψην της ακουστική αντίληψη. Παρότι το αυτί δεν είναι όργανο μέτρησης ήχου, η αντίληψη μέσω της ακοής είναι αυτή που καθοδηγούσε την πορεία των αναλύσεων μας. Όπως σε όλες τις ποιοτικές έρευνες έτσι και στην παρούσα, ο ρόλος του ερευνητή ήταν πολυδιάστατος. Σε όλη τη διάρκεια της εργαστηριακής έρευνας, κρίναμε τη δειγματοληψία της φωνής με τη ματιά του ερευνητή αλλά και ταυτόχρονα του τραγουδιστή. Αυτοί οι δύο τρόποι ακοής (υποκειμενικός και αντικειμενικός) μας προβληματίσαν αρκετά πάνω στον τρόπο που πρέπει να ακούμε τα φωνητικά δείγματα προς ανάλυση καθώς και στον τρόπο ερμηνείας των αποτελεσμάτων, αλλά αποτέλεσαν κριτήριο στο να χαράξουμε τους κύριους άξονες εργασίας (ένταση, φωνητική έκταση, φασματικό περιεχόμενο του ήχου, vibrato, formants vocaliques, τρόποι ταλάντωσης των φωνητικών χορδών¹).

1. Κύριοι άξονες της έρευνας

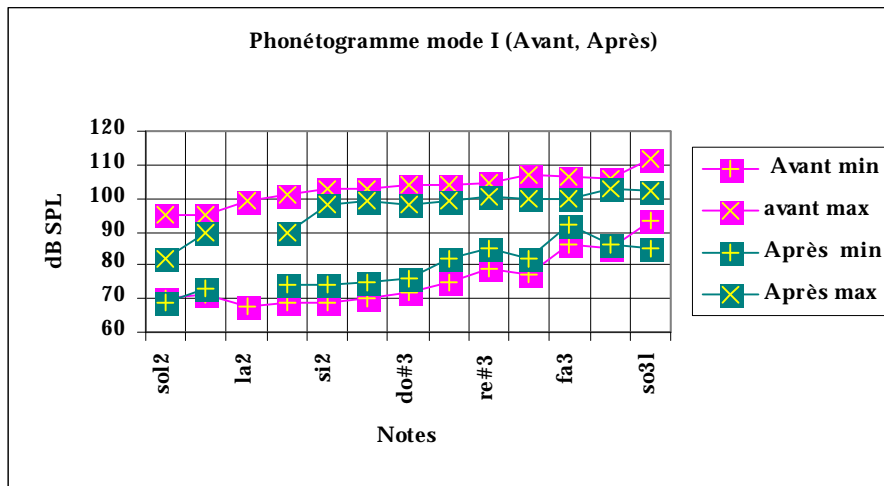
Το πρωτόκολλο ηχογράφησης περιλάμβανε φωνητικές ασκήσεις (*vocalises*), σύμφωνα κρατημένα σε συγκεκριμένες νότες, ήχους σε *crescendo* / *diminuendo*, και μουσικές φράσεις από άριες σε διαφορετικά ύψη. Η ηχογράφηση πραγματοποιήθηκε ένα μήνα πριν την εγχείριση ενώ τρεις μήνες μετά (διάστημα αρκετό για να συνέλθει η φωνή, σύμφωνα με τους γιατρούς) επαναλήφθηκε για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

1.1 Ένταση και έκταση της φωνής

Ξεκινήσαμε την επεξεργασία των δεδομένων αναλύοντας αρχικά την ένταση και την έκταση της φωνής δημιουργώντας ένα φωνετόγραμμα (*phonetogramme*) το οποίο συνδυάζει τις μετρήσεις του ύψους (*pitch*) και της έντασης (*intensity*), και το οποίο μας επέτρεψε να συγκρίνουμε τη δυναμική της φωνής πριν και μετά την

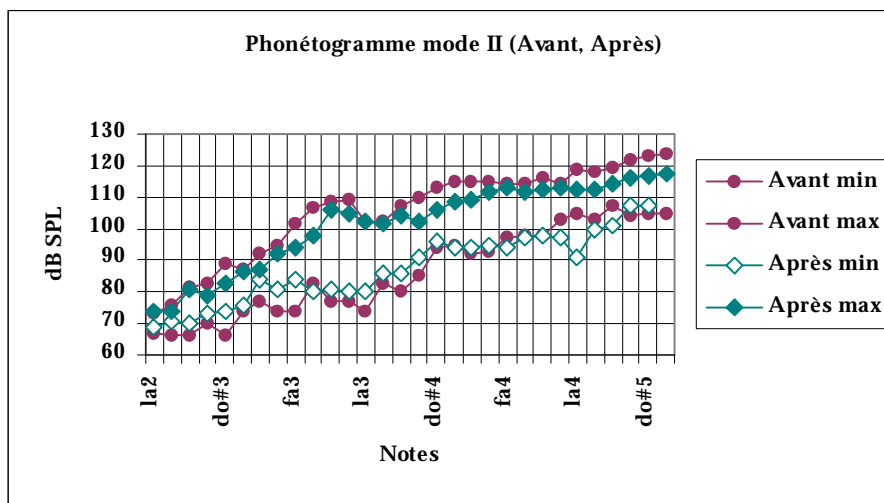
¹ Στάθηκε αδύνατο να πάρουμε σήμα από το ηλεκτρογλωττογράφημα ικανό να αναλυθεί και να δώσει έγκυρα αποτελέσματα αναλύσεων

εγχείριση. Για την υλοποίηση του μετρήσαμε την ένταση από την χαμηλότερη ως την πιο δυνατή που μπορεί να παραχθεί σε κάθε νότα της φωνητικής έκτασης και σε κάθε τρόπο λαρυγγικής φώνησης: “φωνή του στήθους” (mode I) και “φωνή του κεφαλιού” (mode II). Με μια πρώτη ματιά, το εκπληκτικό του αποτελέσματος ήταν η πτώση των υψηλών εντάσεων και η αύξηση των χαμηλών. Αυτό σημαίνει πως η δυναμική περιοχή των δύο τρόπων φώνησης ήταν περισσότερο διευρυμένη πριν την εγχείριση. Όσον αφορά την έκταση της φωνής, δεν υπήρχε αλλαγή. Φυσικά, η ένταση του φωνογραφήματος που μετρήθηκε ήταν η ένταση της θεμελίου. Αυτό δεν λαμβάνει βέβαια υπόψη την ένταση των αρμονικών ή των formants που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ακουστική αίσθηση της έντασης. Ένα ηχόχρωμα (timbre) πλούσιο σε αρμονικούς μπορεί να δώσει στη φωνή μία μεγαλύτερη εμβέλεια από μία φωνή λιγότερο πλούσια αλλά πιο δυνατή σε ένταση (dB).



Σχ.1.1- Φωνετόγραμμα του mode I (στηθική φωνή) πριν και μετά την εγχείριση. Στον άξονα χ η έκταση Sol2-Sol3¹ στην οποία μετρήθηκαν οι δυναμικές της φωνής., ενώ στον άξονα ψ οι εντάσεις σε dB SPL. Παρατηρούμε πως πριν την εγχείριση, η δυναμική περιοχή σε νότες τραγουδισμένες με στηθική φωνή ήταν περισσότερο διευρυμένη. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως υπήρχε μεγαλύτερη δυνατότητα πραγματοποίησης χαμηλών και υψηλών εντάσεων, σε όλες σχεδόν τις νότες.

¹ Πρέπει να διευκρινήσουμε πως σύμφωνα με το Γαλλικό σύστημα συμβολισμού των φθόγγων, η νότα Λα στα 440 Hz αντιστοιχεί στο Ια3.

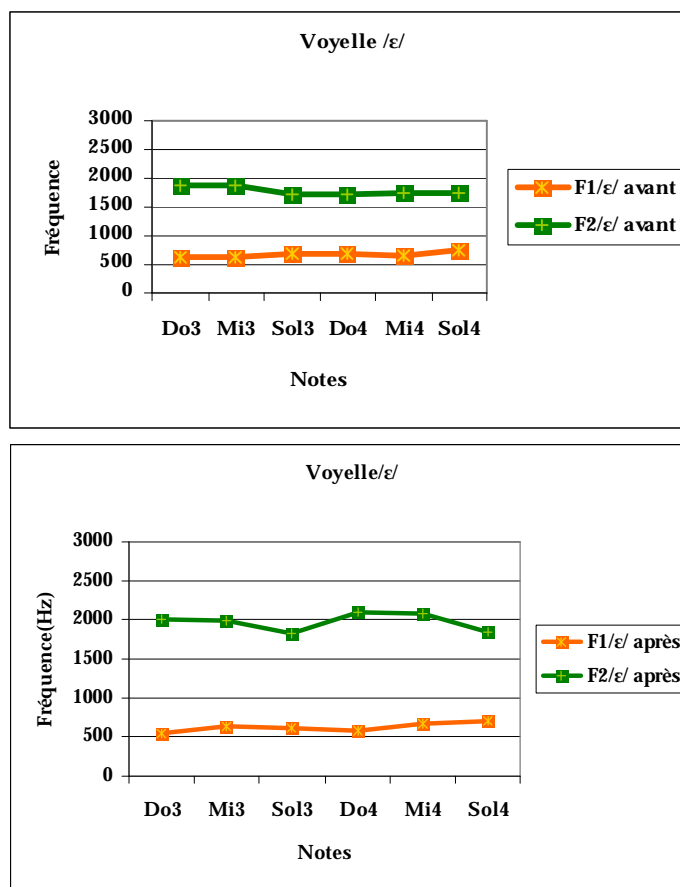


Σχ.1.2- Φωνετόγραμμα του mode II (φωνή του κεφαλιού) πριν και μετά την εγχείριση. Στον οριζόντιο άξονα η έκταση la2-Do#5 στην οποία μετρήθηκαν οι δυναμικές της φωνής, ενώ στον κάθετο άξονα οι εντάσεις σε dB SPL.

1.2 Formants των φωνηέντων και τεχνική Fry

Ο δεύτερος άξονας της έρευνας αφορά τα formants των φωνηέντων και κατά συνέπεια την διαφοροποίησή τους. Στην ηχογράφιση χρησιμοποιήσαμε την τεχνική του Fry¹ για τα φωνήεντα /a/, /ε/, /i/, /ο/, /u/ ούτως ώστε να καταφέρουμε να αναλύσουμε τα formants των φωνηέντων (formants vocaliques) σε όλη την φωνητική έκταση με τη βοήθεια του φασματογράφου KAY ELEMETRICS CORP. MODEL 5500. Σε αυτήν την έρευνα ενδιαφερθήκαμε για τα δύο πρώτα formants τα οποία είναι υπεύθυνα για την ακουστική αντίληψη και διάκριση των φωνηέντων μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, τα υψηλότερα formants παίζουν σημαντικό ρόλο στη χροιά των φωνηέντων. Έχοντας υπολογίσει όλα τα τονικά ύψη των δύο πρώτων formants για κάθε φωνήεν, κατασκευάσαμε διαγράμματα που δείχνουν πως το /a/ ήταν το φωνήεν που υπέστη την πιο μεγάλη αλλαγή, το /ε/ και το /i/ λιγότερη, ενώ σχεδόν καθόλου τα /ο/, /u/. Ενδεικτικά παραθέτουμε τη γραφική παράσταση κατόπιν μετρήσεων του φωνήεν /ε/.

¹ Για τη μελέτη των formants των φωνηέντων χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο έρευνας του Donald Gray Miller η οποία χρησιμοποιεί την τεχνική του Fry (τρόπος φώνησης ο οποίος βοηθά στην εύκολη αναγνώριση των formants στο φάσμα.



Σχ.1.3- Στις δύο άνωθεν γραφικές παραστάσεις συγκρίνουμε τα δύο χαμηλότερα formants από το φωνήεν /ε/ πριν (πάνω σχήμα) και μετά (κάτω σχήμα) την εγχείριση. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις νότες που μετρήθηκαν ενώ στον κάθετο άξονα τη συχνότητα των formants που αντιστοιχούν στις νότες.

1.3 Φασματικό περιεχόμενο

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη του φασματικού περιεχομένου κάθε τονικού ύψους της φωνής σε μεμονωμένες νότες σε όλα τα φωνήεντα καθώς και στο φασματικό περιεχόμενο και formants των φράσεων. Το αποτέλεσμα ήταν παράδοξο: όταν ακούμε νότες τραγουδισμένες χωριστά κάθε μία, το ηχόχρωμα μοιάζει διαφορετικό, ενώ όταν συγκρίνουμε το ηχόχρωμα μιας φράσης δεν παρατηρούμε καμιά διαφορά πριν και μετά την εγχείριση. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώθηκε από της αναλύσεις του φασματογράφου στις οποίες οι αρμονικοί κάθε τραγουδισμένης νότας παρουσιάζουν μια διαφορά στην ένταση, συγκριτικά με πριν, στην περιοχή των 3.000 Hz, που είναι η ζώνη μεγαλύτερης ευαισθησίας του αυτιού. Οι φασματικές αναλύσεις σε μία τραγουδισμένη φράση δεν έδειξαν διαφορά στα formants, αντιθέτως έχουν ακριβώς το ίδιο φασματικό περιεχόμενο. Η εμπειρία του montage μιας νέας φράσης έπειτα από σύνθεση των δύο ηχητικών δειγμάτων πριν και μετά την εγχείριση βεβαιώνει ότι υπάρχει μια συνοχή της χροιάς όταν πρόκειται για φράση αποτελούμενη από σύμφωνα και φωνήεντα (άρα λέξεις) κάτι το οποίο

δεν παρατηρείται στα μεμονωμένα φωνήεντα. Εδώ πρέπει να τονίσουμε δύο πράγματα: πρώτον, αυτή η εμπειρία αγγίζει τον τομέα της ακουστικής αντίληψης στο γεγονός ότι αντιλαμβανόμαστε ακουστικά διαφορετικά τη φωνή όταν πρόκειται για μεμονωμένες νότες και όταν πρόκειται για ολόκληρη τραγουδιστή φράση. Το δεύτερο σημείο αφορά στις διαφορές του πρωτοκόλλου: ο τραγουδιστής ερμηνεύει διαφορετικά τις φωνητικές ασκήσεις (vocalises) από τις άριες. Όταν πρόκειται να ερμηνεύσει μουσική, βρίσκει τρόπους και σωματικά στηρίγματα για να ξεπεράσει πιθανά φωνητικά προβλήματα.

1.4 Βιμπράτο

Το φαινόμενο του βιμπράτο συμβάλει στην αντίληψη του ύψους, της έντασης και της χροιάς ενός φωνητικού ήχου. Στο βιμπράτο διακρίνουμε τρεις συνιστώσες: την διακύμανση του ύψους, την μεταβολή της έντασης και τον αριθμό ταλαντώσεων ανά δευτερόλεπτο. Εκτιμάται ότι έξι ταλαντώσεις ανά δευτερόλεπτο αντιστοιχούν σε ένα φυσιολογικό βιμπράτο¹.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζουμε ενδεικτικά μέρος των μετρήσεων στην μελέτη του βιμπράτο πριν και μετά την εγχείριση, με τη βοήθεια του λογισμικού Audiosculpt. Επιλέξαμε συγκεκριμένες νότες σε όλη την έκταση της φωνής (Si2, Do3, La3, Do4, Mi4, La4, Do5), τραγουδισμένες στο φωνήεν /a/ με “στηθική φωνή” και “φωνή του κεφαλιού” (mode I και mode II). Παραθέτουμε από αριστερά προς τα δεξιά:

- Την συχνότητα της νότας που έχει τραγουδηθεί (F0),
- Το όνομα της νότας που τραγουδήθηκε,
- Το F0 minimum και F0 maximum. Όταν το βιμπράτο δεν είναι συμμετρικό, υπολογίζουμε τα F0min και F0max κατά προσέγγιση,
- Ορίζουμε το πλάτος της ταλάντωσης του βιμπράτο σύμφωνα με το λόγο $\Delta(f)/F0$. Η συνήθης τιμή του για έναν τραγουδιστή είναι 0,6-0,12, το οποίο αντιστοιχεί στο 1/2 και 1 τόνο της συγκερασμένης κλίμακας,
- Την ένταση σύμφωνα με το πρωτόκολλο,
- Τις ταλαντώσεις / δευτερόλεπτο και τα σχόλια για την ομαλότητα του βιμπράτο,
- Τους τρόπους φώνησης (mode I, II) της νότας.

¹ MILLER (Richard), « La structure du chant », cité de la musique, 1986, p. 200

Πίνακας 1.4.- Μετρήσεις του βιμπράτου στο φωνήεν /α/ τραγουδισμένο πριν και μετά την εγχείριση, στη νότα Si2, με στηθική και φωνή του κεφαλιού.

Πριν Μετά την εγχείριση	Συχνότητα	Nota	FO MAXIMUM FO MINIMUM	ΔF/FO	ΕΝΤΑ ΣΗ	ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ / ΔΕΥΤΕΡΟΛΕΠΤΟ	MODE
Πριν	242.6	Si2	251.2 233.7	0,0 7	f	6, αρκετά συμμετρικές	I
Πριν	238	Si2	245.5 228.1	0,0 7	<i>f</i>	6, συμμετρικές	I
Μετά	243,6	Si2	260 231,2	0,1 1	<i>mf</i>	6, συμμετρικές ανά περιόδους	II
Μετά	254,5	Si2	269.6 237.3	0,1 1	<i>mf</i>	6, μη συμμετρικές	II

Το σύνολο των μετρήσεων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αλλαγές ούτε στον αριθμό των ταλαντώσεων / δευτερόλεπτο αλλά ούτε στο πλάτος του βιμπράτο της εκάστοτε νότας. Παρόλα αυτά παρατηρείται μία ελαφριά ασυμμετρία του βιμπράτο η οποία πιστεύεται πως θα διορθωθεί μόλις ο οργανισμός αναρρώσει ολοκληρωτικά.

2. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, δεν μπορούμε να μιλάμε με ακρίβεια με ποιον τρόπο η φωνή άλλαξε μετά την αμυγδαλεκτομή. Είναι βέβαια σίγουρο πως το όργανο της φωνής άλλαξε και πως ο μουσικός πρέπει να προσαρμοστεί σε έναν καινούριο τρόπο παιξίματος για να ξαναβρεί τον αρχικό ήχο ή πιθανώς κάποιον καινούριο ήχο που του ταιριάζει. Όσον αφορά την ποιότητα της φωνής, η ερμηνεία των αναλύσεων στηρίζεται σε χαρακτηριστικά της ακουστικής αντίληψης και στον τρόπο επεξεργασίας των ακουστικών ερεθισμάτων. Όταν η φωνή μελετάται υπό το πρίσμα ενός φυσικού ή τεχνικού, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η φύση και η ομορφιά της φωνής ξεφεύγουν από μετρήσεις και περνά στο πλαίσιο της υποκειμενικότητας. Ο ερευνητής αναλύει τον ήχο, αλλά πίσω από τον ήχο βρίσκεται η ερμηνεία του μουσικού. Στην παρούσα έρευνα, η ανάλυση της χροιάς της φωνής μεταφέρει κυρίως ένα αισθητικό μήνυμα. Είναι μέσα στη γνώση, το ταλέντο, το μουσικό ένστικτο και τη μουσικότητα όπου τοποθετείται η αξία των καλύτερων τραγουδιστών, παρά στην ανατομία του φωνητικού οργάνου.

3. Βιβλιογραφικές αναφορές

- CASTELLENGO, (Michèle), *Cahiers de musiques traditionnelles*, No 4, Voix, George Editeur, Chêne-Bourg /Genève 1991
- CHUBERRE(B.), *Les registres et passages dans la voix chantée*, Thèse pour le diplôme de docteur de médecine, Université de Nantes, Faculté de Médecine, mai 2000
- COLEMAN (Robert F.), *Sources of Variation in Phonetograms* , Journal of Voice, Vol.7, No. 1, pp.1-14, Raven Press, Ltd., New York 1993
- DEJONCKERE (P.H), *Le vibrato vocal*, Médecine des Arts, No.25, 1998
- HENRICH (Nathalie), *Etude de la source glottique en voix parlée et chantée : modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception*, Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, 2001
- HUSSON (Raoul), *La voix chantée*, Collection science et techniques d'aujourd'hui, Editions Gauthier-Villars, Paris 1960
- LEIPP (E.) *La machine à écouter*, Ed. Masson et Cie, Paris 1977
- McADAMS (S.), *Perception et intuition: calculs tacites in* Musique et Perception collection in Harmoniques No3, IRCAM, Paris 1988
- MILLER (Richard), *La structure du chant*, Cité de la Musique, Paris 1999
- ORMEZZANO Dr (Yves), *Le guide de la voix* , Editions ODILE JACOB, Paris 2000
- PAYRI (B.), *Perception de la voix parlée: la cohérence du timbre du locuteur*, Thèse de doctorat de l'Université Paris XI, Orsay 2000
- RAGOT (Marise), *Phonétogrammes des mécanismes vibratoires laryngés et champ de liberté de la voix chantée chez l'enfant et l'adulte*, mémoire pour le certificat de capacité d'orthophoniste, Académie de Paris-Université Paris VI -UFR Pitié –Salpetrière 1997-1998
- RISSET (J-C)., « *Perception, environnement, musiques* » in Musique et Perception, collection in Harmoniques No3, IRCAM, Paris 1988
- RODET (Xavier), POTARD (Yves), BARRIERE (Jean-Baptiste), *CHANT, De la synthèse de la voix chantée à la synthèse en général*, Rapports de Recherche No 35, IRCAM, 1985
- SUNBERG (J.), « *Chest vibrations in singers* », Rapports IRCAM 22/79
- SUNDBERG (J.), « *Vocal fold vibration patterns and modes of phonation* », Folia Phoniatica 47(4), 1995
- SUNDBERG (J.), *Perceptual Aspects of singing* », Journal of Voice, Vol. 8, No 2, 1994
- SUNDBERG (J.), TITZE, SCHERER « *Phonatory control in male singing: a study of the effects of sub-glottal pressure, fundamental and mode of phonation on the voice source* », Journal of Voice 7 (1) 1993
- SUNDBERG (J.), « *The acoustics of the Singing Voice* », Scientific American Mars 1977, Vol. 236, n° 3
- TITZE, *Principles of voice production*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Η Φυσική των Πνευστών Μουσικών Οργάνων: Αγραμμικότητα και Αριθμητική Μελέτη των Ακουστικών Χαρακτηριστικών τους

Α. Σκουρουπάθης και Χ. Παναγόπουλος
Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, CY-1678, Λευκωσία, Κύπρος
apostolos00@hotmail.com, haris@ucy.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μερικά από τα πλέον σημαντικά θέματα που απασχολούν την επιστήμη της Μουσικής Ακουστικής είναι ο υπολογισμός της ακουστικής Εμπέδησης, της Συνάρτησης Ανάκλασης καθώς επίσης και η χρονική εξέλιξη της Πίεσης. Στην εργασία που ακολουθεί παρουσιάζουμε τον τρόπο με τον οποίο περιγράφουμε ένα πνευστό μουσικό όργανο, κάνοντας μια σύντομη αναφορά στο προφίλ του πνευστού, στη γεωμετρία του μετώπου κύματος και στις απώλειες τοιχωμάτων λόγω τριβής και ανταλλαγής θερμότητας. Η μαθηματική σχέση υπολογισμού της Εμπέδησης δίδεται τόσο στην κωνική προσέγγιση, όσο και στην προσέγγιση με υπερβατικές συναρτήσεις. Επιπλέον, παραθέτουμε μερικά γραφήματα που αφορούν την επίδραση της θερμοκρασίας και του σχήματος του προφίλ πάνω στην τιμή της Εμπέδησης. Από τα αποτελέσματά μας για το φάσμα της Εμπέδησης, υπολογίζουμε και την εξάρτηση της Συνάρτησης Ανάκλασης από το χρόνο. Τέλος, περιγράφουμε εν συντομία το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για την καλαμίδα ενός κλαρίνου και παραθέτουμε την επίλυση των εξισώσεων Schumacher, από τις οποίες υπολογίζουμε αριθμητικά την χρονική εξέλιξη της Πίεσης.

ABSTRACT

In this project we address the problem of numerical calculation of the Acoustic Impedance, Reflection Function and Pressure Evolution in time, for wind instruments. For a given profile of an instrument we calculate the Impedance as a function of frequency and temperature, both in the conical and transcendental approximations, having embodied the geometry of wavefronts and the effect of wall losses. After calculating the Impedance spectrum we compute the dependence of the Reflection Function on time. The numerical calculation of Pressure Evolution in time is based on the solution of Schumacher's equations. We solve these equations numerically, adopting a model for the reed and mouthpiece of a clarinet.

Εισαγωγή

Το κέρας των περισσότερων πνευστών οργάνων χαρακτηρίζεται από ένα προφίλ, το οποίο είναι σχεδόν κυλινδρικό για το μισό περίπου μήκος τους, ξεκινώντας από το στόμιο, και επεκτείνεται σε μια ανοικτή «καμπάνα» στο τέλος του κέρατος. Μέρος της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα σύνθετα κέρατα οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνήθεις μέθοδοι μελέτης τους με τεμαχιδόν παρεμβολή παρουσιάζουν ακουστική ασυμβατότητα στα σημεία συναρμογής, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η μορφή της εμπέδησης εξόδου. Παρά το γεγονός αυτό, οι τρόποι ταλάντωσης σε αρκετά σύνθετα κέρατα είναι σχεδόν αρμονικοί, ανάλογα με τη γεωμετρία που έχει το κάθε τμήμα που τα απαρτίζει. Πάνω στην ιδέα των σύνθετων κεράτων, βασίζεται όλη η προσπάθεια που κάνουμε σ' αυτή την εργασία,

προκειμένου να προσεγγίσουμε όσο καλύτερα γίνεται το πραγματικό προφίλ ενός πνευστού μουσικού οργάνου. Τα αποτελέσματά μας για την εμπέδηση είναι βασικό συστατικό για να υπολογίσουμε την ακτινοβολούμενη πίεση σαν συνάρτηση του χρόνου. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιούμε ένα διαδεδομένο μοντέλο του στομίου και επιλύουμε αριθμητικά τις μη γραμμικές εξισώσεις Schumacher [1].

1. Υπολογισμός της Ακουστικής Εμπέδησης

Για να περιγράψουμε το προφίλ ενός πνευστού χρησιμοποιήσαμε μετρήσεις, οι οποίες είναι ουσιαστικά ένας πίνακας από τιμές της ακτίνας του κέρατος σε συγκεκριμένα σημεία, κατά μήκος του κεντρικού άξονα. Υπολογίσαμε αριθμητικά το φάσμα της εμπέδησης, μελετώντας συγχρόνως την επίδραση του σχήματος της καμπάνας και της μεταβολής της θερμοκρασίας πάνω στα αποτελέσματα που βρήκαμε.

1.1 Εξίσωση Webster: Κωνική προσέγγιση, προσέγγιση με Υπερβατικές Συναρτήσεις

Τα μέτωπα κύματος της πίεσης p περιγράφονται από την εξίσωση Webster [2], η οποία στην ουσία είναι μια τροποποιημένη μορφή της κυματικής εξίσωσης (c : ταχύτητα ήχου, S : εμβαδόν διατομής στη θέση x):

$$\frac{1}{S} \frac{J}{J_x} \left(S \frac{Jp}{J_x} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{J^2 p}{J t^2}. \quad (1.1)$$

Οι λύσεις της εξίσωσης Webster μπορούν να γραφούν σε διάφορες μορφές ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιούμε για την περιγραφή των μετώπων κύματος. Η πιο απλή προσέγγιση για την οποία υπάρχει αναλυτική λύση της εξίσωσης Webster, είναι η κωνική προσέγγιση. Για ένα κέρα με σχήμα κόλουρου κώνου, του οποίου ο λαιμός έχει επιφάνεια S_1 στο σημείο x_1 , το στόμιο έχει επιφάνεια S_2 στο σημείο x_2 και το μήκος είναι $L = x_2 - x_1$, αποδεικνύεται ότι

$$Z_{IN} = \frac{rc}{S_1} \left\{ \frac{jZ_L [\sin(kL - q_2)/\sin q_2] + (rc/S_2) \sin kL}{Z_L [\sin(kL + q_1 - q_2)/\sin q_1 \sin q_2] - (jrc/S_2) [\sin(kL + q_1)/\sin q_1]} \right\}, \quad (1.2)$$

όπου $q_1 = \tan^{-1} kx_1$ και $q_2 = \tan^{-1} kx_2$, μετρώντας τα x_1 και x_2 από την κορυφή του κώνου κατά μήκος του άξονα του κέρατος, ρ η πυκνότητα του αέρα, Z_L η εμπέδηση εξόδου και k ο μιγαδικός κυματαριθμός.

Αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης Webster υπάρχουν όχι μόνο για κωνικό προφίλ, αλλά και για προφίλ με μορφή δύναμης του x (κέρας Bessel), καθώς και για υπερβατική μορφή (ημιτονοειδή ή εκθετική). Η τεμαχηδόν παρεμβολή με στοιχειώδη τεμάχια τύπου Bessel είναι υπερβολικά περιοριστική, με αποτέλεσμα να μην είναι εφαρμόσιμη σε ρεαλιστικά προφίλ μουσικών οργάνων. Αντίθετα, η προσαρμογή στοιχειωδών τεμαχίων με υπερβατική μορφή είναι ομαλή και οδηγεί σε μια βελτιστοποιημένη παρεμβολή, χωρίς τις ασυμβατότητες της κωνικής προσέγγισης. Μπορούμε να καταλήξουμε σε μια αντίστοιχη μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό της εμπέδησης, χρησιμοποιώντας τεμάχια υπερβατικής μορφής. Αποδείξαμε ότι

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{iwrp / \left(S \cdot \frac{Jp}{Jx} \right)_2}{iwrp / \left(S \cdot \frac{Jp}{Jx} \right)_1} \quad (1.3)$$

$$= \frac{\left[\left(\frac{1}{a} e^{-i\sqrt{k^2+m^2}x} + \frac{Y_1}{Y_0} \frac{1}{a} e^{i\sqrt{k^2+m^2}x} \right) / a^2 \frac{J}{Jx} \left(\frac{1}{a} e^{-i\sqrt{k^2+m^2}x} + \frac{Y_1}{Y_0} \frac{1}{a} e^{i\sqrt{k^2+m^2}x} \right) \right]_2}{\left[\left(\frac{1}{a} e^{-i\sqrt{k^2+m^2}x} + \frac{Y_1}{Y_0} \frac{1}{a} e^{i\sqrt{k^2+m^2}x} \right) / a^2 \frac{J}{Jx} \left(\frac{1}{a} e^{-i\sqrt{k^2+m^2}x} + \frac{Y_1}{Y_0} \frac{1}{a} e^{i\sqrt{k^2+m^2}x} \right) \right]_1},$$

όπου $w = kc$, a η ακτίνα του προφίλ, $y = pS^{1/2}$ και $m^2 = a''/a$. Για να προσδιορίσουμε τον λόγο Y_1/Y_0 , απαιτούμε στα σημεία προσαρμογής η εμπέδηση από τα δεξιά να ισούται με την εμπέδηση από τα αριστερά. Έτσι βρίσκουμε:

$$\frac{Y_1}{Y_0} = \frac{q'Z_2 \left(\frac{S}{-iwr} \right) - q}{-\tilde{q}'Z_2 \left(\frac{S}{-iwr} \right) + \tilde{q}} \Bigg|_{x_2} \quad \left(q(x) = \frac{1}{a} e^{-i\sqrt{k^2+m^2}x}, \tilde{q}(x) = \frac{1}{a} e^{i\sqrt{k^2+m^2}x} \right) \quad (1.4)$$

1.2 Απώλειες τοιχωμάτων

Είναι σημαντικό να μελετήσουμε τις απώλειες που παρουσιάζονται στα τοιχώματα λόγω τριβής και θερμότητας [2]. Τα τοιχώματα προκαλούν αντίσταση τριβής στην εμπέδηση, που σχετίζεται με την επιτάχυνση του αέρα μέσα στο σωλήνα. Το σχετικό μέγεθος της τριβής εξαρτάται από το πάχος του συνοριακού στρώματος, το οποίο είναι με τη σειρά του ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα του συντελεστή τριβής h διαιρούμενη με την γωνιακή συχνότητα ω . Όμοια, η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των τοιχωμάτων και του αέρα προσθέτει ακόμα μια αντίσταση που προκαλεί απώλειες στην συμπίεστικότητα του αέρα, και το σχετικό μέγεθος αυτής της απώλειας εξαρτάται από το λόγο της ακτίνας του σωλήνα προς το πάχος του θερμικού συνοριακού στρώματος. Οι παράμετροι που εκφράζουν αυτά τα δυο είδη απωλειών είναι, αντίστοιχα:

$$r_v = (wr/h)^{1/2} a \quad \text{και} \quad r_t = (wrC_p/k)^{1/2} a, \quad (1.5)$$

όπου a είναι η ακτίνα του σωλήνα σε μέτρα, C_p είναι η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση και k είναι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα. Για απόκλιση ΔT της θερμοκρασίας από τους 300 °K, μπορούμε να παραθέσουμε τις αριθμητικές τιμές:

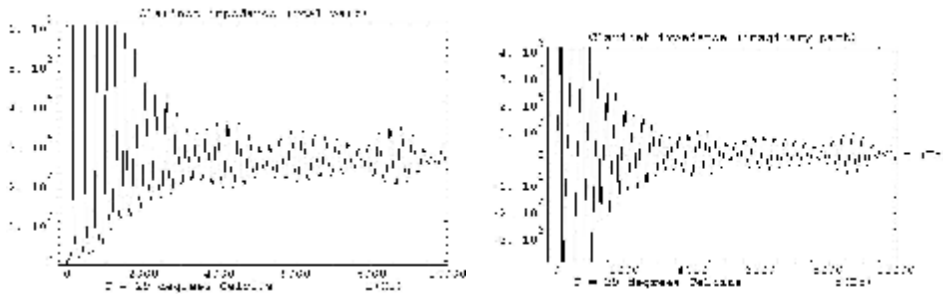
$$r_v \approx 632.8af^{1/2}(1-0.0029\Delta T) \quad \text{και} \quad r_t \approx 532.8af^{1/2}(1-0.0031\Delta T), \quad (1.6)$$

όπου f είναι η συχνότητα σε Hertz.

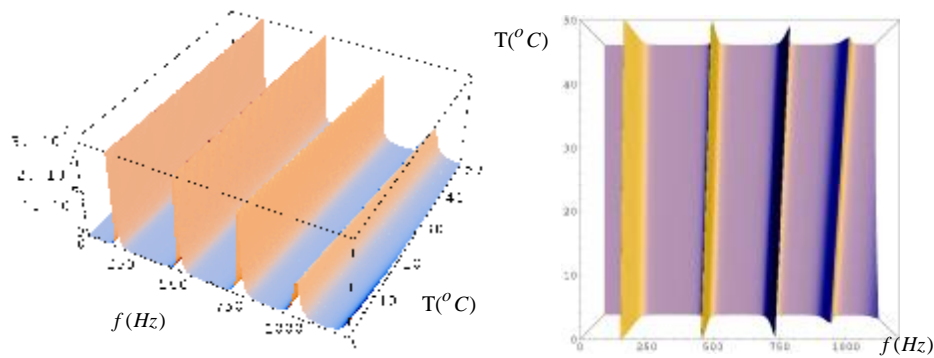
Είναι βολικό να ξαναγράψουμε το κυμαάνυσμα k σαν ένα μιγαδικό αριθμό $w/u - ja$, όπου a είναι ο συντελεστής απόσβεσης ανά μονάδα μήκους και u είναι η ταχύτητα φάσης. Για τα μεγέθη αυτά υπάρχουν οι εξής προσεγγιστικές σχέσεις, οι οποίες είναι καλές για $r_v > 10$ και χρήσιμες για μικρές τιμές μέχρι $r_v = 3$:

$$u \approx c \left[1 - \frac{1}{r_v \sqrt{2}} - \frac{(g-1)}{r_t \sqrt{2}} \right] \quad \text{και} \quad a \approx \frac{w}{c} \left[\frac{1}{r_v \sqrt{2}} + \frac{(g-1)}{r_t \sqrt{2}} \right], \quad (1.7)$$

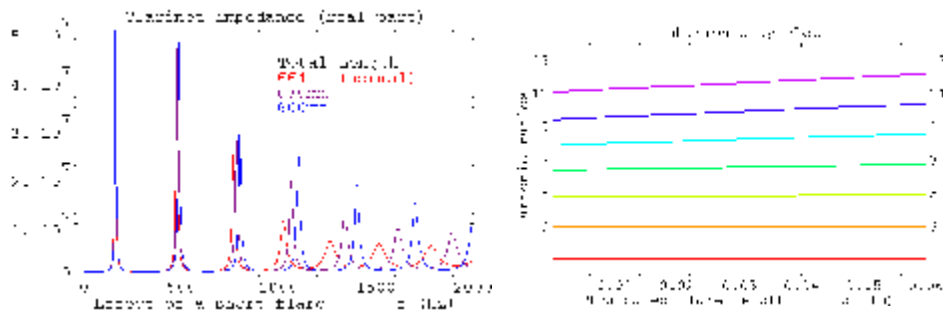
όπου α έχει μονάδες (μέτρα)⁻¹ και $g = C_p / C_v$.



Σχ. 1.1: Πραγματικό και φανταστικό μέρος της εμπέδησης στο χώρο των συχνοτήτων.



Σχ. 1.2: Πραγματικό μέρος της εμπέδησης ενός κλαρίνου συναρτήσει της συχνότητας και της θερμοκρασίας. Στα δεξιά φαίνεται η μετατόπιση των μεγίστων εμπέδησης.



Σχ. 1.3: Πραγματικό μέρος της εμπέδησης συναρτήσει της συχνότητας, για διαφορετικά μήκη της καμπάνας (αριστερά). Στα δεξιά φαίνεται η απόκλιση από την αρμονικότητα.

Στα σχήματα 1.1, 1.2, 1.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που βρήκαμε για το φάσμα της εμπέδησης ενός κλαρίνου τύπου Dolnet [3]. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από αλγόριθμους που φτιάξαμε σύμφωνα με την κωνική προσέγγιση. Στα γραφήματα φαίνεται καθαρά η επίδραση της θερμοκρασίας, καθώς και του μήκους της καμπάνας πάνω στις συχνοτήτες συντονισμού του κλαρίνου.

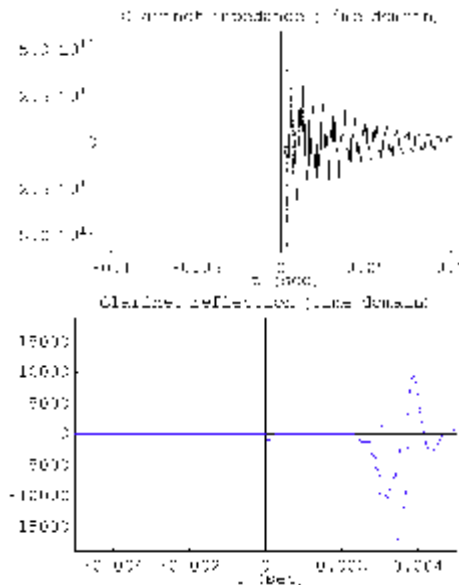
2. Υπολογισμός της Συνάρτησης Ανάκλασης

Το βασικό συστατικό για την επίλυση των εξισώσεων Schumacher είναι η συνάρτηση ανάκλασης στο χώρο των χρόνων. Χρησιμοποιώντας το φάσμα της εμπέδησης που έχουμε ήδη βρει, η συνάρτηση ανάκλασης στο χώρο των συχνοτήτων, $r(w)$, ενός επίπεδου κύματος στην είσοδο του οργάνου, εκφράζεται ως

$$r(w) = (Z(w) - Z_0) / (Z(w) + Z_0), \quad (2.1)$$

όπου $Z_0 = \rho c/S$ είναι η χαρακτηριστική εμπέδηση στην είσοδο του κέρατος.

Ο μετασχηματισμός Fourier που οδηγεί από την $r(w)$ στην $r(t)$ απαιτεί ένα αριθμητικό υπολογισμό που είναι εκ φύσεως ασταθής, δεδομένων των ταλαντώσεων της εμπλεκόμενης φάσης e^{iwt} . Συνεπώς επιβάλλεται έλεγχος της σταθερότητας των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσαμε αλγόριθμους πιο αποτελεσματικούς από το σύνηθες FFT. Τα αποτελέσματά μας εμφανίζονται στο Σχ. 2.1.



Σχ. 2.1: Συναρτήσεις εμπέδησης και ανάκλασης στο χώρο των χρόνων (time domain).

Όπως είναι αναμενόμενο από φυσικές αρχές, οι συναρτήσεις εμπέδησης και ανάκλασης στο χώρο των χρόνων είναι πραγματικές και μηδενίζονται για $t < 0$. Επί πλέον όμως η $r(t)$ έχει πολύ μικρή επέκταση στο χρόνο, κάτι που την καθιστά πιο κατάλληλη από την εμπέδηση για τους υπολογισμούς που έπονται. Η μελέτη μας περιλαμβάνει και την περίπτωση των βελτιστοποιημένων υπερβατικών παρεμβολών, στην οποία οι συναρμογές μεταξύ διαδοχικών τεμαχίων του κέρατος είναι πιο ομαλές, αποφεύγοντας έτσι ασυμβατότητες ανάμεσα σε διαδοχικά μέτωπα κύματος. Οι παρεμβολές αυτές δεν επηρεάζουν αισθητά τις συχνότητες συντονισμού, οδηγούν όμως σε πιο λεία μορφή της συνάρτησης ανάκλασης.

3. Οι εξισώσεις Schumacher

3.1 Μοντέλο καλαμίδας

Σ' αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε ένα ρεαλιστικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει την συμπεριφορά ενός συστήματος όπως η μονή καλαμίδα των ξύλινων πνευστών χωρίς να απαιτεί εξαιρετικά πολύπλοκους αλγόριθμους υπολογισμού. Το μοντέλο βασίζεται πάνω σε ένα σύνολο εξισώσεων, που έμειναν γνωστές ως εξισώσεις Schumacher. Από την εμφάνιση αυτών των εξισώσεων (1981) και έπειτα, αρκετοί ερευνητές τις τροποποίησαν έτσι ώστε να πάρουν μια πιο εύχρηστη μορφή. Πιο κάτω, παραθέτουμε μια από τις πιο πρόσφατες μορφές των εξισώσεων αυτών [4], με σκοπό να περιγράψουμε την συμπεριφορά της μονής καλαμίδας ενός κλαρίνου, όπως αυτή φαίνεται στο Σχ. 3.1.

Αν P_m είναι η στατική πίεση μέσα στην στοματική κοιλότητα του οργανοπαίκτη, η ακουστική ροή $U(t)$ που εισέρχεται στο όργανο σχετίζεται με τη διαφορά πίεσης $P_m - p(t)$ από το νόμο των Bernoulli

$$|P_m - p(t)| = \frac{1}{2} r \left\{ \frac{U(t)}{\nu [y(t) + H]} \right\}^2, \quad (3.1)$$

όπου r είναι η πυκνότητα του αέρα, ν είναι το πλάτος της καλαμίδας, H είναι το ύψος του ανοίγματος του στομίου όταν η καλαμίδα ηρεμεί και $y(t)$ είναι η θέση του άκρου της καλαμίδας. Όταν η καλαμίδα είναι εντελώς κλειστή, τότε $U(t) = 0$, δηλαδή απαιτούμε οι τιμές του $y(t)$ να ικανοποιούν την ανισότητα $y(t) \geq -H$. Λύνοντας ως προς την ακουστική ροή, παίρνουμε

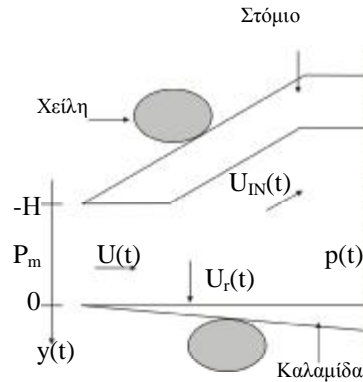
$$U(t) = \sqrt{\frac{2}{r}} \nu \sqrt{|P_m - p(t)|} [y(t) + H] \operatorname{sgn}, \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn} &= 1 & \text{αν } P_m - p(t) \geq 0, \\ \operatorname{sgn} &= -1 & \text{αν } P_m - p(t) \leq 0, \\ U(t) &= 0 & \text{αν } y \leq -H. \end{aligned}$$

Η συνολική ακουστική ροή $U_{IN}(t)$ που εισέρχεται στο κέρασ του οργάνου, οφείλεται στην ακουστική ροή $U(t)$ που προέρχεται από τον οργανοπαίκτη και στην ακουστική ροή $U_r(t)$ που παράγεται από την κίνηση της καλαμίδας. Έτσι, έχουμε

$$U_r(t) = S_r dy/dt \quad \text{και} \quad U_{IN}(t) = U(t) - U_r(t), \quad (3.3)$$

όπου S_r είναι το ενεργό εμβαδόν της καλαμίδας.



Σχ. 3.1: Στόμιο ενός ξύλινου πνευστού οργάνου με μονή καλαμίδα. Στα αριστερά βρίσκεται η στοματική κοιλότητα του μουσικού και στα δεξιά, το κέρασ του οργάνου.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι πιο πάνω σχέσεις που αναφέρονται στην ακουστική ροή, αγνοούν την επίδραση της αδράνειας της αέριας μάζας. Σ' αυτό το μοντέλο υποθέτουμε ότι η καλαμίδα δεν καμπυλώνει στο σημείο όπου ενώνεται με το στόμιο, αλλά μετατοπίζεται έτσι ώστε να υπακούει την εξίσωση απλού γραμμικού αρμονικού ταλαντωτή. Αυτή η υπόθεση δεν είναι άσχημη, αφού σε συχνότητες που απέχουν από την συχνότητα συντονισμού, η καλαμίδα συμπεριφέρεται σαν οδηγούμενο γραμμικό ταλαντωτικό σύστημα. Η σύγκρουση που υπάρχει όταν η καλαμίδα ακουμπήσει το στόμιο είναι ανελαστική και αυτό εκφράζεται από την απαίτηση η ταχύτητα να μηδενίζεται στη θέση $y = -H$. Έτσι, η εξίσωση κίνησης της καλαμίδας είναι

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + g_r \frac{dy(t)}{dt} + w_r^2 y(t) = \frac{p(t) - P_m}{m_r}, \quad (3.4)$$

με συνοριακές συνθήκες

$$y(t) \geq -H \quad \text{και} \quad dy/dt = 0, \quad \text{αν} \quad y(t) = -H, \quad (3.5)$$

όπου g_r είναι ο συντελεστής απόσβεσης, w_r είναι η φυσική συχνότητα συντονισμού και m_r είναι η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας της καλαμίδας.

Η εξίσωση που δίνει τη χρονική εξέλιξη της πίεσης είναι η ακόλουθη:

$$p(t) = Z_0 U_{IN}(t) + \int_0^t r(t') [Z_0 U_{IN}(t-t') + p(t-t')] dt' \quad (3.6)$$

Ρεαλιστικές τιμές για όλες τις παραπάνω παραμέτρους υπάρχουν στην αναφορά [3].

3.2 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Schumacher

Στη συνέχεια παραθέτουμε τη διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος για να υπολογίσει την χρονική εξέλιξη της πίεσης. Η μελέτη περιλαμβάνει προσδιορισμό των σωστών αρχικών συνθηκών [1], καθώς και μια λεπτομερή διερεύνηση που κάναμε για να βεβαιωθούμε ότι η διαδικασία μας για αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Schumacher οδηγεί πάντα σε μια και μοναδική χρονική εξέλιξη, παρά την αγραμμικότητα του συστήματος. Αν γνωρίζουμε τις τιμές των μεταβλητών την χρονική στιγμή t_i , τότε την επόμενη χρονική στιγμή t_{i+1} , οι νέες τιμές των μεταβλητών είναι:

$$y(t_{i+1}) = y(t_i) + \Delta t \frac{1}{S_r} U_r(t_i) \quad (3.7)$$

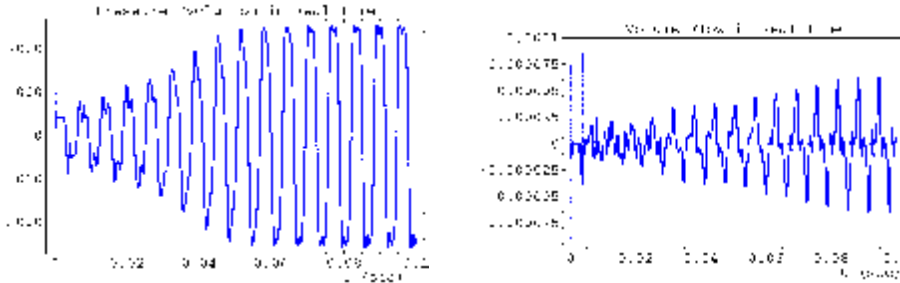
$$U_r(t_{i+1}) = U_r(t_i) + \Delta t S_r \left\{ \frac{p(t_i) - P_m}{m_r} - g_r \frac{U_r(t_i)}{S_r} - w_r^2 y(t_{i+1}) \right\} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} p(t_{i+1}) = & \sum_{j=1}^i r(t_j) [Z_0 U_{IN}(t_{i+1} - t_j) + p(t_{i+1} - t_j)] \Delta t + \frac{1}{2} r(t_{i+1}) [Z_0 U_{IN}(0) + p(0)] \Delta t \\ & + \left(-U_r(t_{i+1}) + \sqrt{\frac{2}{r}} \nu \sqrt{|P_m - p(t_{i+1})|} [y(t_{i+1}) + H] \operatorname{sgn}(t_{i+1}) \right) \left(Z_0 + \frac{1}{2} r(0) Z_0 \Delta t \right) \\ & + \frac{1}{2} r(0) p(t_{i+1}) \Delta t \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$U(t_{i+1}) = \sqrt{\frac{2}{F}} V \sqrt{P_m - p(t_{i+1})} [y(t_{i+1}) + H] \text{sgn}(t_{i+1}) \quad (3.10)$$

$$U_{IN}(t_{i+1}) = U(t_{i+1}) - U_r(t_{i+1}) \quad (3.11)$$

Στα πιο κάτω γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματά μας:



Σχ. 3.2: Χρονική εξέλιξη της πίεσης και της εγκάρσιας ακουστικής ροής όγκου U_r .

4. Αναφορές

[1] Α. Σκουρουπάθης, “Η Φυσική των Πνευστών Μουσικών Οργάνων: Αγραμμικότητα και Αριθμητική Μελέτη των Ακουστικών Χαρακτηριστικών τους”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2004 (περιλαμβάνει πλήρη κατάλογο αναφορών).

[2] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, “The Physics Of Musical Instruments”, 2nd ed., Springer-Verlag New York, Inc., 1998.

[3] C.J. Nederveen, “Acoustical Aspects Of Woodwind Instruments”, Northern Illinois University Press, 1998.

[4] B. Gazengel, J. Gilbert and N. Amir, “Time domain simulation of single reed wind instrument. From the measured impedance to the synthesis signal. Where are the traps?” Acta Acustica 3, 1995, 445-472.

**Μελέτη δονήσεων καπακιών Ελληνικών παραδοσιακών
εγχόρδων μουσικών οργάνων:
Προκαταρκτικά αποτελέσματα με χρήση μηχανικών και
οπτικών τεχνικών.**

Σ. Γυμνόπουλος¹, Σ. Κουζούπης¹, Μ. Μπακαρέζος¹,
Γ. Ορφανός², Μ. Ταταράκης^{3,4} και Ν. Α. Παπαδογιάννης^{1,4}

¹Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας,
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Παράρτημα
Ρεθύμνου, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100 Ρέθυμνο

²Ι.Τ.Ε.- Ι.Η.Δ.Α., Ηράκλειο Κρήτης

³Τμήμα Ηλεκτρονικής, Παράρτημα Χανίων, Τ.Ε.Ι. Κρήτης

⁴Κ.Τ.Ε. Κρήτης, Τομέας Εφαρμοσμένης Ακουστικής και
Φυσικής Προτυποποίησης Μουσικών Οργάνων
και Χώρων, Ρέθυμνο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της εγκατάστασης της πειραματικής διάταξης για την μελέτη δονήσεων, στο Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, έγινε προκαταρκτικός έλεγχος με μετρήσεις σε μεταλλική ράβδο και μεταλλικό φύλλο και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές. Ακολούθως μέσω ηχοβόλησης και αρμονικής διέγερσης προέκυψαν οι ιδιομορφές για καπάκια από Κρητική λύρα και λαούτο. Για τα ίδια μουσικά όργανα ελήφθησαν οι ιδιομορφές των καπακιών μέσω της οπτικής τεχνικής 'συμβολομετρίας σχεδίων με ψηφίδες' (ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry).

ABSTRACT

An experimental set-up for the acquisition of vibration data, mainly frequency response functions, has been tested in a free-free stainless-steel beam and a freely supported rectangular plate. The resonance frequencies identified are compared with those estimated analytically and the response functions are used to draw the corresponding mode shapes. The same experimental procedure is applied to the top plates of several Greek traditional string instruments, such as Cretan lyre and Cretan lute. The mode shapes obtained will be validated using laser speckle pattern interferometry.

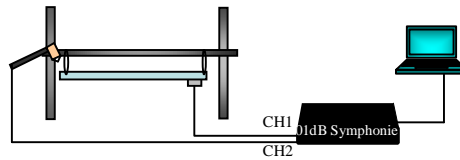
Εισαγωγή

Στα έγχορδα μουσικά όργανα με αντηχείο είναι γνωστό ότι σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του ήχου έχει ο μηχανικός τρόπος δόνησης του καπακιού του οργάνου. Έχουν γίνει πολλές επιστημονικές έρευνες σε καπάκια από βιολί και κιθάρα. Στην Ελλάδα όμως δεν έχει γίνει παρόμοια δουλειά στα παραδοσιακά μουσικά όργανα. Είναι η πρώτη φορά που γίνεται τέτοιου είδους προσπάθεια χαρακτηρισμού των δονήσεων στα ελληνικά μουσικά όργανα.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι αποτελέσματα έρευνας που βρίσκεται σε εξέλιξη από τον Απρίλιο του 2004 στα πλαίσια του προγράμματος Αρχιμήδης Ι.

1. Έλεγχος εργαστηριακής διάταξης

Σαν πρώτο βήμα έγινε έλεγχος της όλης διάταξης λήψης των μετρήσεων μέσω συστηματικής μελέτης της κρουστικής απόκρισης ελεύθερης ράβδου. Έγινε διέγερση της ράβδου στο ένα άκρο με κρουστικό σφυρί και καταγράφηκε το σήμα από το σφυρί και η επιτάχυνση διαδοχικά σε προεπιλεγμένα ισαπέχοντα σημεία της. Η ελεύθερη ράβδος προσομοιώθηκε με ανάρτηση από κατάλληλα λάστιχα. Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Πειραματική διάταξη μετρήσεων σε ράβδο

Από την απόκριση της ράβδου προέκυψαν οι ιδιοσυχνότητες της, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις θεωρητικά προβλεπόμενες [1], μέσω του τύπου,

$$f_n = \frac{p \cdot a \cdot c_L}{16L^2} \cdot n \quad (1)$$

όπου, a : η ακτίνα της ράβδου (0.005m), L : το μήκος της ράβδου (0.33m), c_L : η ταχύτητα του διαμηκών κυμάτων στη ατσάλινη ράβδο, ενώ το n παίρνει τιμές από το σύνολο: $(3 \cdot 011^2, 5^2, 7^2, \dots)$.

Πίνακας 1: Οι πέντε πρώτες θεωρητικές και πειραματικές τιμές της ράβδου

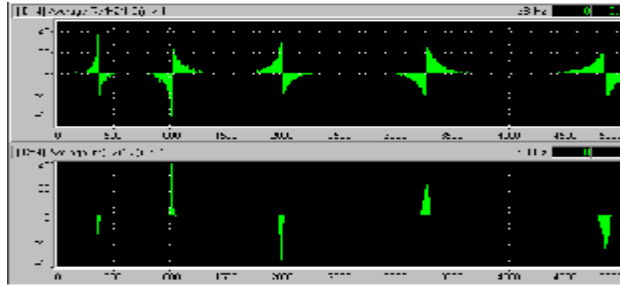
Θεωρητικές Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Πειραματικές Ιδιοσυχνότητες (Hz)
369	375
1017	1019
1993	1988
3295	3269
4922	4850

Παρατηρούμε πολύ καλή συμφωνία πειραματικών μετρήσεων με τη θεωρία αφού τα ποσοστά σφάλματος είναι μικρότερα του 1.5%. Ελέγχθηκε επίσης η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, η αντιστρεψιμότητα και η γραμμικότητα του συστήματος. Η επαναληψιμότητα ελέγχεται επαναλαμβάνοντας ακριβώς την ίδια μέτρηση υπό τις ίδιες συνθήκες. Η αντιστρεψιμότητα, αντιμεταθέτοντας το σημείο κρουστικής διέγερσης με το σημείο ανίχνευσης και η γραμμικότητα επαναλαμβάνοντας μετρήσεις με συνεχώς αυξανόμενη δύναμη. Το ζητούμενο σε κάθε περίπτωση είναι τα αποτελέσματα να παραμένουν ίδια, κάτι που επιβεβαιώθηκε απόλυτα.

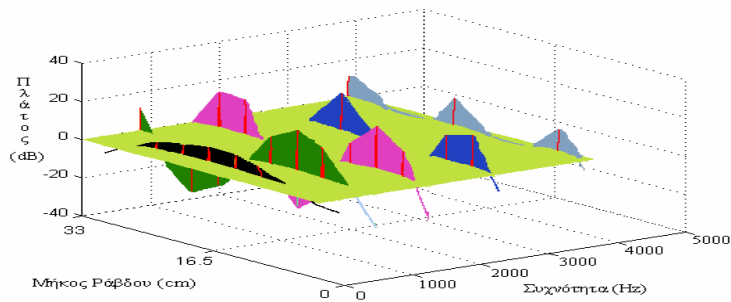
Η συνάρτηση H_2 μας δίνει μία εκτίμηση για τη συνάρτηση απόκρισης συχνότητας της ράβδου [2], για τον κάθε συνδυασμό διέγερσης και λήψης. Δίνεται από τη σχέση,

$$H_2 = \frac{|G_{yy}|^2}{G_{yx}} \quad (2)$$

όπου G_{yx} : η μετασχηματισμένη κατά Fourier ετεροσυσχέτιση και G_{yy} : η μετασχηματισμένη κατά Fourier αυτοσυσχέτιση του σήματος εξόδου. Το φανταστικό μέρος της H_2 για κάθε συνδυασμό θέσης διέγερσης και θέσης λήψης μας παρέχει πληροφορίες για το πλάτος και τη φάση της ταλάντωσης στο συγκεκριμένο σημείο. Διεγείροντας τη ράβδο στο ένα άκρο και υπολογίζοντας το H_2 σε 10 ισαπέχοντα σημεία της ράβδου μπορούν να προκύψουν οι ιδιομορφές της, με την αντίστοιχη συχνότητα τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.

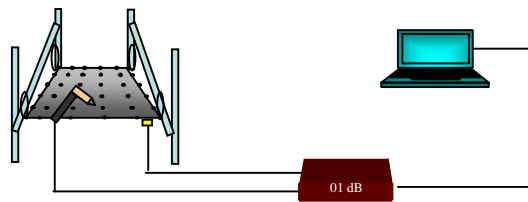


Σχήμα 2: Ενδεικτικά, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της συνάρτησης H_2 για ένα συνδυασμό θέσης διέγερσης και θέσης λήψης στη ράβδο.



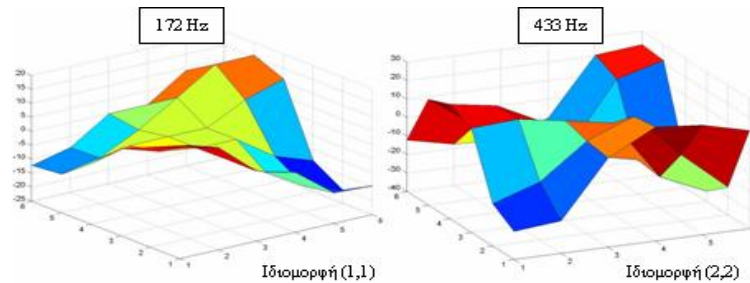
Σχήμα 3: Πέντε πρώτες ιδιομορφές ελεύθερης ράβδου.

Η ίδια τεχνική μετρήσεων ακολουθήθηκε και σε λεπτό τετραγωνικό μεταλλικό φύλλο, όπως φαίνεται και σε μία αντίστοιχη διάταξη με αυτή της ράβδου (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Πειραματική διάταξη μετρήσεων σε μεταλλικό φύλλο

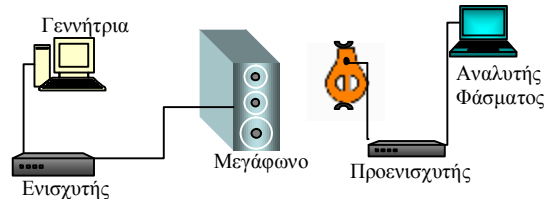
Η αρίθμηση στους οριζόντιους άξονες (του Σχήματος 5), αναφέρεται στο πλέγμα των σημείων λήψης μετρήσεων, ενώ ο κατακόρυφος στο πλάτος της ταλάντωσης. Παρόλο που τα σημεία του πλέγματος δεν είναι πάρα πολλά, διακρίνονται καθαρά οι ιδιομορφές (1,1) και (2,1) του μεταλλικού φύλλου, όπως προέκυψαν με την παραπάνω τεχνική.



Σχήμα 5: Ιδιομορφές (1,1) και (2,1) μεταλλικού φύλλου (λαμαρίνα).

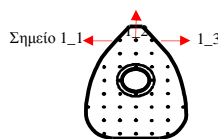
2. Ηχοβόληση καπακιών

Πρὶν περάσουμε στη μελέτη των καπακιών των μουσικών οργάνων με τις τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω, έγιναν ηχοβολήσεις των καπακιών. Η μέθοδος συνίσταται στη διέγερση του καπακιού του εκάστοτε οργάνου με ήχο. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 6. Το καπάκι του οργάνου ακινητοποιείται σε κάθετη θέση, στηριζόμενο ελαφρά σε δύο σημεία του κεντρικού του άξονα, πάνω και κάτω (όπως φαίνεται στο σχήμα 6). Γίνεται αργή σάρωση του φάσματος έως τα 10KHz το σήμα ενισχύεται και οδηγεί το ηχείο το οποίο βρίσκεται απέναντι από το καπάκι. Η ανίχνευση της κίνησης στο καπάκι έγινε με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, το σήμα του οποίου μετά από προενίσχυση οδηγείται στον αναλυτή φάσματος. Με τη μέθοδο αυτή μετρήσαμε 3 διαφορετικά καπάκια από λύρες και ένα καπάκι λαούτου.



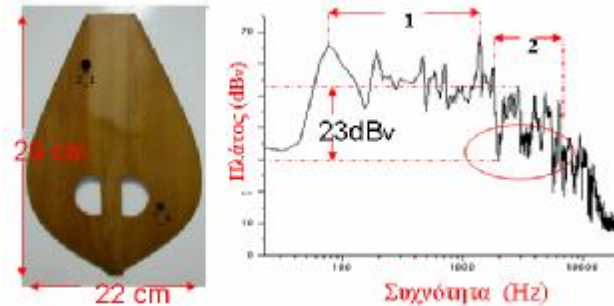
Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη ηχοβόλησης.

Οι μετρήσεις του καπακιού των οργάνων έγιναν πάνω σε ένα πλέγμα σημείων που δημιουργήσαμε στην επιφάνεια του καπακιού. Η αρίθμηση των σημείων έγινε όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Το κάθε σημείο απείχε από το διπλανό του 3 cm στην κάθετη και στην κατακόρυφη διεύθυνση.



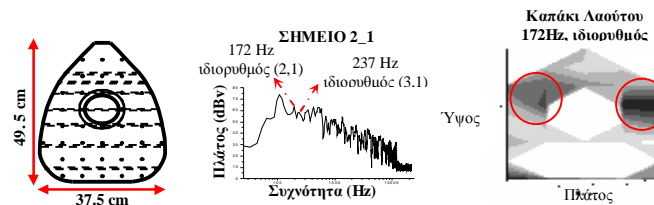
Σχήμα 7: Πλέγμα σημείων

Για κάθε σημείο του πλέγματος καταγράφηκε το φάσμα όπως προέκυψε από την ηχοβόληση. Το φάσμα του Σχήματος 8 (αντιστοιχεί στο σημείο 2_1 πάνω αριστερά στο καπάκι του οργάνου), είναι ενδεικτικό της γενικότερης συμπεριφοράς του καπακιού. Στην περιοχή από τα 75 Hz έως τα 1.5 KHz, η οποία είναι και η κύρια περιοχή λειτουργίας του οργάνου (περιοχή 1), υπάρχουν αρκετοί συντονισμοί. Στην περιοχή 2 (πάνω από τα 1500 Hz) παρατηρείται μία σχετικά νεκρή περιοχή, στην οποία το καπάκι δεν συντονίζεται ιδιαίτερα.



Σχήμα 8: Ενδεικτικό Φάσμα για το σημείο 2_1 Κρητικής λύρας

Το Σχήμα 9 δείχνει το φάσμα του σημείου 2_1 από καπάκι λαούτου, καθώς επίσης και το διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών για τη συχνότητα των 172 Hz που αντιστοιχεί στον (2,1) τρόπο ταλάντωσης. Οι άξονες του διαγράμματος αντιστοιχούν στις διαστάσεις του οργάνου.



Σχήμα 9: Ενδεικτικό φάσμα για το σημείο 2_1 Κρητικού λαούτου και διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών για την ιδιοσυχνότητα των 172 Hz.

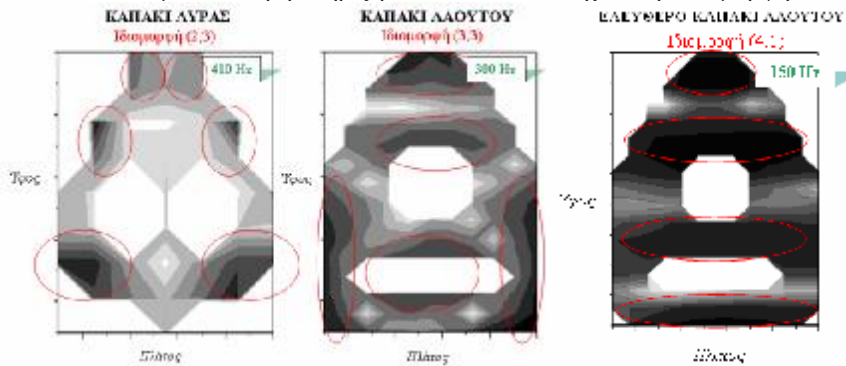
3. Αρμονική οδήγηση καπακιών

Το Σχήμα 10 δείχνει παραστατικά τη διάταξη για την οδήγηση ενός απλά στηριγμένου καπακιού λύρας (Διάταξη 1) και αντίστοιχα την οδήγηση ενός ελεύθερου καπακιού λαούτου (Διάταξη 2).



Σχήμα 10: Πειραματικές διατάξεις αρμονικής διέγερσης καπακιών

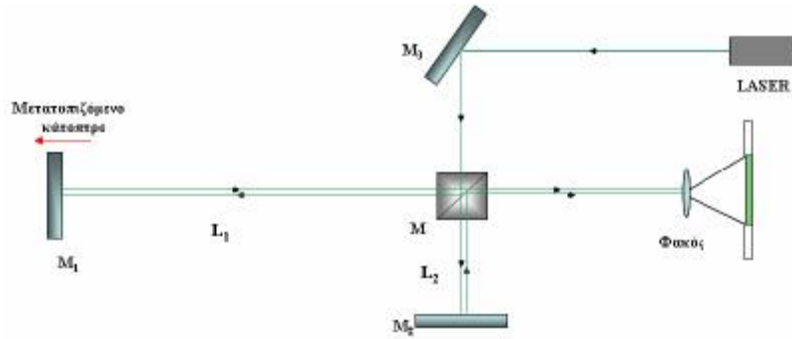
Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: Οδηγούμε το καπάκι σε μία από τις συχνότητες συντονισμού του και καταγράφουμε σε μορφή πίνακα τα πλάτη για κάθε σημείο του πλέγματος. Στη συνέχεια από αυτές τις μετρήσεις εξάγονται τα διαγράμματα ισοψών καμπλών για κάθε ιδιοσυχνότητα, όπου μπορούμε να διακρίνουμε και την ιδιομορφή για κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 11 φαίνεται ενδεικτικά η ιδιομορφή (2,3) για το καπάκι της λύρας (410 Hz) και η ιδιομορφή (3,3) για το καπάκι λαούτου (300 Hz). Παρατηρούμε την προβλεπόμενη συμμετρικότητα στις ισοψείς καμπύλες των καπακιών, σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα, ενώ παράλληλα διαπιστώνουμε μικρότερη συχνότητα συντονισμού (300 Hz) για την ιδιομορφή (3,3) του λαούτου, σε σχέση με την ιδιομορφή (2,3) της λύρας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης ένα διάγραμμα για το καπάκι λαούτου με ελεύθερη στήριξη, το οποίο αντιστοιχεί στην ιδιομορφή (4,1).



Σχήμα 11: Ιδιομορφές (2,3) λύρας και (3,3) λαούτου για στηριγμένο καπάκι καθώς και η ιδιομορφή (4,1) για ελεύθερα στηριγμένο καπάκι λαούτου.

4. Μελέτη καπακιών με οπτικές τεχνικές

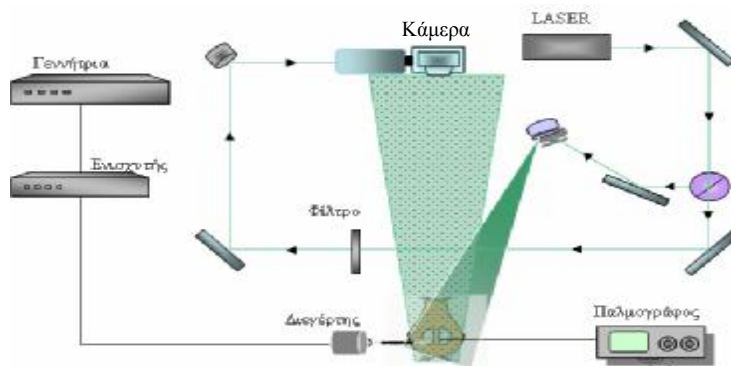
Πριν γίνει μελέτη των καπακιών με την μέθοδο ‘συμβολομετρίας σχεδίων με ψηφίδες’ (ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry) [3], στήθηκε η διάταξη του Σχήματος 12, για να γίνει μέτρηση του μήκους συμφωνίας του laser μέσω συμβολής δύο απλών δεσμών laser.



Σχήμα 12: Συμβολόμετρο Michelson

Στη διάταξη [4] που φαίνεται στο Σχήμα 12 μεταβάλλεται το ΔL , απομακρύνοντας το κάτοπτρο M_1 , αναζητώντας την μέγιστη διαφορά για την οποία οι δύο δέσμες συνεχίζουν να συμβάλουν. Το διπλάσιο αυτής της απόστασης είναι το μήκος συμφωνίας (coherence length) [4] του laser. Στη διάταξη μας βρέθηκε να είναι μεγαλύτερο των 3.5 m.

Η μέτρηση του μήκους συμφωνίας του laser είναι σημαντική σε τέτοιου είδους μετρήσεις, αφού για να μπορέσουμε να διαβάσουμε τη δόνηση ταυτόχρονα σε μία εκτεταμένη επιφάνεια, χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε laser που το μήκος χωρικής συμφωνίας του, να είναι της τάξης του μεγέθους του καπακιού. Η αλλοίωση του φασικού μετώπου του ανακλώμενου από το καπάκι κύματος, θα πρέπει να προέρχεται από τη δόνηση του καπακιού και όχι από τη διάδοση της δέσμης στον αέρα. Η διάταξη ESPI για την μελέτη των καπακιών φαίνεται στο Σχήμα 13.

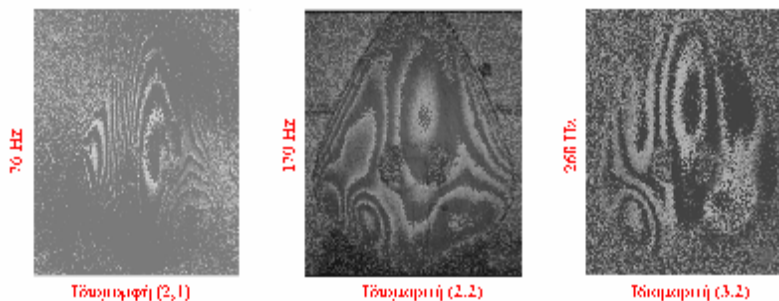


Σχήμα 13: Πειραματική διάταξη ESPI με αρμονική διέγερση

Η αρχική δέσμη του laser διαχωρίζεται σε δύο δέσμες. Η μία συνεχίζει την πορεία της απευθείας προς την κάμερα (δέσμη αναφοράς) αφού προηγουμένως έχει χωρικά ανοιχτεί έτσι ώστε να καλύπτει ομοιόμορφα όλη την επιφάνεια του αισθητήρα της κάμερας. Η δεύτερη δέσμη (δέσμη αντικειμένου) κατευθύνεται προς το καπάκι μέσω συστήματος αποκλινόμενων φακών ώστε να καλύπτει όλο το καπάκι. Στη συνέχεια συλλέγεται το ανακλώμενο από το καπάκι φως και η μίξη των δεσμών αναφοράς και αντικειμένου καταγράφεται από την κάμερα με υψηλή ταχύτητα καταγραφής και τα συσχετογράμματα εμφανίζονται στον ηλεκτρονικό

υπολογιστή κατόπιν επεξεργασίας με ειδικά ανεπτυγμένο λογισμικό, βασισμένο στη μέθοδο διαδοχικής αφαίρεσης εικόνων [5].

Παρακάτω παρουσιάζονται τυπικά συσχετογράμματα για τους (2,1), (2,2) και (2,3) κανονικούς τρόπου δόνησης του καπακιού της λύρας.



Σχήμα 14: Συσχετογράμματα λύρας

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι δοκιμάστηκαν διάφορες μέθοδοι για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και την απεικόνιση των ιδιομορφών των καπακιών. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος εύρεσης των ιδιοσυχνοτήτων με τη χρήση του κρουστικού σφυριού είναι η πιο γρήγορη, αλλά λόγω της μικρότερης σκληρότητας του ξύλινου καπακιού, σε σχέση με μία μεταλλική επιφάνεια, δεν ξεχωρίζουν εύκολα οι ιδιοσυχνότητες στη φασματική συνάρτηση απόκρισης. Διεγείρει όμως όλους τους τρόπους ταλάντωσης, κάθε ένας εκ των οποίων μπορεί να μελετηθεί καλύτερα αν οδηγηθεί αρμονικά το καπάκι. Μπορεί έτσι να μετρηθεί ακριβέστερα το πλάτος τους και να εξαχθεί η μορφή τους, σε αυτό το στάδιο της έρευνας, κυρίως μέσω της οπτικής τεχνικής που αναφέρθηκε παραπάνω.

Η έρευνα αυτή χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από το πρόγραμμα ΕΠΕΑΕΚ «Αρχιμήδης - Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων του Ιδρύματος ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ» υποέργο 13 του παραρτήματος Ρεθύμνου.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coopens, J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, p.84-85, 4th Edition (2000).
- [2] Havard Vold, John Crowley and T. Rocklin, “New ways of estimating response functions”, Sound and Vibration p.34-38, (1984).
- [3] Pramod K. Rastogi, Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, p. 225-234, (2001).
- [4] Eugene Hecht, Optics, p.314-316 & 407-408, 4th Edition (2002).
- [5] C. H. Huang, C. C Ma, J. Acoust. Soc. Am, **109**, 2780 (2001)

Μελέτη και εικονική διαμόρφωση ακουστικής σε αίθουσα διδασκαλίας

Ιωάννης Γ. Μαλαφής,
Π.Δ. 407/80, Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας, Τμήμα
Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών
ymalafis@music.uoa.gr

Παναγιώτης Ε. Χατζημανολάκης και Χριστίνα Ε. Παναγιωτάκου
Φοιτητές Τμήματος Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστημίου Αθηνών

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης
Καθηγητής Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής
Διευθυντής Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, hspyridis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της αναμόρφωσης του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Αθηνών διδάσκεται τα χειμερινά εξάμηνα το μάθημα ελεύθερης επιλογής Ακουστική Σχεδίαση Κλειστών Χώρων με χρήση Η/Υ. Διδάσκοντες είναι ο κ. Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης, καθηγητής Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής και ο κ. Ιωάννης Γ. Μαλαφής, Π.Δ. 407/80. Κατά τις απαιτήσεις του μαθήματος, όλοι οι φοιτητές, που επέλεξαν το μάθημα, προέβησαν στην ακουστική μελέτη και διαμόρφωση των αιθουσών διδασκαλίας του Τμήματός μας, κάνοντας χρήση του λογισμικού “Catt Acoustic”. Χρησιμοποιήθηκαν γνώσεις από τα προπτυχιακά μαθήματα Φυσική και Μουσική Ακουστική, Εισαγωγή στους Η/Υ και Ακουστική διαμόρφωση κλειστών χώρων.

ABSTRACT

Professor Haralambos C. Spyridis and Ioannis G. Malafis P.D./407/82, teach in the Music Dept of University of Athens the subject “Acoustical Design and treatment of enclosures with Computers”. The students study the practice and application of “CATT Acoustics”, one of the most comprehensive, complete and updated software available, referring to acoustical design, study and improvement of enclosures. As a practical exercise our students studied the acoustic behavior and improvement of all the teaching rooms that our Dept has. In the present exercise, the students present in the form of 3D drawings, analytical data tables, graphs and audio material the following:

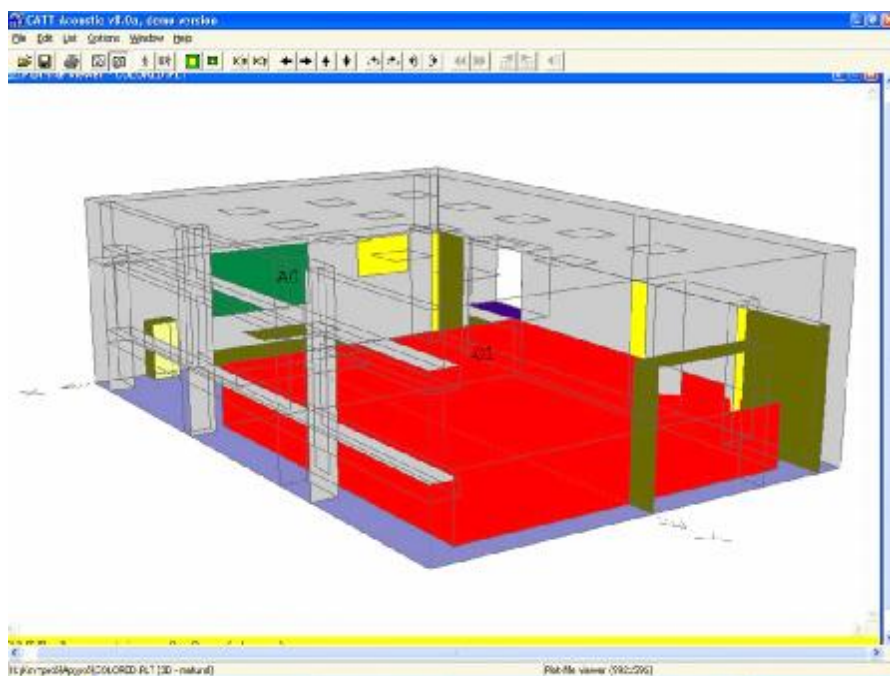
- *The main acoustical elements of the specific classroom 741 (Panepistimiopolis Zografou, School of Philosophy Bld, 7th floor).*
- *The acoustical improvement proposed, using specific acoustic materials and compilations, in order to make the room ideal for teaching, as far as acoustics are concerned.*

Εισαγωγή

Η εισήγηση αφορά στη συνεργασία δύο φοιτητών, των κ.κ. Χατζημανολάκη Παναγιώτη και Παναγιωτάκου Χριστίνας, ώστε η αίθουσα διδασκαλίας 741 του Τμήματός μας, στον έβδομο όροφο του κτηρίου της Φιλοσοφικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών να βελτιστοποιηθεί ακουστικά. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στην **Αίθουσα Πολυμέσων** του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικών Σπουδών.

Για την ακουστική μελέτη χρησιμοποιήθηκε το Demo του προγράμματος CATT-Acoustic v8.0a. Επειδή το πρόγραμμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για την παρουσίαση της μελέτης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθεί εν ολίγοις, προκειμένου να καταστεί κατανοητό.

Πρόκειται για ένα λογισμικό, το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε και να διαμορφώσουμε ακουστικά ένα χώρο σε περιβάλλον Η/Υ. Παρέχεται η δυνατότητα για «ακρόαση του χώρου» με μεταβλητές θέσεις ηχητικής πηγής και δέκτη. Το πρόγραμμα με βάση παραμέτρους σχετικές λ.χ. με τη γεωμετρία του χώρου, με τις ακουστικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται και πλήθος ανακλάσεων γεωμετρικών ακτίνων, που δημιουργούνται, παράγει ηχητικά αρχεία με την ακουστική προσομοίωση του χώρου. Κάθε πιθανή μεταβολή σε γεωμετρία, θέσεις και υλικά, μεταβάλλει, αντίστοιχα, και το ηχητικό αρχείο.



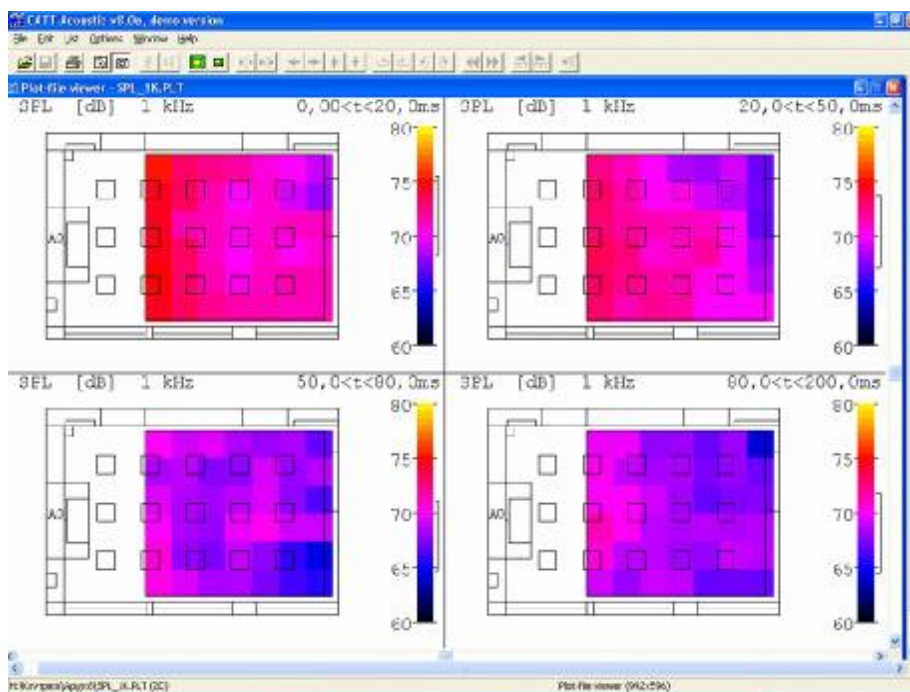
Εικόνα 1. Αρχική κατάσταση αίθουσας

Επισημαίνεται ότι η **πιστή ακρόαση** των ηχητικών αρχείων θα πρέπει να γίνεται μόνο δια μέσου ακουστικών και όχι από ηχεία καθώς στη δεύτερη περίπτωση εμπλέκεται και η ακουστική απόκριση του χώρου ακρόασης. Στο demo δίνεται μία συγκεκριμένη **απεικόνιση** της εκάστοτε αίθουσας - που στην προκειμένη

περίπτωση είναι η ακόλουθη (Εικόνα 1) για την αρχική κατάσταση - και η οποία μεταβαλλόταν κατά την εξέλιξη της εργασίας, έως ότου εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα.

Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο υλικό. Ο ομιλητής (=ηχητική πηγή) τοποθετήθηκε πάνω στο βάθρο διδασκαλίας, που θεωρείται ως η πλέον αντιπροσωπευτική θέση και η πλέον συνηθισμένη. Συμβολίζεται με το Α0. Η ακουστική του χώρου μελετήθηκε έχοντας ως επιλογή κυρίου δείγματος **θέσης ακροατή**, την κεντρική θέση του χώρου ακρόασης (όπως ορίζεται από τις διαστάσεις του χώρου), λαμβάνοντας υπόψη και άλλες τυχαίες θέσεις ακροατών. Συμβολίζεται με το Ο1. Το **ηχητικό αρχείο** προέρχεται από το Demo του προγράμματος CATT-Acoustic v8.0a. Το Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας έχει ήδη προβεί στην παραγγελία του πλήρους λογισμικού πακέτου «Catt Acoustics» από τις πιστώσεις του προγράμματος «Αναμόρφωση προπτυχιακού προγράμματος σπουδών» του Τμήματος Μουσικών Σπουδών.

Θα ακολουθήσει περιγραφή της αρχικής και τελικής κατάστασης της αίθουσας καθώς και των αλλαγών, που πραγματοποιήθηκαν. Θα παρουσιαστούν και κάποια σχεδιαγράμματα μεταβολής του SPL ως προς τον χρόνο και τις βασικές συχνότητες εντός της αίθουσας (προσφέρονται από το προαναφερθέν demo).



Εικόνα 2 Διαγράμματα έντασης και διάχυσης του ήχου στο ακροατήριο

1. Περιγραφή της αρχικής κατάστασης της αίθουσας

Μέσω της δυνατότητας ακουστικής προσομοίωσης του προγράμματος (ΑΚΟΥΜΕ ΗΧΟ) αλλά και των σχετικών διαγραμμάτων (Εικόνα 2) παρατηρούμε ότι ο χώρος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- μεγάλη αντήχηση
- έντονο βάθος

- μειωμένη ευκρίνεια λέξεων
- ακουστικό πεδίο με χαμηλό IL.

2. Διαδικασία βελτίωσης της ακουστικής της αίθουσας

Για την βελτίωση της ακουστικής προχωρήσαμε στην υλοποίηση των εξής ενεργειών:

1. Ασχοληθήκαμε με τα υπάρχοντα υλικά της αίθουσας, τόσο τα κατασκευαστικά, όσο και αυτά των αντικειμένων που προστέθηκαν για τη λειτουργική χρήση της, όπως λ.χ. πίνακας, έπιπλα, φοριαμοί κλπ. και μελετήσαμε τα ακουστικά προβλήματα που δημιουργούνται από αυτά.
2. Παρατηρήσαμε ότι:
 - Υπάρχουν πολύ μεγάλες επιφάνειες από γυμνό χυτό βαμμένο τσιμέντο (concrete) καθώς και μεγάλες γυάλινες επιφάνειες στα παράθυρα.
 - Υπάρχουν ξύλινες και μεταλλικές επιφάνειες, μάρμαρο και πλακάκι.
 - Φυσικά, υπάρχει και το ακροατήριο, το πολύ 80 άτομα, το οποίο επηρεάζει, κατά τα γνωστά, την ακουστική του χώρου.
3. Παρατηρήσαμε τους πίνακες μεταβολής SPL ως προς το χρόνο και τις βασικές συχνότητες εντός της περιοχής του κοινού.
4. Μελετήσαμε τα στοιχεία των χρόνων αντήχησης και διάχυσης και τις ανακλάσεις μέσα στην αίθουσα στις διάφορες συχνότητες.

Διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα υλικά, που υπάρχουν στην αίθουσα, έχουν μικρό συντελεστή ηχοαπορρόφησης ή, ισοδύναμα, μεγάλο συντελεστή ηχοανάκλασης

Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι στην αρχιτεκτονική σχεδίαση της αίθουσας και στα υλικά, που επιλέχθηκαν για την κατασκευή της, οφείλονται τα προαναφερθέντα ηχητικά προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι κτίστηκαν Πανεπιστημιακές αίθουσες διδασκαλίας χωρίς τη στοιχειώδη μέριμνα για τη διδασκαλία αυτή κάθε-αυτή.

Για την βελτίωση της ακουστικής της αίθουσας και με το δεδομένο ότι δεν πρόκειται να αλλάξει η αρχιτεκτονική σχεδίαση αυτής, ούτε θα γίνει μετακίνηση επίπλων για λειτουργικούς λόγους, κρίθηκε σκόπιμη η προσθήκη επιλεγμένων ηχοαπορροφητικών και ηχοανακλαστικών υλικών με διαφορετικές διαστάσεις σε συγκεκριμένες θέσεις.

Έπειτα από μεθοδική μελέτη εντοπίστηκαν τα προβληματικά σημεία της αίθουσας. Πραγματοποιήθηκαν πάρα πολλές δοκιμές, ώσπου να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Λόγω του περιορισμού του αριθμού των σελίδων για τα Πρακτικά του Συνεδρίου, δεν θα επεκταθούμε περισσότερο στη διαδικασία αυτή.

3. Περιγραφή της τελικής κατάστασης της αίθουσας

Όλα τα υλικά τα επιλέξαμε από την ιστοσελίδα της εταιρείας RPG (www.rpginc.com), με κριτήρια:

1. τους συντελεστές ηχοανάκλασης και ηχοαπορρόφησης τους και
2. τον τρόπο που θέλαμε να τα χρησιμοποιήσουμε.

Προτιμήσαμε τη συγκεκριμένη εταιρεία για την επιλογή των υλικών, επειδή στην ιστοσελίδα της βρήκαμε πλήρεις πίνακες με τους συντελεστές ηχοαπορρόφησης και ηχοανάκλασης των υλικών, γεγονός που καθιστά τη μελέτη όλο και πιο ρεαλιστική.

Οι θέσεις τοποθέτησης των υλικών προέκυψαν από τη μελέτη των ανακλάσεων στις διάφορες επιφάνειες της αίθουσας με τη βοήθεια του προαναφερθέντος λογισμικού.

Προκειμένου να αποφύγουμε τη δημιουργία στασίμων κυμάτων, λόγω της παραλληλίας των τοίχων της αίθουσας, στα πάνελ που τοποθετήθηκαν δόθηκε ελαφρά κλίση (προς τα δεξιά και αριστερά, αντίστοιχα) της τάξης των 5^0-10^0 .

3.1 Ταβάνι



Επιλέχθηκε η χρήση διαχυτών, ώστε να διαχυθεί ο ήχος στην αίθουσα. Χρησιμοποιήθηκε το υλικό με εμπορική ονομασία *Formedffusor*. Τοποθετήθηκαν τρία παράλληλα πάνελ, τα οποία διατρέχουν κατά μήκος την αίθουσα.

3.2 Τοίχος πίσω από τον ομιλητή



Επιλέχθηκε η χρήση ηχοαπορροφητών. Χρησιμοποιήθηκε το υλικό με εμπορική ονομασία *Diffusorblox*. Τοποθετήθηκαν δύο πανέλα, το ένα κατά μήκος του εξέχοντος πάνω δοκαριού και το δεύτερο δεξιά από τον ομιλητή.

3.3 Τοίχος αριστερά από τον ομιλητή

Επιλέχθηκε η χρήση ηχοαπορροφητών. Χρησιμοποιήθηκε το προαναφερθέν υλικό *Diffusorblox*. Τοποθετήθηκαν τρία παράλληλα πάνελ, το ένα κάτω από το άλλο με το χαμηλότερο από αυτά να είναι πάνω από το επίπεδο των ακρατών.

3.4 Τοίχος με τζάμια δεξιά από τον ομιλητή

Επιλέχθηκε η χρήση κουρτινών. Χρησιμοποιήθηκε ύφασμα. Τοποθετήθηκαν έξι ανοιχτόχρωμες σχετικά κουρτίνες για να περνάει το φυσικό φως. Προκειμένου να επιτευχθεί συσκότιση -για τις απαιτήσεις κάποιας προβολής- τοποθετούμε ηχοπερατό σκουρόχρωμο ύφασμα με μηχανισμό roll top μπροστά από τις κουρτίνες.

3.5 Τοίχος απέναντι από τον ομιλητή

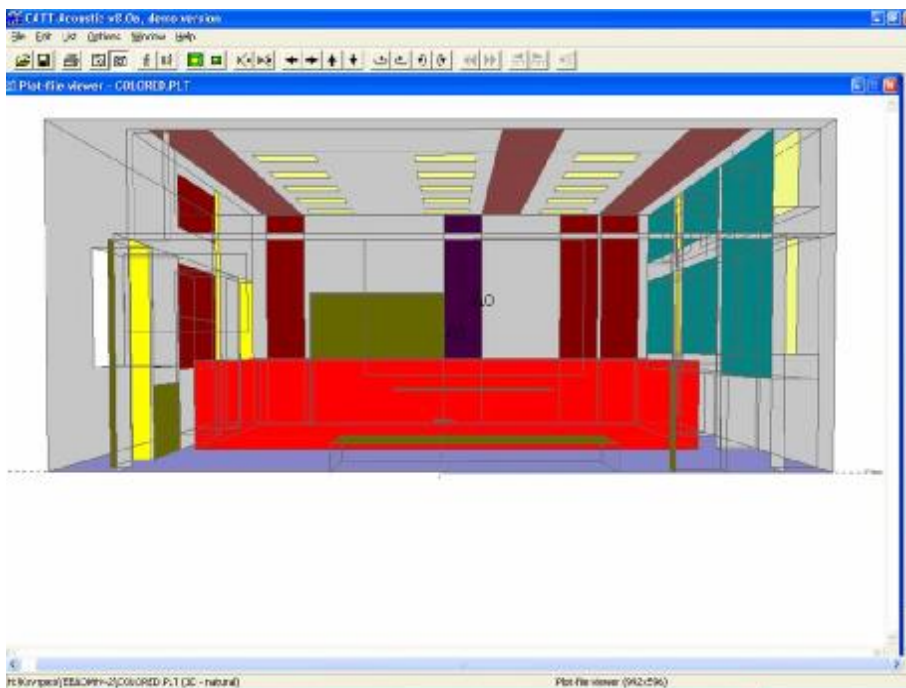
Επιλέχθηκε η χρήση ηχοαπορροφητών. Χρησιμοποιήθηκε το προαναφερθέν υλικό *Diffusorblox* και τοποθετήθηκαν τρία παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς το πάτωμα πάνελ. Ως τέταρτος ηχοαπορροφητής χρησιμοποιήθηκε το υλικό με εμπορική ονομασία *Absorbor*. Τοποθετήθηκε ένα κάθετο πάνελ.

3.6 Πατώμα

Επιλέχθηκε η χρήση ελαστικού δαπέδου σε όλη την επιφάνεια του πατώματος (εξαιρείται η επιφάνεια του βάρους που είναι ξύλινη).

4. Αποτελέσματα

Στις απεικονίσεις της αίθουσας που ακολουθούν (Εικόνα 3,4) , είναι εμφανείς οι αλλαγές που έχει υποστεί η αίθουσα, προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τις θέσεις τοποθέτησης των προαναφερθέντων υλικών.



Εικόνα 3 Τελική κατάσταση αίθουσας – οπτική Α-Δ.

Μετά την τοποθέτηση των προαναφερθεισών ηχοαπορροφητικών και ηχοδιαχυτικών διατάξεων, συγκρίναμε:

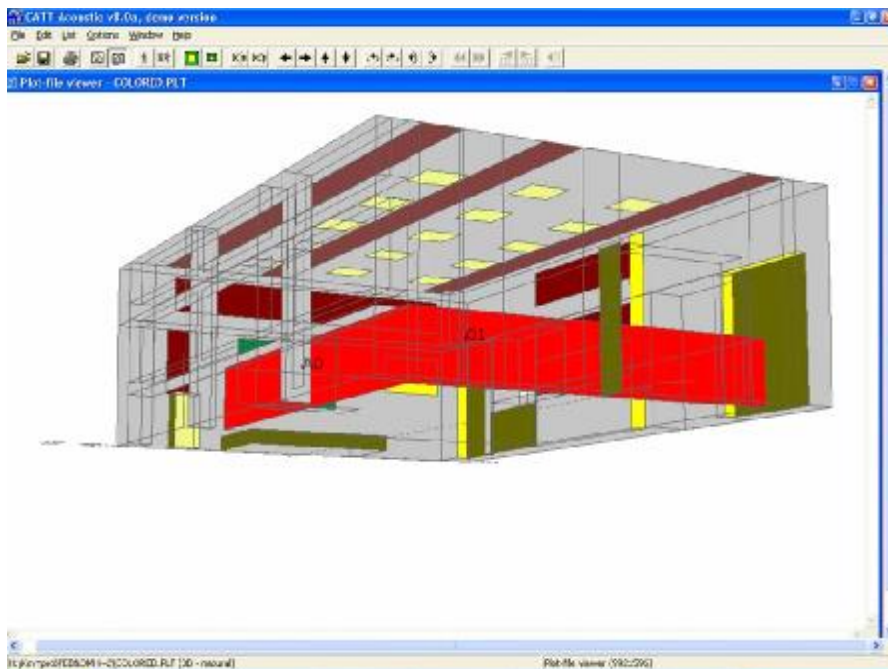
1. τους πίνακες μεταβολής SPL ως προς το χρόνο και τις βασικές συχνότητες εντός της περιοχής κοινού για την αρχική και τελική κατάσταση της αίθουσας.
2. τους χρόνους αντήχησης, διάχυσης και τις ανακλάσεις μέσα στην αίθουσα στις διάφορες συχνότητες για την αρχική και τελική κατάσταση της αίθουσας.

Μέσω της δυνατότητας ακουστικής προσομοίωσης του προγράμματος (ΑΚΟΥΜΕ ΤΕΛΙΚΟ ΗΧΟ), παρατηρούμε ότι ο χώρος τώρα έχει:

- μικρή αντήχηση
- μικρό βάθος
- καλύτερη ευκρίνεια λέξεων
- ακουστικό πεδίο με δυνατότερο IL.

Επισημαίνουμε ότι αυτό που ακούμε τώρα επηρεάζεται από την ακουστική απόκριση της αίθουσας που πραγματοποιείται το Συνέδριο, ενώ η ρεαλιστική ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας, που διαμορφώσαμε, είναι δυνατό να εκτιμηθεί μόνο ακούγοντας μέσω ακουστικών.

Ας ξανακούσουμε το αρχικό και τελικό ηχητικό αποτέλεσμα: ΑΡΧΙΚΟ-ΤΕΛΙΚΟ.



Εικόνα 4 Τελική κατάσταση αίθουσας – οπτική ΒΑ-ΝΔ-.

5. Επίλογος

Κρίνουμε ότι το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Η αίθουσα έχει σαφώς καλύτερη ακουστική συμπεριφορά για τη χρήση που της αποδίδεται (αίθουσα διδασκαλίας).

Το εκτιμώμενο κόστος για την υλοποίηση της ανωτέρω ακουστικής επέμβασης στην αίθουσα είναι της τάξης των 4500 € ποσό που κρίνεται ιδιαίτερα συμφέρον για την υλοποίησή του από το Πανεπιστήμιο Αθηνών.

6. Ευχαριστίες

Για άλλη μια φορά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους δασκάλους μας, τον Καθηγητή κ. Χαράλαμπο Χ. Σπυρίδη και τον κ. Ιωάννη Γ. Μαλαφή για την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους για την εκπόνηση και παρουσίαση αυτής της εργασίας.

Μικροδιάτρητες ηχοαπορροφητικές μεμβράνες για την βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης αιθουσών

Χρήστος Κουτσοδημάκης
Σύμβουλος Ακουστικής, MSc, ckoutsod@hotmail.com
ΕΡΓΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΕ
Πανόρμου 71-73, 11524 - Αθήνα
info@ergoakoustiki.gr, www.ergoakoustiki.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης αιθουσών απαιτεί αρκετές φορές τη διατήρηση της αισθητικής της αίθουσας, χωρίς να καταργούνται τα υαλοπετάσματα της. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν διαφανείς μικροδιάτρητες ηχοαπορροφητικές μεμβράνες, οι οποίες διατηρούν σε μεγάλο βαθμό τη διαφάνεια των υαλοπετασμάτων, προσθέτοντας όμως ηχοαπορρόφηση στον χώρο.

Γενικά, τα μικροδιάτρητα panel (MPP) έχουν μικρή διάμετρο οπής (0,5-1mm) έτσι ώστε να παρέχουν από μόνα τους αρκετή ακουστική αντίσταση και χαμηλή ακουστική εμπέδηση μάζας, ικανή για ηχοαπορρόφηση σε μεγάλο συχνοτικό εύρος χωρίς επιπρόσθετο ινώδες ή πορώδες υλικό πίσω από αυτά. Τα μικροδιάτρητα panel έχουν απλή δομή, μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά όπως χαρτόνι, πλαστικό, κόντρα-πλακέ, μεταλλικά φύλλα. Η απορρόφηση μπορεί επ' ακριβώς να προβλεφθεί.

Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση της αρχής λειτουργίας του μικροδιάτρητου ηχοαπορροφητικού panel. Οι μικροδιάτρητες οπές στην επιφάνεια του panel προκαλούν την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Η τριβή του αέρα σε κάθε οπή ενισχύει τον συντονισμό του αέρα ανάμεσα στη μικροδιάτρητη μεμβράνη και στο πίσω μέρος κάνοντας ηχοαπορρόφηση. Τέσσερις παράμετροι καθορίζουν την ηχοαπορρόφηση της μικροδιάτρητης μεμβράνης: i) Η διάμετρος d των οπών ii) η απόσταση b μεταξύ των οπών iii) το πάχος t της μεμβράνης iv) το πάχος του στρώματος του αέρα D ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής.

Γίνεται επίσης παρουσίαση της βελτίωσης του χρόνου αντήχησης σε διάφορες αίθουσες με την χρήση των ηχοαπορροφητικών μικροδιάτρητων μεμβρανών Microsorber® της εταιρίας Kaefer. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ακουστικές μετρήσεις σε χώρους όπου εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μεμβράνες.

ABSTRACT

In some cases, it is required to achieve the optimum reverberation time for an auditorium with many transparent and hard surfaces. In these cases microperforated panel absorbers should be used in front of the transparent and reflecting surfaces in order to add absorption in the room.

In general microperforated panels (MPP) have submillimeter diameter size (0,5-1mm) as to provide by themselves, enough acoustic resistance and low acoustic mass reactance necessary for wide-band sound absorber, without any additional fibrous, porous material. The microperforated panels have a simple structure and may be made of any material such as cardboard, plastic, plywood sheet metal absorption. Their absorption characteristics are exactly predictable.

In the present paper the principals of the micropeforated panel is presented. The small holes that form the microperforation cause a conversion of sound energy into heat energy. The friction of the air in each single hole is amplified by resonance in

the air between the microperforated panels and the backing and yields to the absorption of the sound. The parameters are determine absorption of the panel are: i) The diameter d of the holes ii) The distance b between the holes iii) The thickness t of the panel iv) The thickness D of the air layer between the panel and the application surface.

Measurement curves of the reverberation time of auditoria in which the microperforated polycarbonate foil Microsorber® -Kaefer is applied to improve the acoustics of restaurants are presented.

1. Εισαγωγή

Τα διάτρητα panels έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί εδώ και αρκετά χρόνια, αλλά η απαραίτητη χρήση πορώδους υλικού μαζί με αυτά είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν σαν προστατευτικό υλικό κάλυψης.

Τα μικροδιάτρητα panels έχουν αναπτυχθεί στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα όταν ήταν απαραίτητο ένα ηχοαπορροφητικό υλικό για ένα λιτό περιβάλλον χωρίς την χρήση ινών ή πορώδους υλικού.

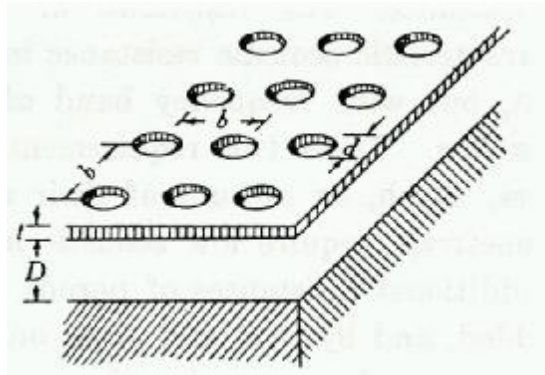
Σε αντίθεση με τα διάτρητα panels όπου η διάμετρος της διάτρησης είναι της τάξης του χιλιοστού ή ακόμη και του εκατοστού, τα μικροδιάτρητα panel έχουν διάμετρο διάτρησης μικρότερου του χιλιοστού (0,5-1mm). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να παρέχουν από μόνα τους αρκετή ακουστική αντίσταση και χαμηλή ακουστική εμπέδηση μάζας, ικανά για ηχοαπορρόφηση σε μεγάλο συχνοτικό εύρος, χωρίς επιπρόσθετο ινώδες ή πορώδες υλικό.

2. Αρχή λειτουργίας των μικροδιάτρητων ηχοαπορροφητικών panel (MPP)

Τα μικροδιάτρητα panel έχουν απλή δομή, μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά όπως χαρτόνι, πλαστικό, κόντρα-πλακέ και μεταλλικά φύλλα.

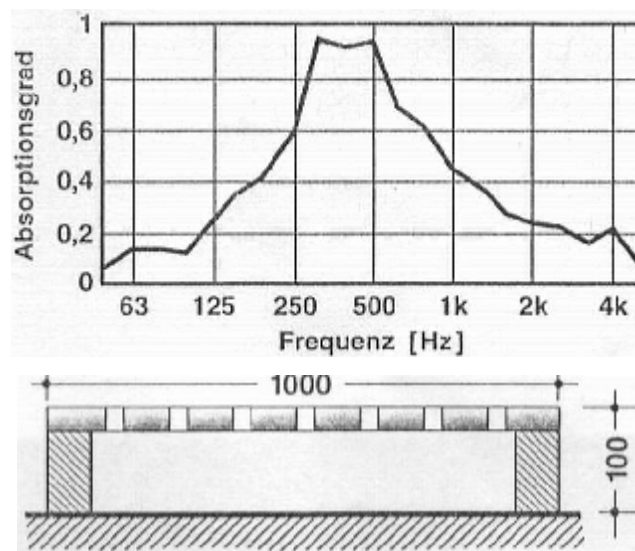
Οι μικροδιάτρητες οπές στην επιφάνεια του panel προκαλούν την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Η τριβή του αέρα σε κάθε οπή ενισχύει τον συντονισμό του αέρα ανάμεσα στη μικροδιάτρητη μεμβράνη και στο πίσω μέρος κάνοντας ηχοαπορρόφηση. Ο αέρας που βρίσκεται ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια λειτουργεί σαν ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου. Ένα μικροδιάτρητο panel αποτελεί ουσιαστικά μια σειρά από αντηχεία Helmholtz. Είναι ένα πλέγμα από στενούς και κοντούς σωλήνες, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους με απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρό τους, αλλά μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος του ήχου.

Τέσσερις παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του μικροδιάτρητου panel [2]: i) Η διάμετρος d των οπών ii) η απόσταση b μεταξύ των οπών iii) το πάχος t της μεμβράνης iv) το πάχος του στρώματος του αέρα D ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικροδιάτρητη απορροφητή [1]

(Source: D.-Y. Maa, Scientia Sinica, Vol. XVIII, 1975)



Πάχος πλάκας: 5,00mm

Διάμετρος οπών: 0,55mm

Απόσταση οπών: 3,55mm

Απόσταση πλάκας από επίπεδη επιφάνεια: 100mm

Εικόνα 2: Απορρόφηση ενός μικροδιάτρητου panel μετρημένο σε αίθουσα του Γερμανικού Κοινοβουλίου (Source: Fuchs H.V., Zha X. „Schallabsorber aus Acryglas im Plenarsaal des Bundestages)

Από τις παραπάνω τέσσερις παραμέτρους μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα συντονισμού στην οποία συμβαίνει η μεγαλύτερη απορροφήση καθώς και την συνολική απορρόφηση του μικροδιάτρητου panel (Εικόνα 2).

Η συχνότητα συντονισμού του μικροδιάτρητου panel όπου έχουμε και την μέγιστη ηχοαπορρόφηση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [3]:

$$f_o = \frac{c}{2p} \sqrt{\frac{P}{D(t+d)}} \quad (1)$$

όπου: c η ταχύτητα του ήχου, P ο λόγος του ανοίγματος της οπής, t το πάχος του panel, d η διάμετρος των οπών, D το πάχος του στρώματος του αέρα ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής.

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός μικροδιάτρητου panel για κάθετη πρόσπτωση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [4]:

$$a = \frac{4r}{(1+r)^2 + (wm - \cot(wD/c))^2} \quad (2)$$

Η σχετική ακουστική αντίσταση r δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{32ht}{s r_o c d^2} k_r, \quad k_r = \left[1 + \frac{k^2}{32} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\sqrt{2}}{32} k \frac{d}{t} \quad (3)$$

Η εμπέδηση μάζας $x_m = \omega m$ δίνεται από την σχέση:

$$wm = \frac{wt}{sc} k_m, \quad k_m = \left[1 + \frac{k^2}{2} \right]^{-\frac{1}{2}} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (4)$$

και η σταθερά διάτρησης k

$$k = d \sqrt{w r_o / 4h} \quad (5)$$

όπου: d η διάμετρος των οπών, t το πάχος του panel, ω γωνιακή συχνότητα, η ο συντελεστής ιξώδους.

Για τον σχεδιασμό ενός μικροδιάτρητου panel για μία συγκεκριμένη εφαρμογή είναι επίσης απαραίτητες οι παρακάτω εξισώσεις:

Η μεγίστη τιμή της απορρόφησης του μικροδιάτρητου panel η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$a_o = 4r / (1+r)^2 \quad (6)$$

Το βάθος της κοιλότητας πίσω από το panel το οποίο δίνεται από την εξίσωση:

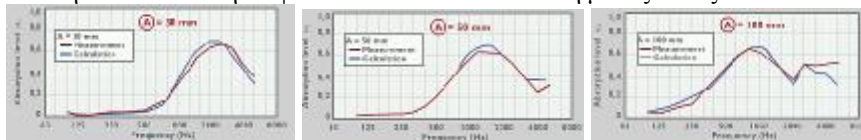
$$\frac{D}{l} = \frac{1}{2p} \cot^{-1} w_o m \quad (7)$$

3. Εφαρμογή μικροδιάτρητης μεμβράνης για την βελτίωση του χρόνου αντήχησης

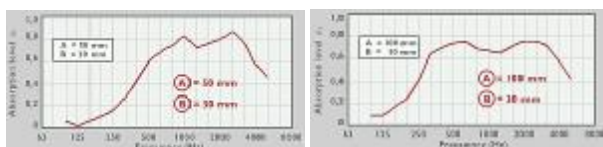
Το Microsorber® είναι μικροδιάτρητη πολυκαρβονική μεμβράνη πάχους 0.1mm, με διάμετρο οπών 0.2mm και με απόσταση μεταξύ οπών 2mm. Η απορρόφηση της μεμβράνης εξαρτάται από την απόσταση στην οποία τοποθετείται [5].

Στην παρακάτω Εικόνα 3.α φαίνεται η καμπύλη του συντελεστή απορρόφησης για μία μεμβράνη σε απόσταση 30mm, 50mm και 100 mm από την ανακλαστική

επιφάνεια. Προκειμένου να έχουμε απορρόφηση σε μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο μεμβράνες. Στην Εικόνα 3.β. φαίνεται η καμπύλη του συντελεστή απορρόφησης για δύο μεμβράνες σε απόσταση 50 mm και 100 mm από την ανακλαστική επιφάνεια και 30mm απόσταση μεταξύ τους.



Εικόνα 3.α Απορρόφηση μίας μικροδιάτρητης πολυκαρβονικής μεμβράνης σε απόσταση 30, 50, 100mm από την ανακλαστική επιφάνεια



Εικόνα 3.β Απορρόφηση δύο μικροδιάτρητων πολυκαρβονικών μεμβράνων σε απόσταση 50, 100mm από την ανακλαστική επιφάνεια και απόσταση 30mm μεταξύ τους (Source: Kaufer Microsorber® datasheet)

Οι μικροδιάτρητες μεμβράνες εφαρμόστηκαν σε δύο χώρους εστίασης. Το κοινό χαρακτηριστικό και στους δύο χώρους ήταν ότι υπήρχαν μεγάλες επιφάνειες από υαλοπετάσματα και δεν επιτρεπόταν να γίνει καμία παρέμβαση από πλευράς αρχιτεκτονικής αισθητικής στους χώρους αυτούς.

Ο μεγάλος χρόνος αντήχησης των χώρων αυτών είχε σαν συνέπεια: πρώτον να ενισχύεται ο θόρυβος από τις ομιλίες και την μουσική με αποτέλεσμα να επέρχεται κόπωση των πελατών και δεύτερον να μην μπορούν να συνομιλήσουν οι πελάτες καθώς υπήρχε μικρή καταληπτότητα του λόγου.

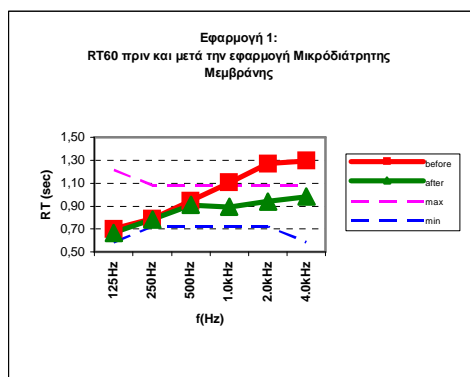
Στα παρακάτω Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μίας μικροδιάτρητης μεμβράνης στους δύο χώρους εστίασης.

4. Συμπεράσματα

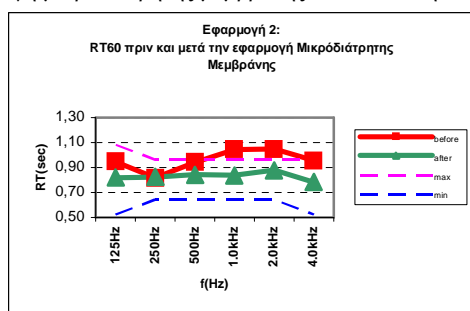
Οι μικροδιάτρητες μεμβράνες με διάμετρο διάτρησης μικρότερη από 1 mm, όταν τοποθετηθούν σε απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια μπορούν να προσθέσουν απορρόφηση μέσα σε μία αίθουσα ώστε να επιτευχθεί βελτίωση του χρόνου αντήχησης χωρίς να καταργείται η διαφάνεια της κατασκευής.

Η διάμετρος των οπών, η απόσταση μεταξύ των οπών, το πάχος της μεμβράνης και το πάχος του στρώματος του αέρα ανάμεσα στην μεμβράνη και στην επιφάνεια εφαρμογής είναι οι παράμετροι που καθορίζουν την απορρόφηση. Σε ειδικές εφαρμογές μπορούν να σχεδιαστούν μικροδιάτρητες μεμβράνες σύμφωνα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του χώρου. Συνήθως τα βιομηχανικά προϊόντα έχουν προκαθορισμένες τις τρεις πρώτες παραμέτρους έτσι ώστε μόνο η απόσταση και ο αριθμούς των μεμβρανών να είναι οι παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν.

Χρήση των μικροδιάτρητων μεμβρανών σε χώρους όπου υπάρχουν αρκετοί υαλοπίνακες μπορούν να επιφέρουν καλή ακουστική του χώρου χωρίς να αλλοιώνεται τελείως η αισθητική αυτού.



Σχήμα 1: Σύγκριση του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μικροδιατρητης μεμβράνης σε απόσταση 20-30 mm



Σχήμα 2: Σύγκριση του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μικροδιατρητης μεμβράνης σε απόσταση 50 mm

Εφαρμογή 1

Η αίθουσα έχει όγκο

$$V = 550 \text{ m}^3$$

Η οροφή και δύο τοίχοι είναι από στοιχεία ξηράς δόμησης. Το πάτωμα είναι από μάρμαρο. Μία πλευρά αποτελείται από υαλοπέτασμα (10x5 m).

Όλες οι επιφάνειες είναι σκληρές ανακλαστικές.

Εφαρμόστηκε μικροδιάτρητη μεμβράνη σε απόσταση 20-30mm εμπρός από το υαλοπέτασμα.

Όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτή την απόσταση επήλθε βελτίωση του χρόνου αντήχησης από τα 500 Hz-4kHz

Εφαρμογή 2

Η αίθουσα έχει όγκο $V = 418 \text{ m}^3$, σε σχήμα πέταλο.

Ο χώρος έχει μεγάλο ύψος και όλες οι επιφάνειες είναι σκληρές και ανακλαστικές. Υπάρχουν στον χώρο περίπου 10 παράθυρα.

Εφαρμόστηκε μικροδιάτρητη μεμβράνη σε απόσταση 50 mm εμπρός από κάθε παράθυρο.

Όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτή την απόσταση επήλθε βελτίωση του χρόνου αντήχησης από τα 250 Hz-4kHz

5. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε την εταιρία Kaefer για την άδεια προβολής του Microsorber®, καθώς και τα εστιατόρια Restaurant 48 και ΠΙΛΠΟΥΛ.

Αναφορές

- [1] D.-Y Maa, "Theory and design of microperforated-panel sound –absorbing construction", Scientia. Sinica. Vol XVIII, 55-71 (1975)
- [2] Fuchs H.V., Zha X. „Schallabsorber aus Acryglas im Plenarsaal des Bundestages
- [3] Morse P. M. & Ingard K. U., "Theoretical Acoustics" Princeton (1968)
- [4] Maa D. Y. "Potential of microperforated panel absorber". Journal of Acoustical Society of America, 104, 5, 2861–2866 (1998)
- [5] Kaefer Microsorber® datasheet

Νέα ηχοπορροφητικά υλικά από θερμοσυγκολλητές πολυεστερικές ίνες

Ηλίας Κωστάζος

Ναυπηγός-Μηχανολόγος Μηχανικός / Ευρυτανίας 27, 111 11 Αιγάλεω

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Νέα υλικά με αυξημένη ηχοαπορροφητική ικανότητα, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας και ταυτόχρονα απόλυτα φιλικά προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον διευρύνουν την παρουσία τους στην αγορά. Είναι κατασκευασμένα από πολυεστερικές ίνες πλεγμένες εν ξηρώ και θερμοσυγκολλημένες ώστε να σχηματίζουν στρώματα ιστών χωρίς χημικές συνδετικές ύλες. Είναι πλήρως ανακυκλώσιμα, μη τοξικά, παρουσιάζουν εξαιρετική διαπερατότητα σε ατμούς, δεν απελευθερώνουν ίνες ή σκόνη ακόμη και μετά από μακρά περίοδο μηχανικής καταπόνησης. Είναι απρόσβλητα από μικροοργανισμούς, μύκητες, βακτήρια και έντομα.

Είναι για αυτό κατάλληλα για χρήση σε χώρους με ιδιαίτερες απαιτήσεις υγιεινής όπως σχολεία, βρεφονηπιακούς σταθμούς και νοσοκομεία. Τα ακουστικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά τα καθιστούν εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές σε τοίχους, ξηρές επενδύσεις, ψευδοροφές, μέσα σε δομικά κενά ή πίσω από διάτρητα φύλλα, μέσα σε αεραγωγούς ή ηχοπαγίδες.

Έχουν εφαρμογή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, γυμναστήρια, κινηματογράφους, αίθουσες συναυλιών, στούντιο ηχογραφήσεων, κέντρα διασκέδασης, εκκλησίες κ.λ.π. Αποτελούν τέλος ουσιώδες συστατικό για τη δημιουργία νέων, ιδιαίτερα αποτελεσματικών, σύνθετων ηχομονωτικών υλικών.

ABSTRACT

New materials with high acoustic absorption factor, particularly in the low area frequencies, low thermal conductivity and in the same time human and environment friendly, widen their presence to international market. They are made of drylaid carded and thermobonded polyester fibres without chemical binders. They are fully recyclable, non toxic and also resistant to attack by microorganisms, fungi, bacteria and insects.

Due to these characteristics they are quite applicable in areas where a high degree of hygiene is required such as schools, nurseries and hospitals. Their acoustic and mechanical properties make them a fine choice for applications including walls, dry linings, false ceilings, inside air spaces or behind perforated sheet, inside air ducts and sound attenuators.

They are applicable in industrial buildings, gyms, cinemas, auditoria, recording studios, music halls, churches etc. Finally they represent a very useful component for the design of new, highly effective, composite sound insulating materials.

Εισαγωγή

Μια νέα γενιά ηχοαπορροφητικών υλικών έχει κάνει την παρουσία της εδώ και λίγα χρόνια στην αγορά παρέχοντας, με τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά τους, νέες δυνατότητες στους μελετητές και κατασκευαστές. Τα υλικά αυτά κατασκευάζονται από θερμοσυγκολλητές ίνες καθαρού πολυεστέρα, παρουσιάζουν εξαιρετική ηχοαπορροφητική και θερμομονωτική ικανότητα, καλή αντίσταση στη φωτιά (κατηγορία 1) χωρίς τη δημιουργία σταγόνων ή επικίνδυνων αερίων, απολύτως ασφαλή ως προς την εκπομπή στο περιβάλλον επιβλαβών ουσιών, παραγώγων ή την απελευθέρωση σωματιδίων και επί πλέον απόλυτα ανακυκλώσιμα.

1. Σύνθεση και τεχνολογία κατασκευής

Πρώτη ύλη για την κατασκευή των ηχοαπορροφητικών υλικών από ίνες πολυεστέρα είναι το PES, παράγωγο του πετρελαίου μέσω ειδικής χημειοφυσικής επεξεργασίας. Είναι στερεό υλικό σε μορφή ίνας ή θυσάνου χρώματος λευκού, άοσμο, αδιάλυτο στο νερό με σημείο τήξης 250 ~ 260 °C.

Το PES είναι δυνατό να προκύψει και από ανακύκλωση ευρέως διαδεδομένων υλικών όπως πλαστικές φιάλες (poly-ethylene terephthalate ή PET). Τα υλικά αυτά μετά την πλύση και το διαχωρισμό τους από ακάθαρτα ή μολυσματικά υλικά μετατρέπονται σε τρίμματα και με κατάλληλη επεξεργασία σε ίνες PES.

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηχοαπορροφητικών υλικών αποτελούνται από πυρήνα και περίβλημα από δύο στοιχεία 100% PES με διαφορετική θερμοκρασία τήξης. Το εξωτερικό περίβλημα της ίνας έχει σημείο τήξης 120 ~ 150 °C ώστε να είναι δυνατή η θερμοκόλληση της με τις διπλανές ίνες χωρίς τη μετατροπή τους σε άμορφη μάζα. Έχουν διάμετρο από 17,9 μm έως 47,8 μm περίπου και μήκος έως 58 mm¹.

Σε ειδικές μηχανές, με τη βοήθεια μηχανικών συστημάτων και αέρα, οι ίνες ξαίρονται και εναποτίθενται σε επάλληλα στρώματα τρισδιάστατων ιστών, με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά υλικό της επιθυμητής πυκνότητας. Σε κατάλληλους φούρνους με τη βοήθεια αέρα σε θερμοκρασία μέχρι 180 °C, αξιοποιώντας το διαφορετικό σημείο τήξης των δύο στοιχείων PES, το περίβλημα των ινών τήκεται, με αποτέλεσμα τη συγκόλληση τους μεταξύ τους. Μετά την ψύξη και τη σταθεροποίησή της η μάζα του υλικού, στην έξοδό της από τους φούρνους κόβεται σε διάφορα πάχη και στη συνέχεια σε πλάκες κατάλληλων διαστάσεων ή τυλίγεται σε ρόλους. Με τη διαδικασία αυτή παράγονται φύλλα ή ρόλοι πυκνότητας από 40 gr/m² έως 5000 gr/m².

Το παραγόμενο με τον τρόπο αυτό υλικό, είναι δυνατό στη συνέχεια, με την εφαρμογή στην επιφάνειά του υλικού PES όμοιου με αυτό του εξωτερικού περιβλήματος τις ίνας, ώστε να αποκτήσει λεία επιφάνεια χωρίς μείωση αλλά αντίθετα με αύξηση της ηχοαπορροφητικής του ικανότητας. Η λεία αυτή επιφάνεια κάνει το υλικό κατάλληλο για εμφανή τοποθέτηση χωρίς της χρήση άλλου υλικού επικάλυψης ενώ επιτρέπει την εκτύπωση στην επιφάνειά του, με χρήση laser, εικόνων έτσι ώστε να δίνουν την εντύπωση φυσικών υλικών όπως πέτρας ή τούβλων ή να αναπαριστούν ακόμη και ζωγραφικά έργα. Είναι τέλος δυνατή η επικόλληση στην επιφάνειά τους διαφόρων ηχοαπορροφητικών υλικών επικάλυψης όπως υφασμάτων κ.λ.π.

Σαν αποτέλεσμα της χρήσης των ινών πολυεστέρα και της παραπάνω τεχνικής, έχουμε υλικά που:

- διατηρούν τα μηχανικά και θερμο/ακουστικά χαρακτηριστικά τους στη διάρκεια του χρόνου και κάτω από έντονη μηχανική καταπόνηση, αφού κατασκευάζονται χωρίς τη χρήση ρητινών σαν συνδετική ύλη, και δεν απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα ίνες ή άλλα χημικά συστατικά επικίνδυνα για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία,
- δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη εντόμων, νοσογόνων μικροοργανισμών, μυκήτων και βακτηριδίων,
- δεν απαιτούν μέτρα προφύλαξης κατά τη μεταφορά και τη φύλαξή τους ούτε προστατευτικό εξοπλισμό από τους εργαζόμενους κατά την εφαρμογή τους.
- είναι διαπερατά από τους υδρατμούς και επομένως ιδιαίτερα κατάλληλα για χρήση σε οικοδομικές εφαρμογές,
- και τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό με βάση τις σημερινές αντιλήψεις για το περιβάλλον, απόλυτα ανακυκλώσιμα.

2. Φυσικά χαρακτηριστικά, μορφές και αντιπροσωπευτικοί τύποι

Τυπική μορφή των ηχοαπορροφητικών υλικών από θερμοσυγκολλητές ίνες πολυεστέρα είναι αυτή των πλακών με επίπεδες, λείες ή λιγότερο ή περισσότερο τραχείες. Το χρώμα είναι συνήθως λευκό δηλαδή το φυσικό χρώμα των πολυεστερικών ινών. Τα φύλλα που προέρχονται από ανακύκλωση έχουν χρώμα ανοιχτό πράσινο ή γκριζό. Έχουν τυπικές διαστάσεις 0,60X1,20 μ. έτσι ώστε να τοποθετούνται εύκολα και γρήγορα στο εσωτερικό ελαφρών τοιχωμάτων από γυψοσανίδα ή παρόμοια υλικά. Τα συνήθη πάχη των πλακών είναι από 10 mm έως 50 mm, ενώ διατίθενται και πάχη έως 150 mm. Οι συνήθεις πυκνότητες είναι από 20 kg/m³ έως 50 kg/m³. Αντιπροσωπευτικά υλικά του τύπου αυτού είναι τα TECNODENS, FIBERFORM 62T, POLYWALL S1, EDILFIBER, WOOLPET κ.λ.π.

Η τελική επιφάνεια των φύλλων είναι συνήθως επίπεδη, όπως προκύπτει από τη διαδικασία κοπής στη φάση της παραγωγής. Για εμφανείς εφαρμογές διατίθενται φύλλα με λεία ηχοδιαπερατή επιφάνεια. Αντιπροσωπευτικά υλικά του τύπου αυτού είναι τα TECNODENS, FIBERFORM 62T και EDILFIBER.

Για ειδικές εφαρμογές, όπως μνημεία ή άλλοι δημόσιοι χώροι, στην επιφάνεια αυτή είναι δυνατή η εκτύπωση εικόνων με απομίμηση του υλικού και της υφής της επιφάνειας που επενδύεται, γραφικών συνθέσεων ειδικά σχεδιασμένων για την κάθε εφαρμογή ή και υπαρκτών ζωγραφικών έργων.

Πρόσφατα έχουν κάνει την εμφάνισή τους και φύλλα με ανάγλυφη επιφάνεια κυματοειδούς μορφής, κατάλληλα για εμφανείς ηχοαπορροφητικές επενδύσεις. Αντιπροσωπευτικό υλικό του τύπου αυτού είναι το POLYWALL S1 BUGNATO.

Η τελική επιφάνεια είναι επίσης δυνατό να είναι καλυμμένη με ηχοδιαπερατή επένδυση από το ίδιο υλικό μαύρου χρώματος για εφαρμογή πίσω από διάτρητα στοιχεία όπως ψευδοροφές ή επενδύσεις και σε χώρους ρυπαρούς όπως μηχανοστάσια κλπ. Αντιπροσωπευτικό υλικό του τύπου αυτού είναι το TECNODENS BLACK.

Για μη εμφανείς εφαρμογές όπως σε ενδιάμεσα κενά τοιχωμάτων ή πίσω από επενδύσεις διατίθενται τύποι με ανώμαλη επιφάνεια αλλά χαμηλότερο κόστος λόγω της απλούστευσης της διαδικασίας παραγωγής τους αλλά και με πρόσμιξη με ανακυκλωμένα υλικά. Αντιπροσωπευτικό υλικό του τύπου αυτού είναι το WOOLPET.

Σε χαμηλότερες πυκνότητες και μικρά σχετικά πάχη διατίθενται επίσης σε μορφή ρόλων. Αντιπροσωπευτικό υλικό του τύπου αυτού είναι το ROTOLO

EDILFIBER ιδανικό για τοποθέτηση σε κεραμοσκεπές χωρίσματα και επενδύσεις με γυψοσανίδες κ.λ.π.

Τέλος ήδη έχουν κάνει την εμφάνισή τους τρισδιάστατες πλάκες πυραμιδοειδούς διαμόρφωσης από υψηλής πυκνότητας υλικό για τοποθέτηση σε ψευδοροφές, ή επενδύσεις τοιχωμάτων και τη δημιουργία ηχοαπορροφητικών διαφραγμάτων (μπάφλες), αυτοτελώς ή σε συνδυασμό με πρόσθετα ηχοαπορροφητικά φύλλα πίσω από αυτές. Αντιπροσωπευτικό υλικό του τύπου αυτού είναι το VALPHON 400S

3. Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το σύνολο των παραπάνω υλικών έχουν παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά. Ενδεικτικά παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του FIBERFORM 62T:

Χημική σύνθεση:	100% πολυεστέρας
Συστατικά:	Συμπολυμερές Πολυεθυλινοτερεφθαλίτης PET
Ελάχιστη – Μέγιστη διάμετρος ινών:	17,9 μm – 47,8 μm
Ποσοστό ινών με διάμετρο από 40 μm – 50 μm :	34,8%
Μέσο μήκος ινών:	55 mm
Περιοχή θερμοκρασιών διατήρησης μακροπρόθεσμα και σε όλη τη μάζα των χαρακτηριστικών του:	-40 έως 110 °C
Διαλυτότητα:	Χαμηλή σε ορισμένους χλωριωμένους διαλύτες.
Δυνατότητα ανακύκλωσης:	100% ανακυκλώσιμο επειδή δεν περιέχει πρόσθετα ή συνδετικές ύλες εκτός από πολυεστέρα.
Πάχος:	Από 10 έως 145 + ή - 5 mm
Μάζα ανά επιφάνεια:	Από 500 έως 4000 g/m^2
Αναφλεξιμότητα:	Class 1 (BKZ 5.2)
Δημιουργία σταγόνων λόγω καύσης:	Καμία
Τοξικότητα και θολότητα καπνού:	F1 (AFNOR 16-101)
Μέσα κατάσβεσης:	CO ₂ , πυροσβεστικός αφρός, νερό.
Επικίνδυνα παράγωγα αποσύνθεσης:	Κανένα
Μέτρα προφύλαξης κατά τη μεταφορά και αποθήκευση:	Κανένα
Θερμική αξία:	21600 KJ/Kg
Ειδική θερμότητα:	0.24 KJ/Kg°K
Διαπερατότητα σε ατμό:	$\mu = 3.11$

Ενδεικτικές των δυνατοτήτων των υλικών αυτών είναι επίσης οι τιμές του δείκτη ηχοαπορρόφησης α για διάφορα πάχη και πυκνότητες του υλικού FIBERFORM 62Tⁱⁱ.

	100 mm 30 Kg/m ³	50 mm 60 Kg/m ³	50 mm 30 Kg/m ³	50 mm 20 Kg/m ³	25 mm 30 Kg/m ³
Hz	A	α	α	α	α
100	0,39	0,24	0,18	0,17	0,07
125	0,44	0,28	0,22	0,22	0,11
160	0,57	0,38	0,30	0,28	0,14
200	0,69	0,48	0,36	0,37	0,20
250	0,84	0,61	0,45	0,42	0,26
315	0,91	0,70	0,58	0,52	0,33
400	0,99	0,82	0,65	0,59	0,41
500	1,00	0,93	0,69	0,64	0,46
630	1,00	0,97	0,74	0,68	0,51
800	0,96	0,96	0,78	0,74	0,56
1000	0,91	0,95	0,79	0,75	0,59
1250	0,92	0,91	0,79	0,74	0,60
1600	0,89	0,91	0,83	0,71	0,63
2000	0,90	0,91	0,83	0,73	0,64
2500	0,99	0,92	0,81	0,72	0,68
3150	0,95	0,95	0,77	0,69	0,70
4000	0,96	0,97	0,80	0,71	0,70
5000	0,94	0,97	0,84	0,70	0,71

4. Εφαρμογές

4.1 Επενδύσεις εμφανείς ή πίσω από διάτρητες επιφάνειες

Η δυνατότητα των υλικών από πολυεστερικές ίνες να έχουν λεία επιφάνεια και η μηχανική σταθερότητά τους ακόμη και κάτω από έντονη μηχανική καταπόνηση τα καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμα για την κατασκευή εμφανών ηχοαπορροφητικών επενδύσεων. Η απόλυτα συμβατή με την υγεία χημική τους σύνθεση και το γεγονός ότι δεν απελευθερώνουν ίνες στην ατμόσφαιρα τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές σε χώρους με αυξημένες απαιτήσεις υγιεινής όπως βρεφονηπιακοί σταθμοί, σχολεία, νοσοκομεία, κλειστά κολυμβητήρια, αίθουσες συνεδριάσεων κ.λ.π.

Η μηχανική σταθερότητά τους και η αντοχή τους στις ατμοσφαιρικές συνθήκες τα καθιστούν επίσης εξαιρετικά χρήσιμα για την κατασκευή ηχοαπορροφητικών επιφανειών, ηχοπετασμάτων για κυκλοφοριακό θόρυβο, υπαίθριες μηχανολογικές εγκαταστάσεις (μονάδες κλιματισμού, ανεμιστήρες κ.λ.π.) και βιομηχανικές εφαρμογές σε απ ευθείας επένδυση τοιχίων, σε φύλλα λαμαρίνας ή κόντρα πλακέ χωρίς την ανάγκη ύπαρξης προσθέτων άλλων υλικών για μηχανική αντοχή όπως διάτρητη λαμαρίνα κ.λ.π.

Αυτό ελαχιστοποιεί το κόστος των κατασκευών και ως κόστος υλικών αλλά και ως κόστος εργατικών.

Η δυνατότητα εκτύπωσης εικόνων κάθε είδους στην επιφάνειά ορισμένων από αυτά, όπως το EDILFIBER, παρέχει εξαιρετικές δυνατότητες ένταξης σε χώρους με υψηλές αισθητικές απαιτήσεις και ιδιαίτερα σε μνημεία, εκκλησίες κ.λ.π.

Φύλλα επενδυμένα με μαύρο ηχοδιαπερατό ύφασμα, όπως το TECNODENS BLACK, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την εμφανή επένδυση επιφανειών που υφίστανται έντονη ρύπανση (μηχανοστάσια κ.λ.π.) ή για τοποθέτηση πίσω από διάτρητες ψευδοροφές ή επενδύσεις.

4.2 Σε δομικά κενά

Η διαπερατότητα των ηχοαπορροφητικών υλικών από πολυεστερικές ίνες από τους υδρατιμούς, συνδυασμό με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους, τα καθιστά κατάλληλα για τοποθέτηση σε δομικά κενά όπως μεταξύ οπτοπλινθοδομών σε τοιχοποιίες, συστημάτων ξηρής δόμησης και επενδύσεων, ξύλινων δαπέδων κ.λ.π. Ενδεικτική για τις δυνατότητές τους είναι η αύξηση της ηχομονωτικής αξίας διαφόρων τοίχων από οπτοπλινθοδομές και γυψοσανίδες κατά 6 dB στα 500 Hz με την τοποθέτηση στα κενά τους φύλλων EDILFIBER πάχους 50 mm, πυκνότητας 30 Kg/m³.ⁱⁱⁱ

Ιδιαίτερα αποτελεσματικά αποδεικνύονται τα υλικά αυτά σαν ηχοαπορροφητικά αντικραδασμικά φύλλα υψηλής πυκνότητας ή και σαν μέρος σύνθετων υλικών, όπως το Mantophon Plus, για την κατασκευή πλωτών δαπέδων υψηλών απαιτήσεων.

4.3 Σε εγκαταστάσεις κλιματισμού αερισμού (ηχοπαγίδες – αεραγωγοί)

Η αυξημένη σταθερότητα σε μακρόχρονη μηχανική καταπόνηση, η μη απελευθέρωση ινών και αποτροπή ανάπτυξης εντόμων, νοσογόνων μικροοργανισμών και βακτηριδίων, καθιστά τα υλικά αυτά απολύτως κατάλληλα για χρήση σε εγκαταστάσεις κλιματισμού, ιδιαίτερα νοσοκομείων, ξενοδοχείων κ.λ.π. Η αυξημένη ηχοαπορροφητική ικανότητά τους στις χαμηλές συχνότητες αποτελεί επίσης ένα ισχυρό πλεονέκτημα της χρήσης τους για την επένδυση κάθε είδους αεραγωγών και την κατασκευή ηχοπαγίδων συστημάτων αερισμού – κλιματισμού όπου οι χαμηλές συχνότητες εμφανίζονται σε υψηλές στάθμες.

4.4 Στην κατασκευή σύνθετων ηχομονωτικών και αντικραδασμικών υλικών

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηχοαπορροφητικών υλικών από πολυεστερικές ίνες τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για τη δημιουργία σύνθετων ηχομονωτικών ή/και αντικραδασμικών υλικών με εξαιρετικές προδιαγραφές.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα ηχομονωτικά αντικραδασμικά φύλλα Mantophon Plus και Mantophon EcoPlus που αποτελούνται από ένα αντικραδασμικό φύλλο από πολυολεφινικές ρητίνες, ένα ηχομονωτικό φύλλο μολύβδου ή εύκαμπτο φύλλο πλαστικοελαστικής πολυολεφίνης αντίστοιχα και ένα αντικραδασμικό - ηχοαπορροφητικό φύλλο πολυεστερικών ινών υψηλής πυκνότητας με εξαιρετική συμπεριφορά στον αερόφερτο και κτυπογενή θόρυβο. Τα ηχομονωτικά φύλλα CIRMIX Pro και CIRMIX Dual που αποτελούνται από ένα ή δύο αντίστοιχα αντικραδασμικά φύλλα από διογκωμένα στοιχεία πολυουραιθάνης με κλειστές κυψέλες προερχόμενα από ανακύκλωση, ένα ή δύο αντίστοιχα ηχομονωτικά φύλλα ελαστικού υψηλής πυκνότητας και ένα ηχοαπορροφητικό φύλλο πολυεστερικών ινών. Το ηχοαπορροφητικά - ηχομονωτικά φύλλα Phonoter και Polywall Pb που αποτελούνται από δύο ηχοαπορροφητικά φύλλα πολυεστερικών ινών και ένα

ενδιάμεσο ηχομονωτικό φύλλο πλαστικοελαστικής πολυολεφίνης ή μολύβδου αντίστοιχα με εξαιρετική ηχοαπορροφητική και ηχομονωτική συμπεριφορά.

Τέλος το SuperWood που αποτελείται από δύο ηχομονωτικά φύλλα ινών ξύλου και ένα ενδιάμεσο ηχοαπορροφητικό φύλλο πολυεστερικών ινών.

5. Βελτίωση της ακουστικής χώρου με χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών πολυεστερικών ινών

Οι δυνατότητες των ηχοαπορροφητικών υλικών από πολυεστερικές ίνες πρόσφατα αξιοποιήθηκαν πλήρως για τη βελτίωση της ακουστικής του Πολυδύναμου Αθλητικού Κέντρου στο Περιστέρι όπου διεξήχθη το αγώνισμα της πυγμαχίας στα πλαίσια της Ολυμπιάδας 2004.

Για την κατασκευή ηχοαπορροφητικής επένδυσης χρησιμοποιήθηκαν φύλλα υλικού FIBERFORM 62T χρώματος λευκού, πάχους 5 cm πυκνότητας 40 kg/m³ επικολημένα απ' ευθείας στα κατακόρυφα μεταλλικά τοιχώματα, χωρίς τη χρήση σκελετού ανάρτησης ή πρόσθετου υλικού επικάλυψης (διάτρητη λαμαρίνα, ξύλο κ.λ.π.).

Η κατασκευή είναι εφικτή επειδή το FIBERFORM 62T, κατασκευασμένο από θερμοσυγκολλητά στρώματα ινών πολυεστέρα μεγάλης διαμέτρου ($\Phi > 30\mu$) χωρίς τη χρήση χημικών συνδετικών υλών, δεν απελευθερώνει ίνες, δεν ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών και είναι δύσφλεκτο και αυτοσβενδύμενο.

Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με το μικρό του βάρος, παρά το μεγάλο ύψος της κατασκευής, επέτρεψαν την τοποθέτησή του σε μια επιφάνεια 520 m² περίπου από προσωπικό δύο ατόμων χωρίς μάσκες, γάντια ή άλλες προφυλάξεις σε χρόνο έξι ημερών.

Επίσης έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες χωρίς επένδυση στο κλειστό κολυμβητήριο της σχολής Αυγουλέα Λιναρδάτου, με επένδυση διάτρητου στο κλειστό κολυμβητήριο του ΤΕΦΑΑ (Γυμναστική Ακαδημία Αθηνών).

- i Αντιστοιχούν στο υλικό FIBERFORM 62T
- ii Στοιχεία από τα πιστοποιητικά εργαστηριακών δοκιμών των υλικών
- iii Σύμφωνα με στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρίας VALTECH

**Ακουστική αρχαίων ωδείων.
Μελέτη περίπτωσης: Το ωδείο της Αρχαίας Αγοράς
Θεσσαλονίκης**

Χρήστος Γούσιος
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
cgoussios@hotmail.com

Χρήστος Σεβαστιάδης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
csevast@ad.auth.gr

Γεώργιος Καλλίρης
Επίκουρος Καθηγητής
ΑΠΘ
gkal@jour.auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΑΠΘ
pap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικός στόχος της έρευνάς μας είναι η εξακρίβωση της ακουστικής και των ακουστικών παραμέτρων των αιθουσών που ονομάζονταν στην αρχαιότητα Ωδεία. Τα Ωδεία ήταν κλειστοί αμφιθεατρικοί χώροι που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κατά την ελληνιστική και τη ρωμαϊκή περίοδο. Μια ειδική περίπτωση είναι το Ωδείο της Ρωμαϊκής Αγοράς της Θεσσαλονίκης για το οποίο παρουσιάζουμε πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία, τη χρήση, την ιστορία και τα βασικά αρχιτεκτονικά στοιχεία που συνδέονται με την ακουστική του. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τη μεθοδολογία, τα αποτελέσματα των μετρήσεων των βασικών ακουστικών χαρακτηριστικών του, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησής του με λογισμικό βασισμένο στη μέθοδο ακτινικής ανίχνευσής (Ray Tracing).

ABSTRACT

The basic target of our research is the definition of the acoustics and the acoustical parameters of the chambers called Odeia. The Odeia were closed amphitheatrical halls constructed and used in hellenistic and roman times. A special case is the Odeion of the Roman Market of Thessaloniki. Information about its location, use, history and the basic architectural elements related with its acoustics are presented. Methodology, measurement results of basic acoustical attributes and the results of Ray Tracing modeling are also presented.

Εισαγωγή

Στην αρχαία Ελλάδα, πέρα από τα διάσημα ανοικτά θέατρα, υπήρξαν μικρότεροι αμφιθεατρικοί χώροι όπου φιλοξενούνταν πολιτιστικές και πολιτικές δραστηριότητες. Αυτοί οι χώροι ονομάζονταν Ωδεία και η βασικότερη διαφορά τους από τα θέατρα ήταν το γεγονός ότι ήταν κλειστοί, σκεπαστοί ή μερικώς σκεπαστοί χώροι [1]. Το πιο φημισμένο από τα Ωδεία είναι αυτό του Ηρώδη του Αττικού, το οποίο, ως γνωστό, χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για μουσικές εκδηλώσεις και θεατρικές παραστάσεις, δυστυχώς όμως χωρίς την παρουσία στέγης [2].



Σχήμα 5. Ωδείο Ηρώδη Αττικού (Ηρώδειο) Αθήνα.

1. Τα αρχαία Ωδεία

Ωδή είναι η ελληνική λέξη που εκφράζει το λυρικό ποίημα. Ωδείο είναι ο χώρος που χρησιμοποιείται για το τραγούδι. Είναι ο χώρος που στην αρχαιότητα φιλοξενούνταν οι μουσικοί διαγωνισμοί και άλλες εκδηλώσεις που συμπεριλάμβαναν τραγούδι με συνοδεία μουσικών οργάνων, καθώς επίσης και οι διαγωνισμοί των ραψωδών και των κιθαρωδών [3].

Αυτό που κάνει πιο ενδιαφέρουσες τις κατασκευές αυτές είναι το γεγονός της ύπαρξης στέγης, διαφορετικού τύπου σε κάθε ωδείο, γεγονός που προκύπτει από τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που σώζονται σε κάποια από αυτά.

Μέχρι σήμερα τα ωδεία της αρχαιότητας και γενικά οι αρχαίοι στεγασμένοι χώροι μελετήθηκαν κυρίως από αρχαιολόγους. Γενικά σπάνια αναφέρονται από ιστορικούς θεάτρου, αρχιτέκτονες και μηχανικούς.

Τα τρία πιο σημαντικά στοιχεία μελέτης αυτών των χώρων είναι:

1. Η χρήση τους,
2. η κατασκευή της στέγης,
3. τα ακουστικά κατασκευαστικά στοιχεία, και
4. η ακουστική τους.

Είναι πραγματικά δύσκολη η αποτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς αυτών των χώρων καθώς και η πραγματική τους χρήση. Ένα μεγάλο ερώτημα επίσης είναι το κατά πόσο η ακουστική των ωδείων ήταν αποτέλεσμα έρευνας και μελέτης. Γνώριζαν οι μηχανικοί της αρχαιότητας τη διαφορά της ακουστικής χώρων από αυτή του ελεύθερου ακουστικού πεδίου;

Δεν υπάρχει καμία απόδειξη για την ποιότητα της ακουστικής στα ωδεία. Συνεπώς, ο βασικός μας στόχος είναι ο προσδιορισμός της ακουστικής συμπεριφοράς μη υπαρκτών χώρων.

2. Το Ωδείο της Θεσσαλονίκης

Το συγκρότημα της αγοράς της Θεσσαλονίκης ήταν το διοικητικό κέντρο της πόλης κατά τα αυτοκρατορικά χρόνια που ξεκινάν το 31 π.Χ. με τη βασιλεία του Αυγούστου. Στους χώρους της αρχαίας αγοράς βρισκόταν οι δημόσιες υπηρεσίες και το ωδείο. Το όλο συγκρότημα οργανώθηκε μετά το 168 π.Χ. όταν οι ρωμαίοι κατέλαβαν τη Θεσσαλονίκη, ενώ εγκαταλείφθηκε τον 4^ο αιώνα μ.Χ.



Σχήμα 6. Το Ωδείο της αρχαίας αγοράς της Θεσσαλονίκης.

Στο κεντρικό τμήμα της ανατολικής πτέρυγας του συγκροτήματος της αγοράς διακρίνονται τρεις κατασκευαστικές φάσεις του ωδείου [4]. Αρχικά κατασκευάστηκε ένα σκεπαστό βουλευτήριο το οποίο χρησιμοποιούνταν ως ο τόπος των συνεδριάσεων των πολιτικών σωμάτων που διοικούσαν τη Θεσσαλονίκη. Η χωρητικότητα του βουλευτηρίου ήταν διακοσίων ατόμων ενώ τα κοίλα καθίσματά του ήταν διατεταγμένα σε καμπύλες εγγεγραμμένες σε ορθογώνιο.

Κατά το τέλος του 2^{ου}, αρχές του 3^{ου} αιώνα μ.Χ. το βουλευτήριο μετατράπηκε σε ωδείο, επίσης στεγασμένο, με χωρητικότητα τετρακοσίων ατόμων. Η πρώτη σειρά των καθισμάτων ήταν χτισμένη στο ίδιο επίπεδο με το δάπεδο της σκηνής. Το ενδιαφέρον στοιχείο του ωδείου της Θεσσαλονίκης είναι η ψηλή σκηνή του. Στο δεύτερο μισό του 3^{ου} αιώνα μ.Χ. τοποθετήθηκαν λεπτές μαρμάρινες πλάκες επάνω στα καθίσματα [5]. Στο Δεύτερο μισό του 4^{ου} αιώνα μ.Χ. αποφασίστηκε η επέκταση του ωδείου και η μετατροπή του σε θέατρο. Κατασκευάστηκε ένα δεύτερο κοίλο με τετραπλάσιο μέγεθος και η όλη χωρητικότητα θα ήταν περίπου δύομιση χιλιάδων ατόμων. Όμως, η τελευταία φάση της κατασκευής δεν ολοκληρώθηκε με αποτέλεσμα το ωδείο να καταστραφεί και ειδικότερα η στέγη του.

Πολύ λίγα αρχιτεκτονικά στοιχεία μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την κατασκευαστική μορφή του ωδείου και ακόμα περισσότερο της στέγης του. Η πιο σημαντική μαρτυρία είναι τα ογκώδη θεμέλια που βρίσκονται εκατέρωθεν της σκηνής από τα οποία αναπτύσσονταν δύο μεγάλες κολόνες. Η απόσταση μεταξύ των κολόνων ήταν δεκατρία μέτρα και πάνω τους εδραζόταν ένα χοντρό ξύλινο δοκάρι στο οποίο στηρίζονταν τα ακτινικά ξύλινα νεύρα της στέγης.

3. Μεθοδολογία

Μέσα στα εναπομείναντα τοιχώματα του ωδείου, στην κατάσταση που σώζονται σήμερα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κάποιων ακουστικών παραμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά κατασκευής του μοντέλου μας. Στη συνέχεια, έγινε μοντελοποίηση του χώρου και υπολογισμός των ίδιων παραμέτρων. Μετά από συγκρίσεις των δεδομένων των μετρήσεων με αυτά του μοντέλου, καταλήγουμε στον ιδανικό συνδυασμό υλικών από τη βιβλιοθήκη υλικών του σχεδιαστικού προγράμματος, τα οποία πρέπει κανείς να επιλέξει από τα πιο κατάλληλα για μια τέτοια αρχαία κατασκευή. Οι υπολογισμοί για το μοντέλο χωρίς οροφή, πρέπει να είναι της τάξης των μετρήσεων.

Αφού καταλήξαμε στα υλικά της κατασκευής, προχωρήσαμε στη σχεδίαση της στέγης του Ωδείου. Στο στεγασμένο πλέον Ωδείο υπολογίστηκαν και πάλι οι ίδιες

ακουστικές παράμετροι και έτσι καταλήξαμε σε στοιχεία σχετικά με την ακουστική του. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με χρήση λογισμικού βασισμένου σε στατιστικούς τύπους (λ.χ. Sabine) και στη μέθοδο ακτινικής ανάχνευσης.

Οι βασικότεροι λόγοι που τα δεδομένα των μετρήσεών μας από μόνα τους, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτίμηση της συνολικής ακουστικής ενός Ωδείου είναι οι εξής:

Κανένα από αυτά δεν σώζεται στεγασμένο

Κάποιοι ή οι περισσότεροι τοίχοι είναι γκρεμισμένοι

Τυχόν ανακατασκευές έχουν γίνει με σύγχρονα υλικά και μεθόδους

Ο περιβάλλοντας χώρος έχει αλλάξει, όπως στο παράδειγμα της Θεσσαλονίκης, όπου το Ωδείο βρίσκεται στο κέντρο της πόλης και βρίσκεται σε χαμηλότερο απ' ότι το σημερινό επίπεδο του εδάφους

Παρά όλα αυτά, ενώ δεν μπορούμε να εξάγουμε απ' ευθείας αποτελέσματα από τις μετρήσεις μας, μπορούμε να κάνουμε κάποιες πρώτες προβλέψεις και να διαπιστώσουμε τυχόν ιδιαιτερότητες στη ακουστική συμπεριφορά των χώρων αυτών.

Όμως, και τα δεδομένα των υπολογισμών παρουσιάζουν αποκλίσεις από την (τότε) πραγματικότητα. Οι λόγοι είναι οι εξής:

Αναφορικά με τα υλικά της κατασκευής, τα μοντέλα είναι σχεδιασμένα βάσει παραδοχών και επί τόπου έρευνας

Ο τρόπος και η δομή της κατασκευής της οροφής, η κλίση, ο αριθμός των ακτινικών νεύρων κ.λ.π. είναι άγνωστος και η σχεδίαση της στέγης του μοντέλου μας αποτελεί αποτέλεσμα αυθαίρετης επιλογής

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως κόγχες και κοιλότητες μπροστά από τη σκηνή, αγνοήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση.

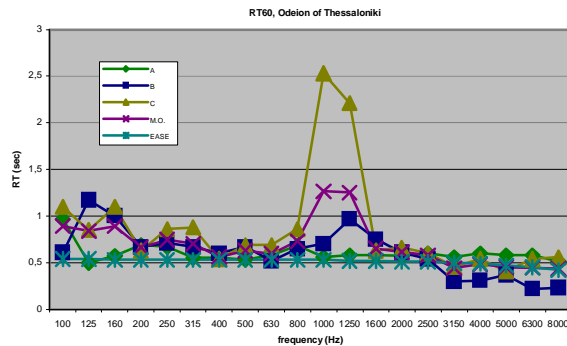
Στο Ωδείο της Θεσσαλονίκης μετρήθηκε ο χρόνος αντήχησης RT60 με τη χρήση του Building Acoustics Analyzer. Η κατανομή της στάθμης ηχητικής πίεσης μετρήθηκε με τη χρήση ηχομέτρου σε διάφορες θέσεις στο Ωδείο. Το μοντέλο πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού EASE.

Η βασικότερη παραδοχή κατά τη μοντελοποίηση, είναι ότι η οροφή εσωτερικά ήταν οριζόντια (δηλαδή παράλληλη με την ορχήστρα) επενδυμένη με ξύλο.

Τέλος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των μοντελοποιήσεων αφορούν το Ωδείο χωρίς την ύπαρξη κοινού.

4. Αποτελέσματα μετρήσεων

Από τις μετρήσεις του χρόνου αντήχησης στο ωδείο της Θεσσαλονίκης διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ομοιομορφία σε όλο το εύρος των συχνοτήτων εκτός από τις χαμηλές συχνότητες και την περιοχή περί των 1000Hz. Αν και ο χώρος είναι ανοικτός ο χρόνος αντήχησης είναι μετρήσιμος και της τάξης των 1/2 sec. Από τη μέτρηση αυτή μπορέσαμε να συγκεκριμενοποιήσουμε τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση.

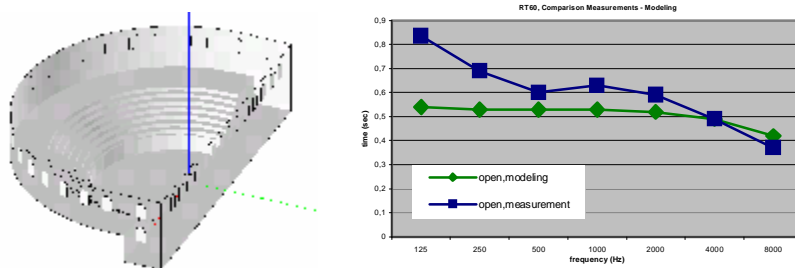


Σχήμα 7. Χρόνος αντήχησης RT_{60}

Η υπερβολική αύξηση του χρόνου αντήχησης στην περιοχή περί των 1000Hz χαίρει περαιτέρω διερεύνησης. Επισημαίνουμε ότι αυτή η αύξηση παρατηρείται στο τελευταίο διάζωμα, γεγονός που επιτρέπει την εικασία ότι δεν πρόκειται για χαρακτηριστικό της εσωτερικής ακουστικής του ωδείου αλλά για αποτέλεσμα ακουστικών φαινομένων σχετικών με τη γενικότερη αρχιτεκτονική της τοποθεσίας.

5. Αποτελέσματα μοντελοποίησης

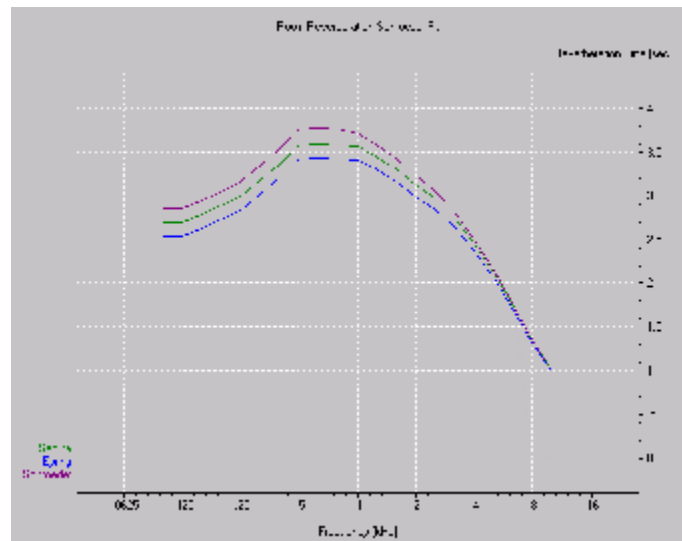
Βάσει των υλικών που επελέγησαν με κριτήριο το χρόνο αντήχησης που μετρήσαμε και την επί τόπου παρατήρηση, δημιουργήσαμε το μοντέλο του Ωδείου.



Σχήμα 8. Μοντέλο του Ωδείου και σύγκριση μετρήσεων και μοντελοποίησης σε ανοικτό ωδείο.

Αρχικά παραλείποντας τη στέγη του ωδείου υπολογίσαμε το χρόνο αντήχησης του μοντέλου. Η παράθεση των δύο καμπύλων παρουσιάζει ένα σχετικά αξιόπιστο, αναφορικά με τα υλικά του, μοντέλο. Στις χαμηλές συχνότητες η διαφορά οφείλεται κυρίως στο γεγονός της ανεπάρκειας πληροφοριών σ' αυτή τη συχνοτική περιοχή, λόγω της χρήσης της μεθόδου ακτινικής ανίχνευσης.

Με την προσθήκη της στέγης πραγματοποιήσαμε τον ίδιο υπολογισμό και προέκυψε η καμπύλη την οποία παραθέτουμε. Ο χρόνος αντήχησης του ως άδειος κλειστός χώρος είναι μεγαλύτερος από τις επιθυμητές. Υποθέτοντας ότι η παρουσία κοινού θα μείωνε το χρόνο αντήχησης τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν είναι περί των άνω ορίων της αποδεκτής περιοχής χρόνων αντήχησης για τη χρήση του Ωδείου.



Σχήμα 9. Αποτελέσματα μοντελοποίησης κλειστού Ωδείου.

6. Περαιτέρω εργασίες

Εξακρίβωση των αιτιών της αύξησης του χρόνου αντήχησης στην περιοχή των 1000Hz.

Μοντελοποίηση και πιθανές μετρήσεις με κοινό (καθώς ο χώρος χρησιμοποιείται για τη φιλοξενία πολιτιστικών εκδηλώσεων)

Συνεργασία με ερευνητές μουσικολόγους για τον προσδιορισμό της μουσικής και των μουσικών οργάνων που χρησιμοποιούνταν κατά την αρχαιότητα, ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα των ωδείων για μουσικές χρήσεις εκείνης της εποχής.

Μετρήσεις των παραμέτρων καταληπτότητας του λόγου

Μετρήσεις και μοντελοποίηση και άλλων ωδείων με στόχο την εξαγωγή τυχόν κοινών ακουστικών χαρακτηριστικών

7. Αναφορές

[1] Bieber Margaret, History of the Greek and Roman Theatre, 2nd edition, Princeton.

[2] Christos Goussios, Christos Sevastiadis, George Kalliris, and George Papanikolaou, The Acoustics of Ancient Greek Odeia, 116th AES Convention 2004 May 8–11 Berlin, Germany.

[3] Hesychius Alexandrinus, Lexicon, rec. M. Schmidt, 1858.

[4] Βελένης Γιώργος και Αδάμ-Βελένη Πολυξένη, Η αρχαία αγορά της Θεσσαλονίκης, University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1997.

[5] Παπαγιαννόπουλος Απόστολος, Μνημεία της Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ρέκος, 1983.

Ραδιοφωνικά στούντιο, παρελθόν-παρόν-μέλλον

Δημήτριος Κεραμίδας
Σύμβουλος Ακουστικής ΕΡΤ 3
dkeramidas@ert3.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μορφή, το μέγεθος και τα ακουστικά χαρακτηριστικά των ραδιοφωνικών στούντιο έχουν αλλάξει σημαντικά, προσπαθώντας να προσαρμοσθούν στις ανάγκες κάθε εποχής. Έτσι, τα πρώτα στούντιο των δεκαετιών '40 – '60 έχουν σημαντικές διαφορές με τα στούντιο των δεκαετιών '70 – '80 και των δεκαετιών '90 – 2000.

Η ανάπτυξη της ηλεκτροακουστικής και η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τεχνολογία είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρέασαν τον τρόπο λειτουργίας και κατασκευής των στούντιο. Η ταχεία ανάπτυξη της τηλεόρασης έφερε τη ραδιοφωνία σε δεύτερο επίπεδο (όσο αφορά την ακρόαση) με αποτέλεσμα τη μείωση των επενδύσεων για την κατασκευή και λειτουργία ραδιοφωνικών σταθμών.

Στην εργασία αυτή επιχειρείται μια ιστορική αναδρομή στα ραδιοφωνικά στούντιο, και στους παράγοντες που επηρέασαν την κατασκευή τους. Επίσης γίνεται μια προσπάθεια πρόβλεψης των μελλοντικών κατασκευών.

Radio studios, past-present-future

Dimitrios Keramidas
Acoustic consultant ERT 3
dkeramidas@ert3.gr

ABSTRACT

The figure, size and acoustic characteristics of radio studios have changed significantly, in an effort to adapt to each eras requirements. For that reason the first radio studios of the 40's – 50's have great difference, compared to those of the 70's-80's, as well as the contemporary ones.

The progress in electroacoustics and the transition from analog to digital technology, are two important factors, that have influenced the construction techniques and operation of studios. As we all know, the investments in radio stations have been significantly cut down, in favor of television.

We retrospectively tried to describe the characteristics of ERT radio studios, from 1928 till today, and we present the results, as well as a prognosis for the future.

1. Ιστορική Αναδρομή

1.1 Ράδιο Τσιγγιρίδη [1] [6] [7] [10] [11]

Η πρώτη ραδιοφωνική εκπομπή στα Βαλκάνια έγινε τον Σεπτέμβριο του 1928 στη Διεθνή Έκθεση Θεσσαλονίκης. Ο μηχανολόγος ηλεκτρολόγος Χ. Τσιγγιρίδης κατασκεύασε πομπό ισχύος 500W με κεραία ύψους 36 m. και τοποθέτησε ραδιόφωνα με μεγάφωνα στην είσοδο και έξοδο της Έκθεσης. Το πρώτο studio ήταν

ένας μικρός θάλαμος με ξύλινο σκελετό, τενεκεδένια σκεπή και χωρίσματα από αλατζιά για να σχηματίσουν ένα τετράγωνο δωμάτιο.

Το 1929 ο Χ. Τσιγγιρίδης αγοράζει μεγαλύτερο πομπό και κατασκευάζει δύο οικήματα στο βορειοδυτικό μέρος της Έκθεσης. Το πρώτο, μία ξύλινη παράγκα διαστάσεων 5X5 m, ήταν το μηχανοστάσιο για τον πομπό και τις τεχνικές εγκαταστάσεις. Το δεύτερο, ένα ξύλινο παράπηγμα διαστάσεων 10X5 m, σκεπασμένο με πισσόχαρτο και εσωτερικά ντυμένο με ψάθες, ήταν το studio του Ραδιοφωνικού Σταθμού. Η ηχομόνωση ήταν ελάχιστη και όταν έβρεχε ακουγόταν ο θόρυβος της βροχής. Σχετικό δημοσίευμα αναφέρει πως, ένα βράδυ ο Χ. Τσιγγιρίδης που έκανε περιστασιακά τον εκφωνητή, ζήτησε συγγνώμη για τους θορύβους που είχαν ακουστεί και προκλήθηκαν από πέτρες που έριξαν παιδιά στο σταθμό.

Από το 1935 και μετά ο σταθμός παίρνει μόνιμη άδεια και λειτουργεί ανεξάρτητα από τη ΔΕΘ. Η παράγκα του Τσιγγιρίδη γνωρίζει στιγμές δόξας με απευθείας αναμεταδόσεις συναυλιών, θεατρικών επιθεωρήσεων κλπ όπου φιλοξενεί έως και 45 άτομα.

Μετά την απελευθέρωση το 1946 ο σταθμός Τσιγγιρίδη έκλεισε οριστικά.

1.2 Ραδιοφωνικός Σταθμός Μακεδονίας [5] [6] [7] [8] [10] [11]

Το 1947 στη Θεσσαλονίκη το Ε.Ι.Ρ. εγκαταστάθηκε στο Σπίτι του Στρατιώτη, όπου οι υπάρχοντες χώροι, με μικρές επεμβάσεις ονομάστηκαν Ραδιοθάλαμοι.

Το 1949 ο Ραδιοφωνικός Σταθμός Μακεδονίας μεταφέρθηκε στην οδό Τσιμισκή 11, σε κτίριο όπου βρισκόταν παλιά η Οθωμανική Τράπεζα, τα θησαυροφυλάκια της οποίας μετατράπηκαν σε ραδιοθαλάμους. Διαμορφώθηκαν στο ισόγειο μικρό studio εκφωνήσεων και χώρος ελέγχου, ενώ η κεντρική μεγάλη αίθουσα χρησιμοποιείτο για συναυλίες. Η μορφή της αίθουσας ήταν κυκλική με κολώνες και γκισέ περιμετρικά. Στο υπόγειο διαμορφώθηκε ένα τρίτο studio για μικρά μουσικά σύνολα με πιάνο κ.λ.π. Η ηχομόνωση λόγω μεγάλου πάχους τοιχοποιίας, διπλών θυρών κλπ. ήταν επαρκής. Για ακουστική επένδυση χρησιμοποιήθηκαν επενδύσεις με κόντρα πλακέ, ύφασμα και ηχοαπορροφητικό υλικό (τζίβα).

Το 1954 κατασκευάζεται στην Περαία, ιδιόκτητο οίκημα (σώζεται μέχρι σήμερα) με γραφεία, δισκοθήκη, εργαστήριο επισκευών, ένα studio, χώρος ελέγχου και χώρος πομπού 5KW. Η κεραία εκπομπής ύψους 75m ήταν σε απόσταση 100 m περίπου. Το studio, με χρόνους αντήχησης 0,8-0,45 sec. ήταν διαστάσεων 7,45x5,85 m και όγκου 185 m³. Τα ηχοαπορροφητικά πλαίσια είναι με κόντρα πλακέ και υαλοβάμβακα για τις χαμηλές συχνότητες. Για τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες είναι με ξύλινα πηγάκια σε κοντινές αποστάσεις, ύφασμα και υαλοβάμβακα. Το ξύλινο δάπεδο είναι πλωτό επάνω σε άμμο και πισσόχαρτο. Για τον αερισμό του χώρου υπάρχει κτιστός αεραγωγός στο εξωτερικό του κτιρίου. Πρωτοποριακό είναι το κανάλι διέλευσης καλωδίων στο δάπεδο μεταξύ του studio, χώρου ελέγχου και πομπού. Οι πόρτες είναι ξύλινες διπλές με διπλή μανδάλωση και λάστιχο σφραγίσματος. Η οροφή και η τοιχοποιία είναι διπλή συνολικού πάχους 60 cm. Δυστυχώς το studio αυτό χρησιμοποιήθηκε περιστασιακά.

Το 1965 παραμένει σε χρήση ο πομπός 5KW της Περαίας ενώ οι ραδιοθάλαμοι, εργαστήρια και διοικητικές υπηρεσίες μεταφέρθηκαν στον 7^ο και 8^ο όροφο πολυκατοικίας της οδού Βενιζέλου 4. Η ηχομόνωση των δύο studio ήταν μέτρια με απλούς μπατικούς τοίχους. Οι πλευρικές επιφάνειες και η οροφή ήταν επενδεδυμένες με κόντρα πλακέ, ύφασμα και υαλοβάμβακα. Υπήρχαν απλοί αεραγωγοί αερισμού.

Το 1984 μεταφέρθηκαν πάλι σε μεγαλύτερο κτίριο της σχολής Κωνσταντινίδη στη Λ.Γεωργικής Σχολής 129. Τα τρία studio στο υπόγειο του κτιρίου διαμορφώθηκαν με μπατικούς τοίχους από πυρότουβλα και βαριές μονές πόρτες. Το σύστημα κλιματισμού αερισμού είχε υψηλή ηχομόνωση. Οι περιμετρικοί τοίχοι ήταν επενδεδυμένοι με ξύλινες σανίδες και στα διάκενα μεταξύ των σανίδων με λινάτσα και υαλοβάμβακα. Η οροφή ήταν επενδεδυμένη με διάτρητα πάνελ αλουμινίου και υαλοβάμβακα. Τα studio διαστάσεων 10m x 5m, 4m x 5m, 2,5m x 2,5m είχαν ύψος 2,8 m και καλή σχετικά ακουστική, αλλά μέτρια ηχομόνωση. Αργότερα κατασκευάστηκαν δύο μικρά studio-εκφωνητήρια, επιφάνειας 2 m² και 3 m² από γυψοσανίδες και υαλοβάμβακα.

Το 1996, μία σημαντική χρονιά για τον Ρ.Σ.Μ, αποφασίζεται η δραστική ανανέωση του σταθμού και ξεκινούν παράλληλα τα δύο έργα, η προμήθεια και εγκατάσταση ψηφιακής ραδιοφωνίας υψηλών προδιαγραφών και η κατασκευή νέων χώρων στούντιο, γραφείων, εργαστηρίων, σε κτίριο της ΔΕΘ στην οδό Αγγελάκη 14. Τα πέντε στούντιο που κατασκευάστηκαν είναι δωμάτιο μέσα σε δωμάτιο, με καλά ηχομονωμένο σύστημα κλιματισμού-αερισμού, διπλές πόρτες με υάλωση και παράθυρα παρατήρησης με τετραπλή υάλωση. Οι τοίχοι και η οροφή είναι από διπλή γυψοσανίδα, φύλλα μολύβδου και υαλοβάμβακα πάχους 20cm. Οι διαστάσεις των στούντιο επελέγησαν με προσοχή και η ακουστική υπολογίστηκε για χαμηλούς χρόνους αντήχησης. Το δάπεδο είναι πλωτό και επικαλυμμένο με δρύινες σανίδες και υαλοβάμβακα στο διάκενο. Οι πλευρικές επιφάνειες είναι επενδεδυμένες με 4 ειδών ηχοαπορροφητικά πάνελς και διαχυτές. Η οροφή έχει επενδυθεί με ηχοαπορροφητικές πλάκες.

Το μεγαλύτερο studio 4 διαστάσεων 5,64x4,75m και όγκου 75m³ έχει χρόνο αντήχησης 0,4-0,3 sec στο φάσμα συχνοτήτων 63-8000 Hz. Τα δύο studio 1, 2 (ON AIR) διαστάσεων 2,80x3,35m όγκου 23m³ και το studio 3 διαστάσεων 3,60x3,42m όγκου 30m³ έχουν χρόνο αντήχησης 0,25- 0,2 sec. Το μικρό studio 5 (BOOTH) διαστάσεων 2,80x2,00m όγκου 14m³ έχει χρόνο αντήχησης 0,2-0,1 sec

1.3 Ραδιοθάλαμοι Ζαπτείου [2] [3] [10] [12]

Το 1937 άρχισαν οι εργασίες κατασκευής των ραδιοθαλάμων του πρώτου Κρατικού Ραδιοφωνικού Σταθμού, σε ένα εσωτερικό ακάλυπτο χώρο του Ζαπτείου. Σύμφωνα με τις γραπτές αναμνήσεις του Ν. Θεοφιλόπουλου «τα κατασκευασθέντα studio ήταν τρία. Το υπ' αριθμό Ι ήταν το μεγάλο, διαστάσεων κατ' εκτίμηση 15X25 m και ύψους 12 m σε σχήμα τραπέζιου». Είχε διπλή τοιχοποιία συνολικού πάχους 70cm (30cm τοίχος, 15cm κενό, 30cm τοίχος). Η εσωτερική επιφάνεια ήταν ανώμαλη (σαγρέ) και αργότερα τοποθετήθηκαν κατακόρυφα ξύλινα κουτιά (πάνελ) με ηχοαπορροφητικό υλικό και ύφασμα, ενώ μερικά κουτιά ήταν με κόντρα πλακέ. Η οροφή ήταν οδοντωτή και οι πλαϊνοί τοίχοι, ελαφρώς λοξοί. Στο studio αυτό γίνονταν οι πρόβες και οι εκπομπές της συμφωνικής ορχήστρας, των χορωδιών, των διαφόρων συγκροτημάτων, ρεσιτάλ κλπ. Στο μέσο σχεδόν του studio υπήρχε μια αυλαία που χώριζε το χώρο σε δύο, ανάλογα με το συγκρότημα π.χ. αν έπαιζε η συμφωνική ορχήστρα ή μια χορωδία, η αυλαία ήταν ανοικτή. Αν όμως στο πρόγραμμα ήταν ρεσιτάλ ενός οργάνου ή φωνητικό ή μικρό συγκρότημα, τότε απλωνόταν η αυλαία και χώριζε το studio σε δύο. Τα άλλα δύο studio Α και Β ήταν μικρά, χωρίς ηχοαπορροφητικά στοιχεία, κατάλληλα μόνο για τις εκφωνήσεις των προγραμμάτων και ομιλιών και τη μετάδοση προγραμμάτων από δίσκους. Και τα τρία studio είχαν μια μόνο κονσόλα μίξης ήχου που βρισκόταν στον τεχνικό έλεγχο. Ο ρυθμιστής ήχου είχε την ορατότητα από τη θέση του και στα τρία studio και ανάλογα έδινε το σήμα εκπομπής στο studio που έπρεπε. Στον τεχνικό έλεγχο

υπήρχαν ακόμα οι ενισχυτές μεταβίβασης του προγράμματος στα Ν. Λιόσια και τα μηχανήματα ηχογραφήσεων. Η κανονική λειτουργία του Ραδιοφωνικού Σταθμού με την επωνυμία ΥΡΕ άρχισε στις 21 Μαΐου 1938.

Το 1947 εγκαταστάθηκε στα Ν.Λιόσια πομπός βραχέων κυμάτων ισχύος 7,5KW. Στο Ζάππειο κατασκευάστηκε ένα μικρό studio συνεχείας (ON AIR), επιφάνειας 14 m², για ομιλίες και δελτία ειδήσεων σε διάφορες ξένες γλώσσες.

Το 1948 άρχισε η μελέτη διαμόρφωσης σε studio II μιας αίθουσας του Ζαπείου που βρισκόταν δίπλα στους ελεύθερους χώρους των ραδιοθαλάμων. Το έργο αυτό αποπερατώθηκε το 1951 για την ορχήστρα ελαφριάς μουσικής του ΕΙΡ. Με επιφάνεια 200 m² και όγκο 1700 m³ περίπου ήταν ορθογωνικής μορφής με παράλληλους τοίχους. Η τοιχοποιία ήταν μονή συνολικού πάχους 80cm, η εσωτερική επιφάνεια ήταν ανώμαλη με πεταχτό σοβά ελαφρόπετρας. Ο χρόνος αντήχησης ήταν μεγάλος και υπήρχαν στάσιμα κύματα. Μετά από πρόσκληση σε μηχανικό ακουστικής από τη Γαλλία (Cordonier), έγιναν μετρήσεις χρόνου αντήχησης με χρήση παλμογράφου και πυροβόλου όπλου. Τοποθετήθηκαν νέα ηχοαπορροφητικά στοιχεία και βελτιώθηκε αρκετά η Ακουστική.

Το 1951 ήταν μία χρονιά ορόσημο και έφερε μεγάλες αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των Ραδιοθαλάμων. Το ΕΙΡ προμηθεύτηκε το πρώτο μαγνητόφωνο, ένα τελειότατο μηχανήμα της εποχής, για ηχογραφήσεις της συμφωνικής ορχήστρας, των θεατρικών έργων κλπ. Από το ίδιο μαγνητόφωνο γινόταν η αναπαραγωγή για μετάδοση των ηχογραφημένων προγραμμάτων. Πολύ σύντομα έγιναν σημαντικές βελτιώσεις στην ηλεκτροακουστική και κάθε studio απέκτησε δική του κονσόλα, δύο μαγνητόφωνα, δύο πικάπ, ηχείο κλπ. Κατασκευάζεται το studio III επιφάνειας 55m² και όγκου 260 m³, για ηχογραφήσεις ορχηστρών με λίγα άτομα.

Από το 1952 έως το 1955 εγκαταστάθηκαν δύο νέοι πομποί μεσσαίων κυμάτων 50KW και 150KW, και μαζί με τους παλιούς των 15KW και 7,5KW δημιουργήθηκαν τα τέσσερα εθνικά προγράμματα του ΕΙΡ. Για την λειτουργία των προγραμμάτων, διαμορφώθηκαν πέντε συνολικά μικροί χώροι σαν studio συνεχείας, ειδήσεων, μοντάζ από δίσκους και ταινίες κ.λ.π. Οι εσωτερικές επιφάνειες των χώρων αυτών ήταν ανώμαλες (σαγρέ), με τυχαίες αναλογίες (πλάτος, μήκος, ύψος) και ελάχιστα ηχοαπορροφητικά στοιχεία (κουρτίνα, ξύλινο δάπεδο).

1.4 Ραδιομέγαρο ΕΙΡΤ [13]

Το 1970 άρχισε η μελέτη και η κατασκευή του Ραδιομεγάρου στη Λ. Μεσογείων 432 το οποίο λειτούργησε το 1974. Τα Ραδιοφωνικά Στούντιο είναι 7 μεγάλα, με συγκεκριμένες λειτουργίες (συμφωνικής ορχήστρας, χορωδίας, ελαφράς μουσικής, μουσικής δωματίου, θεατρικό κλπ) Τα υπόλοιπα στούντιο είναι περισσότερα από 12, για ομιλίες, ειδήσεις, συνεντεύξεις. Όλα τα στούντιο καλύπτουν απόλυτα τα τέσσερα ραδιοφωνικά προγράμματα, με υψηλή ηχομόνωση και καλή ακουστική.

Οι υπολογισμοί Ακουστικής και ηχομόνωσης έγιναν από τον αρχιτέκτονα Ε. Παπαγιάννη σε συνεργασία με τον Δρ. μηχανικό Μ. ZIEGER. Μετά την κατασκευή των στούντιο έγιναν μετρήσεις και διορθώσεις από μηχανικούς της ΕΡΤ σε συνεργασία με τον Δρα LAMORAL. Πολύ αργότερα έγιναν νέες επεμβάσεις σε ορισμένα στούντιο για μείωση του χρόνου αντήχησης και βελτίωση της διάχυσης. Το στούντιο C είναι το μεγαλύτερο, για δοκιμές και ηχογραφήσεις της Συμφωνικής Ορχήστρας (60 - 120 άτομα), με επιφάνεια 307 m² όγκο 2210 m³ και χρόνους αντήχησης άδειο 1,7-1,1 sec. Το στούντιο Β είναι το δεύτερο σε μέγεθος, για δοκιμές και ηχογραφήσεις της ορχήστρας σύγχρονης μουσικής (30-60 άτομα), με επιφάνεια 246 m², όγκο 1775 m³ και χρόνους αντήχησης άδειο 1,5-1,0 sec. Το στούντιο Η, ειδικό για θεατρικά έργα με επιφάνεια 115 m² και όγκο 500 m³

αποτελείτο από τρεις συζευγμένους χώρους με διαφορετική ακουστική συμπεριφορά. Τα υπάρχοντα προβλήματα ακουστικής και η κατάργηση των ηχογραφήσεων θεατρικών έργων, οδήγησαν το έτος 1985, σε ανακατασκευή του χώρου, με μείωση των διαστάσεων, αύξηση της ηχοαπορρόφησης και χρήση πλέον σαν στούντιο ηχογραφήσεων.

1.5 Ραδιοφωνικός Σταθμός Ενόπλων Δυνάμεων [3] [7] [10]

Το 1948 δημιουργείται στην Αθήνα στον 781 Λόχο Γενικών Μεταφορών ένας μικρός Ραδιοφωνικός Σταθμός στα βραχεία (500W), και αργότερα και στα μεσαία κύματα. Διέθετε ένα μικρό χώρο studio και μετέδιδε μουσικά προγράμματα (ελαφράς μουσική, δημοτικά τραγούδια), κυρίως από δίσκους και μερικές φορές από ολιγομελή συγκροτήματα. Ο σταθμός σύντομα μεταφέρθηκε σε κτίριο στην οδό Ζαλοκώστα 3. Ο πομπός μεσαίων 1KW εγκαταστάθηκε στον 3^ο όροφο, ενώ στο ισόγειο χρησιμοποιήθηκαν τα εγκατελειμένα studio των Γερμανών από την κατοχή.

Το 1953 ο Ελληνικός Στρατός κατασκευάζει δύο όμοια κτίρια στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, τα οποία είχαν ένα ημικυκλικό αμφιθέατρο, ένα εκφωνητήριο, ένα χώρο ελέγχου και χώρους γραφείων, δισκοθήκης κλπ. Η ημικυκλική αίθουσα, με διπλά παράθυρα στην περιφέρεια, είχε προβληματική ακουστική και υπήρχαν περιμετρικά κουρτίνες για βελτίωση. Η τοιχοποιία ήταν μονή λιθοδομή πάχους 80 – 100 cm και τα διπλά κουφώματα, ξύλινα ή μεταλλικά με μονό τζάμι. Η οροφή ήταν από οπλισμένο σκυρόδεμα και ελαφρόπετρα πάχους 30cm. Εσωτερικά, οι τοίχοι ήταν με πεταχτό σοβά (σαγρέ) και τα ξύλινα καθίσματα με επένδυση υφάσματος. Τα δύο αυτά studio μετατράπηκαν σε τηλεοπτικά την τελευταία δεκαετία μετά την συνένωση ΕΡΤ και YΕΝΕΔ.

2. Συμπεράσματα

Από την εμφάνιση της Ραδιοφωνίας στην Ελλάδα (1928) έως σήμερα έχουν περάσει 76 χρόνια. Οι πρώτες κατασκευές χώρων στούντιο προσδιορίστηκαν από τα δεδομένα της εποχής που ήταν πολυμελείς ορχήστρες, πενιχρά οικονομικά, ελάχιστα μηχανήματα, έλλειψη εξειδικευμένων υλικών, έλλειψη τεχνογνωσίας. Τα πρώτα χρόνια, μικρόφωνο, πομπός και κεραία έπρεπε να είναι κοντά, ενώ η μη δυνατότητα ηχογράφησης επέβαλε την κατασκευή μεγάλων χώρων, με υψηλό χρόνο αντήχησης.

Η συνεχής ανάπτυξη της ηλεκτροακουστικής με την κατασκευή μηχανημάτων υψηλότερης ποιότητας και χαμηλότερου θορύβου (δυναμικών και πυκνωτικών μικροφώνων, κονσόλες μίξης ήχου, μαγνητοφώνων ταινίας), έδειξαν την ανάγκη για την κατασκευή καλύτερων χώρων ηχογραφήσεων και εκπομπών. Έτσι την δεκαετία του 70 κατασκευάστηκαν studio υψηλών προδιαγραφών και μεγάλου κόστους.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η Τηλεόραση διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο, ενώ η Ραδιοφωνία κρατάει μία σημαντική μεν, αλλά δευτερεύουσα θέση στην ενημέρωση και ψυχαγωγία. Φυσικό αποτέλεσμα ήταν η σταδιακή μείωση των επενδύσεων για νέες κατασκευές χώρων στούντιο Ραδιοφωνίας.

Η ψηφιακή τεχνολογία με τις μεγάλες δυνατότητες ηχοληψίας, επεξεργασίας και αποθήκευσης του ήχου, καθώς και τον ανεπιτήρητο τρόπο λειτουργίας, επέτρεψε τη μείωση των λειτουργικών εξόδων και τη δυνατότητα ηχογραφήσεων από μικρούς χώρους με χαμηλούς χρόνους αντήχησης. Ένας προκατασκευασμένος θάλαμος (booth), μικρής επιφάνειας, με σχετική ηχομόνωση και ηχοαπορρόφηση, καλύπτει τις περισσότερες ανάγκες της σημερινής και αυριανής Ραδιοφωνίας, όπου οι περισσότερες ανταποκρίσεις, συνεντεύξεις, κ.λ.π. γίνονται με την χρήση τηλεφώνου.

Το ραδιόφωνο λειτουργεί πλέον σαν συμπλήρωμα της Τηλεόρασης και είναι το κύριο μέσο πληροφόρησης και ψυχαγωγίας για οδηγούς, εργαζόμενους, χώρους συνάθροισης κοινού κ.λ.π.

3. Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες για τις πληροφορίες, σχέδια, φωτογραφίες που προσέφεραν με προθυμία, στους κ.κ. 1) Κίσκιλα Παναγιώτη, σκηνοθέτη, ιδρυτή Μουσείου Ραδιοφωνίας 2) Ψαλίδα Μιγάλη, ηλεκτρολόγο μηχανολόγο, κατασκευαστή των πρώτων μηχανημάτων, κονσολών στο Ζάππειο 3) Ντισλή Ιωάννη, Φυσικό, Ραδιοηλεκτρολόγο πρώην προϊστάμενο Ραδιοφωνικού Σταθμού Μακεδονίας.

4. Αναφορές

Ολγα Β. Πλέχοβα «Το Πρώτο Ελληνικό Ραδιόφωνο» Θεσσαλονίκη 2002, εκδ. Μπαρμπουνάκης.

Ντίνος Θεοφιλόπουλος, «Αναμνήσεις από τη Ραδιοφωνία και την Τηλεόραση», 1937 – 1968, Αναθεωρημένη έκδοση Αθήνα 1989.

Ράδιο Καραγιάννη «Ελληνική Ραδιοφωνία» Αθήνα 1952.

Norman Joly, Πολύκαρπος Ψωμιάδης, «Ραδιοερασιτέχνες της Ελλάδας», Αθήνα 1988.

Πρακτικά Δημερίδας, «Ραδιόφωνο ΕΡΤ 3, Από το χθες στο σήμερα», Θεσσαλονίκη 1997.

Ραδιοτηλεόραση, Αφιέρωμα Μακεδονία «70 χρόνια Ραδιόφωνο – Τηλεόραση» 1994.

ΕΡΤ 3, Τμήμα Δημοσίων – Διεθνών Σχέσεων «Η ιστορία της Ραδιοτηλεόρασης στην Βορειοελλαδική Πρωτεύουσα από το Ράδιο Τσιγγιρίδη έως την Τηλεόραση της ΔΕΗ και από την ΥΕΝΕΔ στην ΕΡΤ 3»

ΕΡΤ 3, Υπ/ση Τεχνικών Υπηρεσιών «Διαμόρφωση Κτιρίου Ραδιοφωνίας Αγγελάκη 14» 1996.

Παναγιώτης Κίσκιλας, Μουσείο Ραδιοφωνίας 9.84 «Μέρες Ραδιοφωνίας, ένας κόσμος επικοινωνίας» Αθήνα 2002.

Παναγιώτης Κίσκιλας, αρχείο φωτογραφιών Ραδιοφωνίας.

Μακεδονική Φωνοθήκη – Μουσείο Ραδιοφωνίας Θεσσαλονίκης, Αρχείο Φωτογραφιών.

Μιγάλης Ψαλίδας, αρχείο φωτογραφιών, σχεδίων Ζαππείου.

ΕΡΤ /ΔΟΗΜΕ Αρχείο σχεδίων

Ακουστικός σχεδιασμός του Βασιλικού Θεάτρου Θεσσαλονίκης

Θεόδωρος Τιμαγένης
Αρχιτέκτων – Σύμβουλος Ακουστικής ΕΜΠ, MSc University of London
ttimagenis@hol.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παλαιό Βασιλικό Θέατρο που βρισκόταν κοντά στον Λευκό Πύργο, κατεδαφίσθηκε και ανακατασκευάσθηκε εξ ολοκλήρου. Το νέο κτίριο, περιλαμβάνει κεντρική θεατρική αίθουσα, μικρότερη αίθουσα δοκιμών – πειραματικών παραστάσεων και πολλούς άλλους χώρους.

Η κεντρική αίθουσα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, προορίζεται να είναι κατάλληλη, για θεατρικές παραστάσεις, αλλά επίσης και για παραστάσεις όπερας, μπαλέτου κλπ..

Η πολλαπλότητα των χρήσεων της αίθουσας και του κτιρίου γενικότερα δημιουργεί πρόσθετες απαιτήσεις από πλευράς ακουστικής.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται τα βασικά προβλήματα και οι αρχές του ακουστικού σχεδιασμού του κτιρίου, καθώς και ο τρόπος επίλυσης τους.

Μετά το πέρας των εργασιών, εκτελέσθηκαν ηχομετρήσεις στο κτίριο γενικά και ειδικότερα στην αίθουσα. Η εργασία περιλαμβάνει επίσης τα αποτελέσματα των ηχομετρήσεων και τα συγκρίνει με τα προβλεπόμενα από την μελέτη ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Acoustical design of Royal Theatre of Thessaloniki

Theodore Timagenis
Architect – Acoustical Consultant National Technical University of Athens
– MSc University of London
ttimagenis@hol.gr

ABSTRACT

The Royal Theatre of Thessaloniki opened by the end of 2000. It contains a main room of 800 seats, and a secondary rehearsal room, which can be used for special performances too. The main room is suitable for drama and opera performances, and for ballets, and congresses as well.

This paper discusses the basic problems of the acoustic design and presents the results of the acoustic measurements after the completion of the building.

1. Εισαγωγή

Το νέο κτίριο του Βασιλικού Θεάτρου Θεσσαλονίκης έχει αντικαταστήσει το παλαιότερο κτίριο που βρισκόταν στην ίδια θέση, κοντά στον Λευκό Πύργο.

Το κτίριο εκείνο σχεδιάστηκε το 1940 με την προοπτική να λειτουργήσει ως καλοκαιρινή σκηνή του Εθνικού Θεάτρου της Αθήνας. Στην Κατοχή προσέφερε τις υπηρεσίες του στην ψυχαγωγία των Γερμανών και μετά την Απελευθέρωση έγινε προσωρινή στέγη του κρατικού Θεάτρου Θεσσαλονίκης. Στη δεκαετία του '50

φιλοξένησε παραστάσεις μεγάλων ελληνικών θιάσων και συναυλίες της νεοσύστατης συμφωνικής Ορχήστρας Βορείου Ελλάδος. Το 1961 στέγασε το νεοϊδρυθέν τότε ΚΘΒΕ. Όταν εκείνο μεταστεγάστηκε στην Εταιρεία Μακεδονικών Σπουδών, χρησιμοποιήθηκε ως χώρος για πρόβες και αποθήκευση σκηνικών και σταδιακά εγκαταλείφθηκε.

Το 1986, με κάποιες μικροεπισκευές, παραχωρήθηκε από το υπουργείο Πολιτισμού στο Κρατικό Θέατρο για να λειτουργήσει ως δεύτερη σκηνή του και το 1996 παραδόθηκε, οριστικά στην αχρηστία [1].

Το Βασιλικό Θέατρο Θεσσαλονίκης έχει γενικές εξωτερικές διαστάσεις 77 m X 35m. Το ύψος του επάνω από την επιφάνεια του εδάφους είναι 14,5 m. Το συνολικό του ύψος συμπεριλαμβανόμενων και των υπογείων χώρων είναι 25 m. Το κτίριο που αναπτύσσεται σε 8 επίπεδα περιλαμβάνει αίθουσα θεάτρου 800 θέσεων, πειραματική σκηνή – αίθουσα δοκιμών, αίθουσες υποδοχής κοινού, καμαρίνια, γραφεία διοίκησης καθώς και τους απαραίτητους μηχανολογικούς χώρους. Το κτίριο αναπτύσσεται σε συνολική επιφάνεια 11.000 m² και ο όγκος του φθάνει τα 70.000 m³.

2. Ηχομόνωση - Ηχοπροστασία

Η χαμηλή στάθμη θορύβου, είναι ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό κάθε χώρου, που προορίζεται να στεγάσει παραστάσεις υψηλού επιπέδου. Οι περισσότεροι ακροατές αντιλαμβάνονται πολύ εύκολα, τον υψηλό θόρυβο, λίγοι όμως είναι αυτοί, που προσέχουν συνειδητά θορύβους χαμηλής στάθμης. Αυτοί, εν τούτοις, οι θόρυβοι, κατά την διάρκεια των παραστάσεων, εμποδίζουν τον ακροατή, από το να αντιληφθεί το πλήρες εύρος των ήχων από τους ψίθυρους και τα *riantissimi* μέχρι τους ισχυρότερους ήχους και τα *fortissima* μιας θεατρικής ή μουσικής παράστασης. Και όμως, αυτό το συναρπαστικό συναίσθημα, που δημιουργείται από την αντίληψη ολόκληρου του δυναμικού εύρους των ήχων, είναι, που κάνει τις παραστάσεις σε ορισμένους χώρους, να μένουν αξέχαστες.

Για να εξασφαλισθεί αυτή η ζητούμενη χαμηλή στάθμη θορύβου, στο Βασιλικό Θέατρο Θεσσαλονίκης, σε ένα κτίριο, που βρίσκεται σε ένα από τα πλέον θορυβώδη σημεία της πόλης, που είναι εξοπλισμένο με κάθε είδους μηχανολογικές εγκαταστάσεις υψηλής ισχύος και που περιλαμβάνει «μέσα στα σπλάχνα του» αναγκαστικά καλύπτοντας το, το υπάρχον μεγάλο αντλιοστάσιο του ΟΑΘ, που παράγει υψηλό κραδασμικό θόρυβο [2] ελήφθησαν όλα τα μέτρα που ήταν αναγκαία.

Μερικά από αυτά τα μέτρα, είναι η χρήση του συστήματος «δωμάτιο μέσα σε δωμάτιο» για την κατασκευή της κεντρικής αίθουσας και άλλων ακουστικά ευαίσθητων χώρων. Επίσης, η μελέτη μέσου προγράμματος Η/Υ και η εγκατάσταση ειδικών σιγαστήρων καθώς και η εξασφάλιση χαμηλών ταχυτήτων του αέρα που διακινείται στα δίκτυα κλιματισμού και ακόμη η χρήση ειδικών βάσεων και αντικραδασμικών αναρτήσεων στα μηχανήματα και τα μηχανολογικά δίκτυα, η τοποθέτηση ειδικών ηχομονωτικών υαλοστασίων και η κατασκευή «πλωτών δαπέδων» σε όλους τους χώρους. Τέλος, στην σκεπή χρησιμοποιήθηκε πρωτοποριακό σύστημα δικέλυφης κατασκευής από «πλωτές» προκατασκευασμένες πλάκες με το οποίο αντιμετωπίζεται ο θόρυβος από την εναέρια ή επίγεια κυκλοφορία καθώς και ο θόρυβος από την κρούση του χαλαζιού στην σκεπή.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα των μετρήσεων της A-SPL σε διάφορους χώρους του κτιρίου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προδιαγραφές της μελέτης.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Α-ΗΧΟΣΤΑΘΜΗΣ
ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΤΟΥ ΒΒΘ [3]**

<i>a/a</i>	<i>Χώρος</i>	<i>Κατάσταση χώρου</i>	<i>Αποτελ. dB (A)</i>	<i>Προδιαγρ. ΕΣΑ dB (A)</i>
1	Μηχ/σιο (ΕΠΠΠ – 3)	Όλες οι μονάδες σε πλήρη λειτουργ.	69 <	80
2	Μηχ/σιο αίθ. Δοκιμών (ΕΠΠΠ – 3)	Όλες οι μονάδες σε πλήρη λειτουργ.	65 <	80
3	Μηχ/σιο (ΕΠΠΠ + 1Α)	Όλες οι μονάδες σε πλήρη λειτουργ.	66 <	80
4	Μηχ/σιο σκηνής	Όλες οι μονάδες σε πλήρη λειτουργ.	69 <	80
5	Θάλαμ. ελέγχ. Φωτισμ.	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	29 <	30
6	Θάλαμ. προβολών	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	28 <	30
7	Θάλαμ. ήχου	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	22 <	25
8	Θάλαμ. μεταφρ. +1	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	29 <	30
9	Θάλαμ. μεταφρ. ± 0 (αριστερά)	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	22 <	30
10	Θάλαμ. μεταφρ. ± 0 (δεξιά)	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	22 <	30
11	Φουαγιέ –1	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	28 <	35
12	Φουαγιέ ± 0	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	35 =	35
13	Φουαγιέ +1	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	35 =	35
14	Αίθουσα	Κλιμ. σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	24 <	25
15	Γραφ. προέδρου Δ.Σ.	Κλιμ. και αντλιοστάσιο Δήμου σε λειτουργία. Θύρα κλειστή	32 <	35
16	Αίθουσα Δοκιμών	Κλιμ. σε λειτουργ. Θύρες κλειστές.	22 <	25

3. Η αίθουσα

3.1 Η χρήση της αίθουσας

Το Βασιλικό Θέατρο, ανεγέρθηκε για να αποτελέσει την ιδιόκτητη στέγη του Κρατικού Θεάτρου Βορείου Ελλάδος. Το κτίριο δηλ. προβλεπόταν να λειτουργεί, κυρίως, ως θέατρο. Εν τούτοις, οι προδιαγραφές της μελέτης του, περιελάμβαναν και την δυνατότητα χρήσης του και για πολλές άλλες εκδηλώσεις διαφόρων ειδών. Η ποικιλία των εκδηλώσεων αυτών, εκτείνεται από συνέδρια μέχρι όπερα και μουσικές εκδηλώσεις κάθε είδους. Κύριος στόχος, της ακουστικής μελέτης, ήταν να εξασφαλισθεί άριστη ακουστική για τις εκδηλώσεις λόγου – φυσικά, χωρίς την χρήση μεγαφωνικής εγκατάστασης (στην περίπτωση θεατρικών παραστάσεων) – χωρίς αυτό να έχει δυσμενείς επιπτώσεις και στην εξυπηρέτηση εκδηλώσεων άλλου είδους (π.χ. μουσικού θεάτρου, όπερας συναυλιών με ενισχυμένο ή μη ήχο, μπαλέτου κλπ.).

Από την εμπειρία μας γνωρίζουμε ότι είναι δυνατόν να σχεδιασθεί μια αίθουσα, που θα είναι κατάλληλη και για θεατρικές παραστάσεις και για όπερα. Άλλα ο σχεδιασμός θα έχει αρκετές δυσκολίες που επαυξάνονται αν η αίθουσα θα πρέπει να συνδυάζει υψηλό επίπεδο άνεσης θεατών, (π.χ. άνετα καθίσματα) εξαιρετική ορατότητα, αλλά ταυτόχρονα να μπορεί να ικανοποιεί και τις απαιτήσεις μιας συνεδριακής αίθουσας, ενός κινηματογράφου ή άλλων άσχετων με το θέατρο ή την όπερα εκδηλώσεων.

Επί πλέον, για καθαρά μορφολογικούς λόγους, που σχετίζονται με την μορφή παλαιότερου κτιρίου που ήταν στην ίδια θέση, (και που αποτέλεσαν απαίτηση του Εργοδότη και του Τεχνικού Υπευθύνου του Έργου) ο σχεδιασμός της αίθουσας,

ξεφεύγει από τα όρια της κλασικής ακουστικής για θέατρο. Η κάτοψη της δεν είναι επαρκώς συμπαγής και το άνοιγμα του προσκηνίου είναι πλατύ.

Με τα ανωτέρω δεδομένα, ο χρόνος αντήχησης του χώρου προκύπτει χαμηλός σε σχέση με αυτόν που απαιτείται θεωρητικά για τις αίθουσες όπερας. Εν τούτοις έχουμε πολλά παραδείγματα φημισμένων θεάτρων όπερας με χαμηλούς χρόνους αντήχησης (π.χ. Covent Garalen ή La Scala).

3.2 Χρόνος αντήχησης

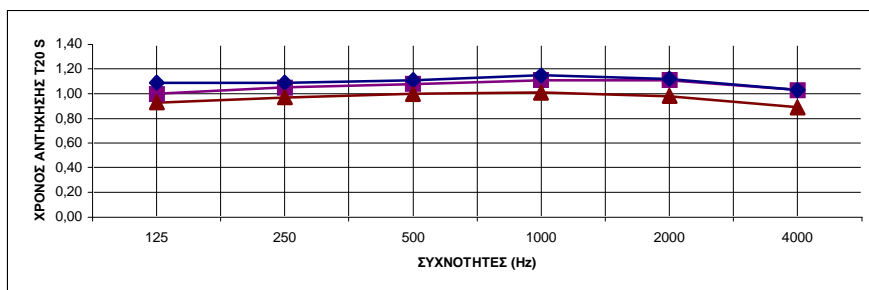
Ο όγκος της αίθουσας (χωρίς τον όγκο της σκηνής) είναι 5000 m³, οι δε εσωτερικές επιφάνειες συνολικά είναι 2414 m². Με βάση τις προδιαγραφές του έργου, ο χρόνος αντήχησης (T) της αίθουσας πλήρους θα έπρεπε να μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών T₅₀₀₋₁₀₀₀ = 0,9 και 1,6 sec. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, αυτή η μεγάλη διακύμανση του T δεν θα ήταν δυνατόν να εξασφαλισθεί στο συγκεκριμένο θέατρο, (για το οποίο προβλεπόταν αυστηροί αισθητικοί – μορφολογικοί περιορισμοί) με τον κλασικό τρόπο μεταβολής της ηχοαπορρόφησης. Για τον λόγο αυτό προτάθηκε η χρήση ειδικού ηλεκτρονικού συστήματος (DMCR) με το οποίο θα ήταν δυνατή η ικανοποίηση της ανωτέρω προδιαγραφής. Η χρήση, εν τούτοις, ενός τέτοιου συστήματος δεν έγινε αποδεκτή από την Τεχνικό Υπεύθυνο του Έργου, ο οποίος αντιπρότεινε σταθερό χρόνο αντήχησης T₅₀₀₋₁₀₀₀ = 1,3 sec.

Η ανωτέρω τιμή, όμως, δεν εξασφάλιζε για την συγκεκριμένη αίθουσα τα κριτήρια D₅₀ & G και γι' αυτό ο μελετητής επέμεινε σε τιμή T_{500 - 1000} = 0,9 sec. Τελικά, ως στόχος ορίστηκε η τιμή T₅₀₀₋₁₀₀₀ = 1,00 sec (αίθουσα πλήρης) με γενικά επίπεδη μορφή καμπύλης.

Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζεται η γραφική παράσταση και καταγράφονται οι τιμές του χρόνου αντήχησης όπως αυτός υπολογίστηκε (αίθουσα κενή) και όπως μετρήθηκε. Από την σύγκριση των δυο καμπύλων φαίνεται ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της ακουστικής μελέτης ως προς τον χρόνο αντήχησης. Καταγράφονται επίσης οι τιμές του χρόνου αντήχησης όπως αυτός υπολογίστηκε για αίθουσα πλήρη. Η διαφορά του T₅₀₀ μεταξύ αίθουσας πλήρους και κενής είναι μόλις 0,1 sec. Η τιμή αυτή είναι απόλυτα ικανοποιητική.

ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ T (sec)

Συχνότητες (Hz)	Αυλαία κλειστή					
	125	250	500	1000	2000	4000
T σύμφωνα με υπολογισμούς (Αίθουσα κενή)	1,00	1,05	1,08	1,11	1,11	1,03
T όπως μετρήθηκε [3] (Αίθουσα κενή)	1,09	1,09	1,11	1,15	1,12	1,03
T όπως υπολογίστηκε (Αίθουσα πλήρης)	0,93	0,97	1,00	1,01	0,98	0,89



3.3 Ενκρίνεια λόγου

Οι προβλεφθήσες τιμές της πρόωμης ηχητικής ενέργειας (early energy fraction, D_{50}) και της σχετικής ισχύος του ήχου (relative total sound level, G) για 38 θέσεις φαίνονται στο σχέδιο, και καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί. Από την καταγραφή αυτή διαπιστώνεται ότι όλες οι τιμές του D_{50} ικανοποιούν τις προδιαγραφές διότι καλύπτουν το κριτήριο $D_{50} \geq 0,50$. Επίσης όλες οι τιμές του G καλύπτουν το κριτήριο $G \geq 0$.

4. Αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές πληροφορίες

Οροφή αίθουσας: 3X12,5 mm γυψοσανίδες. **Τοίχοι αίθουσας:** Μοριοσανίδα με καπλαμά 16 mm με μεταβλητό διάκενο. **Δάπεδο:** 60 mm συμπαγές ξύλο επάνω σε διάκενο

Μελετητής: Θ. Τιμαγένης

5. Τεχνικά στοιχεία (Κεντρική αίθουσα – ορολογία L. Beramek) [4]

Όγκος (V): 5000 m³

Ακουστική επιφάνεια ακροατηρίου (S_A): 515 m²

Μέσο ύψος (H): 11 m

Απόσταση μεταξύ σκηνης και πλέον απομακρυσμένου θεατή (D): 24 m

Αριθμός θέσεων (N): 800

V/N: 6,25 m³

Μέσο πλάτος (W): Επίπεδο θεωρείων 23,5 m

Επίπεδο πλατείας 16,5 m

Μέσο μήκος (L): 24 m

Πλάτος σκηνης (SW): 15 m

S_A/N : 0,64

6. Συμπεράσματα

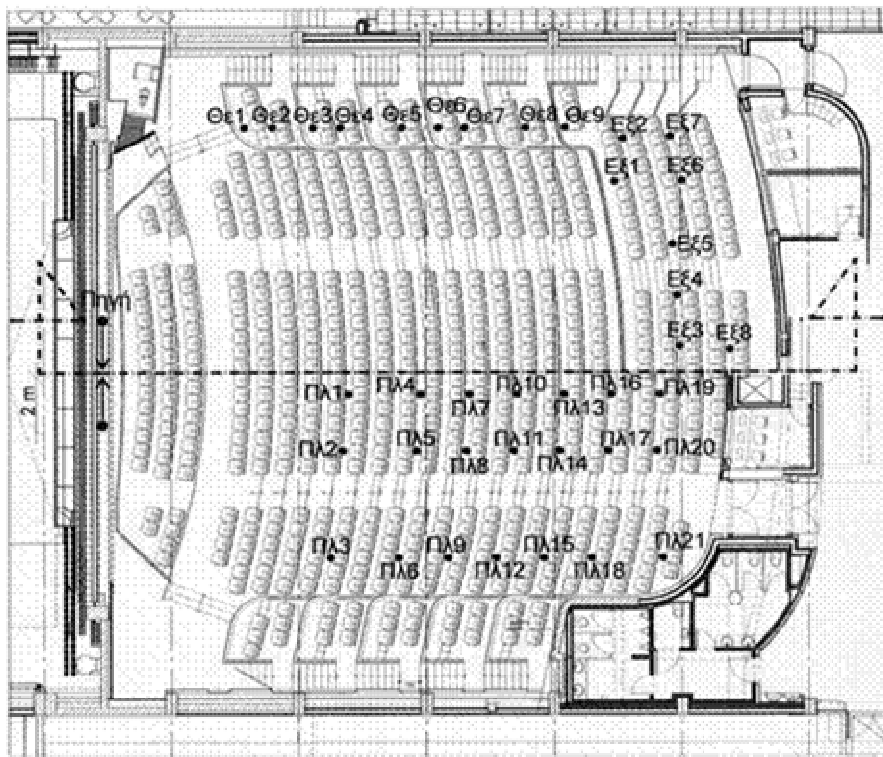
Εξ' όσων αναπτύχθησαν προηγουμένως προκύπτει ότι το ΒΒΘ και ειδικότερα η κεντρική αίθουσα, ικανοποιούν τα **αντικειμενικά** κριτήρια ακουστικής που αφορούν σε ανάλογα κτίρια. Οι στάθμες θορύβου στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου με τον κλιματισμό σε λειτουργία και σε ώρες κυκλοφοριακής αιχμής παραμένουν κάτω από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια. Ο χρόνος αντίχησης της αίθουσας, ταυτίζεται με τον χρόνο αντίχησης – στόχο της μελέτης.

Παράλληλα, τουλάχιστον και όσον μας είναι γνωστό και οι **υποκειμενικές** απόψεις των θεατών και των κριτικών είναι ιδιαίτερες θετικές (π.χ. το κτίριο χαρακτηρίζεται ως ένα «από τα πιο σύγχρονα θέατρα της Ευρώπης με τέλεια

ακουστική» [1] ή : «Σε ότι αφορά την αίθουσα θεάτρου έγινε προσπάθεια αναπαραγωγής της αντίστοιχης από την οποία προήλθε, αλλά με νέα δυναμική και ακουστικές παραμέτρους, έτσι ώστε να αναπτυχθεί στο μέγιστο η δυνατότητα του «ακούειν» και να τηρηθούν οι σύγχρονες προδιαγραφές στην δόμηση των κτιρίων» [5].

Αναφορές

- [1] Έφη Μαρίνου: Περιοδικό Ε Τ.507, 24/12/2000
 [2] Τροχίδης Α.: Μετρήσεις κραδασμών αντλιοστασίου ΟΑΘ, 1998
 [3] Θ. Τιμαγένης: Ηχομετρήσεις για την οριστική παραλαβή του Β.Θ.Θ. 2002
 [4] Beranek L.: «Concert and Opera Halls : How They Sound». Acoustical Society of America, 1996
 [5] Ισμα Μ. Τουλάτου: Περιοδικό «ΒΗΜΑΓΑΖΙΝΟ»

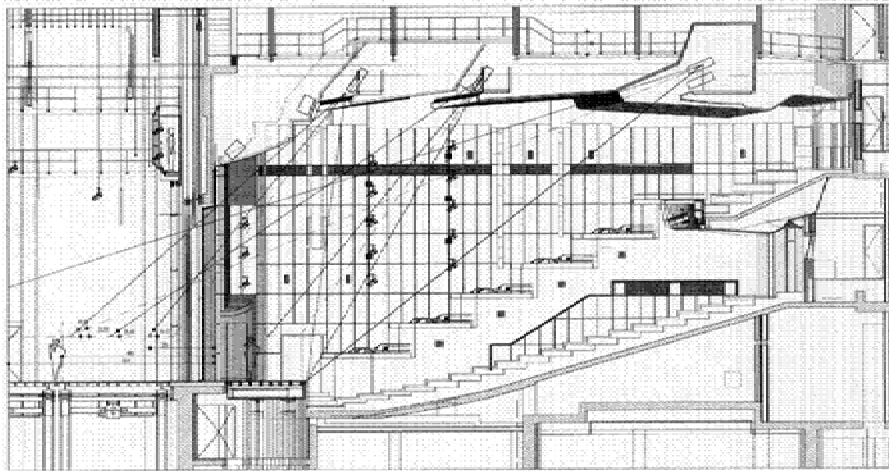


Κάτοψη της αίθουσας όπου φαίνονται οι θέσεις πηγής – δεκτών.

Θέσεις Πλατείας	Κατεύθυνση πηγής			
	Κεντρικά		Πλάγια	
	D_{50}	G (dB)	D_{50}	G (dB)
Πλ1	0.64	6.4	0.63	4.3
Πλ2	0.62	6.1	0.62	4.1
Πλ3	0.50	4.7	0.50	2.6
Πλ4	0.59	5.5	0.58	3.4
Πλ5	0.56	5.2	0.52	2.8
Πλ6	0.60	5.4	0.51	2.5
Πλ7	0.53	4.5	0.55	2.8
Πλ8	0.53	4.5	0.54	2.6
Πλ9	0.59	5.1	0.54	2.4
Πλ10	0.56	4.5	0.61	3.0
Πλ11	0.56	4.5	0.57	2.6
Πλ12	0.61	4.9	0.52	1.8
Πλ13	0.55	4.0	0.61	2.6
Πλ14	0.59	4.5	0.59	2.4
Πλ15	0.58	4.2	0.51	1.5
Πλ16	0.56	3.8	0.59	2.1
Πλ17	0.63	4.6	0.62	2.3
Πλ18	0.59	4.0	0.54	1.5
Πλ19	0.68	4.8	0.70	3.1
Πλ20	0.69	5.0	0.70	3.0
Πλ21	0.55	3.1	0.62	2.0

Θέσεις Εξωστών	Κατεύθυνση πηγής			
	Κεντρικά		Πλάγια	
	D_{50}	G (dB)	D_{50}	G (dB)
Εξ1	0.67	4.6	0.60	1.8
Εξ2	0.67	4.5	0.58	1.4
Εξ3	0.69	4.7	0.68	2.5
Εξ4	0.68	4.5	0.68	2.5
Εξ5	0.71	4.9	0.63	1.8
Εξ6	0.75	5.4	0.67	2.2
Εξ7	0.77	5.7	0.71	2.7
Εξ8	0.81	4.4	0.71	2.5

Θέσεις Θεωρείων	Κατεύθυνση πηγής			
	Κεντρικά		Πλάγια	
	D_{50}	G (dB)	D_{50}	G (dB)
Θε 1	0.63	6.2	0.54	3.2
Θε 2	0.71	7.2	0.52	2.9
Θε 3	0.62	5.8	0.50	2.5
Θε 4	0.56	4.9	0.54	2.7
Θε 5	0.68	6.1	0.61	3.2
Θε 6	0.65	5.4	0.52	2.0
Θε 7	0.78	5.3	0.58	2.6
Θε 8	0.69	5.5	0.50	1.4
Θε 9	0.66	4.7	0.58	1.8



Τομή.



Άποψη της κεντρικής αίθουσας από την σκηνή



Γενική άποψη της κεντρικής αίθουσας

Subjective evaluation of the importance of the ringing frequency in virtual acoustic imaging

Anastasios I. Vasileiadis

DEng Electrical Engineering, University of Patras, MSc in Sound and Vibration
Menippou 24 Cholargos, 15562, Athens, Greece, Email: atv103@soton.ac.uk

Prof. P.A. Nelson

FREng, Director Institute of Sound and Vibration Research

Email: pan@isvr.soton.ac.uk

ISVR, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, UK

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ακύρωση ακουστικής αντι-ήχησης (cross-talk) είναι μια μέθοδος επεξεργασίας σήματος που εφαρμόζεται για τη δημιουργία εικονικών ακουστικών ειδώλων, κατά την οποία ένας αριθμός μεγαφώνων (συνήθως δύο) χρησιμοποιείται για να παράγει τα επιθυμητά ακουστικά σήματα ακριβώς στη θέση των αυτιών του ακροατή. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο ότι τα αμφιωτικά σήματα, τα οποία μπορεί να είναι ηχογραφημένα ή συντεθειμένα έτσι ώστε να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες διεύθυνσης και απόστασης, φιλτράρονται με τον αντεστραμμένο πίνακα που περιέχει τις συναρτήσεις μεταφοράς των ευθειών και των αντίθετων ηχητικών διαδρομών μεταξύ των μεγαφώνων και των αυτιών του ακροατή. Άλλες εργασίες έδειξαν πως για συγκεκριμένες συχνότητες, γνωστές ως «ιδιάζουσες συχνότητες», η διαδικασία αυτή καθίσταται προβληματική με αποτέλεσμα να παράγεται αρκετά σύνθετο ακουστικό πεδίο γύρω από το κεφάλι του ακροατή. Εξομοιώσεις σε υπολογιστές έχουν προβλέψει ότι σε αυτές τις συχνότητες η σθεναρότητα της τεχνικής ακύρωσης της ακουστικής αντι-ήχησης, σχετιζόμενη με πλάγιες μετατοπίσεις της θέσης του ακροατή, μειώνεται αισθητά. Η ακόλουθη εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα ενός συνόλου πειραμάτων που σχεδιάστηκαν για να αξιολογήσουν ψυχοακουστικά τη σημασία της ιδιάζουσας συχνότητας στα συστήματα παραγωγής εικονικών ακουστικών ειδώλων.

ABSTRACT

Acoustic cross-talk cancellation is a signal processing technique used in applications of virtual acoustic imaging, whereby a series of loudspeakers (usually two) are used to deliver the desired signals exactly at the listener's ears. This technique requires that the original binaural signals, recorded or synthesized in order to have specific directional and distance attributes, are filtered according to the inverted plant matrix which contains the direct and cross path transfer functions between the loudspeakers and the listener. Other papers have shown that for certain frequencies, known as the "ringing frequencies", this matrix inversion procedure becomes ill-conditioned resulting in a highly complex acoustic field around the listener's head. Computer simulations have predicted that for these frequencies, the robustness of the acoustic cross-talk cancellation technique degrades noticeably with lateral displacement of the head. This paper presents the results of a series of subjective experiments designed in order to psychoacoustically evaluate the importance of the ringing frequency in virtual acoustic imaging.

Introduction

This paper presents the results obtained by a series of subjective experiments conducted in order to evaluate psychoacoustically the performance of acoustic virtual imaging systems, and the particular importance of the “ringing frequency” [1]. There are two studies presented. The first investigates whether there is a casual relation between the presentation of a virtual image having frequency in the range of the ringing frequency and the degradation of the ability of the subjects to perceive the nominal angle of the virtual image. The second study investigates whether the “sweet spot” size of the system (the size of the area in which correct perception of virtual images is achieved) [2], degrades noticeably in the presence of images having frequency at the ringing frequency. Both studies compare two arrangements of virtual imaging systems. The first follows the traditional angle span of 60° for the loudspeakers, the second follows the 10° , dubbed in literature as the “stereo dipole” which is found to have highly desirable properties, especially with regard to the robustness of the system with respect to the movement of the listener’s head [3,4].

1. The principles of cross-talk cancellation and virtual acoustic imaging

Acoustic virtual imaging systems take advantage of the principles of binaural technology [5] aiming to give the listener the impression of a virtual environment, by delivering the appropriate interaural and spectral sound localization cues. Binaural signals are normally reproduced by headphones, to guarantee that each channel is sent to only one ear. If loudspeakers are used, cross-talk and reflections from the room disturb the reproduction. However, based on the “cross-talk cancellation” technique, it is possible to produce a sound field at the ears of a listener that comprises an accurate replica of a pair of prescribed sound pressure time histories only by using only a pair of loudspeakers [6].

Figure 1 depicts the arrangement of a virtual imaging system. The target is to reproduce the binaural pair of signals $u(k)$ (symbols in the discrete frequency domain), so that to be perceived, at a position placed in an angle of incidence a in the front horizontal plane. Hence there is a question of how to deal with the direct and cross paths of sound propagation between the loudspeakers and the ears of the listener. Assume that there is a matrix of filters $\mathbf{H}(k)$ that can minimize the error as shown in figure 2. Letting $\mathbf{C}(k)$ be the 2×2 matrix containing the direct and cross transfer functions $C_D(k)$ and $C_C(k)$ and assuming that $\mathbf{A}(k)$ is pure delay Δ , then to make $w(k)$ to be as close as possible to $d(k)$ we have to satisfy the requirement:

$$\mathbf{C}(k)\mathbf{H}(k) \approx e^{-jw\Delta}\mathbf{I} \quad (1.1)$$

Thus at each frequency k the solution of the of the feed-forward control design cross-talk cancellation matrix has a good approximation so that :

$$\mathbf{H}(k) = \mathbf{C}^{-1}(k)e^{-jw\Delta} \quad (1.2)$$

It is shown, that the optimal solution for the filters requires the inversion of plant matrix $\mathbf{C}(k)$. There are several strategies for determining this matrix. Apart from measuring the real transfer functions, there is the possibility of using a model for the scattering around the head of the listener. Among all the alternatives found in literature [1-4] this study adopts the rigid sphere model. Kirkeby in [3] lists a number of authors that worked on Rayleigh’s analysis for this scattering problem and explains the way of calculating the scattered field. The analytical expressions can be found in their frequency domain form in [1] while Rose in [8] describes how

the spherical Bessel functions that are needed for this calculation, can be related to the standard (cylindrical) Bessel functions that are available in Matlab. If no pre-recorded binaural material exists the same model can be used in order to synthesize various virtual images by filtering the source waveforms with the proper transfer functions in order to obtain the desired directional attributes.

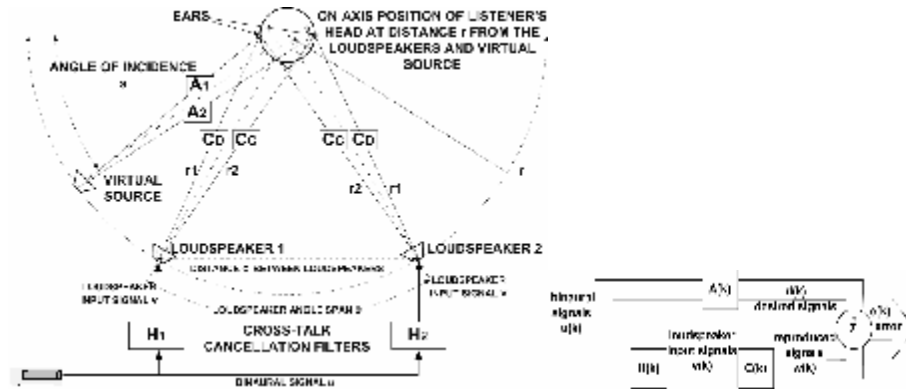


Figure 7.(left) Overview of an acoustic virtual imaging system - geometry and symbols. Figure 8.(right) 2-channel signal processing block diagram

2. The ringing frequency

This inversion procedure was found [7] to become ill-conditioned for specific frequencies, the “ringing frequencies”. Nelson in [1] explains that under the assumptions a) of an anechoic environment, b) of the loudspeakers presumed as point monopole sources, c) that the listener’s head modelled as a free field, d) of the listener standing exactly at an on-axis position then the for a given interaural path length (see figure 1) difference Δr such that,

$$\Delta r = r_2 - r_1 \tag{2.1}$$

and hence a given difference between travel times from the one of the loudspeakers to the most distant and nearest ears of the listener equal to

$$t = \Delta r / c_0 \tag{2.2}$$

where c_0 denotes the speed of sound, then the inversion of the plant matrix becomes ill-conditioned at frequencies equal to:

$$f_n = n / 2t \tag{2.3}$$

where n is a positive integer. Hence, the ringing frequency is mainly an inherent characteristic of the geometry of the system. The ringing frequency is generally determined as the frequency that coincides with the first local maximum of the condition number of $\mathbf{C}(k)$ [7]. Some insight into the time domain response of two-channel virtual imaging systems [1] has lead to the belief that the time domain response produced at the “ringing frequencies” of such reproduction systems is psychoacoustically undesirable. Figure 3 shows a simulation of the acoustic field of a Gaussian pulse centred at 1680Hz. This is the ringing frequency of the 60° arrangement and the sound field produced is that necessary for the pulse to be heard only by the left ear of the listener. The 10° arrangement on the right, for which the inversion problem is well-conditioned, presents a much simpler and clear sound

field than the 60° on the left.



Figure 9 Simulation of the sound field loudspeakers at 60° ill-conditioned case (left) loudspeakers at 10° arrangement (right) well-conditioned case (no head scattering)

3. The subjective experiment

The experiment took place in the small anechoic chamber of ISVR. Four matched, loudspeakers were used being powered by two identical stereo amplifiers. A screen made of acoustically transparent fabric was put between the loudspeakers and the subjects to avoid visual stimuli. The subjects were asked to sit on a chair having their head stabilized with a headrest 1.4m away from the loudspeakers. 16 subjects of both sexes participated, aged between 20 and 30 years and having normal hearing. All stimuli were pre-recorded material that was presented in a randomized order to each subject. Subjects were asked to listen to the stimulus and then report the angle from which they perceived the auditory event by choosing upon a set of markers that were put in front of them at 10° intervals.

The ringing frequency of the 60° arrangement for a normal head of 18cm diameter is estimated theoretically to be at 1680Hz a frequency range for which studies [9] have shown, that ITD cues do not produce any substantial change in lateral position. Hence, in addition to waveforms of band limited white noise and Gaussian pulses, a family of waveforms were also chosen that comprise high frequency tones, amplitude modulated by other tones of low frequency, known in literature as High Frequency Transposed Tones (HFTT). Signals of these three kinds were created being tuned between 500Hz and 2150Hz at 150Hz intervals. Since the 10° arrangement has a ringing frequency at 11kHz it is supposed to have a well-conditioned inversion across the investigated frequency range whereas the 60° arrangement is expected to become ill-conditioned around 1680Hz. The cross-talk cancellation filters were designed incorporating the rigid-sphere model according to Kirkeby's et al [10] fast deconvolution algorithm, which uses regularization in order to reduce the duration of the optimal filter. For reasons of simplicity, all virtual images were placed in 0° elevation and only in the front horizontal plane.

For the first study subjects were presented stimuli at 30° , 150° and 90° (angles counting as shown in figure 1). As reported in [9], a result of the weakening of the IDT cues above 1200Hz leads subjects to perceive auditory events progress towards the centre of their head. Hence, in order to avoid misinterpreting any results, the 90° option was decided so that to investigate what happens at the ringing frequency when we require from the system to place an image directly in the middle. For the second study, a decision was made to move the loudspeakers instead of the subjects for accuracy purposes. Hence, the loudspeakers were put on a frame that was able to move laterally with the use of an automated mechanism. 4 positions were selected 0cm (on axis), 3cm, 6cm and 9cm moving the sources to the right. Virtual images were presented at 150° .

4. The results

Figure 4 presents the results taken from the first study. Data points on the graph are mean values from only 7 subjects found to be “good localizers” following the criterion that they were found having less than 10% of outlier values among the whole data set. Figure 5 presents the results taken from the second study respectively. Data points on the graphs are mean values calculated over all 16 subjects as with this data set it was not feasible to separate them into “good” and “bad” localizers.

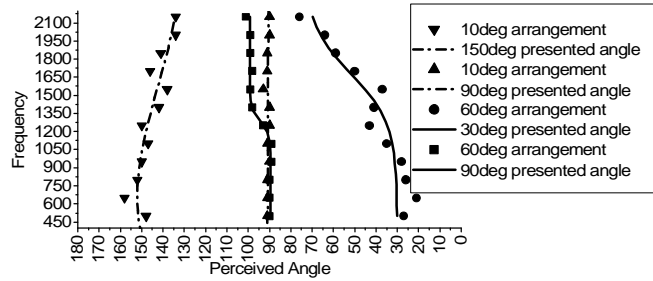


Figure 10 Perceived angle and ringing frequency (results of 1st study)

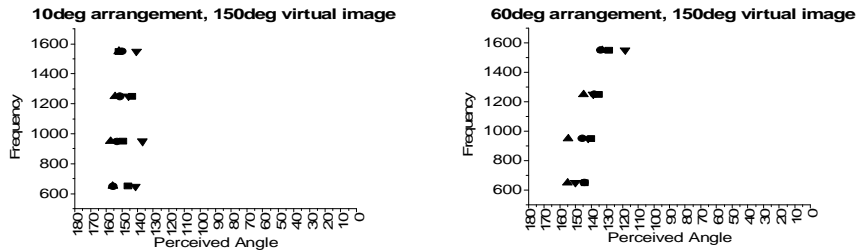


Figure 11 Robustness to head misalignment and ringing frequency (results of 2nd study) (head displacement ■ 0cm ● 3cm ▲ 6cm and ▼ 9cm to the left)

5. Conclusions

It becomes clear that virtual images placed at 30° and 150° tend to be perceived at directions more closely to the central axis, above frequencies of 1200Hz, independently of the arrangement. This effect was expected to appear due to the weakening of the ITD cues. However, compared to the 10° arrangement, the 60° arrangement presents an additional shift of the perceived angle towards the central axis. For virtual images placed exactly in the middle, the 10° arrangement presents excellent performance whilst the 60° arrangement presents an almost constant shift of 10° above 1200Hz. These two findings can be related to the ringing frequency of the 60° arrangement which theoretically is estimated to be at the range of 1680Hz whilst the condition number of the plant matrix $C(k)$ starts to get large values above 1200Hz. This leads to the conclusion that acoustic virtual imaging systems appear to be less capable of presenting accurately virtual images tuned in the range of the ringing frequency.

Interpreting the results of the second study, compared to the 10° arrangement, the 60° arrangement presented a larger tendency to provide the wrong perception to the listener while the listener was misaligned from the on axis position due to the inaccurate synthesis of the binaural signals at the ears. Similar results were reported in previous experiments [4]. However this study provides an additional clue that this difference in performance is also related to the ringing frequency as the two graphs in figure 5 start to differ significantly above 1200Hz.

6. References

- [1] P.A. Nelson, "The time domain response of some systems for sound reproduction", Proceedings of the Institute of Acoustics Vol 25 Pt.8 2003
- [2] J. Rose, P. A. Nelson, B. Rafaely, and T. Takeuchi, "Sweet spot size of virtual acoustic imaging systems at symmetric listener locations" Journal of Acoustical Soc of America 112 (5) Pt. 1 Nov 2002
- [3] O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada, "Local sound field reproduction using two closely spaced loudspeakers" Acoustical Soc. Of America 104 (4) October 1998
- [4] T. Takeuchi, P.A. Nelson and H. Hamada, "Robustness to head misalignment of virtual sound imaging systems", Journal of Acoustical Soc of America 109 (3) March 2001
- [5] J. Blauert, "Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization", MIT Press, Cambridge MA, 2001.
- [6] B.S. Atal and M.R. Schroeder, "Apparent sound source translator", US Patent 3 236949, 1966
- [7] D.B. Ward and G.W. Elko, " Effect of Loudspeaker Position on the Robustness of Acoustic Cross-talk Cancellation", IEEE Signal Processing Letters Vol6 No5, May 1999.
- [8] J. Rose, "Visually adaptive virtual acoustic imaging", 2004, Ph.D. Thesis, University of Southampton, UK.
- [9] L. R. Bernstein "Auditory Processing of Interaural Timing Information: New insights", Journal of Neuroscience Research 66:1035-1046 (2001)
- [10] O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada and F. Orduña-Bustamante "Fast Deconvolution of Multichannel Systems using Regularization", IEEE Transactions on speech and audio processing Vol6. No. 2 March 1998

Binaural simulation applied to standard stereo audio signals aiming to the enhancement of the listening experience

Christos Tsakostas, Electrical Engineer,
tsakostas@holistiks.com
HOLISTIKS, <http://www.holistiks.com>
Digeni Akrita 29, 12243, Athens, Greece
Tel.: +30 210 5317955, Fax: +30 210 5317956

ABSTRACT

It is well-known that humans perceive sound binaurally, which literally means with two ears. The acquired knowledge from the investigation of the auditory system is used for the development of methods for analyzing and processing sound signals, in many cases of applications. Such an application is "Binaural Simulation", which facilitates listening into spaces that only exist in the form of computer models. Namely, a "Virtual Auditory Environment" is created, which should be perceived by a listener, as being natural, or at least highly plausible.

In the work presented here, binaural simulation is used for the processing of the typical stereo audio signals. In more detail, the left and the right audio signals feed two, or more, virtual sound sources which can be placed arbitrarily anywhere in the virtual auditory environment. The result of this process, gives a synthesized binaural signal, which is suitable for listening over headphones. If listening over loudspeakers is required, then the binaural signal passes through a cross-talk cancellation network.

Εφαρμογή της Αμφιωτικής Εξομοίωσης σε τυπικά στερεοφωνικά ηχητικά σήματα με στόχο τη βελτίωση της ηχητικής εμπειρίας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό πως οι άνθρωποι λαμβάνουν τον ήχο αμφιωτικά, δηλαδή με δύο αυτιά. Η αποκτηθείσα γνώση από την εξερεύνηση του ακουστικού συστήματος χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μεθόδων που αναλύουν και επεξεργάζονται ηχητικά σήματα, σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών. Τέτοια εφαρμογή είναι η «Αμφιωτική Εξομοίωση», η οποία προσφέρει ακρόαση σε χώρους που υπάρχουν υπό τη μορφή υπολογιστικού μοντέλου. Για την ακρίβεια δημιουργείται ένα «Εικονικό Ακουστικό Περιβάλλον», το οποίο πρέπει να ακούγεται αρκετά φυσικό ή τουλάχιστον ισχυρά αληθοφανές.

Στην εργασία που παρουσιάζεται εδώ, η αμφιωτική εξομοίωση χρησιμοποιείται για την επεξεργασία τυπικών στερεοφωνικών σημάτων. Το αριστερό και το δεξιό σήμα του στερεοφωνικού σήματος τροφοδοτούν δύο, ή περισσότερες, εικονικές πηγές ήχου οι οποίες μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στο εικονικό ακουστικό περιβάλλον. Το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας δίνει ένα συνθετικό αμφιωτικό σήμα, το οποίο είναι κατάλληλο για ακρόαση με ακουστικά. Εάν απαιτείται η ακρόαση από

ηχεία, τότε το αμφιωτικό σήμα περνάει μέσα από ένα δίκτυο «ακύρωσης διασταύρωσης ήχου».

1. Introduction

Listening over two loudspeakers with the stereo topology was the first commercial method involving spatial sound. The idea was very simple, namely the placement of a sound left or right to the listener is achieved by sending the audio signal to the left or right loudspeaker. If the same signal is sent to both loudspeakers a “phantom source” appears to originate from a point midway between the two loudspeakers. The limitation of this topology is that it does not create the impression of a source outside of the line segment between the two loudspeakers (exception is the case of crosstalk-cancelled stereo as it will be seen later in this paper).

This difficulty was overridden with the introduction of Multi-Channel Systems (Surround Sound). A separate channel is used for every sound originating from a desired direction, including even above and below, if desired. Although multi-channel systems produce impressive spatial effects, the drawback of these systems is that they are expensive and inconvenient.

It has also long been known that it is not necessary to have multiple channels to create convincing 3D sound, but two channels are sufficient. The work presented here describes the methods making that possible by the means of “Binaural Signal Processing” and “Binaural Room Simulation”. These methods are implemented in software presented here through a 3D audio engine and an application. Principally, the goal of the application is to create a spatial impression of standard stereo audio recordings which is by far better than the one offered by conventional systems. Other applications are also considered.

2. Principles of 3D Audio, Binaural Technology & Room Simulation

3D Audio refers to the arbitrary positioning of sounds around a listener. This method creates a so-called virtual auditory scene or virtual auditory environment. 3D Audio systems are intended to work with two-channel reproduction systems: headphones and stereo loudspeakers. Obviously, this is a significant advantage because such systems are cheaper and by far more convenient than the multi-channel ones.

2.1 Binaural Recordings – Listening of Binaural Signals

The question stated is: “How is it possible to recreate an auditory scene?”. The answer is very simple; “Simply, by the recreation the sound pressures at the right and left ear drums that would exist if the listener were actually present”. Fig. 1 depicts the principles of “Binaural Recording”. Two microphones are placed in each one of the ear canals of a human or dummy head and it is recorded what they pick up.

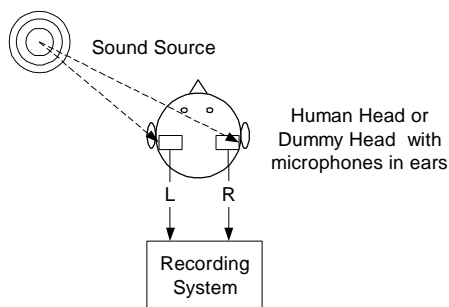


Figure 1: Binaural recording. Two miniature microphones are placed in the ear canals of a human or a dummy head, feeding a recording system.

When the left and right signals are fed to the left and right headphone units, it is as if the listener were present in the original sound field (Fig. 2). Headphones directly feed the ear canals with the signals that were recorded in the original auditory scene (Fig. 1).

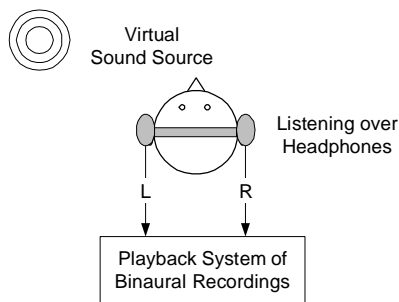


Figure 2: Binaural recording - listening over headphones. A virtual sound source is appeared outside the head of the listener (out-of-head effect).

Although headphones simplify the delivery of one sound to one ear and another sound to another ear, in practice there are some limitations: (a) Sounds heard over headphones seem to be too close, (b) Headphones can have peaks and notches in their frequency response that mistakenly resemble pinna responses and (c) people do not like to wear headphones for long periods of time.

These problems are circumvented by the usage of loudspeakers with the prerequisite that the binaural signals are pre-processed suitably. When listening over stereo loudspeakers each loudspeaker emits sound to both ears (Fig. 3). However, for the recreation of the auditory scene the left loudspeaker should emit sound only to the left ear and the right loudspeaker only to the right ear. In practice, there are additionally the undesired paths which are depicted with red dotted lines in Fig. 3. The process of elimination, or at least significant attenuation, of the sound following these paths is called "Cross-Talk Cancellation". Systems that implement this technique are also called "Transaural Systems". Whilst listening over stereo loudspeakers makes the sound come from between the two speakers in front of the

listener, transaural audio extends the sound field beyond the separation of the loudspeakers and the sound surrounds the listener.

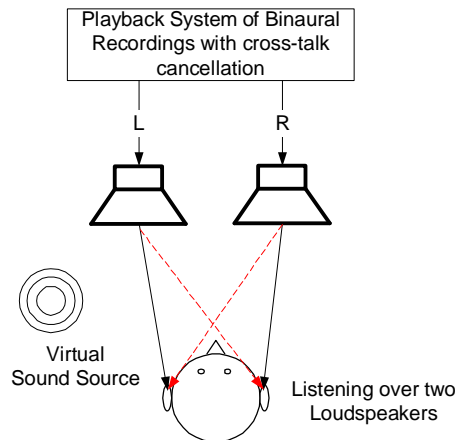


Figure 3: Cross-talk cancellation system or transaural system.

2.2 Binaural Synthesis - HRTF

Although binaural recordings are effective and economic they suffer from several disadvantages, but the most important one is that they are not interactive. This problem is overridden with binaural synthesis. Consider the case depicted in Fig. 1. In order to calculate the sound pressure that an arbitrary sound source produces at the ear drum all we need to know is the impulse response from the source to the ear drum. This is called the Head Related Impulse Response (HRIR) and its Fourier transform is called the Head Related Transfer Function (HRTF).

The HRTF captures all of the physical cues to source localization. Once the HRTF for the left ear and the right ear are known, accurate synthesis of binaural signals from an anechoic signal is achieved. Fig. 4 depicts the process of binaural synthesis.

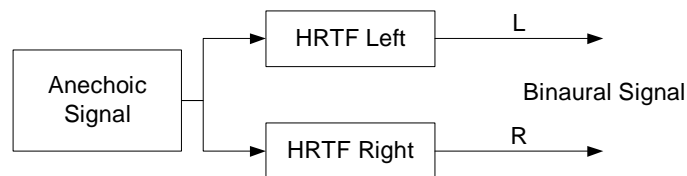


Figure 4: Binaural Synthesis. A binaural signal is synthesized by passing an anechoic signal through the left and right HRTFs that correspond to a particular sound source position relatively to a listener.

HRTF data for various positions are obtained by simply positioning the sound source at the desired position and by measuring the impulse response for this particular position. Such measurements have taken place in several laboratories whose data are available on Internet [6], [7].

2.3 Binaural Room Simulation – Sound Field Models

When “Binaural Synthesis” is combined with existing sound field models, then “Binaural Room Simulation” is achieved. This method facilitates listening into spaces that only exist in the form of computer models [2]. In more detail, the sound field models can output the exact spatial-temporal characteristics of the reflections in a space. The summation of binaural synthesis applied to each reflection produces the “Binaural Room Impulse Response”.

In general, a room’s impulse response is divided in three parts (Fig. 5): (a) the direct sound, (b) the early part and (c) reverberation.

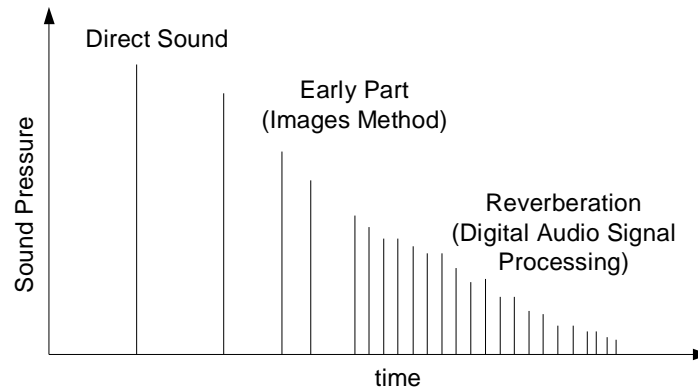


Figure 5: The three parts of a typical room impulse response.

For the case of real-time 3D audio applications, which are combined with the highest possible authenticity, it is usual to approximate the early part with “Image Source Method” and/or “Image Receiver Method” [1], whilst the late part or reverberation is usually approximated with digital audio signal processing techniques. (A brief overview of existing sound field models is given in author’s companion paper [1]).

3. Implemented Virtual Auditory Environments (VAE)

The implemented software 3D audio engine is based on the principles described in section 2. In addition, it incorporates author’s algorithms for the cases of cross-talk cancellation and ISM [1]. One of the most important advantages of the engine is that almost every parameter can be altered by the user in real-time. For example, whilst a track is being played the spatialization HRTFs can be altered without stopping and restarting the playback process.

The core of the software processing is the definition of the virtual auditory environment, namely the definition of: (a) the geometry and materials of the virtual world, (b) the sound field model and (c) the definition of virtual sound sources and virtual receivers.

3.1 Virtual World

At the current stage the user interface of the application software supports only “shoebox” like rooms, although the engine is implemented in such a way that it supports arbitrary shapes of spaces. This was judged to be necessary for the shake of real-time processing in moderate computers.

Concerning the dimensions of the room, users have the capability to define the length, width and height and alter them in real-time.

Materials can be assigned to any surface of the room separately. The application software supports a materials database in which users can add, edit and remove materials. The absorption coefficients and the appearance of them can be defined. The virtual world is represented by the means of 3D graphics.

3.2 Sound Field Models

The available sound field models are: (a) anechoic, (b) early part and (c) early part & reverberation.

For the anechoic case reflections are not considered, consequently the geometry of the room does not play any role at all.

The early part is simulated by the means of “Image Source Method” and “Image Receiver Method” [1]. The order of the reflections can be altered in real-time and its maximum value is limited to five.

Early part & reverberation uses a hybrid algorithm in which the early part is estimated as described earlier and the reverberation part (late part) of the room impulse response is estimated with digital audio signal processing. In more detail, for the late part two algorithms are supported: (a) Schroeder [3], (b) Moorer [4]. According to the Schroeder algorithm the late part is calculated by the means of comb-filters and all-pass filters, whilst for the case of Moorer algorithm the late part is approximated with a decaying white noise. The reverberation time is calculated with the Sabine equation [5]. A special algorithm has been employed in order to combine the binaural early part with the monaural late part.

3.3 Virtual Sound Sources & Virtual Receiver

For the current implementation only one virtual receiver is allowed. For the virtual sound sources there is no limitation. Both the receiver and the virtual sound sources can be placed arbitrarily in the 3D virtual auditory environment.

4. Implemented Processing

4.1 General

Real-time convolution is accomplished by the means of unpartitioned and partitioned overlap-and-save algorithms.

Post-equalization is supported for the final binaural signal. In addition, pre-equalization is also supported for the stereo audio signals before they are spatialized.

Automatic Gain Control is supported by the means of a simple limiter.

4.2 HRTF

Installable sets of individual HRTFs are supported. The default HRTFs are based on data provided by a) MIT Media Laboratory [6], b) CIAIR, Nagoya University, Japan [7].

4.3 Cross-Talk Cancellation / Transaural Audio

The cross-talk cancellation filters are built with HRTFs. Users have the capability to select a different set of HRTFs for the cross-talk cancellation processing than the set used for spatialization.

In general, cross-talk cancellation filters built with HRTFs have the problem that the very low in power frequencies are amplified too much and vice-versa. A special

equalization has been employed that reduces this problem. The equalization is parametric via the “Transaural Equalization Strength” (TES) parameter, measured in dB. It has been observed that different values of TES give satisfactory results for different sets of HRTFs.

In addition, the software gives the capability to apply the cross-talk cancellation filters directly to the stereo input without prior processing through the 3D audio engine.

5. Synopsis

An effort has been made to develop an engine for 3D audio applications. The motivation for this engine was the balance between authenticity and real-time applications in modern PCs. The insides of the engine are demonstrated through a software application that enhances standard stereo audio signals offering a significant better listening experience. For the future, it is intended to enhance the engine and employ it in several other applications including acoustical consulting, and virtual surround.

6. References

- [1] Christos Tsakostas, “Image Receiver Model”: An efficient variation of the “Image Source Model” for the case of multiple sound sources and a single receiver. Conf. HELINA, Thessaloniki Greece, 2004.
- [2] Blauert, J. (1997), Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization, 2nd, enlarged ed. MIT Press, Cambridge MA.
- [3] M. R. Schroeder, “Natural Sounding Artificial Reverberation,” J. Audio Engineering Society, Vol. 10, No 3, 1962.
- [4] James A. Moorer, “About This Reverberation Business,” ComputerMusic Journal, Vol. 3, No 2. 1979.
- [5] W. C. Sabine, "Reverberation," originally published in 1900. Reprinted in Acoustics: Historical and Philosophical Development, edited by R. B. Lindsay. Dowden, Hutchinson, and Ross, Stroudsburg, PA., 1972.
- [6] Bill Gardner and Keith Martin, HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone, <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [7] Nagoya University, Japan, Head Related Transfer Functions, <http://www.itakura.nuee.nagoya-u.ac.jp/HRTF/>

An open platform for conducting psycho-acoustic experiments in the auditory representation of web documents

Gerasimos Xydas¹, Vasilios Argyropoulos²,
Theodora Karakosta¹ and Georgios Kouroupetroglou¹

¹University of Athens,
Department of Informatics and Telecommunications
{gxydas, koupe}@di.uoa.gr

²University of Thessaly, Department of Special Education
vassargi@sed.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία περιγράφει ένα ανοικτό, βασισμένο σε XML, γραφικό περιβάλλον για την πραγματοποίηση σύνθετων πειραμάτων ακουστικής απόδοσης της πληροφορίας οπτικής μορφοποίησης εγγράφων, όπως αυτά δημοσιεύονται στον παγκόσμιο ιστό. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα (α) να απο-μεταγλωττίσει την πηγαία δομή των εγγράφων του Web δημιουργώντας ένα λογικό επίπεδο αναπαράστασης της οπτικής μετα-πληροφορίας που φέρουν και (β) να δημιουργήσει αυθαίρετες διακριτές ηχο-σειρές αντιστοίχησης της με συνδυασμό προσωδιακών παραμέτρων και ηχητικών, μη-φωνητικών, στοιχείων Χρησιμοποιώντας αυτή την πλατφόρμα, εκτελέσαμε ένα σύνολο από ψυχο-ακουστικά πειράματα με τυφλούς και βλέποντες για την αξιολόγηση της καταλληλότητας και της απόδοσης διάφορων ηχο-σειρών στην ακουστική αναπαράσταση των οπτικών στοιχείων σε έγγραφα τύπου HTML. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι καταρχήν οι ηχο-σειρές που επιλέξαμε για τα “bold”, “italics” και “bullets” γίνονται διακριτές σε ποσοστό μέχρι και 84.1%.

ABSTRACT

This work presents an open, XML-based, graphical environment, for conducting complex experiments in the field of the auditory representation of visual format of documents like the ones that are published in the World Wide Web. We allow the user to (a) de-compile the source structure of Web documents generating a logical layer that abstractly represents of the visual meta-information the document carry and (b) to create distinctive sound fonts in an arbitrary way that map of the meta-information to prosodic parameters and non-speech audio elements. Using this platform, we performed a set of psycho-acoustic experiments with blind and sighted students for the evaluation of the appropriateness and performance of several sound fonts in the auditory representation of visual components in cases of HTML documents. The results show that the sound fonts we chose for “bold”, “italics” and “bullets” are being distinctive up to 84.1% of the cases.

1. Introduction

Web documents (e.g. HTML) are mainly concerned with visual modality, though recommendations are being developed (mainly by the W3C) for enabling other modalities to be delivered as well through the Web [1][2]. The visual formation of Web documents comes from data that accommodate the textual data, i.e. meta-information. Examples of utilization of the meta-information by Web Browsers in the visual domain are the effects caused by “bold” or “italics” letters, or the structured layout of tables. However, when setting such documents in an auditory environment, the aural presentation traditionally occurs by stripping out any meta-information from the source document prior to the Text-to-Speech (TtS) conversion. This results in less effective presentation than would be the case if the document structure was retained. For example, “bold” letters usually imply emphasis, which is not delivered, for example, through a screen reading software or a telephone Web browser.

Related works in the field of the representation of documents in auditory-only interfaces have pointed out the need for retaining part of the meta-information through out the TtS procedure. Raman in [3] has developed a series of systems basically for providing an audio format of complex mathematical formulas in (L^A)TEX documents. He used non-speech audio sounds to indicate the formula and some pitch modifications in order to group elements within the formula. The importance of combining speech and non-speech signals to support the presentation of visual components and structures has shown in [4], while other works focus on the prosodic variations and speaker-style changes [5]. Earcons, i.e. structured sounds (the aural counterparts of icons [6]), and Auditory Icons have been used in the human-machine interfaces [7].

Sound Fonts are also another approach that utilizes prosodic modifications of synthetic speech in order to deliver visual components in a speech modality. In [8], the use of Sound Fonts is studied for the comprehension and memorization of bold letters. Blind and sighted objects were used and two cases were examined: (a) insertion of a pitch modified phrase “in bold” before the bold words and (b) a pitch modification that applied directly on the corresponding bold words, which was finally the preferred Sound Font.

This work is part of a bigger effort to provide some means for the auditory accessibility of the Web. We present an open-platform capable of (a) parsing one- and two-dimensional visual components and (b) transforming them into speech markup elements with the combination of prosodic and audio features. Since there are not enough data for the standardization of earcons and prosodic sound fonts (we use the term *auditory scripts* for both cases), we also take advantage of this platform to perform a pilot study on the acoustical effect of different auditory scripts to blind and sighted students. The scripts provide an auditory definition of document components that otherwise should produce visual effect (bold letters, italic letters and bullet list).

In the next section we introduce the Document-to-Audio (DtA) platform and the functionality of a graphical tool for experimenting with earcons and prosodic sound fonts. We then illustrate the usefulness of DtA by measuring the rate of the acoustical distinction of visual components from the students used in the experiments.

2. The Document-to-Audio (DtA) platform

We have dealt with the problem of the auditory formation of documents by introducing the e-TSA Composer [9]. This enabled the transformation of any kind of meta-information inside documents to prosodic realizations or audio insertions. We have now slightly modified the original architecture, as shown in Figure 1 and we have accommodated it with an easy-to-use graphical user interface. The DtA platform adds an abstract logical layer to e-TSA that is free of any presentation details. From this layer we are able to drive user interfaces of any modality.

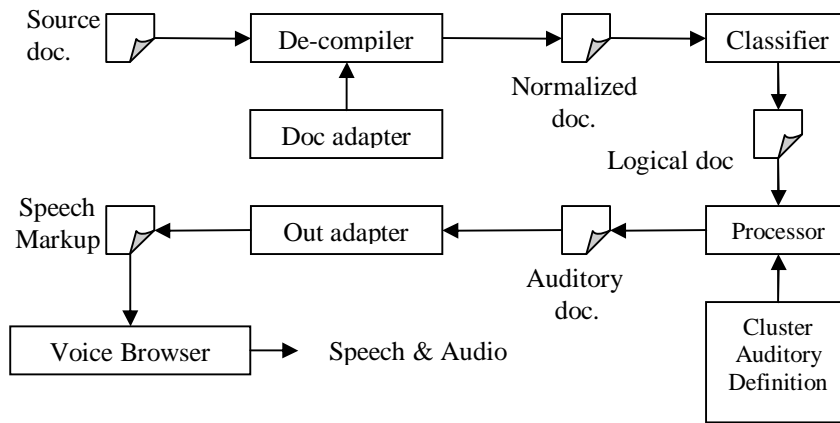


Figure 1: The DtA platform with the added logical stage in e-TSA Composer.

The DtA platform preserves the XML-based initiative of the e-TSA Composer, in the manner that a series of structured documents travels through the processing chain, as illustrated in the above figure. Thus, the source document is firstly de-compiled in order to classify meta-information into one- (e.g. font formation) and two- (e.g. tables) dimensional relations and align it with the corresponding textual data. Each pair of meta-information along with its related text is identified as a “cluster” in the source document (Figure 2).

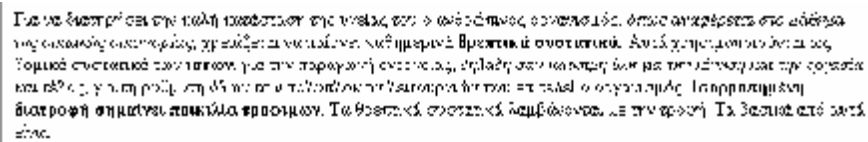


Figure 2: Examples of “bold” and “italic” clusters.

The auditory transformation is then carried out by utilizing a library of Cluster Auditory Definition (CAD) scripts that define the desired prosodic behavior, as well as audio insertions in response to the clusters’ class. Figure 3 and 4 illustrates examples of CAD scripts, using an XSL-based implementation. This transformation is depicted in a Speech Markup document that is being used to drive a Voice Browser. Voice Browsers differ from traditional text-to-speech systems in that the former are capable of parsing texts with speech and audio annotations rather than plain ones.

```

<xsl:template match = "emphasis">
<prosody pitch="+20%" rate="0.85" volume="130">
<xsl:apply-templates/>
</prosody>
<prosody pitch="default" rate="default" volume="default"/>
</xsl:template>

```

Figure 12: a Cluster Auditory Definition script of the prosodic sound font "emphasis".

```

<xsl:template match = "ul">
<audio src="330Hz"/><audio src="440Hz"/>
<xsl:apply-templates/>
<audio src="440Hz"/>
<xsl:template match = "ul/li">
<audio src="330Hz"/> <ssml:audio src="220Hz"/>
<xsl:apply-templates/>
</xsl:template>

```

Figure 13: a CAD script of a bulletin's earcon. A sequence sound of 2 tones forms an intro (played before the list), an outro tone sequence announces the end of the list, while a high tone(440Hz) points each list item.

This platform formed the basis of an experimental environment in order to perform psycho-acoustic experiments with students regarding the appropriateness of selected prosodic parameters and audio features in representing visual clusters.

As the original e-TSA Composer required an experienced XML programmer to use it, we built on top of the DtA platform an user-friendly graphical user interface to be used by researchers not experienced with programming, as well as to facilitate the repetitive nature of the experiments: try some scripts, correct them and start over. The Document-to-Audio Application is a Java-based user interface that hides all the complexity of the DtA platform and allows the user to (a) create and test Prosodic Sound Fonts and Earcons and (b) to write the Cluster Auditory Definition scripts in an abstract manner. The system is organized into four groups: the Adaption of the input file, the Composition and Compilation of Logical rules, the Composition and Compilation of Audio rules and the Transformation of the input file, according to the selected rules, into a Speech Markup document, to be read out by the Voice Browser:

The Doc-Adapter utilizes the JTidy tool for the conversion of HTML documents to XML ones.

The Doc-to-Logical part interacts with the XSLT files that deal with the formation of the logical layer. The XSLT implementation is hidden under a set of user-friendly commands, such as "map the bold element to emphasis".

The Logical-to-Audio function provides a set of speech and audio controls that the user can modify in order to built auditory scripts. More specifically, the user can select prosodic attributes, such pitch, rate and volume and also generate audio files using a hidden interface with the PRAAT [15] tool to generate signals. After testing the script, the user can assign it to a logical element.

At the last stage, the DtA, the user is able to apply any stored rule for Doc-to-Logical and Logical-to-Audio transformations, generating an SSML Document [1]

that is fed to the Voice Browser (in our Greek experiments we used DEMOSTHeNES Speech Composer [10]).

3. Experiments

Eight participants took part in this pilot study; four blind students (two males & two females) and four sighted ones (two males & two females) in the ages 22-25. We experimented with three visual components: (a) “bold”, (b) “italic” and (c) “bulletin”. These were selected within the frame of a research which has been conducted for all textbooks used in Greek high school in terms of the usage of one- and two-dimensional visual constructs. The chosen text (Stimulus Material – Aural Presentation Text) was extracted from the book “Home economics” (high school).

The default synthetic voice that we used featured trained prosodic models [11] and the Mbrola synthesizer [12] with the Greek diphone database gr2 [10]. The prosodic baselines used were: pitch=110Hz, speed=140 words per minute and volume=100. In line with common practice, literature review [8, 13, 14] and internal tests within the research team we arrived at the following auditory definitions for the selected visual components (Table 1).

Table 1: Qualitative auditory specification for the prosodic characteristics in all 4 versions. Earcons’ definition is shown in Figure 4.

Version	Bold	Italics	Bullets
1	Pitch = 132 Hz (+20%)	Speed = 161 wpm (+15%)	earcons
2	Volume = 130 (+ 30%)	Speed = 161 wpm (+ 15%)	earcons
3	Volume = 130 (+ 30%)	Pitch = 94 (-15%)	earcons
4	Pitch = 132 Hz (+20%) Volume = 130 (+ 30%) Speed = 119 wpm (-15%)	Pitch = 94 (-15%) Speed = 161 wpm (+ 15%)	earcons

Before running the tasks, the students listened to plain synthetic speech from DEMOSTHeNES. All subjects were given 10 minutes to familiarize themselves by listening to a range of eight different levels of pitch, volume and speed. The stimulus material was read out first in a flat (plain) version, followed by the 4 alternate ones. First, we performed some measurements concerning the Auditory Distinction (AD), i.e. the ability of the students to identify the different visual components in the auditory versions (Table 2). In general, the performances of all students were at high level of distinction and the fact that blind students surpassed their peers might be happened due to the experience of the former in listening to a big variety of pre-recorded study materials in conjunction with speech synthesizers. Table 3 contains some statistical information (although 8 students are close to being too few to motivate statistical tests). The total number of the visual components in the stimulus material was 11 (5 “bold”, 5 “italic” and 1 bulletin list).

Table 2: Average of correct auditory differentiations per version.

Version	Blind	Sighted
1	63.6%	63.6%
2	61.4%	54.6%
3	63.6%	56.8%
4	84.1%	70.5%

Table 3: Mean and stdev scores in correct distinction of the 11 visual components. (BS = blind students, SS = sighted students).

Version \hat{a}	1	2	3	4
BS Mean	7	6,75	7	9,25
BS Std. Deviation	2,94	4,27	2,45	0,96
SS Mean	7	6	6,25	7,75
SS Std. Deviation	1,63	0,82	0,96	1,26

It is worth to mention the significant difference between the values of std. deviation in the version 2 between the performances of blind and sighted students. The attributes of the prosodic characteristics in the version 2 were adapted only in speed and volume and not at all in pitch (Table 1). In total, variances are bigger in the cases of the blind students than in the sighted ones. This may be happened due to the fact that blind students were users of a different, formant-based speech synthesizer for Greek (along with screen reader software) for a long time. The range of the standard deviation is decreased significantly in the complex version 4.

Table 4: Qualitative auditory distinctions per version.

Version	Blind	Sighted
1	89.4%	70.9%
2	92.5%	78.3%
3	91.0%	77.1%
4	100.0%	97.2%

The second part of the analysis refers to the specification of the quality of the recognised differentiated auditory components (Qualitative Auditory Distinction – QAD) (i.e. changes in the pitch, volume or speed). Table 4 shows that blind students had higher distinctiveness compared with that of the sighted with respect to the qualitative clarification of the differentiated prosodic components. Version 4 (complex) bears special interest because of the 100% of accurate opinions of the blind students when they classified the qualities of the differentiated auditory prosodic elements. Table 5 tabulates mean and std deviations.

Table 5: Results from the QAD of the correct differentiated auditory prosodic components. (BS = blind student, SS = sighted student)

Version \hat{a}	1	2	3	4
BS mean	6,75	6,25	6,75	8,75
BS Std. Deviation	2,87	3,86	2,87	0,96
SS mean	5,25	4,75	4,75	7,50
SS Std. Deviation	2,87	1,71	1,50	1,00

In total, the absolute values of the variance are bigger in the performances of the blind students than in the sighted ones (not so much as in Table 3) whereas, the values of the means converge. It is worth to mention here that the biggest value of std. deviation is when blind students perform in version 2 (std. deviation=3, 86). The fact that this version does not have any change in the pitch may bring some interesting issues for further research in the area of psycho-acoustics.

Summing up the results, nearly all students (apart from two) agreed that version 3 (volume=+ 30%, pitch=-15%, compound earcons) appeared to be more natural, more distinctive. Nevertheless, if we look at Tables 3 & 5 the students performed higher in version 4 rather than in version 3. According to them version 4 was a bit extreme to their ears when “overstretching” the qualities of pitch or volume. The usage of earcons for the starting and ending points of the list (bullets) made all students enthusiastic and could identify at once the presence of the prosodic component “bullet” in the stimulus material. The version which did not motivate the students was version 2 (volume=+30%, speed=+15%). This version was the only one which did not contain any modification of the pitch. Also it is very interesting to mention that all participants stressed out that they faced difficulties to conceptualize modifications in speed of 15% of the default value. On the contrary, they were well disposed toward modifications of pitch in conjunction with modifications of volume. These characteristics are embedded in version 3 and it seems to be closer to the natural way of spoken language.

5. Conclusions

We presented an open-platform, namely DtA, for transforming visual oriented documents to speech and audio. An easy-to-use graphical user interface facilitates the performance of psycho-acoustics experiments. The purpose of these experiments was to evaluate mappings of each logical layer element to an arbitrary set of acoustical presentations. While extreme prosodic renderings sound unnatural, they also lead to a high level of auditory distinction of the document components. The findings of this pilot study provided a rough assessment for the determination and specific auditory behaviour of the three selected visual components (bold, italic & bullet) leading to an integrated and enriched auditory web accessibility.

6. Acknowledgments

Part of this work has been funded under a postdoctoral grant scholarship to the second of the authors from the Hellenic State Scholarships Foundation (I.K.Y.).

7. References

- [1] “Speech Synthesis Markup Language (SSML) Version 1.0”, Burnett C.D., Walker R. M. and Hunt A (editors), W3C Recommendation, 2004, <http://www.w3.org/TR/speech-synthesis/>
- [2] “Cascading Style Sheets”, <http://www.w3.org/Style/CSS/>”
- [3] Raman, T.V. “An Audio View of (LA)TEX Documents, TUGboat, 13, Number 3, Proceedings of the 1992 Annual Meeting, pp. 372-379.
- [4] Hakulinen, J., Turunen, M. and Raiha, K. “The Use of Prosodic Features to Help Users Extract Information from Structured Elements in Spoken Dialogue Systems”, In Proceedings of ESCA Tutorial and Research Workshop on Dialogue and Prosody, Eindhoven, The Netherlands, (1999), pp. 65-70

- [5] Shriver, S., Black, A. and Rosenfeld, R. "Audio Signals in Speech Interfaces", In Proceedings of International Conference on Spoken Language Processing, Beijing, China, 2000
- [6] Blattner, M.M., Sumikawa, D.A. and Greenberg, R.M. "Earcons and Icons: Their Structure and Common Design Principles", in Human Computer Interaction, 1989, Vol 4, pp. 11-14.
- [7] Gorny, P. "Typographic semantics of Webpages Accessible for Visual Impaired Users, Mapping Layout and Interaction Objects to an Auditory Interaction Space", International Conference on Computer Helping with Special Needs, 2000, pp. 17-21.
- [8] Truillet, P., Oriola, B., Nespoulous, J.L. and Vigoroux, N. "Effect of Sound Fonts in an Aural Presentation", 6th ERCIM Workshop, UI4ALL, 2000, pp. 135-144
- [9] Xydas, G. and Kouroupetroglou, G. "Augmented Auditory Representation of e-Texts for Text-to-Speech Systems", Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, Vol. 2166, pp. 134-141
- [10] Xydas, G. and Kouroupetroglou, G. "The DEMOSTHeNES Speech Composer", in Proceedings of the 4th ISCA Tutorial and Workshop on Speech Synthesis (SSW4), 2001, pp. 167-172
- [11] Xydas, G., Spiliotopoulos, D. and Kouroupetroglou, G. "Modeling Prosodic Structures in Linguistically Enriched Environments", in Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, Vol 3206, pp. 521-528
- [12] Dutoit, T. "An Introduction to Text-to-Speech Synthesis", Kluwer Academic Publishers, 1997
- [13] Brewster, S. "Providing a model for the use of sound in user interfaces", Department of Computer Science University of York, Heslington, 1991, pp 20-24, 35-40
- [14] Kallinen, K. "Using sounds to present and manage information in computers", Center for Knowledge and Innovation Research Helsinki School of Economics, Finland, 2003
- [15] Boersma, P. "PRAAT, a system for doing phonetics by computer", Glot International 5(9/10), 2001, pp. 341-345

Μελέτη χαρακτηριστικών της αντίληψης της χροιάς μουσικών ήχων με τη βοήθεια μοντέλων προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας

Γεώργιος Παπαδέλης
Λέκτορας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.
54124 Πανεπιστημιούπολη
Θεσσαλονίκη
e-mail: papadeli@mus.auth.gr

Κων/νος Παστιάδης
Δρ. Ηλ/γος Μηχ/κός Α.Π.Θ.
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών &
Μηχ/κών Υπολογιστών Α.Π.Θ.
54124 Πανεπιστημιούπολη
Θεσσαλονίκη
e-mail: pastiadi@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας στην επεξεργασία ενθόρυβων μουσικών ηχητικών σημάτων. Η διερεύνηση επικεντρώνεται σε χαρακτηριστικά του σήματος που σχετίζονται άμεσα με την αντίληψη της χροιάς και διερευνά την πιθανότητα ανάδειξης χαρακτηριστικών κατηγορικής αντίληψης κατά τα πρωτογενή (προκατηγορικά) στάδια ακουστικής επεξεργασίας.

ABSTRACT

Experimental data, which resulted from a certain application of computational models of the auditory periphery in the processing of noisy musical signals, are presented within this study. That investigation was focused on the hypothesis whether there is an indication of categorical perception characteristics within the primary or peripheral auditory processing (pre-categorical stages of processing), considering mainly these aspects of the audio signal, which play a significant role in the perception of its timbre.

Keywords: timbre perception, categorical perception, auditory models, peripheral auditory processing

Εισαγωγή

Η αντίληψη της χροιάς είναι ένα χαρακτηριστικό της ακουστικής αντίληψης το οποίο, σε αντίθεση με άλλα ψυχοακουστικά μεγέθη (π.χ. ακουστότητα, αντίληψη τονικού ύψους), παραμένει ακόμη και σήμερα σχετικά απροσπέλαστο στην απόλυτη επιστημολογική προσέγγιση. Η αδυναμία να διατυπωθεί ένας σαφής ορισμός της αντίληψης της χροιάς οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στον πολυδιάστατο τρόπο με τον οποίο αυτή διαμορφώνεται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων και χαρακτηριστικών του φυσικού σήματος. Η πλειοψηφία των πειραματικών μελετών επικεντρώνεται στην επίδραση δύο βασικών χαρακτηριστικών του σήματος: στη μορφή της περιβάλλουσας του πλάτους (amplitude envelope) και της αντίστοιχης του φάσματος του ήχου (spectrum envelope), με ιδιαίτερη έμφαση σε επιμέρους χαρακτηριστικά της μεταβολής τους στο χρόνο [4]. Η εφαρμογή τεχνικών multidimensional scaling (MDS) σε αποτελέσματα πειραματικών δοκιμασιών

αναγνώρισης (identification), κατηγοριοποίησης (categorization), ταύτισης με κάποιο πρότυπο (matching), εκτίμησης της εγγύτητας (proximity rating), διάκρισης (discrimination), κατέδειξε με αναλυτικότερο τρόπο την επίδραση παραμέτρων όπως:

- Διάρκεια της ατάκας (attack time) – Grey, 1975 / Wessel, 1979 / Krumhansl, 1989 / Iverson & Krumhansl, 1993 / McAdams et al., 1995 / Lakatos, 2000.
- Συγχρονικότητα στις ατάκες των χαμηλής συχνότητας συστατικών σε αντιδιαστολή με αυτών υψηλής συχνότητας - Grey, 1977 / Wessel, 1979.
- Κεντροειδές (centroid): ένδειξη της μέσης τιμής της κατανομής της ενέργειας κατά μήκος του φάσματος - Grey, 1975 / McAdams et al., 1995 / Lakatos, 2000.
- Φασματική ρευστότητα (spectral flux): δείκτης της μεταβολής της φασματικής περιβάλλουσας στο χρόνο - Krumhansl, 1989 / Grimphoff et al., 1994 / McAdams et al., 1995 [4], [6], [8].

Η κλασσική ψυχοφυσική μεθοδολογική προσέγγιση στη διάγνωση του κατηγορικού, σε αντιδιαστολή με τον συνεχή τρόπο αντίληψης φυσικών ερεθισμάτων, βασίζεται στον ίδιο τον ορισμό της κατηγορικής αντίληψης. Δηλαδή, ένα συνεχές φυσικό ερέθισμα θεωρείται ότι γίνεται αντιληπτό κατηγορικά, εφόσον παρατηρείται κάποια ποιοτική διαφοροποίηση κατά την αντίληψη των διαφορετικών επιπέδων του, η οποία συντελεί στην αναγνώριση υποσυνόλων από αυτά, ως μελών διακριτών κατηγοριών. Παράλληλα με την προαναφερθείσα ποιοτική διαφοροποίηση παρατηρείται ένα συγγενές ποσοτικό φαινόμενο και ειδικότερα μια διακύμανση στη διακριτότητα μεταξύ ισαπεχόντων επιπέδων του ερεθίσματος, η οποία μάλιστα είναι συνάρτηση της διάρθρωσης των κατηγοριών. Συγκεκριμένα, μεταξύ των μελών της ίδιας κατηγορίας παρατηρείται χαμηλός βαθμός διακριτότητας, ο οποίος πολλές φορές κυμαίνεται στα επίπεδα του τυχαίου. Αντίθετα, υψηλός είναι ο βαθμός διακριτότητας μεταξύ των επιπέδων του ερεθίσματος που αναγνωρίζονται ως μέλη διαφορετικών κατηγοριών [5].

Το φαινόμενο αυτό της διακύμανσης της διακριτότητας ως αποτέλεσμα της διαμόρφωσης των κατηγοριών, παρατηρείται επιπλέον και μεταξύ των μελών κάθε κατηγορίας κατά την αντίληψη ισόποσων μεταβολών του φυσικού ερεθίσματος και έχει χαρακτηριστεί ως φαινόμενο «αντιληπτικού μαγνητισμού» [7]. Ο χαρακτηρισμός αυτός αποδίδεται μεταφορικά, λόγω της ιδιότητας των «καλών παραδειγμάτων» της κατηγορίας να «έλκουν» τα γειτονικά προς αυτά μέλη της, έτσι ώστε να γίνεται δυσχερέστερη η μεταξύ τους διάκριση σε επίπεδο αντίληψης [12].

1. Μοντέλα προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας και αντίληψη της χροιάς

Η παραδοσιακή νευροφυσιολογική έρευνα των περιφερικών μερών του οργάνου της ακοής έχει αναδείξει μια τονοτοπογραφική οργάνωση κατά την πρωτογενή επεξεργασία του ακουστικού ερεθίσματος, τόσο στο επίπεδο του κοχλίου όσο και κατά μήκος της ακουστικής οδού. Τα ευρήματα αυτά οδήγησαν στη διατύπωση της κλασσικής θεωρίας ότι το εσωτερικό αυτί λειτουργεί ως ένας παθητικός «βιολογικός αναλυτής συχνοτήτων», ενώ η αντίληψη χαρακτηριστικών του ερεθίσματος ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα νοητικών διεργασιών υψηλότερων επιπέδων. Βέβαια, ανάλογα σύγχρονα ευρήματα συνηγορούν προς μια ριζική αναθεώρηση της υπόθεσης αυτής, εδραιώνοντας, ολοένα και περισσότερο την άποψη ότι σημαντικές διεργασίες ολοκλήρωσης της πληροφορίας, με παράλληλη ανάδειξη χαρακτηριστικών του ερεθίσματος που μεταφέρουν βιολογικά σημαντική

πληροφορία, επιτελούνται ακόμη και κατά τα περιφερικά στάδια επεξεργασίας, τα οποία χαρακτηρίζονται μέχρι σήμερα ως προκατηγορικά στάδια της αντίληψης [3].

Η διερεύνηση της λειτουργίας του κοχλίου και της ακουστικής οδού με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων στηρίζεται σε μια βασική ιδέα: προσομοιώνοντας φυσικά, φυσιολογικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων που εμπλέκονται στο μετασχηματισμό της μηχανικής διέγερσης της βασικής μεμβράνης σε σχήματα νευρικών ώσεων και δημιουργώντας μια τονοτοπικά οργανωμένη αναπαράσταση των νευρωνικών καναλιών στο πεδίο της συχνότητας, είναι δυνατό να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη μορφή της ακουστικής αναπαράστασης φασματικά απλών ή σύνθετων ήχων σε επίπεδο διέγερσης του ακουστικού νεύρου.

Η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας ξεκίνησε με στόχο τη μελέτη χαρακτηριστικών της ακουστικής αντίληψης σε περιφερικό επίπεδο όπως για παράδειγμα, φαινομένων χρονισμού - "κλειδώμα" φάσης (phase locking) -, διεργασιών που συντελούν στην αντίληψη του τονικού ύψους (pitch perception) κ.ά. [10], [11], [1]. Αν και σε πολλές περιπτώσεις η "ορθότητα" της λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων των μοντέλων δεν είναι δυνατόν να τεκμηριωθεί με νευροφυσιολογικά δεδομένα, εντούτοις η μεγιστοποίηση της λειτουργικής τους αξιοπιστίας, επιτυγχάνεται με έναν έμμεσο τρόπο, σύμφωνα με τον οποίο η ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται ύστερα από εφαρμογή του στην ανάλυση χαρακτηριστικών φαινομένων της ακουστικής αντίληψης και συσχέτιση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα αποτελέσματα που έχει καταδείξει η κλασική ψυχοακουστική πειραματική διερεύνηση των φαινομένων αυτών [11].

Τρεις βασικές παραλλαγές μοντέλων της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας απαντώνται, τόσο στον τομέα της επεξεργασίας και αναγνώρισης φωνής, όσο και σε διάφορους άλλους τομείς της ακουστικής αντίληψης. Παρά τις επιμέρους διαφορές τους, ο τρόπος με τον οποίο απεικονίζουν την «ακουστική πληροφορία» που εμπεριέχεται στη μορφή της νευρικής διέγερσης (Neural Activity Pattern - NAP) στην «έξοδο» του κοχλίου, ως συνάρτηση αυτής του προσλαμβανόμενου ακουστικού σήματος (σήματος «εισόδου»), είναι παρεμφερής και βασίζεται σε μια κοχλιοτοπική αναπαράσταση των περιοδικοτήτων που συνιστούν τη διέγερση αυτή [13].

1.1 Προβληματική

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη διερεύνηση της συμπεριφοράς υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας με έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αυτά επεξεργάζονται χαρακτηριστικά του φυσικού σήματος που σχετίζονται με την αντίληψη της χροιάς μουσικών ήχων. Ειδικότερα, διερευνάται η υπόθεση εάν τα σχήματα των νευρικών διεγέρσεων που παράγονται ως αποτέλεσμα της πρόσληψης μιας ακολουθίας ήχων μεταξύ δύο διακριτών κατηγοριών χροιάς (καθαρού ήχου πλάγιου φλάουτου σε αντιδιαστολή με ενθόρυβο), οι οποίοι κατασκευάζονται μεταβάλλοντας την αναλογία των κυρίαρχων τονικών προς τις υπόλοιπες μη-τονικές συνιστώσες του φάσματος κατά «ισόποσα» βήματα, παρέχουν ενδείξεις χαρακτηριστικών κατηγορικής διάκρισης κατά τα πρωτογενή (προκατηγορικά) στάδια ακουστικής επεξεργασίας.

1.2 Μέθοδος

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των παραμέτρων του φυσικού σήματος που επιδρούν στην αντίληψη της χροιάς και ειδικότερα αυτών που αφορούν την ατάκα του ήχου (attack), τα σήματα που χρησιμοποιούνται συντίθενται με βάση τη σύσταση του φάσματος του σταθερού τμήματος (steady state) του ήχου του

οργάνου. Η επιλογή του συγκεκριμένου οργάνου οφείλεται καταρχήν στην ιδιότητα της οικογένειας αυτής των οργάνων να παρουσιάζουν φασματική περιβάλλουσα με σαφείς και διακριτές κορυφώσεις, χωρίς σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια του σταθερού τμήματος (steady state) του ήχου, ενώ επιπρόσθετα, ο ιδιαίτερος ηχοχρωματικός χαρακτήρας του οργάνου οφείλεται κατά κύριο λόγο στο σήμα διέγερσης, δηλαδή στον θόρυβο που προκαλείται από την εμφύσηση στο επιστόμιο του [2]. Επίσης, λαμβάνεται πρόνοια ώστε η ακολουθία των ηχητικών διεγέρσεων να είναι κανονικοποιημένη ως προς το τονικό ύψος, την ακουστότητα και τη χρονική διάρκεια, δηλαδή τα σήματα της ακολουθίας ηχητικών διεγέρσεων διατηρούν αναλλοίωτα τα χαρακτηριστικά αυτά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των μεταβλητών αυτών στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η δημιουργία της ακολουθίας των ηχητικών σημάτων, που χρησιμοποιούνται στην πειραματική διαδικασία, βασίζεται σε έναν πρωτότυπο ήχο μιας νότας φλάουτου (A5-880Hz), που παράγεται συνθετικά με συχνότητα δειγματοληψίας 44100Hz και από τον οποίο αποκόπτεται ένα σταθερό τμήμα διάρκειας 100ms. Η συστηματική μεταβολή της αναλογίας των κυρίαρχων τονικών προς τις υπόλοιπες μη-τονικές συνιστώσες του φάσματος του πρωτοτύπου κατά «ισόποσα» βήματα και η παραγωγή των υπόλοιπων μελών της ακολουθίας επιτυγχάνεται ως εξής:

Ορίζουμε ένα νέο σήμα $n(t)$ που προκύπτει από το πρωτότυπο σήμα $f(t)$ αποκόπτοντας από το φάσμα του $f(t)$ πολύ στενές ζώνες εύρους BW_i , $i = 1KN$ γύρω από τα διακριτά μέγιστα της φασματικής περιβάλλουσας. Όπου N ο αριθμός των διακριτών αυτών ζωνών. Το σήμα $n(t)$ επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί την μη τονική συνιστώσα του σήματος, ή αλλιώς «θόρυβο».

Παράλληλα, ορίζουμε ένα σήμα $sf(t) = f(t) - n(t)$, που περιλαμβάνει όλες τις πολύ στενές φασματικές ζώνες γύρω από τα διακριτά μέγιστα της φασματικής περιβάλλουσας του $f(t)$. Το σήμα $sf(t)$ έχει σχεδόν τονικό χαρακτήρα και θα αναφέρεται ως τονική συνιστώσα του $f(t)$.

Ισχύει δηλαδή,

$$n(t) = IFFT[F(w) \cdot W(w)],$$

όπου

$$W(w) = \begin{cases} 0 & w_i - \frac{BW_i}{2} \leq w \leq w_i + \frac{BW_i}{2}, \text{ και } w_i, i = 1KN \text{ είναι οι διακριτές} \\ 1 & \text{αλλού} \end{cases}$$

κορυφές της φασματικής περιβάλλουσας του $f(t)$, BW_i το εύρος της κάθε φασματικής ζώνης (~50Hz) και $F(w)$ το φάσμα του $f(t)$.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια νέα οικογένεια σημάτων $x_m(t) : x(t) = a \cdot sf(t) + b \cdot n(t)$, $a, b > 0$ διάρκειας 100 msec, από την οποία προκύπτουν τα μέλη της ακολουθίας μεταβάλλοντας συστηματικά και με σταθερό βήμα - π.χ. 2.5% της μέγιστης - τα a και b κατά τέτοιο τρόπο, ώστε στα σήματα x_m οι μέσες τιμές της ισχύος των τονικών στοιχείων και του θορύβου να «αλληλοσυμπληρώνονται». Για παράδειγμα:

$$\begin{aligned} \{x_{60}(t) : 60\% \max(P_{\text{tonal}}) \& 40\% \max(P_{\text{noise}})\}, \\ \{x_{50}(t) : 50\% \max(P_{\text{tonal}}) \& 50\% \max(P_{\text{noise}})\}, \\ \{x_{40}(t) : 40\% \max(P_{\text{tonal}}) \& 60\% \max(P_{\text{noise}})\} \text{ κ.ο.κ.} \end{aligned}$$

Όπως επισημάνθηκε και προηγούμενα, τα σήματα διατηρούνται σταθερά ως προς το τονικό τους ύψος (A5-880Hz), ενώ οι τιμές $\max(P_{\text{tonal}})$ και $\max(P_{\text{noise}})$ επιλέγονται κατάλληλα, ώστε να διατηρείται σταθερή η μέση ισχύς φίλτρου A των σημάτων $sf(t)$ και $n(t)$, η οποία υιοθετείται ως δείκτης της ακουστότητάς τους.

Για την απεικόνιση των μορφών της νευρικής διέγερσης καθενός από τα παραπάνω σήματα υιοθετήθηκε η χρήση του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης της περιφερικής ακουστικής λειτουργίας των Patterson, Allerhand και Giguere [10], [11], το οποίο αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

1. Μοντέλο εξωτερικού και μέσου αυτιού.
2. Τράπεζα gamma tone φίλτρων της βασικής μεμβράνης του κοχλίου.
3. Μοντέλο λειτουργίας των εσωτερικών τριχωτών κυττάρων (Inner Hair Cells – IHC).

Το μοντέλο αυτό παρέχει εκτιμήσεις της νευρικής δραστηριότητας (Neural Activity Pattern, NAP) στις ίνες του ακουστικού νεύρου που συνάπτονται στα αντίστοιχα εσωτερικά τριχωτά κύτταρα, δηλαδή υπολογίζει τη συνάρτηση $NAP(f, t)$ για κάθε ένα ηχητικό σήμα $x_m(t)$, όπου f η χαρακτηριστική συχνότητα του αντίστοιχου gamma-tone φίλτρου της βασικής μεμβράνης. Η τράπεζα φίλτρων χρησιμοποιεί 68 φίλτρα στην περιοχή 100Hz - 12kHz, καταναμεμένα ομοιόμορφα στην κλίμακα ERB¹.

Η μέση Ευκλείδεια απόσταση d μεταξύ δύο απεικονίσεων $NAP_m(f, t)$, ορίζεται ως:

$$d(i, j) = \frac{1}{N_f \cdot N_t} \sum_{f, t} |NAP_m(f, t) - NAP_j(f, t)|$$

όπου $N_f = 68$, $t = \frac{h}{44100}$, $h = \text{ακέραιος}$, και $N_t = 100 * 44100 * 0.001$.

Αντίστοιχα, ορίζουμε την $d_{f_k}(i, j)$ ως:

$$d_{f_k}(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_t |NAP_m(f_k, t) - NAP_j(f_k, t)|$$

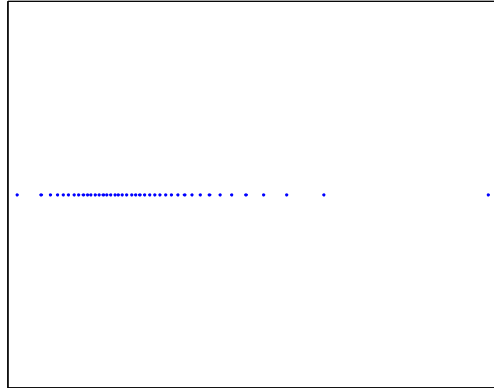
¹ ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth): Κλίμακα κατανομής ζωνοδιαβατών κοχλιακών φίλτρων, στην οποία αυτά αναπαριστώνται με το ισοδύναμο εύρος ζώνης τους (φασματικά αναπαριστώνται σαν ιδανικά ζωνοδιαβατά φίλτρα και όχι με κλίσεις του τύπου -12db/oct). Το εύρος ζώνης σχετίζεται με την κεντρική συχνότητα του φίλτρου με παρόμοιο τρόπο όπως στις κρίσιμες ζώνες (critical bands) [11].

1.3 Αποτελέσματα

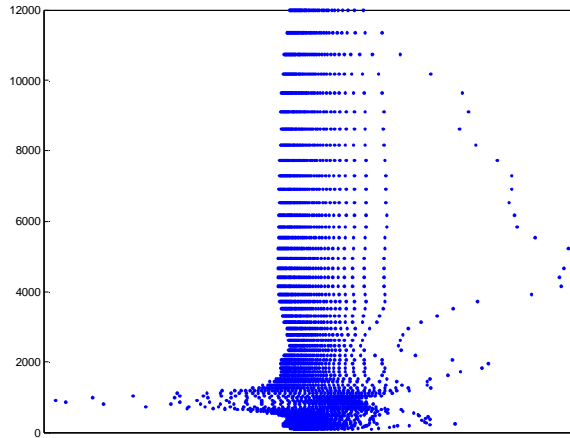
Εφαρμόζοντας την τεχνική *metric multidimensional scaling* στον πίνακα $D : \{d_{ij} = d(i, j)\}$ των αποστάσεων των $NAP_m(f, t)$, αποκτούμε μια εκτίμηση της τοπολογικής κατανομής των σημείων που αντιστοιχούν στα $NAP_m(f, t)$ για $m = [0L100]$. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η τοπολογική αυτή κατανομή, που όπως αποδεικνύεται μπορεί να είναι μονοδιάστατη.

Αντίστοιχα, από τους πίνακες $D_{f_k} : \{d_{ij} = d_{f_k}(i, j)\}$, προκύπτουν οι μονοδιάστατες απεικονίσεις του Σχήματος 2.

Από την εξέταση των δύο σχημάτων προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις, εμφανίζεται μια τάση συγκέντρωσης των αναπαραστάσεων (μείωση της διακριτότητας) στο άκρο που αντιστοιχεί στην συνιστώσα θορύβου, ενώ αντίθετα εντοπίζεται αύξηση της διακριτότητας προς την περιοχή των τονικών συνιστωσών. Ο υπολογισμός των αποστάσεων d_{f_k} (Σχήμα 2) αναδεικνύει λεπτομερέστερα την ύπαρξη δύο αντικρουόμενων τάσεων οι οποίες εντοπίζονται σε δύο χαρακτηριστικές περιοχές του φάσματος: α) στην περιοχή της θεμέλιας συχνότητας (880 Hz) και β) στην περιοχή της μέγιστης ευαισθησίας της ακοής (4-5kHz), η οποία μάλιστα φαίνεται ότι καθορίζει την συνολική αύξηση της διακριτότητας προς την περιοχή των τονικών συνιστωσών (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Τοπολογική κατανομή των απεικονίσεων $NAP_m(f, t)$, για $m = [0L100]$



Σχήμα 2: Τοπολογική κατανομή των απεικονίσεων $NAP_m(f_k, t)$, για $m = [0L 100]$

2. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνηγορούν καταρχήν στην υποστήριξη της θέσης ότι, ακόμη και από τα περιφερικά στάδια επεξεργασίας αναδεικνύονται χαρακτηριστικά του ερεθίσματος που μεταφέρουν βιολογικά σημαντική πληροφορία (τονικά χαρακτηριστικά), ενώ έρχονται σε αντίθεση με το κλασικό ψυχοφυσικό μοντέλο κατηγορικής αντίληψης φυσικών ερεθισμών, σύμφωνα με το οποίο, οποιοδήποτε σύνολο τιμών που ανήκουν στο συνεχές πεδίο τιμών κάποιας φυσικής παραμέτρου, μετασχηματίζεται αρχικά σε αντίστοιχες καταστάσεις διέγερσης σε αισθητηριακό επίπεδο με απόλυτα αναλογικό τρόπο [9]. Στην περίπτωση μας, παρά το γεγονός ότι η παράμετρος μεταβάλλεται ομοιόμορφα και γραμμικά, εντούτοις η μορφή των απεικονίσεων της νευρικής διέγερσης στην είσοδο του ακουστικού νεύρου παρουσιάζει μη-γραμμική διαφοροποίηση με στοιχεία “συρρίκνωσης” προς το ένα άκρο της κλίμακας μεταβολής.

Βέβαια, λαμβάνοντας υπόψη ότι «η αντίθεση ανάμεσα στην αντιληπτική σταθερότητα που εμφανίζουν οι αναπαραστάσεις τύπου NAP, σε σχέση με τις λεπτές αποχρώσεις της χροιάς που τελικά αντιλαμβανόμαστε» [11], μας βρίσκουν σχετικά επιφυλακτικούς στο να συσχετίσουμε άμεσα τις «αποστάσεις» που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου, με ανάλογες που θα προέκυπταν από αντίστοιχη μελέτη του φαινομένου σε πραγματικές συνθήκες ακρόασης. Προς την κατεύθυνση αυτή στοχεύει μια υπό εξέλιξη μελέτη μας, με εφαρμογή ακουστικών δοκιμασιών διακριτότητας σε ακροατές και χρήση προσαρμοστικών μεθόδων για τον εντοπισμό ψυχοφυσικών ορίων.

3. Αναφορές

- [1]. de Cheveigne Alain, *Time-domain auditory processing of speech*, Journal of Phonetics, 2003, 31, 547-561.
- [2]. Fletcher Neville, Rossing Thomas, *The physics of musical instruments*, 1998, Springer Verlag.
- [3]. Greenberg, Steven, *Auditory function*, Στο: Crocker, Malcolm (ed.) "Encyclopedia of Acoustics", 1997, New York: John Wiley & Sons, 1301-1323.
- [4]. Hajda, John et al., *Methodological issues in timbre research*, Στο: Deliege, Irene & Sloboda, John (eds.) "Perception and Cognition of Music", 1997, Hove, UK: Psychology Press, 253-306.
- [5]. Harnad, Stevan, *Categorical Perception: The Groundwork of Cognition*, 1987, Cambridge: Cambridge University Press.
- [6]. Herrera – Boyer Perfecto, Peeters Geoffrey & Dubnov Shlomo, *Automatic Classification of Musical Instrument Sounds*, Journal of New Music Research, 2003, 32, 3-21.
- [7]. Kuhl, Patricia, *Human adults and human infants show a perceptual magnet effect for the prototypes of speech categories, monkeys do not*, Perception & Psychophysics, 1991, 50, 93-107.
- [8]. McAdams S., Beauchamp J., Meneguzzi S., *Discrimination of musical instrument sounds resynthesized with simplified spectrotemporal parameters*, Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105, 882-897.
- [9]. Pastore Richard, *Categorical perception: Some psychophysical models*. Στο: Harnad Stevan. (ed.) "Categorical Perception: The Groundwork of Cognition", 1987, Cambridge: Cambridge University Press, 29-52.
- [10]. Patterson Roy, Allerhand Mike, Giguere Christian, *Time-domain modeling of peripheral auditory processing: A modular architecture and a software platform*, Journal of the Acoustical Society of America, 98, 1995, 1890-1894.
- [11]. Patterson Roy, *Auditory images: How complex sounds are represented in the auditory system*, Journal of the Acoustical Society of Japan, 2000, 21, 183-190.
- [12]. Sussman Joan & Lauckner-Morano Valerie, *Further tests of the perceptual magnet effect in the perception of [i]: Identification and change/no-change discrimination*, Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97, 539-552.
- [13]. Todd McAngus, O'Boyle Donald & Lee Christopher, *A sensory-motor theory of rhythm, time perception and beat induction*, Journal of New Music Research, 1999, 28, 5-28.

Ευφυή υπολογιστικά συστήματα ηχοδιάδρασης για την καλλιέργεια μουσικών ρυθμικών δεξιοτήτων

Γεώργιος Παπαδέλης
Λέκτορας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.
54124 Πανεπιστημιούπολη
Θεσσαλονίκη
e-mail: papadeli@mus.auth.gr

Αιμίλιος Καμπουρόπουλος
Λέκτορας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.
54124 Πανεπιστημιούπολη
Θεσσαλονίκη
e-mail: emilios@mus.auth.gr

Κων/νος Παστιάδης
Δρ. Ηλ/γος Μηχ/κός Α.Π.Θ.
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών &
Μηχ/κών Υπολογιστών Α.Π.Θ.
54006 Θεσσαλονίκη
e-mail: pastiadi@auth.gr

Ιωάννης Ταρνανάς
Υπ. Δρ. Ψυχολογίας
Τμήμα Ψυχολογίας Α.Π.Θ.
54006 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη ρυθμικών διεργασιών στα πλαίσια ηχητικών/μουσικών φαινομένων και ειδικότερα στο πρόβλημα της ανάπτυξης υπολογιστικών μοντέλων αναγνώρισης του ρυθμού που να προσομοιώνουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης αντίληψης και συμπεριφοράς. Εξετάζεται η διεύρυνση και ο επαναπροσδιορισμός υφιστάμενων μοντέλων, ώστε αυτά να ανταποκρίνονται με επιτυχία στην επεξεργασία και ασύμμετρων ρυθμών. Η εργασία κατευθύνεται προς τον συνδυασμό δεδομένων από πειραματικές διαδικασίες αντίληψης του ρυθμού, με δεδομένα από την εφαρμογή των αντίστοιχων αναθεωρημένων μοντέλων. Τέλος, εξετάζονται οι δυνατότητες ενσωμάτωσης και προσαρμογής των συστημάτων αναγνώρισης ρυθμού σε διαδραστικά περιβάλλοντα ηχοκίνησης, με απώτερο στόχο την ανάπτυξη πρότυπων «εκπαιδευτικών εργαλείων» για την καλλιέργεια μουσικών ρυθμικών δεξιοτήτων.

ABSTRACT

The paper aims towards the study of rhythmic processes of musical/auditory phenomena. We focus on the development of computational models of rhythm recognition, capable of simulating human intelligence and attitudes. The improvement of existing models towards the processing of asymmetric rhythm patterns is investigated. The study exploits both experimental data on rhythm perception and revised computation models. Finally, the discussion is focused on the way, by which research results are to be embedded into an interactively functioning environment for the development of prototype educational tools of musical rhythmic skills' culture.

Εισαγωγή

Η ρυθμική εναλλαγή συμβάντων, είτε σε ισόχρονα είτε σε ανισόχρονα διαστήματα, αποτελεί χαρακτηριστικό πολλών φυσικών και βιολογικών φαινομένων. Η ιδέα της χρονικής διαδοχής συμβάντων, η οποία μάλιστα συσχετίζεται με διαδοχές που παρουσιάζουν συγκεκριμένες μορφές οργάνωσης, συνιστά το θεωρητικό υπόβαθρο για τον προσδιορισμό των εννοιών της αντίληψης του ρυθμού και του χρόνου στη σύγχρονη Ψυχολογία: «Ο όρος αντίληψη του χρόνου αποτελεί στην ουσία μια γενική έκφραση, η οποία έχει την έννοια ενός συνδυασμού της αντίληψης της διαδοχής με αυτήν της διάρκειας» [10]. Πληθώρα από ερευνητικές εργασίες έχουν καταδείξει επίσης, ότι η καλλιέργεια της ρυθμικής αντίληψης και της ανάπτυξης ρυθμικών δεξιοτήτων από τα πρώτα κιόλας βήματα της ζωής του ανθρώπου, συμβάλλει στη γενικότερη γνωστική ανάπτυξη του ατόμου, καθώς και στην επικοινωνία και το συγχρονισμό των ενεργειών του κατά την αλληλεπίδραση του με το εξωτερικό περιβάλλον.

Από την προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα στο χώρο αυτό έχει προκύψει ότι η αδυναμία αξιόπιστης ανταπόκρισης των υφιστάμενων μοντέλων στην κατηγοριοποίηση ασύμμετρων ρυθμών, παρέχει σοβαρές ενδείξεις για την ανάγκη μιας συνολικής αναθεώρησης των καθιερωμένων θεωριών αντίληψης του μουσικού ρυθμού.

Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται η παρούσα ερευνητική προσπάθεια, συνδυάζοντας δεδομένα από πειραματικές διαδικασίες αντίληψης του ρυθμού, με δεδομένα από την εφαρμογή των αντίστοιχων αναθεωρημένων μοντέλων. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αναγνώρισης ρυθμικών μορφών που εντάσσονται σε ένα ευρύ πεδίο μουσικών ειδών. Επίσης, εξετάζεται η ενσωμάτωση και προσαρμογή του σε διαδραστικό περιβάλλον ηχοκίνησης με στόχο την ανάπτυξη πρότυπων «εκπαιδευτικών εργαλείων» για την καλλιέργεια μουσικών ρυθμικών δεξιοτήτων.

1. Υπολογιστικά μοντέλα και πειραματική διερεύνηση για την αντίληψη του ρυθμού

Η μουσική, λόγω της φύσης της, αποτελεί ιδανικό πεδίο για την μελέτη της αντίληψης ρυθμικών φαινομένων. Τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα της αντίληψης του μουσικού ρυθμού έχει συγκεντρώσει το ιδιαίτερο ενδιαφέρον ερευνητών, τόσο από το χώρο της Γνωστικής Ψυχολογίας, όσο και από το χώρο της Πληροφορικής και της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Η ανάπτυξη του διεπιστημονικού αυτού χώρου συνετέλεσε καθοριστικά στη διαμόρφωση μιας νέας φιλοσοφίας για την προσέγγιση ζητημάτων της Μουσικής Θεωρίας, «στοχεύοντας προς μια θεωρία της μουσικής η οποία να αποτελεί μια τυπική περιγραφή της μουσικής αντίληψης ενός πεπειραμένου σε κάποιο μουσικό ιδίωμα ακροατή» [14].

Μια θεμελιώδης έννοια που διαπερνά όλα τα σύγχρονα θεωρητικά μοντέλα ανάλυσης του μουσικού ρυθμού ([5], [27], [14]), είναι αυτή της *ρυθμικής διαστρωμάτωσης (rhythmic stratification)*, της αντίληψης δηλαδή διαφορετικών επιπέδων ρυθμικής οργάνωσης του μουσικού υλικού κατά την ακρόαση της μουσικής. Η συνδυαστική δράση των επιπέδων αυτών συντελεί στην αντίληψη ενός δεσπόζοντος «παλμού», σε ίσα χρονικά διαστήματα, που σηματοδοτεί χρονικά σημεία υψηλής σημαντικότητας. Παράλληλα, η εθνομουσικολογική έρευνα έχει δείξει ότι το στοιχείο της ισοχρονικότητας του δεσπόζοντος παλμού δεν αποτελεί καθολικό γνώρισμα των διαφόρων μουσικών πολιτισμών. Χαρακτηριστική

εξαίρεση μάλιστα αποτελούν οι ασύμμετροι ρυθμοί που απαντώνται στα μουσικά ιδιώματα του ελλαδικού χώρου, αλλά και πολλών άλλων, μη ευρωπαϊκών μουσικών παραδόσεων. Η παρούσα ερευνητική προσπάθεια έχει σκοπό την διεύρυνση ή και την ριζική αναθεώρηση βασικών παραδοχών σχετικά με την αντίληψη του μουσικού ρυθμού, συγκαταλέγοντας και τις περιπτώσεις αυτές, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζονται ως «περίεργες» εξαιρέσεις ή παραβλέπονται.

Από την πλευρά της Υπολογιστικής Μουσικολογίας έχουν αναπτυχθεί συστήματα με εφαρμογή διαφορετικών μοντέλων, τα οποία «αναδεικνύουν» τον δεσπόζοντα παλμό (και τη μετρική δομή γενικότερα) ενός μουσικού αποσπάσματος προσομοιώνοντας τον τρόπο με τον οποίο ένας άνθρωπος μπορεί να «χτυπήσει» το ρυθμό. Τα συστήματα αυτά δέχονται μουσικά δεδομένα συνήθως σε μορφή MIDI και σπανιότερα σε μορφή συνεχούς ηχητικού σήματος και επικεντρώνονται στην «ανακάλυψη» του μέτρου ή και της ρυθμικής αγωγής (meter and tempo induction). Μια επέκταση της εφαρμογής των συστημάτων αυτών αφορά τον συγχρονισμό μηχανικού παλμού και ανθρώπινης εκτέλεσης (beat tracking). Μερικά σύγχρονα μοντέλα αναγνώρισης ρυθμού περιγράφονται στα [22], [6], [13], [8], [9], [26].

Πειραματικά ευρήματα από την εφαρμογή πολυαισθητηριακών (multimodal) διαδραστικών (interactive) συστημάτων ηχοκίνησης, αναφέρουν μια σημαντική επίδραση της αντίληψης του ρυθμού στην βελτίωση της κινητικής, γνωστικής και κοινωνικής δεξιότητας των ατόμων με ειδικές ανάγκες [1], [25] και ειδικότερα δυσλειτουργίες της προσοχής [11]. Ακόμη, παρατηρείται μια αιτιολογική σχέση μεταξύ της εφαρμογής των παραπάνω περιβαλλόντων και γενικών ακαδημαϊκών επιδόσεων των μουσικών αλλά και του γενικού πληθυσμού στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση [23], καθώς και στην αντίληψη της μουσικής [12]. Σημαντική είναι επίσης και η χρήση τέτοιων πολυαισθητηριακών και διαδραστικών συστημάτων ηχοκίνησης, στη μουσική σύνθεση και εκτέλεση και στην διερεύνηση καινοτόμων συσχετίσεων αντιληπτικών σχημάτων και εργονομικά βέλτιστων, κινητικών ή ρυθμικών εκτελέσεων [15], [24].

Έτσι, γίνεται φανερό ότι μια τέτοια διεπιστημονική προσέγγιση προσβλέπει τόσο στην πειραματική διερεύνηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει η αντίληψη του ρυθμού, όσο και στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αντίστοιχων υπολογιστικών μοντέλων και νοημόνων συστημάτων για την προσομοίωση των σχετικών γνωστικών διεργασιών.

2. Ερευνητικοί στόχοι-μεθοδολογία

Οι στόχοι στους οποίους προσβλέπει το παρόν ερευνητικό σχέδιο μπορούν να προσδιοριστούν και να εξειδικευτούν σε τρεις κεντρικούς άξονες ως εξής:

- *Ανάπτυξη συστήματος ανάλυσης και συμβολικής αναπαράστασης ρυθμικών σχημάτων*

Ένα βασικό πρόβλημα στα υπάρχοντα μοντέλα αναγνώρισης ρυθμού είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τα τονικά ύψη ή οι εντάσεις των μουσικών φθόγγων, ενώ δίνεται βαρύτητα κυρίως στις «ατάκες» τους (δηλαδή τις χρονικές στιγμές έναρξης τους). Μια πληρέστερη προσέγγιση οφείλει να λαμβάνει υπόψη όλα αυτά τα στοιχεία τα οποία είναι σημαντικά για τον υπολογισμό του σχετικού τονισμού (δηλαδή τη σχετική «σημαντικότητα») των μουσικών φθόγγων/συγχορδιών.

Προς την κατεύθυνση αυτή, έχει ήδη προταθεί [4] μια μεθοδολογία με βάση την οποία υπολογίζεται αρχικά ο σχετικός τονισμός των μουσικών συμβάντων βάσει της θέσης τους στην δομή ομαδοποίησης μιας μελωδίας και κατόπιν επιλέγεται η

μετρική μήτρα (template) η οποία βελτιστοποιεί τη σύμπτωση μετρικά ισχυρών θέσεων της με τις σχετικά πιο τονισμένες νότες της παρτιτούρας. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται σε πολυφωνική μουσική (MIDI) η οποία έχει εκτελεστεί εκφραστικά από κάποιο μουσικό στα πλαίσια ενός real-time προγράμματος [2], ενώ οι Dixon και Cambouropoulos [7] υλοποιούν ένα υπολογιστικό σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (multiple-agent system) για τον καθορισμό του δεσπόζοντος παλμού σε πολυφωνική εκτέλεση MIDI, και καταδεικνύεται ότι η επίδοσή του βελτιώνεται σημαντικά όταν λαμβάνονται υπόψη ο σχετικός τονισμός των μουσικών φθόγγων και συγχορδιών. Τέλος, η πειραματική μελέτη [3] υποστηρίζει την σχετική ανεξαρτησία του γνωστικού μηχανισμού «μέτρησης» του χρόνου από τα καθαυτά μουσικά δεδομένα.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για αναγνώριση ρυθμού, τα οποία θα επεξεργάζονται δεδομένα είτε σε μορφή πολυφωνικών MIDI εκτελέσεων, είτε σε μορφή ηχητικών σημάτων. Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας μουσικών ηχητικών σημάτων δίνουν τη δυνατότητα απομόνωσης και διαχωρισμού των απότομων μεταβατικών διεγέρσεων (transients - π.χ. γλωττιδική διέγερση κατά την επεξεργασία της ανθρώπινης φωνής, ήχοι κρουστών σε εκτελέσεις οργανικών συνόλων, κ.ά.) από τις σχετικά στάσιμες συνιστώσες (stationary components) του ήχου έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν οι «ατάκες» (onset-detection) των στοιχειωδών ηχητικών συμβάντων και κατ' επέκταση να είναι δυνατή η αναπαράσταση του ηχητικού συνεχούς υπό τη μορφή μιας ακολουθίας διακριτών συμβάντων σε συμβολική μορφή.

Παράλληλα απαιτείται ο εντοπισμός των πιθανών και η επιλογή κατάλληλων δεικτών για τον υπολογισμό της αντιληπτής σχετικής δυναμικής των επιμέρους μουσικών συμβάντων (της «βαρύτητας» δηλαδή με την οποία κάθε επιμέρους ηχητικό συμβάν συμβάλλει στη διαμόρφωση της αντίληψης του ρυθμού).

Τέλος, έμφαση πρέπει να δοθεί στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που απαιτείται να έχουν, τόσο τα υπολογιστικά μοντέλα όσο και οι σχετικοί αλγόριθμοι, για την ανάλυση και αναπαράσταση ασύμμετρων μετρικών δομών οι οποίες ενσωματώνουν μορφολογικά χαρακτηριστικά μουσικών ιδιωμάτων του ελλαδικού χώρου ειδικότερα, αλλά και μη ευρωπαϊκών μουσικών παραδόσεων γενικότερα.

- *Πειραματική διερεύνηση χαρακτηριστικών της αντίληψης του μουσικού ρυθμού*

Η πειραματική διερεύνηση χαρακτηριστικών της αντίληψης του ρυθμού αποσκοπεί στον εμπλουτισμό υπαρχόντων πειραματικών δεδομένων από πρότερες εργασίες. Η υφιστάμενη γνώση στον τομέα αυτό περιλαμβάνει εργασίες όπου επιχειρείται ένας συγκερασμός πειραματικών ευρημάτων και θεωριών για την αντίληψη του μουσικού ρυθμού με αντίστοιχα από το χώρο της ψυχολογίας και ειδικότερα της κατηγορικής αντίληψης φωνημάτων. Τα ευρήματα αναδεικνύουν καταρχήν την ύπαρξη βασικών χαρακτηριστικών κατηγορικής αντίληψης: Η οξύτητα της αναγνώρισης «ισόποσων» μικροπαραλλαγών ενός ρυθμικού σχήματος ως μελών διαφορετικών κατηγοριών ρυθμών συσχετίζεται αρνητικά με το βαθμό της μεταξύ τους διακριτότητας [16]. Επίσης έχουν διερευνηθεί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής των κατηγοριών ρυθμών (ύπαρξη πρωτοτύπων, διαβάθμιση της τυπικότητας των μελών μέσα σε μια κατηγορία, οξύτητα οριοθέτησης των κατηγοριών, «ελαστικότητα» των ορίων) [17].

Η ερευνητική προσπάθεια στον τομέα αυτό πρέπει να εμπλουτιστεί με την αξιοποίηση τεχνικών επεξεργασίας φυσικών σημάτων με εγγενή ρυθμικό χαρακτήρα. Σημαντική ερευνητική δράση στον τομέα αυτό αφορά σε σήματα όπως

αυτά ορισμένων βασικών βιοακουστικών διαδικασιών (π.χ. φωνή, καρδιακή λειτουργία, γαστρεντερική δραστηριότητα, κ.ά.) [20], [19], [21]. Άλλωστε, έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία αυτών των φαινομένων στο ανθρώπινο σώμα συνδέεται τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά με την αντίληψη του επαναληπτικού χαρακτήρα φυσικών φαινομένων όπως ο ήχος. Παράλληλα, έχουν εξετασθεί και ζητήματα που άπτονται των προβλημάτων εντοπισμού [29] και διαχωρισμού των (ισόχρονων ή μη) ρυθμικών διεγέρσεων σε σύνθετα σήματα [30], [29], της περιγραφής ρυθμικών μοτίβων καθώς και της αναπαραστατικής απόδοσής τους με οπτική ή άλλες μορφές, για την αξιοποίηση δραστηριοτήτων ηχοκίνησης σε ευφυή περιβάλλοντα ανάπτυξης ρυθμικών δεξιοτήτων κ.ά. Επίσης, με εφαρμογή ψυχοακουστικών δοκιμασιών, έχει μελετηθεί ο παραλληλισμός ψυχοακουστικών φαινομένων με την αντίληψη και προσαρμογή σε ακουστικά ερεθίσματα [18] και η εφαρμογή υπολογιστικών μοντέλων για την προτυποποίηση της ακουστικής επεξεργασίας, τόσο από αισθητηριακής όσο και από μηχανικής σκοπιάς [31].

Για την ολοκλήρωση του παραπάνω ερευνητικού πλαισίου, απαιτείται η εκτέλεση ψυχοακουστικών πειραμάτων, ιδιαίτερα με συμμετοχή μουσικών, τα οποία αποσκοπούν σε μια λεπτομερή χαρτογράφηση του «αντιληπτικού χώρου» που διαμορφώνεται ως αποτέλεσμα της αντίληψης διακριτών κατηγοριών ρυθμών κατά την ακρόαση μουσικών αποσπασμάτων, ρυθμικά συμμετρικών ή/και ασύμμετρων. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί σε ρυθμούς μουσικών ιδιωμάτων του ελλαδικού χώρου (συμμετρικούς και ασύμμετρους), έτσι ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση των εξαγόμενων από αυτή πειραματικών αποτελεσμάτων, με τα αντίστοιχα των υπολογιστικών μοντέλων-συστημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο συγκεκριμένος πειραματικός σχεδιασμός στοχεύει στη διερεύνηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών μέσα σε κάθε κατηγορία ρυθμών, με ιδιαίτερη έμφαση στην ποσοτικοποίηση της τυπικότητας των μελών κάθε κατηγορίας και των μεταξύ τους «αντιληπτών αποστάσεων».

• *Ανάπτυξη διαδραστικού υπολογιστικού περιβάλλοντος ηχοκίνησης για την καλλιέργεια μουσικών (ρυθμικών) δεξιοτήτων*

Η πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών της μουσικής αντίληψης με χρήση περιβαλλόντων ηχοκίνησης και ειδικότερα η συσχέτιση της αντίληψης του τονικού ύψους με την ανάπτυξη της κιναισθητικής ικανότητας, έχει αποτελέσει ήδη αντικείμενο ερευνητικής δραστηριότητας [28] και με τη συνεισφορά τεχνικών εικονικής πραγματικότητας [24], [25].

Η περαιτέρω εξέλιξη των παραπάνω προσεγγίσεων απαιτεί την προσαρμογή των περιβαλλόντων αυτών μέσω: α) τυποποίησης ενός «λεξιλογίου» εκφραστικών κινήσεων του χρήστη, β) ανάπτυξης εργαλείων για την ανάλυση των δεδομένων εισόδου στο σύστημα, δηλαδή λογισμικού για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση χαρακτηριστικών ανυσμάτων - feature vectors - της κίνησης ή/και του ήχου που παράγει ο χρήστης, γ) ενσωμάτωσης βελτιστοποιημένων αλγορίθμων για το μετασχηματισμό των δεδομένων εισόδου σε μουσική/ρυθμική πληροφορία, και δ) σχεδιασμού συστήματος ηχητικής ή/και οπτικής ανατροφοδότησης του χρήστη και ανάπτυξης λογισμικού για τη χωροθέτηση του παραγόμενου από το σύστημα ήχου.

Τα παραπάνω συμπληρώνονται με την ενσωμάτωση υπολογιστικών μοντέλων αναγνώρισης ρυθμού στο σύστημα αυτό με εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας σημάτων που διευκολύνουν την εκτίμηση ρυθμικών μεταβολών/αποκλίσεων μεγάλης ή μικρής κλίμακας και τον διαχωρισμό τους από άλλες παρεμφερείς ενεργειακές μεταβολές του σήματος, σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα

ανάπτυξη λογισμικού για τον εντοπισμό ρυθμικών σχημάτων και ποσοτικής περιγραφής των δομικών τους χαρακτηριστικών, με τη χρήση δεικτών συσχετιστικού χαρακτήρα στο πεδίο του χρόνου και αξιοποίηση ενεργειακών κριτηρίων και δυναμικού προγραμματισμού. Στόχος ενός τέτοιου συστήματος είναι ο εντοπισμός του βασικού παλμού της ρυθμικής/κινητικής δραστηριότητας του χρήστη, η παρακολούθηση των μικρομεταβολών της και ο συγχρονισμός με το παραγόμενο από το σύστημα ηχητικό/μουσικό υλικό.

Με την ολοκλήρωση ενός τέτοιου υπολογιστικού σχήματος καθίσταται δυνατή η δημιουργία πρότυπου εκπαιδευτικού λογισμικού για την καλλιέργεια μουσικών/ρυθμικών δεξιοτήτων με έμφαση στην εκμάθηση σύνθετων ή ασύμμετρων ρυθμών.

3. Συνολική εκτίμηση-συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή γίνεται καταρχήν επισκόπηση των κυριότερων μέχρι σήμερα εξελίξεων στον τομέα της αντίληψης/εκτίμησης ρυθμικών σχημάτων και αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση των αδυναμιών που παρουσιάζουν τα υπάρχοντα υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης γνωστικών διεργασιών που σχετίζονται με την αντίληψη ασύμμετρων ρυθμών. Στη συνέχεια, η συζήτηση επικεντρώθηκε προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης περιβαλλόντων ηχοκίνησης, με αξιοποίηση αποτελεσμάτων της ψυχοακουστικής έρευνας, υπολογιστικών μοντέλων, και εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας σημάτων. Απώτερος στόχος της υπό εξέλιξης ερευνητικής μας δραστηριότητας είναι η ανάπτυξη περιβάλλοντος για την καλλιέργεια ρυθμικών μουσικών δεξιοτήτων και η εξειδίκευσή του, τόσο σε συμμετρικά όσο και ασύμμετρα ρυθμικά σχήματα.

Η πρωτότυπη επέκταση γνωστικών και υπολογιστικών μοντέλων (στο πεδίο των ασύμμετρων ρυθμών της τοπικής μουσικής παράδοσης) αποτελεί σημαντική απαίτηση. Η ενσωμάτωση υπολογιστικών μοντέλων αναγνώρισης ρυθμού σε ηχοδιαδραστικά περιβάλλοντα καταδεικνύεται ως βάση τόσο για την ανάπτυξη νέων εκπαιδευτικών εργαλείων, αλλά και για την περαιτέρω κατανόηση των ρυθμικών διεργασιών μέσα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα μουσικής δράσης/διάδρασης, με εξειδίκευση σε νέα εκπαιδευτικά εργαλεία/περιβάλλοντα προσαρμοσμένα στις ιδιαιτερότητες των μουσικών παραδόσεων του ελλαδικού χώρου.

Επιπλέον, είναι δυνατή η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σε ζητήματα αλληλεπίδρασης βασικών δεξιοτήτων μουσικής αντίληψης με ανωτέρου επιπέδου γνωστικές λειτουργίες και η σύνδεση με γενικότερα χαρακτηριστικά της γνωστικής ανάπτυξης του ατόμου (π.χ. ζητήματα που σχετίζονται με την καλλιτεχνική έκφραση, μουσικοθεραπεία, βοηθητική τεχνολογία και αποθεραπεία ατόμων με νοητικές και κινητικές δυσλειτουργίες).

4. Αναφορές

- [1]. Barkley, R. A. (1997), *Attention-deficit/hyperactivity disorder, self-regulation, and time: toward a more comprehensive theory*, Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics, 18(4): 271-9.
- [2]. Cambouropoulos E. (2000), *From MIDI to Traditional Musical Notation*, In Proceedings of the AAAI Workshop on Artificial Intelligence and Music: Towards Formal Models for Composition, Performance and Analysis, Austin, Texas.
- [3]. Cambouropoulos, E., Dixon, S., Goebel, W. and Widmer, G. (2001), *Human Preferences of Tempo Smoothness*, Proceedings of the VII International Symposium

- on Systematic and Comparative Musicology and III International Conference on Cognitive Musicology, Jyväskylä, Finland.
- [4]. Cambouropoulos, E. (1997), *Musical Rhythm: Inferring Accentuation and Metrical Structure from Grouping Structure*, In Music, Gestalt and Computing. In Leman, M. (ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- [5]. Cooper, G.W. and Meyer, L.B. (1960), *The Rhythmic Structure of Music*, University of Chicago Press, Chicago
- [6]. Desain, P. and Honing H. (1992), *Music, Mind and Machine*, Thesis Publishers, Amsterdam.
- [7]. Dixon S. and Cambouropoulos E. (2000), *Beat Tracking with Musical Knowledge*, In Proceedings of EGA 12000 (14th European Conference on Artificial Intelligence), W.Horn (ed.), IOS Press, Amsterdam.
- [8]. Dixon, S. (2001), *Automatic Extraction of Tempo and Beat from Expressive Performances*, Journal of New Music Research, 30(1).
- [9]. Eck, Douglas (2002), *Finding downbeats with a relaxation oscillator*, Psychological Research, 66(1): 18-25
- [10]. Fraisse, P. (1978), *Time and Rhythm Perception*, In Handbook of Perception. Vol.8: Perceptual Coding. E.G. Carterette and M.P.Friedman (eds.). Academic Press, New York.
- [11]. Kadesjo, B. and Gillberg, I. C. (1998), *Attention deficits and clumsiness in Swedish 7-year-old children*, Developmental Medicine and Child Neurology, 40(12): 796-804
- [12]. Kuhlman, K. and Schweinhart, L.J. (1999), *Timing in child development*, Ypsilanti, MI: High/Scope Educational Research Foundation. In press.
- [13]. Large, E.W. and Jones M.R. (1999), *The Dynamics of Attending: How people Track Time-Varying Events*. Psychological Review, 106(1): 119-159.
- [14]. Lerdahl, F. and Jackendoff, R. (1983), *A Generative Theory of Tonal Music*, The MIT Press, Cambridge (Ma).
- [15]. Libkuman, T. and Otani, H., (1999), *Training in Timing Improves Accuracy in Golf*, Unpublished manuscript, Central Michigan University, Mt. Pleasant, Michigan.
- [16]. Papadelis, G. and Papanikolaou, G. (1999a), *Effect of timing variations on the categorical perception of musical rhythm patterns*, In: Collected Papers from the Joint Meeting "Berlin 99" (137th regular meeting of the Acoustical Society of America and the 2nd convention of the European Acoustics Association: Forum Acusticum). Berlin: Deutsche Gesellschaft fur Akustik.
- [17]. Papadelis, G. and Papanikolaou, G. (1999b), *Mapping the Perceptual Space Between and Within Musical Rhythm Categories*, Presentation at the First European Conference on Research Relevant to the Work of Music Academies and Conservatories. Lucerne: European Society for the Cognitive Sciences of Music.
- [18]. Pasiadis, C. and Papanikolaou, G. (1994), *An Object Oriented Programming Approach to Tonal Audiometry*, 97th AES Convention Preprints
- [19]. Pasiadis, C. and Papanikolaou, G. (1998), *Higher-order statistics based inverse filtering for analysis of esophageal voice production*, 104th Audio Engineering Society Convention, May 16-19, Amsterdam
- [20]. Pasiadis, C. and Papanikolaou, G. (1999), *A preliminary study on Greek esophageal speech and a method for quality and intelligibility enhancement*, Archives of Acoustics, 24, 1, 25-38
- [21]. Pasiadis, C. and Papanikolaou, G., and Dimoulas, Ch, and Kalampakas, Ath. (1998), *Intestinal motility recording and analysis*. MEDICON98, JUNE 1998,

Nicosia, Cyprus.

- [22]. Rosenthal, D. (1992), *Emulation of Human Rhythm Perception*, Computer Music Journal, 16(10):64-76.
- [23]. Stemmer, P.M. (1996), *Improving student motor integration by use of an interactive metronome*, Study paper presented at the 1996 Annual Meeting of the American Educational Association, Chicago, IL, Madonna University, Livonia, Michigan.
- [24]. Tarnanas, I. (2003), *Sound-Kinetic Physiotherapy ergonomic training for IDCs*, In International Ergonomics Association Proceedings, published by Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [25]. Tarnanas, I. and Adam, D. (2003), *Sonic Intelligence as Virtual Therapeutic Environment*. In Cyber Psychology & Behavior, special issue 6(4). (indexed in Medline).
- [26]. Toiviainen, P. and Snyder, J. (2003), *Tapping to Bach: Resonance-based Modeling of Pulse*, Music Perception 21(1):43-80.
- [27]. Yeston, M. (1976), *The Stratification of Musical Rhythm*, Yale University Press, New Haven.
- [28]. Δασκόπουλος, Δ., Ταρνανάς, Ι., Τζεδάκη, Κ., Αδάμ, Δ., Ρικάκης, Θ., & Καργόπουλος, Φ. (2000), *Διαδραστικά περιβάλλοντα και η σχέση κίνησης και οργανωμένων ήχων. Άσκηση της κιναισθητικής ικανότητας μέσα σε ηχοδιαδραστικό περιβάλλον*, 2^ο Συμπόσιο Μουσικής Πληροφορικής - Σχέσεις Μουσικής, Επιστήμης και Τεχνολογίας, Κέρκυρα: Τμήμα Μουσικών Σπουδών Ιονίου Πανεπιστημίου.
- [29]. Παστιάδης, Κ. (2002), *Σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης φωνής ατόμων με προβλήματα ομιλίας*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών Α.Π.Θ.
- [30]. Παστιάδης, Κ. και Παπανικολάου, Γ. (2002), *Μια νέα μέθοδος αποθορυβοποίησης του Γλωττιδικού Κυματιδίου με χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Συνημιτόνου*, 1ο Συνέδριο Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής, Πάτρα.
- [31]. Παστιάδης, Κ., Παπανικολάου, Γ. και Μπλιάτσιου, Χ. (1996), *Επεξεργασία ακουστικών σημάτων με χρήση Ψυχοακουστικών μεθόδων και κριτηρίων*, Συνέδριο ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ, «Τεχνολογία και Αυτοματισμός», Πειραιάς.

Ανάπτυξη εφαρμογής για διεξαγωγή προληπτικής ακουομετρικής εξέτασης από απόσταση

Δημούλας Χαράλαμπος, Διπλ. Ηλ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ, babis@eng.auth.gr
Καρδαράς Χαράλαμπος, Διπλ. Ηλ. Μηχ., ckardara@hotmail.com
Καλλίρης Γεώργιος, Δρ Ηλ. Μηχ., Λέκτορας ΑΠΘ, gkal@jour.auth.gr
Αβδελίδης Κων/νος, Διπλ. Ηλ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ, avdel@auth.gr
Παπανικολάου Γεώργιος, Δρ Ηλ. Μηχ., Αν. Καθ. ΑΠΘ, pap@eng.auth.gr

Εργαστήριο Ηλεκτροακουστικής & Τηλεοπτικών Συστημάτων,
Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΑΠΘ,
Πανεπιστημιούπολη, 54124, Θεσσαλονίκη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης και εύκολης στο χειρισμό ακουομετρικής εφαρμογής για προληπτική εξέταση από απόσταση. Στατιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι πολλά άτομα των σύγχρονων πόλεων έχουν προβλήματα ακοής από πολύ μικρή ηλικία. Η ελλιπής πληροφόρηση σχετικά με τις συνέπειες του αστικού θορύβου, σε συνδυασμό με τον σχετικά περιορισμένο αριθμό σύγχρονων εργαστηρίων ακουομετρικής εξέτασης (ιδιαίτερα στην Ελλάδα), καθιστούν τη διαδικασία προληπτικής εξέτασης της ακοής προβληματική. Η προτεινόμενη εφαρμογή επιχειρεί να δώσει απαντήσεις σε τέτοιου είδους προβλήματα, μέσα από ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον διεξαγωγής ακουομετρικών εξετάσεων από απόσταση. Πρόκειται για μια διαδικτυακή εφαρμογή εξυπηρετητή – πελάτη, αποτελούμενη από γραφικά, φιλικά προς το χρήστη, περιβάλλοντα. Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής περιγράφονται τα στάδια ανάπτυξης της εφαρμογής, αναλύεται η λειτουργικότητα της μεθόδου και παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή πιλοτικών πειραματικών διαδικασιών.

ABSTRACT

This paper focuses on the development of a reliable, user-friendly application, to carry out acouometry examination for prophylaxis. Statistics have shown that a lot of people in rural areas suffer from hearing difficulties, even in the very young ages. The lack of knowledge in combination with the absence of fully equipped acouometric laboratories (especially in Greece), make the prophylaxis of hearing examinations quite difficult. The proposed application aims to solve these kinds of problems, via an integrated environment for “distance – acouometry”. It is an Internet based client – server application with graphical, user-friendly environment. Development steps and operational issues of the implemented method are described in detail, while first results of a pilot experimental procedure are presented.

Εισαγωγή

Ένα από τα ζητήματα, που έχει πάρει ανησυχητικές διαστάσεις στη χώρα μας, είναι η συνεχής έκθεση σε υψηλές στάθμες θορύβου. Πολλές ψυχικές και παθολογικές ασθένειες συνδέονται με την έκθεση σε μεγάλες ηχητικές στάθμες ή για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Ανάμεσα σ' αυτές, περισσότερο από όλες έχει μελετηθεί η σταδιακή εξασθένηση της ακοής, η οποία και χαρακτηρίζεται ως η σημαντικότερη επίδραση του θορύβου στον άνθρωπο [1, 2, 8].

Ερευνητικές μελέτες [1] έχουν αποδείξει ότι ένα μεγάλο κομμάτι του ανθρώπινου πληθυσμού παρουσιάζει προβλήματα ακοής. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα μεγάλα αστικά κέντρα, ενώ ιδιαίτερα ανησυχητικό είναι το γεγονός ότι τα ποσοστά παραμένουν υψηλά και στις μικρές ηλικίες. Πολλά άτομα συχνά αγνοούν ότι έχουν πρόβλημα ακοής, ενώ ελάχιστοι ενδιαφέρονται να πραγματοποιήσουν προληπτικές εξετάσεις στα διάφορα ιατρικά εργαστήρια παρακολούθησης. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αντιμετωπίσει τα παραπάνω προβλήματα προτείνοντας ένα ευέλικτο σύστημα προληπτικού ελέγχου της ακοής, μέσα από ένα δικτυοκεντρικό περιβάλλον ακουομετρίας από απόσταση.

1. Ανθρώπινη ακοή και ακουομετρική διάγνωση

Σε γενικές γραμμές η διαδικασία λήψης και ερμηνείας των ηχητικών ερεθισμάτων περιλαμβάνει τρία στάδια [2]: α) τη λήψη και ακουστική προσαρμογή των ηχητικών κυμάτων στο πτερύγιο του εξωτερικού αυτιού, β) τη μετατροπή των μεταβολών της ακουστικής πίεσης σε μηχανικές μετατοπίσεις στο τύμπανο, και γ) τη μηχανική σύζευξη του μέσου αυτιού προς το εσωτερικό, όπου οδηγούνται τα ακουστικά ερεθίσματα για κωδικοποίηση με τη μορφή νευρικών σημάτων. Είναι φανερό ότι οποιαδήποτε «βλάβη» στα όργανα κατά μήκος της «ακουστικής αλυσίδας» μεταφράζεται, σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό, σε δυσλειτουργία ή/και παθολογία της ακοής.

1.1 Μείωση της ικανότητας ακοής

Η μείωση της ακοής μπορεί να είναι απόρροια της επίδρασης ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα προβλήματα ακοής προέρχονται κυρίως από δυσλειτουργίες στο αισθητήριο ακουστικό όργανο (εξωτερικό, μέσο και εσωτερικό αυτί), ενώ σε πολύ μικρότερο βαθμό παρατηρούνται διαταραχές στην διαδρομή του ακουστικού νεύρου από τον κοχλία προς τον εγκέφαλο. Για το λόγο αυτό και η προσοχή των περισσότερων επιστημόνων στρέφεται προς την κατεύθυνση της προστασίας του αισθητήριου μηχανισμού της ακοής, δηλαδή του αυτιού. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι απώλειας της ακοής λόγω βλάβης του ακουστικού οργάνου. Ο πρώτος συσχετίζεται με το εξωτερικό και μέσο αυτί και προκαλείται συνήθως από διάτρηση ή μόλυνση του μέσου αυτιού και από φλεγμονές των οσταρίων (σφύρα, άκμονας, αναβολέας). Το αποτέλεσμα είναι να μη γίνεται σωστή μετάδοση των ερεθισμάτων στον κοχλία και το εσωτερικό αυτί. Οι απώλειες αυτού του είδους είναι δυνατόν να αποκατασταθούν με χειρουργική επέμβαση. Ο δεύτερος τύπος απώλειας προέρχεται από ζημιές στον κοχλία ή στις νευρικές δομές του εσωτερικού αυτιού. Γενετικά ελαττώματα, ωτοτοξικά φάρμακα, θόρυβος και τραυματισμοί μπορούν να προκαλέσουν αυτού του είδους απώλεια ακοής, περιπτώσεις που σε γενικές γραμμές δεν μπορούν να διορθωθούν ιατρικά. [2], [3], [4]

1.2 Επίδραση του θορύβου στην ακουστική ικανότητα

Η ηχοέκθεση αποτελεί, στις μέρες μας, έναν από τους κυριότερους παράγοντες εξασθένησης της ακουστικής ικανότητας (NIHL = noise induced hearing loss). Οι μηχανισμοί με τους οποίους είναι δυνατό να προκληθεί εξασθένηση της ακουστικής ικανότητας εξαιτίας του θορύβου είναι οι ακόλουθοι:

1. Έκθεση σε εξαιρετικά υψηλά ηχητικές στάθμες (πάνω από 120-130 dB), οι οποίες έστω και αν έχουν πολύ μικρή διάρκεια μπορούν να προκαλέσουν άμεσα τη μόνιμη απώλεια της ακοής (ακουστικό «τραύμα»).
2. Έκθεση σε λιγότερο υψηλές ηχητικές στάθμες αλλά για μεγάλες χρονικές περιόδους (μήνες ή και χρόνια) προκαλεί σταδιακή απώλεια της ακοής που ισοδυναμεί με μια παροδική μετατόπιση του κατωφλίου ακοής (temporary threshold shift = TTS).
3. Στην περίπτωση που η σταδιακή εξασθένηση TTS δεν αντιμετωπίζεται εγκαίρως, ή επαναλαμβάνεται διαρκώς μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη απώλεια της ακοής (permanent threshold shift = PTS) [1], [8]

Πρόκειται για τη θεωρία της ισοδύναμης ενέργειας (equal energy hypothesis) σύμφωνα με την οποία η μείωση της ακουστικής εξασθένησης καθορίζεται από τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του θορύβου, δηλαδή το γινόμενο στάθμης και διάρκειας, και είναι ανεξάρτητη από την κατανομή της ηχητικής στάθμης στο χρόνο. [1]

1.3 Ακουομετρική διάγνωση

Η ακουομετρία αποτελεί κλάδο της ακουολογίας που ασχολείται με τη μέτρηση και την αξιολόγηση των βαρηκοιών, συμβάλλοντας στον εντοπισμό, τη διάγνωση και την αντιμετώπιση της ωτολογικής αυτής πάθησης. Διακρίνουμε τις υποκειμενικές και αντικειμενικές ακουομετρικές μεθόδους. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη η αντίληψη του υποκειμένου κατά τη διαγνωστική διαδικασία ενώ στη δεύτερη όχι. Στις υποκειμενικές μεθόδους εντάσσονται η τονική ακουομετρία, η υπερουδική ακουομετρία και η ομιλητική ακουομετρία. Στις αντικειμενικές μεθόδους ανήκουν η ακουομετρία αντίστασης και η ηλεκτρονική ακουομετρία. [3], [4], [9]

1.4 Τονική ακουομετρία

Η τονική ή ουδική ακουομετρία, η οποία αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη της παρούσας εφαρμογής, ασχολείται με τον προσδιορισμό της ακουστότητας του ήχου, δηλαδή την ανεύρεση των κατωφλίων ακοής σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του ακουστικού φάσματος. Η διαδικασία διεξαγωγής της είναι σχετικά απλή: το αυτί διεγείρεται από τόνους μεταβλητής συχνότητας και στάθμης και καταγράφεται κατά πόσο το υποκείμενο αντιλαμβάνεται αυτούς τους ήχους. Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση ακουστικών, οπότε προσδιορίζονται οι τιμές ελάχιστης ακουστής πίεσης (MAP: minimum audible pressure), είτε με τη χρήση μεγαφώνων οπότε οι μετρούμενες στάθμες SPL αποτελούν το ελάχιστο ακουστό πεδίο (MAF : minimum audible field). [4], [9]

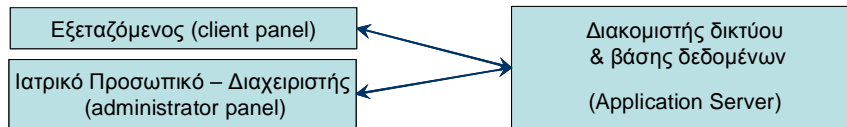
2. Δικτυοκεντρική τονική ακουομετρία

Η προτεινόμενη μέθοδος τονικής ακουομετρίας αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιείται από απόσταση, κάνοντας χρήση της τεχνολογίας των

ηλεκτρονικών υπολογιστών και του διαδικτύου. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού στο χώρο του εξεταζομένου. Η εξέταση γίνεται με τη βοήθεια Η/Υ, στον οποίο εκτελείται ένα εξειδικευμένο λογισμικό σε κατάλληλα διαμορφωμένο γραφικό περιβάλλον, ενώ απαραίτητα εργαλεία αποτελούν μία κάρτα ήχου και ένα ζευγάρι ακουστικά. Τα αποτελέσματα της εξέτασης δρομολογούνται σε έναν κοινό, για όλους τους εξεταζομένους, δικτυακό τόπο, όπου ταξινομούνται σε κατάλληλη βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό ένας γιατρός μπορεί, θεωρητικά τουλάχιστον, να εξετάσει άτομα από όλο τον κόσμο, ενώ ανά πάσα στιγμή μπορεί να έχει πρόσβαση στα αποτελέσματα διάγνωσης από οποιοδήποτε Η/Υ που είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο. Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο LabVIEW βί και τα εργαλεία SQL Toolkit και Internet Toolkit. [5], [6], [7]

2.1 Το μοντέλο πελάτη - εξυπηρετητή

Από όσα έχουν αναφερθεί ως τώρα, γίνεται σαφές ότι η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του μοντέλου εξυπηρετητή – πελάτη. Ιδιαίτερότητα, σε σύγκριση με την πλειονότητα των περιπτώσεων αυτής της κατηγορίας, αποτελεί το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί δύο περιβάλλοντα πελάτη: ένα για τον εξεταζόμενο (simple user) και ένα για το επιβλέποντα των πειραμάτων ή το ιατρικό προσωπικό (administrator). Το μοντέλο αυτό αποδίδεται σχηματικά στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Το μοντέλο εξυπηρετητή – πελάτη της δικτυοκεντρικής ακουομετρίας

Στην πλευρά του πελάτη (client side) γίνεται η διεξαγωγή του πειράματος. Το υποκείμενο χρησιμοποιεί τα ακουστικά και καθοδηγούμενο από την εφαρμογή εκτελεί την πειραματική διαδικασία. Αρχικά δίνονται τα προσωπικά στοιχεία του εξεταζόμενου, που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ταξινόμηση στη βάση δεδομένων αλλά και για τη μετέπειτα στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων (σχήμα 2-α). Στη συνέχεια, η εφαρμογή αναπαράγει σταδιακά ηχητικούς τόνους για τις οκτάβες 125 Hz έως και 8 kHz, ενώ ο εξεταζόμενος καλείται να απαντήσει εάν αντιλαμβάνεται το αντίστοιχο ερέθισμα. Αν όχι, έχουμε επανάληψη εκπομπής του τόνου με αύξηση της στάθμης κατά 5 dB. Όταν ο ήχος γίνει αντιληπτός, η εφαρμογή προχωρά στον επόμενο τόνο, μέχρι να «εξαντληθούν» όλες οι οκτάβες. Με τον τρόπο αυτό γίνεται σάρωση όλων των συχνοτήτων χωριστά για κάθε αυτί και λαμβάνονται τα αντίστοιχα κατώφλια ακοής από την ακόλουθη σχέση:

$$HL (dB) = SPL_m(dB) - SPL_{ref}(dB) \quad (1.1)$$

όπου $SPL_m(dB)$ είναι η εκπεμπόμενη στάθμη που αντιλαμβάνεται το υποκείμενο σε κάθε συχνότητα και $SPL_{ref}(dB)$ οι στάθμες αναφοράς για τις οκτάβες 125Hz-8kHz (πίνακας 1-1) που προκύπτουν από την τυποποίηση TDH – 39 [9].

Πίνακας 1.1 Στάθμες αναφοράς κατά TDH-39 για τις οκτάβες 125Hz-8kHz

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SPL ref (dB)	45	25,5	11,5	7	9	9,5	13

Από τις προσδιοριζόμενες τιμές κατωφλίων HL(dB) προκύπτει το διάγραμμα ακουστότητας σε συνάρτηση με τη συχνότητα που είναι γνωστό ως *τονικό ακουόγραμμα*. Στο σχήμα 2-β βλέπουμε το βασικό πάνελ όπου ο εξεταζόμενος μπορεί να δει το τονικό ακουόγραμμα κάθε αυτιού και να διαπιστώσει αν και σε ποιο βαθμό έχει πρόβλημα ακοής. Παράλληλα μπορεί να επαναλάβει όλη τη διαδικασία («αυτόματο») ή να επιλέξει να ακούσει μεμονωμένες συχνότητες («χειροκίνητο») στις οποίες ενδεχομένως να υπάρχει πρόβλημα, να αποθηκεύσει τα αποτελέσματα και να τα αποστείλει στον εξυπηρετητή. Αν υπάρξει διαφορά στους μέσους όρους των αποτελεσμάτων των δυο αυτιών μεγαλύτερη από 40 dB τότε πιθανόν να έχουμε φαινόμενο υποκλοπής [9], οπότε το τεστ επαναλαμβάνεται για το «κακό» αυτί με παρουσία λευκού θορύβου κάλυψης στο άλλο αυτί.



Σχήμα 2. Το περιβάλλον ελέγχου (πάνελ) του εξεταζόμενου (client)

Τα δεδομένα των πειραματικών αποτελεσμάτων αποστέλλονται με τη μορφή πακέτων TCP στον εξυπηρετητή και καταχωρούνται στη βάση δεδομένων. Εδώ, αντιμετωπίζονται ζητήματα όπως ο έλεγχος της ροής του τηλεπικοινωνιακού φορτίου, η σωστή αποστολή – λήψη δεδομένων κατ' απαίτηση (on demand) από και προς τη βάση. Τέλος, το πάνελ του διαχειριστή (administrator), που έχει πολλές ομοιότητες με αυτό του εξεταζόμενου, παρέχει τη δυνατότητα προβολής των τονικών διαγραμμάτων και των προσωπικών δεδομένων όλων των εξεταζόμενων. Επιτρέπει τη στατιστική ανάλυση αυτών των δύο κατηγοριών παραμέτρων με κατάλληλα ερωτήματα (queries) που αποστέλλονται στη βάση, καθώς και τη ρύθμιση διαφόρων άλλων πειραματικών παραμέτρων. Ο διαχειριστής μπορεί, με τον τρόπο αυτό, να ελέγχει το ποσοστό των υποκειμένων που έχει προβλήματα ακοής και να αναλύει το είδος και το μέγεθος αυτών των προβλημάτων με βάση τα δημογραφικά στοιχεία των εξεταζόμενων. Για λόγους ασφάλειας και απορρήτου των προσωπικών δεδομένων των εξεταζόμενων η πρόσβαση στο περιβάλλον του διαχειριστή είναι ελεγχόμενη.

2.2 Προδιαγραφές προτυποποίησης

Είναι φανερό ότι για την εφαρμογή της μεθόδου στο ευρύ κοινό υπάρχει ανάγκη προτυποποίησης. Συγκεκριμένα, είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί η σωστή ρύθμιση εκπομπής, ώστε οι στάθμες στα ακουστικά να είναι ίδιες για κάθε εξεταζόμενο και σε κάθε τεμαχικό. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνει ελέγχοντας το πλάτος των

παραγομένων σημάτων, επομένως την τάση στην έξοδο γραμμής της κάρτας ήχου, και λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία και την χαρακτηριστική αντίσταση των ακουστικών [9]. Στην προκειμένη περίπτωση έγιναν και μετρήσεις ηχητικής στάθμης χρησιμοποιώντας διατάξεις τύπου “dummy head”, καθώς η μεταβολή της αντίστασης των ακουστικών με τη συχνότητα, δημιουργούσε αποκλίσεις από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες μετρήσεις. Μελλοντικά, κρίνεται σκόπιμη η μέτρηση των πιο διαδεδομένων τύπων ακουστικών και η καταχώρηση των αντίστοιχων ρυθμίσεων έτσι ώστε να είναι δυνατή η επιλογή τους από το χρήστη.

3. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας αναπτύχθηκε μια μέθοδος δικτυοκεντρικής τονικής ακουομετρίας που επιτρέπει τη διεξαγωγή ακουομετρικών εξετάσεων από απόσταση. Η μέθοδος έχει ήδη δοκιμαστεί σε μερικές δεκάδες φοιτητών που πραγματοποίησαν τη μέτρηση στο χώρο του Εργαστηρίου Ηλεκτρακουστικής ΑΠΘ. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής αυτής διαδικασίας με «πιστοποιημένο» εξοπλισμό τονικής ακουομετρίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδο. Τα περιβάλλοντα επικοινωνίας τόσο του εξεταζομένου – χρήστη όσο και του επιβλέποντα – διαχειριστή χαρακτηρίστηκαν ιδιαίτερα απλά, εύχρηστα και λειτουργικά. Τα δε αποτελέσματα διάγνωσης επιβεβαίωσαν την πρόβλεψη ένα σημαντικό ποσοστό του πληθυσμού παρουσιάζει προβλήματα ακοής. Εκτιμάται ότι η ευρεία εφαρμογή της μεθόδου θα δώσει πολλές και χρήσιμες πληροφορίες στο μέλλον.

4. Αναφορές

- [1]Dr. Alice, H. Suter, “Noise and Its Effects”, Administrative Conference of the United States, NPC Online Library
- [2]Stanley Gelfand, Marcel Dekker Inc. “Hearing”, New York, 1990
- [3]Ηλιάδη Θ., Κεκέ Γ., “Κλινική ακουολογία”, Εκδόσεις Τριανταφύλλου, Θεσσαλονίκη 1986
- [4]Humes L., “Clinical audiology: An overview”, Encyclopedia of acoustics, Vol III, Editor Crocker M., New York, USA, 1997
- [5]National Instruments, LabVIEW 6i User Manual, July 2000 Edition
- [6]National Instruments, “SQL Toolkit for G Reference Manual”, 1997
- [7]National Instruments, “Internet Toolkit for G Reference Manual”, 1997
- [8]Παπανικολάου Γ, “Ηλεκτρακουστική”, Univerity Studio Press, Θεσσαλονίκη 1985
- [9]Παστιάδης Κ., “Ακουομετρία με χρήση Η/Υ”, Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 1992

Pitch estimation using spiking neurons

K. Voutsas

Research Assistant
Institute of Automatic Control
Control Theory and Robotics Lab
Darmstadt University of Technology
Petersenstr. 20 / D-64287 Darmstadt
Email: kvoutsas@rtr.tu-darmstadt.de

J. Adamy

Head of Control Theory and Robotics Lab
Institute of Automatic Control
Control Theory and Robotics Lab
Darmstadt University of Technology
Landgraf-Georg-Str. 4 / D-64283 Darmstadt
Email: adamy@rtr.tu-darmstadt.de

ABSTRACT

The paper introduces a brain-like neuronal model for sound processing. The Periodicity Analyzing Network (PAN) is a bio-inspired neural network of spiking neurons simulating certain parts of nuclei of the auditory system in detail. The PAN consists of complex models of neurons, which can be used for understanding the dynamics of individual neurons and the mechanisms of structured neural networks of the auditory system. Because of the cochlear frequency analysis, a neuron responds strongest at its characteristic frequency (CF). In addition to its CF, a coincidence neuron is tuned to a certain periodicity, i.e. a certain modulation frequency of an AM signal, also called the best modulation frequency (BMF). Following the cochlear filtering, each PAN responds to the encoded carrier and modulation information according to its BMF and CF, thus forming a spatial structure, where the representations of CF and BMF, encoding carrier and modulation frequency respectively, are roughly orthogonal. On a technical level, the network is able to process fundamental frequency characteristics of harmonic sound signals. The PAN model may therefore be used in audio signal processing applications, such as periodicity analysis, pitch extraction and the cocktail party problem.

Introduction

Most common pitch estimation algorithms are based upon time domain (temporal) or frequency domain (spatial) methods. Autocorrelation, zero crossings or maximum likelihood methods in the time domain [1, 2, 3] or the cepstrum method and the harmonic product spectrum method in the frequency domain [4, 5] provide a wide range of different algorithms for pitch estimation and extraction. Most of these methods are mathematical models and only vaguely based on the physiological models of hearing. Some other methods combine the advantages of spatial and temporal processing methods [6] and only one biologically inspired spatiotemporal method for pitch estimation is so far widely known [7]. A new biologically based spatiotemporal approach to the pitch estimation problem is introduced in this paper.

The Periodicity Analyzing Network (PAN) is a spiking neural network based on neural mechanisms, utilizing complex neuron models, and attempting to simulate certain parts of nuclei of the auditory system in detail. It can be used both for purposes of understanding the mechanisms of a structured neural network of the auditory system and for periodicity analysis and sound source localization tasks with amplitude modulation (AM) signals in technical applications.

1. Physiological fundamentals

1.1 The auditory pathway

The external ear (pinna) bundles the arriving sound, which is then directed through the outer auditory canal to the ear drum and to the inner ear. The basilar membrane in the cochlea is tonotopically organized. This feature of the cochlea enables a decomposition of the traveling wave generated by the incoming acoustic stimulus at different points of the membrane, thus activating a frequency filtering mechanism, which filters higher frequencies at the beginning of the cochlea and lower at the end of it. The basilar membrane in the cochlea is lined with sensitive hair cells, which trigger the generation of nerve signals that are sent through the auditory nerve (AN) to the central nervous system (CNS).

The AN transfers spike encoded sound signals to the three centers of the cochlear nucleus (CN) (Fig. 1(a)). The first neural processing levels of periodicity analysis occur in the CN [8]. The DCN and the PVCN nuclei forward the signal to the nucleus of the lateral lemniscus (NLL), and to the inferior colliculus (IC), the next processing levels of periodicity analysis [8]. The resulting information is transferred to the auditory cortex (AC) via the medial corpus geniculatum (MGB). A spiking neural network was developed, which makes use of the described interconnections in the auditory pathway. The neural network is able to perform periodicity analysis tasks as described in the following section along with biological evidence from electrophysiological experiments supporting this model.

1.2 Physiological structure of the periodicity analyzing network

The neural network described in this section is a correlation network of spiking neurons. The basic structure of the periodicity analysis model (Fig. 1(b)) consists of a trigger neuron, an oscillator, an integrator complex, and a coincidence neuron. Exemplary neuronal potentials describing the function of the four modules of the network driven with an optimal stimulus are shown in the right part of Fig. 1(b). The function of the network is based upon the correlation of delayed and undelayed neuronal responses of the depicted neurons to envelopes of AM signals. These responses converge finally at neurons acting as coincidence detectors [8]. Each modulation period of an AM signal triggers the trigger neuron (Fig. 1(b)), which triggers a rapid oscillation (oscillator potential in Fig. 1(b)) with a predefined frequency. Parallel to that process, the integrator neuron responds to the same cycle only with a longer delay (integration period of the integrator). The coincidence neuron will be activated, despite the different delay times of the two previous units, provided that the integration period equals the period of the AM signal.

A coincidence neuron will respond more often, when its inputs are synchronized, i.e. when the oscillation and integration delay periods of its inputs have approximately the same duration. Thus, modulation periods, $m \cdot \tau_m$, with $m = 1, 2, \dots$, which activate the oscillations and drive the coincidence unit can be computed from the following linear equation:

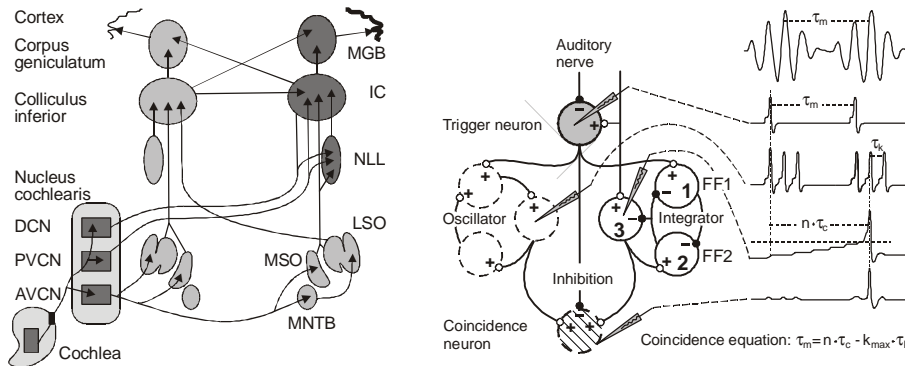


Figure 1. (a) The auditory pathway, (b) The periodicity analyzing neural model and some exemplar neuronal potentials of a PAN module. The model is driven with a stimulus generating equal oscillation and integration delay periods and therefore a coincidence for the specific module

$$m \cdot \tau_m = n \cdot \tau_c - k \cdot \tau_k \tag{1.1}$$

where m, n are small integers, and $k = 0, 1, \dots, k_{\max}$. $n \cdot \tau_c$ is the integration period, which consists of n carrier periods and which is the time the integrated input signal needs to reach a certain threshold. $1/\tau_c$ is the carrier frequency of the AM signal, $1/\tau_k$ the frequency of the oscillations and k_{\max} the number of the oscillations triggered by the modulation of the AM signal which are required for the synchronization of the two inputs of the coincidence unit. The parameter m takes into account the fact that coincidence neurons respond also to harmonics ($m > 1$) of the modulation frequency of the AM signal, which implicates an ambiguity of IC neurons with respect to harmonically related signals. A solution to this problem based on electrophysiology results is proposed by [9] and is also tested in the present model.

Because of the cochlear frequency analysis, a neuron responds strongest at its characteristic frequency (CF). In addition to its CF, a coincidence neuron is tuned to a certain periodicity, i.e. a certain modulation frequency of an AM signal, also called the best modulation frequency (BMF). Therefore, different trigger, oscillator, integrator, and coincidence units are needed to cover the range of periodicity of AM signals. The biological evidence supporting the hypothesis about the existence of such periodicity analysis in the auditory system are described in detail in [10].

The periodicity analysis model explains the selectivity of the neurons of the midbrain for a specific BMF. Utilizing a model of cochlear filtering, a mechanism of encoding the carrier and modulation information of an AM signal and numerous PANs in parallel differently tuned for various CFs and BMFs, we can simulate the response of the IC to AM signals (Fig. 2(a)). We can therefore perform periodicity analysis and pitch extraction. The implementation of the modules up to the input of the PAN and the simulation of the PAN model are described in the following section.

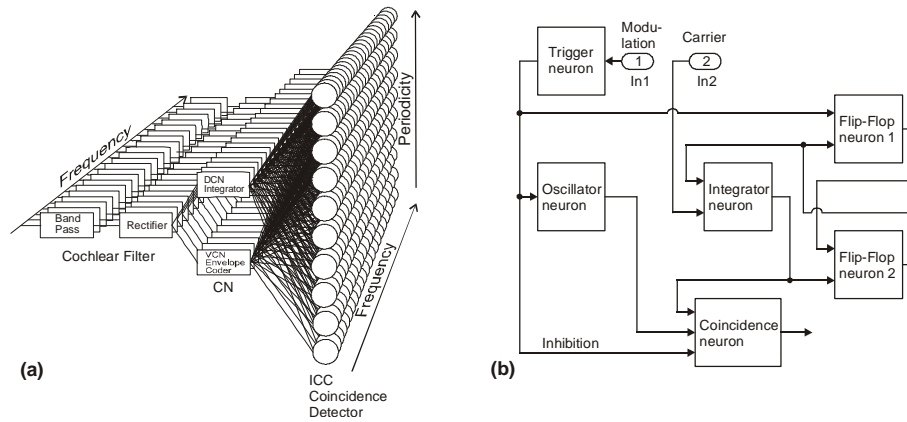


Figure 2. (a) A highly simplified scheme of the tonotopic and periodotopic organization of the auditory brainstem [11]. Following the cochlear filtering, the modules of the PAN respond to the encoded carrier and modulation information according to their BMF and CF, thus forming a spatial structure, where the tonotopic and periodotopic axes of the IC neurons are roughly orthogonal. (b) Block diagram of the PAN model implementation corresponding to the physiological model of Fig. 1(b).

2. Simulation of the PAN model

2.1 Models of the cochlea and of the inner hair-cells

A model of the cochlear filtering mechanism is used to simulate the band-pass decomposition of a sound signal and the tonotopic organization of the cochlea. A corresponding band-pass filterbank is used, where the filterbank consists of a series of band-pass filters, the so-called ERB-filters [12]. The equivalent rectangular bandwidth (ERB) corresponds to the bandwidth of each filter of the human cochlea along various points on the basilar membrane based on psychoacoustic measurements.

The decomposition of the AM signal in the cochlea is followed by a simulation of the inner hair-cells, which transform the mechanical response of each filter to electrical pulses [13]. At every positive zero-crossing of the filtered signal a spike is triggered. The amplitude of each spike equals 1. A spike train for each filter is thus generated, which is then used as encoded information about the modulation and the carrier frequency of the AM signal. A more detailed description of the cochlea and inner hair-cell models can be found in [10].

2.2 Simulating neurons

The functional structure of the chemical synapse model can be seen in Fig. 3. An incoming spike from the presynaptic neuron releases synaptic vesicles containing neurotransmitters. The vesicle emission mechanism is simulated with a look-up table providing a certain predefined amount of vesicles each time the subsystem is enabled by an incoming spike, as seen in Fig. 3. The transmitter molecules diffuse to the postsynaptic neuron through the synaptic cleft. The decay of the transmitter concentration is simulated by a leaky-integrator. The amount of transmitters on the postsynaptic neuron changes its permeability to certain ions. Ion channels are thus gradually opened, receiving even more ions, forming a current moving towards the

soma of the neuron using a resistance mechanism which forms a gradually increasing post synaptic current (PSC). PSCs can be either excitatory or inhibitory (EPSC or IPSC), depending on the ions rushing through the postsynaptic membrane. This mechanism is simulated by the weight function of the synapse model. The overall time needed for the diffusion of the transmitters and the transmission of the PSCs to the soma is modelled with a predefined time delay for each synapse.

A soma model based on an integrate-and-fire model [14] was especially here developed for the PAN simulation. A leaky integrate-and-fire neuron consists of a leak resistance R , in parallel to a capacitance C driven by an external current I . The neuron will fire only if the excitatory input is strong enough to overcome the leak. The voltage u across the capacitor can be interpreted as the membrane potential of the neuron. The neuron voltage u starts from zero and increases or decreases in dependence of the synaptic input. When the voltage u reaches a threshold ϑ , the neuron fires instantly a spike, and returns to the initial value of $u=0V$. After an absolute refractory period, during which the neuron cannot fire due to hyperpolarization of the membrane, and a relative refractory period, during which the neuron can fire only when a very strong input exists, the cell is ready to fire again. A detailed description of the models, the tunable parameters and their value regions can be found in [10].

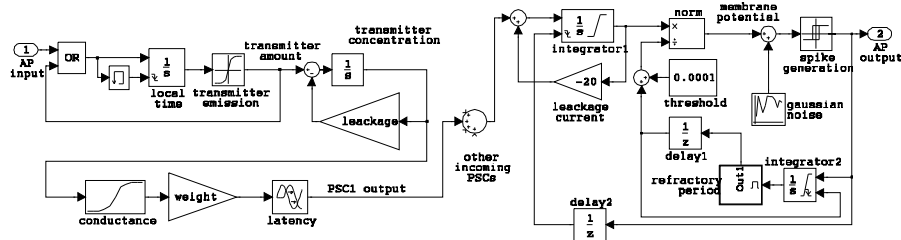


Figure 3. Block diagrams of the chemical synapse and the leaky integrate-and-fire soma model implemented in MATLAB – SIMULINK.

2.2 Simulating the PAN model

Based upon the biological model seen in Fig. 1(b), a simulation model utilizing the neuron model described above was developed, Fig. 2(b). The implemented PAN unit is functionally similar to its biological analogon described in section 1.2 including also a third inhibitory connection to the coincidence neuron. Furthermore, a new function of the PAN is proposed here to cover stimuli at higher frequencies.

The trigger and the integrator neuron receive the two PAN inputs, one encoding the modulation and the other the carrier frequency of the acoustic signal. The trigger neuron is synchronised to the incoming signal from the inner hair-cells model and triggers the oscillator neuron, which is implemented by only one oscillating neuron in our model. One spike (AP) of the trigger neuron is sufficient for the oscillator neuron to release a series of spikes with a predefined frequency, thus providing the coincidence time window needed for the periodicity analysis. The flip-flop neurons synchronize the accumulation of spikes in the integrator neuron with the output of the trigger neuron and the integrator neuron provides spikes to the coincidence neuron, which also has a third input simulating the modulation coupled inhibition of the coincidence mechanism. This inhibition mechanism suppresses reactions of the coincidence neuron to harmonics of the preferred BMF of a specific PAN unit.

Depending on the frequency of the incoming signals we propose a dual-function mode scheme for the PAN model. When receiving low frequency stimuli (<1 kHz), the response of the integrator neuron is coupled to each modulation period of the stimulus [10], while for high frequency stimuli (above 1 kHz), the integrator neuron and thus the flip-flop structure respond every two modulation periods of the stimulus (Fig. 4). The advantage of the second mode is that the integrator and the flip-flop neurons are still able to respond phase coupled to higher frequency stimuli, while, if working in the first mode, this would not be the case and one would need a population of neurons to encode higher frequency stimuli. Therefore, system simplicity and robustness (higher frequencies can be better encoded with fewer neurons) and model execution time are positively affected by the introduction of the proposed dual-mode scheme.

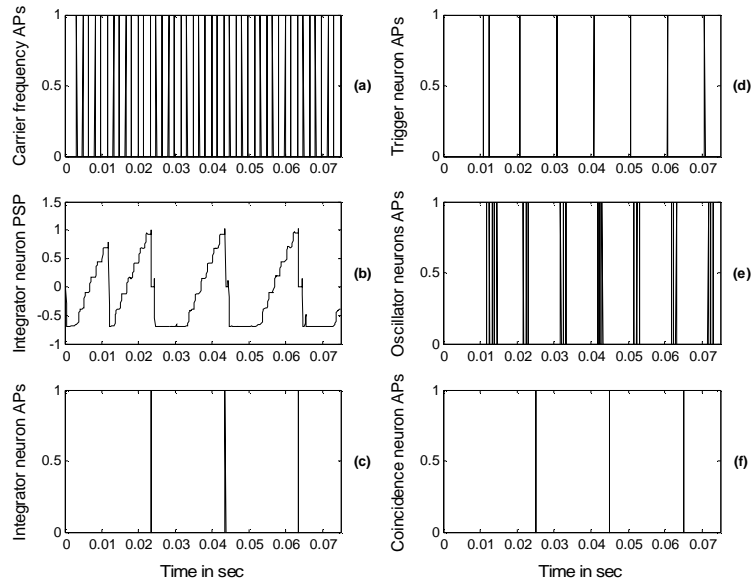


Figure 4. AP and PSP plots of a PAN unit tuned for a 100Hz to 600Hz (modulation/carrier frequency) signal and tested with signal. (a) APs of the encoded carrier frequency as received from the cochlear filterbank, (b) PSP of the integrator neuron to the incoming APs of (a), (c) resulting APs of the integrator neuron, (c) APs of the trigger neuron, which receives various cochlear filterbank channels and decodes the modulation frequency of the signal, (d) oscillator APs generated at each incoming AP of the trigger neuron seen in (d), and (f) coincidence neuron APs, resulting from the temporal coincidence of (c) and (e) and thus encoding the specific carrier to modulation frequency ratio of the incoming signal.

Each block of the model consists of a neuron as described in Section 2.2, with the trigger, and the oscillator neuron having one, the integrator and the flip-flop neurons having two, and the coincidence neuron having three synaptic inputs. Numerous parameters of each neuron can be tuned according to the CF and the BMF that one PAN unit should maximally react to. Among these parameters are the amount of transmitters, the time delay and the weight of each synaptic model. The

threshold, the leakage current and the refractory period of each soma model can be optimised for every PAN unit. Adjusting the parameters of a PAN unit can be done by using optimization algorithms and is a challenging task for further research.

3. An example of pitch estimation

The tests presented in Fig. 5 show an aspect of the evaluation of a PAN unit. One PAN unit – tuned for a specific modulation to carrier frequency ratio of an arbitrary incoming stimulus and for a specific CF – is tested with a wide range of SAM stimuli. 15 modulation frequencies ranging from 60 to 200 Hz and 15 carrier frequencies ranging from 300 to 1140 Hz were tested. As seen in both exemplary cases, the maximum response of the PAN unit is correctly placed at the tuned (desired) ratio. Existing responses in the neighbourhood of the maximum response can be suppressed utilizing a winner-take-all neural network at the output layer of a complete PAN array, thus providing an increased efficiency of the model.

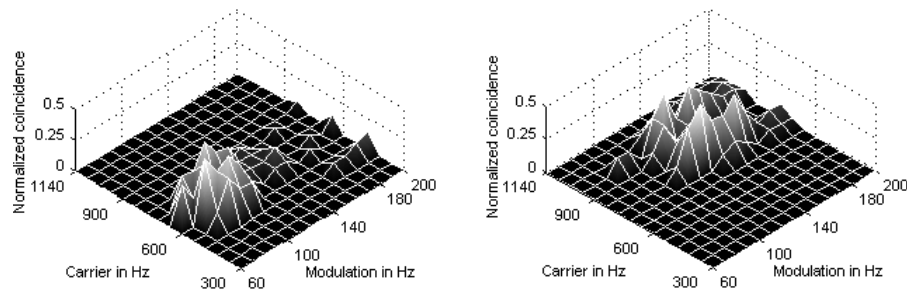


Figure 5. Simulation results of two PAN units, the one on the left tuned to react at a 100 Hz modulation to 600 Hz carrier frequency AM signal and the one on the right for a 150 Hz modulation to 800 Hz carrier frequency AM signal. The PAN units were tested with 225 SAM signals with different combinations of modulation (60 to 200 Hz) and carrier (300 to 1140 Hz) frequencies.

4. Summary and conclusions

The simulation results of the complete auditory spatial tonotopic and periodotopic structure consisting of PAN units show, that it is possible to combine processing tasks with detailed models of spiking neurons and neural networks based on neuronal mechanisms to obtain technical applications that perform comparable to the auditory system.

Furthermore, an accurate periodicity analysis mechanism providing pitch estimation can be implemented using the PAN unit. The tonotopic and periodotopic structure proposed in this paper can therefore be used for distinguishing one among many simultaneously speaking persons. A further improvement is proposed with a dual-mode function scheme to cover a wide range over frequencies of incoming stimuli.

5. Literature

[1] A. E. Rosenberg, M. R. Sambur: New techniques for automatic speaker verification, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-23, pp. 169-176, 1975.

- [2] N. J. Miller: Pitch detection by data reduction, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-23, pp. 72-79, 1975.
- [3] J. J. Dubnowski, R. W. Schafer, L. R. Rabiner: Real-time digital hardware pitch detector, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-24, pp. 2-8, 1976.
- [4] R. W. Schafer, L. R. Rabiner: System for automatic formant analysis of voiced speech, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 47, pp. 634-648, 1970.
- [5] A. M. Noll: Cepstrum pitch determination, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 41, no. 2, pp. 293-309, 1967.
- [6] T. Tolonen, M. Karjalainen: A computationally efficient multipitch analysis model, *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, Vol. 8(6), S. 708-716, 2000.
- [7] M. Slaney, R.F. Lyon: A perceptual pitch detector, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol. 1, S. 357-360, 1990.
- [8] G. Langner: Neuronal periodicity coding and pitch effects, in *Central Auditory Processing and Neural Modeling* (Ed. Poon, and Brugge), New York: Plenum Press, pp. 31-41, 1998.
- [9] M. Ochse, G. Langner: Modulation tuning in the auditory midbrain of gerbils: bandpasses are formed by inhibition, *Proc. 5th Meet. of the German Neurosc. Soc.*, pp. 434-435, 2003.
- [10] K. Voutsas, G. Langner, J. Adamy, M. Ochse: A brain-like neural network for periodicity analysis, *Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, submitted November 2003, accepted as a regular paper, July 2004.
- [11] G. Langner, M. Sams, P. Heil, H. Schulze: Frequency and periodicity are represented in orthogonal maps in the human auditory cortex: evidence from magnetoencephalography, *Journal Comp. Physiol.*, Vol. 181, S. 665-676, 1997.
- [12] R. Patterson, I. Nimmo-Smith, J. Holdsworth, P. Rice: Spiral VOS final report: Part A, the auditory filterbank, *Internal Report*, University of Cambridge, England, 1988.
- [13] R. Meddis, M.J. Hewitt, and T.M. Shackleton: Implementation details of a computational model of the inner hair-cell/auditory-nerve synapse, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87(4), pp. 1813-1816, 1990.
- [14] C. Koch, C.H. Mo, W. Softky: Single-Cell Models, in *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (M.A. Arbib, Ed.), 2nd ed., Cambridge, MA: MIT Press, 2003, S. 1044-1049.

***Vox ex machina : Στην αναζήτηση ενός δυναμικού
ψηφιακού συνθετητή τραγουδιστής φωνής.
Τεχνικά προβλήματα, εφαρμογές και προοπτικές έρευνας.***

Αναστασία Γεωργάκη, Λέκτορας
Τμήμα Μουσικών Σπουδών
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής και Τεχνολογίας
Φιλοσοφική Σχολή
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
georgaki@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια αυτής της ανακοίνωσης εξετάζουμε διάφορες πτυχές της έρευνας γύρω από την ψηφιακή σύνθεση της τραγουδιστής φωνής εστιάζοντας κυρίως προβλήματα μεθοδολογίας που συναντούν οι ερευνητές σχετικά με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου φωνητικού συνθετητή.

Στο πρώτο σκέλος κάνουμε μία σύντομη αναφορά στην τρέχουσα έρευνα γύρω από το θέμα αυτό συγκρίνοντας κάποια φωνητικά μοντέλα για την σύνθεση τραγουδιστής φωνής και προβάλλοντας τις ιδιαιτερότητες τους. Στην συνέχεια αναφερόμαστε σε τεχνικά προβλήματα ακουστικής φύσης που παρουσιάζονται στα περισσότερα ερευνητικά προγράμματα συνθετικής τραγουδιστής φωνής. Στο τρίτο σκέλος της εργασίας αναφερόμαστε στις τρέχουσες εφαρμογές της τραγουδιστής συνθετικής φωνής στο χώρο της μουσικής σύνθεσης, παιδαγωγικής και μουσικολογίας καθώς και τις προοπτικές έρευνας στον Ελληνικό χώρο.

ABSTRACT

In this paper we are going to present several aspects on the singing voice synthesis research by focusing on methodology problems concerning the development of a vocal synthesizer. In the first paragraph we present current research programs, a brief evaluation and the on-going directions of the research domain, as well as future improvements and perspectives. In the second paragraph we mention some of the technical problems which still stand an obstacle to the perfection of the singing voice synthesizer. In the third part we present the most current application of the synthesis of the singing voice in the area of music composition, systematic musicology, vocal pedagogy, etc..Last, we describe further perspective research on the synthesis of the Greek singing voice.

Εισαγωγή

Η ηχητική σύνθεση της τραγουδιστής φωνής, συγκρινόμενη με αυτή των υπολοίπων μουσικών ηχοχρωμάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς το σήμα της αποτελεί ένα ιδιάζοντα συνδυασμό τονικών υψών και μεταβλητών ηχοχρωμάτων (φωνημάτων). Η άμεση σχέση της φωνής με την γλώσσα και την ακοή, καθώς και η σχέση της με την βιολογική λειτουργία του ανθρώπινου σώματος και κατ' επέκταση με την ψυχική διάθεση του τραγουδιστή, προσθέτουν μια βαρύνουσα σημασία στην μελέτη του πολύπλοκου αυτού ηχητικού σήματος.

Η σύνθεση της τραγουδιστής φωνής έχει απασχολήσει ένα μεγάλο μέρος του ερευνητικού δυναμικού στο χώρο της Μουσικής Πληροφορικής τα τελευταία τριάντα χρόνια. Ο ερευνητικός αυτός χώρος, που έχει τις βάσεις του στην σύνθεση της ομιλούσας φωνής, έχει αρχίσει να αναδεικνύεται σαν ένα πεδίο ερευνών μεγάλου ενδιαφέροντος όπου συγκλίνουν διάφορες διεπιστημονικές προσεγγίσεις¹ και παρουσιάζει ενδιαφέρουσες προοπτικές για την ανάπτυξη χρήσιμων μουσικών εργαλείων.

Ιδιαίτερα από το 1980 και μετά πολλά ερευνητικά προγράμματα είχαν σαν κεντρικό θέμα την σύνθεση της τραγουδιστής φωνής [1], [3], [4], [5], [6], [25], [26], [28], [29] διαφοροποιώντας την από αυτήν της ομιλούσας και εστιάζοντας σε ακουστικές και πολιτισμικές διαφορές² με κύρια εργαλεία την ανάλυση και σύγκριση των δεδομένων. Κάθε πρόγραμμα παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα ως προς τους στόχους, τις κατευθύνσεις και τις εφαρμογές [12]. Από την τελευταία μας έρευνα [12],[14], όπου παρουσιάσαμε μια αξιολόγηση των προγραμμάτων συνθετικής τραγουδιστής φωνής και των εφαρμογών τους στο χώρο της μουσικής δημιουργίας, πολλά νέα ερευνητικά προγράμματα [2], [15], [16], [19], [21], [22], [33]. έχουν αρχίσει να διαφαίνονται στον ορίζοντα με διαφορετικές μεθοδολογίες, κατευθύνσεις και προοπτικές προς την εξερεύνηση του «κλειδαριθμού» της συνθετικής τραγουδιστής φωνής

1. Μοντέλα κι ερευνητικές προσεγγίσεις

Στην παρούσα ανακοίνωση θα παραθέσουμε ορισμένα από τα μοντέλα που παρουσιάζουν μια ολιστική προσέγγιση στο θέμα της τραγουδιστής φωνής (τεχνική σύνθεσης, κανόνες άρθρωσης και εκτέλεσης, έλεγχος των παραμέτρων μέσω λογισμικού ή υλισμικού) και όχι απλές τεχνικές σύνθεσης φωνηέντων ή διφώνων. Διαφορετικές οπτικές γωνίες που εκτείνονται από την ανεύρεση τεχνικών που προσδίδουν *φυσικότητα* (naturalness)³ στο φωνητικό σήμα (πολύ σημαντικός παράγοντας για το τραγούδι σε σχέση με την ομιλία) έως και τον σχεδιασμό κανόνων που καθορίζουν την σύνδεση των φωνημάτων σε δίφωνα, φράσεις καθώς και την εκφραστική προσωπική τους γραμμή.

1.1 Απο την MUSSE στον CANTOR

Στον ερευνητικό χώρο της Μουσικής Πληροφορικής τα μοντέλα που έχουν ξεχωρίσει και έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες καθώς και στην σύγχρονη μουσική δημιουργία είναι τα MUSSE/RULSUS [28] CHANT [25],[26] and SPASM/SINGER[5]. Τα συγκεκριμένα μοντέλα παρουσιάζουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στο θέμα της συνθετικής τραγουδιστής φωνής καθώς μελετάται η σύνθεση της φωνής σε πολλά επίπεδα: τεχνική σύνθεσης του σήματος, κανόνες

¹ Ανάλυση -σύνθεση και επεξεργασία σήματος, Ψυχοακουστική, Μουσική γνωσιολογία, Γλωσσολογία, Τεχνητή νοημοσύνη και μουσική, Φωνολογία, Ωτορινολαρυγγολογία, κ.α.

² Διαφορετική έκταση συχνοτήτων, προκαθορισμένες συχνότητες, μετατόπιση των φωνοσυντονισμών (formants), τυχαίες διακυμάνσεις των φωνητικών χορδών (jitter), σπουδαιότητα των περιοδικών διακυμάνσεων, διαφορές στην ατάκα, την φασματική περιβάλλουσα, «προσδόκιμο αντίληψης», κ.α.

³ Στο θέμα της *φυσικότητας* (naturalness) της συνθετικής φωνής αναφέρεται σε διάφορα άρθρα του ο Σουηδός ερευνητής S. Ternstrom. Παραπέμπουμε σε ένα από τα τελευταία άρθρα του: Ternström, S, «Session on Naturalness in Synthesized Speech and Music», 143rd ASA meeting, Pittsburgh, June 3-7, 2002.

μετάβασης και διασύνδεσης των φωνημάτων, κανόνες εκφραστικού ελέγχου κατάλληλο διασυνδεδετικό για το χειρισμό των παραμέτρων.¹ Στις μέρες μας νέα συστήματα ηχητικής σύνθεσης έχουν παρουσιαστεί σε ακαδημαϊκές πλατφόρμες και την αγορά όπως FLINGER², LYRICOS³[21], VOCALWRITER⁴, VOCALOID [33], CANTOR[31], - που φέρνουν το χρήστη της μουσικής τεχνολογίας πιο κοντά στο «όνειρο της συνθετικής τραγουδιστής φωνής».

Σε κάθε περίπτωση τα μοντέλα που προαναφέραμε δεν διαφέρουν μόνο στην τεχνική σύνθεσης, τους προστιθέμενους κανόνες αλλά επίσης στο διασυνδεδετικό ελέγχου των παραμέτρων και τον παραγόμενο ήχο που προκύπτει από αυτή την αλυσίδα. Κάθε λογισμικό έχει την δική του ηχητική υπογραφή⁵[12]. Διαφορές επίσης υπάρχουν στον τρόπο χρήσης του μοντέλου ανάλογα με το πεδίο εφαρμογών στην μουσική δημιουργία ή την μουσική έρευνα (σύνθεση υποβοηθούμενη με υπολογιστή, παιδαγωγική της φωνής, ψυχοακουστική).[12].

1.2 Ερευνητικά πεδία: Από την ηχητική σύνθεση στον έλεγχο των παραμέτρων

Το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ευέλικτων εργαλείων ακουστικής ανάλυσης και τεχνικών ηχητικής σύνθεσης για την βελτίωση του «φωνητικού χαρακτήρα» τραγουδιστών διφώνων ή φράσεων προς μια ζητούμενη «φυσικότητα και ζωντάνια των φωνών» στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Τεχνικές όπως η FM σύνθεση[4], το μοντέλο με σύνθεση των φωνοσυχνοτήτων (formant synthesis), [1],[28], το FOF⁶ μοντέλο[25],[27] ή σύνθεση με φυσική μοντελοποίηση[5], η σύνθεση με επιλογή και συρραφή των δειγμάτων [2],[21],[26] είναι οι πιο δημοφιλείς στο χώρο της Μουσικής Πληροφορικής.

Αξιοσημείωτο είναι ότι στα μοντέλα της τελευταίας γενιάς κερδίζει έδαφος περισσότερο η μέθοδος επιλογής και συρραφής ηχογραφημένων φωνημάτων η διφώνων (unit selection and concatenation method) έναντι των «καθαρόαιμων» τεχνικών σύνθεσης ήχου.

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε τις δύο επικρατέστερες κατευθύνσεις αρχιτεκτονικών συστημάτων σύνθεσης τραγουδιστής φωνής: το μοντέλο με την ηχητική σύνθεση κυματομορφών και το μοντέλο επιλογής και συρραφής ηχητικών δειγμάτων από μια βάση δεδομένων.

¹ Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει από ένα δεδομένο κείμενο σε συνδυασμό με την παρτιτούρα πρωτότυπες τραγουδιστές φράσεις, να πειραματιστεί με διάφορα ηχοχρώματα φωνής και να επέμβει στο φασματικό τους περιεχόμενο.

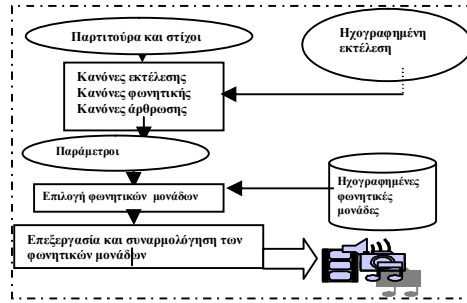
² FLINGER Festival Speech synthesis system: Χρησιμοποιεί βάση δεδομένων με δειγματισμένα δίφωνα : <http://cslu.cse.ogi.edu/cgi-bin/flinger>

³ Ένα καινοτόμο πρόγραμμα για σύνθεση φωνής μέσω παρτιτούρας –στίχων.. <http://clu.cse.cgi.edu/tts/research/sing/sing.html>

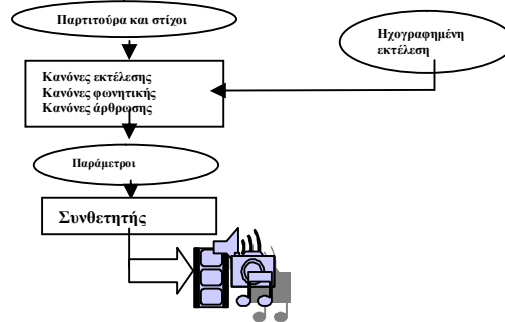
⁴ Εμπορικό πρόγραμμα που έχει σαν βάση την παρτιτούρα και προσφέρει 90 διαφορετικά ηχοχρώματα φωνών. <http://kaelabs.com>

⁵ Στην παρουσίαση θα ακουστούν χαρακτηριστικά δείγματα των μοντέλων MUSSE, SPASM, CHANT, LYRICOS, CANTOR, etc.

⁶ FOF: Fonction d'onde s formantiques, ηχητική σύνθεση με συναρτήσεις φορμαντικών κομμάτων, τεχνική σύνθεσης που αναπτύχθηκε στο Παρίσι την δεκαετία του '80 από την ομάδα του X.Rodet , στο IRCAM.



Σχήμα 1. Αρχιτεκτονικό σύστημα σύνθεση τραγουδιστής φωνής με ηχητική σύνθεση



Σχήμα 2. Αρχιτεκτονικό σύστημα τραγουδιστής φωνής με επιλογή και συρραφή φωνητικών δειγμάτων από βάση δεδομένων.

Μια άλλη κατεύθυνση των ερευνών εστιάζεται στην ανάπτυξη κανόνων εκτέλεσης (performance rules)¹ της τραγουδιστής φωνής²[1],[3],[28], ανάπτυξη συστημάτων μετατροπής ενός δεδομένου μουσικού κειμένου με στίχους σε τραγουδιστή φωνή³(score to singing synthesis), την ανάπτυξη κατάλληλων διασυνδεδετικών ελέγχου των παραμέτρων καθώς και τον σχεδιασμό υλισμικών ελεγκτών εκτέλεσης των συνθετικών φωνών [7].

¹ Στον ερευνητικό χώρο ειδικών κανόνων εκτέλεσης του τραγουδιού έχουν εργαστεί ιδιαίτερα οι Σουηδοί ερευνητές A. Friberg and L. Frydén (<http://www.speech.kth.se/music/performance/thw>) της ομάδας του J.Sundberg. Ανάλογα με το μουσικό περιεχόμενο των νοτών οι κανόνες αλλάζουν σε τέμπο, διάρκεια, ακουστότητα, τονικό ύψος και άλλα χαρακτηριστικά. Τρεις τύποι κανόνων διακρίνονται : οι «κανόνες διαφοροποίησης» που τονίζουν τις διαφορές μεταξύ διαδοχικών μουσικών στοιχείων όπως οι κατηγορίες τόνων. Οι «κανόνες ομαδοποίησης» που οριοθετούν τις νότες που έχουν τα ίδια δομικά στοιχεία με την προσθήκη μικροπαύσεων κ.α.. Οι «κανόνες συνόλου» που εφαρμόζονται σε δύο ή περισσότερες φωνές και επηρεάζουν τις δεδομένες παραμέτρους τους όπως διάρκεια και τονικό ύψος έτσι ώστε να γίνουν συμβατές όταν οι φωνές παίζουν μαζί.

² Rules for Music Performance: <http://www.speech.kth.se/music/performance/>

³ Το πρώτο σύστημα περιλαμβάνει ακουστική ανάλυση που μετατρέπει τη παρτιτούρα σε αφηρημένες μορφές (όπως στα MIDI αρχεία) περιλαμβάνοντας το φώνημα και την καμπύλη προσώδιας. Το δεύτερο υποσύστημα μετατρέπει αυτές τις πληροφορίες σε ήχο.



1. Ερευνητικά πεδία με αντικείμενο της σύνθεση τραγουδιστής φωνής

2. Τεχνικά προβλήματα

2.1. Η πολυπλοκότητα της τραγουδιστής φωνής ως σήμα

Τα σημαντικότερα εμπόδια στην σύνθεση τραγουδιστής φωνής σχετίζονται με την πολυπλοκότητα του φωνητικού σήματος, στη μετατόπιση των formants ανάλογα με την συχνοτική περιοχή, καθώς και στα εξής:

α) την τεράστια ποσότητα παραμέτρων (συχνότητα, πλάτος, εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών-formants, μεταβλητότητα τους στο χρόνο, τυχαίες διακυμάνσεις της συχνότητας, κ.α..) και δεδομένων, που περιγράφουν βήμα προς βήμα την χρονική εξέλιξη του φωνητικού σήματος καθώς και την ανεπάρκεια των υπολογιστικών συστημάτων να επεξεργαστούν με ταχύτητα ένα τόσο μεγάλο όγκο δεδομένων. Παραδείγματος χάρι για την διαχείριση ενός τύπου τραγουδιστής φωνής στην Γαλλική γλώσσα απαιτείται πλήρης έλεγχος 2.200 ηχητικών μονάδων (που περιγράφουν ένα συγκεκριμένο τύπο φωνής).

β) η διαφοροποίηση του ηχητικού σήματος της φωνής σε σχέση με τα άλλα ηχοχρώματα μουσικών οργάνων εστιάζεται εκτός των άλλων, στην περιγραφή των τυχαίων μικροδιακυμάνσεων (jitter), της μεταβλητότητας του vibrato και της μεταβλητότητας των διαδρομών των φωνοσυντονισμών (formants trajectories) που συνδέονται με βιολογικά, παθολογικά και ψυχολογικά αίτια. Σε μελέτες που έχουν γίνει γύρω από αυτό το πεδίο μετά από θυρεοειδεκτομή η αμυγδαλεκτομή και πειραματισμούς με συγκινησιακές καταστάσεις η περιοδικότητα και το φασματικό περιεχόμενο του αρχικού σήματος παρουσιάζεται εμφανώς αλλοιωμένο.

γ) Το γεγονός ότι κάθε γλώσσα έχει μια διαφορετική βάση φωνημάτων και φωνητικών κανόνων καθιστά δύσκολη την δημιουργία μιας διεθνούς βάσης δεδομένων τραγουδιστών φωνημάτων¹.

Οι βελτιώσεις που χρειάζεται να γίνουν σταδιακά έτσι ώστε να αναπτυχθεί η φυσικότητα του ηχοχρώματος της τραγουδιστής φωνής, η ομοιομορφία των ηχοχρωμάτων σε διάφορες συχνότητες και η ομαλή προφορά τους εστιάζεται στα εξής :

-στην έρευνα γύρω από την βελτιστοποίηση των τεχνικών σύνθεσης [27]

-στην ακουστική ανάλυση φυσικών φωνών γύρω από την συμπεριφορά της γλωττίδας και του αντηχείου

-στο χώρο της αυτόματης εκτέλεσης βάσεις κανόνων (έτσι ώστε να ακούγεται φυσικά μια φωνή που «εκτελεί» μια παρτιτούρα).¹

¹ Ένα μεγάλο λεξικό φωνημάτων και διφώνων σε διάφορες γλώσσες και μια πολυκατευθυντική προσέγγιση μεταξύ των.

2.2. Ο έλεγχος των παραμέτρων.

Ένα μεγάλο μέρος του ερευνητικού πεδίου στην ανάλυση, διαχείριση και σύνθεση του φωνητικού σήματος εστιάζεται στον έλεγχο μιας συνθετικής τραγουδιστής φράσης [12] :

α) Σε ένα πρώτο επίπεδο υπάρχει μια βελτίωση του ελέγχου της ταλάντωσης της γλωττίδας σε αλληλεπίδραση με τους αναπνευστική προσπάθεια που καταβάλλει ο κάθε τραγουδιστής και άλλων ακουστικών μηχανισμών. Σε γενικές γραμμές πρέπει να επανεξεταστούν οι έρευνες που έχουν γίνει στο χώρο της ακουστικής ανάλυσης της φωνής και να προσανατολιστούν περισσότερο στην επινόηση κανόνων που σχετίζονται με την δραστηριότητα των φωνητικών χορδών κατά την διάρκεια του τραγουδιού και την αλληλεπίδραση μεταξύ φωνητικής προσπάθειας (χορδές, αναπνευστικοί μύς) και φωνητικού αποτελέσματος (αντηχείο-άρθρωση)[23]. Σε αυτή την περίπτωση η σύνθεση φωνής με φυσικά μοντέλα θεωρείται η πιο κατάλληλη[27].

β) Σε ένα δεύτερο επίπεδο υπάρχει μια ερευνητική τάση για τον συσχετισμό του ελέγχου των παραμέτρων στο πεδίο της συχνότητας² με την άμεση αντίληψη αυτών[2],[3],[16],[34] : οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι συχνότητες, πλάτη και εύρη ζώνης των formants καθώς και δευτερεύοντα στοιχεία όπως το jitter και vibrato .

γ) σε ένα τρίτο επίπεδο οι ερευνητές ασχολούνται με τους κανόνες περιγραφής της εξέλιξης των formants στο χρόνο, κανόνες αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων η ερωτήσεις που αφορούν την αντίληψη των σημάτων ελέγχου από περιφερειακές συσκευές έτσι ώστε να ενταχθούν στα πλαίσια ελέγχου ενός συνθετητή. [27],[22],[15].

3. Εφαρμογές στο χώρο της Μουσικής

Πόσοι συνθέτες δεν ονειρεύτηκαν την αυτόματη μετατροπή των στίχων σε συνθετική φωνή, την αλλαγή φωνητικών ηχοχρωμάτων σε ένα δεδομένο μουσικό κείμενο, το πειραματισμό διαφορετικών φωνητικών τεχνικών σε μια συγκεκριμένη φράση?

Η εξάπλωση των δειγματοληπτών (sampler) και η χρήση προηχογραφημένων ήχων που ακούγονται φυσικοί σε σχέση με τους συνθετικούς, έχει οδηγήσει μεγάλες εταιρείες παραγωγής λογισμικών Μουσικής τεχνολογίας στην σύνθεση φωνών με την χρήση δειγμάτων (και όχι μόνο), καθώς και την ανάπτυξη τεχνικών μετατροπής το μουσικού κειμένου με στίχους σε συνθετική φωνή. Από την άλλη πλευρά, ο σχεδιασμός νέων συστημάτων ελέγχου των παραμέτρων είτε σε λογισμική είτε σε υλισμική μορφή (όπως το MIDI ακκορντεόν) φέρνει την έρευνα αυτού του περίπλοκου ζητήματος πιο κοντά στην μουσική εκτέλεση και την χρήση του από μουσικούς και συνθέτες. Τέλος, στο χώρο της φωνητικής παιδαγωγικής η χρήση ειδικών λογισμικών που αναπαριστούν στην οθόνη την ακουστική λειτουργία της τραγουδιστής φωνής με φυσική μοντελοποίηση (physical modeling), ανοίγουν νέους

¹ Οι ερευνητές πρέπει να εστιάσουν περισσότερο στην ανάλυση εκτελέσεων από τραγουδιστές και να μάθουν πως χρησιμοποιούν τα ακουστικά χαρακτηριστικά για έκφραση. Εξ άλλου υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για βάσεις δεδομένων φωνών και για την χρήση τους σε λογισμικά συρραφής δειγμάτων .

² Πεδίο συχνότητας

ορίζοντες στους καθηγητές φωνητικής και τους τραγουδιστές για τη καλύτερη κατανόηση της, την ποιοτική αξιολόγηση της και των περασμάτων των ρεζίστρων .

3.1. Σύνθεση τραγουδιστής φωνής από μουσικό κείμενο

Μόλις το τελευταίο χρόνο το όνειρο των συνθετών -χρηστών της μουσικής τεχνολογίας για έλεγχο των φωνητικών κυττάρων και την μετατροπή μουσικού κειμένου σε τραγουδιστή φωνή άρχισε να γίνεται πραγματικότητα. Δύο νέα πολύ ενδιαφέροντα λογισμικά συνθετικής φωνής το CANTOR¹(VirSYn) και το VOCALOID²(Yamaha). εμφανίστηκαν στην διεθνή αγορά και θέτουν τα θεμέλια για μια νέα σειρά λογισμικών *score- to singing- synthesis of the voice*: Τα νέα αυτά λογισμικά προσεγγίζουν την σύνθεση τραγουδιστής φωνής με ένα πιο άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο από τα ερευνητικά προγράμματα που αναφέραμε³. Αν και ο τελικός ήχος απέχει κατά πολύ από την πραγματικότητα,⁴ η εμφάνιση των προγραμμάτων αυτών -για τη σύνθεση τραγουδιστών φωνών (συνθετικών η δειγμάτων) σε φράσεις σε συνδυασμό με τα τονικά ύψη, εντάσεις, διάρκειες και ηχοχρώματα -ανοίγει νέους ορίζοντες στο χώρο της Μουσικής Τεχνολογίας και δίνει μια *κοινωνική διάσταση* της συνθετικής τραγουδιστής φωνής.

Πολλές προσεγγίσεις διαφαίνονται άκρως ενδιαφέροντες σε αυτό το χώρο όπως ο έλεγχος των φωνητικών συνθέσεων (για φωνητικό σύνολο η για φωνή και οργανικό σύνολο) με χρήση διαφορετικών ηχοχρωμάτων η δημιουργία τεχνητών τραγουδιστών φωνών από βάση δεδομένων δειγμάτων της φωνής διασήμων τραγουδιστών.

3.2. Σύνθεση τραγουδιστής φωνής και εκτέλεση

Με ποιο τρόπο μπορούν οι εκτελεστές να εκμεταλλευτούν τα αποτελέσματα από το ερευνητικό χώρο της συνθετικής φωνής? Με άλλα λόγια πως μπορούμε να «εκτελέσουμε» φωνές με χέρια μας για να ανακτήσουμε το «χαμένο»όργανο της μουσικής Πληροφορικής?

Η πρώτη προσπάθεια απόδοσης ηχοχρωμάτων φωνής με τα χέρια ανάγεται στο θρυλικό όργανο αιθερόφωνο (Theremin) που με μαγικό τρόπο ερμήνευε η Clara Rockmore στην δεκαετία του '20 στην Αμερική. Ακολουθία φωνηέντων τύπου /α/

¹ Η εταιρία προϊόντων μουσικής τεχνολογίας *Virsyn* παρουσίασε τον περασμένο Μάιο στην διεθνή έκθεση της Φρανκφούρτης Musikmesse Prolight+sound2004a ένα φωνητικό συνθεσάιζερ 8 φωνών (Mac/Win) (<http://www.kvr-vst.com/get/984.html>) που δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να εισάγουν συλλαβές η λέξεις στα Αγγλικά και να τις εκτελέσουν μελωδικά από ένα MIDI πληκτρολόγιο σε real-time. Δίνεται επίσης η ελευθερία στους χρήστες να επέμβουν στο ηχοχρώμα της συνθετικής φωνής καθορίζοντας το βασικό φάσμα για τα φωνήεντα και τα σύμφωνα. Η εφαρμογή επίσης περιλαμβάνει ένα επεξεργαστή που προσφέρει έλεγχο σε πραγματικό χρόνο σε vibrato, βάθος και αλλαγές στο χαρακτήρα της φωνής που καθορίζεται από το φύλο.

² Το πρόγραμμα *Vocaloid* (www.vocaloid.org) της YAMAHA , χρησιμοποιεί την μέθοδο σύνθεσης με συναρμολόγηση ηχητικών δειγμάτων (Frequency-Domain Singing Articulation Splicing and Shaping) που έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά στα εργαστήρια της. Με αυτό το σύστημα οι αρθρώσεις της τραγουδιστής φωνής (συλλογή από φωνητικά κύτταρα, η φωνητικών εκφράσεων όπως το vibrato) έχουν συλλεχθεί από διάφορες ηχογραφήσεις τραγουδιστών και αποθηκεύτηκαν σε μια βάση δεδομένων αφού μετατράπηκαν στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain).

³ Που έχουν σαν επίκεντρο την αναζήτηση των κατάλληλων τεχνικών για την βελτίωση της φυσικότητας, ακρίβειας και ελέγχου των παραμέτρων της συνθετικής τραγουδιστής φωνής.

⁴ Παρουσιάζονται μεγάλες ελλείψεις στο τρόπο διασύνδεσης των διφώνων και στην φασματική τους ποιότητα σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες.

σε υψηλές συχνότητες που εκτελείται με δεξιοτεχνία ώστε να μη γίνεται διακριτή η διαφορά μεταξύ συνθετικού και πραγματικού. Στις μέρες μας συσκευές με γάντια αισθητήρων και άλλου τύπου MIDI ελεγκτές δίνουν την δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να εκτελέσουν δείγματα φωνητικών ήχων από μια βάση δεδομένων. Η πιο προσιτή προσέγγιση στο θέμα της φωνής είναι η εκτέλεση φωνητικών δειγμάτων η συνθετικών φωνημάτων με την χρήση MIDI ακκορντεόν [12] καθώς παρέχει την δυνατότητα εκτέλεσης μέσω ενός συγκεκριμένου διαδοχέα μουσικών ακολουθιών με την εκφραστική δυνατότητα της φυσούνα. Αξιόλογα είναι επίσης τα μοντέλα Squeezevox¹[7] and COWE² που τελούν υπό ανάπτυξη στο Princeton University από την ερευνητική ομάδα του P.COOK. Τέλος, μια διαφορετική προσέγγιση στην παραγωγή συνθετικής φωνής μέσω εκτέλεσης (performance driven singing voice) είναι η περίπτωση όπου οι παράμετροι (συχνότητα, ένταση, διάρκεια) δίνονται απευθείας από την διάδραση οργάνου-υπολογιστή και γίνεται αυτόματη κωδικοποίηση³ τους σε συνθετική φωνή.[18].

3.3. Ηλεκτρακουστική μουσική

Ορισμένοι συνθέτες σύγχρονης μουσικής έχουν χρησιμοποιήσει μέχρι τώρα σύνθεση τραγουδιστών φωνών στα έργα τους μέσα από μια πειραματική αναζήτηση των ορίων του φωνητικού και του οργανικού χαρακτήρα των ηχοχρωμάτων: μετάλλαξη του φωνητικού ηχοχρώματος κα υβριδική του μείξη με άλλα οργανικά ηχοχρώματα [13]. Η ηχοχρωματική μεταμόρφωση, η δημιουργία «αμφίβολων» ηχοχρωμάτων, και η σταδιακή μετάλλαξη του φωνητικού ηχοχρώματος σε οργανικό, καθώς και η εξώθηση της φωνής στα άκρα της είναι μερικές από τις τεχνικές των συνθετών γύρω από την χρήση *αλληγορικών φωνών* στα έργα τους. Σε αντίθεση με την έρευνα και τους χρήστες της τρέχουσας μουσικής τεχνολογίας οι συνθέτες της λόγιας ηλεκτρακουστικής και σύγχρονης μουσικής δεν ενδιαφέρονται για την μετατροπή κειμένου-παρτιτούρας σε φωνή αλλά για τις ηχοχρωματικές προσομοιώσεις και προεκτάσεις της φωνής που τους παρέχει ένα πρόγραμμα.

3.4. Φωνητική παιδαγωγική

Στο χώρο της φωνητικής παιδαγωγικής προγράμματα σαν το SPASM/SINGER and MUSSE/RULSUS έχουν αναδειχθεί σε χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση όχι μόνο της λειτουργίας του φωνητικού συστήματος κατά την διάρκεια του τραγουδιού αλλά και της μετάβασης από την μια συχνοτική περιοχή στην άλλη (ρεζίστρα). Με την βοήθεια του υπολογιστή ο τραγουδιστής μαθαίνει να χρησιμοποιεί πιο αποτελεσματικά τις φωνητικές του χορδές σε σχέση με το αντηχείο αποφεύγοντας λάθη που θα μπορούσε να διορθώσει εμπειρικά, όπως εξ άλλου γίνονταν μέχρι τώρα η διδασκαλία του τραγουδιού.. Από την άλλη πλευρά η επανασύνθεση ενός φωνήεντος με την χρήση του σωστού η λάθους αντηχείου δίνει

¹ Το Squeezebox είναι μια συσκευή τύπου ακκορντεόν και επιτρέπει τον έλεγχο της ηχητικής σύνθεσης φωνής σε real-time. (<http://soundlab.cs.princeton.edu/research/controllers/squeezevox>)

² Με το διασυνδεδετικό COWE ο χρήστης μπορεί να ελέγξει μια σειρά φωνητικών τεχνικών (κλάμα μωρού, bel canto, Θιβετιανούς μοναχούς, κτλ)

³ Ένας αποκωδικοποιητής πληροφοριών μετατρέπει τη δεδομένη πληροφορία σε προσομοίωση ανθρώπινης φωνής

την δυνατότητα στον τραγουδιστή να καταλάβει καλύτερα την ακουστική λειτουργία του φωνητικού του οργάνου. Ιδιαίτερα, η χρήση φυσικής μοντελοποίησης (physical modeling) όπως είναι το μοντέλο Spasm singer[5], [6] του Perry Cook, δίνει μια οπτική επαφή του τραγουδιστή με την ακουστική λειτουργία του οργάνου του και την ευκαιρία να το διαχειριστεί με μεγαλύτερη ευελιξία.

3.5.Μετεπεξεργασία και «ανάσταση» φωνών του παρελθόντος

Η σύνθεση τραγουδιστής φωνής μπορεί να χρησιμοποιηθεί από βοηθητικό εργαλείο έως και βασικό εργαλείο στο χώρο της μετεπεξεργασίας του ήχου στο Στούντιο, δίνοντας την δυνατότητα στον ειδικό ηχολήπτη να διορθώσει με αντικατάσταση κάποια τυχόν λάθη της ηχογράφησης (όταν δεν υπάρχει περίπτωση επανηχογράφησης) [27] αλλά και να αναπαράγει την φωνή ενός τραγουδιστή μέσα από ηχητικά δείγματα του ίδιου. Στην περίπτωση ανασύστασης μιας φωνής του παρελθόντος, όπως έγινε στην περίπτωση της φωνής του καστράτο Farinelli [8] με τις νέες τεχνικές morphing, είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων με διάφορες φωνές καθώς και η ψυχοακουστική μελέτη του ηχοχρώματος που προκύπτει από την συναρμολόγηση των φωνών.

3.6.Συστηματική μουσικολογία: Μουσική Αισθητική και Εθνομουσικολογία

Στο χώρο της συστηματικής μουσικολογίας τα εργαλεία ανάλυσης και σύνθεσης τραγουδιστής φωνής ανοίγουν νέους ορίζοντες στην υπολογιστική εξερεύνηση αισθητικών προτύπων της Δυτικοευρωπαϊκής μουσικής καθώς επίσης και στην ποσοτική (και όχι) ποιοτική ταξινόμηση των τραγουδιστών φωνών [29].¹ Το ερευνητικό αυτό πεδίο αξιολόγησης της ηχοχρωματικής ποιότητας των φωνών σαν ένα εργαλείο της συστηματικής μουσικολογίας βρίσκεται υπό ανάπτυξη.

Τέλος στο χώρο της Εθνομουσικολογίας, έχουν γίνει μεμονωμένες μελέτες για Εξωευρωπαϊκές τεχνικές όπως η μελέτη (ανάλυση και σύνθεση) της φωνητικής τεχνικής Θιβετιανών μοναχών η του διφωνικού τραγουδιού των Μογγόλων[30]. Στον ανεξερεύνητο αυτό χώρο υπάρχουν μεγάλες προοπτικές έρευνας για την μελέτη της φωνής και της ποιοτικής της ταξινόμησης στην Δυτική μουσική καθώς και στην διερεύνηση της σχέσης μεταξύ δυτικής και Εξωευρωπαϊκής φωνητικής τεχνολογίας.

3.7.Προοπτικές έρευνας στον Ελληνικό χώρο

Παρά την αλματώδη ανάπτυξη εργαλείων για την σύνθεση ομιλούσας φωνής στην Ελληνική γλώσσα δεν έχουν γίνει ιδιαίτερες έρευνες στην ανάλυση και

¹ Ο διάσημος ερευνητής στο χώρο της ακουστικής φωνής Σουηδός J.Sundberg (*Music and speech Department, KTH, Stockholm*) τα τελευταία χρόνια ασχολείται με ζητήματα αισθητικής της φωνής διαχωρίζοντας την ηχοχρωματικά κακής ποιότητας φωνή με τις ωραίες και γεμάτες φωνές της όπερας. Σε συγκεκριμένα πειράματα που έχει διεξάγει παίρνει φωνές που θεωρούνται άσχημες (με χαμηλό φωνοσυντονισμό τραγουδιστ-singer's formant, ασθενή θεμελιώδη συχνότητα, ασθενείς αρμονικοί, ακανόνιστο vibrato και ένα ασταθές μέσο τονικό ύψος). Με τις κατάλληλες διορθώσεις πάνω στις παραμέτρους που αναφέραμε μέσω της σύνθεσης, η «άσχημη» φωνή αλλάζει προς το καλύτερο, πλησιάζοντας την πλούσια φωνή του bel canto.

σύνθεση της τραγουδιστής φωνή στον Ελληνικό χώρο¹ και ιδιαίτερα στον τομέα της Παραδοσιακής και Λόγιας Ελληνικής φωνής.

Προοπτικές έρευνας ανοίγονται σε πολλά θέματα όπως :

- -η ανάλυση τραγουδιστής φωνής στην Ελληνική γλώσσα (ανδρικής , γυναικείας, παιδικής) και η ακουστική μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών της
- -δημιουργία βάσης δεδομένων με φωνήματα και δίφωνα
- -εξαγωγή των παραμέτρων
- -ανεύρεση κατάλληλων τεχνικών σύνθεσης
- μελέτη των φωνητικών ιδιωμάτων της τραγουδιστής Ελληνικής φωνής στο χώρο και στο χρόνο .

α) μελέτη φωνητικών τεχνικών και ιδιωμάτων ανά περιοχές εξετάζοντας την χρήση του αντηχείου στις διάφορες παραδόσεις, καθώς επίσης μελέτη της ποικιλίας των ιδιωμάτων

β) μελέτη φωνητικών τεχνικών ανάλογα με το είδος της μουσικής και το στυλ (ρεμπέτικο, δημοτικό, λαϊκό, Bel canto) σε συνδυασμό με το ανάλογο μουσικό σύστημα.

- ανάπτυξη ενός λογισμικού συνθέτη Ελληνικής τραγουδιστής φωνής text-to-speech,² που θα δίνει την δυνατότητα μετατροπής ενός δεδομένου μουσικού κειμένου (παρτιτούρα-στίχοι) σε συνθετική φωνή και αλλαγή των φωνητικών τεχνικών ανάπτυξη ενός υποσυστήματος συνθέτη Ελληνικής τραγουδιστής με ειδικό interface για τυφλούς μουσικούς.

4. Συμπεράσματα

Τα συστήματα σύνθεσης τραγουδιστής φωνής βρίσκονται σε άθηση τα τελευταία χρόνια αν και ο χώρος προσφέρεται για περαιτέρω έρευνα, καθώς υπάρχει ακόμη αρκετός δρόμος να διανυθεί μέχρι τη τελειοποίηση των συστημάτων αυτών. Στα πλαίσια της διεθνούς ερευνητικής κοινότητας υπολείπεται να γίνουν έρευνες στην βελτίωση των συνθετητών φωνής, στην αυτόματη εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων από ηχογραφήσεις , στις τεχνικές εκμάθησης για αυτόματη κατασκευή κανόνων άρθρωσης, κανόνων εκτέλεσης και κανόνων φωνητικής . Υπολείπεται επίσης μια περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των ακουστικών και εκτελεστικών χαρακτηριστικών της συνθετικής φωνής, και τον σχεδιασμό ενός «έξυπνου» συνθετητή που θα συνδυάζει την σύνθεση φωνής με κανόνες που σχετίζονται με την εκτέλεση , την άρθρωση και την φωνητική τεχνική.

¹ Μια απόπειρα σύνθεσης τραγουδιστής Ελληνικής φωνής έγινε από την ομάδα του Δ.Καμαρωτού πάνω στο μοντέλο Spasm/singer του P.Cook: Kamarotos D. , Diamantopoulos T., Philippis G. "Igdīs: A modern Greek text to speech/singing program for the spasm /singer instrument". In *ICMC'93proceedings*, Tokyo, 1993. Όσον αφορά την ακουστική ανάλυση τραγουδιστής φωνής σποραδικά έχουν γίνει κάποιες έρευνες μεταξύ των οποίων αξιοσημείωτη η συγκριτική μελέτη των φωνηέντων της Βυζαντινής μουσικής με τα αντίστοιχα του οπερατικού τραγουδιού στο : Δ. Δελβινιώτης, Σ.Θεοδορίδης,Γ.Αμαργιαννάκης: "Σύγκριση των φωνηέντων της Βυζαντινής μουσικής και του ανδρικού οπερατικού τραγουδιού», *πρακτικά Δεύτερου Συμποσίου Μουσικής Πληροφορικής*, Ιόνιο Πανεπιστήμιο 2000.

² Η πρόταση της γράφουσας είναι να υπάρξει συνεργασία μεταξύ του εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής και τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών με αντίστοιχο Πανεπιστημιακό εργαστήριο Πληροφορικής για την συνεργασία τους στην ανάπτυξη του λογισμικού ΑΟΙΔΟΣ(σύμφωνα με τον Όμηρο ο Αοιδός συνθέτει το τραγούδι του κατά την διάρκεια της παράστασης)

Συμπέρασμα, το πρόβλημα ελέγχου των παραμέτρων δεν πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο από την πλευρά της φυσιολογικής λειτουργίας της φωνής αλλά επίσης και από την βιολογική της πλευρά σε συνεργασία με την έρευνα πάνω στις γνωστικές επιστήμες και την άντληση πληροφοριών για την επίδραση των ψυχολογικών καταστάσεων στο τραγούδι και την σπουδαιότητα της ανατομίας του σώματος στην απόδοση (αντηχία, γλώσσα, φωνητικές χορδές, κτλ).

Μέχρι την ανάπτυξη αυτών των μεθοδολογιών, οι εφαρμογές που προσφέρονται στις μέρες μας της συνθετικής τραγουδιστής φωνής στον Μουσικό χώρο είναι πολλές : σύνθεση τραγουδιστής φωνής μέσω παρτιτούρας (score to singing synthesis), μουσική εκτέλεση, μουσική παιδαγωγική, μετεπεξεργασία και ανασύσταση φωνών του παρελθόντος και συστηματική μουσικολογία. Οι προοπτικές έρευνας στον Ελληνικό χώρο είναι ευοίωνες και θα εμπλουτίσουν το χώρο της συστηματικής μουσικολογίας και σύνθεσης με σημαντικά εργαλεία γύρω από την φωνή.

5.Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Berndtsson, G. *Systems for synthesising singing and for enhancing the acoustics of music rooms*. Dissertation, KTH, Department of Speech communication and Music Acoustics, Royal Institut of Technology, Stockholm, 1995
- [2] Bonada J., Loscos A. "Sample –based singing voice synthesizer by spectral concatenation", *Proceedings of Stockholm Music Acoustics Conference 2003*, Stockholm Sweden, 2003
- [3] Carlson,G. and Ternström,S. and Sundberg, J. "A new digital system for singing synthesis allowing expressive control", *ICMC'91 proc.*, Montréal, 1991
- [4] Chowning J. "Computer Synthesis of Singing Voice", In *ICMC '81 proceedings*, La Trobe University, Melbourne, 1981
- [5] Cook P. "Spasm, a real -time Vocal Tract Physical Model Controller; and Singer the companion Software Synthesis System", *Computer Music journal*, 17(1),MIT, Boston, 1993
- [6] Cook. P. "Singing voice synthesis: History, current work, and future directions", in *Computer music journal*, vol. 20 no 3, MIT Press. p.27, 1996
- [7] Cook, P. R., Leider C.."Squeeze Vox: A New Controller for Vocal Synthesis Models," in *ICMC2000 Proceedings* , Berlin, 2000
- [8] Depalle Ph., G. Garcia, X. Rodet "A virtual castrato" , in *ICMC 1994 proceedings*, Aarhus, Denmark, 1994
- [9] Dufourt H. "L'instrument philosophe",entretien avec p. Szendy, *Cahiers de l'Ircam no7*,Paris, 1996
- [10] Fant G. *Speech sounds and features*, MIT press.Cambridge, 1973
- [11] Gael R. *Rules for fundamental frequency transition in singing synthesis*. Dissertation,\Dept of Speech Communication and acoustics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1990
- [12] Georgaki A. "Towards the conception of a vocal synthesizer", *Proceedings of the VIth symposium of Brazilian Computer Music*, Rio de Janeiro, Brazil, 1999
- [13] Georgaki A. "Proteic voices in the computer music repertory", in *ICMC 1999 proceedings*, Beijing, China, 1999
- [14] Georgaki A. *Problèmes techniques et enjeux esthétiques de la voix de synthèse dans la recherche et création musicales*. Thèse de doctorat, EHESS/IRCAM, Paris, 1998

- [15] Gibson, I.S., Howard, D.M., Tyrell, A.M. "Real-time singing synthesis using a parallel processing system", *Proc. of the IEE colloquium on Audio and music technology; the creative challenge of DSP*, IEE Digest 98/470, 8/1-8/6, 1998
- [16] Lu H.-L. *Toward a High-Quality Singing Synthesizer with Vocal Texture Control*, PhD thesis, Stanford University, USA, 2002
- [17] Kob M., "Singing voice modeling - as we know it today", in *SMAC 2003 Proceedings*, Stockholm, 2003
- [18] Kim Y. E. "Structured Encoding of the Singing Voice using Prior Knowledge of the Musical Score", *Proc. 1999 IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New Paltz, New York, Oct. 17-20, 1999.
- [19] Lomax K. *The Analysis and Synthesis of the Singing Voice*. PhD thesis, Oxford, 1997
- [20] Macon, M. W., L. Jensen-Link, J. Oliverio, M. Clements, and E. B. George, "Concatenation-based MIDI-to-singing voice synthesis," *103rd Meeting of the Audio Engineering Society*, New York, 1997.
- [21] Macon M. W., L. Jensen-Link, J. Oliverio, M. Clements, and E. B. George, "A system for singing voice synthesis based on sinusoidal modeling," *Proc. of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 1*, pp.435-438, 1997.
- [22] Meron Y. *High Quality Singing Synthesis using the Selection-based Synthesis Scheme*. PhD thesis, University of Tokyo, 1999
- [23] Pierucci P, Paladin. "A Singing voice analysis and synthesis system through glottal excited formant resonators", in *ICMC'97 Proceedings*, Thessaloniki, 1997
- [24] Rossitier D., Howard D. "Voice source and acoustic output qualities for singing synthesis", in *ICMC'94 Proceedings*. Aarhus, Denmark, 1994
- [25] Rodet X. et Al. "The Chant project : From Synthesis of the singing voice to sythesis in general". *Computer Music Journal* 8 (3) (pp. 15-31), MIT Press, 1984
- [26] Rodet X., A. Lefèvre: "The Diphone program: New features, new synthesis methods and experience of musical use", *proc. Int. Comp. Music Conference*, Thessaloniki, 1997.
- [27] Rodet X. "Synthesis and processing of the singing voice", *Proc. 1st IEEE Benelux Workshop on Model based Processing and Coding of Audio (MPCA-2002)*, Leuven, Belgium, 2002(3), pp. 15-31, 1984.
- [28] Sundberg John . "Synthesis of singing by rule. In *Current directions of computer music research*, MIT Press., 1989[30]
- [29] Sundberg J, "Sounds of singing. A matter of mode, style, accuracy, and beauty", invited paper, *4th Pan European Voice Conference*, Stockholm, 2001
- [30] Tisato G., Maccarini A., Ricci . «Analysis and synthesis of diphonic singing", *Bulletin d'Audiophonologie*, vol. VII no 5 et 6 - 619 -648, Ann. Sc. Aniv. Franche -Comté, 1991.
- [31] Virsyn's "Cantor" Vocal synthesis software: <http://www.kvr-vst.com/get/984.html>
- [32] Xydias G. and G. Kouroupetroglou: "The DEMOSTHeNES Speech Composer", *Proc. of the 4th ISCA Tutorial and Research Workshop on Speech Synthesis*, Perthshire, Scotland, August 29th - September 1st, 2001, pp 167-172.
- [33] Yamaha Corporation Advanced System Development Center. *New Yamaha VOCALOID Singing Synthesis Software Generates Superb Vocals on a PC*, 2003 (<http://www.vocaloid.com>)
- [34] Youngmoo E. K. *Singing Voice Analysis/Synthesis*, PhD thesis, Program in Media Arts and Sciences, School of Architecture and Planning, MIT, Boston, 2003

Ανάλυση και απεικόνιση διαταραχών ακουστικών σημάτων μουσικών οργάνων ή/και φωνής

Κων/νος Πασιτιάδης
Δρ. Ηλ/γος Μηχ/κός Α.Π.Θ.
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών &
Μηχ/κών Υπολογιστών Α.Π.Θ.
54006 Θεσσαλονίκη
e-mail: pastiadi@auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου
Αν. Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών &
Μηχ/κών Υπολογιστών Α.Π.Θ.
54006 Θεσσαλονίκη
e-mail: pap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια νέα αναλυτική-υπολογιστική μέθοδος για την εκτίμηση των διαταραχών σημάτων ψευδο-περιοδικών πηγών. Μια ευρεία κατηγορία ήχων παράγεται με διαμόρφωση του σήματος μιας γλωττιδικής πηγής από το σώμα ενός μουσικού οργάνου ή τον μηχανισμό παραγωγής φωνής. Η εργασία επικεντρώνεται στον ταυτόχρονο ποιοτικό διαχωρισμό και ποσοτικό προσδιορισμό διαταραχών jitter/shimmer/θορύβου, με χρήση συγχρονισμένης ανά περίοδο (pitch synchronous) ανάλυσης ζευγών γλωττιδικών παλμών. Σε δεύτερη φάση, αξιολογείται η εισαγωγή μιας νέας γραφικής απεικόνισης (“Διαταραχόγραμμα”-“Disturbogram”) για περιγραφή διάφορων μορφών γλωττιδικής διέγερσης με στόχο αφενός την απόδοση χαρακτηριστικών ποσοτήτων διαταραχών αλλά και αφετέρου τον οπτικό διαχωρισμό και διάκρισή τους. Το “Διαταραχόγραμμα” και η υποκείμενη αναλυτική μέθοδος μπορούν να βρουν εφαρμογή στην επεξεργασία και σύνθεση φωνής, στην μελέτη της ακουστικής μουσικών οργάνων, την οργανολογία, την εκτέλεση μουσικών οργάνων, την σύνθεση μουσικών ήχων-ηχοχρωμάτων, κ.α.

ABSTRACT

The paper presents a novel analytical and computational method for the estimation of disturbances of pseudo-periodic sources such as voice or musical instruments. The work focuses on pitch synchronous simultaneous estimation of jitter/shimmer/noise based on analysis using pairs of consequent glottal pulses. A new graphical tool ('Disturbogram'), which may prove useful in voice and speech sciences, musical acoustics, organology, performing, and timbre synthesis, is introduced for displaying, qualified separation and quantification of the computed disturbances

Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι μια ευρεία κατηγορία σημάτων όπως οι ήχοι μουσικών οργάνων και η ανθρώπινη φωνή χαρακτηρίζονται από ψευδοπεριοδικότητες, ή διαταραχές πλάτους, περιόδου και παρουσία θορύβου. Η μελέτη των διαταραχών αυτών μπορεί να συμβάλει στην αρτιότερη περιγραφή των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή των ήχων αυτών, με εφαρμογές στην επεξεργασία φωνής, την μουσική ακουστική, κ.α. Συγκεκριμένα, είναι σαφής η ανάγκη για πιστοποίηση και των ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων των εφαρμοζόμενων θεραπευτικών μεθόδων και αγωγών στην αντιμετώπιση της παθολογικής φώνησης, ενώ μεγάλη είναι η σημασία της περιγραφής της λειτουργίας

του μηχανισμού παραγωγής μουσικών ήχων από διάφορες κατηγορίες μουσικών οργάνων (π.χ. πνευστά με γλωττίδες, χελική διέγερση, κ.ά.) [11],[5],[7],[1],[9],[6]. Το πρόβλημα του διαχωρισμού και της εκτίμησης διαταραχών στο σήμα της γλωττιδικής διέγερσης είναι γενικά ευκολότερο, δεδομένης της απουσίας επίδρασης των διαμορφωτικών φίλτρων (σώμα μουσικών οργάνων, στοματοφάρυγγας, κ.ά.). Η εργασία αυτή περιγράφει μια αναλυτική και απεικονιστική μέθοδο που προτείνεται για την περιγραφή των διαταραχών της γλωττιδικής λειτουργίας. Αν και η ανάλυση παρουσιάζεται για την περίπτωση της ανθρώπινης γλωττίδας, αντίστοιχη είναι και η αντιμετώπιση για άλλων γλωττιδικών διεγέρσεων (π.χ. πνευστά μουσικά όργανα).

1. Εκτίμηση jitter/shimmer/SNR με συγχρονισμένη ανάλυση ακολουθίας ζευγών γλωττιδικών παλμών

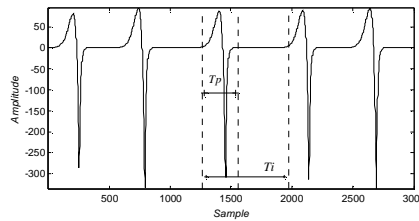
Ας θεωρήσουμε το εξής μοντέλο ενθόρυβης γλωττιδικής λειτουργίας:

$$g(n) = p(n) + w(n) \quad (1)$$

όπου $p(n)$ είναι μια ακολουθία N_p παρόμοιων γλωττιδικών παλμών με διαφορετικά πλάτη και περιόδους, και $w(n)$ είναι η συνιστώσα γλωττιδικού θορύβου που θεωρείται ευρείας ζώνης και μηδενικής μ.τ.. Έχουμε δηλαδή:

$$p(n) = \sum_i A_i \cdot p_i(n - T_{i-1}), \quad p_i(n) = \begin{cases} p_p(n) & 0 \leq n < T_p - 1 \\ 0 & T_p \leq n < T_i \end{cases} \quad (2)$$

όπου $p_p(n)$ είναι ένας πρότυπος παλμός διάρκειας T_p , $A_i > 0$ είναι το πλάτος του i -οστού γλωττιδικού παλμού της ακολουθίας, και T_i η διάρκειά του (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ακολουθία γλωττιδικών παλμών παρόμοιας μορφής

Για ένα τμήμα $p_{2p}(n)$ της $p(n)$ που περιλαμβάνει δύο γλωττιδικούς παλμούς, ο όρος $\frac{1}{T_i + T_{i+1}} \sum_n p_{2p}(n) \cdot p_{2p}(n-t)$ θα εμφανίζει μέγιστα για $t=0$ και $t = \pm T_i$. Συγκεκριμένα, και εφόσον η ακολουθία $p_{2p}(n)$ αποτελείται από τις ακολουθίες $A_i \cdot p_i(n)$ και $A_{i+1} \cdot p_{i+1}(n - T_i)$, τότε προκύπτει ότι:

$$R_{2p}(t) = \frac{1}{T_i + T_{i+1}} \sum_n p_{2p}(n) \cdot p_{2p}(n-t) = \frac{1}{T_i + T_{i+1}} \left(\begin{aligned} & A_i^2 \sum_n p_i(n) \cdot p_i(n-t) + A_{i+1}^2 \sum_n p_{i+1}(n - T_i) \cdot p_{i+1}(n - T_i - t) + \\ & + A_i A_{i+1} \sum_n p_i(n) \cdot p_{i+1}(n - T_i - t) + A_i A_{i+1} \sum_n p_{i+1}(n - T_i) \cdot p_i(n - t) \end{aligned} \right) \quad (3)$$

για $t = -(T_i + T_{i+1}) \mathbf{K}(T_i + T_{i+1})$ (Σχήμα 2).

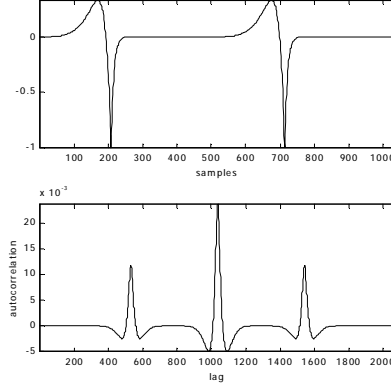
Αποδεικνύεται [12] ότι

$$|T_i - T_{i+1}| = \left| \frac{T_i + 1}{2} - T_{i+1} - T_{i+1} \right| = \left| \frac{T_i + 1}{2} - 2T_{i+1} \right|, \text{ όπου } T_i = 2 * (T_i + T_{i+1}) - 1 \quad (4)$$

Έχοντας εκτιμήσεις των $T_i, i = 1 \mathbf{K} N_p$, υπολογίζουμε τα:

$$Jitt(i) = \frac{\frac{1}{N_p - 1} |T_i - T_{i+1}|}{\bar{T}}, \text{ όπου } \bar{T} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} T_i \text{ και } \sum_i Jitt(i) = \frac{\frac{1}{N_p - 1} \sum_i |T_i - T_{i+1}|}{\bar{T}} = \frac{MRjitt^1}{\bar{T}} \quad (5)$$

που αποτελούν δείκτες της διαταραχής περιόδου [10].



Σχήμα 2: Ζεύγος γλωττιδικών παλμών και αυτοσυσχέτιση

Ταυτόχρονα, αποκόπτοντας ένα τμήμα της $R_{2p}(t)$ μήκους T_r (τέτοιο ώστε $R_p(t) \approx 0$, για $|t| \geq T_r/2$)¹ γύρω από την θέση $t = T_i$ ή $t = -T_i$, αποδεικνύεται [12]:

$$\sqrt{a_i} = \frac{|A_i - A_{i+1}|}{\bar{A}} \quad (6)$$

όπου: $\bar{g}(n) = \frac{1}{N_p} \sum_i w_{pT_{\min}}(n) \cdot (A_i \cdot p_i(n)) = w_{pT_{\min}}(n) \cdot \frac{1}{N_p} \sum_i A_i = w_{pT_{\min}}(n) \cdot \bar{A}$ και

$$w_{pT_{\min}}(n) = \begin{cases} 1 & 0 < n \leq T_{\min}, T_{\min} = \min(T_i, i = 1 \mathbf{K} N_p), T_{\min} \geq T_p \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

Έτσι: $Sh(i) = \frac{\frac{1}{N_p - 1} |A_i - A_{i+1}|}{\bar{A}}$ και $\sum_i Sh(i) = \frac{\frac{1}{N_p - 1} \sum_i |A_i - A_{i+1}|}{\bar{A}} = \frac{MRsh^1}{\bar{a}}$ (7)

που αποτελούν δείκτες διαταραχής πλάτους [10]. Το a_i προέκυψε αποκλειστικά από την $R_{2p}(t)$.

Στην περίπτωση ενθόρυβης γλωττιδικής ακολουθίας $g(n)$, μια εκτίμηση $\hat{p}(n)$ της $p(n)$ προκύπτει με αποθορυβοποίηση [12], και η παραπάνω ανάλυση εφαρμόζεται για την $\hat{p}(n)$. Η συνιστώσα θορύβου είναι τότε $\hat{w}(n) = g(n) - \hat{p}(n)$. Από

¹ Ακριβέστερα, $T_r = 2T_p$

το τμήμα της $\hat{w}(n)$ που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο ζεύγος γλωττιδικών παλμών, δηλαδή $\hat{w}_{2p}(n)$, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του θορύβου είναι $R_{\hat{w}_{2p}}(t)$ και το φάσμα ισχύος του θορύβου (μέθοδος Blackman-Tukey) είναι:

$$S_w(w) = \sum_{t=-(T_i+T_{i+1}-1)}^{(T_i+T_{i+1}-1)} R_{\hat{w}_{2p}}(t) \cdot w_s(t) \cdot e^{-jw t} \quad (8)$$

όπου $w_s(t)$ είναι ένα συμμετρικό παράθυρο (το τριγωνικό-Bartlett παράθυρο εγγυάται την μη εμφάνιση αρνητικών τιμών της $S_w(w)$ [8]).

Από την (8), μια εκτίμηση της σηματοθορυβικής σχέσης για την ενθόρυβη ακολουθία $g_{2p}(n) = p_{2p}(n) + w_{2p}(n)$ είναι:

$$SNR_{g_{2p}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_i + T_{i+1}} \frac{\sum_n (g_{2p}(n))^2}{\sum_k S_w(k)} \right) \Leftrightarrow NSR_{g_{2p}} = -SNR_{g_{2p}} \quad (9)$$

Τα παραπάνω δείχνουν ότι είναι δυνατός ο ταυτόχρονος διαχωρισμός και ποσοτική εκτίμηση δεικτών διαταραχής jitter/shimmer/θορύβου, με χρήση συγχρονισμένης ανά περίοδο (pitch synchronous) ανάλυσης ζευγών γλωττιδικών παλμών. Τα παραπάνω αξιοποιούνται για αναπαράσταση των διαταραχών αυτών σε ένα νέο γραφικό εργαλείο, που λόγω της δυνατότητάς του να περιγράφει φαινόμενα διαταραχών ονομάζεται "Διαταραχόγραμμα".

2. Διαταραχόγραμμα: ένα νέο απεικονιστικό εργαλείο των διαταραχών των γλωττιδικών σημάτων

Η αξιοποίηση του παραπάνω πλαισίου ανάλυσης των γλωττιδικών σημάτων βοηθά στην εισαγωγή ενός νέου γραφικού εργαλείου για περιγραφή των παθολογικών (και όχι μόνο) μορφών διέγερσης του λάρυγγα. Στόχο της ανάπτυξης ενός τέτοιου εργαλείου αποτελεί αφενός η απόδοση χαρακτηριστικών ποσοτήτων των διάφορων μορφών διαταραχών που μπορούν να εμφανίζονται στο σήμα της γλωττιδικής διέγερσης αλλά και αφετέρου ο οπτικός διαχωρισμός και η διάκρισή τους. Ταυτόχρονα, και για λόγους εναρμόνισης και προσαρμογής με ήδη γνωστά εργαλεία ακουστικής και φωνητικής ανάλυσης, το νέο γραφικό εργαλείο προσπαθεί να διατηρήσει ισχυρές ομοιότητες με σπεκτρογραφικού τύπου αναπαραστάσεις, δηλαδή συνδυασμένη απεικόνιση έντασης-συχνότητας-χρόνου.

Σχετικά με τις δυνατότητες γραφικής αναπαράστασης της ενθόρυβης συνιστώσας και της τοπικής (χρονικά) σηματοθορυβικής σχέσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η $w(k)$ (εξ. (9)).

Η αναπαράσταση του jitter μπορεί να γίνει τοπικά με χρήση της εξίσωσης (5).

Η αναπαράσταση του shimmer μπορεί να γίνει με χρήση της εξίσωσης (7). Ταυτόχρονα όμως, η μορφή του φάσματος του γλωττιδικού παλμού μπορεί να αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης φώνησης ή παραγωγής μουσικής χροιάς. Διαχωρισμοί μεταξύ των διάφορων μορφών γλωττιδικών παλμών έχουν περιγραφεί στο παρελθόν [4],[3],[2]. Μια συνδυασμένη απεικόνιση τόσο της συνάρτησης διαταραχής πλάτους, όσο και του φάσματος του θεωρούμενου μέσου γλωττιδικού παλμού $\overline{g(n)}$, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο.

Σχηματίζουμε την $y_p(n) = \frac{1}{\sqrt{\sum_n \overline{g(n)}^2}} \overline{g(n)}$ με συνολική ενέργεια είναι ίση με 1.

Πολλαπλασιάζοντας με $\sqrt{Sh(i)}$, έχουμε:

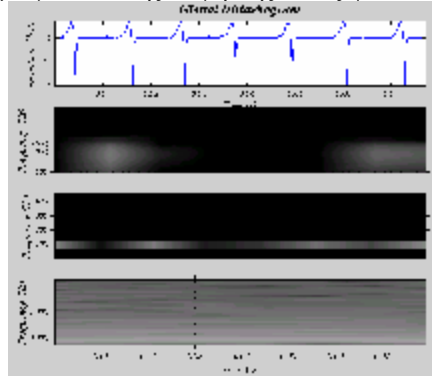
$$e_p(n) = \sqrt{Sh(i)} \cdot y_p(n) \Rightarrow \sum_n e_p(n)^2 = \frac{1}{T_{\min}} \sum_k |E_p(k)|^2 = Sh(i), \text{ όπου } E_p(k) = DFT[e_p(n)] \quad (10)$$

Εφόσον $E_p(k) = \sqrt{Sh(i)} \cdot r \cdot G(k)$, όπου $r = \frac{1}{\sqrt{\sum_n g(n)^2}}$ και $G(k) = DFT[g(n)]$, τότε

χρησιμοποιώντας το $\frac{1}{T_{\min}} |E_p(k)|^2$, έχουμε μια απεικόνιση του φάσματος $G(k)$ του μέσου γλωττιδικού παλμού $\overline{g(n)}$, ενώ η τιμή $Sh(i)$ προκύπτει από το $\sum_k \frac{1}{T_{\min}} |E_p(k)|^2$.

Βλέπουμε δηλαδή ότι μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονη αναπαράσταση των τοπικών τιμών jitter/shimmer/SNR, αλλά και απεικόνιση του φάσματος τόσο του μέσου γλωττιδικού παλμού όσο και του φάσματος του γλωττιδικού θορύβου, με αντίστοιχες ποσοτικές εκτιμήσεις.

Τα παραπάνω συμπυκνώνονται στην βασική μορφή του "Διαταραχογράμματος" για ένα συνθετικό σήμα γλωττιδικής διέγερσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διαταραχογράμμα γλωττιδικής διέγερσης με jitter.

Στο πρώτο παράθυρο έχουμε μια απεικόνιση του γλωττιδικού σήματος στον χρόνο. Στο δεύτερο παράθυρο έχουμε μια σπεκτρογραφικού τύπου αναπαράσταση τόσο της ποσότητας του shimmer, όσο και της μορφής του μέσου γλωττιδικού παλμού. Η ανάλυση γίνεται σε χρονικά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους, μήκους δύο διαδοχικών γλωττιδικών περιόδων, και με μεταβλητό βήμα ίσο με το μήκος κάθε γλωττιδικής περιόδου. Σαν χρονικά ορόσημα καθορίζονται οι εναύσεις των γλωττιδικών παλμών. Παρατηρούμε έτσι στην χρονική στιγμή ~10ms (όπου εντοπίστηκε η έναυση μιας γλωττιδικής περιόδου), ότι έχουμε μια φασματική "φέτα" που αντιστοιχεί στο φάσμα του μέσου γλωττιδικού παλμού και με συνολική ένταση που αντιστοιχεί στην τοπική τιμή $Sh(i)$. Παρατηρείται επίσης ο χαμηλοδιαβατός χαρακτήρας του γλωττιδικού παλμού.

Στο τρίτο παράθυρο αναπαριστώνται οι διαταραχές jitter στον χρόνο, ενώ στον άξονα y εμφανίζεται η τιμή της μέσης F_0 (μπλε γραμμή) που στην συγκεκριμένη περίπτωση του συνθετικού σήματος είναι 100Hz.

Στο τέταρτο παράθυρο, εμφανίζεται η εκτίμηση τόσο του φάσματος του γλωττιδικού θορύβου όσο και της NSR (Εξ. (9)).

Συνολικά λοιπόν, στο Σχήμα 3 εμφανίζονται διαταραχές jitter και χαμηλής ποσότητας θορύβου. Παρατηρείται η εμφάνιση έντονων περιοχών γύρω από την μέση τιμή της F0, σε γλωττιδικές περιόδους με διαταραχές περιοδικότητας. Επίσης, παρατηρείται περισσότερο αυξημένη ένταση στο παράθυρο του θορύβου. Στο παράθυρο του shimmer εμφανίζονται σημειακές εξάρσεις που όμως είναι artifacts εξαιτίας της παρουσίας του θορύβου. Εντούτοις, η συνολική ένταση του shimmer (άξονας x) είναι πολύ μικρή, εφόσον στο συνθετικό σήμα δεν είχε προστεθεί διαταραχή πλάτους.

3. Αναφορές

- [1] Bless Diane M., *Measurement Of Vocal Function*, Otolaryngologic Clinics of North America, 24, No.5, October, 1991
- [2] Childers D. G., Ahn Chieteuk, *Modelling The Glottal Volume-Velocity Waveform For Three Voice Types*, JASA, 97, No.1, January, 1995
- [3] Childers D. G., Lee C. K., *Vocal Quality Factors: Analysis, Synthesis And Perception*, JASA, 90, No5, November, 1991
- [4] Childers D.G., *Speech Processing And Synthesis Toolboxes*, John Wiley & Sons, 2000
- [5] Dejonckere Philippe H., *A Basic Protocol For Functional Assessment Of Voice Pathology*, Committee on Phoniatrics of the European Laryngological Society (ELS)
- [6] Fletcher N., Rossing D., *The physics of musical instruments*, Second Edition, Springer, ISBN 0-387-98374-0
- [7] Koufman James A., Isaacson Glenn, *The Spectrum Of Vocal Dysfunction*, Otolaryngologic Clinics of North America, 24, No.5, October, 1991
- [8] Oppenheim A., Schahfer R., Buck J., *Discrete Time Signal Processing*, PTR, Signal Processing series
- [9] Pasiadis C., Printza A., Metaxas S., Daniilidis I., Papanikolaou G., *Acoustic Voice Analysis In The Evaluation Of Vocal Fold Polyps*, Proc. AFEA 2001, Athens, June, 2001
- [10] Pinto Neal B., Titze Ingo R., *Unification Of Perturbation Measures In Speech Signals*, JASA, 87(3), March, 1990
- [11] Titze Ingo R., *Workshop On Acoustic Voice Analysis*, NCVS- National Center for Voice and Speech, 1994
- [12] Παστιάδης Κων/νος, *Σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης φωνής ατόμων με προβλήματα ομιλίας*, Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., 2002

Ισοστάθμιση ηχητικής πίεσης σε μεγάλη συνεχή περιοχή παράλληλεπίπεδου χώρου

Ιωάννης Σαρρής
Υποψ. Διδάκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
jsarris@central.ntua.gr

Νικόλαος Στεφανάκης
Υποψ. Διδάκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
stefanik6@hotmail.com

Γεώργιος Καμπουράκης
Λέκτορας
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
gcamb@cs.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται η πειραματική επαλήθευση μίας μεθόδου για την ισοστάθμιση των χαμηλών συχνοτήτων ηχητικών σημάτων σε μία μεγάλη περιοχή ενός παραλληλεπίπεδου χώρου. Η περιοχή ισοστάθμισης είναι συνεχής και καταλαμβάνει σχεδόν όλο το χώρο, ενώ η ισοστάθμιση τυχαίων σημάτων είναι εφικτή. Η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία ενός επίπεδου κύματος που διαδίδεται παράλληλα προς τη μία πλευρά του χώρου. Στην εργασία μελετώνται επίσης θέματα που δεν αναλύθηκαν στην αρχική εργασία όπως οι συμμετρίες που το πρόβλημα παρουσιάζει λόγω της διάταξης των πηγών και των δεκτών, καθώς και τα όρια της περιοχής ισοστάθμισης σε σχέση με παραμέτρους όπως ο αριθμός των πηγών που χρησιμοποιούνται και η υψηλότερη συχνότητα για την οποία το αποτέλεσμα της ισοστάθμισης είναι ικανοποιητικό.

ABSTRACT

In the paper the experimental verification of a method for the equalisation at low frequencies in rectangular enclosures is presented. The region of equalisation is continuous and occupies almost the complete volume of the enclosure, while the equalisation of random signals is possible. The method is based on the generation of a propagating plane wave. Other issues that remained unaddressed in the original study such as the symmetries that the problem exhibits due to the specific arrangement of sources and receivers, and the dependence of the limits of the zone of equalization on factors such as the damping constant of the modes of the enclosure, the number of sources, and the driving frequency are studied in this work.

Εισαγωγή

Στόχος της ισοστάθμισης της ακουστικής συμπεριφοράς ενός κλειστού χώρου είναι η διόρθωση των παραμορφώσεων που ο χώρος εισάγει σε ηχητικά σήματα, όπως η μουσική ή η ομιλία που μεταδίδονται μέσα σε αυτόν. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ισοστάθμισης χρησιμοποιούν ψηφιακά φίλτρα για την προ-επεξεργασία του σήματος εισόδου πριν αυτό αναπαραχθεί από ένα σύνολο ηχείων ώστε να ακυρωθούν τα σχετιζόμενα με το χώρο χαρακτηριστικά μετάδοσης και τα καταγραφόμενα σήματα στα σημεία παρατήρησης να προσεγγίζουν το αρχικό σήμα εισόδου [1]. Τέτοιες τεχνικές έχουν υψηλή απόδοση ακριβώς στα σημεία παρατήρησης, αλλά η επιτυχής ισοστάθμισης περιορίζεται σε μικρές περιοχές γύρω από αυτά [2]. Ειδικά για τις χαμηλές συχνότητες η ισοστάθμιση περιορίζεται σε περιοχές γύρω από τα σημεία παρατήρησης με διαστάσεις μικρότερες του μισού μήκους κύματος του αναπαραγόμενου ήχου [3].

Τα παραπάνω προβλήματα ξεπεράστηκαν στην ισοστάθμιση χαμηλών συχνοτήτων σε ένα παραλληλεπίπεδο χώρο μέσω της δημιουργίας ενός επίπεδου κύματος που διαδίδεται παράλληλα προς τη μία πλευρά του χώρου [4]. Με αυτή τη μέθοδο γίνεται εφικτή η ισοστάθμιση σε μία περιοχή που είναι συνεχής και καταλαμβάνει σχεδόν όλο το χώρο. Θεωρητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραγωγή ενός επίπεδου κύματος είναι δυνατή σε ένα παραλληλεπίπεδο χώρο υπό την προϋπόθεση οι πηγές να είναι κατάλληλά διατεταγμένες στις κάθετες στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος πλευρές, ενώ η ισοστάθμιση τυχαίων σημάτων είναι εφικτή.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να επιβεβαιώσει τη μέθοδο πειραματικά και να μελετήσει θέματα που δεν αναλύθηκαν στην αρχική εργασία. Έτσι μελετώνται οι συμμετρίες που το πρόβλημα παρουσιάζει λόγω της διάταξης των πηγών και των δεκτών, καθώς και τα όρια της περιοχής ισοστάθμισης σε σχέση με παραμέτρους όπως ο αριθμός των πηγών που χρησιμοποιούνται και η υψηλότερη συχνότητα για την οποία το αποτέλεσμα της ισοστάθμισης είναι ικανοποιητικό.

1. Ισοστάθμιση αρμονικών σημάτων

1.1 Αναδρομικός υπολογισμός των συντελεστών των φίλτρων ισοστάθμισης

Στην αρχική εργασία [4] οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών των φίλτρων ισοστάθμισης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο πολλαπλών σημείων (multiple point method) [5] ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα σημεία παρατήρησης. Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την αντιστροφή ενός πίνακα το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό. Έτσι στη συγκεκριμένη εργασία οι συντελεστές των φίλτρων ισοστάθμισης προσεγγίζουν τις βέλτιστες τιμές τους με χρήση του αναδρομικού αλγόριθμου multiple error LMS algorithm [6].

1.2 Όρια περιοχής ισοστάθμισης

Σύμφωνα με την αρχική εργασία [4] η ζώνη ισοστάθμισης, η οποία ορίζεται ως η συνεχής τρισδιάστατη περιοχή του χώρου όπου οι διακυμάνσεις της ηχητικής πίεσης από την επιθυμητή τιμή είναι εντός ± 3 dB, περιορίζεται στα 0.6 μέτρα από τις παράλληλες πλευρές στις οποίες είναι τοποθετημένες οι πηγές. Το όριο αυτό αποτελεί μία συντηρητική εκτίμηση για τις περισσότερες περιπτώσεις και άρα η εξάρτηση των ορίων της ζώνης ισοστάθμισης από παράγοντες όπως ο συντελεστής απόσβεσης, ο αριθμός των πηγών και η συχνότητα του ηχητικού κύματος μελετήθηκαν μέσω προσομοιώσεων σε H/Y οι οποίες έγιναν σύμφωνα με την περιγραφή στην αρχική εργασία [4]. Εκμεταλλευόμενοι τις συμμετρίες που το πρόβλημα παρουσιάζει λόγω της διάταξης των πηγών και των δεκτών η τάξη των πινάκων για τον υπολογισμό των βέλτιστων φίλτρων ισοστάθμισης μπορεί να μειωθεί σε $(L/8) \times (L/8)$, όπου L είναι ο αριθμός των πηγών ενώ ο αριθμός των απαιτούμενων για τη μέτρηση του ηχητικού πεδίου μικροφώνων μπορεί να μειωθεί στο ένα τέταρτο του αρχικού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα όρια της ζώνης ισοστάθμισης εξαρτώνται και από τους τρεις παράγοντες, δηλαδή το συντελεστή απόσβεσης, τον αριθμό των πηγών και τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Η ζώνη ισοστάθμισης είναι περιορισμένη σχετικά με τις παράλληλες πλευρές στις οποίες τοποθετούνται οι πηγές λόγω του πεπερασμένου αριθμού αυτών και η απόσταση της ζώνης από τις πλευρές είναι ανάλογη της συχνότητας και αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πηγών.

1.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική επαλήθευση της μεθόδου έγινε σε παραλληλεπίπεδη κατασκευή από MDF fibreboard πάχους 22 χιλιοστών με εσωτερικές διαστάσεις $L_x=1.2$ m, $L_y=2$ m, και $L_z=0.2$ m. Για λόγους απλότητας η δομή είχε μία διάσταση αρκετά μικρότερη από τις άλλες δύο ώστε το ηχητικό πεδίο να είναι δισδιάστατο στο εύρος συχνοτήτων που μελετήθηκε. Τέσσερα ηχεία διαμέτρου 5 ιντσών της κατασκευαστικής εταιρείας Vifa-Speak τοποθετήθηκαν στις δύο παράλληλες προς τον y άξονα πλευρές σε ύψος $z=0.1$ m με τα κέντρα τους τοποθετημένα στα $x=0.3$ m και $x=0.9$ m. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή τα ηχεία έχουν επίπεδη απόκριση στο εύρος συχνοτήτων 140 Hz-2 kHz. Για τη μέτρηση του ηχητικού πεδίου 5 ηλεκτρικά μικρόφωνα διαμέτρου 9.7 χιλιοστών τοποθετήθηκαν σε τρεις παράλλες προς τον x άξονα γραμμές. Στις δύο πρώτες γραμμές υπήρχαν από δύο μικρόφωνα ενώ στην τρίτη γραμμή ένα. Ο αριθμός των μικροφώνων περιορίστηκε από τη χωρητικότητα της μνήμης της διαθέσιμης DSP κάρτας. Η πρώτη γραμμή μικροφώνων τοποθετήθηκε στη θέση $y=0.6$ m, και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών μικροφώνων ήταν 0.43 m και 0.8 m στη y και x -κατεύθυνση αντίστοιχα. Επειδή το ηχητικό πεδίο στο εύρος συχνοτήτων που μελετήθηκε ήταν πρακτικά ανεξάρτητο από τη z -κατεύθυνση όλα τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν σε ένα επίπεδο στο ύψος $z=0$ m. Για τη μέτρηση του ηχητικού πεδίου σε διάφορα σημεία της κατασκευής 19 οπές ανοίχθηκαν σε ίσα διαστήματα στη μία πλευρά της κατασκευής κατά την y -διεύθυνση για ένα probe μικρόφωνο διαμέτρου 9.7 χιλιοστών. Συνεπώς μετακινώντας το μικρόφωνο σε 13 θέσεις του x -άξονα ($x=0$ m έως 1.2 m) η ηχητική πίεση μπορούσε να μετρηθεί σε 247 θέσεις της κατασκευής.

Για την παραγωγή του αρμονικού σήματος εισόδου χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια σημάτων του Brüel and Kjaer PULSE συστήματος. Το σήμα εισόδου ενισχύθηκε και τροφοδοτήθηκε στην DSP κάρτα αφού πέρασε από έναν A/D μετατροπέα. Τα σήματα που καταγράφοταν στα μικρόφωνα ενισχύονταν, ψηφιοποιούνταν και τροφοδοτούνταν επίσης στην DSP κάρτα. Τα σήματα εξόδου παράγονταν στην DSP κάρτα, περνούσαν από D/A μετατροπείς, ενισχύονταν και δίνονταν σαν είσοδο στα ηχεία. Ο A/D μετατροπέας, ο D/A μετατροπέας και η DSP κάρτα ήταν εγκαταστημένοι σε ένα Pentium 233 MHz H/Y. Η DSP κάρτα ήταν της Loughborough Sound Images Ltd. και περιείχε τον Motorola DSP 96002 επεξεργαστή με συχνότητα ρολογιού 33.3 MHz. Ο A/D μετατροπέας ήταν μία κάρτα εισόδου 32 αναλογικών καναλιών ενώ ο D/A μετατροπέας ήταν μια κάρτα εξόδου 16 καναλιών. Και οι δύο κάρτες ήταν της Loughborough Sound Images Ltd.

Πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για την ισοστάθμιση ενός αρμονικού ηχητικού πεδίου 300 Hz. Επειδή απαιτείται η ισοστάθμιση ενός αρμονικού πεδίου τα φίλτρα ισοστάθμισης περιείχαν δύο συντελεστές των οποίων οι τιμές ανανεώνονταν με χρήση του multiple error LMS αλγόριθμου. Η συχνότητα δειγματοληψίας που επιλέχθηκε ήταν 1600 Hz αφού σε αυτήν τη συχνότητα ο χρόνος που απαιτείται ώστε το ηχητικό κύμα να μεταβεί κατά την y -διεύθυνση μεταξύ των διαφορετικών γραμμών των μικροφώνων αντιστοιχεί σε δύο δείγματα. Η τιμή της αρχικής καθυστέρησης η οποία αντιστοιχεί στην πρώτη γραμμή μικροφώνων δεν έχει επίδραση στο αποτέλεσμα αφού το σήμα εισόδου είναι στάσιμο και επομένως δεν χρησιμοποιήθηκε αρχική καθυστέρηση. Αντιθέτως οι τιμές των σχετικών καθυστερήσεων ανάμεσα στις διαδοχικές γραμμές μικροφώνων είναι σημαντικές για τη δημιουργία του οδευόντος ηχητικού κύματος και έτσι πρόσθετη καθυστέρηση δύο και τεσσάρων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε για τη δεύτερη και τρίτη γραμμή μικροφώνων αντίστοιχα σύμφωνα με τα παραπάνω.

Πριν τη διαδικασία της ισοστάθμισης οι διακριτές κρουστικές αποκρίσεις από τα ηχεία στα μικρόφωνα αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας τον multiple error LMS αλγόριθμο υλοποιημένο στην DSP κάρτα ως αλγόριθμος ταυτοποίησης. Τα FIR φίλτρα ταυτοποίησης περιείχαν δύο συντελεστές.

Η χωρική κατανομή της ηχητικής πίεσης στην κατασκευή πριν και μετά την ισοστάθμιση απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Το ηχητικό πεδίο πριν την ισοστάθμιση παράχθηκε από διέγερση της κατασκευής μόνο από την πηγή στο (0.3, 0, 0.1) m. Όπως φαίνεται από το σχήμα η ισοστάθμιση απομάκρυνε τις διακυμάνσεις της ηχητικής πίεσης σχεδόν σε όλο τον όγκο της κατασκευής.

2. Ισοστάθμιση τυχαίων σημάτων

2.1 Αναδρομικός υπολογισμός των συντελεστών των φίλτρων ισοστάθμισης

Στην αρχική εργασία η ισοστάθμιση τυχαίων σημάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση FIR φίλτρων ισοστάθμισης των οποίων οι συντελεστές υπολογίστηκαν με τη μέθοδο πολλαπλών σημείων (multiple point method) ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα σημεία παρατήρησης [4]. Όμοια με την περίπτωση της ισοστάθμισης ενός αρμονικού ηχητικού πεδίου στη συγκεκριμένη εργασία οι συντελεστές των φίλτρων ισοστάθμισης προσεγγίζουν τις βέλτιστες τιμές τους με χρήση του αναδρομικού αλγόριθμου multiple error LMS algorithm [6].

2.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για την ισοστάθμιση ενός τυχαίου ηχητικού πεδίου. Το σήμα εισόδου ήταν λευκός θόρυβος που παράχθηκε και φιλτραρίστηκε στη ζώνη συχνότητας από 100 Hz έως 300 Hz χρησιμοποιώντας το Brüel & Kjaer PULSE σύστημα. Επιπλέον το σήμα φιλτραρίστηκε από ένα βαθυπερατό αναλογικό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 310 Hz. Η πειραματική διάταξη για την ισοστάθμιση του τυχαίου ηχητικού πεδίου ήταν παρόμοια με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ισοστάθμιση του αρμονικού πεδίου, αλλά anti-aliasing αναλογικά φίλτρα με συχνότητα αποκοπής 400 Hz χρησιμοποιήθηκαν για το φιλτράρισμα των ενισχυμένων σημάτων των μικροφώνων ενώ αναλογικά φίλτρα ανακατασκευής με συχνότητα αποκοπής 400 Hz χρησιμοποιήθηκαν για το φιλτράρισμα των σημάτων εξόδου της DSP κάρτας πριν δοθούν ως είσοδο στους ενισχυτές και τα ηχεία. Οι διακριτές κρουστικές αποκρίσεις από τα ηχεία στα μικρόφωνα αναπαραστάθηκαν από FIR φίλτρα ταυτοποίησης 150 συντελεστών οι οποίοι υπολογίστηκαν με χρήση του multiple error LMS αλγόριθμο υλοποιημένου στην DSP κάρτα ως αλγόριθμος ταυτοποίησης. Τα φίλτρα ισοστάθμισης ήταν FIR φίλτρα με 60 συντελεστές. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 1600 Hz, και το οδεύον επίπεδο κύμα παρήχθη με τη εφαρμογή αρχικής καθυστέρησης είκοσι δειγμάτων για τα δύο μικρόφωνα στην πρώτη γραμμή και πρόσθετων καθυστερήσεων δύο δειγμάτων για τα μικρόφωνα στις ακόλουθες γραμμές.

Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας πριν και μετά τη διαδικασία της ισοστάθμισης για τέσσερις θέσεις στην κατασκευή οι οποίες αντιστοιχούν στη θέση ενός μικροφώνου που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία ισοστάθμισης, σε ένα σημείο μέσα στη ζώνη ισοστάθμισης, σε ένα σημείο ακριβώς έξω από τη ζώνη ισοστάθμισης και σε ένα σημείο αρκετά μακριά από τη ζώνη ισοστάθμισης. Από το σχήμα φαίνεται ότι οι κορυφές και οι βυθίσεις των αρχικών αποκρίσεων απομακρύνθηκαν και σχεδόν επίπεδες αποκρίσεις προέκυψαν ακόμα και στο σημείο

μακριά από τη ζώνη ισοστάθμισης. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν για άλλες θέσεις στην κατασκευή.

3. Συμπεράσματα

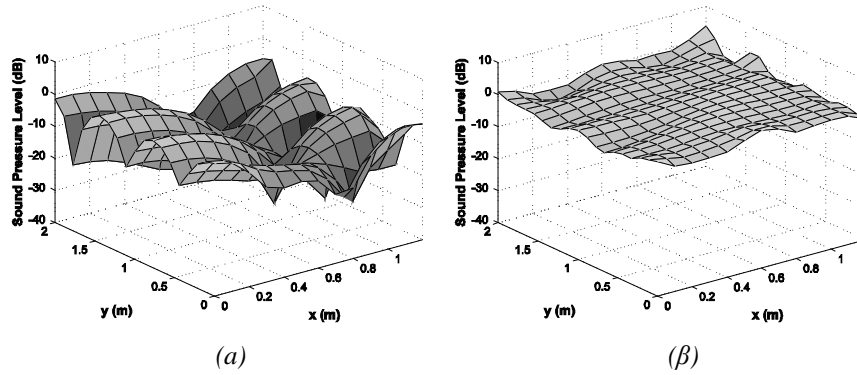
Η παρούσα εργασία συμπληρώνει την αρχική θεωρητική μελέτη του Santillán [4] για την ισοστάθμιση χαμηλών συχνοτήτων σε ένα παραλληλεπίπεδο χώρο με τη δημιουργία ενός επίπεδου κύματος που διαδίδεται παράλληλα προς τη μία πλευρά του χώρου. Η μέθοδος επιβεβαιώθηκε πειραματικά και θέματα που δεν αναλύθηκαν στην αρχική εργασία εξετάστηκαν. Έτσι μελετήθηκε η εξάρτηση των ορίων της περιοχής ισοστάθμισης από παράγοντες όπως ο συντελεστής απόσβεσης, ο αριθμός των πηγών και η συχνότητα του ηχητικού κύματος και βρέθηκε ότι σε πρακτικές περιπτώσεις η ζώνη ισοστάθμισης θα είναι περιορισμένη ως προς τις δύο πλευρές στις οποίες τοποθετούνται οι πηγές και η απόσταση της ζώνης από τις πλευρές θα είναι ανάλογη της συχνότητας και αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πηγών.

4. Ευχαριστίες

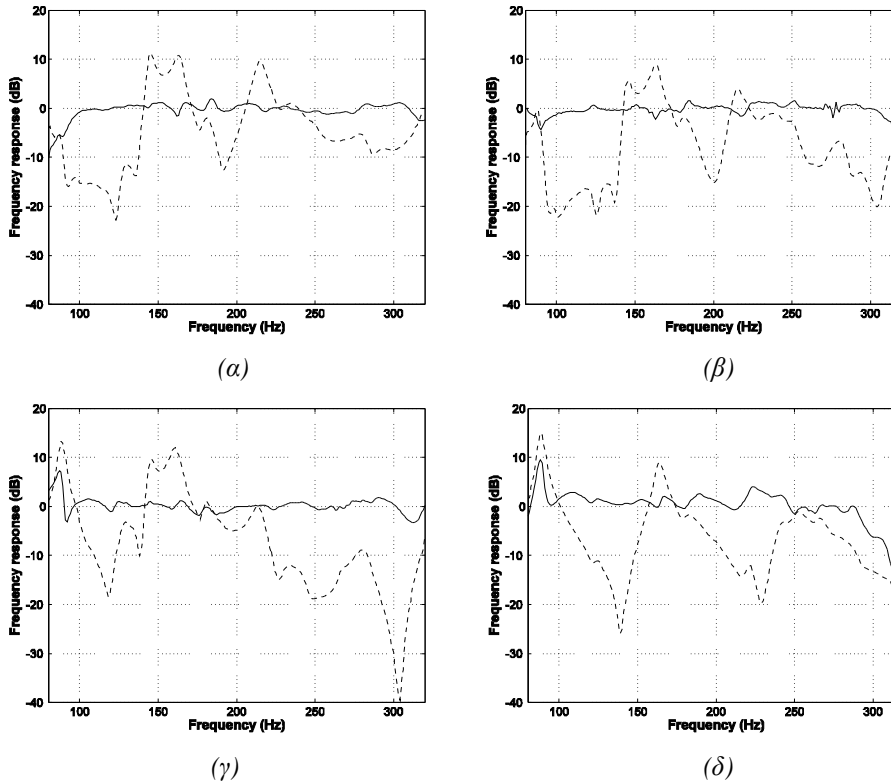
Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε κατά τη επίσκεψη του πρώτου συγγραφέα στο τμήμα Acoustic Technology του Denmark Technical University υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή Finn Jacobsen.

5. Αναφορές

- [1] M. Miyoshi and Y. Kaneda, "Inverse filtering of room acoustics," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 1988, 36, 145-152
- [2] P. A. Nelson, F. O.- Bustamante, and H. Hamada, "Inverse filter design and equalization zones in multichannel sound reproduction," *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, 1995, 3, 185-192
- [3] A. O. Santillán, "Experimental low-frequency sound equalization in an extended region of an enclosure using adaptive filters," *Proc. 104th Convention Audio Eng. Soc.*, 1998, prep. No. 4755
- [4] A. O. Santillán, "Spatially extended sound equalization in rectangular rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, 110, 1989-1997
- [5] F. Asano and D. C. Swanson, "Sound equalization in enclosures using modal reconstruction," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 98, 2062-2069
- [6] S. J. Elliott, I. M. Stothers, and P. A. Nelson, "A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, 1987, 35, 1423-1434



Σχήμα 10. Ηχητική πίεση στην πειραματική κατασκευή (α) πριν και (β) μετά την ισοστάθμιση ενός αρμονικού πεδίου 300 Hz. Το ηχητικό πεδίο πριν την ισοστάθμιση παράχθηκε από διέγερση της κατασκευής μόνο από την πηγή στο (0.3, 0, 0.1) m.



Σχήμα 2. Απόκριση συχνότητας πριν (---) και μετά (—) την ισοστάθμιση στα σημεία (α) (0.2, 1.03, 0.1) m, (β) (0.4, 1.1, 0.1) m, (γ) (1.0, 1.6, 0.1) m, και (δ) (0.6, 0, 0.1) m τα οποία αντιστοιχούν σε ένα μικρόφωνο που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία ισοστάθμισης, σε ένα σημείο μέσα στη ζώνη ισοστάθμισης, ένα σημείο ακριβώς έξω από τη ζώνη ισοστάθμισης και ένα σημείο αρκετά μακριά από τη ζώνη ισοστάθμισης.

Υλοποίηση πρωτοτύπου πλήρως ψηφιακού ενισχυτή ηχητικών σημάτων

Κουτσομήτσος Σωτήρης	Τάτλας Νικ. –Αλέξ.	Μουρτζόπουλος Ιωάννης
Διπλ. Ηλ. Μηχανικός	Διπλ. Ηλ. Μηχανικός	Αν. Καθηγητής
skoytsomht@upnet.gr	ntatlas@upatras.gr	mourjop@wcl.ee.upatras.gr

Ομάδα Ήχου, Εργ. Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται η υλοποίηση πλήρως ψηφιακού ενισχυτή ηχητικών σημάτων. Ο ενισχυτής τροφοδοτείται με δείγματα ήχου από πηγή ψηφιακών ηχητικών δειγμάτων μέσω της διεπαφής S/PDIF τα οποία επανακβαντίζει και διαμορφώνει κατά PWM. Το PWM σήμα ελέγχει διακοπτικό στάδιο ισχύος το οποίο οδηγεί απ'ευθείας το ηχείο. Στη μελέτη αυτή αναλύεται ο σχεδιασμός του επανακβαντιστή και PWM διαμορφωτή σε γλώσσα περιγραφής υλικού Verilog καθώς και η υλοποίηση τους σε πλατφόρμα FPGA (Atmel FPSlic) με τα κατάλληλα εργαλεία EDA. Ακόμα, παρουσιάζεται η υλοποίηση της διεπαφής S/PDIF του συστήματος καθώς και το διακοπτικό στάδιο ισχύος. Τέλος, γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές μετρήσεις που διεξήχθησαν και στα συμπεράσματα που αυτές οδηγούν.

Implementation of a novel all digital audio power amplifier

Koutsomitsos Sotiris	Tatlas Nic.–Alex.	Mourjopoulos John
Electrical Eng., Dipl.	Electrical Eng., Dipl.	Assistant Prof.
skoytsomht@upnet.gr	ntatlas@upatras.gr	mourjop@wcl.ee.upatras.gr

Audio Group, Wire Communications Lab, University of Patras

ABSTRACT

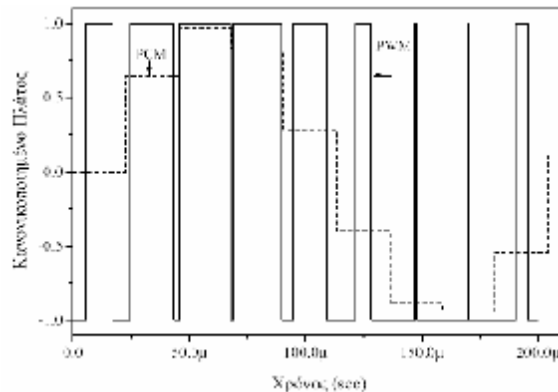
The implementation of a novel all-digital audio power amplifier is presented. Audio samples from a digital audio source are fed into the amplifier through an S/PDIF interface, requantized and finally PWM modulated. The PWM signal controls a switching power stage that directly drives a loudspeaker. The paper focuses on the design of the requantizer and the pulse width modulator in Verilog hardware description language and their implementation on the Atmel FPSlic FPGA platform, using the appropriate EDA tools. Furthermore, the implementation of the S/PDIF interface and the switching power stage is presented. Results and conclusions derived from laboratory measurements obtained are also given.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή κυριαρχούν οι ψηφιακές τεχνικές στην καταγραφή, επεξεργασία και αναπαραγωγή του ήχου, τα ψηφιακά μέσα αποθήκευσης (CDDA, SACD, DVD-Audio) και μετάδοσης ήχου (DAB, HDTV). Παράλληλα, η έρευνα έχει στραφεί στην υλοποίηση πλήρως ψηφιακής αλυσίδας καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου με αντικατάσταση των συνηθισμένων αναλογικών ενισχυτών από ψηφιακούς. Οι ψηφιακοί ενισχυτές δέχονται τα ψηφιακά δεδομένα ήχου χωρίς μετατροπή σε αναλογικά και, με κατάλληλη επεξεργασία, πραγματοποιούν ενίσχυση του σήματος και οδήγηση των μεγαφώνων. Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής ενίσχυσης έναντι της αναλογικής είναι φανερά, καθώς

- υλοποιείται με αποδόσεις αρκετά μεγαλύτερες από την αναλογική (80% - 90% σε σύγκριση με 20% - 30% που επιτυγχάνουν τα αναλογικά συστήματα ενίσχυσης ισχύος). Έτσι, επιτρέπει την κατασκευή συσκευών υψηλής ισχύος με μικρό όγκο, βάρος και κόστος.
- απαλλάσσει από την χρήση μετατροπέων ψηφιακού-σε-αναλογικό και έτσι εξαλείφονται οι παραμορφώσεις που αυτοί προκαλούν.
- μειώνει τις αναλογικές προσθετικές πηγές θορύβου, όπως μετατροπείς ψηφιακού-σε-αναλογικό, προενισχυτές, καλωδιώσεις μεταξύ των συσκευών, διαδοχικά στάδια κέρδους, βρόχοι ανάδρασης, κλπ.

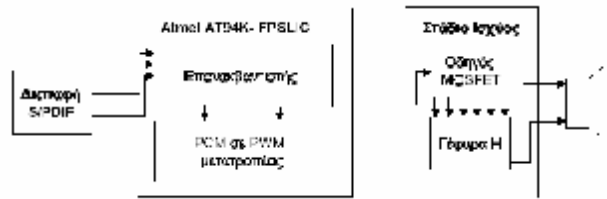
Οι τεχνολογίες για την υλοποίηση συστημάτων ψηφιακής ενίσχυσης είναι δύο. Η πρώτη βασίζεται στη διαμόρφωση εύρους των παλμών (Pulse Width Modulation - PWM), ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί διαφορική διαμόρφωση τύπου ΣΔ (Sigma Delta Modulation). Στους ενισχυτές τεχνολογίας PWM ο διαμορφωτής μετατρέπει το ψηφιακό σήμα εισόδου σε σήμα του 1-bit με μεταβαλλόμενο χρονικό πλάτος παλμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι σε κάθε περίοδο της αρχικής δειγματοληψίας εμφανίζεται μόνο ένας παλμός με αποτέλεσμα η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) της PWM να είναι πολύ χαμηλότερη της ΣΔ και σταθερή. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση των ψηφιακών ενισχυτών τύπου PWM είναι πολύ μεγαλύτερη ενώ η διαμόρφωση είναι λιγότερο ευαίσθητη σε παραμορφώσεις ολίσθησης χρονισμού τόσο της ψηφιακής παλμοσειράς όσο και του σταδίου ισχύος.



Σχήμα 1: Τυπική μορφή PCM και PWM κυματομορφής για ημίτονο πλάτους 0.18dB relative Full Scale, συχνότητας 5kHz.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Ο επανακβαντιστής και ο διαμορφωτής PCM σε PWM έχουν σχεδιαστεί στη γλώσσα περιγραφής υλικού Verilog HDL και με τη χρήση εργαλείων αυτοματοποίησης ηλεκτρονικού σχεδίου (EDA Tools), υλοποιούνται σε πλατφόρμα FPGA. Ο επανακβαντιστής μετατρέπει τα 16-bit δεδομένα που λαμβάνει από την διεπαφή S/PDIF σε 8-bit λέξεις. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιεί dither και μορφοποίηση θορύβου που καθιστούν το θόρυβο κβαντισμού ελάχιστα ακουστό. Τα 8-bit δεδομένα περνούν στον διαμορφωτή PCM-σε-PWM στην έξοδο του οποίου παράγεται μια 1-bit παλμοσειρά. Η παλμοσειρά εισάγεται στον οδηγό MOSFET ο οποίος, ανάλογα με τη λογική κατάσταση, «0» ή «1», ενεργοποιεί τα αντίστοιχα MOSFETs της γέφυρας - Η. Έτσι το σήμα της εξόδου του διαμορφωτή μετατρέπεται σε σήμα ισχύος στην έξοδο της γέφυρας - Η και είναι πλέον δυνατό να οδηγηθεί σε ηχείο. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Γενικό διάγραμμα του ψηφιακού ενισχυτή

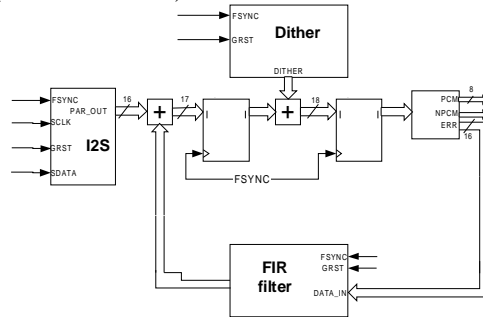
2.1. ΕΠΑΝΑΚΒΑΝΤΙΣΤΗΣ

Ο επανακβαντιστής αποτελείται από τον σειριακό σε παράλληλο καταχωρητή ολίσθησης (shift register), την γεννήτρια dither (dither generator), έναν απλό κβαντιστή (quantizer) και το φίλτρο μορφοποίησης θορύβου (noise shaper) [1]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η είσοδος SDATA παρέχει τα δεδομένα ήχου στον επανακβαντιστή σε σειριακή μορφή. Τα σήματα FSYNC και SCLK είναι τα σήματα συγχρονισμού του επανακβαντιστή: το FSYNC συγχρονίζει την επεξεργασία των ηχητικών δεδομένων (κβαντισμός, προσθήκη θορύβου dither, μορφοποίηση θορύβου), ενώ το SCLK συγχρονίζει την μετατροπή των σειριακών ηχητικών δεδομένων σε δείγματα των 16 bits. Οι έξοδοι PCM και NPCM παρέχουν τα επεξεργασμένα δείγματα μήκους 8-bits. Εσωτερικά στον επανακβαντιστή χρησιμοποιείται αρχιτεκτονική διασωλήνωσης (pipeline), ενώ εξασφαλίζεται ότι οι αριθμητικοί υπολογισμοί γίνονται χωρίς υπερχειλίσσεις.

Η γεννήτρια dither παράγει θόρυβο κατανομής TPDF, πλάτους 2 LSB p.p. Η προσθήκη του θορύβου αυτού στο σήμα πριν τον κβαντισμό, δίνει στον θόρυβο κβαντισμού χαρακτηριστικά λευκού θορύβου. Επιπλέον, ο θόρυβος TPDF είναι λιγότερο ακουστός σε σχέση με άλλες κατανομές dither καθώς συγκεντρώνει μεγάλο μέρος της ισχύος του σε υψηλές συχνότητες, ενώ είναι και υπολογιστικά οικονομικός.

Ως φίλτρο μορφοποίησης θορύβου χρησιμοποιήθηκε φίλτρο τύπου FIR, έβδομης τάξης, ακέραιων συντελεστών από την οικογένεια φίλτρων $1 - H(z) = (1 - z^{-1})^N$. Η υψηλή τάξη του φίλτρου δίνει ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο στην περιοχή συχνοτήτων μέγιστης ακουστότητας, ενώ δεν απαιτεί υπερβολικά μεγάλη επιφάνεια στο FPGA και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για ταχύτητα

επεξεργασίας. Για την υλοποίηση του φίλτρου χρησιμοποιήθηκε η συνηθισμένη ευθεία δομή FIR (direct form FIR).



Σχήμα 3: Εσωτερική δομή του επανακβαντιστή

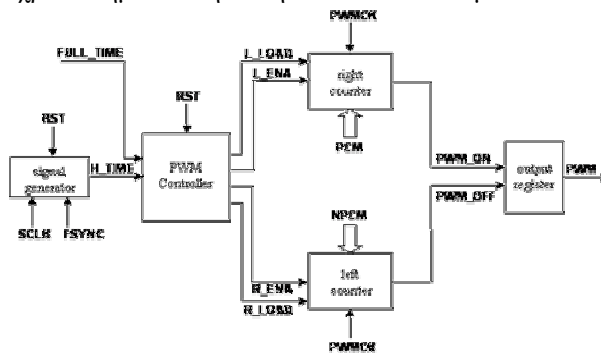
2.2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ PWM

Η εσωτερική δομή του διαμορφωτή PCM-σε-PWM φαίνεται στο Σχήμα 4. Ο διαμορφωτής βασίζεται σε πρωτότυπη τεχνική που προτάθηκε από τον Α. Φλώρο [11] αποτελείται από δύο απαριθμητές που μαζί με τον ελεγκτή εξόδου δημιουργούν το σήμα PWM, και τον ελεγκτή λειτουργίας που τροφοδοτείται από την γεννήτρια σημάτων και ελέγχει τους απαριθμητές [2], [3], [4].

Ο ελεγκτής λειτουργίας καθορίζει τη φόρτωση και την ενεργοποίηση των απαριθμητών. Στηρίζεται σε μια απλή μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στην οποία εισοδοί είναι τα σήματα ελέγχου FULL_TIME και HALF_TIME που σηματοδοτούν την έναρξη και το μέσο της αρχικής περιόδου δειγματοληψίας. Έξοδοι είναι τα σήματα R_LOAD, L_LOAD, R_ENABLE και L_ENABLE που οδηγούνται στους απαριθμητές, ελέγχοντας την ενεργοποίηση και φόρτωση των απαριθμητών.

Η διαδικασία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε όταν ο ένας απαριθμητής φορτώνεται με δεδομένα, ο άλλος να μετρά και αντίστροφα.

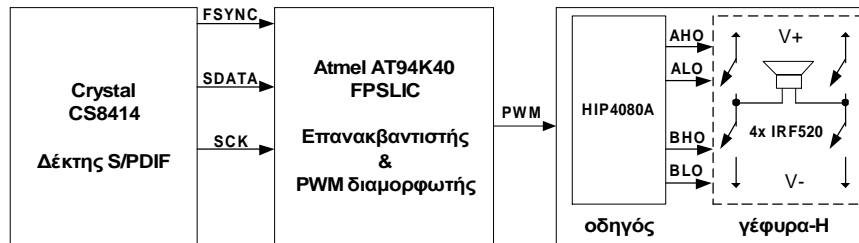
Ουσιαστικά, ο αριστερός απαριθμητής περιέχει στα δεδομένα του τους παλμούς CLOCK που πρέπει να μετρήσει μέχρι να σηματοδοτήσει την ανοδική παρυφή του PWM, ενώ τα δεδομένα του δεξιού απαριθμητή περιέχουν τους παλμούς που πρέπει να μετρήσει μέχρι να σηματοδοτήσει την κάθοδο του παλμού PWM.



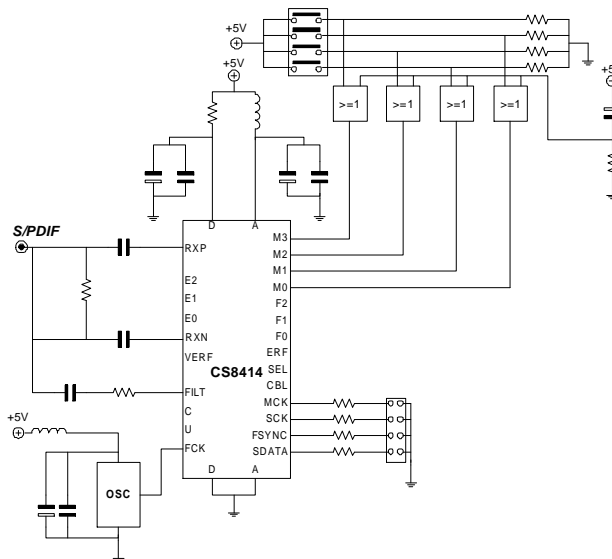
Σχήμα 4: Εσωτερική δομή του διαμορφωτή PWM

3. ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η διάταξη υλοποίησης του ψηφιακού ενισχυτή αποτελείται από τρεις πλακέτες. Η πρώτη περιλαμβάνει τον ψηφιακό δέκτη και αποκωδικοποιητή S/PDIF της εταιρίας Crystal. Η δεύτερη φιλοξενεί το FPGA AT94K40-FPSLIC της Atmel και κάποια κυκλώματα υποστήριξης [5]. Η τρίτη υλοποιεί το στάδιο ισχύος με τέσσερα MOSFETs IRF520 της Intersil, έναν οδηγό MOSFET της ίδιας εταιρείας και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία [12]. Στο Σχήμα 5 φαίνεται το σχεδιάγραμμα της διάταξης.



Σχήμα 5: Διάγραμμα υλοποίησης ψηφιακού ενισχυτή

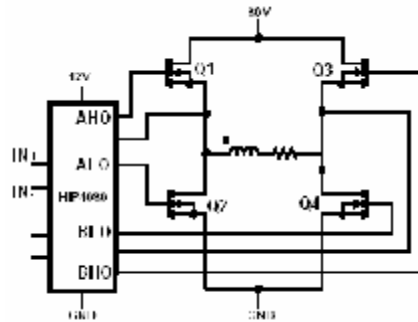


Σχήμα 6: Κυκλωματικό διάγραμμα διεπαφής S/PDIF

Το κυκλωματικό διάγραμμα της διεπαφής S/PDIF δείχνεται στο Σχήμα 6. Το κύριο στοιχείο του κυκλώματος διεπαφής S/PDIF είναι ο ψηφιακός δέκτης CS8414. Τα δεδομένα λαμβάνονται από την ομοαξονική είσοδο K1 με την αντίσταση R1 να ρυθμίζει την αντίσταση εισόδου του κυκλώματος στα 75Ω ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ανάκλασης στη μεταφορά του σήματος μέσω του καλωδίου. Ο ψηφιακός δέκτης λαμβάνει τα δεδομένα S/PDIF στις εισόδους RXP και RXN και από αυτά εξάγει τα ηχητικά δεδομένα στην γραμμή SDATA καθώς και τα σήματα χρονισμού των δεδομένων μέσω βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL). Ο πυκνωτής C3 και η

αντίσταση R3 στην είσοδο FILT είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του φίλτρου που περιέχεται στο PLL του δέκτη. Ο διακόπτης S1 επιτρέπει τη ρύθμιση της μορφής των δεδομένων εξόδου με την οδήγηση ενός λογικού «0» ή «1» στις εισόδους M0-M3 του δέκτη μέσω των πλών OR. Τα απαραίτητα σήματα MCK, SCK, FSYNC και SDATA οδηγούνται στους ακροδέκτες K3 ώστε να είναι δυνατό να συνδεθούν στο FPGA με κατάλληλα καλώδια.

Το σήμα PWM από την έξοδο του διαμορφωτή οδηγείται στο στάδιο εξόδου τάξης D, το οποίο αποτελείται από έναν οδηγό MOSFET και τέσσερα transistors τύπου MOSFET συνδεδεμένα σε διάταξη γέφυρας-H [6]. Το κυκλωματικό διάγραμμα του σταδίου εξόδου φαίνεται στο Σχήμα 7. Στην είσοδο IN+ οδηγείται το σήμα της PWM ενώ στην IN- ένα σήμα τάσης αναφοράς. Όταν για τις εισόδους IN+ και IN- του οδηγού ισχύει IN+>IN- τότε οι εξόδοι AHO και BLO παράγουν λογικό «1» οδηγώντας τα Q1 και Q4, αρα στο φορτίο εφαρμόζεται θετική τάση. Αντίθετα όταν IN+<IN-, οδηγούνται τα Q2 και Q3 και στο φορτίο εφαρμόζεται αρνητική τάση.



Σχήμα 7: Κυκλωματικό διάγραμμα σταδίου εξόδου

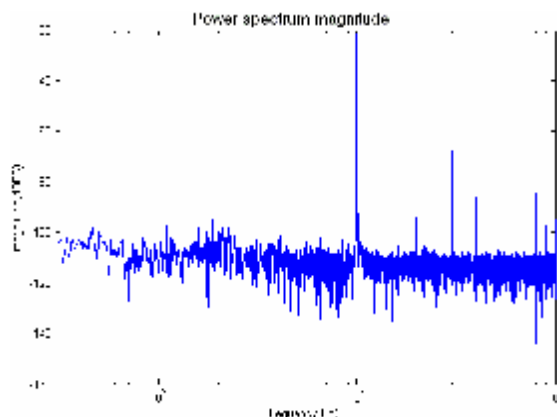
Στην υλοποίηση, τόσο ο οδηγός όσο και τα transistors τροφοδοούνται από τάση 12V. Τα transistors τύπου MOSFET άγουν μέγιστο ονομαστικό ρεύμα 9.2A και λειτουργούν υπό μέγιστη τάση 100V και μέγιστη συχνότητα περίπου 16MHz, ενώ ο οδηγός λειτουργεί σε γραμμές τάσης 8-80V DC. Αυτό καθιστά φανερό ότι είναι δυνατό να έχουμε πολύ μεγαλύτερη ισχύ εξόδου χωρίς αύξηση του όγκου της υλοποίησης. Το μόνο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ψύξη των transistors και του οδηγού MOSFET.

4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

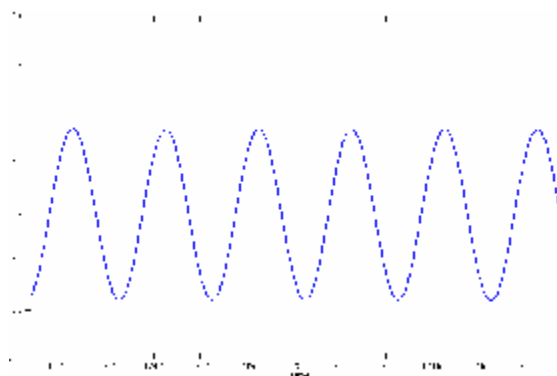
Οι μετρήσεις στο σύστημα του ψηφιακού ενισχυτή έγιναν ακουστικά, η σύνδεση του ενισχυτή με το σύστημα μετρήσεων MLSSA πραγματοποιείται μέσω ηχείου και μικροφώνου, τα οποία, φυσικά, επηρεάζουν σε ένα βαθμό την τελική μέτρηση [7]. Ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ημίτονο συχνότητας 1kHz.

Το σχήμα 8 παρουσιάζει την μέτρηση φάσματος ισχύος του ψηφιακού ενισχυτή. Διακρίνεται καθαρά η συχνότητα του 1kHz και αρμονικές παραμορφώσεις σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας εισόδου. Φανερή είναι και η συγκέντρωση θορύβου στις υψηλές συχνότητες λόγω του φίλτρου μορφοποίησης θορύβου.

Στο σχήμα 9 δείχνεται η χρονική απόκριση του ενισχυτή στο ίδιο ημίτονο. Οι κορυφές του ημιτόνου αναπαράγονται με ακρίβεια όπως και οι μεταβάσεις του σήματος από τα αρνητικά στα θετικά.



Σχήμα 8: Ακουστική μέτρηση φάσματος ισχύος σε είσοδο ημιτόνου 1kHz



Σχήμα 9: Χρονική απόκριση του ενισχυτή σε ημίτονο 1kHz

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας πλήρως ψηφιακός ενισχυτής ηχητικών σημάτων. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο των 70dB είναι αναμενόμενος για την ακρίβεια των 8-bits στο σήμα ημιτόνου που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές. Οι έντονες παραμορφώσεις σε συχνότητες πολλαπλάσιες της συχνότητας εισόδου οφείλονται στην διαμόρφωση κατά PWM. Παραμορφώσεις σε συχνότητες που προκύπτουν από συνδυασμό της συχνότητας εισόδου και της συχνότητας δειγματοληψίας οφείλονται σε ενδοδιαμόρφωση. Οι παρατηρούμενες παραμορφώσεις συμφωνούν με τις αναμενόμενες από την θεωρητική μελέτη στα [8], [9] με μικρές αποκλίσεις να παρουσιάζονται λόγω της ακουστικής μέτρησης.

Η ταχύτητα του διαμορφωτή PWM στην παρούσα υλοποίηση είναι στα 22.491MHz. Δεδομένου ότι κάθε αύξηση της ανάλυσης στην PCM κατά 1 bit συνεπάγεται διπλασιασμό της ταχύτητας διαμόρφωσης, περαιτέρω βελτιώσεις στην ηχητική ποιότητα του σήματος εξόδου είναι εύκολα δυνατές ακόμη και στις τεχνολογίες FPGAs και PLDs. Οι συγγραφείς προτείνουν υπερδειγματοληψία x4 του σήματος πριν τη διαμόρφωση και εφαρμογή του αλγορίθμου *jither* [10], [11].

Η απόδοση του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 80-90% και είναι δυνατό με προσεκτική σχεδίαση να φτάσει το 95%. Επιπλέον, το στάδιο ισχύος αποτελείται από transistors τύπου MOSFET τα οποία είναι δυνατό να ολοκληρωθούν για χαμηλή ισχύ με τεχνολογίες CMOS ή BiCMOS και να ελεγχθούν οι ικανότητες

οδήγησης, η κατανάλωση, η αντίσταση εξόδου. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την απλότητα της αρχιτεκτονικής, καθιστούν εφικτή την σχεδίαση και υλοποίηση του ψηφιακού ενισχυτή σε χαμηλή ισχύ ώστε να χρησιμοποιείται σε φορητές συσκευές (κινητά τηλέφωνα, συσκευές αναπαραγωγής συμπιεσμένων μορμά όπως MP3, WMA) και σε συσκευές υποβοήθησης της ακοής.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Atmel Hellas για την παροχή του εξοπλισμού και ιδιαίτερα τους Ανδρέα Φλώρο (System Concepts Group) και Παναγιώτη Ρόζο (Hardware Group) για τις πολύτιμες συμβουλές τους στην υλοποίηση του ψηφιακού ενισχυτή.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] J.M. Goldberg and M.B. Sandler, "Noise Shaping and Pulse-Width Modulation for an All-Digital Audio Power Amplifier," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 39, no. 6, pp. 449-460, June 1991.

[2] Φλώρος Ανδρέας, Διαμόρφωση ηχητικών σημάτων κατά PWM για υλοποίηση πλήρως ψηφιακών ενισχυτών, Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 2001.

[3] A.C. Floros, J. N. Mourjopoulos, "Analytic Derivation of Audio PWM Signals and Spectra", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 46, No. 7/8, pp. 621-633, July/Aug. 1998.

[4] K. Nielsen, "High-Fidelity PWM-Based Amplifier Concept for Active Loudspeaker Systems with Very Low Energy Consumption", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 45, No 7/8, pp.554-570, Jul./Aug. 1997.

[5] Atmel Corporation, *5K-40K Gates of AT40K FPGA with 8-bit AVR Microcontroller, up to 36K Bytes of SRAM and On-chip JTAG ICE*, Rev.1138F, 2002.

[6] Application Note 9324 (HIP4080AIP), Intersil 1996

[7] Maximum – Length Sequence System Analyzer, Reference Manual, Version 10A, DRA Laboratories

[8] A.C. Floros, J. N. Mourjopoulos, "On the Nature of Digital Audio PWM Distortions", *Audio Eng. Soc. 108th Convention*, preprint 5123, Feb. 2000.

[9] A.C. Floros, J. N. Mourjopoulos, "A Study of the Distortions and Audibility of PCM to PWM Mapping", *Audio Eng. Soc. 104th Convention*, preprint 4669, May. 1998.

[10] A.C. Floros, J. N. Mourjopoulos, D. E. Tsoukalas, "Jitter: The Effects of Jitter and Dither for 1-bit Audio PWM Signals", *Audio Eng. Soc. 106th Convention*, preprint 4656, May. 1999.

[11] A. Floros, N. A. Tatlas and J. Mourjopoulos, "A Distortion-free PWM Coder for All-digital Audio Amplifiers", presented at the *Audio Engineering Society 110th Convention*, Amsterdam, May 2001.

[12] Application Note 9324 (HIP4080AIP), Intersil

Τεχνολογίες ασύρματης οικιακής δικτύωσης για ηχητικές εφαρμογές

Ανδρέας Φλώρος
Δρ. Ηλ/γος Μηχ/κός & Τεχν/γίας Υπολογιστών
ATMEL Hellas S.A., Οδός Σταδίου, Πλατάνι,
26504 Ρίο, Πάτρα
afloros@patras.atmel.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχιζόμενη εξέλιξη των προτύπων ασύρματης δικτύωσης έχει αυξήσει κατακόρυφα τους υποστηριζόμενους ρυθμούς ασύρματης μετάδοσης. Το κυριότερο πρόβλημα για την μετάδοση χωρίς καλώδιο υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων σε πραγματικό χρόνο είναι η παροχή Ποιότητας της Υπηρεσίας (Quality of Service). Στην εργασία αυτή γίνεται μια παρουσίαση των υπάρχουσων τεχνολογιών που μπορούν να εφαρμοσθούν για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων σε οικιακό περιβάλλον, με στόχο τη μετάδοση και αναπαραγωγή ηχητικών δεδομένων υψηλής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε πρωτόκολλα που υλοποιούν QoS τεχνικές, σε μεθόδους αυτόματης ανακάλυψης και ενεργοποίησης ηχητικών συσκευών σε ολοκληρωμένα ασύρματα οικιακά δίκτυα, καθώς και σε ζητήματα ασφάλειας και προστασίας των πνευματικών δικαιωμάτων της διακινούμενης πληροφορίας.

ABSTRACT

In recent years, the rapid growth of wireless networking technologies has dramatically increased the supported wireless transmission rates. Hence, the key-aspect for cable-free, real time transmissions of bandwidth-demanding traffic flows is the Quality of Service (QoS) support. In this paper, the existing wireless local networks technologies that can be employed for home applications are presented, focusing on their abilities to transmit high-quality audio data in real-time. Moreover, a number of protocols are also described, providing QoS support, automatic device discovery as well as wireless security and/or digital rights protection management.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης εμφανίζουν γρήγορη ανάπτυξη και εκτεταμένη διείσδυση στην αγορά δικτύων υπολογιστών, προσφέροντας οικονομικές και ευέλικτες λύσεις, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση καλωδίων αποτελεί χρονοβόρο και ακριβή διαδικασία. Η αρχή της γρήγορης ανάπτυξης των τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης δεδομένων έγινε πριν από περίπου 5 χρόνια, με τη δημιουργία του προτύπου IEEE 802.11b, που υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων μέχρι 11Mbps. Από τότε, η εξέλιξη της τεχνολογίας και οι απαιτήσεις της αγοράς, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία νέων προτύπων (υπό τη μορφή προσθήκης στη βασική τυποποίηση 802.11 [1]), μερικά από τα οποία θα περιγραφούν εν συντομία στη συνέχεια, έχοντας σαν πρωτεύοντα στόχο την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, την ασφάλεια της

διακινούμενης πληροφορίας, και την παροχή Ποιότητας Υπηρεσιών (Quality of Service – QoS).

Ταυτόχρονα με την εξάπλωση των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παράλληλη ανάπτυξη της τεχνολογίας των πολυμέσων και η εμφάνιση πολυμεσικών εφαρμογών για δικτυακά περιβάλλοντα. Η εισαγωγή του διαδικτύου (internet) στην καθημερινή ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων, οδήγησε προοδευτικά στην ανάπτυξη τεχνολογιών για την μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων (π.χ. ήχου και εικόνας πραγματικού χρόνου, τηλεφωνίας - VoIP) μέσω ενσύρματων δικτύων μεταγωγής πακέτου. Αναπόφευκτα, η εξέλιξη αυτή οδηγεί στην απαίτηση για υποστήριξη τέτοιων εφαρμογών από ασύρματα δίκτυα, με στόχο είτε την κατάργηση χρήσης ή/και αντικατάσταση των καλωδίων, ή τη δημιουργία νέων τύπων ασύρματων πολυμεσικών εφαρμογών, οι οποίες δεν θα ακολουθούν το τυπικό μοντέλο χρήσης ενός προσωπικού υπολογιστή (Personal Computer – PC) ως κεντρικού συστήματος δικτύωσης, αλλά θα καταφέρνουν να δικτυώσουν φορητές και καταναλωτικές (Consumer Electronics – CE) συσκευές, τόσο σε οικιακό, όσο και σε επαγγελματικό περιβάλλον.

Στην εργασία αυτή γίνεται η παρουσίαση των τεχνολογιών που είναι διαθέσιμες σήμερα για ασύρματη μετάδοση υψηλής ποιότητας ψηφιακού ήχου, σε πραγματικό χρόνο και σε οικιακό περιβάλλον. Στην ενότητα 1, δίνονται οι βασικές προδιαγραφές και απαιτήσεις που εισάγει η ψηφιακή τεχνολογία ήχου και οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται από το σύστημα ασύρματης δικτύωσης. Στη συνέχεια, με βάση τις προδιαγραφές αυτές, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης που είναι κατάλληλες για μετάδοση ηχητικών δεδομένων υψηλής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο, με έμφαση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που κάθε μια προσφέρει. Η εργασία αυτή κλείνει με μια σειρά συμπερασμάτων που αφορούν στην ολοκλήρωση των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης με ηχητικές εφαρμογές υψηλής ποιότητας.

1. Αρχές ασύρματης ψηφιακής τεχνολογίας ήχου

Η επιλογή του πρωτοκόλλου ασύρματης μετάδοσης είναι συνάρτηση ενός συνόλου απαιτήσεων και προδιαγραφών που ορίζονται από τον τύπο της εφαρμογής και τη μορφή των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν από το ασύρματο μέσο. Οι προδιαγραφές αυτές, είναι εν συντομία οι ακόλουθες:

α) Τύπος ηχητικής εφαρμογής

Οι ασύρματες ηχητικές εφαρμογές μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες [2]: I) τις εφαρμογές όπου το αρχικό ηχητικό σήμα (το οποίο εν γένει αποτελείται από N διάκριτα κανάλια ήχου) μεταδίδεται ασύρματα από την ηχητική πηγή στο δέκτη και στη συνέχεια υπόκειται σε επεξεργασία, διαχωρισμό και αναπαραγωγή και II) τις εφαρμογές όπου το αρχικό σήμα υπόκειται σε διαχωρισμό στα επιμέρους κανάλια ήχου πριν την μετάδοσή του και στη συνέχεια μεταδίδεται προς τους συγκεκριμένους δέκτες όπου και αναπαράγεται (ή υπόκειται σε επεξεργασία). Στην περίπτωση (I) απαιτείται μία σύνδεση σημείο-σε-σημείο (ad hoc), ενώ στη (II) απαιτείται η δημιουργία πολλών ταυτόχρονων συνδέσεων, γεγονός το οποίο οδηγεί σε πιο σύνθετες τοπολογίες δικτύου (infrastructures).

β) Κωδικοποίηση ηχητικών δεδομένων

Η επιλογή της μορφής/κωδικοποίησης των υπό μετάδοση ψηφιακών ηχητικών δεδομένων αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους για την επιλογή του

κατάλληλου ασύρματου πρωτοκόλλου, καθώς καθορίζει το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση LPCM ηχητικών δεδομένων ποιότητας CD (συχνότητα δειγματοληψίας $f_s=44.1\text{kHz}$, ευκρίνεια κβαντισμού $N=16\text{bit}$), κάθε ηχητικό κανάλι αντιστοιχεί σε σταθερή ροή δεδομένων ίση προς 705kbps. Λαμβάνοντας δε υπ'όψιν την πρόσθετη πληροφορία που εισάγεται από τα χαμηλότερα επίπεδα δικτύωσης, στην πράξη ο ρυθμός αυτός αγγίζει το 1Mbps για κάθε κανάλι ήχου. Αντίθετα, στην περίπτωση συμπιεσμένου ηχητικού υλικού, οι παραπάνω ρυθμοί μειώνονται δραματικά (μέχρι 320kbps για συμπίεση στερεοφωνικού σήματος κατά το πρότυπο MPEG1-LayerIII και 384kbps για 5.1 ηχητικά κανάλια κωδικοποιημένα κατά AC-3).

γ) Τύπος ασύρματης μετάδοσης

Ως τύπος ασύρματης μετάδοσης εννοείται το σύνολο των παραμέτρων που ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα πακέτα δεδομένων μέσω του ασύρματου καναλιού. Τέτοιες παράμετροι είναι: I) η μετάδοση σημείο προς σημείο (unicast), ή σημείο προς πολλαπλά σημεία (multicast/broadcast), καθώς επίσης και διάφορες παραλλαγές που μπορούν να υιοθετηθούν με στόχο τη βελτιστοποίηση χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ειδικά σε περιπτώσεις έντονων παρεμβολών στο ασύρματο κανάλι και II) το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων, το οποίο μπορεί να είναι σταθερό ή μεταβλητό και το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές ταχύτητες δεδομένων (throughput).

δ) Περιορισμοί μετάδοσης πραγματικού χρόνου

Η μετάδοση ηχητικών δεδομένων είναι μια διαδικασία η οποία πρέπει να πραγματοποιείται με καθυστέρηση ελεγχόμενη, που δεν θα ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή (η οποία εξαρτάται από τον τύπο της κωδικοποίησης των ηχητικών δεδομένων). Απαραίτητη προϋπόθεση λοιπόν είναι η υλοποίηση μηχανισμών που εξασφαλίζουν Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) κατά τη διάρκεια της μετάδοσης.

ε) Μετάδοση συμπληρωματικής πληροφορίας και δεδομένων ελέγχου

Παράλληλα με τη ασύρματη μετάδοση των ηχητικών δεδομένων, πρέπει να εξασφαλίζεται η μετάδοση πληροφορίας σηματοδότησης του πρωτοκόλλου που υλοποιεί την μετάδοση, καθώς και πρόσθετης πληροφορίας ελέγχου της εφαρμογής (π.χ. έλεγχος στάθμης ηχητικής αναπαραγωγής από το χρήστη καθώς και σηματοδότηση για την αρχικοποίηση ενός ασύρματου πολυκάναλου συστήματος). Παράλληλα, σε πολυκαναλικά περιβαλλοντα, απαραίτητη κρίνεται η ανάπτυξη και υλοποίηση ενός μηχανισμού συγχρονισμού των δεκτών/μονάδων αναπαραγωγής. Ο μηχανισμός αυτός θα πρέπει να εξασφαλίζει με τρόπο δυναμικό τον απόλυτο συγχρονισμό των απομακρυσμένων, μη διασυνδεδεμένων ασύρματων δεκτών, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστο ηχητικό αποτέλεσμα.

στ) Ασφάλεια και προστασία ηχητικών δεδομένων

Η προστασία του περιεχομένου και των δικαιωμάτων των ηχητικών δεδομένων αποτελεί προϋπόθεση εκ μέρους των μουσικών παραγωγών για την κυκλοφορία ηχητικού υλικού προσαρμοσμένου σε συγκεκριμένες πλατφόρμες αναπαραγωγής. Σε γενικές γραμμές, η προστασία αυτή επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές, όπως για παράδειγμα η Content Protection for Pre-recorded Media (CPPM) που χρησιμοποιείται στο DVD-Audio, η Content Scramble System (CSS) που εφαρμόζεται στο DVD-Video, καθώς και με μια ποικιλία αλγορίθμων υδατογραφίας

(watermarking). Κατά την ασύρματη μετάδοση του ηχητικού υλικού, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εφαρμογή αλγορίθμων που θα απαγορεύουν την αντιγραφή του ηχητικού υλικού από το ασύρματο κανάλι. Τέτοιοι αλγόριθμοι λοιπόν θα πρέπει να ενσωματωθούν σε κάποιο ανώτερο επίπεδο του πρωτοκόλλου ασύρματης δικτύωσης.

2. Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης για ηχητικές εφαρμογές

α) Bluetooth

Η τυποποίηση Bluetooth προβλέπει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων χαμηλού ρυθμού (μέχρι 1Mbps) σε απόσταση 10m. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν σε προηγούμενη εργασία [3], έδειξαν ότι μέσω Bluetooth, είναι δυνατή η μετάδοση μόνο συμπιεσμένων ηχητικών δεδομένων (π.χ. MPEG1-LayerIII @ 320kbps), μέσω ασύγχρονων διασυνδέσεων (links). Παρόλα αυτά, η τεχνολογία Bluetooth ενδείκνυται αποκλειστικά για μεταδόσεις σημείο-προς-σημείο και όχι για σύγχρονη μετάδοση από έναν πομπό σε πολλαπλούς δέκτες.

β) 802.11b

Πρόκειται για τον πρώτο αντιπρόσωπο της οικογένειας τυποποιήσεων 802.11. Υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 11Mbps. Στην πράξη όμως ο πραγματικός ρυθμός δεδομένων (throughput) περιορίζεται κατά μέγιστο στα 5.5 - 6Mbps, γεγονός που το καθιστά ικανό να υποστηρίξει ηχητικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου χωρίς συμπίεση των ηχητικών δεδομένων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για ασύρματη μετάδοση στερεοφωνικού ήχου ποιότητας CD, το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι 1.44Mbps.

Η έλλειψη ενός μηχανισμού συγχρονισμού ακριβείας (παρέχεται ακρίβεια της τάξης των 100msec) μεταξύ δύο ή περισσότερων διασυνδεδεμένων ασύρματων ηχητικών συσκευών μέσω του πρωτοκόλλου 802.11b δεν αποτελεί το μοναδικό του μειονέκτημα για τη χρήση του σε ηχητικές εφαρμογές υψηλής ποιότητας και πραγματικού χρόνου. Το 802.11b πρωτόκολλο στηρίζεται σε έναν μηχανισμό προσπέλασης του ασύρματου μέσου με ανταγωνισμό, ο οποίος σε καμία περίπτωση δεν εξασφαλίζει εγγυήσεις για το εύρος ζώνης που θα διατεθεί σε κάποια εφαρμογή, καθώς και για το μέγεθος των καθυστερήσεων που θα δημιουργηθούν κατά την μετάδοση των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, βρίσκεται σε εξέλιξη η ανάπτυξη της τυποποίησης 802.11e με στόχο την προσθήκη χαρακτηριστικών Ποιότητας Υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) σε 802.11 ασύρματα δίκτυα.

γ) 802.11e

Η τυποποίηση αυτή περιγράφει ένα σύνολο μηχανισμών που επιτρέπουν την μετάδοση σε πραγματικό χρόνο πολυμεσικών δεδομένων (π.χ. ήχου και εικόνας) χωρίς διακοπές και καθυστερήσεις, οι οποίες αλλοιώνουν το αντιληπτό από τον άνθρωπο αποτέλεσμα. Η αναμενόμενη ημερομηνία οριστικοποίησης του προτύπου [4] είναι στα τέλη του 2004. Παράλληλα, εξαιτίας του μεγάλου ενδιαφέροντος της αγοράς για άμεση υλοποίηση QoS τεχνικών σε ασύρματα δίκτυα και της παρατεταμένης περιόδου διαμόρφωσης του τελικού 802.11e προτύπου, η Wireless Fidelity Alliance (WFA) έχει αναπτύξει δύο υπο-πρότυπα για QoS, το Wireless Multimedia Enhancements (WME) και το Wireless Scheduled Multimedia (WSM), τα οποία περιέχουν μηχανισμούς του 802.11e, με στόχο την συγκράτηση της διασυνδεσιμότητας μεταξύ των συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών σε αποδεκτά πλαίσια.

δ) 802.11g/n

Η τυποποίηση 802.11g αποτελεί εξέλιξη της 802.11b με στόχο την υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης (έως 54Mbps). Αποτελεί την αντιπρόταση στο πρότυπο 802.11a των 5GHz το οποίο είχε προταθεί στο παρελθόν. Τον τελευταίο χρόνο, η εξάπλωσή του στην αγορά είναι ραγδαία, ενώ όλα δείχνουν πως θα αντικαταστήσει πλήρως το πρότυπο 802.11b.

Εξέλιξη του 802.11g προτύπου αποτελεί το 802.11n, του οποίου η διαμόρφωση άρχισε πριν από μερικούς μήνες. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που θα προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 108-320Mbps και θα αποτελέσει μια σταθερή πλατφόρμα για ταυτόχρονη μετάδοση ήχου και εικόνας υψηλής ανάλυσης.

ε) 802.11i

Πρόκειται για την πλέον πρόσφατη τυποποίηση και αναφέρεται σε προσθήκες χαρακτηριστικών στο MAC επίπεδο που εξασφαλίζουν ασφάλεια κατά την ασύρματη μεταφορά δεδομένων, μέσω ενός μηχανισμού που καλείται WiFi Protected Access (WPA) και την χρήση κλειδιών που μεταβάλλονται με το χρόνο. Παρόλα αυτά, για εφαρμογές ψηφιακού ήχου, όπου απαιτείται πρόσθετη ασφάλεια πνευματικών δικαιωμάτων (π.χ. Digital Copyright Management), το πρότυπο αυτό θα πρέπει να επεκταθεί με πρόσθετους αλγορίθμους που θα εξασφαλίζουν την ασφαλή διακίνηση του μεταδιδόμενου ηχητικού υλικού.

ε) Πρωτόκολλο Ultra Wide Band

Η τεχνολογία Ultra Wide Band (UWB) αποτελεί μια εξελισσόμενη ασύρματη πλατφόρμα, τόσο σε επίπεδο φυσικού επιπέδου, όσο και σε επίπεδο MAC και υπόσχεται ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 480Mbps. Αν και οι αντιπαραθέσεις σχετικά με την τεχνολογία που θα υλοποιήσει το πρωτόκολλο είναι έντονες, αποτελεί τον ασύρματο απόγονο του ευρύτατα διαδεδομένου Universal Serial Bus (USB), και αναμένεται να επικρατήσει σε περιβάλλοντα οικιακής πολυμεσικής δικτύωσης υψηλών ταχυτήτων, σε συνδυασμό με πρωτόκολλα ανακάλυψης συσκευών (όπως π.χ. το Universal Plug n' Play – UPnP).

3. Συζήτηση και συμπεράσματα

Η ασύρματη μετάδοση ηχητικών δεδομένων υψηλής ποιότητας αποτελεί σήμερα μια σημαντική τεχνολογική πρόκληση, τόσο σε επίπεδο έρευνας, όσο και σε επίπεδο αγοράς. Μεγάλη ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή αναμένεται να δώσει η μεταστροφή των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης από το παραδοσιακό περιβάλλον δικτύων υπολογιστών στην κατεύθυνση δικτύωσης καταναλωτικών συσκευών (CE). Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι βασικές απαιτήσεις που εισάγονται από την σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία ήχου και οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται από τα ασύρματα πρωτόκολλα, όπως οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, η υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) καθώς και η αυξημένη ασφάλεια (σε συνδυασμό με την αποτελεσματική διαχείριση των πνευματικών δικαιωμάτων).

Στη συνέχεια, έγινε συνοπτική παρουσίαση των υφιστάμενων και εξελισσόμενων τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης, κάθε μία από τις οποίες ικανοποιεί κάποιες από τις απαιτήσεις αυτές. Κατάλληλος συνδυασμός τους μπορεί να οδηγήσει πολύ γρήγορα σε πλατφόρμες ικανές να ανταποκριθούν στους αυστηρούς περιορισμούς που επιβάλλει η φύση των ψηφιακών δεδομένων υψηλής ποιότητας.

Παράλληλα, πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη των κατάλληλων ασύρματων πρωτοκόλλων για την υποστήριξη ηχητικών εφαρμογών υψηλής ποιότητας πρέπει να λάβει υπόψιν της και μια σειρά από επιπλέον παράγοντες όπως: α) εύκολη εγκατάσταση και λειτουργία του απαιτούμενου υλικού και λογισμικού από τη μεριά του χρήστη β) τη συμβατότητα μεταξύ συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών και γ) την τελική σχεδίαση των προϊόντων, συμβιβάζοντας πρόσθετα χαρακτηριστικά και τιμές οι οποίες θα είναι προσεγγίσιμες από το μεγαλύτερο μερίδιο των καταναλωτών.

4. Αναφορές

[1] IEEE802.11 WG, IEEE802.11, “Information technology Telecommunications and information exchange between system Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, 1999.

[2] A. Floros and T. Karoubalis, “Delivering high-quality Audio over WLANs”, Audio Engineering Society 116th Convention, Berlin, May 8-11, preprint 5996.

[3] A. Floros, M. Koutroubas, N. Tatlas, J. Mourjopoulos, “A Study of Wireless Compressed Digital – Audio Transmission”, presented at the 112th AES Convention, Munich, May 10 – 13 2002 (preprint 5516).

[4] IEEE802.11 WG, IEEE802.11e/D9.0, “IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 7: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements”, August 2004.

Πρόβλεψη κυκλοφοριακού θορύβου: Μια στατιστική προσέγγιση

Μανώλης Μανατάκης
Επικ.Καθηγητής/ Πανεπ. Πατρών
manata@mech.upatras.gr

Ιωάννα Μανατάκη
Υποψ. Διδάκτωρ/ Ο.Π.Α.
imanatak@aueb.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή προσπαθούμε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο του κυκλοφοριακού θορύβου βασισμένο στους τύπους των οχημάτων. Τα δεδομένα συλλέγονται στους δρόμους των Πατρών με κυκλοφοριακές συνθήκες ελεύθερης ροής. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα επίπεδα του κυκλοφοριακού θορύβου (L_{10}) και τους όγκους των οχημάτων ταξινομημένων σε κατηγορίες (ελαφρά και βαριά). Τέλος με τη βοήθεια Στατιστικών μεθόδων δημιουργούνται ζώνες εμπιστοσύνης και ζώνες πρόβλεψης των επιπέδων του θορύβου.

ABSTRACT

This article describes a new prediction model for traffic noise based on vehicles types. The data were collected from Patras center with free-flow traffic conditions. The model consists of traffic noise levels, traffic volumes by vehicle classification (light and heavy) and average speeds by vehicle type. The method, based on the Statistical theory of regression analysis, formulate the models and the results are expressed by confidence and prediction intervals of noise.

Εισαγωγή

Ο θόρυβος είναι ένα γνωστό περιβαλλοντικό πρόβλημα σε όλες τις μεγάλες πόλεις. Η κυριότερη πηγή του περιβαλλοντικού αυτού θορύβου στις αστικές περιοχές προέρχεται από την κυκλοφορία των οχημάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες ο κυκλοφοριακός θόρυβος έχει αυξηθεί δραματικά. Η παρακολούθηση και η πρόβλεψη του κυκλοφοριακού θορύβου στις αστικές περιοχές έχει εξεταστεί με τη χρήση διαφόρων μοντέλων σε ένα μεγάλο αριθμό εργασιών. Στα πρώτα μοντέλα που αναπτύχθηκαν πριν 25 χρόνια τα οχήματα θεωρούντο ότι κινούνται σε κατάσταση ελεύθερης ροής και με σταθερή ταχύτητα. Αργότερα αναπτύχθηκαν πιο πολύπλοκα μοντέλα και στις ημέρες μας έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου που βασίζονται στις αρχές της Στατιστικής Ανάλυσης. Έτσι έχει υπάρξει ένας μεγάλος αριθμός εργασιών, μερικές (πιο κοντινές στη δική μας θεώρηση) φαίνονται στη βιβλιογραφία [1-15].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εισάγει ένα Στατιστικό μοντέλο για τον προσδιορισμό και την πρόβλεψη των επιπέδων κυκλοφοριακού θορύβου L_{10} , λαμβάνοντας υπόψη τους τύπους οχημάτων, την κυκλοφοριακή ροή, τη μέση ταχύτητα των οχημάτων και την κλίση του εδάφους. Η δημιουργία του Στατιστικού μοντέλου και ο προσδιορισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης και διαστημάτων πρόβλεψης του θορύβου στηρίζονται στην ανάλυση παλινδρόμησης και στην ανάλυση διασποράς.

1. Το Στατιστικό μοντέλο

Για τη Στατιστική προσέγγιση του προβλήματος απαιτείται η συναρτησιακή σχέση του κυκλοφοριακού θορύβου και των παραμέτρων οχημάτων και δρόμων. Οι κλασσικές συναρτησιακές σχέσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία στηρίζονται στην επεξεργασία αυτών των σχέσεων με τη βοήθεια Μαθηματικών ή Στατιστικών μεθόδων.

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας έγινε η υπόθεση ότι το εμπορικό κέντρο της πόλης των Πατρών (όπου έγιναν οι μετρήσεις) είναι ένα πολυμεταβλητό σύστημα εισόδου και ένα πολυμεταβλητό σύστημα εξόδου, όπου οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου είναι η κυκλοφοριακή ροή και ο κυκλοφοριακός θόρυβος αντίστοιχα.

Το μοντέλο θα πρέπει να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια: α) η κυκλοφορία οχημάτων να είναι η κυριότερη πηγή θορύβου, β) να επιτρέπει ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο θόρυβο και γ) να χρησιμοποιεί δεδομένα που να είναι εύκολα μετρήσιμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια μπορούμε να πούμε ότι η στάθμη του κυκλοφοριακού θορύβου L_{10} για μια λογική περίοδο χρόνου, είναι μια παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση περιγραφής του κυκλοφοριακού θορύβου.

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου δίνουν ένα ωριαίο επίπεδο θορύβου L_{10} που εξαρτάται από τους λογαρίθμους των παραμέτρων του προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ένα πολυμεταβλητό μοντέλο για το θόρυβο L_{10} όπως συναντάται στη βιβλιογραφία, που είναι το εξής:

$$L_{10} = a \log Q + b \log H + c \log L + d \log V + eG + \Delta \quad (1.1)$$

όπου: L_{10} = το προβλεπόμενο ωριαίο επίπεδο θορύβου ($L_{A10, T=1 \text{ hr}}$), H =ο αριθμός των βαρέων οχημάτων (που περιλαμβάνει τα ιδιωτικά και δημόσια λεωφορεία, φορτηγά, πούλμαν), L = ο αριθμός των ελαφρών οχημάτων (που περιλαμβάνει τα Ι.Χ, μοτοποδήλατα, ταξί), $Q=H+L$ ο ωριαίος ολικός κυκλοφοριακός όγκος, V = η μέση ταχύτητα των οχημάτων, G = η κλίση του δρόμου και Δ = το άθροισμα όλων των άλλων διορθώσεων, όπως ορίζονται στο CRTN [24].

Με τη βοήθεια της Ανάλυσης διασποράς και παλινδρόμησης έγινε ανάλυση αυτών των παραμέτρων και βρέθηκε η συνεισφορά τους στο προτεινόμενο μοντέλο.

2. Στατιστική Ανάλυση

Υποθέτουμε ότι η σχέση μεταξύ της ανεξάρτητης μεταβλητής X (κυκλοφοριακός χρόνος, min) και της εξαρτημένης μεταβλητής Y (κυκλοφοριακός θόρυβος, dB) δίνεται από το πολυμεταβλητό μοντέλο παλινδρόμησης :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + e_i \quad (2.1)$$

όπου η L_{10} αντιστοιχεί στην τυχαία μεταβλητή Y [19, 20] και e_i είναι τα σφάλματα. Ένα σύνολο m μετρήσεων είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \beta_{01} + \beta_{11} x_1 + \beta_{21} x_2 + \dots + \beta_{r1} x_r + e_1 \\ Y_i &= \beta_{02} + \beta_{12} x_1 + \beta_{22} x_2 + \dots + \beta_{r2} x_r + e_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$Y_i = \beta_{0m} + \beta_{1m} x_1 + \beta_{2m} x_2 + \dots + \beta_{rm} x_r + e_m$$

Ο όρος του σφάλματος $e = [e_1, e_2, \dots, e_m]'$ έχει μέση τιμή και διασπορά

$$E(e) = 0, \quad \text{Var}(e) = \Sigma \quad (2.3)$$

Σε μορφή πινάκων έχουμε

$$Y = X \beta + e \quad (2.4)$$

όπου Y , X , β και e είναι πίνακες τάξεων $n \times m$, $n \times (r+1)$, $(r+1) \times m$ και $n \times m$ αντίστοιχα, με

$$E(e_i) = 0, \quad \text{Cov}(e_{(i)}, e_{(k)}) = \sigma_{ik} \mathbf{I}, \quad i, k = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

Οι m παρατηρήσεις της j δοκιμής έχουν πίνακα συνδιασποράς $\Sigma = \{\sigma_{ik}\}$, ενώ παρατηρήσεις από διαφορετικές δοκιμές είναι ασυσχέτιστες. Οι β και σ_{ik} είναι άγνωστες παράμετροι.

Έχοντας τις τιμές των X και Y υπολογίζουμε τους εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων $\hat{\beta}_{(i)}$ αποκλειστικά από τις παρατηρήσεις $Y_{(i)}$. Συγκεντρώνοντας όλες αυτές τις εκτιμήσεις παίρνουμε

$$\hat{\mathbf{b}} = (X' X)^{-1} X' Y \quad (2.6)$$

Για κάθε επιλογή των παραμέτρων B , ο πίνακας των σφαλμάτων είναι $Y - XB$.

Χρησιμοποιώντας τους εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων $\hat{\mathbf{b}}$, μπορούμε να σχηματίσουμε τους πίνακες των

$$\text{Προβλεπουσών τιμών: } \hat{Y} = X \hat{\mathbf{b}} = X(X' X)^{-1} X' Y \quad (2.7)$$

$$\text{Υπολοίπων: } \hat{\mathbf{e}} = Y - \hat{Y} = [I - X(X' X)^{-1} X'] Y \quad (2.8)$$

$$\text{Υπολοίπων αθροισμάτων των τετραγώνων: } \hat{\mathbf{e}}' \hat{\mathbf{e}} = Y' Y - \hat{Y}' \hat{Y} = Y' Y - \hat{\mathbf{b}}' X' X \hat{\mathbf{b}} \quad (2.9)$$

Για τον εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων $\hat{\mathbf{b}}$, που υπολογίζεται με τη βοήθεια του πολυμεταβλητού μοντέλου παλινδρόμησης της σχ.(2.4) έχουμε ότι

$$E(\hat{\mathbf{b}}) = \beta, \quad \text{Cov}(\hat{\mathbf{b}}_{(i)}, \hat{\mathbf{b}}_{(k)}) = \sigma_{ik} (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \quad (2.10)$$

όπου οι $\hat{\mathbf{e}}$ και $\hat{\mathbf{b}}$ είναι ασυσχέτιστοι.

Έστω το πολυμεταβλητό μοντέλο παλινδρόμησης της σχ.(2.4) με τάξη του πίνακα X να είναι $r+1$ και έστω ότι τα σφάλματα e έχουν κανονική κατανομή. Τότε

$$\hat{\mathbf{b}} = (X' X)^{-1} X' Y \quad (2.11)$$

είναι ο εκτιμητής μεγίστης πιθανοφάνειας του β και ο $\hat{\mathbf{b}}$ έχει κανονική κατανομή

$$\hat{\mathbf{b}} \sim N(E(\hat{\mathbf{b}}) = \beta, \quad \text{Cov}(\hat{\mathbf{b}}_{(i)}, \hat{\mathbf{b}}_{(k)}) = \sigma_{ik} (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1}) \quad (2.12)$$

Έστω τέλος ότι $\hat{\Sigma}$ είναι ο εκτιμητής μεγίστης πιθανοφάνειας του Σ , που είναι

$$\hat{\Sigma} = \frac{\hat{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{e}}'}{n} = \frac{(Y - X \hat{\mathbf{b}})' (Y - X \hat{\mathbf{b}})}{n} \quad (2.13)$$

και $n \hat{\Sigma} : W_{n-r-1}(\mathbf{g}' \Sigma)$ (2.14)

2.1 Προβλέψεις από τα πολυμεταβλητά μοντέλα παλινδρόμησης, [21-23]

Θεωρούμε το μοντέλο $Y = X \beta + e$. Από τη πρόβλεψη του Y και με τη βοήθεια της θεωρίας της παραπάνω παραγράφου βρίσκουμε ότι $\hat{\beta}' \mathbf{x}_0$ έχει κανονική κατανομή $N(\hat{\beta}' \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_0' (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0 \Sigma)$ και $n \hat{\Sigma}$ κατανέμεται ανεξάρτητα με $W_{n-r-1}(\mathbf{x}' \Sigma)$.

Η άγνωστη τιμή της συνάρτησης παλινδρόμησης του \mathbf{x}_0 είναι η $\hat{\beta}\alpha_0$. Έτσι έχουμε ότι

ένα 100 (1- α) % διάστημα εμπιστοσύνης για την $\hat{\beta}\alpha_0$ είναι

$$\left(\beta\alpha_0 - \hat{\beta}\alpha_0\right) \frac{\frac{\alpha}{\xi} \frac{n\hat{\Sigma}}{n-r-1} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}}{\xi} \left(\beta\alpha_0 - \hat{\beta}\alpha_0\right) \leq \mathbf{x}_0' (\mathbf{X}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0 \frac{\frac{\alpha}{\xi} \frac{n}{n-r-1} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} F_{m, n-r-m, \alpha}}{\xi} \frac{\hat{\theta}}{\theta} \quad (2.15)$$

όπου $F_{m, n-r-m, \alpha}$ είναι το άνω (100 α)-στο της F κατανομής με m, n-r-m βαθμούς ελευθερίας.

Για το πρόβλημα της πρόβλεψης μιας μεμονωμένης τιμής της $\mathbf{Y}_0 = \beta\alpha_0 + \varepsilon_0$ στο \mathbf{x}_0 , έχουμε ότι το ε_0 είναι ανεξάρτητο του \mathbf{e} και ότι η τ.μ. $\mathbf{Y}_0 = \hat{\beta}\alpha_0 = (\beta - \hat{\beta})\alpha_0 + \varepsilon_0$ έχει την κανονική κατανομή $N_m(\mathbf{0}, (\mathbf{1} + \mathbf{x}_0'(\mathbf{X}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}_0)\Sigma)$. Έτσι:

ένα 100 (1- α) % διάστημα πρόβλεψης της \mathbf{Y}_0 είναι

$$\mathbf{x}_0' \hat{\beta}_{(i)} \pm \sqrt{\frac{\frac{\alpha}{\xi} \frac{n}{n-r-m} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} F_{m, n-r-m, \alpha}}{\xi} \sqrt{1 + \mathbf{x}_0' (\mathbf{X}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0 \frac{\frac{\alpha}{\xi} \frac{n}{n-r-1} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}}{\xi}}} \quad (2.16)$$

3. Μετρήσεις- Πειράματα

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής οι μετρήσεις έγιναν στους πιο γνωστούς εμπορικούς δρόμους των Πατρών - Αγ. Ανδρέου, Κορίνθου, Γούναρη, Ερμού, Κολοκοτρώνη και Υψηλάντου. Στο Σχ.3.1 φαίνονται οι δρόμοι αυτοί και τα σημεία μετρήσεων. Για την κυκλοφορία υποθέσαμε ότι ο συνολικός αριθμός των κινουμένων οχημάτων είναι μια παράμετρος που μεταβάλλεται αργά με το χρόνο και ότι η κυκλοφορία είναι η κύρια πηγή περιβαλλοντικού θορύβου. Κάθε διαδικασία μετρήσεων διαρκούσε 30min. και υπολογίζετο ο αριθμός ελαφρών, βαρέων και ο συνολικός αριθμός οχημάτων. Υπολογίζετο η μέση ταχύτητα των οχημάτων μετρώντας το χρόνο που χρειάζονταν τα οχήματα για να διανύσουν μια γνωστή απόσταση 25m. Όλες οι μετρήσεις γίνοντο από 7.00-21.00. Εβρίσκετο η L_{10} , L_{eq} και L_{max} ως συνάρτηση του κυκλοφοριακού όγκου και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίν.1.

4. Αποτελέσματα- Συμπεράσματα

Από τον Πιν.3.1 φαίνεται ότι οι μετρήσεις θορύβου σε L_{10} περιέχονται μεταξύ των τιμών 71.1 και 77.3 dBA. Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων/ώρα μεταβάλλεται μεταξύ 472 και 570. Οι ταχύτητες των οχημάτων ήταν από 29.4 έως 46.3km/h.

Η θεωρία της παραγρ. 2 εφαρμόστηκε για να δημιουργηθεί το μοντέλο της Στατιστικής Ανάλυσης. Η επεξεργασία των δεδομένων έδωσε τις τιμές των συντελεστών του μοντέλου της σχ.1.1 που είναι:

$$a=10.9, b=8.2, c=0.02, d=-4.3, e=0.2, \Delta=47$$

Έτσι η βέλτιστη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στη σχ.1.1 έδωσε το μοντέλο

$$L_{10} = 10.9\log Q + 8.2\log H + 0.02\log L - 4.3\log V + 0.2G + 47 \quad (4.1)$$

με ένα τυπικό σφάλμα μέτρησης 2dBA.

Η Στατιστική Ανάλυση της παραγρ.2 έδωσε τα διαστήματα εμπιστοσύνης και πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου, όπως αυτά φαίνονται στον Πίν.4.1 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το στατιστικό αυτό μοντέλο είναι στοχαστικό και εκφράζεται από τις εξισώσεις (2.15) και (2.16).

Τα διαστήματα εμπιστοσύνης και πρόβλεψης μεταβάλλονται μεταξύ ενός κατώτερου και ανώτερου ορίου καθώς οι τιμές των μεταβλητών της εξίσωσης (4.1) αλλάζουν και αντιστοιχούν στην κατάσταση του συστήματος με ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Έτσι είναι δυνατόν θεωρώντας τα δεδομένα του προβλήματος (όπως αριθμός οχημάτων, μέση ταχύτητα οχημάτων, κλίση εδάφους κ.λ.π.) να γίνουν προβλέψεις θορύβου L_{10} ως συνάρτηση των όρων της σχ.(1.1) και της (4.1) με ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Το προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου στηρίζεται στις αρχές της Στατιστικής Συμπερασματολογίας και της Ακουστικής Ανάλυσης και είναι ρεαλιστικό αφού παίρνει υπόψη του τις κυριότερες παραμέτρους του κυκλοφοριακού προβλήματος. Έτσι με το μοντέλο αυτό είναι δυνατόν να γίνουν συστηματικές προβλέψεις του κυκλοφοριακού θορύβου και να δημιουργηθούν «χάρτες θορύβου» διαφόρων περιοχών.

5. Αναφορές

- [1] Blumenfeld D.E. and Weiss G.H., "Curve fitting and probability distribution of acoustic noise from freely flowing traffic", Transportation Research 1978, v.12, p.p 111-114.
- [2] Lewis P.T. "The noise generated by single vehicles in freely-flowing traffic", Journal of Sound & Vibration 1973, v.30, p.p 191-206.
- [3] Denamy M.E., et all "The prediction of noise levels L_{10} due to traffic noise", Journal of Sound and Vibration, 1976, v.48, p.p 305-325.
- [4] To W.M. et all "A multiple regression model for urban traffic noise in Hong-Kong" J. Acoust. Soc., 2002, v.112, 2, p.p 551-556.
- [5] Hajech J.J., "Leq traffic noise prediction model", Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1977, Transportation Research Record No 648, p.p. 48-52.
- [6] Jacobs L.J et all, "A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light conditions", J. of Sound & Vibration, 1980, v.72 (4), p.p.523-537.
- [7] Cvetkovic D. et all, "Naiss model for traffic noise prediction", Working & Living Environmental Protection, 1997, v.1 (2), p.p. 73-81.
- [8] Jones R.R. et all, Techniques for the investigation of road traffic noise in regions of restricted flow by the use of digital computer simulation methods", J. Sound Vib. 1981, v.75, p.p.307-322.
- [9] Saadu A.A. et all "Road traffic noise survey and analysis of some major urban centers in Nigeria", Noise Control Eng. J, 1998, v.46, p.p.146-158.
- [10] Cannelli G.B. et all "A mathematical model for evaluation and prediction of the mean energy level of traffic noise in Italian towns", Acustica 1983, v.53, p.p 31-36.
- [11] Suksaard T. et all, "Road traffic noise prediction model in Thailand", Appl.Acoust. 1999, v. 58,2, p.p.123-130.
- [12] Steele C., "A critical review of some traffic noise prediction models", Appl. Acoust. 2001, v. 62, 3, p.p.271-287.

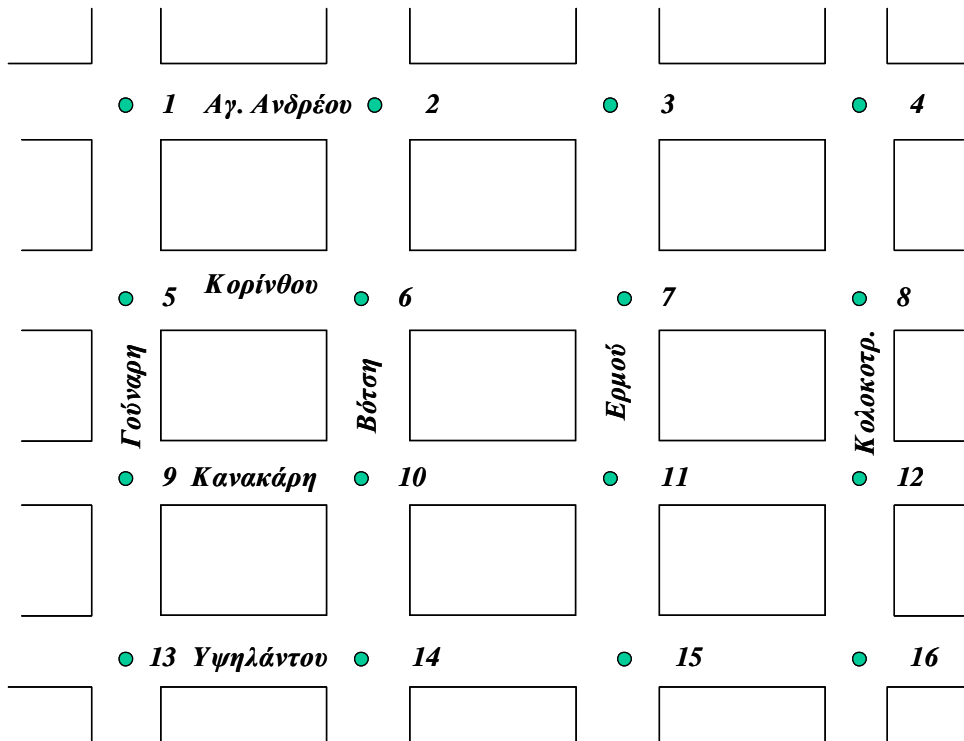
- [13] Ohta M. et al, "State prediction for environmental noise system by a generalized adaptive function model", J. Acc. Soc. Am. 1984, v.75,4.
- [14] Johnson D.R. and Shonders E.G. , "The evaluation of noise from freely flowing road traffic", J. Sound Vibr. 1998, v.7,2, p.p.287-309.
- [15] UK Department of Transport Calculation of road traffic noise, HMSO, London, 1988.
- [16] Johnson R.-Wichern D., "Applied Multivariate Statistical Analysis", 1992, Prentice Hall.
- [17] Montgomery D. Pech E & Vining G., "Introduction to Linear Regression Analysis", 3rd Ed., 2001, J. Wiley & Sons.
- [18] Mendenhall W. – Sincich T., "Regression Analysis: a second course in Statistics", 6th Ed., 2004, Pearson Education, Inc.
- [19]., "Εφαρμοσμένη Στατιστική", τ.2, 1996, Εκδόσεις Συμμετρία.
- [20] Mason R. & Young J., "Multivariate Statistical Process Control with Industrial Applications", 2002, ASASIAM.
- [21] Manatakis E.K "A new methodological trial on Statistical Analysis of construction equipment noise", 2000, Applied Acoustics, v. 59, p.p. 67-76.
- [22] Manatakis E.K.& Skarlatos D., " A Statistical model for evaluation and prediction of the noise in construction equipment area", 2002, Applied Acoustics, v. 63, p.p.759-773.
- [23] Μανατάκης Ε.Κ, "Στατιστική μοντελοποίηση του θορύβου δομικών μηχανών", 13^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικού Στατιστικού Ινστιτούτου 2000, Φλώρινα, σ. 351-361.

Πίνακας 3.1. Δεδομένα και τοποθεσίες μετρήσεων

Θέση No	Ολικός αριθμός οχημ./h Q	Βαριά οχημ./h H	Ελαφρά οχημ./h L	Μέση ταχύτητα (km/h) V	Μετρούμενος θόρυβος L ₁₀ (dB(A))	L _{eq} (dB(A))	L _{max} (dB(A))
1	514	41	473	45.5	75.4	71.3	92.1
2	524	38	486	46.1	75.1	72.6	80.4
3	570	46	524	46.3	76.2	72.5	81.2
4	545	36	509	47.4	76.4	73.1	80.9
5	493	32	461	42.7	76.8	73.4	79.8
6	518	22	497	35.8	76.2	72.9	78.7
7	523	20	503	36.1	77.0	73.3	81.6
8	552	35	517	38.4	77.3	73.7	81.9
9	496	17	479	42.4	76.1	72.8	80.5
10	495	12	483	32.8	75.8	72.8	80.1
11	516	15	501	33.6	76.3	72.9	79.2
12	503	14	489	32.1	76.8	73.0	79.7
13	512	15	497	40.4	75.8	71.7	80.1
14	483	17	466	31.7	74.1	72.3	79.3
15	472	21	451	29.7	74.6	71.7	78.9
16	510	27	483	29.4	75.2	72.6	79.1

Πίνακας 4.1. Μετρούμενα και προβλεπόμενα επίπεδα θορύβου. Διαστήματα εμπιστοσύνης-διαστήματα πρόβλεψης dB(A)

Θέση No	Μετρούμενος Θόρυβος L ₁₀	Προβλεπόμενος Θόρυβος L ₁₀	Διάστημα Εμπιστοσύνης	Διάστημα Πρόβλεψης
1	75.4	74.3	[77.8 , 91.2]	[77.1 , 92.3]
2	75.1	75.7	[68.1 , 79.4]	[67.7 , 80.6]
3	76.2	76.8	[69.2 , 80.1]	[68.1 , 81.5]
4	76.4	76.9	[70.3 , 80.3]	[69.2 , 81.4]
5	76.8	77.9	[68.4 , 78.7]	[67.3 , 80.1]
6	76.2	75.4	[67.7 , 78.1]	[66.1 , 79.1]
7	77.0	76.3	[70.4 , 81.5]	[69.3 , 82.0]
8	77.3	76.7	[68.9 , 80.2]	[67.9 , 81.9]
9	76.1	76.6	[68.6 , 80.1]	[67.5 , 81.2]
10	75.8	76.3	[68.4 , 79.8]	[67.1 , 81.4]
11	76.3	75.7	[67.8 , 78.9]	[66.9 , 80.3]
12	76.8	76.0	[68.1 , 78.8]	[67.1 , 80.8]
13	75.8	76.3	[69.1 , 80.1]	[68.4 , 81.3]
14	74.1	74.9	[68.2 , 78.9]	[67.2 , 80.4]
15	74.6	75.2	[67.7 , 78.8]	[66.6 , 79.1]
16	75.2	74.1	[68.0 , 78.9]	[67.1 , 80.3]



Σχήμα 3.1 Ο Χάρτης του κέντρου της Πάτρας

Ηχητική συμπεριφορά οδικών κατασκευών

I. Ζήσιμος
Msc Architectural Acoustics
Industrial Noise & Vibration Control
Σύμβουλος Ηχομονώσεων & Ακουστικής
Ιδρυτής της «ΗΧΟΠΙΛΗΜΒΑΣΗΣ» 210-93.15.435
www.noise-control.gr, e_mail: zissimos@acsmi.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την ηχητική συμπεριφορά διαφόρων οδικών κατασκευών, όπως ποιότητας οδοστρώματος και συμπεριφορά των υπόγειων γεφυρών και κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθεί λόγω των οδικών έργων που έγιναν στην Αθήνα επ' ευκαιρία των Ολυμπιακών αγώνων.

Το κύριο κριτήριο διερεύνησης είναι η ηχητική επίδραση επί των οδηγών και των συνεπιβαινόντων των οχημάτων, καθώς και η ηχοδιάδοση προς το άμεσο οικιστικό περιβάλλον από το οποίο διέρχεται ο δρόμος.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία η οποία επί σειρά ετών διερευνά την ηχητική αλληλεπίδραση της κύλισης των τροχών των οχημάτων με την ποιότητα του ασφαλτοτάπητα.

Η παρούσα δεν στηρίζεται σε θεωρητικά δεδομένα ή αποτελέσματα διαφόρων μοντελοποιήσεων αλλά είναι αποτέλεσμα πραγματικών οδικών συνθηκών και ηχομετρήσεων.

ABSTRACT

This paper is examining the acoustic behavior of several road constructions, such as asphalt pavement quality, and behavior of "underground" bridges and was able to be accomplished due to the projects that were constructed for the Olympic games of Athens.

The most important criterion is the acoustic influence of the drivers and co_drivers, as well as the noise transmission towards the direct community through which the road passes.

The findings are consistent with the international bibliography, that for a number of years is examining the acoustic interaction between tire rolling and quality of asphalt paved roads

The paper is not based in theoretical data or results of different "models" but is the result of actual measurements and every day traffic conditions.

ΑΙΤΙΟΝ

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ερέθισμα για την διεξαγωγή των μετρήσεων δημιουργήθηκε στον υπογράφοιτα όταν συνάντησε μια «παράξενη» αλλά «ακουστικώς» πολύ καλή συμπεριφορά υπόγειας οδικής γέφυρας.

Η εν λόγω γέφυρα ευρίσκεται στην Λ. Κηφισίας (Αθήνα) και κατασκευάστηκε με επενδεδυμένα τοιχώματα και οροφή ως εξής: επί γαλβανισμένου σκελετού ο οποίος στερεώθηκε στα σκυροδετημένα στοιχεία της υπόγειας γέφυρας τοποθετήθηκαν πλάκες από πετροβάμβακα και ακολούθησε πλήρη κάλυψή του από λεπτά ελάσματα (της τάξεως των 0,6mm) τα οποία ήταν προβαμμένα σε λευκή

απόχρωση, με ορισμένες διαμήκεις νευρώσεις και δεν είχαν καμία απολύτως διάτρηση.

Κατά την τυχαία διέλευση του υπογράφοντα (μετά την ολοκλήρωσή της) ήταν εμφανής η απουσία έντονης αντήχησης κάτω από το στεγασμένο μέρος της, το οποίο στην αρχή αποδόθηκε στην ως άνω επένδυση.

Μετά από προσεκτικότερη σκέψη όμως, έγινε σαφές ότι δεν συντρέχουν οι κατασκευαστικοί λόγοι εκείνοι ώστε να μπορεί να αποδοθεί η πάρα πολύ καλή ακουστική συμπεριφορά της στις ως άνω επενδύσεις, διότι προφανώς όπως κατασκευάστηκαν δεν αποτελούν «ηχοαπορροφητική» επένδυση.

Το ως άνω «μυστήριο» ήταν άκρως ενδιαφέρον και αποφασίσθηκε να γίνει πληρέστερη διερεύνηση, για λόγους ικανοποίησης του προβληματισμού του γράφοντος.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΗΧΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι ηχομετρήσεις έπρεπε να γίνουν σε ώρες με μειωμένη κίνηση και για τον λόγο αυτόν επιλέχθηκε μεταμεσονύχτια εργάσιμη ημέρα (νύχτα) ώστε να μην είναι όλοι στους δρόμους όπως τα Σαββατοκύριακα!! Οι ώρες των πολλαπλών ηχομετρήσεων έγιναν από τις 02,00 π.μ έως τις 5,30 το πρωί.

Ως πηγή θορύβου επιλέχθηκε το αυτοκίνητο του υπογράφοντος (το οποίο δεν έχει καινούρια ελαστικά οπότε δημιουργεί μεγαλύτερο θόρυβο). Το μικρόφωνο στο οποίο συνδέθηκε ο real time φασματικός αναλυτής τοποθετήθηκε επί αντικραδασμικού τριπόδου μπροστά και στο μέσον των πίσω θέσεων (ώστε να μην προσβάλλεται απ' ευθείας από τον αέρα) με τον κατάλληλο ανεμοθώρακα, και όλα τα παράθυρα του οχήματος ήταν ανοιχτά ώστε να εισέρχεται χωρίς πρόβλημα ο θόρυβος που δημιουργείται.

Όλες οι καταγραφείσες μετρήσεις ήταν μέσος όρος 10 μετρήσεων ώστε να εξαλειφθούν καταγραφές τυχαίων ηχητικών γεγονότων, έγιναν υπό στάθμιση Α και με δειγματοληψία πλήρους φάσματος.

Οι ταχύτητες διελεύσεως ήταν 60χλμ/ώρα, τιμή τυπική για αστική κυκλοφορία και μη δημιουργούσα δευτερογενείς αεροδυναμικούς θορύβους, έτσι ώστε να καταγράφονται κυρίως οι θόρυβοι κύλισης του οχήματος και η ακουστική συμπεριφορά των υπόγειων κατασκευών.

Τα αποτελέσματα ήταν θεαματικά διότι διαπιστώθηκε ότι:

A) Δεν υπάρχουν «μαγικά» υλικά

B) Ανέκτησα την ψυχική μου ηρεμία !! και

Γ) έκανε την εμφάνισή του το "νέο" ηχοαπορροφητικό και ηχομονωτικό υλικό που είναι «ο νεοδιαστρωθείς ασφαλτοτάπητας»

Οι φρέσκοι ασφαλτοτάπητες δεν έχουν ακόμη λειανθεί από την χρήση και δεν έχουν ακόμη βουλώσει τα κενά μεταξύ των αδρανών τους με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η διαπέραση του συμπιεσμένου, από την κύλιση του ελαστικού, αέρα, και να μην δημιουργούνται υψίσυχοι θόρυβοι εκφυγής, παράλληλα υπάρχει γενικώς μια πιο ηχοαπορροφητική επιφάνεια (τεκμηριώνεται με την ικανοποιητική «απουσία» αντήχησης κάτω από τις υπόγειες γέφυρες - βλ. κατωτέρω)

ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

Όλοι κατά την οδήγηση έχουμε αισθανθεί την αλλαγή του θορύβου και την αίσθηση «ξεκούρασης» που προκαλείται όταν κυκλοφορούμε επί νέου ασφαλτοτάπητα, αλλά πόσο πιο ήσυχος είναι ή πόσο θα μπορούσαν να ωφεληθούν οι περίοικοι των δρόμων ίσως να έχει απασχολήσει ελάχιστους.

Τονίζεται ότι από την ανέγερση ηχοπετασμάτων είναι γνωστό ότι ωφελούνται μόνον οι ευρισκόμενοι στην ηχητική του σκιά και είναι πρακτικώς αδιάφορη η ανέγερσή του σε όλους τους υπόλοιπους που δυστυχώς είναι περισσότεροι από τους ωφελούμενους, διότι:

Από την μικρότερη δημιουργία θορύβων ωφελούνται όλοι οι κάτοικοι των πολυκατοικιών που βλέπουν τον δρόμο, ασχέτως στάθμης μπαλκονιού, ωφελούνται όλοι οι κάτοικοι των εγκάρσιων (στον θορυβώδη) δρόμων επίσης σε όλες τις στάθμες των ορόφων, ωφελούνται οι κάτοικοι του απέναντι ρεύματος κυκλοφορίας, και γενικώς από την μείωση της βασικής εκπεμπόμενης ηχοστάθμης της πηγής (οχήματος) ωφελείται ολόκληρη η περιοχή όσο μακριά και εάν ευρίσκεται ο εκάστοτε δέκτης.

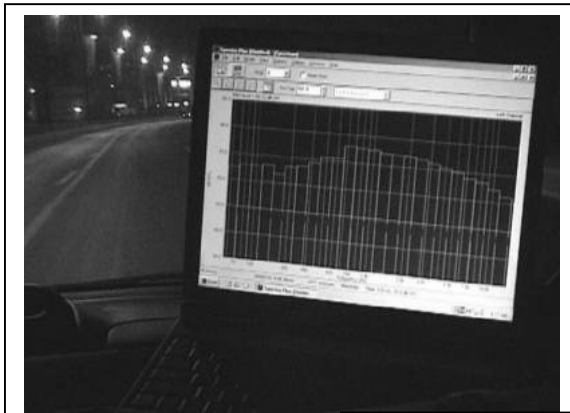
Διευκρινίζεται ότι απ' όσο είμαι σε θέση να γνωρίζω, οι ασφαλοτάτητες που διαστρώθηκαν δεν ήταν ειδικού τύπου με ειδικά ηχομειωτικά πρόσμικτα κλπ οπότε την βασική ηχομονωτική δράση ανέλαβε α) το επίπεδο της επιφάνειας της οδού (χωρίς έντονες προεξοχές) β) το μικροπορώδες της μη λειασμένης ακόμη ασφάλτου και γ) το μακροπορώδες της μη βουλωμένης ακόμη ασφάλτου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κάτωθι παρατίθενται φωτογραφίες από ορισμένες από τις διελεύσεις σε διάφορες θέσεις όπου είναι εμφανής η ηχητική διαφορά νέου και λειασμένου από την χρήση οδοστρώματος και επίσης είναι εμφανής η άριστη ηχητική συμπεριφορά (πρακτικώς απουσία αντήχησης) σε υπόγειες γέφυρες με οδόστρωμα χωρίς φραγμένο ή λειασμένο οδόστρωμα.

Επίσης αποδείχθηκε ότι οι προαναφερθείσες επενδύσεις της υπόγειας γέφυρας δεν ήταν αυτές που προσέφεραν το βελτιστοποιημένο ακουστικό περιβάλλον αλλά το οδόστρωμα με την ανοιχτή μικρο και μέγρο πορώδη επιφάνειά του.

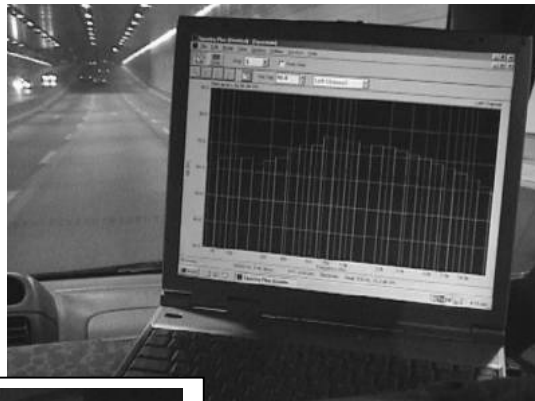
Επιπλέον σημαντικότετοι παράγοντες είναι: η πρόσφυση του οχήματος που είναι κατά πολύ καλύτερη με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερος ο έλεγχος του οχήματος, μικρότερη απόσταση φρεναρίσματος, μικρότερη υδρολίσηση, μη ανάκλαση των ηλιακών ακτίνων ειδικά σε πρωινές ή απογευματινές ώρες και γενικώς κατά πολύ ασφαλέστερη οδήγηση με άμεσο επακόλουθο την μείωση των ατυχημάτων και την ευρύτερη οδική ασφάλεια για οδηγούς αυτοκινήτων, μοτοσικλετών, φορτηγών αλλά ακόμη και των πεζών που διασχίζουν τον δρόμο.



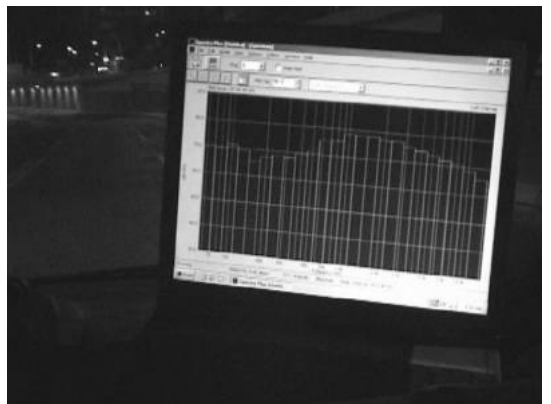
No 01

Ελεύθερος δρόμος με
Ανοιχτόπορο οδόστρωμα
από νεοδιαστρωθέντα
τυπικό ασφαλτοτάπητα
(μειωμένος θόρυβος
αντίστοιχος με την φωτό
No02)

Κάτω από την υπόγεια &
επενδεδυμένη γέφυρα αλλά
με Ανοιχτόπορο οδόστρωμα
(μειωμένος θόρυβος)



No 02



No 03

Λειασμένο από την χρήση
οδόστρωμα (αυξημένος
θόρυβος κατά περίπου 4 έως
6 dB σε ολόκληρο το
ακουστικό φάσμα)

Στην επόμενη σελίδα ακολουθούν μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετική ημέρα (αντίστοιχης ώρας) με απλό ηχόμετρο με στάθμιση A το οποίο ήταν τοποθετημένο κάτω από τον κεντρικό καθρέπτη του οχήματος, ώστε να μην δέχεται ριπές αέρα, πάλι όλα τα παράθυρα ήταν ανοιχτά (ταχύτης = 60km/h)



. ζ Επίπεδος δρόμος με παλαιό λειασμένο οδόστρωμα (78,3dBA)

Κάτω από ΜΗ επενδεδυμένη γέφυρα με παλαιό λειασμένο οδόστρωμα (83,2dBA) è



No 05



ζ Επίπεδος δρόμος με ανοιχτόπορο οδόστρωμα (75,2dBA)

Κάτω από επενδεδυμένη γέφυρα με ανοιχτόπορο οδόστρωμα (77,4dBA) è



No 07



. ζ Κάτω από ΜΗ επενδεδυμένη γέφυρα αλλά ΜΕ ανοιχτόπορο οδόστρωμα (77,4dBA)

ΣΧΟΛΙΑ

Η ως άνω εργασία διεξήχθη από έναν ιδιώτη με μοναδικό στόχο τον προβληματισμό του και με μοναδικό όφελος την ηθική ικανοποίησή του, με την χρήση απλών διαδικασιών (με βαθμονομημένα όργανα) ώστε να κατανοηθεί η φύση του προβλήματος.

Δεν ήταν μέρος επιδοτούμενου προγράμματος, δεν ήταν μέρος ανατεθείσης μελέτης, δεν χρησιμοποιήθηκαν φοιτητές για την διεξαγωγή της όπως και δεν χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός ηχομετρήσεων αγορασμένος με δημόσιο χρήμα.

Και όμως θεωρώ ότι θα έπρεπε και μέρος επιδοτούμενου προγράμματος για την καταπολέμηση της κυκλοφοριακής ηχορύπανσης να ήταν, και μέρος ανατεθείσης μελέτης από τους αρμόδιους φορείς (ΥΠΕΧΩΔΕ κλπ) για την διερεύνηση πιθανών άλλων προτάσεων από την άκριτη ανέγερση ηχοπετασμάτων με σχεδόν τους ίδιους πάντοτε μελετητές και κατασκευαστές, και οι φοιτητές να εμπλακούν ώστε να πάντουν να βλέπουν την Ακουστική επιστήμη μόνον ως μαθηματικά μοντέλα, και ταυτόχρονα να αναπτυχθούν εγκαταστάσεις έρευνας για την πρόοδο όλων μας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Παρ' ότι έως σήμερα η ηχοαπορροφητική επίδραση και δομή των τυπικών οδοστρωμάτων (τουλάχιστον όσο είναι ανοιχτόπορα) δεν θεωρείτο ως μέσον για την ηχομείωση των κυκλοφοριακών θορύβων, ίσως θα πρέπει να γίνει ριζική επανεξέταση του θέματος διότι όπως προέκυψε υπάρχει μια μέση μείωση της τάξεως των 3-4 dBA (σε ορισμένες μετρήσεις που δεν παρατίθενται ως ακραίες, εμφανίστηκαν διαφορές ακόμη και 9dBA).

Κάτω δε από τις υπόγειες γέφυρες που συνήθως δεν κατασκευάζονται με ακουστικά κριτήρια, διαπιστώθηκε μειωμένη ηχοστάθμη κατά μέσο όρο 5dBA μόνον και μόνον από την ύπαρξη ανοιχτής μικρο και μακρο πορώδους υφής του τυπικού ασφαλτικού οδοστρώματος.

Είναι γεγονός ότι η συνεχής διάστρωση νέων ασφαλοταπήτων πρακτικώς είναι ανέφικτη λόγω πολύ μεγάλων κοστολογίων, αλλά μήπως υπάρχει διαδικασία για την πρακτικώς ανέξοδη επίτευξη των ίδιων άριστων ηχητικών αποτελεσμάτων ?? (και όμως. . .)

Κατασκευαστική αξιολόγηση των προσφάτως ανεγερθέντων ηχοπετασμάτων στην περιοχή Αθηνών

I. Ζήσιμος
Msc Architectural Acoustics
Industrial Noise & Vibration Control
Σύμβουλος Ηχομονώσεων & Ακουστικής
Ιδρυτής της «ΗΧΟΠΑΡΕΜΒΑΣΗΣ» 210-93.15.435
www.noise-control.gr, e_mail: zissimos@acsmi.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχουν ανεγερθεί σε διάφορες τοποθεσίες στην περιοχή Αθηνών, διάφανα Ηχοπετάσματα, με κύριο στόχο την ηχοπροστασία των σχολείων.

Γνωρίζοντας τις διακηρύξεις και τις τεχνικές προδιαγραφές των ως άνω έργων επιχειρείται η κατασκευαστική τους αξιολόγηση, όσον αφορά την ποιότητα της κατασκευής και την συμπεριφορά τους στο σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που έχει περάσει.

Διερευνάται η αντοχή των υλικών, οι κατασκευαστικές πρακτικές που εφαρμόστηκαν, η ασφάλεια που παρέχουν στους μαθητές των σχολείων, η ασφάλεια που παρέχουν στους οδηγούς των οχημάτων και των πεζών, η θάμβωση που δημιουργείται, και γίνεται αναφορά στην αμφιλεγόμενη αισθητική τους.

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι να δοθεί ερέθισμα στους αρμόδιους φορείς που εμπλέκονται στις μελέτες και επιβλέψεις αντίστοιχων έργων, να προδιαγράψουν βελτιστοποιημένες κατασκευές ηχοπετασμάτων, όπου αυτό είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί και δεν είναι δυνατόν να εξευρεθεί άλλη λύση.

ABSTRACT

The recent years in different areas in Athens, a lot of Transparent traffic barriers have been erected in order to protect several school facilities

Knowing the technical requirements of those projects from the calls for bids, an evaluation of their constructional behaviour is attempted, concerning the quality of the construction and their behaviour in the short period of time that has elapsed.

The materials strength is examined, as well as the construction methodology and the safety they provide to the students, to the vehicle drivers and pedestrians, the glare that is produced, and a comment on their disputable aesthetics

The goal of this paper is to give an incentive to the responsible authorities that are involved in the studies and supervision of such projects, to specify improved and optimum construction of traffic barriers, wherever such a construction is needed and no other solution is possible.

ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

Λόγω μη εξειδίκευσης σε ηχομονωτικές κατασκευές των μηχανικών των τεχνικών υπηρεσιών διαφόρων δημόσιων φορέων, παρατηρείται το φαινόμενο να υπάρχει άκριτη αντιγραφή των προσφάτως ανεγερθέντων ηχοπετασμάτων και να θεωρείται πλέον ως δεδομένη η προδιαγραφή ηχοπετασμάτων εκ' διαφανών πλαστικών υλικών επί μεταλλικών κολονών.

Με την μη τεκμηρίωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ως άνω κατασκευών από τις αντίστοιχες υπηρεσίες του ΥΠΕΧΩΔΕ ή άλλων αρμόδιων φορέων, εξακολουθεί και πλανάται η ως άνω «ασάφεια» με αποτέλεσμα να αρχίζει να γίνεται καθεστώς η χρήση των συγκεκριμένων τύπων κατασκευών οι προδιαγραφές των οποίων σε κάθε διακήρυξη είναι ακριβώς ίδιες και ατεκμηρίωτα αυστηρές (επί ποινή αποκλεισμού) σχετικά με την χρήση διάφανων υλικών "πλαστικού" τύπου.

Ως παρένθεση αναφέρεται μόνον ότι σε χώρες της Ευρώπης και Αμερικής η ποικιλία των υλικών, το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα, οι χρωματικοί συνδυασμοί, η ενσωμάτωση των ηχοπετασμάτων στο τοπικό περιβάλλον, η έρευνα και η ακουστική μελέτη ανά περίπτωση που προηγούνται, η οδική ασφάλεια οδηγών και πεζών κλπ είναι καθ' όλα αξιοθαύμαστα και πιθανόν να έχουμε να διανύσουμε αρκετό χρονικό διάστημα και να αλλάξουν ορισμένες κακές νοοτροπίες, μέχρι να φθάσουμε σε αντίστοιχο επίπεδο αντιμετώπισης.

Τα προβλήματα των διάφανων ηχοπετασμάτων ξεκινούν από την ίδια την διακήρυξη η οποία τα επιβάλλει αναγκαστικώς, μη αφήνοντας στον μελετητή να προδιαγράψει άλλου είδους ή τύπου υλικά.

Το σκεπτικό που αναπτύσσεται είναι ότι η «διαφάνεια» των ηχοπετασμάτων είναι επιβεβλημένη για να μην δημιουργούνται αισθητικά προβλήματα ούτε στους προστατευόμενους οικισμούς αλλά ούτε και στους οδηγούς.

Οι διακηρύξεις προφανώς αγνοούν την ψυχοακουστική συμπεριφορά των ηχοπροστατευόμενων οικισμών όπου ισχύει το «ότι ΔΕΝ φαίνεται, ΔΕΝ ακούγεται» (η συμπεριφορά αυτή αποδεικνύεται όχι μόνον στην βιβλιογραφία αλλά και από συγκεκριμένες έρευνες).

Αλλά ακόμη και επιστημονικές έρευνες να μην υπήρχαν διαθέσιμες δεν είναι κατανοητό στον υπογράφοντα, γιατί η διέλευση των



θαμπωμένο και ημιδιαφανές «διάφανο» ηχοπέτασμα

αυτοκινήτων και των φορτηγών είναι θέαμα που αξίζει να φαίνεται και δεν πρέπει να γίνει προσπάθεια απόκρυψής του π.χ πίσω από δένδροφύτευση, ή άλλη αισθητικώς αποδεκτή κατασκευή με διαφοροποιήσεις σχημάτων, χρωμάτων κλπ. πέραν του ότι τα διάφανα ηχοπετάσματα όταν λερωθούν παρουσιάζουν μια πλήρως αποκρουστική και "βρώμικη" αισθητική η οποία σε καμία απολύτως περίπτωση δεν είναι αποδεκτή.

Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι οι προσπάθειες αφαίρεσης “graffiti” (πιθανόν με λάθος υλικά κάτι που όμως δεν είναι δυνατόν να αποκλεισθεί) δημιουργούν οριστικές θαμπάδες και χαρακιές οι οποίες δεν είναι δυνατόν να αφαιρεθούν.

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΟΔΗΓΩΝ

Από την πλευρά των οδηγών, επίσης επιδρούν δυσμενώς διότι:

α) δημιουργούν μια παραμορφωμένη αίσθηση του ορίζοντα και

β) ανακλούν τις ηλιακές ακτίνες και δημιουργούν σοβαρότατα προβλήματα απότομης θάμβωσης. (βέβαια οι διακηρύξεις ζητούν τα υλικά να είναι αντιθαμβωτικά αλλά για να είναι αντιθαμβωτικά θα έπρεπε να είναι αδιαφανή ή «τραχιές» υφής οπότε εμπίπτουν στην διάταξη του αποκλεισμού λόγω αδιαφάνειας!!!)

Ένα από τα πολύ σοβαρά προβλήματα οδικής ασφάλειας είναι η μεθοδολογία κατασκευής του μεταλλικού φορέα στήριξης (συνήθως κολόνες από μορφοσιδηρά προφίλ «H») όπου σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει σκυροδετημένο στηθαίο ή μπαριέρες ασφαλείας και η ανάπτυξη των κολονών του ηχοπετάσματος γίνεται από την στάθμη του πεζοδρομίου.

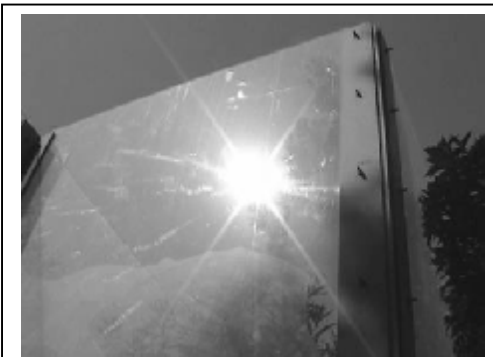
Ο κύριος λόγος ύπαρξης των μπαριέρων ασφαλείας είναι να υποστούν προοδευτική

παραμόρφωση και να περιορισθούν κατά το δυνατόν οι συνέπειες της σύγκρουσης του οχήματος, επίσης τα σκυροδετημένα τοιχία (π.χ. τύπου New Jersey) προσφέρουν «ολίσθηση» του οχήματος επ’ αυτών με κύριο στόχο να μην βγεί το όχημα από τον δρόμο και να περιορισθούν οι τραυματισμοί από την απότομη κρούση του οχήματος.

Τα τυπικά ηχοπετάσματα κατασκευάζονται από μεταλλικές κολόνες (βαρέως τύπου) ανά ~2,0m και μεταξύ τους τοποθετούνται τα πλαστικά διαφανή φύλλα.

Στην περίπτωση των ηχοπετασμάτων που αναπτύσσονται από την στάθμη του πεζοδρομίου, είναι προφανές ότι οποιοδήποτε όχημα εκτραπεί του δρόμου θα σπάσει πολύ εύκολα το πλαστικό φύλλο (πάχους ~12mm) και θα προσκρούσει με όλη την κινητική του ενέργεια επί της μεταλλικής κολόνας.

Τα αποτελέσματα αυτής της (απευκταίας) πρόσκρουσης είναι:



θάμβωση οδηγών εκ διαφανούς ηχοπετάσματος



Κατασκευή ηχοπετάσματος σε νησίδα, από την στάθμη του πεζοδρομίου χωρίς σκυροδετημένο στηθαίο ασφαλείας. Η μπαριέρα που φαίνεται είναι η παλαιά που δεν αφαιρέθηκε και ευρίσκεται από την πίσω πλευρά

α) επενέργεια επί του οχήματος σημειακών δυνάμεων εκ της κολώνας που θα έχει ως αποτέλεσμα την έντονη και μη προϋπολογισμένη παραμόρφωση του οχήματος (οι τυπικές δομικές πρόσκρουσης των αυτοκινητοβιομηχανιών αφορούν σύγκρουση του οχήματος επί σταθερής επιφάνειας και όχι επί σημειακών στύλων)

β) πτώση της ίδιας της κολώνας είτε επί άλλων διερχόμενων οχημάτων, πεζών ή ακόμη επί του ίδιου του οχήματος, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ακόμη μεγαλύτερα προβλήματα ασφαλείας και γ) το ίδιο το σπασμένο πλαστικό φύλλο δεν θρυμματίζεται (όπως τα κρύσταλλα ασφαλείας) αλλά σπάει σε μεγάλα κοφτερά τεμάχια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πρόσθετα προβλήματα ασφαλείας.

Αρα η χρήση προστατευτικών μέσων ή καλύτερου σχεδιασμού των ηχοπετασμάτων είναι επιβεβλημένη και πρέπει να εξετάζεται ανά περίπτωση.



σπασμένο και κοφτερό διάφανο τεμάχιο

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία τεκμηριώνονται (με φωτογραφίες) πρόσθετα θέματα κακότεχνων κατασκευών που αφορούν την ίδια την κατασκευή του ηχοπετάσματος ή την στατική της επάρκεια από ανεμοπιέσεις (π.χ. στις διακηρύξεις δεν ζητείται πτυχιούχος στατικός μηχανικός!! αλλά επιβάλλουν συγκοινωνιολόγο και περιβαλλοντολόγο χωρίς προφανώς κανέναν από τους δύο να έχει κατασκευαστική κατάρτιση)

Σε κάθε περίπτωση θεωρώ ότι είναι επιβεβλημένα τουλάχιστον τα κάτωθι:

A) ελευθερία στην επιλογή υλικών & μεθοδολογίας ανέγερσης (εκτός εάν επιβάλλεται για συγκεκριμένους λόγους που φυσικά θα έπρεπε να αναφέρονται)

B) Συνεργασία του ειδικευμένου Ακουστικού μηχανικού με έμπειρο Αρχιτέκτονα (ή μηχανικό αντίστοιχης ειδικότητας) για την αισθητική και τις λεπτομέρειες της κατασκευής όπως π.χ ενσωμάτωση διακοσμητικών στοιχείων κλπ

Γ) Και προφανώς την σύνταξη στατικής μελέτης από ειδικευμένο Μηχανολόγο ή Στατικό μηχανικό λαμβάνοντας υπ' όψιν όχι μόνον τα στατικά φορτία του ηχοπετάσματος αλλά και παράγοντες ασφαλείας των οδηγών.

Στις προκηρύξεις των έργων που έχουν γίνει έως σήμερα δεν υπάρχει καμία απολύτως ανάγκη ύπαρξης συγκοινωνιολόγου διότι είτε η τελική ηχοστάθμη BNL (της οδικής αρτηρίας) δίδεται από την διακήρυξη είτε γίνεται ηχομέτρηση και καταγραφή της, οπότε δεν τίθεται θέμα υπολογισμού της. Η δε ζήτηση του περιβαλλοντολόγου είναι συζητήσιμη διότι δεν τεκμηριώνεται η ακουστική ειδικότητά του μόνον εκ του πτυχίου του.

Αρα όπως και σε πολλά άλλα τεχνικά έργα θα ήταν δυνατόν να υπάρχει η συνδρομή ειδικευμένου και έμπειρου Ακουστικού μηχανικού υπό τύπου ακουστικού συμβούλου ο οποίος (όπως και σε άλλα έργα) να έχει την ευθύνη των ακουστικών υπολογισμών, της ηχητικής απόδοσης των ακουστικών υλικών, της διαστρωμάτωσής των κλπ.

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΠΕΖΩΝ

Τα περισσότερα ηχοπετάσματα έχουν ανεγερθεί για την υποτιθέμενη ηχοπροστασία ορισμένων σχολείων (Να ληφθεί υπ' όψιν ότι ήδη ορισμένα σχολεία που έχουν «ηχοπροστατευθεί» με την ανέγερση ηχοπετάσματος, αναγκαστικά λαμβάνουν πρόσθετα μέτρα διότι όπως είναι προφανές οι μελέτες δεν είναι δυνατόν να είναι όμοιες μεταξύ και δεν μπορούν να εφαρμόζονται άκριτα παντού)

Δεδομένου ότι γύρω από τα ηχοπετάσματα κυκλοφορούν πεζοί και κυρίως μαθητές, θα έπρεπε τα μέτρα ασφαλείας να είναι πιο προσεγμένα και να μην υπάρχουν μικρολεπτομέρειες που θα ήταν δυνατόν να δημιουργήσουν προβλήματα ασφαλείας.

Π.χ διαπιστώθηκαν παραμένοντες προεξοχές φυτευτών μπουζονιών, ή κοχλιών συγκράτησης (μία απλούστατη λύση θα ήταν η τοποθέτηση τυφλών περικοχλίων ή κοχλιών κατάλληλου και όχι μεγαλύτερου μήκους) οξειδωμένα εξαρτήματα, απουσία ροδελών ασφαλείας 'grover' κλπ

Μεταλλικές κολώνες αφήνονται με κοφτερές και ατρόχιστες ακμές, δημιουργώντας σοβαρότατο κίνδυνο τραυματισμού ή σε περίπτωση βίαιης πρόσκρουσης ατόμων, ακόμη και θανάσιμο κίνδυνο.

Σε αρκετά σχολικά συγκροτήματα εντός της αυλής τους, κατασκευάστηκαν υπέργεια και όχι υπόγεια ως θα έπρεπε, σκυροδετημένα στοιχεία για την πάκτωση των αντηρίδων τα οποία έχουν ανεπεξέργαστες (όχι φάλτσοκατασκευασμένες) ακμές με προφανείς τους κινδύνους τραυματισμού των μαθητών.



Όψη από την εσωτερική πλευρά της αυλής σχολείου



Όψη από την εξωτερική πλευρά της αυλής σχολείου (κοχλίες μεγαλύτεροι κατά 4cm), επί πλέον να προσεχθεί η ζητούμενη στην διακήρυξη «διαφάνεια»



Ατρόχιστες και κοφτερές ακμές σε στάθμη προσιτή από μαθητές και πεζούς (-90cm από πεζοδρόμιο)

Προφανώς δεν θα έπρεπε να υπάρχουν καθόλου αντηρίδες (ειδικά στα σχολικά συγκροτήματα) διότι οι ίδιες δημιουργούν πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού (με την κεκλιμένη προεξοχή τους εντός της αυλής ή του κήπου του σχολείου) εάν αντιμετωπισθούν ως «παιχνίδι» από τα παιδιά.

Θεωρώ ότι η τοποθέτηση αντηρίδων είναι αποτέλεσμα την μη ύπαρξης ειδικευμένου μηχανολόγου ή στατικού μηχανικού κατά την στατική επίλυση του μεταλλικού φορέα, έτσι ώστε να υπολογισθεί η αναγκαία στιβαρότητα και αντοχή των ίδιων των κολονών και να μην υπάρχει η ανάγκη κατασκευής αντηρίδων.

Το δε κωμικοτραγικό με την κατασκευή των αντηρίδων είναι ότι σε διάφορα έργα έχουν τοποθετηθεί λεπτές διατομές «Γ» «Τ», κοιλοδοκοί μικρής διατομής 50x80 κλπ και διάφορες άλλες "παράξενες" κατασκευές ενώ στον οποιονδήποτε μηχανολόγο ή στατικό είναι γνωστό ότι όλες οι ως άνω κατασκευές καταπονούνται σε σύνθετες τάσεις είτε λυγισμού είτε κάμψης (αναλόγως του είδους του φορτίου) και ποτέ μόνον σε καθαρό εφελκυσμό, οπότε όταν έρθει η στιγμή αυτές οι αντηρίδες να παραλάβουν τα ως άνω φορτία, απλώς θα αστοχήσουν.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Το συμπέρασμα της παρούσης εργασίας δεν είναι η μη αναγκαιότητα ή χρησιμότητα των ηχοπετασμάτων (αδιαφανών, διαφανών ή μικτών) αλλά η ανά περίπτωση απαιτούμενη σοβαρότητα στην προσέγγιση ενός εκάστου προβλήματος και όχι η άκριτη εφαρμογή «εύκολων» λύσεων, ώστε να εξυπηρετηθούν διάφορες καταστάσεις.



Προεξέχουσες αντηρίδες και σκυροδετημένες βάσεις εντός της αυλής σχολείου



κάλυψη της σκυροδετημένης βάσης με χώμα κήπου και απ' ευθείας «φύτευση» της αντηρίδας, χωρίς πρόσθετη αντισεισμική επεξεργασία

Παράμετροι που επηρεάζουν την υποκειμενική εκτίμηση του θορύβου των αυτοκινητοδρόμων

Χρυσάνθη Ναθαναήλ,
Επιστημονικός Συνεργάτης
Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας
Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ. Τ.Κ. 54006
nathan@arch.auth.gr

Bertrand Masson
Σύμβουλος σε θέματα Περιβαλλοντικού Θορύβου
bertrand.masson@voila.fr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ποσοτικοί και ποιοτικοί παράμετροι του ήχου, οπτικές πληροφορίες, αλλά και παράμετροι γνωστικής φύσεως παίζουν σημαντικό ρόλο στην υποκειμενική εκτίμηση του κυκλοφοριακού θορύβου. Η παρούσα έρευνα έχει σαν στόχο την διερεύνηση των επιδράσεων αυτών μέσω μίας σειράς οπτικοακουστικών πειραμάτων αντίληψης. Τα ηχητικά ερεθίσματα αντιπροσωπεύουν θόρυβο αστικού αυτοκινητόδρομου, διαφέρουν δε ως προς την φύση του πεδίου μεταξύ του αυτοκινητοδρόμου και του σημείου ηχογράφησης, την απόσταση ηχογράφησης και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων. Η επίδραση της οπτικής πληροφορίας μελετάται με την παρουσίαση οπτικοακουστικών ερεθισμάτων ενώ η επίδραση γνωστικής φύσεως ερευνάται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων ενός άμεσα και ενός έμμεσα ενδιαφερομένου πληθυσμού.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντίληψη του θορύβου των αυτοκινητοδρόμων παρουσιάζει σχετικά μονοδιάστατο χαρακτήρα, στενά συνδεδεμένο με τα επίπεδα θορύβου. Δευτερεύοντα ρόλο φαίνεται να παίζουν οι οπτικές πληροφορίες, ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζουν την υποκειμενική εκτίμηση του θορύβου η σύνθεση του φόρτου ή ο βαθμός αμεσότητας των ερωτηθέντων με τον συγκεκριμένο θόρυβο.

ABSTRACT

Recent research in traffic noise perception points out the complex character of the evaluation process. Quantitative and qualitative parameters of sound, but also visual and cognitive factors seem to play an important and often combined role. The present research investigates these questions by a series of perceptive audiovisual tests. Sound stimuli are binaural recordings of highway noise; they vary on the depth and the nature of the field between the recording position and the highway and the percentage of heavy vehicles. Visual influence is studied by the presentation of controlled audiovisual sequences while cognitive factors are investigated by comparing test results of an exposed and a non-exposed population. Factor analysis shows that most of the variance of the responses is related to the single dimension of sound level while analysis of variance reveals a complex visual influence. No significant differences are observed between the two participating populations.

Εισαγωγή¹

Ο θόρυβος των αυτοκινητοδρόμων είναι ένας σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας στενά συνδεδεμένος με την ποιότητα ζωής συνεχώς αυξανομένων ομάδων πληθυσμού. Οι μελέτες που αφορούν την υποκειμενική εκτίμηση του κυκλοφοριακού θορύβου πραγματοποιούνται με την βοήθεια είτε επιτόπιων είτε εργαστηριακών ερευνών. Οι επιτόπιες έρευνες σέβονται το περιβαλλοντικό πλαίσιο της έκθεσης του πληθυσμού αλλά αποτυγχάνουν να ελέγξουν τα ακουστικά ερεθίσματα. Οι εργαστηριακές έρευνες, αντίθετα, είναι πειραματικά έγκυρες εφόσον επιτρέπουν τον έλεγχο και την ανάλυση των παρουσιαζόμενων ακουστικών ερεθισμάτων, δεν λαμβάνουν όμως υπόψη τους ένα σημαντικό αριθμό περιβαλλοντικών παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν την αντίληψη του ήχου. Κατά συνέπεια, ενώ κάποια πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν μία σχετικά καλή συσχέτιση με τα τυποποιημένα μετρήσιμα μεγέθη [1, 2, 3], άλλες μελέτες τείνουν να δείξουν τα οριά τους. Πολλά είναι τα ερωτήματα που εμφανίζονται έτσι, αφορούν από την μία πλευρά την ποιοτική διάσταση του ήχου και από την άλλη περιβαλλοντικούς ή γνωστικούς παραμέτρους (φόβος, ευαισθησία, αναμονές και ενδιαφέρον του πληθυσμού, μη ακουστικές συνέπειες της ακουστικής πηγής, κλπ.) [4, 5, 6].

Η παρούσα εργασία έχει σαν στόχο να διερευνήσει την επίδραση μερικών εκ των παραμέτρων αυτών στην υποκειμενική εκτίμηση του θορύβου των αυτοκινητοδρόμων όπως και να μελετήσει τις τυχόν αλληλεπιδράσεις τους. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν ελεγχόμενα πειράματα αντίληψης του θορύβου που επιπλέον περιλαμβάνουν και οπτική προσομοίωση. Με σκοπό την μελέτη παραμέτρων που σχετίζονται με την εμπειρία, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν εν μέρει στην πόλη Reims της Γαλλίας (κοντά στον αυτοκινητόδρομο A4) και εν μέρει στο Παρίσι, με άτομα δηλαδή που αντίστοιχα είναι εκτεθειμένα σε καθημερινή βάση ή μη στον εν λόγω θόρυβο.

1. Πειράματα

Πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα: το πρώτο χρησιμοποιεί την μέθοδο της «ανοιχτής συνέντευξης» και έχει σαν κύριο στόχο την επιλογή ενός συνόλου επιθέτων που περιγράφουν τον θόρυβο των αυτοκινητοδρόμων. Τα άλλα δύο χρησιμοποιούν «κλίμακες διαφοροποίησης» με σκοπό τον καθορισμό των κυρίων αξόνων αντίληψης του θορύβου των αυτοκινητοδρόμων και την διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων πειραματικών παραμέτρων (αυτά τα δύο πειράματα αφορούν τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη Reims και στο Παρίσι και στα επόμενα θεωρούνται ως ένα).

Τα ηχητικά και τα οπτικά ερεθίσματα είναι κοινά για όλα τα πειράματα. Τα ηχητικά ερεθίσματα είναι έξι διωτικές ηχογραφήσεις θορύβου του αυτοκινητοδρόμου A4 της Γαλλίας που πραγματοποιήθηκαν στο ύψος της πόλης Reims, σε τρία διαφορετικά σημεία και σε απόσταση 100 m από αυτόν. Ένα σημείο βρίσκεται σε ελεύθερο ακουστικό πεδίο με ανοιχτή την θέα του αυτοκινητοδρόμου

¹ Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε στην Γαλλία από την εταιρία συμβούλων IMPEDANCE S.A. με την υποστήριξη του ερευνητικού προγράμματος *PREDIT 1996-2000* του Γαλλικού Υπουργείου Περιβάλλοντος.

(Σχήμα 1), ενώ μεταξύ των δύο άλλων σημείων ηχογράφησης και του αυτοκινητοδρόμου παρεμβάλλεται στη μία περίπτωση πυκνή βλάστηση και στην άλλη περίπτωση ένα ηχοπέτασμα



Σχήμα 1. Διωτική ηχογράφηση θορύβου αυτοκινητοδρόμου με ταυτόχρονες ακουστικές μετρήσεις και λήψη video σε σημείο που βρίσκεται σε ελεύθερο ακουστικό πεδίο.

Όλα τα ερεθίσματα επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν τον ίδιο αριθμό συνολικού κυκλοφοριακού φόρτου αλλά να έχουν διαφορετικό ποσοστό βαρέων οχημάτων : επιλέχθηκε έτσι, για κάθε θέση ηχογράφησης, ένα ερέθισμα με ποσοστό κάτω του 10% βαρέα οχήματα στον συνολικό φόρτο και ένα ερέθισμα με ποσοστό άνω του 30%. Η διάρκεια των ερεθισμάτων είναι 20 s. Τα επίπεδα θορύβου κυμαίνονται μεταξύ 67.5 και 56.5 dB(A). Χρησιμοποιήθηκαν πέντε οπτικά ερεθίσματα (λήψεις video), τα δύο αντιστοιχούν σε ανοικτή θέαση του αυτοκινητοδρόμου, τα άλλα δύο αντιπροσωπεύουν όψεις της πυκνής βλάστησης και το τελευταίο όψη του ηχοπέτασματος. Αυτά τα ηχητικά και οπτικά ερεθίσματα συνδυαζόμενα μεταξύ τους δημιουργούν δεκατέσσερα οπτικοακουστικά ερεθίσματα τα οποία παρουσιάστηκαν με την βοήθεια ακουστικών¹ και ειδικών ψηφιακών γυαλιών².

Μετά από μία μικρή περίοδο εξάσκησης, τα έξι ηχητικά ερεθίσματα παρουσιάστηκαν στους συμμετέχοντες χωρίς παράλληλα οπτικά ερεθίσματα, ακολούθησε η παρουσίαση των δεκατεσσάρων οπτικοακουστικών ερεθισμάτων. Ανάλογα με το πείραμα, οι συμμετέχοντες ζητήθηκαν να σχολιάσουν ή να κρίνουν τα ηχητικά ερεθίσματα που τους παρουσιάζονταν, οι οδηγίες που τους δόθηκαν ανέφεραν ότι οι λήψεις video παρουσιάζονται με μόνο στόχο να τους βοηθήσουν να

¹ Σύστημα ηχογράφησης και αναπαραγωγής *HEAD Acoustics*.

² Τα ερεθίσματα αποθηκεύτηκαν σε ένα DVD και αναπαράχθηκαν σε κατάλληλη συσκευή μέσω ψηφιακών γυαλιών με οθόνες LCD.

φανταστούν όσο το δυνατόν καλύτερα ότι βρίσκονται σε ένα τέτοιο περιβάλλον και διευκρίνιζαν ότι σκοπός δεν είναι να τις κρίνουν.

1.1 Πειράματα με «ανοιχτή συνέντευξη».

Δεκαοκτώ άτομα από το Παρίσι έλαβαν μέρος σε αυτό το πείραμα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανοιχτής συνέντευξης που έγκειται στο να ζητηθεί από τους συμμετέχοντες να σχολιάσουν ελεύθερα το ακουστικό περιβάλλον που τους παρουσιάζεται μέσω ακουστικών ή οπτικοακουστικών ερεθισμάτων. Το κύριο αποτέλεσμα αυτού του πειράματος ήταν ένας κατάλογος περιγραφικών επιθέτων που επιλέχθηκαν με βάση την συχνότητα εμφάνισής τους. Αυτά τα επίθετα εμφανίστηκαν τουλάχιστον δεκαοκτώ φορές στο σύνολο των συνεντεύξεων και είναι: «δυνατός», «μακρινός», «συνεχής», «ενοχλητικός», «ευχάριστος», «υποφερτός», «βιώσιμος» («fort», «lointain», «continue», «génant», «agréable», «supportable», «vivable» στα γαλλικά). Προφανώς κάποιοι όροι είναι παρεμφερείς, αλλά επιλογή μας ήταν να διατηρήσουμε όλους τους βασικούς όρους που αναφέρθηκαν από τους συμμετέχοντες και άρα έχουν κάποια έννοια για αυτούς. Η απλή λεκτική ανάλυση που ακολούθησε αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη στον έλεγχο της εγκυρότητας και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων της «σημασιολογικής διαφοροποίησης».

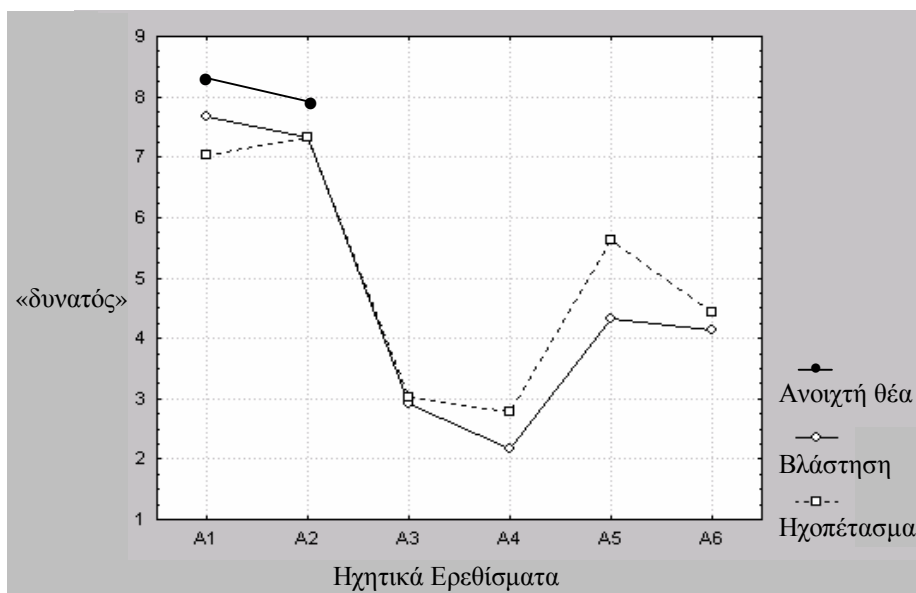
1.2 Πειράματα «σημασιολογικής διαφοροποίησης».

Δεκαοκτώ άτομα από το Παρίσι και δεκαοκτώ άτομα από τη Reims έλαβαν μέρος σε αυτό το πείραμα. Τους ζητήθηκε να κρίνουν το ακουστικό περιβάλλον είκοσι ερεθισμάτων (έξι ακουστικών και δεκατεσσάρων οπτικοακουστικών) βασιζόμενοι σε οκτώ κλίμακες διαφοροποίησης. Επτά από αυτές αντιπροσωπεύουν τα περιγραφικά επίθετα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο ενώ το επίθετο «φυσικό» («naturel» στα γαλλικά) προστέθηκε για να περιγράψει την παρουσία τυχόν φυσικών ηχητικών πηγών στα ερεθίσματα (κυρίως τον ήχο των πουλιών, το θρόισμα των δένδρων, κλπ.).

Οι αναλύσεις PCA (Principal Component Analysis) που πραγματοποιήθηκαν στα αποτελέσματα του καθαρά ακουστικού και του οπτικοακουστικού σκέλους των πειραμάτων και για τα δύο δείγματα πληθυσμών, έδειξαν ότι σε όλες τις τέσσερις περιπτώσεις σχεδόν το 90% της συνολικής διακύμανσης παρατηρείται κατά μήκος ενός και μόνο άξονα. Αυτός ο άξονας είναι στενά συνδεδεμένος με τις έννοιες «δυνατός», «ενοχλητικός» και στενά συνδεδεμένος επίσης, αλλά σε αντίστροφη σχέση, με τις έννοιες «μακρινός», «ευχάριστος», κλπ. Οι σχετικά μεγάλες διαφορές στα επίπεδα θορύβου μεταξύ των ερεθισμάτων (μέχρι και 11 dB(A) διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων ερεθισμάτων) εξηγούν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα αυτό, όπως επίσης το εξηγεί και η ομάδα των επιθέτων που χρησιμοποιήθηκαν και που προήλθαν από τους ίδιους τους συμμετέχοντες.

Μία ανάλυση ANOVA (Analysis of Variance) έδειξε ότι ο παράγοντας «τόπος» (Παρίσι ή Reims) δεν είναι σε καμία περίπτωση καθοριστικός των απαντήσεων, δεν υπάρχουν δηλαδή με άλλα λόγια σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο πληθυσμών. Ο παράγοντας αντίθετα «ηχητικό ερέθισμα» είναι στις περισσότερες περιπτώσεις σημαντικός δείχνοντας εκτός των άλλων ότι τα επίθετα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατανοητά για τους συμμετέχοντες, οι οποίοι εξάλλου δήλωσαν ότι δεν συνάντησαν καμία δυσκολία στην κρίση τους. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ερεθισμάτων με διαφορετικό ποσοστό βαρέων οχημάτων στον συνολικό φόρτο κάτι που υποδεικνύει ότι ο αυτοκινητόδρομος, από αυτήν τουλάχιστον την απόσταση, αντιμετωπίζεται ως μία ηχητική πηγή. Τέλος, είτε ο ίδιος ο παράγοντας

«οπτική πληροφορία» είτε η αλληλεπίδρασή του με το «ηχητικό ερέθισμα» αποδείχθηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις σημαντικοί ($p < 0.05$), γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει μία σαφής αλλά σύνθετη επίδραση της όρασης στην ακουστική αντίληψη. Ειδικότερα, τα ακουστικά ερεθίσματα που θεωρούνται πολύ δυνατά ή/και ενοχλητικά δεν επηρεάζονται από οπτικά ευχάριστα περιβάλλοντα – παρουσιάζεται δε έως και μία αντίθετη επίδραση. Αντίθετα, τα ακουστικά ερεθίσματα που θεωρούνται λιγότερο δυνατά και ενοχλητικά μοιάζουν να επωφελούνται από την παρουσία ευχάριστων σκηνικών. Το Σχήμα 2 δείχνει αυτή την επίδραση για το επίθετο «δυνατός». Παρόμοιο μοτίβο οπτικής επίδρασης παρατηρείται για το επίθετο «ενοχλητικός» και «συνεχής», ενώ όπως είναι αναμενόμενο, η αντίστροφη τάση παρατηρείται για το «μακρινός», «ευχάριστος», «φυσικός» και «βιώσιμος» κ.α.. Το «υποφερτός» δεν φαίνεται σε καμιά περίπτωση να επηρεάζεται από τα οπτικά ερεθίσματα.



Σχήμα 2. Η επίδραση των οπτικών ερεθισμάτων στην υποκειμενική αντίληψη του «δυνατός». Τα ηχητικά ερεθίσματα A1-A6 παρουσιάστηκαν με 2 διαφορετικά σκηνικά (βλάστηση και ηχοπέτασμα) ($F_{interaction}(5,170)=2.74, p < 0.005$) ενώ τα ερεθίσματα A1 και A2 παρουσιάστηκαν επιπλέον με την «ανοιχτή θέα» ($F_{main}(2,68)=7.20, p < 0.005$).

Συμπερασματικά, τα δύο πειράματα δείχνουν ότι ο θόρυβος του αυτοκινητοδρόμου – τουλάχιστον από την απόσταση από την οποία ηχογραφήθηκε – αντικατοπτρίζεται από μία κύρια διάσταση αντίληψης και φαίνεται να αντιμετωπίζεται ως μία ηχητική πηγή. Παρατηρείται επίσης μία μικρή, αλλά στατιστικά σημαντική, καθώς και περίπλοκη επίδραση της οπτικής πληροφορίας στα περισσότερα περιγραφικά επίθετα που χρησιμοποιήθηκαν, μεταξύ των οποίων στην σημαντική διάσταση της ενόχλησης και στην πολύ «ανθεκτική» – όσον αφορά την αντίληψη – διάσταση της έντασης του ήχου (επίθετο «δυνατός»).

4. Αναφορές

[1] Medieva H., και Vos H. “Exposure-response relationships for transportation noise” *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, 104(6), 3432-3445.

[2] Sato T., Yano T., Björkman M., και Rylander R. “Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level” *J. Sound and Vibration*, 1999, 223 (5), 775-784.

[3] Öhrström E “Longitudinal surveys on effects on changes in road traffic noise-annoyance, activity disturbances, and psycho-social well-being” *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, 115 (2), 719-729.

[4] Job, R.F.S. “Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction” *J. Acoust. Soc. Am*, 1988, 83, 991-1001.

[5] Fields J.M. “Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas” *J. Sound and Vibration*, 1993, 93(5), 2753-2763.

[6] Medieva H., και Vos H. “Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise” *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, 105(6), 3336-3344.

Παραγοντική ανάλυση της επίδρασης των συνθηκών οδήγησης και της κατάστασης του δρόμου στον συντελεστή άνεσης αυτοκινήτων

Χαράλαμπος
Σουγλέρης¹

Σπύρος
Πολυχρονόπουλος²

Τηλέμαχος
Ζακινθινός¹

Δημήτρης
Σκαρλατος¹

¹Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών

²Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Φυσικής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή με την βοήθεια της παραγοντικής ανάλυσης γίνεται μία προσπάθεια της εύρεσης των επιδράσεων των διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με την κατάσταση των δρόμων και των συνθηκών οδήγησης στον συντελεστή άνεσης N_{MV} . Συγκεκριμένα μελετήθηκε η κατάσταση του δρόμου σε τρία επίπεδα, η διαμόρφωση του δρόμου, σε δύο επίπεδα η ταχύτητα του αυτοκινήτου σε δύο επίπεδα και ο χειρισμός του αυτοκινήτου σε τρία επίπεδα. Η ανάλυση έδειξε ότι οι πιο σπουδαίοι παράγοντες που επιδρούν στην άνεση είναι η κατάσταση του δρόμου και ο συνδυασμός στροφές τρόπος οδήγησης. Τέλος υπολογίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης που περιγράφει την άνεση συναρτήσει των παραγόντων.

ABSTRACT

A factorial design was used in order to examine the effect of various factors on the comfort index N_{MV} of small cars. We studied the effect of road situation, the vehicle speed and the vehicle operation on N_{MV} . The analysis showed that the most important factor on comfort is the road situation and the interaction of vehicle operation and road curves.

1. Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού η άνεση των επιβατών είναι μία παράμετρος θεμελιώδους σημασίας. Για τον λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια οι εταιρίες κατασκευής οχημάτων διαφόρων τύπων δίδουν μεγάλη σημασία στον περιορισμό των ταλαντώσεων που μαζί με τον θόρυβο είναι και οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την άνεση. Η επίδραση τους πάντως επάνω στον άνθρωπο είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο και εξαρτάται από την ιδιομορφία του κάθε επιβάτη.

Οι δυσκολίες του ποσοτικού προσδιορισμού της άνεσης εστιάζονται σε δύο σημεία:

Ο καθορισμός των ορίων που επιδρούν στην άνεση,

Ο προσδιορισμός της ευαισθησίας των ατόμων στα παραπάνω όρια.

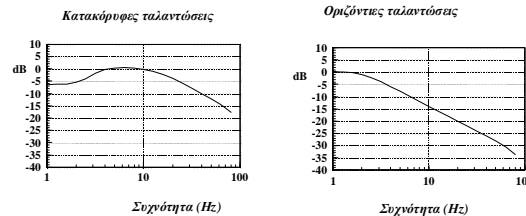
Οι ταλαντώσεις των οχημάτων είναι τυχαίες και αποτελούνται από 6 συνιστώσες: τρεις κατά την διεύθυνση των αξόνων X,Y,Z και τρεις περιστροφικές ως προς τους ίδιους άξονες. Η επίδραση των τελευταίων θεωρείται γενικά αμελητέα και συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη.

Η μελέτη της άνεσης των επιβατών ενός ταξιδιού ξεκίνησε το 1941 στους γερμανικούς σιδηροδρόμους, υπό την αιγίδα του Sperling [1]. Ο Sperling εισήγαγε την μέθοδο Wz (Wertzungzahl). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η άνεση των επιβατών προσδιορίζεται από τον δείκτη W_z που ορίζεται από την σχέση.

$$W_z = 4.42 a_{w,rms}^{0.5} \quad (1.1)$$

Όπου $a_{w,rms}$ η rms τιμή της επιτάχυνσης (μέσω κατάλληλου φίλτρου) κατά την διεύθυνση x, y ή z, σε m/s^2 .

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι η άνεση των επιβατών



Σχήμα 1 Τιμές συνάρτησης βάρους για οριζόντιες και κατακόρυφες ταλαντώσεις (ISO 2631-1)

εκφράζεται με ένα (ή τρεις) απλό αριθμό. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την διάρκεια του ταξιδιού και συνεπώς την κόπωση (fatigue time) και ότι υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε κατεύθυνση.

Αργότερα από τους Γαλλικούς σιδηροδρόμους SNCF προτάθηκε ο SNCF δείκτης που λαμβάνει υπόψη του την κόπωση των επιβατών και συνεπώς την διάρκεια του ταξιδιού. Ο δείκτης αυτός συγχωνεύτηκε με τους κανονισμούς ISO 2631 (1978) [2,3]. Σύμφωνα με τους παραπάνω κανονισμούς ο δείκτης ISO/SNCF σε ώρες ορίζεται από την σχέση:

$$NC = 10^{Z_2} \quad (1.2)$$

όπου:

$$Z_2 = \frac{-0.6667Z_1^2 + 1.6667Z_1 - 0.084396}{Z_1 - 0.7033}, \quad Z_1 = \log a \quad (1.3)$$

στις παραπάνω σχέσεις μέσω κατάλληλης συνάρτησης βάρους a είναι η επιτάχυνση σε m/s^2 .

Τελευταία η επιτροπή ORE B153 καθόρισε τον δείκτη άνεσης N_{MV} [4]. Ο δείκτης αυτός ορίζεται από την σχέση:

$$N_{MV} = 6\sqrt{(a_{xp95})^2 + (a_{yp95})^2 + (a_{zp95})^2} \quad (1.4)$$

Όπου a_{xp95} , a_{xy95} , a_{xz95} οι επιταχύνσεις κατά τους άξονες x, y, z, καθοριζόμενες ως τα 95% ποσοστιαία σημεία. Οι επιταχύνσεις πολλαπλασιάζονται με κατάλληλες συναρτήσεις βάρους που ορίζονται στους κανονισμούς ISO 2631-1 (1997), που αντικατέστησαν τους κανονισμούς ISO 2631(1978) [5]. Το σχήμα 1 δείχνει τις συναρτήσεις βάρους που έχουν ορισθεί ανάλογα με την ευαισθησία του ανθρώπου. Ο δείκτης N_{MV} έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψη του τις

ταλαντώσεις σε τρεις διευθύνσεις ταυτόχρονα και επί πλέον εκφράζεται με ένα απλό αριθμό. Για τον λόγο αυτό στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης N_{MV} .

2. Μετρήσεις

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αυτοκίνητο τύπου WW Taro 2.4 lit, 4X4 Diesel, 9 Hp με αμορτισέρ και σούστες. Για τις μετρήσεις των ταλαντώσεων χρησιμοποιήθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα (ένα για κάθε κατεύθυνση) B&K 4730. Το εύρος των συχνοτήτων ανάλυσης ήταν 1-80 Hz , για την ανάλυση δε χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα τριτοοκτάβας. Η εικόνα 1 δείχνει την θέση των επιταχυνσιομέτρων.



Εικόνα 1 Θέση επιταχυνσιομέτρων (X, Y, Z) κατεύθυνση

3 Μέθοδος ανάλυσης

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στον δείκτη N_{MV} χρησιμοποιήθηκαν παραγοντικά πειράματα (factorial experiments) με τέσσερις παράγοντες σε περισσότερα από δύο επίπεδα. Η επιλογή αυτή στηρίχτηκε στο γεγονός ότι η εξάρτηση του δείκτη N_{MV} από τους παράγοντες που μελετώνται δεν είναι γραμμική. Συγκεκριμένα ως παράγοντες χρησιμοποιήθηκαν κατάσταση του δρόμου (route) σε δύο επίπεδα (1:καλή, 2:κακή) η ταχύτητα (speed) σε τρία επίπεδα (1:μικρή, 2:μεσαία, 3:μεγάλη), ο χειρισμός του αυτοκινήτου (oper) σε τρία επίπεδα (1:επιτάχυνση, 2:επιβράδυνση, 3:σταθερή ταχύτητα), και οι στροφές του δρόμου (curve) (1:με στροφές, 2: ευθεία).

4 Αποτελέσματα

Ο πίνακας 1 δείχνει την ανάλυση της μεταβλητότητας. Από τον πίνακα 1 φαίνεται ότι δύο παράγοντες η κατάσταση του δρόμου και ο συνδυασμός τρόπος οδήγησης / στροφές έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης εφ' όσον οι τιμές p (p-value) είναι μικρότερες του 0.05.

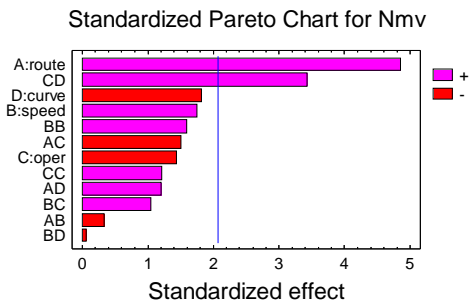
Πίνακας 1 Ανάλυση της μεταβλητότητας (ANOVA)

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:route	205,44	1	205,44	23,52	0,0001
B:speed	26,7628	1	26,7628	3,06	0,0934
C:oper	17,9959	1	17,9959	2,06	0,1647
D:curve	28,9752	1	28,9752	3,32	0,0816
AB	0,975335	1	0,975335	0,11	0,7413
AC	19,7046	1	19,7046	2,26	0,1467
AD	12,6859	1	12,6859	1,45	0,2404
BB	22,1868	1	22,1868	2,54	0,1247
BC	9,44576	1	9,44576	1,08	0,3092
BD	0,0266254	1	0,0266254	0,00	0,9564
CC	12,8101	1	12,8101	1,47	0,2382
CD	102,589	1	102,589	11,74	0,0023
Total error	200,918	23	8,73558		

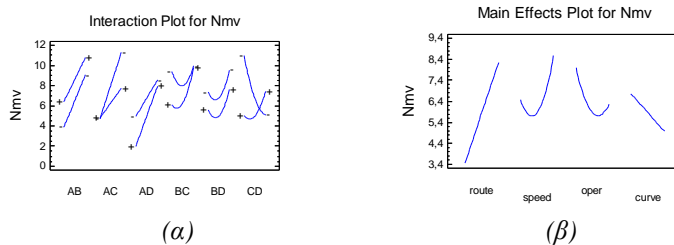
R-squared = 69,5816 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 53,7112 percent

Αυτό φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα Pareto του σχήματος 2, όπου κατατάσσονται οι επιδράσεις κατά σειρά μεγέθους.



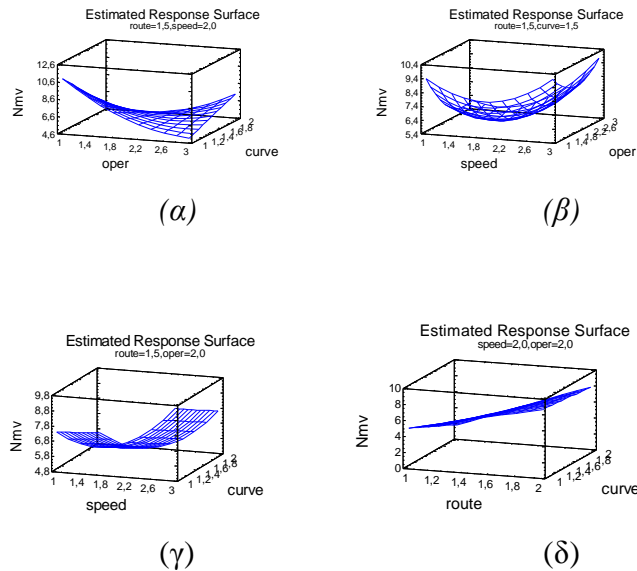
Σχήμα 2 Διάγραμμα Pareto που δείχνει την σημαντικότητα των παραμέτρων.



Σχήμα 3 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης παραγόντων

Το σχήμα 3α δείχνει το διάγραμμα της αλληλεπίδρασης των παραγόντων. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων AC: Δρόμος- τρόπος οδήγησης, BC: ταχύτητα τρόπος οδήγησης, CD: τρόπος οδήγησης – στροφές. Το σχήμα 3β δείχνει τις κύριες επιδράσεις των παραγόντων.

Το σχήμα 4 δείχνει τις επιφάνειες απόκρισης των διαφόρων παραγόντων.



Σχήμα 4: Επιφάνειες απόκρισης παραγόντων

5 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Ο συντελεστής άνεσης των αυτοκινήτων παίρνει μεγάλες τιμές συνεπώς η άνεση είναι μειωμένη. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα Pareto των επιδράσεων των παραγόντων (σχήμα 2), ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την άνεση των επιβατών είναι κατά κύριο λόγο η κατάσταση του δρόμου και κατά δεύτερο λόγο η αλληλεπίδραση χειρισμός αυτοκινήτου / στροφές δρόμου.

Από το διάγραμμα των αλληλεπιδράσεων (σχήμα 3α) Υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων χειρισμός αυτοκινήτου / στροφές δρόμου ενώ δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων κατάσταση δρόμου / ταχύτητα και ταχύτητα / στροφές.

Πίνακας 2 Συντελεστές Παλινδρόμησης του μοντέλου

Regression coeffs. for Nmv

constant	=	26,7062
A:route	=	5,64678
B:speed	=	-6,43736
C:oper	=	-10,9484
D:curve	=	-13,4928
AB	=	-0,403182
AC	=	-1,81221
AD	=	2,37448
BB	=	1,66534
BC	=	0,768349
BD	=	-0,0666151
CC	=	1,26541
CD	=	4,13499

Από το διάγραμμα των κυρίων επιδράσεων (σχήμα 3β), προκύπτει ότι η εξάρτηση της άνεσης από την ταχύτητα δεν είναι γραμμική.

6. Αναφορές

- [1]. ORE: Methods for assessing the comfort quality of passenger vehicles. Report No. 8. Utrecht, April 1997 Interaction between vehicles and track: Methods for assessing the comfort quality of passenger vehicles” ORE Question C116 Report N0 8 Utrecht, April 1977.
- [2]. ISO 2631 –1978 (E) “Guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration”
- [3]. Application of the ISO 2631 standard to railway vehicles”. ORE: Question B153. Report No. 8 (2nd edition). Utrecht, September 1986.
- [4]. ORE: Methods for assessing the comfort quality of passenger vehicles. Report No. 8. Utrecht, April 1997 Interaction between vehicles and track: Methods for assessing the comfort quality of passenger vehicles” ORE Question C116 Report N0 8 Utrecht, April 1977.
- [5]. ISO 2631-1 (1997) “Mechanical vibration and shock –Evaluation of human exposure to whole body vibration” Part 1 General requirement.
- [6]. Karakasis K., Skarlatos D., Zakinthinos T., “A factorial analysis for the determination of an optimal train speed for a desired comfort” Applied Acoustics (In review process)

Μέτρα ηχοπροστασίας από τον οδικό κυκλοφοριακό θόρυβο

Γ. Μπάμνιος¹, Α. Τροχίδης²

¹ Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρονικής, ΤΕΙ Θεσσαλονίκης,
bamnios@el.teithe.gr

² Καθηγητής, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, troidis@gen.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων για την αντιμετώπιση του οδικού κυκλοφοριακού θορύβου είναι μία πρακτική που τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εφαρμόζεται σε αρκετές περιπτώσεις και στην Ελλάδα, καθώς αποτελεί το μόνο μέτρο που μπορεί να πετύχει ηχομείωση έως και 10dB περίπου. Ωστόσο, η ηχομείωση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπογραφία της περιοχής με αποτέλεσμα, σε αρκετές περιπτώσεις, τα αποτελέσματα να μην είναι ικανοποιητικά.

Η διαδικασία σχεδίασης ηχοπετασμάτων περιλαμβάνει αρχικά σειρά μετρήσεων στις προσόψεις των κτιρίων της περιοχής με σκοπό την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης του ακουστικού περιβάλλοντος. Ακολουθεί η τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής και, τέλος, με χρήση λογισμικού, η διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων σχεδίασης ηχοπετασμάτων και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία σχεδίασης ηχοπετασμάτων τόσο σε περιοχές στις οποίες η τοπογραφία καθιστά την τοποθέτησή τους προφανή όσο και σε περιοχές με πιο περίπλοκη τοπογραφία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στοιχεία από μια μελέτη ηχοπροστασίας από κυκλοφοριακό θόρυβο που πραγματοποιήθηκε σε περιοχή της Θεσσαλονίκης.

ABSTRACT

Noise barriers are considered as the most effective and easy-to-use method to decrease road traffic noise. However, their effectiveness depends, to a large extent, on the topography of the area under consideration. Thus, in many locations the use of noise barriers has no significant result on noise reduction and alternative solutions should be examined.

In this paper the performance of noise barriers for various types of topography is examined and alternative choices are investigated including the combined use of noise barriers together with tunnels. In addition, results are presented for a highway road passing from locations with different topographical characteristics.

1. Εισαγωγή

Ο οδικός κυκλοφοριακός θόρυβος αποτελεί τα τελευταία χρόνια μια από τις σημαντικότερες πηγές ενόχλησης σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε οδικές αρτηρίες υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Το πρόβλημα αυτό επιτείνεται συνεχώς όσο αυξάνει ο στόλος των αυτοκινήτων και όσο οι οδικές αρτηρίες βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Θα πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η μείωση της ενόχλησης αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα, καθώς τα τελευταία 20-30 χρόνια η στάθμη θορύβου που εκπέμπουν τα αυτοκίνητα έχει ήδη μειωθεί κατά 8dB(A) για τα επιβατικά και 15dB(A) για τα φορτηγά. Επιπλέον, βελτιωμένοι τύποι ασφάλτου

έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση κατά 6dB(A) του θορύβου που οφείλεται στην τριβή μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος.

Ένας άλλος παράγοντας που δυσχεραίνει τη μείωση της ενόχλησης είναι το γεγονός ότι σε χώρες με κλιματολογικές συνθήκες παρόμοιες με της Ελλάδας, αρκετούς μήνες του έτους αναπτύσσονται δραστηριότητες σε υπαίθριους χώρους ενώ και τα παράθυρα των κατοικιών παραμένουν ανοιχτά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επομένως η λήψη μέτρων τόσο στην πηγή όσο και στο δέκτη καθίσταται αναποτελεσματική. Έτσι η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων αποτελεί το πιο δημοφιλές μέσο λήψης μέτρων κατά τη διαδρομή μεταξύ πηγής και δέκτη.

Η Ελληνική Νομοθεσία έχει ορίσει ανώτατα επιτρεπόμενα όρια για τη στάθμη θορύβου που προέρχεται από τον οδικό κυκλοφοριακό θόρυβο, όπως αυτός μετρείται στις προσόψεις των κατοικιών. Τα όρια αυτά δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ανώτατα επιτρεπόμενα όρια δεικτών οδικού κυκλοφοριακού θορύβου

Δείκτης	Περιγραφή	Όριο
Leq (08.00 έως 20.00)	Ισοδύναμη Συνεχής Στάθμη Θορύβου για τη χρονική περίοδο από 08.00 έως 20.00.	67dB(A)
L ₁₀ (18ωρο)	Μέση τιμή των 18 ωριαίων τιμών του L ₁₀ (από 06.00 έως 24.00) όπου L ₁₀ είναι η στάθμη που ξεπεράσθηκε στο 10% του συνολικού χρόνου μέτρησης.	70dB(A)

Η διαδικασία σχεδίασης ηχοπετασμάτων θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω μέσω της παρουσίασης μιας μελέτης ηχοπροστασίας από οδικό κυκλοφοριακό θόρυβο που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

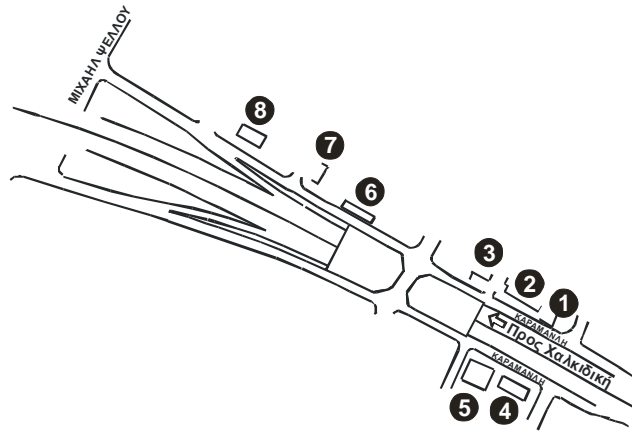
2. Υπάρχουσα κατάσταση

2.1 Περιγραφή της περιοχής

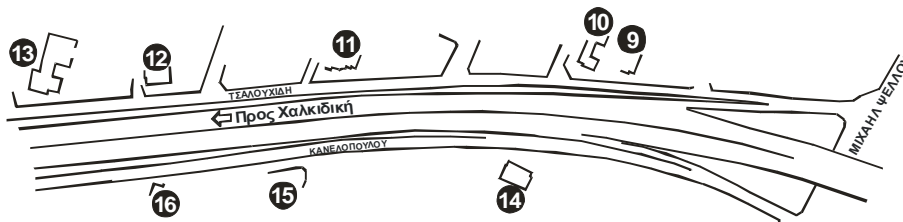
Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται κατά μήκος του οδικού άξονα Θεσσαλονίκης - Χαλκιδικής στην περιοχή της Ν. Ελβετίας - Κηφισιάς. Τα κτίρια που έπρεπε να προστατευθούν ταυτίζονται με τα σημεία μέτρησης που φαίνονται στα Σχήματα 1 και 2 και εκτείνονται από το σηματοδότη της Βούλγαρη έως το πολυκατάστημα ΜΑΚΡΟ. Από άποψη τοπογραφίας, η περιοχή χωρίζεται σε δύο τμήματα (περιοχή 1 και περιοχή 2).

Στην περιοχή 1 ανήκουν τα κτίρια (σημεία 1 έως 8) που βρίσκονται πριν και μετά την υπόγεια διάβαση του ανισόπεδου κόμβου (κοντά στο σηματοδότη της Βούλγαρη). Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση από τον οδικό άξονα, ενώ λόγω των υψομετρικών διαφορών τα περισσότερα από αυτά εδράζονται πολύ υψηλότερα από το επίπεδο της οδού. Επιπλέον κάποια από αυτά πριν από τον ανισόπεδο κόμβο είναι πολυόροφες οικοδομές (σημεία 4, 5).

Η περιοχή 2 περιλαμβάνει τα κτίρια (σημεία 9 έως 16) που εκτείνονται εκατέρωθεν της Εθνικής Οδού, από την έξοδο προς την οδό Μιχαήλ Ψελλού έως το πολυκατάστημα ΜΑΚΡΟ. Και στην περιοχή αυτή τα περισσότερα κτίρια βρίσκονται πολύ κοντά στον οδικό άξονα. Κάποια από αυτά (σημεία 9 έως 13) εδράζονται χαμηλότερα από το επίπεδο της οδού, ενώ τα υπόλοιπα (σημεία 14 έως 16) εδράζονται στο ίδιο περίπου επίπεδο με την οδό.



Σχήμα 1. Σημεία μέτρησης στην περιοχή 1.



Σχήμα 2. Σημεία μέτρησης στην περιοχή 2.

2.2 Μετρήσεις

Προκειμένου να καταγραφεί με ακρίβεια το ακουστικό περιβάλλον της περιοχής πραγματοποιήθηκε μία μεγάλη σειρά μετρήσεων θορύβου σε 16 κτίρια, όπως αυτά σημειώνονται στα Σχήματα 1 και 2. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν, σύμφωνα με τα ελληνικά και διεθνή πρότυπα, στις προσόψεις των κτιρίων και σε διάφορους ορόφους ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής, ενώ διήρκεσαν τρεις εβδομάδες. Σε κάθε μέτρηση μετρήθηκαν τόσο οι δείκτες L_{eq} και L_{10} όσο και οι δείκτες L_{max} , L_{min} και L_1 έως L_{99} . Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, διάρκειας 10 λεπτών η καθεμία, μετρήθηκαν και οι κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό των δεικτών $L_{eq}(08.00-20.00)$ και $L_{10}(18\omega\rho\omicron)$.

Για τον υπολογισμό του δείκτη $L_{eq}(08.00-20.00)$ χρησιμοποιήθηκε, σύμφωνα με τα πρότυπα, η σχέση

$$L_{eq}(08.00 \quad 20.00) = L_{eq,o} + 10 \log \frac{N_T}{N_o} \quad (1)$$

όπου $L_{eq,o}$ είναι η ισοδύναμη συνεχής ηχοστάθμη που μετρήθηκε, N_T είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος (οχήματα/ώρα) στο διάστημα 08.00 μέχρι 20.00 και N_o είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος (οχήματα/ώρα) στο χρονικό διάστημα της μέτρησης. Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Στάθμες των δεικτών $L_{eq}(08.00-20.00)$ και $L_{10}(18\omega\rho\omicron)$.

Περιοχή	$L_{eq}(08.00-20.00)$ σε dB(A)	$L_{10}(12\omega\rho\omicron)$ σε dB(A)
1	71.8-78.9	75-81
2	75.8-79.9	78-81

2.3 Αξιολόγηση των μετρήσεων

Όπως φαίνεται από τις τιμές του Πίνακα 2, οι στάθμες που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή 1 ο δείκτης $L_{eq}(08.00-20.00)$ φθάνει μέχρι τα 78.9dB(A) και στην περιοχή 2 μέχρι τα 79.9dB(A), ενώ και οι χαμηλές τιμές είναι και αυτές σημαντικά υψηλές. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τον δείκτη $L_{10}(18\omega\rho\omicron)$.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε και μία 12ωρη μέτρηση στο σημείο 1 που είναι από τα πιο επιβαρυνμένα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαιώνουν την εικόνα του Πίνακα 2 μιας και ο δείκτης $L_{eq}(08.00-20.00)$ μετρήθηκε στα 78.3dB(A) ενώ ο δείκτης $L_{10}(18\omega\rho\omicron)$ μετρήθηκε στα 80dB(A).

Συνολικά, οι τιμές που προκύπτουν είναι πολύ υψηλές συγκρινόμενες με τα όρια των 67dB(A) και 70dB(A) που ισχύουν για τους δύο δείκτες. Με άλλα λόγια, το ακουστικό περιβάλλον της περιοχής κρίνεται ιδιαίτερα επιβαρυνμένο, γεγονός που οφείλεται τόσο στο μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο (περίπου 4000 οχήματα/ώρα) όσο και στις υψηλές ταχύτητες κίνησης.

3. Διερεύνηση εναλλακτικών μέτρων ηχοπροστασίας

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα όποια προτεινόμενα μέτρα ηχοπροστασίας θα πρέπει να αποσκοπούν σε μειώσεις της στάθμης θορύβου στις προσόψεις των κτιρίων της τάξης τουλάχιστον των 10dB(A), ώστε να προστατευθούν οι κάτοικοι της περιοχής από τον οδικό κυκλοφοριακό θόρυβο. Για το σκοπό αυτό προτείνεται, καταρχήν, η διερεύνηση τοποθέτησης ηχοπετασμάτων τα οποία σε γενικές γραμμές μπορούν να πετύχουν ηχομειώσεις αυτού του μεγέθους.

Για τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων ηχοπετασμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MITHRA της 01dB, στο οποίο η τοπογραφία της περιοχής εισήχθη σε τρισδιάστατη ψηφιακή μορφή. Σε πρώτη φάση το λογισμικό βαθμονομήθηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ενώ στη συνέχεια δοκιμάστηκαν διάφορα σενάρια παρεμβάσεων.

Σε όλες τις περιπτώσεις που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης L_{eq} που σύμφωνα με τη νομοθεσία δεν επιτρέπεται να ξεπερνά τα 67dB(A) και τα ηχοπετάσματα που προτείνονται είναι ηχοαπορροφητικά, ώστε να αποφεύγονται ανακλάσεις που θα επιβαρύνουν τόσο τους οδηγούς των οχημάτων όσο και τις προσόψεις των κτιρίων.

Τέλος, το ύψος των ηχοπετασμάτων που αναφέρεται μετριέται σε σχέση με το επίπεδο του παράπλευρου δρόμου δηλ. το επίπεδο των κτισμάτων.

3.1 Περιοχή 1 (πριν την υπόγεια διάβαση του ανισόπεδου κόμβου)

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει υψηλές στάθμες θορύβου σε συνδυασμό με τη μικρή απόσταση πολυόροφων κτιρίων από τον οδικό άξονα και την έδρασή τους πολύ υψηλότερα από αυτόν. Ο συνδυασμός αυτός έχει σαν αποτέλεσμα την ανεμπόδιστη έκθεση όλων σχεδόν των ορόφων των κτιρίων στον εκπεμπόμενο κυκλοφοριακό θόρυβο.

		ΣΕΝΑΡΙΑ									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Σημείο	Οροφος	Α ρακική Κατάσταση	1.α+1.β: 5m 1.γ: -----	1.α+1.β: 3.5m 1.γ: 3m	1.α+1.β: 4.5m 1.γ: -----	1.α+1.β: 4.5m 1.γ: 4m	σκέπαστρο 50m	σκέπαστρο 50m 1.α+1.β: 3m	σκέπαστρο 70m	σκέπαστρο 70m 1.α+1.β: 3m	
1	3ος	78,1	74,5	73,1	73,4	71,5	72,3	70,7	67,1	66,9	
2	2ος	76,7	72,2	71,0	71,2	69,6	69,2	67,3	64,8	64,7	
3	3ος	71,8	67,2	66,3	66,9	65,7	64,9	62,4	61,2	61,0	
4	5ος	76,9	75,5	74,5	75,2	73,6	72,5	72,0	69,7	69,6	
5	5ος	76,0	74,8	74,0	74,7	73,7	69,2	68,8	67,0	66,9	

Σχήμα 3. Εναλλακτικά σενάρια για την περιοχή 1 (πριν την υπόγεια διάβαση του ανισόπεδου κόμβου).

Για την περιοχή αυτή διερευνήθηκαν οκτώ σενάρια, των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στο Σχήμα 3. Στα πρώτα τέσσερα σενάρια εξετάστηκε η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων (πλευρικών και μεσαίου) αυξάνοντας το ύψος έως και τα 4.5m (σενάριο 4). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι παρά το πολύ μεγάλο ύψος των ηχοπετασμάτων δεν εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ηχοπροστασία, κυρίως στα σημεία 4 και 5 όπου οι στάθμες φθάνουν στα 74dB(A). Σημειώνεται ότι μία τέτοια λύση ενέχει επίσης υψηλό κόστος, δυσκολίες στήριξης αλλά και αισθητικά προβλήματα.

Για τους παραπάνω λόγους διερευνήθηκε η επέκταση της υπόγειας διάβασης προς το σηματοδότη της Βούλγαρη με ειδική κλειστή κατασκευή σε συνδυασμό με χρήση ηχοπετασμάτων (σενάρια 5 έως 8). Στο Σχήμα 3 φαίνεται ότι η κάλυψη της οδού σε ένα μήκος 70m (σενάριο 7) εξασφαλίζει ικανοποιητική ηχοπροστασία σχεδόν σε όλα τα σημεία της περιοχής.

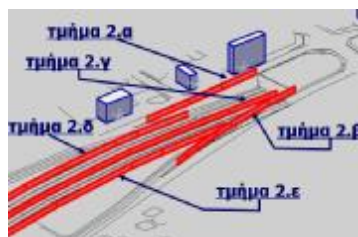
3.2 Περιοχή 1 (μετά την υπόγεια διάβαση του ανισόπεδου κόμβου)

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ανάλογα χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, μόνο που τα κτίρια δεν είναι τόσο υψηλά και ούτε έχουν την ίδια μεγάλη υψομετρική διαφορά από τον οδικό άξονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι στάθμες θορύβου να είναι ελαφρά χαμηλότερες, παραμένοντας όμως αρκετά υψηλότερες από το επιτρεπόμενο όριο.

Και για την περιοχή αυτή διερευνήθηκαν οκτώ σενάρια, των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στο Σχήμα 4, με ανάλογα αποτελέσματα όπως και παραπάνω. Έτσι παρά το μεγάλο ύψος των ηχοπετασμάτων (σενάριο 4), δεν εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ηχοπροστασία, κυρίως στα σημεία 6 και 8 όπου οι στάθμες φθάνουν στα 74.4dB(A) και 70dB(A) αντίστοιχα. Για τους παραπάνω λόγους διερευνήθηκε η επέκταση της υπόγειας διάβασης προς την οδό Μιχαήλ

Ψελλού με ειδική κλειστή κατασκευή με παράλληλη χρήση ηχοπετασμάτων (σενάρια 5 έως 8). Όπως φαίνεται στο σενάριο 7 η κάλυψη της οδού σε ένα μήκος 50m, σε συνδυασμό με την τοποθέτηση παράπλευρων ηχοπετασμάτων ύψους 3.5m, εξασφαλίζει ικανοποιητική ηχοπροστασία σχεδόν σε όλα τα σημεία της περιοχής.

		ΣΕΝΑΡΙΑ								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Σημείο	Όροφος	A ρηχκή Κατάσταση	2.α+2.β: 3.5m 2.δ+2.ε: 3.5m	σενάριο 1 + 2.γ: 3m	2.α+2.β: 4.5m 2.δ+2.ε: 3.5m	σενάριο 3 + 2.γ: 3m	σκέπαστρο 30m 2.α+2.β+2.δ+2.ε: 3.5m	σενάριο 5 + 2.γ: 3m	σκέπαστρο 50m 2.α+2.β+2.δ+2.ε: 3.5m	σενάριο 7 + 2.γ: 3m
6	5ος	75.4	74.9	74.5	74.8	74.4	68.7	68.1	66	65.5
7	2ος	74.8	70.7	68.7	68.8	66.6	68.9	66.8	65.5	63
8	3ος	75.6	72.1	69.6	71.8	69.1	72	69.9	71.4	69.2

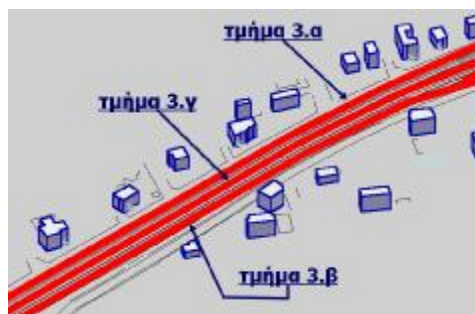


Σχήμα 4. Εναλλακτικά σενάρια για την περιοχή 1 (μετά την υπόγεια διάβαση του ανισόπεδου κόμβου).

3.3 Περιοχή 2

Η περιοχή 2 χαρακτηρίζεται από μεγάλες ταχύτητες κίνησης των αυτοκινήτων, ενώ τα κτίρια βρίσκονται κοντά στον οδικό άξονα και, σε αρκετές περιπτώσεις, οι τελευταίοι όροφοι παρουσιάζουν μεγάλη υψομετρική διαφορά από το οδόστρωμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα υψηλές στάθμες θορύβου και δυσκολία μείωσής τους στους υψηλούς ορόφους.

		ΣΕΝΑΡΙΑ				
		0	1	2	3	4
Σημείο	Όροφος	A ρηχκή Κατάσταση	3.α+3.β: 2.5m	3.α+3.β: 3m	3.α+3.β: 3.5m	3.α+3.β: 4m
9	2ος	77,5	73,0	71,6	70,2	68,9
10	4ος	77,5	76,3	75,9	75,3	74,8
11	3ος	78,1	76,2	75,6	74,9	73,7
12	3ος	78,4	76,3	75,9	74,7	73,2
13	4ος	78,2	76,9	76,6	76,1	75,8
14	4ος	77,4	76,6	76,2	76,0	75,4
15	3ος	78,5	77,7	77,3	76,8	76,5
16	1ος	78,4	71,1	69,8	68,5	67,3



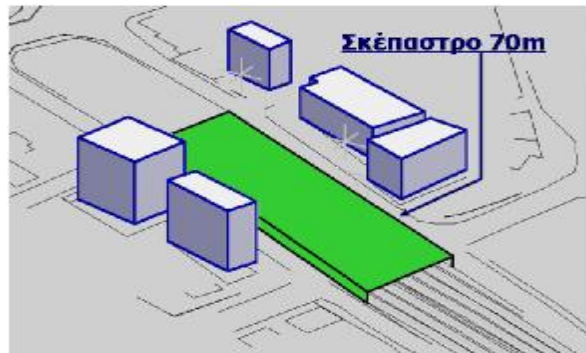
Σχήμα 5. Εναλλακτικά σενάρια για την περιοχή 2.

Στο Σχήμα 5 φαίνεται ότι, ακόμη και για ηχοπετασμάτα ύψους 4m (σενάριο 4) οι υψηλοί όροφοι δεν προστατεύονται ικανοποιητικά. Ωστόσο, επειδή η ηχομείωση είναι ικανοποιητική στους χαμηλότερους ορόφους, τελικά με ηχοπετάσματα ύψους 3.5m, που παρουσιάζουν μικρότερες δυσκολίες στήριξης και αισθητικά

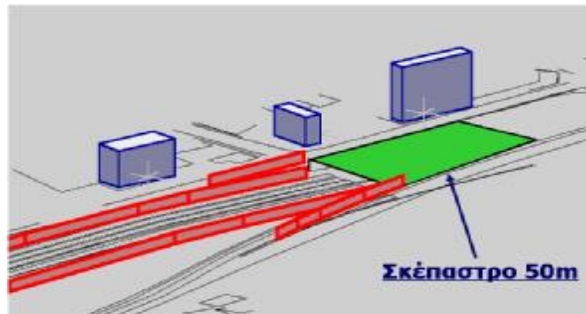
προβλήματα, εξασφαλίζεται η επιθυμητή ηχοπροστασία στο 50% των κατοίκων, ενώ σημαντικές ηχομειώσεις προκύπτουν και στους υψηλούς ορόφους.

4. Τελική Πρόταση

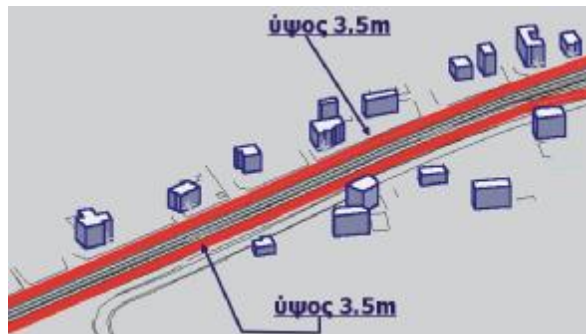
Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι προτεινόμενες επεμβάσεις, όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση των εναλλακτικών σεναρίων.



(α) περιοχή 1 (πριν τον ανισόπεδο κόμβο)



(β) περιοχή 1 (μετά τον ανισόπεδο κόμβο)



(γ) περιοχή 2

Σχήμα 6. Προτεινόμενες επεμβάσεις για την ηχοπροστασία της περιοχής.

Για την περιοχή 1 (τμήμα πριν τον ανισόπεδο κόμβο) προτείνεται η κάλυψη της οδού σε μήκος 70m προς το σηματοδότη της Βούλγαρη (Σχήμα 6.α). Η κάλυψη αυτή μπορεί να γίνει με ειδική κλειστή κατασκευή (τούνελ) που θα αποτελεί προέκταση της υπόγειας διάβασης.

Για την περιοχή 1 (τμήμα μετά τον ανισόπεδο κόμβο) προτείνεται η κάλυψη του οδικού άξονα σε μήκος 50m προς την οδό Μιχαήλ Ψελλού, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω (τούνελ). Πέραν αυτού προτείνεται και η τοποθέτηση πλευρικών ηχοπετασμάτων ύψους 3.5m (Σχήμα 6.β)

Τέλος, για την περιοχή 2 προτείνεται η τοποθέτηση πλευρικών ηχοπετασμάτων ύψους 3.5m κατά μήκος του οδικού άξονα, έως το πολυκατάστημα ΜΑΚΡΟ (Σχήμα 6.γ).

Συμπερασματικά, μπορεί να πει κανείς ότι η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων μειώνει σημαντικά τις στάθμες θορύβου που οφείλονται σε οδικό κυκλοφοριακό φόρτο, μόνο εφόσον η τοπογραφία της περιοχής το επιτρέπει. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να διερευνηθούν εναλλακτικές μέθοδοι ηχομείωσης, όπως η κάλυψη της οδού με ειδική κλειστή κατασκευή που αναφέρθηκε παραπάνω.

5. Βιβλιογραφία

1. Bolt, Beranek, and Newman, Inc., "Establishment of Standards for Highway Noise Levels (Final Report)", Vol. 5, Prepared for Transportation Research Board, National Co-operative Highway Research Program, National Academy of Sciences, NCHRP3-7/3, November 1974.
2. ISO, "Acoustics-Description and Measurement of Environmental Noise-Part 1: Basic Quantities and Procedures, ISO 1996-11 : 1982; Part 2: Acquisition of Data Pertinent to Land Use ISO 1996-22 : 1987; Part 3: Application to Noise Limits. ISO 1996-3 : 1987", Int. Std. Org., Geneva, Switzerland.
3. Hellenic Ministry of the Environment, Physical Planning and Public Works, "Definition of sound indices and of high permissible noise levels concerning road traffic noise", Y.A. 17252-FEK 395/B/19, June 1992.
4. DIN 45642, "Messungen von Verkehrsgeräuschen", October 1974.
5. Department of Transport, "Calculation of Road Traffic Noise", HMSO, London, 1988.

Μελέτη της ανάκλασης ακουστικών κυμάτων από πυθμένα με επικλινή διεπιφάνεια

Παναγιώτης Παπαδάκης
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών
Τ.Θ. 1527, 71110 Ηράκλειο Κρήτης

Ερευνητής (ΕΛΕ)
Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
e-mail: panos@iacm.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συντελεστής ανάκλασης επίπεδων ακουστικών κυμάτων από πυθμένα αποτελούμενο από δύο στρώματα με επικλινή διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων, είναι τοπικού χαρακτήρα και εξαρτάται από το σημείο μέσα στην στήλη του νερού όπου μετράται το ανακλώμενο κύμα, σε αντίθεση με την περίπτωση πυθμένα με παράλληλα στρώματα όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι ο ίδιος όπου και αν μετρηθεί. Επιπλέον η διαφορά φάσης εξαρτάται τώρα και από το οριζόντιο μέρος της διάδοσης των ηχητικών κυμάτων.

Στην εργασία αυτή μελετάται ο τύπος του συντελεστή ανάκλασης ο οποίος τώρα δεν δίνεται σε κλειστή μορφή αλλά μόνο ένα μερικό άθροισμα μπορεί να υπολογισθεί και ως εκ τούτου μόνο μια προσεγγιστική τιμή του συντελεστή ανάκλασης μπορεί να δοθεί. Επίσης τα αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων που εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Υδροακουστικής του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών συγκρίνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στην περίπτωση αυτή ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή ανάκλασης έχει τροποποιηθεί διότι το κύμα που παράγει η πηγή που είναι κατευθυντική δεν είναι πια επίπεδο αλλά έχει σχήμα δέσμης.

Study of the reflection of acoustic waves from a two layer sea floor with oblique interface between the layers

ABSTRACT

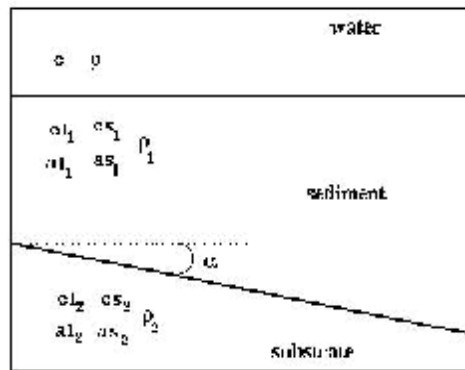
In this work several aspects concerning the local nature of the reflection coefficient of a plane wave reflected from a sea bed consisting of two layers with a sloping interface between them are presented. It is shown that the reflection coefficient is now range dependent and it changes according to the position the reflected signal is been measured. Moreover the horizontal component of the propagation of the plane wave can not be eliminated and should be included in the calculation of the reflection coefficient. Due to the fact that each return (either the specular or multiple reflections from the substrate) arrives at a different angle there is not an explicit closed formula for the infinite sum of these returns and only a partial sum can be calculated. This sum is an approximation of the exact reflection coefficient. Laboratory experiments were performed in the Hydroacoustics Laboratory of the IACM with a material having a sloping interface. The situation is different now, since the source of the waves is a point source which emits a beam and not a plane wave

Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η ανάκλαση ακουστικών κυμάτων που διαδίδονται στην θάλασσα από πυθμένα που αποτελείται από δύο στρώματα με επικλινή διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων. Σε προηγούμενες εργασίες [1], [2] αυτή η περίπτωση εξετάστηκε θεωρώντας ένα επίπεδο κύμα και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ανακλάσεις μιας ακτίνας καθώς διαδιδόταν στο περιβάλλον. Τώρα θα μελετηθεί το ανακλώμενο κύμα σε ένα σημείο της στήλης του νερού θεωρώντας όλες τις ανακλάσεις που φθάνουν σε αυτό το σημείο. Θαδειχθεί ότι ο συντελεστής ανάκλασης δεν είναι πια ίδιος σε όλα τα σημεία της στήλης του νερού – όπως στην περίπτωση οριζόντιας διεπιφάνειας – αλλά έχει τοπικό χαρακτήρα και εξαρτάται από το σημείο που θεωρούμε. Η κατάσταση είναι διαφορετική αν θεωρήσουμε ότι το διαδιδόμενο κύμα δεν είναι επίπεδο αλλά είναι σε μορφή δέσμης που προέρχεται από σημειακή πηγή. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να θεωρήσουμε ότι η δέσμη αποτελείται από επίπεδα κύματα με διαφορετική γωνία διάδοσης και διαφορετική μέγιστη τιμή.

1. Το μοντέλο του πυθμένα.

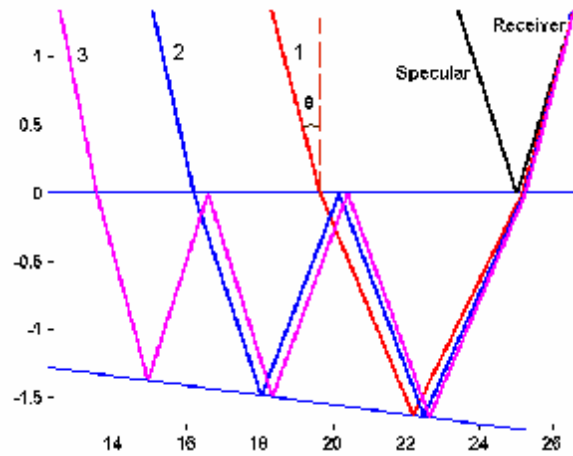
Ο πυθμένας αποτελείται από δύο στρώματα (σχήμα 1). Κάθε στρώμα αποτελείται από ομοιογενές υλικό και η διεπιφάνεια τους είναι επικλινή (σχήμα 1). Η περίπτωση της παράλληλης διεπιφάνειας έχει μελετηθεί διεξοδικά [3]. Τα υλικά που αποτελούν τον βυθό θεωρήθηκαν ότι είναι είτε και τα δύο υγρά (δεν διεγείρουν ελαστικά κύματα), ή το ίζημα υγρό και το υπόστρωμα στερεό, ή και τα δύο στερεά. Οι παράμετροι (ακουστικές και φυσικές) που χαρακτηρίζουν τα υλικά είναι οι εξής:



Σχήμα 1: Το μοντέλο του πυθμένα.

- Η ταχύτητα των ακουστικών και ελαστικών κυμάτων στο ίζημα: cl_1, cs_1 .
- Η ταχύτητα των ακουστικών και ελαστικών κυμάτων στο υπόστρωμα: cl_2, cs_2 .
- Οι πυκνότητες: r_1, r_2 .
- Οι συντελεστές απορρόφησης: al_1, as_1, al_2, as_2 .
- Η κλίση της διεπιφάνειας α
- Η ταχύτητα του ήχου στο νερό c και η πυκνότητα του νερού ρ

Στο σχήμα 2 φαίνονται οι ανακλάσεις ενός επιπέδου (μονοχρωματικού) ακουστικού κύματος που φθάνουν στο ίδιο σημείο (Receiver) έχοντας υποστεί μία ανάκλαση (Specular), τρεις (ακτίνα 1), πέντε (ακτίνα 2), και επτά ανακλάσεις (ακτίνα 3). Τα στρώματα του πυθμένα θεωρούνται εδώ ρευστά.

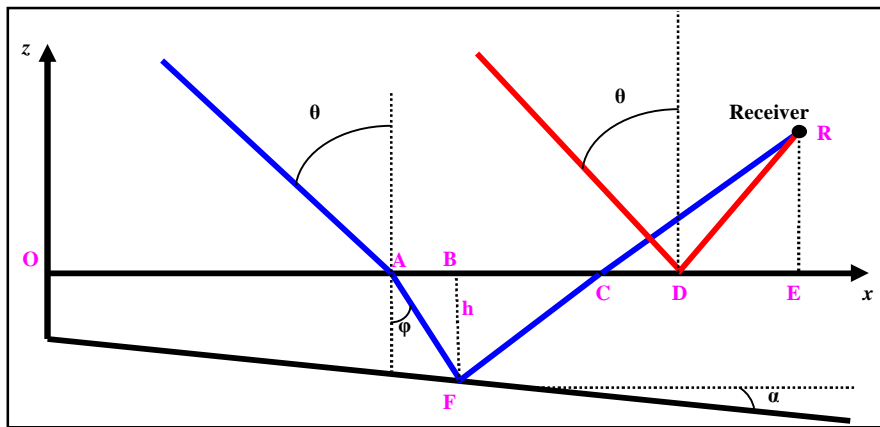


Σχήμα 2. Πολλαπλές ανακλάσεις επίπεδου κύματος που φθάνει σε ένα σημείο.

2. Υπολογισμός του Συντελεστή ανάκλασης

2.1 Ρευστά υλικά

Έστω ένα σύστημα αξόνων όπως στο σχήμα 3 και ας εξετάσουμε τις ακτίνες ενός επίπεδου κύματος με γωνία πρόσπτωσης θ , που φθάνουν στο σημείο R. Δύο από αυτές φαίνονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3. Υπολογισμός του συντελεστή ανάκλασης για ρευστά στρώματα.

Το επίπεδο κύμα που φθάνει στο R δίνεται από τον τύπο:

$$P_i(R) = \exp(k \sin(q)L) \cdot \exp(-ik \cos(q)Z) \quad (1)$$

με $L=|OE|$, $Z=|RE|$ και $k = 2\pi f / c$.

Το κύμα που φθάνει στο R μετά από μία ανάκλαση είναι:

$$P_1(R) = V \exp(k \sin(q)L) \cdot \exp(ik \cos(q)Z) \quad (2)$$

ενώ για την ακτίνα με τις τρεις ανακλάσεις έχουμε διαδοχικά τα εξής κύματα:

$$P_i(B) = \exp(ik \sin(q)L_A), L_A = |OA| \quad (3)$$

$$P_{11}(F) = P_i(B) \cdot W \cdot \exp(ik_1 \sin(j)L_B) \cdot \exp(ik_1 \cos(j)h), L_B = |AB| \quad (4)$$

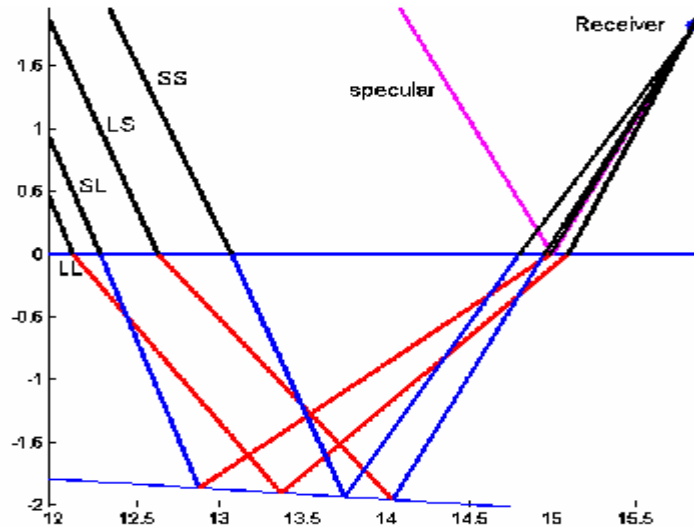
$$P_{11}(C) = P_{11}(F) \cdot V_1 \cdot \exp(ik_1 \sin(j + 2a)L_C) \cdot \exp(ik_1 \cos(j + 2a)h), L_C = |BC| \quad (5)$$

$$P_{11}(R) = P_{11}(C) \cdot W \cdot \exp(ik_1 \sin(q_3)L_E) \cdot \exp(ik \cos(q_3)Z), L_E = |CE| \quad (6)$$

Το άθροισμα των εξισώσεων (6) και (2) είναι το ολικό κύμα που φθάνει στο σημείο R από αυτές τις δύο ακτίνες. Με τον ίδιο τρόπο προσθέτουμε και παραπάνω ακτίνες με πολλαπλές ανακλάσεις. Διαιρώντας τώρα αυτό το άθροισμα με το κύμα της εξίσωσης (1) υπολογίζουμε μια προσέγγιση του συντελεστή ανάκλασης αφού ο ακριβής συντελεστής προϋποθέτει ένα άπειρο άθροισμα όρων. Αυτό το άπειρο άθροισμα δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί με μια κλειστή μορφή διότι δεν είναι μια γεωμετρική σειρά [3] όπως στην περίπτωση παράλληλων στρωμάτων.

2.2 Ελαστικά υλικά

Στην περίπτωση αυτή ελαστικά κύματα διεγείρονται μέσα στα υλικά και άρα μετά από κάθε ανάκλαση δύο κύματα διαδίδονται μέσα στα υλικά, ένα ακουστικό και ένα ελαστικό. Στο σχήμα 4 φαίνεται η περίπτωση αυτή.



Σχήμα 4. Η περίπτωση ελαστικών στρωμάτων.

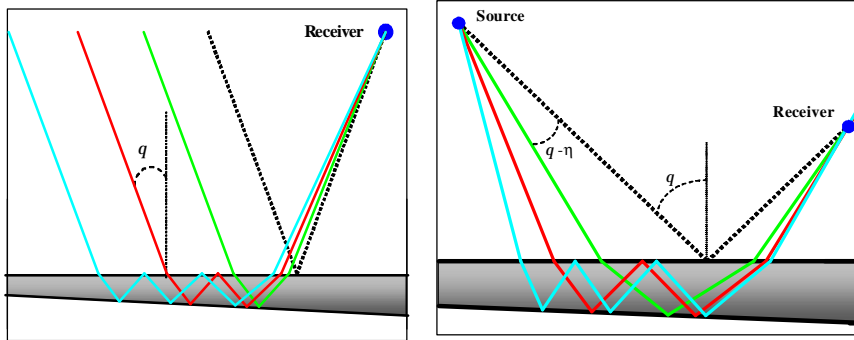
Εδώ παρουσιάζονται η ακτίνα με μία ανάκλαση (specular), και τέσσερις ακτίνες με τρεις ανακλάσεις που διαφέρουν ως προς το τι είδος κύματος (ακουστικό L ή ελαστικό S) διαδίδεται μέσα στο υλικό. Για παράδειγμα η ακτίνα LS είναι εκείνη που μετά από την πρώτη της ανάκλαση στην διεπιφάνεια νερού- ιζήματος συνεχίζει σαν ακουστικό κύμα το οποίο μετά την ανάκλαση του στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων συνεχίζει σαν ελαστικό. Είναι προφανές ότι λαμβάνοντας υπ' όψιν ακτίνες με πολλαπλές ανακλάσεις το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο με πολλές ακτίνες να καταφθάνουν στο R. Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι είναι ο:

$$RC=R_0+R_{ll}+R_{ls}+R_{sl}+R_{ss}+R_{lll}+R_{lls}+R_{lls}+R_{lsl}+R_{sl}+\dots \quad (7)$$

Οι μαθηματικοί τύποι για κάθε όρο του αθροίσματος είναι επίσης πολύπλοκοι.

2.3 Η περίπτωση της δέσμης.

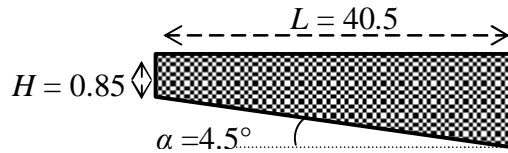
Όπως φαίνεται από το σχήμα 5 οι ακτίνες που φτάνουν στο δέκτη (Receiver) είναι διαφορετικές από εκείνες της περίπτωσης επίπεδου κύματος. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι θέσεις της πηγής και του δέκτη καθώς και το διάγραμμα κατευθυντικότητας της πηγής και του δέκτη.



Σχήμα 5. Ακτίνες που φθάνουν στον δέκτη στην περίπτωση επίπεδου κύματος και στην περίπτωση δέσμης

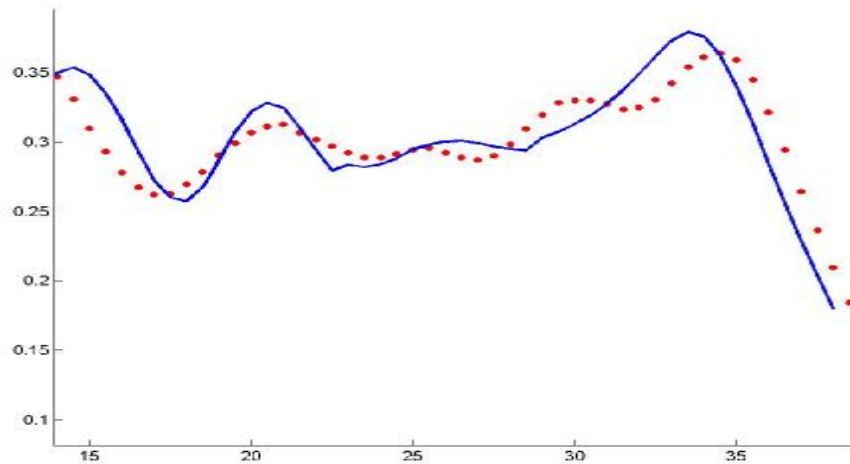
3. Σύγκριση των μοντέλων με πειραματικά δεδομένα.

Στο Εργαστήριο Υδροακουστικής του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών έγιναν πειράματα με ένα υλικό με μορφή σφήνας και με πηγή και δέκτη κατευθυντικούς με εύρος δέσμης περίπου 5 μοίρες (σχήμα 6).



Σχήμα 6. Η πειραματική διάταξη και οι διαστάσεις του υλικού (σε cm).

Η πηγή και ο δέκτης μετακινήθηκαν συγχρόνως για αρκετές γωνίες και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 7. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται σαν τελείες και τα θεωρητικά αποτελέσματα με την συνεχή γραμμή. Παρατηρούμε ότι παρόλο που υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους οι δύο καμπύλες είναι αρκετά κοντά.



Σχήμα 7. Σύγκριση της απόλυτης τιμής του συντελεστή ανάκλασης, ανάμεσα στα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα.

4. Συμπέρασμα

Τα πρώτα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων είναι ενθαρρυντικά. Περισσότερα πειράματα με καλύτερες συνθήκες ελέγχου είναι δυνατόν να φέρουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Το επόμενο βήμα θα είναι η μελέτη του αντιστρόφου προβλήματος, δηλαδή η ανάκτηση των ιδιοτήτων του πυθμένα.

5. Αναφορές

- [1] P.J. Papadakis, H. G. Mizeraki, E. T. Flouri, “Plane Acoustic Wave Reflection from an Oblique Sea-floor”, FORTH/IACM report No 99.16, 1999.
- [2] Π. Παπαδάκης, “Ανάκλαση Ακουστικών Κυμάτων Από Θαλάσσιο Πυθμένα Δύο Στρωμάτων Με Επικλινή Διεπιφάνεια” Ακουστική 2002 Πρακτικά συνεδρίου 69-74, 2003
- [3] L. M. Brekhovskikh O. A. Godin, “Acoustics of Layered Media I”, Springer-Verlag 1990.

Underwater acoustic localization of pulsed sources with a 2-hydrophone configuration

E. Skarsoulis,¹ A. Frantzis,² M. Kalogerakis^{1,3}

¹ Institute of Applied and Computational Mathematics, FORTH, P.O. Box 1527,
711 10 Heraklion, Crete, Greece, eskars@iacm.forth.gr

² Pelagos Cetacean Research Institute, Terpsichoris 21, 16671 Vouliagmeni, Greece

³ Technological Education Institute, PO Box 1939, 710 04 Heraklion, Crete, Greece

ABSTRACT

The use of a 2-hydrophone configuration for the localization of pulsed sound sources, vocalizing (click producing) cetaceans in particular, is studied. For small source-receiver distances the sound arrives at each hydrophone over a direct and a surface-reflected path. By exploiting differential travel times of direct and surface-reflected arrivals, three-dimensional location estimates can be obtained. In the case of a homogeneous ocean simple expressions are derived for the distance estimates. Uncertainties in the measurement of time and hydrophone geometry and deviations from the hypothesis of a homogeneous ocean (stratification) contribute to the estimation errors.

Παθητικός εντοπισμός υποβρύχιων παλμικών πηγών με συστοιχία δύο υδροφώνων

Ε. Σκαρσουλής,¹ Α. Φραντζής,² Μ. Καλογεράκης^{1,3}

¹ Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, ΙΤΕ, Τ.Θ. 1527, 711 10 Ηράκλειο

² Ινστιτούτο Κητολογικών Ερευνών Πέλαγος, Τερψιχόρης 21, 16671 Βουλιαγμένη

³ Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τ.Θ. 1939, 710 04, Ηράκλειο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τον παθητικό εντοπισμό παλμικών ηχητικών πηγών, θαλάσσιων κητιδών ειδικότερα, με τη βοήθεια δύο υδροφώνων. Για μικρές αποστάσεις πηγής-δέκτη τα παλμικά σήματα φθάνουν σε κάθε υδρόφωνο αφ' ενός με απ' ευθείας διάδοση και αφ' ετέρου με ανάκλαση στην επιφάνεια. Αξιοποιώντας τους διαφορικούς χρόνους άφιξης αυτών των σημάτων και υποθέτοντας ομογενές ακουστικό μέσο και γνωστή γεωμετρία λήψης μπορεί να υπολογισθεί η θέση της πηγής σε σχέση με τα δύο υδρόφωνα. Τα σφάλματα στην εκτίμηση της απόστασης οφείλονται σε σφάλματα μέτρησης (χρόνου και γεωμετρίας) και σε αποκλίσεις από την υπόθεση του ομογενούς μέσου (στρωμάτωση).

Introduction

The passive localization of vocalizing cetaceans is essential for behavioral studies as well as for the quantitative description of a number of characteristics of the produced sounds, such as source level and directionality. While there is a broad literature on sounds produced by various cetacean species, it is only recently that reliable range and source-level estimates of free-ranging cetaceans have been reported, sperm whales in particular [1], [2]. These estimates were obtained from measurements of differential arrival times of click sounds at large-aperture hydrophone arrays deployed from a number of independent platforms.

The use of a simple 2-element hydrophone array is examined here for localization. Such arrays are commonly used for bearing estimation of sound-producing whales based on differential travel times of direct arrivals at the two hydrophones [3]. By exploiting both direct and surface-reflected arrivals an estimate for the animal location can be obtained. In the case of a homogeneous ocean simple closed-form expressions are derived for the location estimates and the errors associated with uncertainties in the measurement of time and hydrophone geometry. Furthermore, the performance of this simple estimation scheme in the presence of stratification, i.e. in realistic environments, is studied using ray tracing.

1. Localization in a homogeneous medium

Let us consider an array of 2 hydrophones, 1 and 2, with separation L in a homogeneous medium with constant sound velocity c (Fig. 1). Let h be the depth of hydrophone 1 and a the array angle with respect to the horizontal. A Cartesian coordinate system (x,y,z) is adopted with origin at the location of hydrophone 1 and with the xz plane coinciding with the vertical plane containing the two hydrophones.

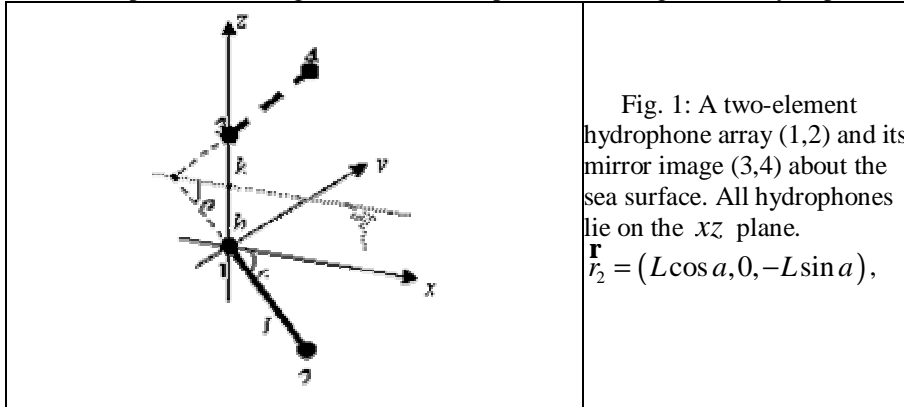


Fig. 1: A two-element hydrophone array (1,2) and its mirror image (3,4) about the sea surface. All hydrophones lie on the xz plane.

$$\mathbf{r}_2 = (L \cos a, 0, -L \sin a),$$

A pulsed signal originating at the source location (x_s, y_s, z_s) . will reach the hydrophones 1 and 2 at times T_1 and T_2 , respectively, following the direct propagation paths. The travel times corresponding to the surface-reflected paths from the source to the hydrophones can be calculated as the direct-path travel times from the source to the mirror images 3 and 4 of the hydrophones 1 and 2 about the sea surface. In this connection the travel times of the surface-reflected arrivals at the hydrophones 1 and 2 are denoted by T_3 and T_4 , respectively. The location vectors of the four hydrophones can be written in the form $\mathbf{r}_i = (x_i, 0, z_i)$, $i=1, \dots, 4$, with $\mathbf{r}_1 = (0, 0, 0)$ and

$$\mathbf{r}_3 = (0, 0, 2h), \quad \mathbf{r}_4 = (L \cos a, 0, 2h + L \sin a) \quad (1.1)$$

By referring all travel times to $T = T_1$, the arrival time at hydrophone 1, and defining the differential arrival times $t_i = T_i - T$, the following equations can be written

$$c^2 (T + t_i)^2 = (x_s - x_i)^2 + y_s^2 + (z_s - z_i)^2, \quad i = 1, \mathbf{K}, 4 \quad (1.2)$$

By subtracting the equation for $i = 1$ from the remaining equations the following system of linear equations is obtained

$$\begin{pmatrix} x_2 & z_2 & c^2 t_2 \\ x_3 & z_3 & c^2 t_3 \\ x_4 & z_4 & c^2 t_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ z_s \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\mathbf{r}_2|^2 - c^2 t_2^2 \\ |\mathbf{r}_3|^2 - c^2 t_3^2 \\ |\mathbf{r}_4|^2 - c^2 t_4^2 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

By solving this system the unknowns x_s , z_s and T can be evaluated. The y -coordinate of the source location can then be estimated from the relation $y_s = \pm \sqrt{c^2 T^2 - x_s^2 - z_s^2}$, provided that $c^2 T^2 > x_s^2 + z_s^2$. With a 2-hydrophone array configuration there are two symmetric solutions for y_s (left-right ambiguity).

The distance D of the source from hydrophone 1, is related with the reference travel time T by the relation $D = Tc$, and it is given by the following expression

$$D = -\frac{c}{2} \frac{ht_2^2 + (h + L \sin a)t_3^2 - ht_4^2}{ht_2 + (h + L \sin a)t_3 - ht_4} \quad (1.4)$$

Thus, the estimate for the distance D depends on the differential travel times (t_2, t_3, t_4), the array geometry (h, L, a) and the sound velocity c .

1.1 Localization errors

Errors in the measurement of the array depth and inclination as well as in the differential travel times will reflect in errors in the estimation of the source distance. The first-order effect of these errors is given by

$$dD = \frac{\partial D}{\partial h} dh + \frac{\partial D}{\partial a} da + \sum_{i=2}^4 \frac{\partial D}{\partial t_i} dt_i \quad (1.5)$$

Assuming that the measurement errors are uncorrelated, the variance of the error dD can be expressed as

$$\langle dD^2 \rangle = \left(\frac{\partial D}{\partial h} \right)^2 \langle dh^2 \rangle + \left(\frac{\partial D}{\partial a} \right)^2 \langle da^2 \rangle + \sum_{i=2}^4 \left(\frac{\partial D}{\partial t_i} \right)^2 \langle dt_i^2 \rangle \quad (1.6)$$

Thus the rms error $dD_{RMS} = \sqrt{\langle dD^2 \rangle}$ for the source distance can be calculated in terms of the underlying rms errors in array geometry and travel-time measurement.

Besides the errors due to measurement uncertainties there are also systematic localization errors caused by the effects of stratification on the ray geometry (ray bending) and the corresponding travel times. In a stratified ocean with sound speed

$c(z)$, varying with depth, the geometry of the acoustic paths (rays) is governed by Snell's law [4]

$$\frac{\cos j}{c} = \text{const.} \tag{1.7}$$

where j is the grazing angle of propagation. By application of Snell's law the time of flight along an acoustic ray from depth z_0 to depth z is given by the expression

$$t(z) = t_0 + \int_{z_0}^z \frac{|dz'|}{c(z') \sqrt{1 - \frac{\cos^2 j_0}{c_0^2} c^2(z')}} \tag{1.8}$$

where j_0 is the initial inclination and $c_0 = c(z_0)$. Thus, in a stratified medium, the correct arrival times from any source location to the two hydrophones is given by eq. (1.8) rather than eq. (1.2) and the use of the latter will introduce errors. Eq. (1.8) applies to rays with depth being a monotonous function of range. If an acoustic path has turning points or surface reflections, eq. (1.8) can be used to calculate travel-times piecewise between turning/reflection points.

2. Numerical results

Some numerical results for passive source localization are given below. Figures 2 and 3 show the rms error of the estimated distance D as a function of the source location for six array configurations assuming measurement errors (rms) of 0.01 msec for travel times and 0.1 m for depth. Assuming that the inclination of the array is estimated from the depths of the two hydrophones, the error in angle estimation is correlated with the measurement error for the depth of each hydrophone ($L \cos a \cdot da_{rms} = \sqrt{2} dh_{rms}$).

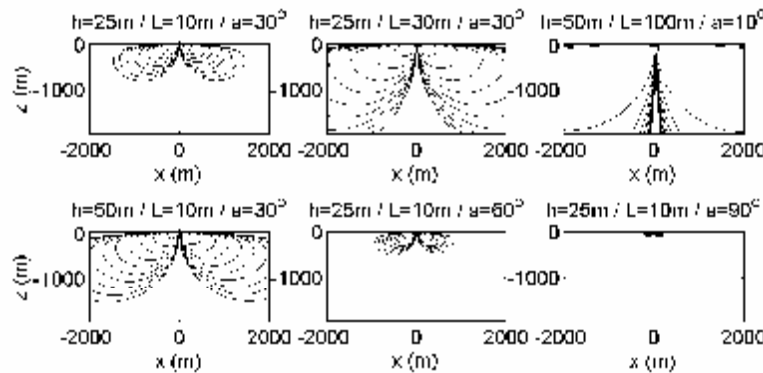


Fig. 2: Rms error (%) in distance estimation as a function of the source location on the xz plane for six array configurations. The contours are separated by 10% and span the range from 10% (inner) to 100% (outer).

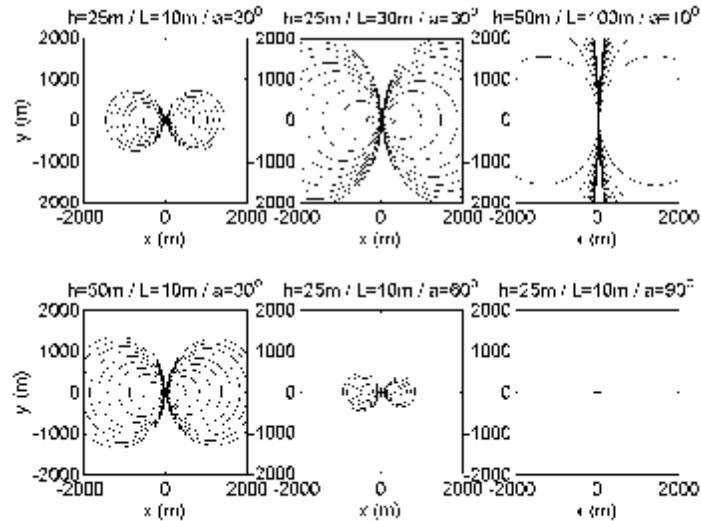


Fig. 3: Rms error (%) in distance estimation as a function of the source location on the horizontal plane 300m below hydrophone 1 ($z=-300\text{m}$) for six array configurations. The contours are separated by 10% (the outer contours correspond to 100% error).

Figs. 2 and 3 reveal that the estimation error becomes largest for source locations close to the sea surface or close to the yz plane. errors can be reduced by increasing the array depth or the hydrophone separation, or by decreasing the array inclination with respect to the horizontal. In this connection, a horizontal array offers the largest accuracy possible for source distance estimation and a vertical array the smallest.

In a stratified environment the ray geometry and corresponding travel times are affected by refraction and the application of the localization scheme based on the homogeneity assumption will introduce errors. To assess these errors we use two sound-speed profiles (Fig. 4) corresponding to winter and summer conditions off southern Crete, a favorable area for the encounter of cetaceans.

Figure 5 shows the errors in distance estimation (%) obtained by using the arrival times calculated from ray theory as input to the simple localization formulas of Section 1. From Fig. 5 it is seen that the errors in summer are large, whereas in winter they are small and quite acceptable. This is due to the intense refraction taking place close to the surface in summer (largest deviation from homogeneity assumption). Further, the increase of array depth and hydrophone separation and the decrease of the array inclination lower the systematic errors, as in the case of the rms errors.

In conclusion, a localization scheme based on the homogeneous medium assumption is anticipated to perform well for small ranges or small sound-speed variability (e.g. winter conditions), where the straight-line propagation is a good approximation. For longer ranges or large sound-speed variability (e.g. summer conditions) the refraction (ray bending) and the non-uniformity of the sound-speed distribution along the ray paths have significant effects on the arrival times and must be accounted for.

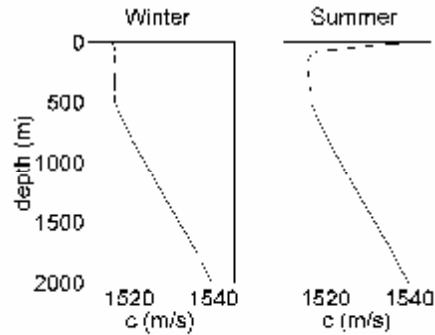


Fig.4: Typical sound-speed profiles for the Libyan sea (MODB data).

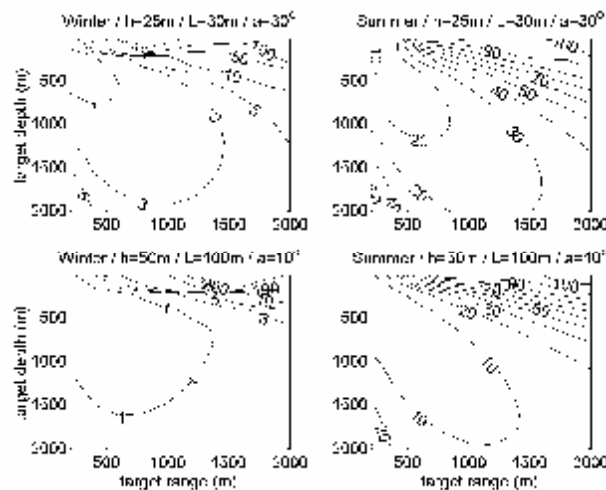


Fig. 5: Systematic error (%) in distance estimation due to stratification in winter and summer propagation conditions (cf. Fig. 4) as a function of the source location on the xz plane for two array configurations.

3. References

- [1] B. Møhl, M. Wahlberg, P.T. Madsen, L.A. Miller and A. Surlykke, "Sperm whale clicks: Directionality and source level revisited", J. Acoust. Soc. Am., 2000, Vol. 107, pp. 638-648.
- [2] M. Wahlberg, B. Møhl, and P.T. Madsen, Estimating source position accuracy of a large-aperture hydrophone array for bioacoustics, J. Acoust. Soc. Am., 2001, Vol. 109, pp. 397-406.
- [3] W.A. Watkins, W.E. Schevill, Sound source location by arrival-times on a non-rigid three-dimensional hydrophone array, Deep-Sea Research, 1972, Vol. 19, pp. 691-706.
- [4] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter and H. Schmidt, Computational ocean acoustics, AIP Press, New York, 1994.

Χαρακτηρισμός ενός υποβρύχιου ακουστικού σήματος με χρήση της στατιστικής κατανομής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων

Μιχάλης Ταρουδάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Κρήτης
και

Ιδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
taroud@iacm.forth.gr

Γιώργος Τζαγκαράκης
Μεταπτυχιακός Σπουδαστής
Πανεπιστήμιο Κρήτης
Και

Ιδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
gtzag@ics.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αναφέρεται στον χαρακτηρισμό ενός ακουστικού σήματος με χρήση της στατιστικής κατανομής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων. Η τεχνική αυτή έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό εικόνας με μεγάλη επιτυχία. Η δυνατότητα μεταφοράς της τεχνικής αυτής στην υποβρύχια ακουστική για τον χαρακτηρισμό και στη συνέχεια την αντιστροφή ενός ακουστικού σήματος είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη. Η εργασία παρουσιάζει αφ' ενός μεν την ιδέα της μεθόδου, αφ' ετέρου δε πρώτα αποτελέσματα από την μελέτη των μεταβολών των υποβρύχιων ακουστικών σημάτων που χρησιμοποιούνται στην ακουστική τομογραφία λόγω μεταβολών των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε σχέση με τις μεταβολές των στατιστικών χαρακτηριστικών των συντελεστών. Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αξιολόγηση του προτεινόμενου εργαλείου στα αντίστροφα προβλήματα κυματικής διάδοσης, μια και οι μεταβολές των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών πρέπει να απεικονίζονται με τον ίδιο βαθμό ευαισθησίας στα μετρούμενα μεγέθη.

Acoustic characterization of an underwater acoustic signal by means of the statistical distribution of the wavelet sub-band coefficients

ABSTRACT

The paper deals with the characterization of an acoustic signal by means of the wavelet subband coefficients as an alternative tool for tomographic or geoacoustic inversions. This technique is used in image processing and has demonstrated its efficiency for image reconstruction. The possibility of transferring this technique for inverse problems in underwater acoustics is promising. The paper presents first results from analysis of the properties of the wavelet sub-band coefficients with respect to variations of the environmental parameters, an issue which is critical in the evaluation of the technique for underwater acoustic inversions.

Εισαγωγή

Η διατύπωση και επίλυση αντίστροφων προβλημάτων στην κυματική διάδοση σχετίζεται αναγκαστικά με την έννοια της «μέτρησης» ενός χαρακτηριστικού μεγέθους που αποτελεί και το δεδομένο του αντίστροφου προβλήματος. Στην υποβρύχια ακουστική, αντίστροφα προβλήματα διατυπώνονται για εφαρμογές αναγνώρισης πηγών, στόχων, της σύστασης των θαλασσινών ιζημάτων ή ακόμη της σύστασης της υδάτινης στήλης (ακουστική τομογραφία). Σε όλες τις περιπτώσεις ένα ακουστικό σήμα που προέρχεται από γνωστή πηγή λαμβάνεται σε κατάλληλο δέκτη και τα χαρακτηριστικά του καταγράφονται για να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα του αντίστοιχου αντίστροφου προβλήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να αναγνωρίζονται κατάλληλα ώστε να συσχετισθούν στη συνέχεια με κατάλληλο νόμο με τις παραμέτρους που πρόκειται να ανακτηθούν. Παραδείγματα χαρακτηριστικών που μετρώνται στην ακουστική τομογραφία είναι οι χρόνοι άφιξης ιδιοακτίνων, οι χρόνοι άφιξης ιδιομορφών (modes), η φάση ιδιομορφών. Η επιλογή των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται στο αντίστροφο πρόβλημα σχετίζεται με την ευαισθησία των προς ανάκτηση παραμέτρων ως προς τις μεταβολές των χαρακτηριστικών αυτών, καθώς επίσης και με την αξιοπιστία της μέτρησης των χαρακτηριστικών και την αναγνωρισιμότητά τους σε ένα περιβάλλον θορύβου. Σημαντική βιβλιογραφική πληροφορία υπάρχει για τις μεθόδους αντιστροφής υποβρύχιων ακουστικών δεδομένων και την επεξεργασία του σήματος (βλ π.χ. [1] και [2]).

Η παρούσα εργασία προτείνει μία εναλλακτική μέθοδο χαρακτηρισμού του υποβρύχιου ακουστικού σήματος που έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί αναγνώριση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και επομένως δίδει την δυνατότητα αυτόματης αντιστοίχισης των μετρήσεων με τις προς ανάκτηση παραμέτρους. Ο χαρακτηρισμός πραγματοποιείται με χρήση ενός μετασχηματισμού κυματιδίων (wavelet transform) και με ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων συντελεστών του μετασχηματισμού. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αμεσότητά της και η ευκολία αντιστοίχισης ενός σήματος με διακριτά χαρακτηριστικά (ώστε να καταστεί δυνατή η διατύπωση ενός διακριτού αντίστροφου προβλήματος).

1. Στατιστικός χαρακτηρισμός των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων

Ένα από τα ζητούμενα στην επεξεργασία ενός ακουστικού σήματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την διατύπωση και επίλυση ενός αντίστροφου προβλήματος είναι η ταχύτητα και στιβαρότητα στον καθορισμό των παρατηρούμενων χαρακτηριστικών (observables) χωρίς να θυσιάζεται η ευαισθησία τους ως προς τις προς ανάκτηση παραμέτρους. Τα ζητούμενα αυτά φαίνεται ότι συνυπάρχουν στις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη στατιστική κατανομή των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων που επιβάλλεται σε ένα ακουστικό σήμα που μετράται στο πεδίο του χρόνου ως πρώτο στάδιο της επεξεργασίας του. Μετασχηματισμοί κυματιδίων χρησιμοποιούνται τελευταία στην υποβρύχια ακουστική με επιτυχία ως εναλλακτικοί των μετασχηματισμών Fourier, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ευρυζώνιων ακουστικών σημάτων. Συνήθως από ένα μετασχηματισμό κυματιδίων, ανακτά κανείς τις καμπύλες διασποράς του σήματος (dispersion curves) που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του σήματος στο πεδίο χρόνου-συχνότητας. Οι καμπύλες αυτές διακριτοποιούνται και αποθηκεύονται σε

ένα διάνυσμα δεδομένων του αντίστροφου προβλήματος αφού προηγουμένως αναγνωρισθούν ως προς την τάξη (order) των ιδιομορφών που αντιπροσωπεύουν [3].

Στην προτεινόμενη μέθοδο, το ακουστικό σήμα χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα πολύ μικρότερο σε μέγεθος που περιλαμβάνει δεδομένα που προέρχονται από την στατιστική ανάλυση των παραμέτρων του μετασχηματισμού κυματιδίων. Δοκιμές που έχουν γίνει στον χαρακτηρισμό εικόνας με χρήση δυδιάστατου μετασχηματισμού κυματιδίων έδειξαν ότι το διάνυσμα αυτό χαρακτηρίζει μονοσήμαντα μία εικόνα κάτι που είναι απαιτητό σε κάθε προσπάθεια αξιοποίησης μιας ομάδας δεδομένων σε ένα αντίστροφο πρόβλημα αναγνώρισης. Μεταφερόμενη η τεχνική αυτή στην υποβρύχια ακουστική θα πρέπει να οδηγεί αντίστοιχα σε μονοσήμαντο χαρακτηρισμό ενός υποβρύχιου ακουστικού σήματος.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μελέτη της δυνατότητας εφαρμογή της μεθόδου αυτής στην υποβρύχια ακουστική βασίζεται σε προηγούμενες εργασίες για την επεξεργασία εικόνας ([4]-[6]) και είναι η ακόλουθη :

Στο μετρούμενο σήμα εφαρμόζεται πολυεπίπεδος μονοδιάστατος διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων (multilevel 1-D Discrete Wavelet Transform (DWT)). Έτσι το σήμα διασπάται σε πολλά τμήματα στο επίπεδο συχνοτήτων, ώστε να υπάρχει αρκετή πληροφορία προς αξιοποίηση. Από το αρχικό σήμα $s(t)$ προκύπτουν κατ' αρχάς δύο ομάδες συντελεστών που χαρακτηρίζονται ως προσέγγισης (approximation coefficients A_1) και λεπτομέρειας (detail coefficients D_1). Για να γίνει αυτό, εφαρμόζεται κατ' αρχήν συνέλιξη στο μετρούμενο σήμα που έχει βέβαια ψηφιοποιηθεί με ένα βαθυπερατό και ένα υψιπερατό φίλτρο αντίστοιχα. Στο δεύτερο επίπεδο προσέγγισης, το διάνυσμα των συντελεστών A_1 διασπάται σε δύο υποσύνολα συντελεστών ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπου τον ρόλο του σήματος $s(t)$ παίρνουν οι συντελεστές A_1 . Η ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί k φορές και οδηγεί σε αντίστοιχα διανύσματα συντελεστών. Σε κάθε επίπεδο ανάλυσης οι συντελεστές μελετώνται ως προς τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, ώστε να τους αποδοθεί μία κατάλληλη κατανομή που θα περιγράφεται από τις αντίστοιχες παραμέτρους. Για παράδειγμα εάν οι συντελεστές ακολουθούν κανονική κατανομή, η μέση τιμή και η διασπορά είναι αρκετή για να χαρακτηρίσει το διάνυσμα ενώ το σύνολο των χαρακτηριστικών αυτών παραμέτρων για όλα τα επίπεδα ανάλυσης που αναφέραμε χαρακτηρίζουν το σήμα.

Στην εργασία που παρουσιάζεται εδώ, υιοθετείται μία γενική συμμετρική Α-ευσταθής κατανομή (Symmetric Alpha-Stable (SaS) model) για την στατιστική περιγραφή των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων που εφαρμόστηκε στα υποβρύχια ακουστικά σήματα που μελετήθηκαν. Η κατανομή αυτή έχει έκφραση σε κλειστή μορφή μόνο για τις περιπτώσεις των κατανομών Cauchy και Gauss που αποτελούν υποπεριπτώσεις της. Η χαρακτηριστική της εξίσωση περιγράφει τελικά την κατανομή και μπορεί να πάρει διάφορες μορφές που εξαρτώνται από τις παραμέτρους α , γ και δ σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.1)-(1.3)

$$f(w) = \exp(jdw - g|w|^a) \quad (1.1)$$

$$f(w) = \exp(jdw - g^a|w|^a) \quad (1.2)$$

$$f(w) = \exp\left(jdw - \frac{1}{a}g^a|w|^a\right) \quad (1.3)$$

όπου $0 < a \leq 2$, d ($-\infty < d < \infty$) και g, g_1 ($g, g_1 > 0$) με $g_1 = a^{1/a} g$

Η κατανομή SaS είναι κατάλληλη για να χαρακτηρίσει σήματα, οι παράμετροι μετασχηματισμού κυματιδίων των οποίων εμφανίζουν μεγάλες ουρές στην κατανομή που ακολουθούν ένα νόμο απόσβεσης της μορφής $P(X > x) \sim c_a x^{-a}$. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια ενός σήματος (περίπτωση τομογραφικών ακουστικών σημάτων), τόσο μεγαλύτερη είναι η ουρά της κατανομής των αντίστοιχων συντελεστών και επομένως αναμένουμε ότι η κατανομή SaS θα είναι κατάλληλη να περιγράψει την κατανομή τους.

Απομένει να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο θα προκύψουν οι παράμετροι της στατιστικής κατανομής των συντελεστών. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood (ML) estimator) σύμφωνα με τον Nolan ([7],[8]).

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε περίπτωση υποβρύχιου ακουστικού σήματος ελέγχεται η δυνατότητα περιγραφής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων μέσω της κανονικής κατανομής. Ένας άμεσος τρόπος ελέγχου είναι να υπολογιστούν οι καμπύλες πυκνότητας πιθανότητας (amplitude probability density (APD) curves) και να συγκριθούν με εκείνες που αποδίδονται στην κανονική κατανομή

2. Εφαρμογή

Για να μελετηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής που αναφέρθηκε παραπάνω στα υποβρύχια σήματα, επελέγη ένα τυπικό περιβάλλον ρηχής θάλασσας, στο οποίο προσομοιώθηκε ένα πείραμα ακουστικής τομογραφίας βασισμένο σε ένα σήμα κεντρικής συχνότητας $f_0 = 100$ Hz και πλάτους $\Delta f = 40$ Hz. με φασματικά χαρακτηριστικά τύπου Gauss που εκπέμπεται από πηγή ποντισμένη σε βάθος 50 μέτρων. Στον επόμενο πίνακα αναφέρονται οι γεωακουστικές παράμετροι του περιβάλλοντος της μελέτης μας

Πίνακας 2.1 Γεωακουστικές παράμετροι του περιβάλλοντος της εφαρμογής

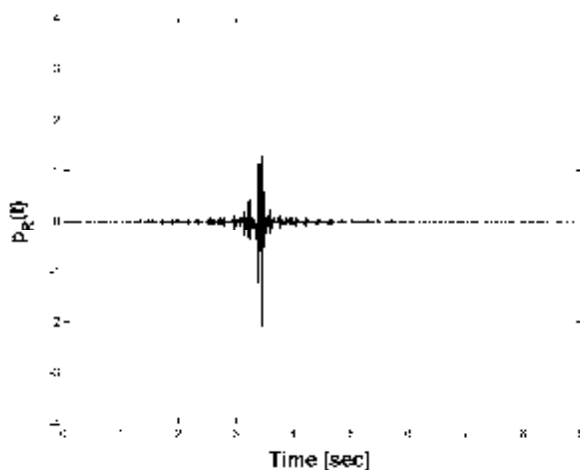
Παράμετρος	Τιμή
Βάθος νερού H (m)	100
$c(0)$ (m/sec)	1500
$c(100)$ (m/sec)	1515
c_b (m/sec)	1600
r_b (kg/m ³)	1200

Οι ταχύτητες στο νερό αναφέρονται στην επιφάνεια και στον πυθμένα ενώ η ταχύτητα διάδοσης του ήχου και η πυκνότητα του πυθμένα c_b και ρ_b αντίστοιχα, θεωρούνται σταθερές. Γραμμική μεταβολή συναρτήσεως του βάθους θεωρείται για την ταχύτητα του ήχου στο νερό. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το ακουστικό σήμα όπως υπολογίζεται από ένα πρόγραμμα υπολογισμού του ακουστικού πεδίου στη θάλασσα σε περιβάλλον χωρίς θόρυβο βασισμένο σε ανάπτυγμα της πίεσης σε σειρά ιδιομορφών (normal-modes). Ο υπολογισμός του πεδίου γίνεται σε κάθε συχνότητα εντός του εύρους συχνοτήτων του ακουστικού σήματος και ακολουθείται από μία σύνθεση Fourier των επί μέρους συναρτήσεων μεταφοράς (transfer function) ακολουθώντας μία τυπική διαδικασία εφαρμογής φίλτρων σε γραμμικά

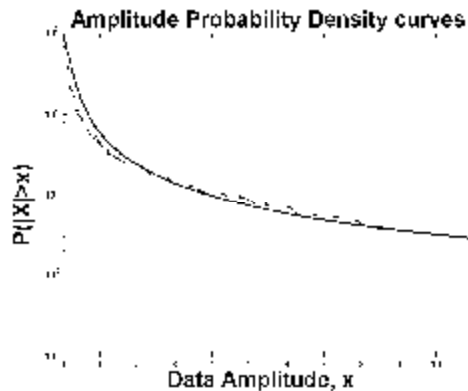
σύστηματα. Το βάθος υπολογισμού είναι 50 μέτρα και η απόσταση από την πηγή 5 χιλιόμετρα.

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό κυματιδίων στο κανονικοποιημένο σήμα, παίρνομε μέσω τις διαδικασίας που παρουσιάσαμε παραπάνω μία σειρά από κατανομές για τους συντελεστές του μετασχηματισμού. Στην περίπτωση μας εφαρμόστηκε το φίλτρο Daubechies' "db4" για ανάλυση σε τρία επίπεδα που οδηγούν σε 3 διάνυσματα συντελεστών λεπτομέρειας (Detail coefficients) και ένα διάνυσμα συντελεστών προσέγγισης (Approximation coefficients). Υπολογίζοντας τις παραμέτρους της SaS κατανομής των συντελεστών για κάθε διάνυσμα, έχουμε συνολικά οκτώ (8) παραμέτρους (2 x 4) να περιγράφουν το ακουστικό σήμα.

Στο σχήμα 2.2 βλέπομε δύο καμπύλες από τις οποίες η διακεκομμένη καμπύλη παρουσιάζει την εμπειρική στατιστική κατανομή των συντελεστών λεπτομέρειας (detail coefficients) του μετασχηματισμού για το πρώτο επίπεδο της διαδικασίας. Η ανάλυση μέγιστης πιθανοφάνειας έδωσε τους συντελεστές $\alpha = 1.20927$, $\gamma = 0.045983$, για την κατανομή SaS, μέσω των οποίων υπολογίστηκε η συνεχής καμπύλη του σχήματος 2.2. Είναι εμφανής η πολύ καλή περιγραφή της στατιστικής κατανομής των συντελεστών από το μοντέλο της SaS κατανομής.

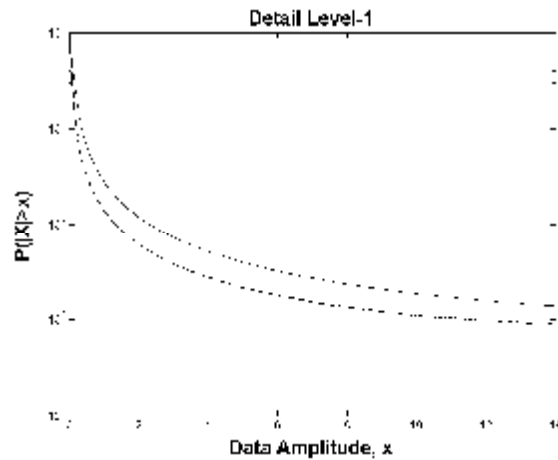


Σχήμα 2.1. Το ακουστικό σήμα της μελέτης

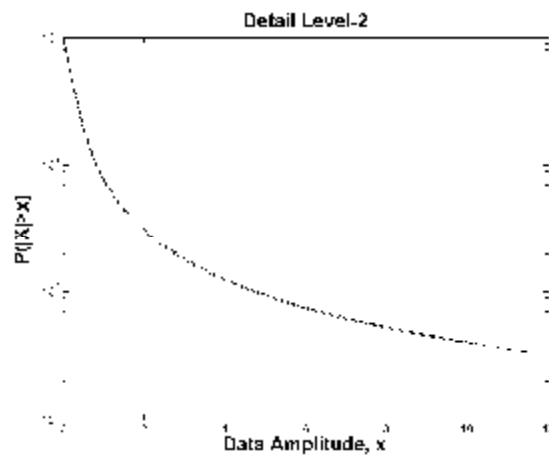


Σχήμα 2.2. Μοντελοποίηση της στατιστικής κατανομής των συντελεστών λεπτομέρειας του προσομοιωμένου σήματος για το πρώτο επίπεδο χρησιμοποιώντας το φίλτρο 'db4'.

Για να πάρουμε τέλος μία εικόνα της ευαισθησίας του χαρακτηρισμού του σήματος μέσω της στατιστικής κατανομής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων, εφαρμόσαμε την ίδια διαδικασία σε ένα «τροποποιημένο» περιβάλλον ρηχού νερού, στο οποίο η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον πυθμένα ήταν 1510 m/sec αντί για 1515 m/sec του αρχικού περιβάλλοντος. Έτσι μπορεί να πάρει κανείς μία αίσθηση των μεταβολών που αναμένονται στις στατιστικές παραμέτρους, όταν αυτές προέρχονται από διαφορετικά περιβάλλοντα και συνεπώς μια πρώτη εντύπωση σχετικά με την δυνατότητα χρήσης των παραμέτρων της νέας στατιστικής κατανομής για την ανάκτηση των παραμέτρων του περιβάλλοντος. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η στατιστική κατανομή των συντελεστών λεπτομέρειας του πρώτου επιπέδου για το αρχικό (συνεχής γραμμή) και το τροποποιημένο (δικεκομμένη γραμμή) περιβάλλον. Η μεταβολή της στατιστικής κατανομής είναι εμφανής και αντανακλάται στις νέες στατιστικές παραμέτρους που είναι τώρα $a = 1.201$, $\gamma = 0.03011$. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι δεν παρουσιάζεται σε όλα τα επίπεδα η ίδια ευαισθησία. Στο συγκεκριμένο περιβάλλον σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους των στατιστικών κατανομών παρατηρήθηκαν για τις παραμέτρους λεπτομέρειας του πρώτου επιπέδου (ως ανωτέρω) και τις παραμέτρους προσέγγισης του τρίτου επιπέδου. Οι άλλες δύο κατανομές διέφεραν λίγο μεταξύ τους. Για παράδειγμα η κατανομές των συντελεστών λεπτομέρειας για το δεύτερο επίπεδο που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4 δεν παρουσιάζουν ουσιώδη μεταβολή μεταξύ τους παρά το γεγονός ότι οι παράμετροι έχουν κάποια αξιοσημάντη διαφορά. Το συμπέρασμα από την παρατήρηση αυτή είναι ότι ο χαρακτηρισμός ενός σήματος είναι ικανοποιητικός όταν προέρχεται από το σύνολο των διαθέσιμων στατιστικών παραμέτρων σε όλα τα επίπεδα.



Σχήμα 2.3. Η στατιστική κατανομή των συντελεστών λεπτομέρειας του πρώτου επιπέδου για το αρχικό (συνεχής γραμμή) και το τροποποιημένο (διακεκομμένη γραμμή) περιβάλλον.



Σχήμα 2.4. Η στατιστική κατανομή των συντελεστών λεπτομέρειας του δεύτερου επιπέδου για το αρχικό (συνεχής γραμμή) και το τροποποιημένο (διακεκομμένη γραμμή) περιβάλλον. Αντίστοιχες παράμετροι της κατανομής είναι για το αρχικό $\alpha = 1.2659$, $\gamma = 0.00095213$ και για το τροποποιημένο $\alpha = 1.2562$, $\gamma = 0.0014653$

3. Συμπεράσματα

Οι κατανομές των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων σε διάφορα επίπεδα ενός υποθαλάσσιου ακουστικού σήματος αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του σήματος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό του. Επομένως είναι δυνατό να παίξουν τον ρόλο δεδομένων ενός αντίστροφου προβλήματος ακουστικής τομογραφίας ή αναγνώρισης πυθμένα, μια και τα σήματα που προέρχονται από περιβάλλοντα διαφορετικών παραμέτρων είναι με τη σειρά τους διαφορετικά και επομένως μπορούν να συνδεθούν μέσω κατάλληλου μοντέλου με τις προς ανάκτηση παραμέτρους του περιβάλλοντος.

Βασικό πλεονέκτημα του χαρακτηρισμού ενός ακουστικού σήματος με τις παραμέτρους της στατιστικής κατανομής των συντελεστών του μετασχηματισμού κυματιδίων σε διάφορα επίπεδα, είναι η απλότητα και ταχύτητα στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών (observables) σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο αριθμός των μεγεθών αυτών είναι σχετικά μικρός σε σύγκριση με άλλες περσιπτώσεις χαρακτηρισμού ενός ακουστικού σήματος.

Απαιτείται βέβαια περαιτέρω εργασία για να εξακριβωθεί η αποδοτικότητα μιας σχετικής διαδικασίας αντιστροφής των δεδομένων αυτών (π.χ. μέσω νευρωνικών δικτύων ή άλλων τεχνικών) για τον υπολογισμό των παραμέτρων του περιβάλλοντος από το οποίο προέρχονται. Σε κάθε περίπτωση το αντίστροφο πρόβλημα που ορίζεται είναι μη γραμμικό και απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας για τον καθορισμό του βαθμού αξιοπιστίας μιας διαδικασίας αντιστροφής.

4. Αναφορές

- [1] M.I. Taroudakis and G.N. Makrakis eds, *Inverse Problems in Underwater Acoustics* Springer Verlag, 2001.
- [2] O.Diachok, A Caiti, P. Gerstoft and H Schmidt eds, *Full Field Inversion Methods in Ocean and Seismic Acoustics*. Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [3] M.I. Taroudakis and G. Tzagkarakis "On the use of the reassigned wavelet transform for mode identification" *J.Comp. Acoust.* Vol (12), pp 175-196, 2004.
- [4] M.N. Do and M. Vetterli, "Wavelet-based texture retrieval using generalized Gaussian density and Kullback-Leibler distance," *IEEE Trans. Image Processing*, vol (11), pp. 146-158, 2002.
- [5] A. Achim, A.Bezerianos, and P.Tsakalides, "Novel Bayesian multiscale method for speckle removal in medical ultrasound images," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol.(20), pp. 772-783, 2001.
- [6] A.Achim, P.Tsakalides, and A.Bezerianos, "SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling," *IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sens.*, vol. (41), pp. 1773-1784, 2003.
- [7] J.P. Nolan, "Parameterizations and modes of stable distributions," *Statistics & Probability Letters*, vol. (38), pp 187-195, 1998.
- [8] J.P. Nolan, "Numerical calculation of stable densities and distribution functions," *Commun. Statist.-Stochastic Models*, vol. (13), pp. 759-774, 1997.

Παρακολούθηση της οριζόντιας μετατόπισης των υποθαλάσσιων ρηγμάτων με συνδυασμό τεχνικών DGPS/ακουστικών συστημάτων

Ευστράτιος Δουκάκης
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ, edouk@central.ntua.gr

Σταυρούλα Περουτσέα
Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ, rok2pok5g@internet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κινήσεις και παραμορφώσεις των τεκτονικών πλακών προκαλούν σεισμούς και ηφαιστειακές εκρήξεις που συχνά έχουν καταστρεπτικές συνέπειες για τους πληθυσμούς κατά μήκος των ορίων των πλακών. Για την παρακολούθησή τους έχουν δημιουργηθεί παγκόσμια δίκτυα βασισμένα κυρίως σε δορυφορικές τεχνικές που είναι αποκλειστικά χερσαία ως σήμερα. Η συλλογή δεδομένων της δυναμικής του υποθαλάσσιου φλοιού θα συνεισφέρει σημαντικά στην κατανόηση της φύσης των τεκτονικών διαδικασιών. Προτείνεται ένα σύστημα παρακολούθησης των υποθαλάσσιων τεκτονικών πλακών βασισμένο σε συνδυασμό dGPS-ακουστικών τεχνικών με την ίδρυση ενός γεωδαιτικού δικτύου του πυθμένα. Το σύστημα αποτελείται από 3 κύριες συνιστώσες: τον εντοπισμό του πλοίου με dGPS ως προς τους σταθμούς αναφοράς της στεριάς, ακριβείς ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας τεχνικές συμπίεσης παλμού μεταξύ του πλοίου και των κορυφών του δικτύου και άμεσες μετρήσεις των γραμμών βάσης του δικτύου. Οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου ως προς γνωστό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς καθορίζονται από αυτές τις παρατηρήσεις και ένα μοντέλο της δομής της ταχύτητας του ήχου στο θαλάσσιο νερό. Κινήσεις και παραμορφώσεις των τεκτονικών πλακών ανιχνεύονται ως αλλαγή των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου ή αλλαγή της εσωτερικής γεωμετρίας του. Οι ακρίβειες που αναμένονται είναι της τάξης των 1-10cm για το dGPS, 1-2cm για τις ακουστικές μετρήσεις μεταξύ πλοίου και δικτύου του πυθμένα και 0.5-1cm για την άμεση μέτρηση των γραμμών βάσης μήκους περίπου 1.5km.

ABSTRACT

Tectonic plate motion and deformation are the cause of earthquakes and volcanic eruptions with often devastating consequences for populated areas along the plate boundaries. To date, global monitoring networks based mainly on satellite techniques have been established on terrestrial sites only. Data collection of underwater crust dynamics will contribute significantly to the understanding of the nature of tectonic processes. A monitoring system based on combined dGPS-acoustics techniques using a seafloor geodetic network is proposed. The system consists of 3 main components: dGPS ship positioning relatively to land reference stations, precise acoustic ranging between the ship and the seafloor transponders and near bottom acoustic direct baseline measurements of the network. The coordinates of the transponders in a geodetic reference system can be determined from these observations and a sound speed structure model. Tectonic plate motion and deformation can be traced as a change in network coordinates or a change in network internal geometry. Expected accuracy is 1-10cm for dGPS solutions, 1-2cm

for acoustic ranging between the ship and seafloor network and 0.5-1cm for acoustic direct network baseline measurements, for baseline lengths of about 1.5km.

Εισαγωγή

Η μετακίνηση και η αλληλεπίδραση των τεκτονικών πλακών στην επιφάνεια της γης είναι υπεύθυνες μέσα στο γεωλογικό χρόνο για την δημιουργία των ωκεάνιων λεκανών, την ορογένεση και την ρηγμάτωση των ηπείρων. Στη διάρκεια ζωής ενός ανθρώπου αυτές οι κινήσεις των πλακών είναι η αιτία σεισμών και ηφαιστειακών εκρήξεων που μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για τους πληθυσμούς που ζουν κατά μήκος των ορίων των πλακών. Ενώ οι σχετικές κινήσεις των πλακών είναι τώρα γνωστές, απομένουν αναπάντητες πολλές βασικές ερωτήσεις όσον αφορά τις δυνάμεις που δρουν πάνω στις πλάκες, το πως τα όρια των πλακών αλληλεπιδρούν και παραμορφώνονται και το πως διασυνδέονται οι μαγματικές, τεκτονικές, υδροθερμικές και βιολογικές διαδικασίες στα όρια των πλακών.

Με την εξέλιξη της δορυφορικής γεωδαισίας, και με την χρήση σύγχρονων τεχνικών όπως Συμβολομετρία ραδιοκυμάτων ή Συμβολομετρία πολύ μεγάλων γραμμών βάσης (Very Long Baseline Interferometry-VLBI) και τεχνικές του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού (Global Positioning System – GPS), έχουν δημιουργηθεί παγκόσμια δίκτυα για την μελέτη της δυναμικής του φλοιού της γης. Ο κύριος στόχος αυτών των δικτύων είναι η παρακολούθηση της κίνησης και της παραμόρφωσης των πλακών. Επειδή οι πιο πάνω τεχνικές χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η οποία δεν διεισδύει παρά μόνο σε πολύ μικρό βάθος στο θαλάσσιο νερό, υπάρχουν μεγάλα κενά στην παγκόσμια κάλυψη όπως επίσης υπάρχουν κενά στα παγκόσμια σεισμικά και γεωμαγνητικά συστήματα παρατήρησης. Τα νησιά μπορούν να γεφυρώσουν αυτά τα κενά σε κάποιο βαθμό αλλά παρατηρείται απουσία νησιών σε μεγάλες ωκεάνιες εκτάσεις καθώς και σε πολλές από τις τεκτονικά πιο ενεργές περιοχές όπως τα υποθαλάσσια όρια πλακών. Ο νέος φλοιός είναι πολύ λεπτός για να υποστηρίξει νησιά ενώ αντίθετα η βύθιση του παλαιού φλοιού στα περισσότερα όρια καταβύθισης παρασύρει στο βυθό τα νησιά όσο πλησιάζουν το όριο [1].

Οι σεισμοί στα όρια των πλακών είναι ο πιο σημαντικός δείκτης έντασης και παραμόρφωσης. Η μελέτη τους είναι περιορισμένη επειδή οι περισσότερες σειсмоγραφικές καταγραφές περιορίζονται σε χερσαίους σταθμούς. Παρατηρήσεις μέσα στη θάλασσα μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για το μήκος της ζώνης ρηγμάτωσης που καθορίζει το μέγεθος των γεγονότων μεγάλης ώσης [1].

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν σημεία αναφοράς του πυθμένα για την παρακολούθηση των κινήσεων του υποθαλάσσιου φλοιού. Τα δεδομένα της παραμόρφωσης συμπληρώνοντας τα αντίστοιχα χερσαία δεδομένα θα συνεισφέρουν σημαντικά στην κατανόηση της φύσης των τεκτονικών διαδικασιών στα όρια των πλακών και της δυναμικής της κίνησης της λιθόσφαιρας.

Το επόμενο μεγάλο βήμα στην κατανόηση του συστήματος γης – ωκεανού, θα απαιτήσει να τοποθετήσουμε ‘αυτιά’ και ‘μάτια’ στον ωκεανό για να παρατηρήσουμε τις δυναμικές διαδικασίες που συμβαίνουν εκεί την ώρα που συμβαίνουν. Στους ωκεανούς φυσικές, χημικές, βιολογικές και γεωλογικές διαδικασίες αλληλεπιδρούν συνεχώς σε χρονικές κλίμακες από δευτερόλεπτα ως εκατομμύρια χρόνια και σε χωρικές κλίμακες από εκατοστά έως όλη τη γη. Η συλλογή σεισμικών, γεωδαιτικών και άλλων γεωφυσικών δεδομένων για παρατεταμένες χρονικές περιόδους θα ήταν ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση και εξήγηση αυτών των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων.

Για την παρακολούθηση της δυναμικής του φλοιού του πυθμένα χρειάζεται η μέτρηση των κατακόρυφων και οριζόντιων παραμορφώσεων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μέτρηση και την εκτίμηση των οριζόντιων παραμορφώσεων.

Για την μέτρηση της οριζόντιας παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται παραμορφωσιόμετρα οπτικών ινών (fiber optic strain meter) για μικρές αποστάσεις $\approx 1\text{km}$ και υποθαλάσσια ακουστικά συστήματα που έχουν χρησιμοποιηθεί για γεωδαιτικές εργασίες ακριβείας του πυθμένα, καλύπτοντας αποστάσεις μεγαλύτερες από 10 km στο νερό [6]. Η χρήση υποθαλάσσιων ακουστικών συστημάτων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και περιγράφεται αναλυτικά πιο κάτω.

1. Ακουστικά συστήματα εντοπισμού

Τα ακουστικά συστήματα εντοπισμού που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικές μετρήσεις ακριβείας είναι τα συστήματα Μεγάλων Γραμμών Βάσης (Long Base Line –LBL). Το LBL σύστημα είναι ένα ακουστικό σύστημα εντοπισμού με βάση ένα δίκτυο του πυθμένα. Οι κορυφές ενός δικτύου υλοποιούνται από έναν αριθμό ποντισμένων πομποδεκτών σε επιλεγμένες θέσεις του πυθμένα. Οι μεταξύ τους αποστάσεις αποτελούν τις γραμμές βάσης που χρησιμοποιούνται από το σύστημα. Ο εξοπλισμός της μονάδας επιφανείας (πλοίο ή πλατφόρμα) αποτελείται από ένα transducer (δέκτης και πομπός) στα ύφαλα του σκάφους που χρησιμοποιείται για την εκπομπή και λήψη των ακουστικών σημάτων και από την μονάδα ελέγχου. Τρεις τουλάχιστον ποντισμένοι πομποδέκτες είναι απαραίτητοι για τον καθορισμό της θέσης στην επιφάνεια και τέσσερις για την διασταύρωση στοιχείων. Με το LBL σύστημα μετριέται ο χρόνος διπλής διαδρομής που χρειάζεται το ακουστικό κύμα για να φτάσει από τον transducer του πλοίου σε κάθε ένα από τους ποντισμένους πομποδέκτες και να επιστρέψει στο πλοίο και με βάση την ταχύτητα του ήχου υπολογίζεται η κεκλιμένη απόσταση. Με γνωστές τις κεκλιμένες αποστάσεις η θέση ενός σημείου προκύπτει σαν τομή 3 ή περισσότερων σφαιρών. Στις συνηθισμένες υποθαλάσσιες γεωδαιτικές εργασίες οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι 10-20kHz που παρέχουν μεγάλη εμβέλεια και ακρίβεια περίπου 1m.

Αν και η παραμόρφωση του φλοιού φτάνει αρκετά μέτρα στην περίπτωση έντονων γεωλογικών γεγονότων - ηφαιστειακών εκρήξεων ή σεισμών - οι μακροχρόνιες σχετικές κινήσεις των πλακών και η επακόλουθη παραμόρφωση του φλοιού κοντά στα όρια της πλάκας είναι της τάξης των μερικών cm /χρόνο[3,5,6,]. Για μετρήσεις αποστάσεων με ακουστικά συστήματα στον πυθμένα είναι επιθυμητή μια ανάλυση καλύτερη από 1cm και μακροχρόνια σταθερότητα και επομένως η ανάλυση των μετρήσεων απόστασης πρέπει να βελτιωθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους.

2. Η ακρίβεια των μετρήσεων με ακουστικά συστήματα

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την μέτρηση αποστάσεων με ακουστικά συστήματα είναι : $S = \frac{1}{2} v t$ όπου:

S : η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ πλοίου – ποντισμένου πομποδέκτη σε m

v : η ταχύτητα του ήχου στη θάλασσα σε m/sec

t : ο μετρημένος χρόνος διπλής διαδρομής μεταξύ πλοίου – ποντισμένου πομποδέκτη σε sec.

Οι δύο παράμετροι που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων είναι η εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου κατά την διάρκεια των μετρήσεων και η ακρίβεια στην μέτρηση του χρόνου διπλής διαδρομής. Τα προβλήματα στην εκτίμηση της

ταχύτητας προέρχονται από την φύση της ταχύτητας του ήχου μέσα στην θαλάσσια στήλη, η οποία αυξάνεται με την θερμοκρασία, πίεση και αλατότητα. Για ακριβείς μετρήσεις, πρέπει οι τρεις αυτές μεταβλητές να μετρώνται στην χρονική περίοδο που πραγματοποιούνται οι ακουστικές μετρήσεις και να γίνεται η αντίστοιχη διόρθωση των δεδομένων.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα του ήχου είναι 3×10^{-6} /millidegree. Η θερμοκρασία του νερού σε μεγάλο βάθος είναι σχεδόν σταθερή και μπορεί να μετρηθεί με ανάλυση καλλίτερη από 0.1millidegree [4]. Ένα πλεονέκτημα της άμεσης μέτρησης των γραμμών βάσης στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ότι δεν παρατηρούνται οι μεγάλες διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ήχου καθ' ύψος της υδάτινης στήλης που έχουμε στις μετρήσεις από το πλοίο, επειδή όλοι οι πομποδέκτες βρίσκονται στο ίδιο περίπου βάθος. Αν η θερμοκρασία καταγράφεται σε 3 σημεία κατά μήκος της γραμμής βάσης η επίδραση της διακύμανσης της θερμοκρασίας πρακτικά μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια.

Η αλατότητα είναι αρκετά σταθερή στην βαθιά θάλασσα και η επίδραση στην ταχύτητα του ήχου είναι περίπου 1×10^{-5} με μια διακύμανση της αλατότητας κατά 0.01per mill, πολύ μικρότερη από την επίδραση της διακύμανσης της θερμοκρασίας.

Η επίδραση της πίεσης είναι περίπου 10^{-5} της ταχύτητας του ήχου για αλλαγή πίεσης 1m της υδάτινης στήλης και είναι εύκολο να υπολογιστεί μετρώντας την πίεση στον πυθμένα [2]. Η επίδραση της πίεσης δημιουργεί ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα στην μέτρηση των οριζόντιων αποστάσεων και περιορίζει το μήκος των γραμμών βάσης λόγω της καμπύλωσης που υφίσταται το ακουστικό σήμα. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για μετρήσεις οριζόντιων αποστάσεων στον πυθμένα επειδή πρέπει να εξασφαλίζεται άμεση διάδοση του ακουστικού κύματος μεταξύ των πομποδεκτών και επομένως είναι απαραίτητο οι πομποδέκτες να τοποθετούνται σε συγκεκριμένα ελάχιστα ύψη πάνω από τον πυθμένα.

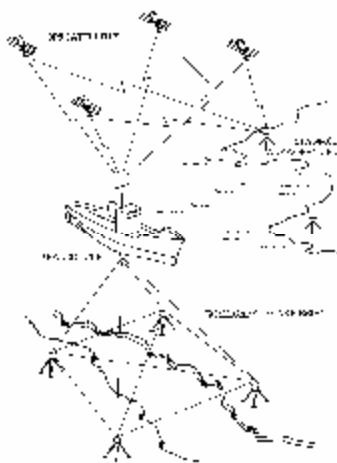
Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων είναι η ακρίβεια στη μέτρηση του χρόνου διπλής διαδρομής και εξαρτάται από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Τα υποθαλάσσια ακουστικά συστήματα κρατούν σαν αρχή του χρόνου, το χρόνο εκπομπής του ακουστικού σήματος και μετρούν τον χρόνο άφιξης των ακουστικών σημάτων από τους ποντισμένους πομποδέκτες (Time Of Arrival – TOA). Η ακρίβεια εκτίμησης του χρόνου άφιξης βελτιώνεται σημαντικά με τεχνικές διαμόρφωσης του παλμού.

3. Εφαρμογή

Η βασική ιδέα είναι η ίδρυση ενός διαχρονικού γεωδαιτικού δικτύου στο πυθμένα παρόμοιο με τα γεωδαιτικά δίκτυα της στεριάς (Σχ.1). Κάθε παραμόρφωση του φλοιού του πυθμένα ανιχνεύεται ως αλλαγή των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου και αλλαγή της εσωτερικής γεωμετρίας του δικτύου. Η παρακολούθηση του δικτύου μέσα στο χρόνο γίνεται με συνδυασμό dGPS – ακουστικών συστημάτων. Το σημαντικότερο στοιχείο των συνδυασμένων τεχνικών dGPS - ακουστικών συστημάτων είναι η δυνατότητα σύνδεσης ενός δικτύου του βυθού με ένα παγκόσμιο σύστημα αναφοράς με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Έτσι επιτυγχάνεται η επέκταση του γεωδαιτικού δικτύου της στεριάς στον υποθαλάσσιο χώρο που επιτρέπει την καταγραφή της συνολικής εικόνας των κινήσεων των πλακών για την καλλίτερη κατανόηση και μελέτη των τεκτονικών διαδικασιών.

Η πρόταση περιλαμβάνει δύο τύπους μετρήσεων. Ο πρώτος αφορά συνδυασμένες τεχνικές dGPS και ακουστικών συστημάτων για να καθοριστούν οι

συντεταγμένες των ποντισμένων πομποδεκτών που αποτελούν τις κορυφές του δικτύου του πυθμένα σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 1. Η βασική ιδέα του συνδυασμένου dGPS – ακουστικού συστήματος. Η διπλή πυραμίδα με κοινή κορυφή το πλοίο ανάμεσα στο δίκτυο πομποδεκτών του πυθμένα και των δορυφόρων dGPS.

Το συνδυασμένο dGPS - ακουστικό σύστημα αποτελείται από τις πολλαπλές αντένες (δέκτες) του GPS συνδεδεμένες σταθερά πάνω σε μια πλατφόρμα (βάση) της οποίας το υποθαλάσσιο τμήμα περιλαμβάνει τον transducer (πομπός-δέκτης) του ακουστικού συστήματος που χρησιμοποιείται για την εκπομπή και την λήψη των ακουστικών σημάτων (αφετηρία των ακουστικών μετρήσεων). Με ακουστικές μετρήσεις από διάφορες θέσεις του πλοίου και σε συνδυασμό με τα δεδομένα του GPS προκύπτουν οι συντεταγμένες του κάθε πομποδέκτη στο σύστημα αναφοράς του GPS. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία απόδοσης συντεταγμένων ανά τακτά χρονικά διαστήματα παρακολουθείται η ‘απόλυτη’ μετακίνηση της κάθε κορυφής του δικτύου στο χρόνο.

Στο δεύτερο τύπο μετρήσεων χρησιμοποιούνται μόνο ακουστικά συστήματα για την άμεση μέτρηση των γραμμών βάσης του δικτύου του πυθμένα. Με βάση αυτές προσδιορίζεται η εσωτερική γεωμετρία του δικτύου. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται από τους πομποδέκτες που έχουν την δυνατότητα να ανακρίνουν ο ένας τον άλλο και να μετρούν τις μεταξύ τους αποστάσεις. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται και στέλνονται με τηλεμετρία στο πλοίο επιφανείας. Με αυτό τον τρόπο παρακολουθούνται οι αλλαγές στην εσωτερική γεωμετρία του δικτύου του πυθμένα ακόμα και καθημερινά.

3.1 Το GPS – ακουστικό σύστημα

3.1.1 Εξοπλισμός του πλοίου

Ιδανικά, τα δεδομένα που συλλέγονται στο πλοίο θα πρέπει να περιλαμβάνουν παρατηρήσεις διπλής και μονής συχνότητας GPS ψευδοαποστάσεων και φέρουσας φάσης που θα καθορίζουν την θέση του πλοίου και την τρισδιάστατη στάση του, ακουστικά σήματα χαμηλής συχνότητας που θα δίνουν χρόνους διπλής διαδρομής μεταξύ του πλοίου και του δικτύου του πυθμένα και άμεσες μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θερμοκρασίας και βάθους μέσα στη θαλάσσια στήλη για να καθοριστεί το προφίλ της ταχύτητας του ήχου. Επιπλέον οι σταθεροί σταθμοί της στεριάς με δέκτες GPS διπλής συχνότητας βοηθούν στην σχεδόν εξ’ολοκλήρου απαλοιφή των σημαντικών σφαλμάτων των μετρήσεων του GPS μέσω της μετάδοσης κατάλληλων διορθώσεων προς το πλοίο. Το πλοίο της επιφανείας είναι

εξοπλισμένο με μια ομάδα αντενών GPS και το ακουστικό σύστημα, που αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και ένα transducer - αφετηρία των ακουστικών μετρήσεων - τοποθετημένο σταθερά στα ύφαλα του σκάφους. Οι εκκεντρότητες μεταξύ του transducer και της ομάδας των αντενών θα πρέπει να έχουν μετρηθεί και καταγραφεί με ακρίβεια κατά την διάρκεια της τοποθέτησής τους.

Η κεντρική αντένα χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τρισδιάστατης θέσης και ταχύτητας του πλοίου επιφανείας με διαφορικές τεχνικές σε σχέση με τους χερσαίους σταθμούς αναφοράς. Η ακρίβεια στον καθορισμό της θέσης εξαρτάται από την απόσταση του πλοίου από τους σταθμούς αναφοράς της στεριάς. Για αποστάσεις μεταξύ 30-50km από την στεριά, η ακρίβεια στον καθορισμό της θέσης είναι της τάξης των 1-2cm [5,9] ενώ για αποστάσεις της τάξης των 100km καλλίτερη από 10cm[7,9].

Για τον καθορισμό της τρισδιάστατης στάσης του πλοίου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα όλων των αντενών GPS. Συνήθως χρησιμοποιούνται 4 αντένες έτσι ώστε να υπάρχει πλεονασμός δεδομένων (redundancy) για την εκτίμηση της στάσης του πλοίου. Για την εκτίμηση της θέσης του transducer στους χρόνους εκπομπής και λήψης των ακουστικών σημάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η επίλυση θέσης που προκύπτει από τις μετρήσεις του GPS αναφέρεται στην αντένα που βρίσκεται αρκετά m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ενώ ο transducer βρίσκεται στα ύφαλα του σκάφους. Επειδή το πλοίο υπόκειται σε συνεχείς κινήσεις (pitch, roll, heading), είναι απαραίτητο να καθορίζεται ο στιγμιαίος προσανατολισμός του διανύσματος transducer - αντένα στο σύστημα αναφοράς WGS 84 (στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις του GPS).

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα ο transducer εκπέμπει ένα κωδικοποιημένο ακουστικό σήμα που λαμβάνεται από τους πομποδέκτες του πυθμένα και μετά από ένα προκαθορισμένο χρόνο καθυστέρησης (delay time) το σήμα επανεκπέμπεται και λαμβάνεται από τον transducer του πλοίου. Συνδυάζοντας το λαμβανόμενο σήμα με το εκπεμπόμενο σήμα και ένα μοντέλο της ταχύτητας του ήχου μετατρέπονται οι χρόνοι διπλής διαδρομής σε απόσταση αφού αφαιρεθεί ο χρόνος καθυστέρησης. Με βάση τις αποστάσεις ως προς έναν ή περισσότερους πομποδέκτες από διάφορες θέσεις του πλοίου, οι συντεταγμένες στις τρεις διαστάσεις κάθε πομποδέκτη καθορίζονται ως η τομή 3 ή περισσότερων σφαιρών με κέντρα τις γνωστές θέσεις του transducer. Για την επίλυση χρησιμοποιείται μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (MET), δίνοντας τα κατάλληλα βάρη στις παρατηρήσεις.

3.1.2 Εξοπλισμός του πυθμένα

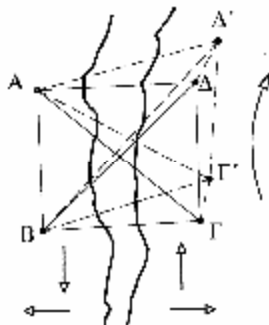
Οι κορυφές του δικτύου του πυθμένα υλοποιούνται με πομποδέκτες σε επιλεγμένες θέσεις. Οι προτεινόμενοι πομποδέκτες είναι εξελεγμένοι γεωδαιτικοί πομποδέκτες ακριβείας (precision interrogator geodetic transponders) που εκτός από την λειτουργία τους σαν απλοί πομποδέκτες έχουν την δυνατότητα να ανακρίνουν άλλους για την ακριβέστερη μέτρηση των γραμμών βάσης. Πρέπει επίσης να είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης και αγωγιμότητας (CTD), για την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στον πυθμένα. Επιπλέον, θα πρέπει να τοποθετηθούν σε σταθερές βάσεις πάνω στον πυθμένα (ocean bottom bases). Οι πομποδέκτες έχουν πρόσθετους αισθητήρες κλίσης, για την ανίχνευση των επιδράσεων της κλίσης της βάσης τους. Τα στοιχεία που συλλέγουν μπορούν να τα αποθηκεύουν και να τα στέλνουν με τηλεμετρία στο πλοίο.

Η βασική επιδίωξη είναι η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή της εσωτερικής γεωμετρίας του δικτύου. Ο καλλίτερος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η άμεση παρακολούθηση των γραμμών βάσης ανάμεσα στους πομποδέκτες

του δικτύου, επειδή κοντά στο πυθμένα και σε μεγάλο βάθος δεν παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ήχου. Τοποθετώντας CTD σε κάθε πομποδέκτη και στα μέσα των γραμμών βάσης, μπορεί να γίνει μια πολύ καλή εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου. Η άμεση μέτρηση των γραμμών βάσης επιπροσθέτως είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα γιατί παρέχει πρόσθετα δεδομένα στην διαδικασία απόδοσης συντεταγμένων στο δίκτυο. Συνδυάζοντας στις επιλύσεις MET τα δεδομένα του dGPS και του ακουστικού δικτύου, αναμένεται μια ακρίβεια στις συντεταγμένες της τάξης των μερικών cm.

Από την άλλη πλευρά, η απαίτηση δυνατότητας άμεσης μέτρησης των γραμμών βάσης θέτει περιορισμούς στο μέγιστο μήκος τους. Λόγω της καμπύλωσης της ακτίνας είναι απαραίτητο οι πομποδέκτες να τοποθετηθούν σε υψηλές κατασκευές έτσι ώστε να έχουν την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους. Αν οι πομποδέκτες τοποθετηθούν εκατέρωθεν ρηγμάτων σε σημεία που έχουν κάποια κλίση προς το ρήγμα δεν θα υπάρχει σοβαρό πρόβλημα, αλλά αν ο πυθμένας είναι επίπεδος τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν σε ύψη περίπου 1.9m για γραμμές βάσης 1.5km και 22m για γραμμές βάσης πάνω από 5km (από πειράματα που έχουν γίνει στο Sagami Bay, Central Japan) [3]. Το ανάγλυφο του πυθμένα είναι καθοριστικό για την έκταση και την μορφή του δικτύου.

Στην εργασία αυτή, το βασικό δίκτυο αποτελείται από 4 πομποδέκτες σε σχήμα τετραγώνου με πλευρά περίπου 1.5km έτσι ώστε οι πομποδέκτες να τοποθετούνται σε σχετικά χαμηλές κατασκευές εκατέρωθεν του ρήγματος (Σχ.3).



Σχήμα 3. Το βασικό δίκτυο του πυθμένα για την παρακολούθηση στροφής, ολίσθησης και απομάκρυνσης δύο γειτονικών πλακών.

Το δίκτυο έχει την δυνατότητα επέκτασης είτε παράλληλα είτε κάθετα με το ρήγμα με την προσθήκη επιπρόσθετων πομποδεκτών, ώστε να παρακολουθείται η παραμόρφωση σε μεγαλύτερο μήκος του ρήγματος ή και στις γεινιάζουσες ζώνες. Τέσσερις πομποδέκτες είναι ο απαραίτητος αριθμός για να υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης απομάκρυνσης, ολίσθησης και στροφής των δύο πλακών εκατέρωθεν του ρήγματος. Επίσης, οι τέσσερις πομποδέκτες παρέχουν την δυνατότητα επιβεβαίωσης των μετρήσεων (redundancy), επειδή παρέχουν επιπλέον δεδομένα από τα ελάχιστα απαιτούμενα. Η ακρίβεια που αναμένεται στην μέτρηση του μήκους των γραμμών βάσης χρησιμοποιώντας precision interrogator geodetic transponders είναι της τάξης του 0.5-1cm [10].

3.2 Η μέθοδος βελτίωσης στις ακουστικές μετρήσεις

Για να βελτιωθεί η ακρίβεια στην μέτρηση του χρόνου άφιξης κατά δύο τάξεις μεγέθους, εφαρμόζεται μια τεχνική συμπίεσης παλμού που παρέχει μεγάλη εκπεμπόμενη ενέργεια με την χρήση ενός παλμού μεγάλης διάρκειας, αλλά

ταυτόχρονα και την ακρίβεια στην εκτίμηση του χρόνου άφιξης ενός παλμού μικρής διάρκειας. Η συμπίεση παλμού μπορεί να γίνει είτε με διαμόρφωση συχνότητας είτε με διαμόρφωση φάσης που συνήθως χρησιμοποιείται στα υποθαλάσσια ακουστικά συστήματα. Σε αυτή την μορφή συμπίεσης παλμού ένας παλμός συνολικής διάρκειας T διαιρείται σε N -υποπαλμούς με χρονική διάρκεια t . Η φάση κάθε υποπαλμού επιλέγεται να είναι είτε 0 είτε π rad. Ο κωδικός της φάσης που χρησιμοποιείται είναι της μορφής ψευδοτυχαίου θορύβου (pseudorandom noise code) λόγω των χαρακτηριστικών του που το κάνουν να μοιάζει με τυχαίο θόρυβο. Μια τεχνική που παρέχει ένα κωδικό ψευδοτυχαίου θορύβου είναι η δημιουργία μιας γραμμικής επαναληπτικής ακολουθίας τάξης n με περίοδο $2^n - 1$ (M-sequence) χρησιμοποιώντας ένα Linear Feedback Shift Register (LFSR), που είναι η καρδιά κάθε ψηφιακού συστήματος που χρησιμοποιεί ψευδοτυχαίες ακολουθίες. Με την χαρτογράφηση της M-sequence σε ένα ακουστικό κύμα και την ανάλογη διαμόρφωση της φάσης επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός κωδικοποιημένου παλμού που αποτελεί τμήμα του συνολικού σήματος που θα σταλεί στον πομποδέκτη. Αυτό το πρώτο τμήμα θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του χρόνου διπλής διαδρομής. Στο συνολικό σήμα περιλαμβάνεται επίσης ο κωδικός ενεργοποίησης του πομποδέκτη και τυχόν άλλες εντολές. Ο πομποδέκτης περιέχει στο κύκλωμά του ένα delay line το οποίο με την αρχή της λήψης του σήματος καταγράφει τα πρώτα msec του λαμβανόμενου σήματος, που περιλαμβάνουν το κωδικοποιημένο σήμα χρονισμού. Με την λήψη ολόκληρου του σήματος, όταν ο πομποδέκτης κάνει την αναγνώριση ενεργοποίησης του, επανεκπέμπει τα περιεχόμενα του delay line [3,4,6]. Το σήμα απάντησης λαμβάνεται από τον transducer του πλοίου και γίνεται η συσχέτιση του (correlation) με ένα αντίγραφο του αρχικού κωδικοποιημένου σήματος που έχει στην μνήμη της η μονάδα ελέγχου. Η διαδικασία συσχέτισης γίνεται με τον εξής τρόπο. Κατά αρχάς το αντίγραφο του αρχικού παλμού διαιρείται στους N -υποπαλμούς και συσχετίζεται ο κάθε υποπαλμός με το λαμβανόμενο σήμα. Μπορούμε να φανταστούμε ότι μετακινούμε χρονικά τον υποπαλμό μέχρι να υπάρχει πλήρης εναρμόνιση με το λαμβανόμενο παλμό. Η χρονική μετατόπιση είναι ο ζητούμενος χρόνος άφιξης. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία συσχέτισης για κάθε υποπαλμό μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση του χρόνου άφιξης.

Η ομάδα του F.N Spiess στη Juan de Fuca στο Βορειοανατολικό Ειρηνικό καθορίζει τον χρόνο άφιξης με ακρίβεια ± 5 msec που αντιστοιχεί σε 4mm σε απόσταση [6]. Η ομάδα του H. Fujimoto στο Sagami Bay επιτυγχάνει μια ακρίβεια της τάξης 0.1msec αντίστοιχη με 7.5cm [2].

Επίσης θα πρέπει να γίνει μια διόρθωση για την διάθλαση της ακουστικής ακτίνας. Λόγω της διακύμανσης της ταχύτητας του ήχου, η ακουστική ακτίνα δεν είναι ευθεία αλλά καμπύλη και οι μετρημένοι χρόνοι διπλής διαδρομής αναφέρονται σε αυτήν. Χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ray tracing με βάση τα δεδομένα της ταχύτητας του ήχου στην περιοχή σε διάφορα βάθη που συλλέγονται κατά την διάρκεια των μετρήσεων, οι μετρημένοι χρόνοι διπλής διαδρομής ανάγονται σε κεκλιμένες αποστάσεις. Για εφαρμογές ακριβείας ιδανική θα ήταν η χρήση ενός σφαιρικού στρωματοποιημένου μοντέλου του ωκεανού που παρέχει καλλίτερη χωρική ανάλυση της ταχύτητας του ήχου.

3.3 Η υλοποίηση και λειτουργία του δικτύου

Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή της θέσης ίδρυσης του δικτύου με βάση τα γεωφυσικά και σεισμικά δεδομένα που θα υποδειχθεί από σεισμολόγους και επιστήμονες που ασχολούνται με την μελέτη των τεκτονικών κινήσεων.

Ακολουθεί μια αρχική χαρτογράφηση του πυθμένα με σόναρ έτσι ώστε να ανιχνευτούν τοπικές εξάρσεις του ανάγλυφου του πυθμένα και οι κλίσεις. Με αυτά τα στοιχεία επιλέγονται οι θέσεις των πομποδεκτών που θα εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ τους. Κατόπιν οι πομποδέκτες ποντίζονται στις επιλεγμένες θέσεις και γίνεται η πρώτη απόδοση των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου στο σύστημα αναφοράς με συνδυασμό μετρήσεων dGPS-ακουστικών συστημάτων. Χρειάζεται προσοχή ώστε οι διαφορετικοί τύποι δεδομένων να συλλέγονται ταυτόχρονα για χρονικές περιόδους αρκετά μεγάλες ώστε να επιτρέψουν την πλήρη αξιοποίηση των ακουστικών δεδομένων. Μετά τη συλλογή όλων των δεδομένων χρειάζονται αρκετά βήματα επεξεργασίας με τελικό στάδιο την εφαρμογή μιας τεχνικής εκτίμησης (MET) για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των πομποδεκτών.

Μετά την πρώτη απόδοση των συντεταγμένων του δικτύου, η συνήθης λειτουργία του συστήματος είναι η παρακολούθηση της εσωτερικής γεωμετρίας του δικτύου, που είναι μια αρκετά πιο απλή διαδικασία μικρού σχετικά κόστους. Οι πομποδέκτες είναι προγραμματισμένοι έτσι ώστε να εκτελούν άμεσες μετρήσεις των γραμμών βάσης του δικτύου ακόμα και σε καθημερινή βάση. Αυτά τα δεδομένα καθώς και τα στοιχεία από τα CTD παραμένουν στη μνήμη των πομποδεκτών που έχει αρκετή χωρητικότητα για αποθήκευση δεδομένων μέχρι και 6 μήνες. Σε τακτά χρονικά διαστήματα το πλοίο επισκέπτεται την περιοχή και στέλνει μια εντολή στους πομποδέκτες ώστε να μεταδώσουν με τηλεμετρία τα δεδομένα στο πλοίο, στα οποία κατόπιν γίνεται επεξεργασία και καθορισμός της εσωτερικής γεωμετρίας του δικτύου. Μια αλλαγή στη γεωμετρία του δικτύου σημαίνει σχετική κίνηση γειτονικών πλακών στην περιοχή του ρήγματος.

Η 'απόλυτη' κίνηση των πλακών μπορεί να εξαχθεί με την επανάληψη της διαδικασίας απόδοσης των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου στο σύστημα αναφοράς με dGPS-ακουστικά συστήματα και συγκρίνοντας τις νέες με τις αρχικές συντεταγμένες όποτε αυτό θεωρείται απαραίτητο (π.χ. όταν άλλες δορυφορικές μετρήσεις στην ξηρά ανιχνεύουν μια μετρήσιμη παραμόρφωση του φλοιού, όταν διαπιστώνεται μια σημαντική αλλαγή στη γεωμετρία του δικτύου στο πυθμένα ή όταν υπάρχει μια τεκτονική δραστηριότητα στην περιοχή που ανησυχεί τους αντίστοιχους επιστήμονες).

Η διάρκεια ζωής των μπαταριών ενός precision interrogator geodetic transponder είναι περίπου 7 χρόνια [10]. Το κόστος κάθε πομποδέκτη είναι της τάξης των 15.000-20.000\$ και το κόστος του ακουστικού εξοπλισμού του πλοίου (μονάδα ελέγχου και transducer) περίπου 25.000-30.000\$.

4. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Σε αυτή την εργασία προτείνεται ένας συνδυασμός τεχνικών dGPS-ακουστικών συστημάτων για την ίδρυση ενός υποθαλάσσιου δικτύου που παρέχει την δυνατότητα επέκτασης μέσα στη θάλασσα του χερσαίου δικτύου παρακολούθησης της παραμόρφωσης του φλοιού, έτσι ώστε να βοηθήσει στην κατανόηση της φύσης των τεκτονικών διαδικασιών κοντά στα όρια των πλακών.

Η δημιουργία ενός υποθαλάσσιου συστήματος παρακολούθησης της οριζόντιας παραμόρφωσης του φλοιού στην περιοχή του Ελληνικού Τόξου και των ρηγμάτων του Αιγαίου, σε συνδυασμό με σεισμολογικούς και άλλους γεωφυσικούς αισθητήρες, θα ήταν πολύ σημαντική για την κατανόηση των κινήσεων που συμβαίνουν στην περιοχή. Ένα τέτοιο σύστημα παρακολούθησης θα μπορούσε να προσφέρει μια συνεχή ροή πληροφοριών γεφυρώνοντας τα κενά στη συλλογή των

δεδομένων των χερσαίων σταθμών παρακολούθησης και επιτρέποντας μια συνολική εικόνα των οριζόντιων κινήσεων του φλοιού από τα ανατολικά όρια του Αιγαίου έως το Ιόνιο. Θεωρούμε ότι στη χώρα μας, λόγω της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας – υποθαλάσσιας σε μεγάλο βαθμό – και με δεδομένο το όχι ιδιαίτερα υψηλό κόστος της προτεινόμενης λύσης, θα πρέπει να δοθεί μεγάλο βάρος στο τομέα έρευνας και εξέλιξης τέτοιων συστημάτων.

5. Βιβλιογραφία

1. www.geo.prose.com/cabled_wksp/pdfs/geodynamics_wg_rpt.pdf
Earth Structure and Dynamics of Ocean Lithosphere.
2. Hiromi Fujimoto, et al. 'Development of instruments for seafloor geodesy' Earth Planets Space, 1998, 50, (pp. 905-911).
3. Fujimoto H., et al. 'Installation of Ocean Bottom Bases for Observation of Seafloor Crustal Movement', Marine Geodesy, 1990, Vol.14 (pp.177-184).
4. Koichiro Obana, et al. 'Seafloor positioning with GPS-acoustic link for crustal dynamics observation – a preliminary result from experiments in the sea' Earth Planets Space, 2000, 52, (pp.415-423).
5. Yukihiro Osada, Hiromi Fujimoto, Satoshi Miura et al. 'Estimation and correction for the effect of sound velocity variation on GPS/Acoustic seafloor positioning: An experiment off Hawaii Island', Earth Planets Space, 2003, Vol. 55, (pp. 17-20).
6. Fred N. Spiess, David Chadwell et al. 'Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1998, Vol.108, (pp. 101-112).
7. Dr. Oscar L. Colombo, Dr. Alan G. Evans 'Tests of Decimeter-Level, Differential GPS Navigation a Long Distance Away from any Reference Station, with Implications for Very Accurate Positioning at Sea' (pp.720-727).
8. Gang Lu 'Attitude Determination Using A Multi-Antenna GPS System for Hydrographic Applications'. Thesis
9. Oscar L. Colombo, Alan G. Evans 'Speeding Up The Estimation Of Floated Ambiguities For Sub-Decimeter Kinematic Positioning At Sea'. Proceedings ION GPS-2000, Salt Lake City, September 2000
10. <http://www.link-Quest.com>

Extrapolation techniques for the solution of the wave equation in time domain using implicit schemes

Anastassios Skarlatos¹
TU Darmstadt
skarlatos@temf.de

Markus Clemens
Helmut-Schmidt-Universität
Markus.Clemens@hsu-hh.de

Thomas Weiland
TU Darmstadt
weiland@temf.de

ABSTRACT

In this paper we examine the application of different extrapolation strategies for the construction of starting values in implicit stepping schemes used for the solution of the wave equation. The implicit formulation of such problems implies the solution of a system of linear equations in each timestep. The choice of a good start value for the solver of the equation system can yield a faster convergence of the solver, and hence reduce the total simulation time.

Introduction

The numeric simulation of elastic, acoustic or electromagnetic problems implies the solution of the wave equation in frequency (FD) or in time domain (TD). The discretization of the spatial operator of the wave equation in TD using volume discretization techniques, like the Finite Elements Method (FEM) [1], or the Finite Integration Technique (FIT) [2] leads to a system of ordinary differential equations, which describes the temporal behaviour of the field. The discretization of the time derivatives delivers a system of algebraic equations that has to be solved in each timestep. In case of FIT the system matrix is symmetric, positive definite, and can be efficiently solved using Preconditioned Conjugate Gradient method (PCG). The choice of a “good” starting value for such solvers is important for the overall efficiency of the scheme since it can reduce the time needed for the solution of the equation system. This start value can be constructed by extrapolating the solution obtained in the previous timesteps to the current timestep. In this paper a number of different extrapolation techniques for the construction of start values is examined. The presented techniques are tested in two important cases of electromagnetic problems, namely the resonator and the scattering problem, and they are compared in terms of the solver speed-up they achieve.

1. Discretization of the wave equation

The discrete form of the wave equation obtain using FEM, or the FIT, has the general form

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \mathbf{D} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}, \quad (1)$$

¹ A. Skarlatos is supported by the graduate student program “Modelierung, Simulation und Optimierung in Ingenieurwissenschaften” of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under grant GK-GRK 853.

where \mathbf{x} is the unknown field, \mathbf{M}, \mathbf{D} are the “mass” and “dissipation” matrices respectively, \mathbf{K} is the so-called “stiffness” matrix which describes the topological properties of the operator, and \mathbf{f} is the excitation term. Using the FIT discretization scheme the first two matrices are of diagonal form, which is not the case in other techniques (e.g. FEM). Discretization of the time derivatives using the Newmark-beta scheme [3] leads to the following system of equations

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M} + g\Delta t\mathbf{D} + b\Delta t^2\mathbf{K})\mathbf{x}^{(n+1)} = -(2\mathbf{M} + (1-2g)\Delta t\mathbf{D} + \\ & (0.5-2b+g)\Delta t^2\mathbf{K})\mathbf{x}^{(n)} + (\mathbf{M} + (1-g)\Delta t\mathbf{D} + (0.5+b-g)\Delta t^2\mathbf{K})\mathbf{x}^{(n-1)} \\ & + \Delta t^2\mathbf{f}^{(n)}, \end{aligned} \quad (2)$$

where b, g are discretization parameters. For an unconditionally stable scheme it must $b \geq 0.25$. The condition $g = 0.5$ guaranties the conservation of the discrete energy, i.e. no numerical dumping is introduced to the problem.

2. Extrapolation Strategies

The task of the extrapolation techniques is to use the information obtain from the solution of the system in the previous timesteps to construct “good” approximations for the solution in the current timestep. This can be done in different ways.

2.1 Taylor expansion

The usual way to extrapolate a time varying function is through the Taylor series expansion

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{x}^{(n)} + \Delta t \frac{d}{dt} \mathbf{x}^{(n)} + \Delta t^2 \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}^{(n)} + \mathbf{K}. \quad (3)$$

Keeping only the first orders of the series, we can construct an approximation for the function in the $n+1$ timestep. For example keeping the first two terms we get a 1st order approximation

$$\mathbf{x}^{(n+1)} \approx \mathbf{x}^{(n)} + \Delta t \frac{d}{dt} \mathbf{x}^{(n)}, \quad (4)$$

The time derivatives can be approximated using finite differences schemes, e.g. the first derivative will be given by

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}^{(n)} \approx \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} \mathbf{x}^{(n)} - 2\mathbf{x}^{(n-1)} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^{(n-2)} \right), \quad (5)$$

We would expect that the more terms that are taken into account, the better accuracy for the approximation we get. This is however not always the case, due to the numerical error that is introduced in our approximation. The influence of error to

the different orders of approximation is not known a-priory. A rather efficient way to overcome this problem is to combine the different approximations obtained by different orders of expansion, in order to get an optimal estimation for the start value. This is the main idea behind the Subspace Projection Extrapolation (SPE) technique [4].

2.2 The Subspace Projection Extrapolation (SPE) scheme

Consider the start vectors $\mathbf{x}_i^{(n+1)}$, $i = 1, \mathbf{K}, m$ obtained by different orders of Taylor expansion. Normalizing these vectors using a modified Gram-Schmidt orthonormalization process we get the set of orthonormal vectors $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{K}, \mathbf{v}_m$ which define a subspace of dimension m . We define the projection operator

$$\mathbf{V} := \{\mathbf{v}_i | \mathbf{K} | \mathbf{v}_m\} \in \mathbb{R}^{N \times m}, \quad (6)$$

where N is the size of the problem. The original problem is then projected and solved on the constructed subspace

$$\mathbf{V}^T \mathbf{A} \mathbf{V} \mathbf{z} = \mathbf{V}^T \mathbf{q}, \quad (7)$$

where \mathbf{A} is the Newmark system matrix and \mathbf{q} the excitation vector. The timestep index is omitted. This system now can be solved without a serious overhead since the dimension of the subspace is small. The solution of the reduced order problem is then extracted back into the original domain and the extracted vector is considered as start value for the original problem

$$\mathbf{x}_{0,SPE} = \mathbf{V} \mathbf{z}, \quad (8)$$

2.3 Diagonal Extraction Approximation

Let us return to the Newmark system of equations

$$(\mathbf{M} + g\Delta t \mathbf{D} + b\Delta t^2 \mathbf{K}) \mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{q}^{(n+1)}. \quad (9)$$

Bringing the non-diagonal term of the system matrix in the right hand side (rhs), (9) yields

$$(\mathbf{M} + g\Delta t \mathbf{D}) \mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{q}^{(n+1)} - b\Delta t^2 \mathbf{K} \mathbf{x}^{(n+1)}, \quad (10)$$

and approximating the field on the rhs with Taylor 0 we get

$$(\mathbf{M} + g\Delta t \mathbf{D}) \mathbf{x}^{(n+1)} \approx \mathbf{q}^{(n+1)} - b\Delta t^2 \mathbf{K} \mathbf{x}^{(n)}. \quad (11)$$

The system in (11) is diagonal and it can thus be solved without significant computational effort. The solution of (11) is then set as initial approximation to (9).

2.4 Projection of the rhs

The solution of the system is actually equivalent of applying the inverse matrix on the excitation vector. If we could therefore express the rhs vector as a linear combination of vectors, for which the solution is already known, we could obtain a good approximation to the unknown field. Let us consider once again the equation system arising from the Newmark formulation

$$\mathbf{A}\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{q}^{(n+1)}, \quad (12)$$

which can be written in the following way

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}^{(n+1)}. \quad (13)$$

Normalizing the excitation vector we get

$$\frac{\mathbf{x}^{(n+1)}}{\|\mathbf{q}^{(n+1)}\|} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{v}_1. \quad (14)$$

\mathbf{v}_1 is the normalized rhs vector. The excitation vector in the next timestep can be written

$$\mathbf{q}^{(n+2)} = a_1\mathbf{v}_1 + \mathbf{r}_1, \quad (15)$$

and the solution for this timestep will be

$$\mathbf{x}^{(n+2)} = a_1\mathbf{A}^{-1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{r}_1. \quad (16)$$

The vector $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{v}_1$ is already known from the previous timestep and $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{r}_1$ is the unknown residual term. The field can be approximated keeping the first (known) term, and this approximation is used as start value for the solver. Solving the system, we can evaluate the residual (unknown) term and construct the new basis vector

$$\mathbf{v}_2 = \frac{\mathbf{q}^{(n+2)} - a_1\mathbf{v}_1}{\|\mathbf{q}^{(n+2)} - a_1\mathbf{v}_1\|}. \quad (17)$$

Continuing this process, which is actually a kind of Gram-Schmidt orthonormalization process, we can expand the constructed subspace by one dimension each time. From numerical experimentation it turns out that the basis vectors can provide a good description of the excitation vector (and subsequently of the solution) only in the proximity of the point where the construction began. The more far we get from that point, the more uncorrelated our solution becomes from the basis vectors of the subspace. The whole process has therefore to be restarted after a number of timesteps, the number of which is estimated after experimentation.

3. Results

The presented techniques are tested in two examples taken from the electromagnetics. As first example we consider the lossy resonator of Fig. 1a. The resonator has rectangular shape and contains two dielectric cylinders, one with $\epsilon_r = 15$ and radius 1 cm, and the second with $\epsilon_r = 3$ and radius 10 cm. The second cylinder has a conductivity of $k = 0.08$ S/m. The choice of the material parameter was made in such a way, to get a system of relatively bad condition. Each side of the resonator is 1 m, so the first resonance is located at 210 MHz. The structure is excited by a small dipole located at the point (0.233, 0.233, 0.489). The excitation signal is a modulated Gaussian pulse with bandwidth 150 MHz. In the second example we examine the scattering from a dielectric cylinder with $\epsilon_r = 10$ and radius 15 cm. The geometry of the problem is shown in Fig. 1b. The field is produced by an infinite electric line (TM case). The excitation pulse has bandwidth 400 MHz. The truncation of the computational domain is achieved by applying a Perfectly Matching Layer on the boundary [5].

Both problems were solved with the PCG applying the presented extrapolation schemes. The total number of iterations as well as the solution time needed for each case are compared in table 3.1. The convergence of the solver in the different timesteps is illustrated in Fig. 2 for both problems. We notice that the SPE and the rhs projection schemes provide a clear decrease of the iteration number and subsequently a significant speed-up for the solver.

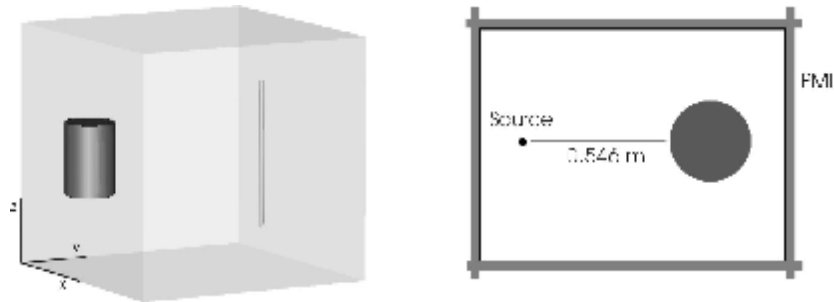


Fig.1. Eximamples: a) Lossy Resonator b) Scattering from dielectric cylinder

Table 3.1 Comparison of the different extrapolation schemes

Extrapolation Scheme	Resonator Problem		Scattering Problem	
	Iterations	Time (s)	Iterations	Time (s)
Taylor 0	50,109	13,349	21,930	6,077
SPE	31,689	8,703	17,611	5,184
Matrix Splitting	39,000	10,640	19,798	5,861
Rhs Projection	27,936	8,272	12,740	4,054

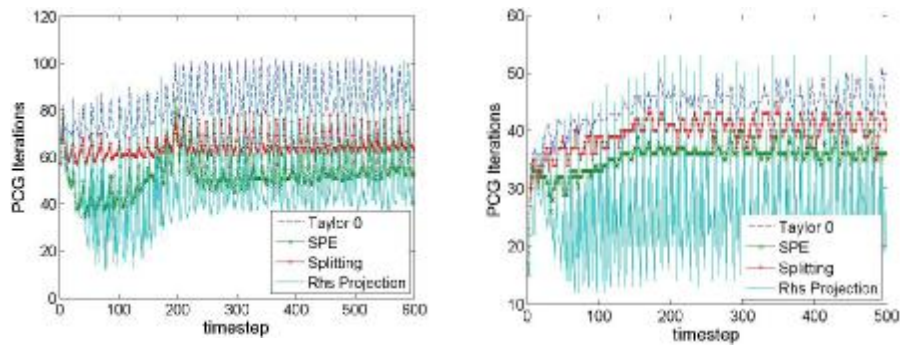


Fig. 2. Solver convergence with the different extrapolation schemes: a) Resonator Problem b) Scattering Problem

4. Conclusions

In this paper a number of different extrapolation techniques for the construction of start values for implicit time stepping schemes was examined. Even if implicit formulations can be considered as computationally expensive, the solution can be accelerated by providing good start values to the solver. This can be very useful in cases where no explicit solution is available.

5. References

- [1] Volakis, J.L., Chatterjee, A., Kempel, L.C. "Finite Elements in Electromagnetics", Wiley, New York, 1993.
- [2] Weiland, T., "Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods" Int. J. Num. Mod. 1996, vol. 9, pp. 259-319.
- [3] Edelvik, F., Ledfelt, G., Lötstedt, P., and Riley, D. J. "An unconditionally stable subcell model for arbitrarily oriented thin wires in the FETD method" IEEE Trans. on Antennas and Propagat., 2003, vol. 51, pp. 1797-1805.
- [4] Clemens, M., Wilke, M., and Weiland, T., "Subspace projection extrapolation scheme for transient field simulations" IEEE Trans. Magn., 2004, vol. 40, pp. 934-937.
- [5] Jiao, D., and Jin, J. M, "An effective algorithm for implementing perfectly matched layers in time-domain finite element simulation of open-region EM problems" IEEE Trans. on Antennas and Propagat., 2000, vol. 48, pp. 1615-1623.

High-order discontinuous-Galerkin discretizations for computational aeroacoustics in complex domains

Ioannis Touloupoulos
toulio@iacm.forth.gr
Graduate student

John A. Ekaterinaris
ekaterin@iacm.forth.gr
Associate Fellow, AIAA.

FORTH/IACM, P.O. Box 1527
71110 Heraklion, Crete, Greece

Copyright © 2004 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
All rights reserved.

Abstract

Discontinuous Galerkin discretization was applied for the numerical solution of the linearized Euler equations governing propagation of small amplitude acoustic disturbances. Second- and fourth-order accurate numerical solutions were obtained for domain discretizations with triangular elements. Results for a pressure pulse propagation and reflection from a solid surface are presented and compared with the exact solution. It is demonstrated that the numerical solutions show grid convergence according to the order of accuracy used for the discretization. The versatility of the method to obtain accurate predictions in complex geometries is demonstrated with the results obtained for sound scattering from a single cylinder surface.

1. Introduction

The discontinuous Galerkin (DG) method was applied for the numerical solution of the linearized Euler equations that describe sound propagation in Computational aeroacoustics (CAA). The main advantage of using the linearized Euler equations in practical calculations is computational efficiency. The intensity of sound sources and impulsive noise may be captured only with the numerical solutions of the computationally intensive, fully nonlinear viscous, compressible flow equations. However, propagation of the generated acoustic waves away from the source may be accurately obtained from the linearized Euler equations. On the other hand, the linearized Euler equations, from a numerical point of view, encompass many essential features of the inviscid flow governing equations. Therefore development of the DG method for the full Euler equations is greatly facilitated.

CAA require high-order accurate in space and time discretizations. In the last few years, finite-difference methods¹⁻⁴ found widespread application in CAA. These methods were applied in simple Cartesian-type domains and more complex domains through the use of generalized coordinate transformations. For highly accurate computations in three dimensions, extreme caution is required for the computation of metric quantities⁵ that appear in the generalized coordinate transformations in order to preserve the high-order of spatial accuracy provided by finite-differences. Application of boundary conditions that guarantee the overall high order of accuracy of the method for body-fitted curvilinear meshes is far from trivial.⁶ Use of multiblock discretizations of complex domains often results into grid singularities⁷ that require special treatment in order to preserve the high order of accuracy needed in CAA calculations. On the other hand, domain decomposition⁵ often used for

parallelization requires overlap in order to ensure that the high-order accuracy of the interior scheme is retained at the interfaces of the domains.

Subsonic flow numerical solutions with central-difference schemes require some form of numerical smoothing to suppress growth of spurious solutions due to unresolvable and parasitic modes, non-linear interactions and inaccuracies in boundary conditions. Explicit filtering⁸ of the computed solutions with spectral-type filters^{1,8} was used in order to overcome these difficulties. Application of these filters is often necessary for complex domain CAA computations with the linearized equations to suppress oscillations from computational boundaries, parasitic modes, and insufficient spatial resolution. Application of spectral-type filters for complex geometry multi-domain computations is not straightforward.

CAA computations for high-speed flows with discontinuities⁴ require use of shock capturing methods. For these cases the finite-difference weighed essentially non-oscillatory (WENO) schemes⁹⁻¹¹ appear to be an attractive candidate. WENO schemes include, however, a diffusive part, which for high-order WENO approximations is very low. Therefore, applicability of WENO finite-difference methods to highly accurate CAA computations must be carefully evaluated.³ It was shown¹² that high-order (seventh or higher) WENO schemes have satisfactory performance in aeroacoustics.

Unstructured grid methods¹³⁻¹⁵ that overcome some problems associated with discretizations of complex domains can also be used in CAA. Preservation of high order accuracy in finite volume methods¹³ is computationally intensive. The recently proposed spectral volume method¹⁵ and the discontinuous Galerkin (DG) method¹⁴ overcome the shortcomings of high-order finite volume methods. The DG method appears to offer certain advantages over the spectral volume method because it is highly local, easy to parallelize, and possible to extend for viscous flow computations.¹⁶ Furthermore, the DG method is suitable high-order accurate discretizations of complex domains with triangular or quadrilateral elements and can preserve high order of accuracy in distorted meshes and meshes with hanging nodes that may result from local grid refinement.¹⁷ The systematic study of Ref. 18, concluded that anisotropic grids offer an advantage for wave propagation

In this work application of the DG finite element method to linear CAA, which is a simple multidimensional example of hyperbolic conservation laws, is demonstrated. High-order polynomial representations of the approximate solution within the elements (up to third order) are used. The accuracy of the DG method is demonstrated for triangular discretizations. This paper is organized as follows. The governing equations and the DG method for their spatial discretization and the boundary conditions are presented first. Sufficient implementation details for the numerical approximation of various terms in the mathematical formulation are given..

2. Governing Equations

The two-dimensional linearized Euler equations governing propagation of small-amplitude acoustic-type disturbances are

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S$$

$$q = \begin{bmatrix} u \\ \mathbf{u} \\ p \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} p \\ 0 \\ u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ p \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

where q is the solution variable vector for the acoustic velocities and pressure, F , G are the flux vectors, and $S(x, y)$ is a source term, which usually contains an initial condition of a pressure disturbance $p_o = p_o(x, y)$ or a time varying acoustic pressure excitation of the form $p_o = p_o(x, y) \sin(\omega t)$. The acoustic density R satisfies an equation identical to the equation for the variation of pressure and can be omitted.

3. Temporal Scheme

Time marching of the nonlinear or linearized equations, Eq. (1), can be performed with implicit methods.¹⁹ The third- or fourth-order accurate Runge-Kutta method may also be applied for explicit time marching. For aeroacoustic computations, time accuracy and the diffusion introduced by the numerical method are important for long-time integration. It was shown that a significant increase in performance for long time integration might be obtained with optimized methods.^{20, 21} In this work the total variation diminishing (TVD) Runge-Kutta method of Ref. 22 was used. This method is TVD in the sense that the temporal operator itself does not increase the total variation of the solution. The TVD property of the time integration scheme may not be important for linear problems. It plays however, an important role for time marching of nonlinear hyperbolic problems that use DG space discretizations.

Let $Q_t = R(Q)_e$ be the semi-discrete form of Eq. (1) where R is the spatial discretization for the right hand side operator of Eq. (1) $R = -(F_x + G_y)$, to be discussed in the next section. The third-order accurate TVD Runge-Kutta (RK3) method²² is as follows:

$$Q^{(1)} = Q^n + \Delta t R(Q^{(n)})$$

$$Q^{(2)} = \frac{3}{4}Q^n + \frac{1}{4}Q^{(1)} + \frac{1}{4}\Delta t R(Q^{(1)}) \quad (2)$$

$$Q^{n+1} = \frac{1}{3}Q^n + \frac{2}{3}Q^{(2)} + \frac{2}{3}\Delta t R(Q^{(2)})$$

4. Space Discretization

The DG method is briefly described in this section. Further information and more details can be found in the original references^{23, 24, 25} and the review articles of Ref. 14. For each time $t \in [0, T]$ the approximate solution, q_h , of the governing

equations in conservation law form, $\nabla \cdot \mathbf{q} + \text{div} \mathbf{F}(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$, is sought in the finite element space of discontinuous functions V_h

$$V_h = \{ \mathbf{u}_h \in L^\infty(W) : \mathbf{u}_h|_K \in V(K), \forall K \in \mathcal{T}_h \} \quad (3)$$

where \mathcal{T}_h is a discretization of the domain W using triangular or quadrilateral elements and $V(K)$ is the local space that contains the collection of polynomials up to degree k . The weak formulation of the governing equations is

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_K q(x,t) u(x) dx = \\ - \sum_{e \in \partial K} \int_e F(q(x,t)) \cdot \mathbf{n}_{e,K} u(x) d\Gamma \\ + \int_K F(q(x,t)) \cdot \nabla(u(x)) dx \end{aligned} \quad (4)$$

where $u(x)$ is any sufficiently smooth function and $\mathbf{n}_{e,K}$ denotes the outward, unit normal to the face or edge e .

The stiffness matrix integral at the left hand side of Eq. (4) is evaluated numerically using Gauss-Radau integration rules. The integrals on the right hand side of Eq. (4) are evaluated using quadrature rules as follows:

$$\begin{aligned} \int_e F(q(x,t)) \cdot \mathbf{n}_{e,K} u(x) d\Gamma \\ \approx \sum_{l=1}^L y_l F(q(x_{el},t)) \cdot \mathbf{n}_{e,K} u(x_{el}) |e| \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \int_K F(q(x,t)) \cdot \nabla(u(x)) dx \\ \approx \sum_{j=1}^J w_j F(q(x_{Kj},t)) \cdot \nabla(u(x_{Kj})) |K| \end{aligned} \quad (6)$$

The line integrals of Eq. (5) are computed using appropriate high order Gaussian quadrature. For example, for a third-order polynomial basis a quadrature rule that integrates exactly at least sixth-order polynomial is used.

The data are assumed discontinuous across the interfaces of the continuous domain and at each interface two values are available. Therefore, the flux $F(q(x,t)) \cdot \mathbf{n}_{e,K} v(x)$ is replaced by a suitable numerical flux $\hat{F}_{e,K}^{\%}(x,t)$ for the approximate solution q_h and the test function $u_h \in V(K)$. Using $\hat{F}_{e,K}^{\%}(x,t)$ in Eqs. (4) and (5) the approximate solution q_h is given by

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \int_K q_h(x,t) \mathbf{u}_h(x) dx = \\
& + \sum_{j=1}^J w_j F(q_h(x_{K_j}, t)) \cdot \nabla(\mathbf{u}_h(x_{K_j})) |K| \\
& - \sum_{e \in \partial K} \sum_{l=1}^L y_l \mathcal{F}_{e,K}^{\%}(x_{el}, t) \mathbf{u}_h(x_{el}) |e|, \\
& \forall \mathbf{u}_h \in V(K), \quad \forall K \in T_h
\end{aligned} \tag{7}$$

where time advancement of Eq. (7) is performed with the third order accurate Runge-Kutta method.

The major difference of the GD formulation with a standard node-based Galerkin finite element method is that the expansion in each element is local without any continuity across the element boundaries. The value of the numerical flux $\mathcal{F}_{e,K}^{\%}(x,t)$ at the edge of the boundary of the element K depends on two values of the approximate solution, one from the interior (right) of the element K , $q^R = q_h(x^{\text{int}(K)}, t)$, and the other from the exterior (left) of the element K , $q^L = q_h(x^{\text{ext}(K)}, t)$. Any consistent, conservative exact or approximate Riemman solver can be used to obtain the numerical flux $\mathcal{F}_{e,K}^{\%}(q(x^{\text{int}(k)}), q(x^{\text{ext}(k)}))$ as follows

$$\begin{aligned}
& \mathcal{F}_{e,K}^{\%}(q^L, q^R) = \\
& = \frac{1}{2} \left[F(q^L) \cdot \mathbf{n}_{e,K} + F(q^R) \cdot \mathbf{n}_{e,K} \right] - F^*(q^L, q^R)
\end{aligned} \tag{8}$$

where $F^*(q^L, q^R)$ is the dissipative part of the numerical flux. The computationally efficient local Lax-Friedrichs flux is used. F . The flux is split as $F = F^+ + F^-$ where $F^\pm = F + \mathbf{a}q$ where $\mathbf{a} = \mathbf{l}$ and \mathbf{l} is the maximum eigenvalue of the flux Jacobian. For the linearized Euler equations the eigenvalues are constant and the derivatives are continuous for the nonlinear case, however, in order to obtain continuous higher derivatives $\mathbf{a} = \sqrt{\mathbf{e}^2 + \mathbf{l}^2}$ with $\mathbf{e} = 0.05$.

4.1 Boundary conditions

The following boundary conditions were used for the aeroacoustic computations. At the solid wall or the symmetry line a fictitious cell was used. The value of the velocity was specified so that the normal to the wall flux is zero and the velocity is tangent to the surface. The condition of zero velocity components normal to the surface $\mathbf{u} \cdot \mathbf{g} = 0$, combined with the first and second of Eqs. (1), implies that $\nabla p \cdot \mathbf{g} = 0$, where \mathbf{n} is the outward normal to the surface vector. The solid wall boundary condition is shown schematically in Fig. 1.

At the outflow boundaries the following radiation boundary condition²⁶ was used.

$$\left[\frac{1}{V_r} \frac{\partial}{\partial t} + \cos J \frac{\partial}{\partial x} + \sin J \frac{\partial}{\partial y} + \frac{1}{2r} \right] \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

where $V_r = \cos J u + \sin J v$, r is the distance from the source $r = [(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2]^{1/2}$, and J is the angle between the horizontal and the line between the boundary point and the source. The implementation of the radiation boundary condition is similar to the wall boundary condition implementation with the difference that the values of the variables in the fictitious cell are obtained from the radiation boundary condition of Eq. (9).

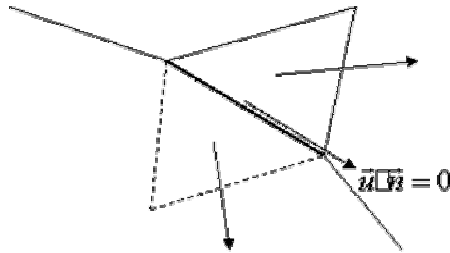


Fig. 1. Solid wall boundary condition

4.2 Polynomial basis functions

The order of accuracy of the DG method is at least $n + 1/2$ if polynomials of degree at most n are used as basis functions. Furthermore, it was shown that for linear problems that for Cartesian grids and semi-uniform triangular grids the order of accuracy is $(n + 1)$. For simplicity in the rest of this paper, the method is called $(n + 1)$ th order accurate if the basis functions are polynomials of degree at most n . The approximate solution within each element is expanded in a series of local bases functions (polynomials) as follows.

$$q_h(x, y, t) = \sum_{j=1}^J c_j(t) P_j^k(x, y) \quad (10)$$

where $c_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, J$ are expansion coefficients or degrees of freedom for each element, to be computed at each time step, and $P_j^k(x, y)$ are polynomial bases of degree k the most. The following first- and third-order polynomials for the master element were used.

First-order polynomials

$$\begin{aligned} P_1^1 &= 1 - 2y \\ P_2^1 &= 2x + 2y - 1 \\ P_3^1 &= 1 - 2x \end{aligned} \quad (11)$$

Each of these polynomials takes unit value at one node, located in the middle of an edge, and zero value at the other nodes located at the middle of the other edges. The polynomials P_1^1, P_2^1, P_3^1 of Eq. (11) are orthogonal and the mass matrix resulting from the integration at the left hand side of Eq. (4) is diagonal.

third-order polynomials

$$\begin{aligned}
 P_1^3 &= 9x(x^2 - x - 2/9)/2 \\
 P_2^3 &= 9y(y^2 - y - 2/9)/2 \\
 P_3^3 &= 9(1-x-y)(2/3-x-y)(1/3-x-y)/2 \\
 P_4^3 &= 9xy(3x-1)/2 \\
 P_5^3 &= 27xy(y-1/3)/2 \\
 P_6^3 &= 27y(1-x-y)(y-1/3)/2 \\
 P_7^3 &= 27y(1-x-y)(2/3-x-y)/2 \\
 P_8^3 &= 27x(1-x-y)(2/3-x-y)/2 \\
 P_9^3 &= 27x(x-1/3)(1-x-y)/2 \\
 P_{10}^3 &= 27xy(1-x-y)
 \end{aligned} \tag{12}$$

At the reference element, each of these polynomials takes unit value at one of the $1/3$ -distance nodes and zero value at all other nodes. The polynomials P_j^3 , $j = 1, \dots, 10$ of Eq. (12) are nonorthogonal and the mass matrix of Eq. (7) is computed using high-order accurate Gauss-Radau integration

5. Results

Second- and fourth-order accurate numerical solutions are computed using polynomial base functions P^1 and P^3 , respectively. The accuracy of the numerical solutions is evaluated by comparing the computed results with exact solutions.²⁷ The first test problem with an exact solution is propagation and reflection from a solid wall of a Gaussian pressure pulse given by $p(x, y) = \exp\{-\ln 2[x^2 - (y - y_0)^2]/W\}$, where W is the width of the pulse and y_0 is the distance from the wall. The second problem with an exact solution is scattering of a similar Gaussian pressure pulse from the surface of a cylinder.

The solution computed with third-order polynomial basis on a relatively coarse, fully unstructured mesh is shown in Fig. 2. At the far field boundaries the radiation boundary condition of Eq. (9) was used. It can be seen that the pressure waves exit the computational domain undistorted and there are no reflections in the interior from the computational boundaries.

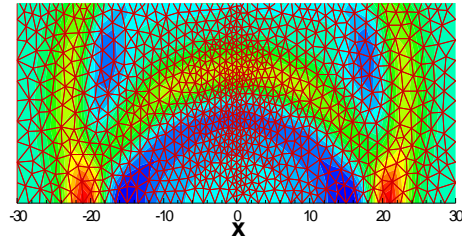


Fig. 2. Fourth-order accurate computed solution on an unstructured mesh

Acoustic disturbance propagation is isotropic and requires use of meshes without pattern. Evaluation of the numerical method is performed, however, on triangular meshes obtained from triangulation of structured Cartesian-type grids. The elements (see Fig. 3) follow a uniform triangular-mesh generating pattern. It was shown in Ref. 18 that the accuracy of the computed solution depends on the triangular-mesh generating pattern. Nevertheless, for fine grid resolution and high order accuracy the bias introduced by the triangular-mesh generating pattern is small. The solutions computed until final time $T = 25$ on triangular meshes with mesh generating pattern (see Fig. 3) are compared with the exact solution given in Ref. 27. The computed pressure field obtained from the second-order accurate solution with $\Delta x = 1.0$ is shown in Fig. 3. A comparison of the solutions computed with different grid spacing $\Delta x = 0.5, 1.0, \text{ and } 2.0$ is shown in Fig. 4. The same time step $\Delta t = 0.01$, which is below the stability limit of the Runge-Kutta method was used for all solutions. The comparison with the exact result of Ref. 27 is shown along the symmetry line, which is normal to the wall at $x = 0$. For the same location, the relative error $e_r = (p_{com} - p_{ex}) / |p_{ex}|_{\max}$ of the computed solutions is shown in Fig. 5. It appears that for a first-order polynomial basis (2nd-order accurate solution) only the results computed with $\Delta x = 0.5$, provide the accuracy level needed in aeroacoustic computations.

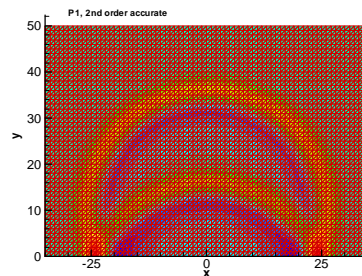


Fig. 3. Computed flow field and mesh used for the second-order accurate (orthogonal P1 polynomial basis) solution until final time $T = 25$.

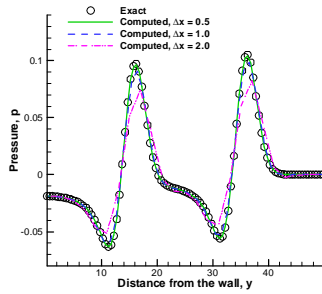


Fig. 4 Comparison with the exact result of the second-order accurate solutions (P1 orthogonal polynomial basis) computed with different grid spacing and final

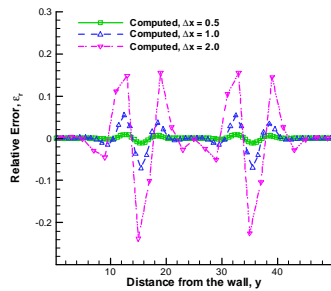


Fig. 5 Relative error of the second-order accurate solutions (P1 polynomial basis) computed with different grid spacing.

Solutions computed with the order complete, third order polynomial basis (4th-order accurate solutions) are presented next. The fourth-order accurate solutions were computed with the same time step $\Delta t = 0.01$ and a sequence of grids. The computed pressure field obtained from the solution with $\Delta x = 1.0$ is shown in Fig. 6. A comparison of the solutions computed with different grid spacing $\Delta x = 1.0, 2.0,$ and 3.0 is shown in Fig. 7. The comparison is shown along the symmetry line, which is normal to the wall at $x = 0$. For the same location the relative error of the computed solutions is shown in Fig. 8. It appears that for fourth-order accuracy the solution computed with $\Delta x = 1.0$ provides the resolution required in aeroacoustic computations.

A comparison of the errors of the second- and fourth-order accurate solutions computed with $\Delta x = 1.0$ is shown in Fig. 9. Finally, in Fig. 10 the grid convergence of the second- and fourth-order accurate solutions is shown. The error norm in Fig. 10 was computed on the symmetry line, where the errors are expected to be the largest, and not for the entire domain. The fourth-order accurate solution practically converges for $Dx ; 1.0$.

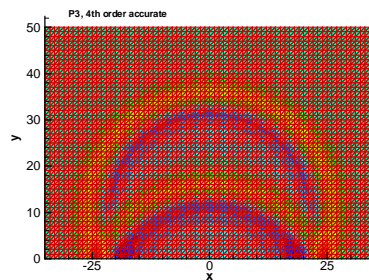


Fig. 6. Computed flow field and mesh used for the fourth-order accurate solution (nonorthogonal P3 polynomial basis) until final time $T = 25$

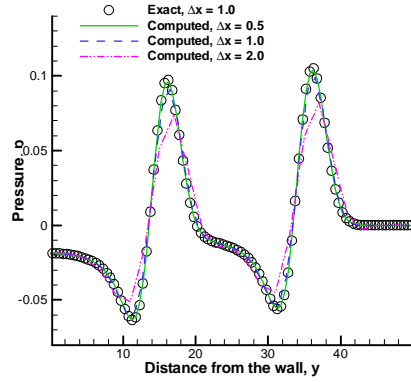


Fig. 7 Comparison with the exact result of the fourth-order accurate solutions (P3 nonorthogonal polynomial basis) computed with different grid spacing and final time $T = 25$.

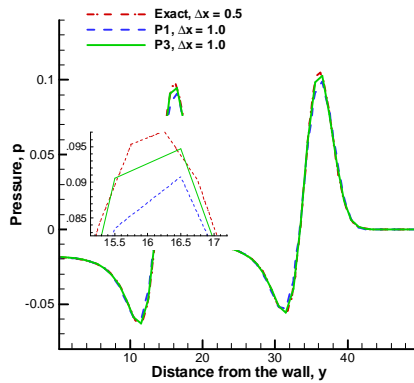


Fig. 9 Comparison of the solution obtained with the second- and fourth-order accurate solutions on the same grid.

A fourth-order accurate solution at $T = 5.0$ for the reflection of a pressure disturbance from a cylinder surface of radius $R = 0.5$ is shown in Fig. 11. This solution was computed on a relatively coarse mesh with 45 elements on half-cylinder surface. It appears, however, that even in the coarse grid region $r > 10$ the quality of the computed solution does not degrade. Furthermore, the DG method was found quite robust for numerical solutions with rapidly varying meshes.

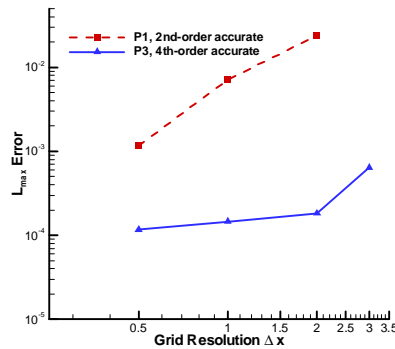


Fig. 10 Grid convergence of the second- and fourth-order accurate solutions.

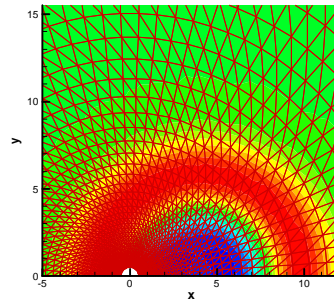


Fig. 11 Computed pressure for the reflection of a pressure pulse from a cylinder surface at $T = 5.0$.

6. Conclusions

High order accurate numerical solutions of the linearized Euler equations were obtained using the discontinuous Galerkin finite element method for general, unstructured-type, triangular meshes. The accuracy of the numerical solutions was verified by comparing with available exact results. Fourth-order accurate solutions provided sufficient accuracy for CAA computations. The versatility of the numerical solution is demonstrated with complex domain numerical solutions for scattering from a cylinder surface.

7. References

1. Lele, S. K., "Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution," *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, No. 1, 1992, p. 16.
2. Tam, C. K. and Webb, J. C., "Dispersion-Relation Preserving Finite Difference Schemes for Computational Acoustics," *J. of Comp. Phy.*, Vol. 83, 1993, p. 262.
3. Wang, Z. J. and Chen, R. F., "Optimized Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Computational Aeroacoustics," AIAA Paper 2001-1101, Jan. 2001.
4. Grasso, F. and Pirozzoli, S., "Simulations and Analysis of the Coupling Process of Compressible Vortex Pairs; Free Evolution and Shock Induced Coupling," *Physics of Fluids*, Vol. 13, 2001, p. 1343.
5. Visbal, M. R. and Gaitonde, D. V., "On the Use of High-Order Finite-Difference Schemes on Curvilinear and Deforming Meshes," *Journal of Computational Physics*, Vol. 181, 2002, 155-185.
6. Hixon, R., "Curvilinear Wall Boundary Conditions for Computational Aeroacoustics," AIAA Paper 99-2395, June 1999.
7. Hixon, R., "Effect of Grid Singularities on the Solution Accuracy of a CAA Code," AIAA Paper 2003-0879, Jan. 2003.
8. Gaitonde, D. V. and Visbal, M. R., "Pade-Type High-Order Boundary Filters for the Navier-Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11, 2000, p. 2103.
9. Jiang, G.-S. and Shu, C.-W., "Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes," *Journal of Computational Physics*. Vol. 126, 1996, p. 202.
10. Balsara, D. S. and Shu, C.-W., "Monotonicity Preserving Weighted Essentially Non-oscillatory Schemes with Increasingly High Order of Accuracy," *Journal of Computational Physics*. Vol. 160, 2000, p. 405.

11. Pirozzoli, S., "Conservative Hybrid Compact-WENO Schemes for Shock Turbulence Interaction" *Journal of Comp. Physics*, Vol. 178, 2002, p. 81.
12. Ekaterinaris, J. A., "Performance of High-Order-Accurate, Low-Diffusion Numerical Schemes for Compressible Flow," *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 2, 2004.
13. Abgral, R., "On Essentially Non-Oscillatory Schemes on Unstructured Meshes," *Journal of Computational Physics*. Vol. 114, 1994, p. 45.
14. Cockburn, B, Karniadakis, G. E., and Shu, C.-W. (Editors) "Discontinuous Galerkin Methods," Springer, 1999.
15. Wang, Z. J., "High-Order Spectral Volume method for Benchmark Aeroacoustic Problems," AIAA Paper 2003-0880, Jan 2003.
16. Yan, J. and Shu, C-W., "Local Discontinuous Galerkin Methods for Partial Differential Equations with Higher Order Derivatives," NASA/CR-2002-211959 and ICASE Report No. 2002-42, Nov. 2002.
17. van der Veght, J. J. W. and van der Ven, H., "Space-Time Discontinuous Galerkin Finite Element Method with Dynamic Grid Motion for Inviscid Compressible Flows: I. General Formulation," *Journal of Computational Physics*, Vol. 182, No. 2, 2002, pp. 546-585
18. Hu, F. Q., Hussaini, M. Y., and Rasetarinera, P., "An Analysis of the Discontinuous Galerkin Method for Wave Propagation Problems," *Journal of Computational Physics*, Vol. 151, No. 2, 1999, pp. 921-946.
19. Rasetarinera, P. and Hussaini, M. Y., "An Efficient Implicit Discontinuous Spectral Galerkin Method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 172, No. 2, pp. 718-738.
20. Hu, F. Q., Hussaini, M. Y., and Manthey, J. L., "Low-Dissipation and Low-Dispersion Runge-Kutta Schemes for Computational Acoustics," *Journal of Computational Physics*, Vol. 124, No. 1, 1996, pp. 177-191.
21. Hixon, R. and Turkel, E., "Compact Implicit MacCormack-Type Schemes with High Accuracy," *Journal of Computational Physics*, Vol. 158, No. 1, 2000, pp. 51-70.
22. Gottlieb, S. and Shu, C.-W., "Total Variation Diminishing Runge-Kutta Schemes," *Mathematics of Computation*, Vol. 67, 1998, pp. 73-85.
23. Reed, W. H. and Hill, T. R., "Triangular Mesh Methods for the Neutron Transport Equation," Technical Report LA-UR-73-479, Los Alamos Scientific laboratory, 1973.
24. Cockburn, B., and Shu, C.-W., "The Runge-Kutta Local Projection Discontinuous Galerkin Finite Element Method for Conservation Laws IV: The Multidimensional Case," *Mathematics of Computation*, Vol. 54, 1990, p. 545.
25. Cockburn, B., and Shu, C.-W., "The Runge-Kutta Discontinuous Galerkin Method for Conservation Laws," *Journal of Computational Physics*, Vol. 141, 1998, p. 199.
26. Tam C. K. and Webb, J. C., "Dispersion-Relation-Preserving Finite Difference Schemes for Computational Acoustics," *Journal of Computational Physics*, Vol. 107, No. 2, August 1993, pp. 262-281.
27. Hardin, J. D., Ristorcelli, J. R., and Tam, C. K., ICASE/LaRC Workshop on Benchmark Problems in Computational Aeroacoustics (CAA), NASA CP 3300, 1995.

Επίδραση της κίνησης του αναβολέα στον υμένα της ωοειδούς θυρίδας

Δόσχορης Μιχαήλ¹, Κακαβάς Παναγιώτης², Παπαδέας Ευάγγελος³ και Σκαρλάτος
Δημήτριος¹

¹ Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Πατρών,

² Τμήμα Ανακαίνισης και Αποκατάστασης Κτιρίων, Α.Τ.Ε.Ι. Πατρών, ³ Τμήμα
Ωτορινολαρυγγολογίας, Πανεπιστημιακό Νοσοκομείο Πανεπιστημίου Πατρών
(Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο για επικοινωνία: skarlat@mech.upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην κατανόηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας του έσω ωτός δια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει αναβολέα, δακτυλιοειδή σύνδεσμο, τένοντα του μυός του αναβολέα και ένα μέρος της αιθουσαίας μεμβράνης έχει προταθεί. Το μοντέλο αυτό υλοποιήθηκε με την βοήθεια ανατομικών φωτογραφιών του μέσω ωτός και υπολογίσθηκαν (i) οι φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές και (ii) η αρμονική απόκριση στο φάσμα συχνοτήτων από 100Hz έως 10kHz της αιθουσαίας μεμβράνης και του υπόλοιπου συστήματος (αναβολέας-δακτυλιοειδής σύνδεσμος-τένοντας του μυός του αναβολέα). Το προτεινόμενο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ελέγχθη συγκρίνοντας την κίνηση της βάσης του αναβολέα με αντίστοιχες δημοσιευμένες πειραματικές μετρήσεις.

Influence of the 3-D stape's movement on the vestibular membrane

Doschoris Michael¹, Kakavas Panayiotis², Papadeas Evangelos³, Skarlatos
Dimitrios¹

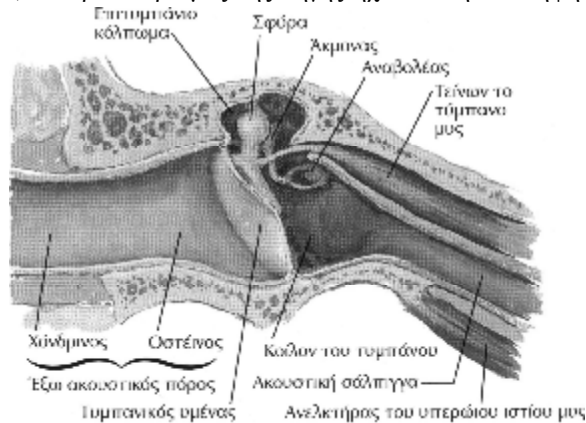
¹ Department of Mechanical Engineering & Aeronautical, University of Patras, Hellas, ²Department of Renovation and Reconstruction of Buildings, Technological Educational Institute of Patras, Hellas, ³Department of Head and Neck Surgery, University Hospital and Department of Medical Sciences, University of Patras, Hellas

ABSTRACT

The aim of the present study is to understand the function of inner ear by applying the finite element analysis. We propose a 3-D finite element model which includes stapes, annular ligament, stapedia tendon and a section of the vestibular membrane. The shapes of the several sections were determined based on photographs of the middle ear sections and calculated (i) the modal analysis and (ii) the harmonic analysis in the range of frequencies from 100Hz to 10kHz. The finite element model was validated by comparing model-predicted ossicular movements at the stapes footplate with published experimental measurements.

Εισαγωγή

Το αυτί περικλείεται στο κροταφικό οστό και διαιρείται σε τρία μέρη το έξω, το μέσο και το έσω αυτί (σχήμα 1). Ο προσδιορισμός της πηγής ήχου και η αντίληψη της από τον άνθρωπο, ξεκινάει από το έξω ους, το οποίο αναλαμβάνει την συλλογή των ηχητικών κυμάτων με την βοήθεια του πτερυγίου και την προώθηση τους μέσω του έξω ακουστικού πόρου. Οι διακυμάνσεις αυτές θέτουν σε δόνηση τον τυμπανικό υμένα, οι οποίες με την σειρά τους μετατρέπονται σε μηχανικές δονήσεις πριν



καταλήξουν στο έσω ους. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια τριών

μικροσκοπικών οσταρίων (σφύρα, άκμονας και αναβολέας), τα οποία μαζί με τον τυμπανικό υμένα, αποτελούν την ακουστική αλυσίδα. Έτσι, δονήσεις του τυμπανικού υμένα καταλήγουν σε κίνηση του τελευταίου κρίκου της ακουστικής αλυσίδας, του αναβολέα. Οι κινήσεις του αναβολέα προκαλούν μεταβολή της πίεσης στη λέμφο του κοχλίου η οποία καθορίζει ποια τριχωτά κύτταρα θα ενεργοποιηθούν για να σταλθεί νευρωνική ώση στον εγκέφαλο.

Η ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση των δονήσεων του μέσο ωτός, επειδή η πολύπλοκη γεωμετρία μπορεί να απεικονισθεί με κάθε λεπτομέρεια. Ένα πλήρες μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του μέσο ωτός θα ήταν σε θέση να μας δώσει στοιχεία για την τρισδιάστατη κίνηση των οσταρίων, τις μεταβολές στις μετατοπίσεις του τυμπανικού υμένα κ.ο.κ. χωρίς την ανάγκη υλοποίησης πειραμάτων τα οποία είναι δύσκολα στην εκτέλεση. Επιπρόσθετα, θα ήταν δυνατόν να προβλέψουμε πως η λειτουργία του μέσο αυτιού επηρεάζεται από τις διάφορες παθήσεις του μέσο ωτός και θα κατανοήσουμε πως ατομικές διαφοροποιήσεις της ανατομίας του μέσο αυτιού επηρεάζουν την λειτουργία του.

Οι ιδιότητες των υλικών των συστατικών που αποτελούν το μέσο αυτί και οι συνοριακές συνθήκες ελήφθησαν από δημοσιεύσεις άλλων ερευνητών .

1. Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες

1.1 Υλοποίηση του μοντέλου

Η υλοποίηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια ανατομικών φωτογραφιών του μέσο ωτός. Για την υλοποίηση τόσο της γεωμετρίας, όσο και του πλέγματος του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η απόδοση και επεξεργασία της γεωμετρίας αυτής, όπως επίσης η

προσομοίωση χαρακτηριστικών όπως οι διάφορες ιδιότητες των υλικών (μη ομογένεια, ανισοτροπία κ.ο.κ.).

Η απόσβεση (εκτός της λέμφου του κοχλίου) περιγράφεται υπ' όρους της απόσβεσης Rayleigh. Το μητρώο απόσβεσης του συστήματος C ισούται με το άθροισμα των μητρώων της μάζας M και δυσκαμψίας K , πολλαπλασιασμένες με τις σταθερές απόσβεσης Rayleigh a και β , δηλ.:

$$C = aM + bK \quad (1.1)$$

Ο λόγος απόσβεσης ζ ισούται με

$$\zeta = \frac{\frac{a}{\omega} + b\omega}{2} \quad (1.2)$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα. Από την έκφραση (1.2) φαίνεται ότι οι σταθερές a και β ελέγχουν την απόσβεση σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες αντίστοιχα.

1.2 Οστάρια, σύνδεσμοι και τένοντες

Το μοντέλο του αναβολέα και των υπολοίπων στοιχείων έχει υλοποιηθεί με την βοήθεια ανατομικών φωτογραφιών του μέσου ωτός. Το ανθρώπινο μέσο αυτί έχει περιγραφεί ως γραμμικό ισότροπο σύστημα υπό φυσιολογικές συνθήκες ακουστικών εντάσεων. Για το λόγο αυτό τα υλικά που συνιστούν το σύστημα του μέσου αυτιού θεωρούνται γραμμικά ισότροπα και ελαστικά. Η σταθερά του Poisson πάρθηκε ίση με 0.3 βασιζόμενοι στο γεγονός ότι όλες οι δημοσιευμένες τιμές τις σταθεράς Poisson είναι κοντά σε αυτήν την τιμή. Έχοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου βιολογικού συστήματος και την έλλειψη πειραματικών μετρήσεων για τις σταθερές απόσβεσης των στοιχείων που συνθέτουν το σύστημα, οι σταθερές απόσβεσης Rayleigh a και β για όλα τα υλικά του συστήματος εκτός της λέμφου του κοχλίου και της αιθουσαίας μεμβράνης, έχουν παρθεί ίσες με $a=0 \text{ s}^{-1}$ και $\beta=3.72 \times 10^{-4} \text{ s}$. Οι ιδιότητες των υλικών, όπως και οι σταθερές απόσβεσης έχουν παρθεί από δημοσιεύσεις άλλων ερευνητών (πίνακας 1). Ο αναβολέας και οι μαλακοί ιστοί (τένοντας του μυός του αναβολέα και δακτυλοειδής σύνδεσμος) έχουν αναπαρασταθεί με πλέγμα συνολικών 1010 τετράεδρων στοιχείων (SOLID187).

1.3 Αιθουσαία μεμβράνη και κοχλίας

Η αιθουσαία μεμβράνη αποτελεί το σύνορο οστέινου και υμενώδους λαβύρινθου. Είναι πάρα πολύ λεπτή και δεν υπάρχουν στοιχεία σχετικά με την γεωμετρία ή τις μηχανικές ιδιότητες τις δημοσιευμένες. Το λεπτότερο στοιχείο στο μέσο αυτί αποτελεί ο δακτυλοειδής σύνδεσμος με πάχος της τάξης των μm . Για το λόγο αυτό θεωρούμε την αιθουσαία μεμβράνη πάχους της τάξης των μm . Στο προτεινόμενο μοντέλο προσομοιάστηκε ως ελαστομερές και έχει μοντελοποιηθεί ως μεμβράνη με στοιχεία SHELL63 σε σύνολο 96 στοιχείων.

Από πειραματικές μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης της λέμφου του κοχλίου(6) προέκυψε ότι η κύρια αντίσταση του ωτός προέρχεται κυρίως από την λέμφο του

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Μέτρο Ελαστικότητας (N/m ²)		
Αναβολέας ^b		1.41 × 10 ¹⁰
Τένοντας του μυός του αναβολέα ^c		5.20 × 10 ⁵
Δακτυλιοειδείς σύνδεσμος ^c		4.90 × 10 ⁵
Αιθουσαία μεμβράνη (υπόθεση)		7.00 × 10 ⁵
Πυκνότητα (kg/m ³)		
Αναβολέας ^a		2.20 × 10 ³
Τένοντας του μυός του αναβολέα ^c		2.50 × 10 ³
Δακτυλιοειδείς σύνδεσμος ^c		2.50 × 10 ³
Αιθουσαία μεμβράνη (υπόθεση)		0.90 × 10 ³
Σταθερά Poisson		
Αναβολέας		0.30
Τένοντας του μυός του αναβολέα		0.30
Δακτυλιοειδείς σύνδεσμος		0.30
Αιθουσαία μεμβράνη (υπόθεση)		0.45
Σταθερές απόσβεσης		
	α (s ⁻¹)	β (s)
Αναβολέας ^c	0.0	3.72 × 10 ⁻⁴
Τένοντας του μυός του αναβολέα ^c	0.0	3.72 × 10 ⁻⁴
Δακτυλιοειδής σύνδεσμος ^c	0.0	3.72 × 10 ⁻⁴
Αιθουσαία μεμβράνη (υπόθεση)	0.0	3.72 × 10 ⁻⁴
Κοχλίας ^c	D _c = 8.91 × 10 ⁻¹ Ns/m	

^a τιμές βασισμένες στα πειραματικά δεδομένα του Kirikae (1960)

^b τιμές βασισμένες στα πειραματικά δεδομένα των Herrman & Liebowitz (1972)

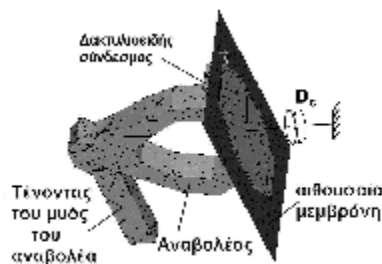
^c τιμές από Koike et al. (2002)

κοχλία, η οποία ισούται περίπου με 5×10^{10} rayls/m² για συχνότητες μεταξύ 0.1 και 2kHz και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Στην παρούσα μελέτη η επίδραση της λέμφου του κοχλίου έχει ληφθεί υπόψη με μια σταθερά απόσβεσης D_c (σχήμα 2) με τιμή 0.891 Ns/m, έτσι ώστε η σύνθετη αντίσταση της λέμφου του κοχλίου να ανέρχεται σε 5×10^{10} rayls/m². Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έχει μοντελοποιηθεί με στοιχεία COMBIN14 σε σύνολο 1 στοιχείου.

1.4 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο σύστημα περιλαμβάνουν τον πλήρη περιορισμό των ακόλουθων στοιχείων: (i) ελεύθερο άκρο του τένοντα του μυός του αναβολέα, όπως επίσης όλη η περιφέρεια του δακτυλιοειδούς συνδέσμου, και (ii) η επιφάνεια της αιθουσαίας μεμβράνης που βρίσκεται σε επαφή με την βάση του αναβολέα.

Εφαρμόστηκε ακουστική πίεση 80 dB (= 0.2 Pa) στον τυμπανικό υμένα. Η επιφάνεια του τυμπανικού υμένα είναι περίπου



Σχήμα 2: Πλήρες σύστημα με συνοριακές συνθήκες

82mm² και η επιφάνεια της κεφαλής του αναβολέα περίπου 0.22mm². Η διαφορά των επιφανειών λειτουργεί ως ενισχυτής της ηχητικής πίεσης που ασκείται στον τυμπανικού υμένα. Η ενίσχυση αυτή εκφράζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του τυμπανικού υμένα προς εκείνη της κεφαλής του αναβολέα και ισούται περίπου με 375. Επιπλέον εισέρχεται ενίσχυση από το σύστημα τυμπανικού υμένα-σφύρα και μογλού σφύρα-άκμονα, ίση με 2.3. Έτσι η συνολική ενίσχυση ανέρχεται σε 375x2.3; 862 που αντιστοιχεί σε μεταβολή της ακουστικής πίεσης κατά 60dB. Έτσι ακουστική πίεση στάθμης 80dB στον τυμπανικού υμένα μετατρέπεται σε ακουστική πίεση στάθμης περίπου 140dB στην κεφαλή του αναβολέα. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση από 0.2 Pa στην είσοδο του τυμπανικού υμένα μετατρέπεται σε 200 Pa στην κεφαλή του αναβολέα, αύξηση κατά τρεις τάξεις μεγέθους.

2. Ανάλυση & Αποτελέσματα

2.1 Εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών

Για να προσδιορίσουμε τις ιδιοσυχνότητες ενός συστήματος που χαρακτηρίζεται από απόσβεση, απαιτείται η επίλυση εξισώσεων τις μορφής

$$\mathbf{K}\mathbf{f}_j + \mathbf{I}_j\mathbf{C}\mathbf{f}_j = -\mathbf{I}_j^2\mathbf{M}\mathbf{f}_j \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{K} , \mathbf{C} , \mathbf{M} τα μητρώα δυσκαμψίας, απόσβεσης και μάζας αντίστοιχα, $\mathbf{I}_j = \mathbf{S}_j \pm i\mathbf{W}_j$, όπου \mathbf{S}_j και \mathbf{W}_j το πραγματικό και φανταστικό μέρος των ιδιοτιμών \mathbf{I}_j αντίστοιχα. Η δυναμική απόκριση του συστήματος δίνεται από την έκφραση

$$u_j = \mathbf{f}_j e^{\mathbf{I}_j t} \quad (2.2)$$

Το σύστημα είναι ευσταθές εφόσον $\mathbf{S}_j < 0$ και ασταθές αν $\mathbf{S}_j > 0$.

2.2 Αρμονική ανάλυση

Για να προσδιορίσουμε την απόκριση ενός συστήματος που ταλαντώνεται, απαιτείται η επίλυση της χρονοεξαρτώμενης εξίσωσης κίνησης

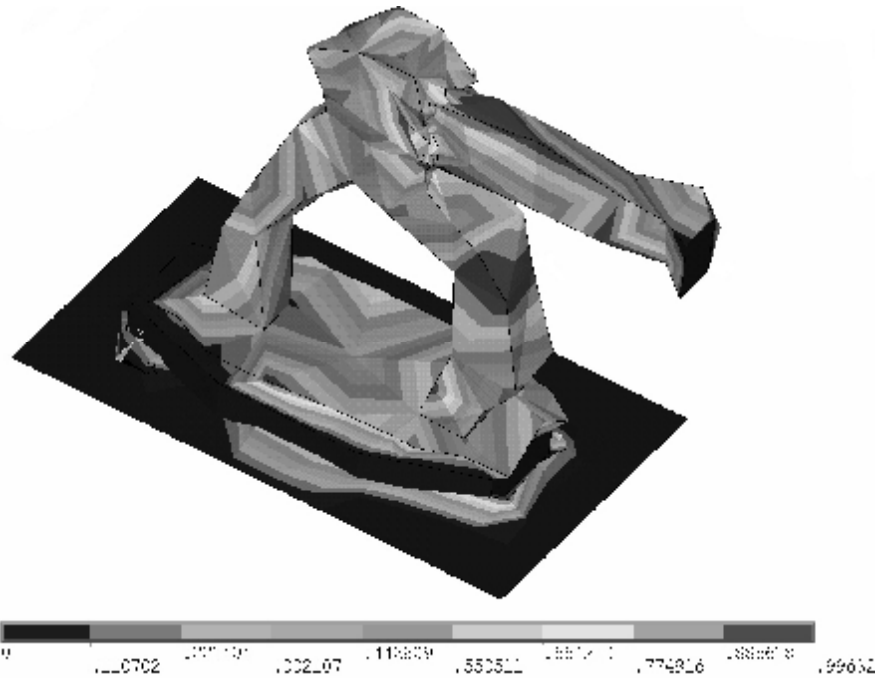
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = \sum \mathbf{F} \quad (2.3)$$

όπου \mathbf{r} , $\dot{\mathbf{r}}$ και $\ddot{\mathbf{r}}$ το διάνυσμα θέσεως, η ταχύτητα και επιτάχυνση

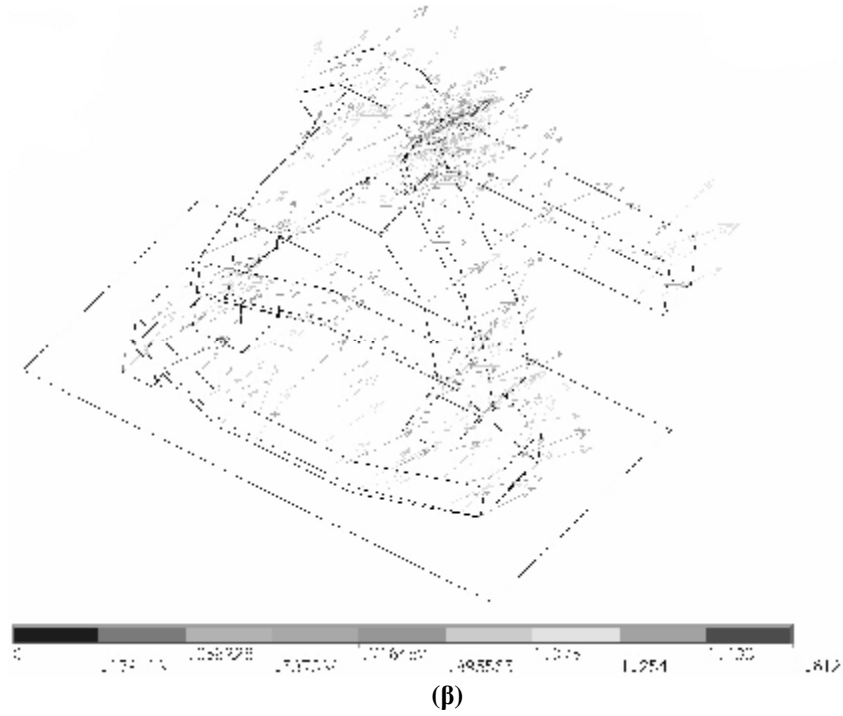
αντίστοιχα, $\sum \mathbf{F}$ η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα.

Πίνακας 2: Οι πρώτες δέκα ιδιοσυχνότητες σε Ηz. Όλες οι τιμές είναι κανονικοποιημένες στην μονάδα

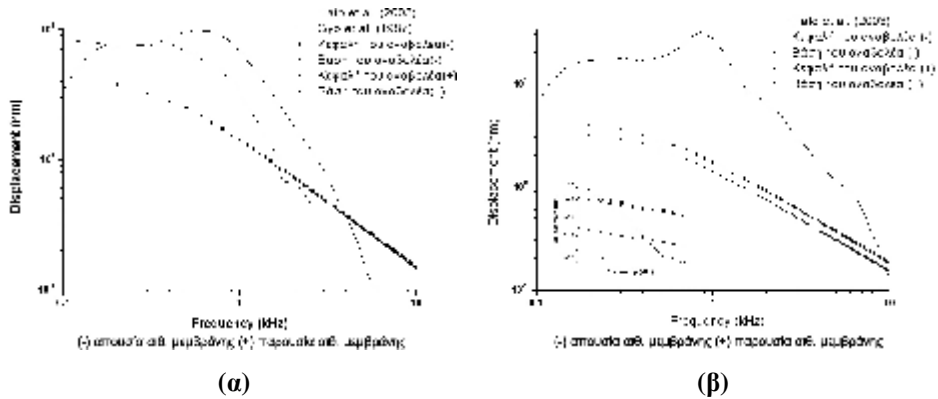
	Μόνο αναβολέας	Αναβολέας παρουσία αιθουσαίας μεμβράνης		Αναβολέας και κοχλία	Αναβολέας παρουσία αιθουσαίας μεμβράνης και κοχλία	
		πάχος 10μm	πάχος 20μm		πάχος 10μm	πάχος 20μm
1	-427.84	-427.84	-427.84	-427.54	-345.21	-427.84
2	-427.87	-428.19	-428.01	-427.84	-427.84	-427.93
3	-428.06	-428.69	-428.26	-427.86	-428.14	-428.23
4	-428.27	-429.55	-428.79	-428.02	-428.48	-428.46
5	-428.36	-431.59	-429.19	-428.11	-430.02	-429.61
6	-429.11	-435.50	-429.73	-428.39	-430.99	-430.73
7	-429.43	-436.39	-431.59	-428.70	-436.15	-431.82
8	-429.69	-438.09	-432.09	-429.21	-438.08	-433.30
9	-431.55	-444.45	-433.73	-429.53	-444.45	-436.15
10	-431.63	-452.26	-436.35	-429.75	-451.55	-438.07



(α)



Σχήμα 2: Ίδιομορφή συστήματος αναβολέα παρουσία αιθουσαίας μεμβράνης για πάχος 20μm και συχνότητα $f = -427.84$ Hz. (α) Contour Plot μετατόπιση κατά των άξονα z, (β) Vector Plot translation U



Σχήμα 3. Μετατοπίσεις της κεφαλής και βάσης του αναβολέα. Η ακουστική πίεση στον τυμπανικό υμένα ισούται με 80dB. Η συνεχόμενη και διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχούν σε πειραματικά δεδομένα (Hato et al. (2003) & Gyo et al. (1987)) αντίστοιχα. Τα δεδομένα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αντιστοιχούν στα διασκορπισμένα σημεία (α) παρουσία της λέμφου του κοχλίου και (β) απουσία αυτής.

3. Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι δεν είναι εύκολο να προσομοιώσουμε την λειτουργία του μέσο ωτός μόνο με ένα οστάριο παρόλο που αυτό θα αποτελούσε μεγάλο πλεονέκτημα. Οι κορυφές που παρατηρούνται στα γραφήματα οφείλονται στο συντονισμό των τριών μαζών (οστάρια). Επίσης απαιτούνται πειραματικά δεδομένα για τον ακριβή προσδιορισμό της γεωμετρίας και των μηχανικών ιδιοτήτων της αιθουσαίας μεμβράνης. Το σημείο αυτό θεωρείται κρίσιμο, επειδή οι δονήσεις του υμένα της ωοειδούς θυρίδας καθορίζουν τον τρόπο ταλάντωσης της λέμφου του κοχλίου και άρα καθορίζουν τις νευρωνικές ώσεις που θα σταλθούν στον εγκέφαλο.

4. Αναφορές

- [1] Gyo K., Aritomo H., and Goode R.L., “Measurement of the ossicular vibration ratio in human temporal bones by use of a video measuring system”, *Acta Otolaryngol.*, 1987, 103, 87-95
- [2] Herrman G., Liebowitz H., “Mechanics of Bone Fractures”, In: Liebowitz H. (ed.): *Fracture: An Advanced Treatise*, New York, Academic Press, 1972, 7, 772-840
- [3] Kirikae I., “The Structure and Function of the Middle Ear”, Tokyo, University of Tokyo Press, 1960
- [4] Koike T., Wada H., Kobayashi T., “Modeling of the Human Middle Ear using the finite-element method”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, 111(3), 1306-1317
- [5] Naohito Hato, Stefan Stenfelt, Richard L. Goode, “Three-Dimensional Stapes Footplate Motion in Human Temporal Bones”, *Audiol Neurotolol*, 2003, 8, 140-152
- [6] Merchant S.N., Ravicz M.E. and Rosowski J.J. “Acoustic input impedance of the stapes and cochlea in human temporal bones”, *Hear. Res.*, 1996, 97, 30-45

Προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού και θέσεων αισθητήρων για τον εντοπισμό της θέσης ακουστικής εκπομπής

Καπάτος Βασίλειος
Λυμπερτός Ευστράτιος
Μεταπτυχιακοί Φοιτητές
Δερματάς Ευάγγελος
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

kappatos/libertos/dermatas@george.wcl2.ee.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα δημοσίευση παραθέτει και σχολιάζει τις σημαντικότερες επιστημονικές εργασίες που μελετούν τα προβλήματα αυτόματου προσδιορισμού του ελαχίστου αριθμού και της βέλτιστης θέσης αισθητήρων με στόχο την εύρεση της θέσης πηγών ακουστικής εκπομπής, δύο προβλήματα με τεράστιο ερευνητικό και εμπορικό ενδιαφέρον ιδιαίτερα σε εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου εγκαταστάσεων. Η βέλτιστη διάταξη αισθητήρων καθορίζεται σαν τις θέσεις εκείνες κατά τις οποίες ελαχιστοποιείται το σφάλμα εντοπισμού των πηγών ακουστικής εκπομπής ή μεγιστοποιείται η στατιστική ανεξαρτησία των μετρήσεων που πραγματοποιούν οι αισθητήρες κ.α. Η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που προκύπτουν γίνεται με την χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, γενετικών αλγορίθμων, αλγόριθμοι βραδείας ψύξης, την μεθοδολογία tabu, μεθοδολογίες εκτίμησης κατάστασης συστήματος κ.α. Η εύρεση του μικρότερου αριθμού αισθητήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα και το είδος του υλικού της κατασκευής. Με την χρήση τριγωνικών τεχνικών απαιτούνται τουλάχιστον τρεις αισθητήρες ενώ μέθοδος που χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό wavelet προσδιορίζει τον ελάχιστο αριθμό αισθητήρων σε δύο.

ABSTRACT

In this paper, the problem of minimum number of sensors and optimal sensors placement for acoustic emission source location are presented. The optimal configuration of sensors is defined at the minimum of the source location error or at the maximum of the statistical independence of measurements. The solution of optimisation problem is accomplished using artificial neural networks, genetic algorithms, simulated annealing algorithms, tabu search etc. The minimum number of sensors depends on the form and the type of material. Triangular techniques require at least three sensors while using the wavelet transformation the minimal number of sensors is reduced to two.

Εισαγωγή

Οι αισθητήρες αποτελούν τα θεμελιώδη στοιχεία κάθε συστήματος μετρήσεως και χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν τις διάφορες φυσικές ποσότητες (π.χ θέση, ταχύτητα, θερμοκρασία κ.λπ.) σε ηλεκτρικά σήματα (π.χ τάση, ένταση). Ο μη καταστροφικός έλεγχος εγκαταστάσεων απαιτεί την χρήση αισθητήρων, των οποίων η βέλτιστη τοποθέτησή τους, μπορεί να επιφέρει μείωση του αριθμού των αισθητήρων καθώς και αύξηση στην ακρίβεια των μετρήσεων. Οι Padula και Kincaid [1] έκαναν μια περιεκτικότερη έρευνα για την τοποθέτηση των αισθητήρων. Οι σημαντικότερες εφαρμογές που σχετίζονται με την βέλτιστη τοποθέτηση των αισθητήρων λαμβάνουν χώρα στην ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων [2], στην αεροπορική βιομηχανία [3-6] καθώς και σε βιομηχανίες κατεργασίας [7].

Ο εντοπισμός της πηγής της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ) δηλαδή της περιοχής που εμφανίζεται συνήθως μια δομική ατέλεια βασίζεται στις αρχές διάδοσης των ελαστικών κυμάτων μέσα στα υλικά. Με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων τα ελαστικά κύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα. Η ανάλυση του φαινομένου της ΑΕ χρησιμοποιείται συχνά στην εύρεση ζημιών σε εγκαταστάσεις όπως για παράδειγμα δεξαμενές, γέφυρες, δοχεία, συστήματα σωλήνων κ.α. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού αισθητήρων σε συνδυασμό με την βέλτιστη τοποθέτησή τους, με σκοπό την εξακρίβωση της δομικής ακεραιότητας μιας εγκατάστασης είναι ένα θέμα με τεράστιο οικονομικό και ερευνητικό ενδιαφέρον. Είναι γνωστό ότι λανθασμένες τοποθετήσεις αισθητήρων μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένες διαγνώσεις. Γνωρίζοντας τον ακριβή αριθμό και την θέση των αισθητήρων εξασφαλίζονται αξιόπιστες μετρήσεις του φαινομένου ακουστικής εκπομπής για τον έλεγχο των εγκαταστάσεων με αποτέλεσμα το κόστος ελέγχου της κατασκευής να ελαχιστοποιείται. Τα προβλήματα γίνονται περισσότερο όταν η εγκατάσταση των αισθητήρων είναι μόνιμη, οπότε η αλλαγή στην θέση τους είναι σχεδόν αδύνατη (π.χ υπόγειες δεξαμενές, υπόγειους σωλήνες κ.λπ.).

Η δομή της συγκεκριμένης δημοσίευσης είναι η ακόλουθη: η πρώτη ενότητα περιγράφει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης των αισθητήρων στην κατασκευή, ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε τεχνικές που σχετίζονται με τον βέλτιστο αριθμό των αισθητήρων. Τέλος η τρίτη ενότητα συζητά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την δημοσίευση.

1. Βέλτιστη τοποθέτηση αισθητήρων

Πολυάριθμες τεχνικές αναφέρονται στην βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων (ΒΤΑ). Οι Worden και Burrows παρουσίασαν μια μέθοδο για την κατανομή αισθητήρων με σκοπό την διάγνωση αστοχιών [8], ενώ οι Hemez και Farhat [9] βρίσκουν την ΒΤΑ με στόχο τον εντοπισμό ζημιών στις διάφορες κατασκευές. Πολλές εργασίες έχουν παρουσιαστεί μελετώντας το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης συμβατικών αισθητήρων [10,11], αλλά μόνο μερικές σχετίζονται με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες [12,13], οι οποίοι αποτελούν τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της πηγής ΑΕ.

Παραδοσιακά τοποθετούσαν τους αισθητήρες διαισθητικά ή κάνοντας πολλές δοκιμές μέχρι να βρουν την καλύτερη θέση. Η πλήρης αναζήτηση (ΠΑ) στην επιφάνεια της εγκατάστασης αποτελεί μια πρόσφατη μέθοδο με την οποία επιτυγχάνεται η ΒΤΑ για τον εντοπισμό της πηγής ΑΕ. Κατά την ΠΑ οι αισθητήρες

μετακινούνται σε υποψήφιες θέσεις “καλύπτοντας” έτσι ολόκληρη την επιφάνεια με συγκεκριμένο βήμα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο σφάλμα εντοπισμού της θέσης πηγής ΑΕ. Στα [14,15] πραγματοποιήθηκε εντοπισμός της ΒΤΑ για κυλινδρικές και σφαιρικές μεταλλικές δεξαμενές. Η ΠΑ είναι μια χρονοβόρα υπολογιστική διαδικασία, που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βήμα μετακίνησης των αισθητήρων. Μικρότερο βήμα σημαίνει περισσότερες θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων, που συνεπάγεται περισσότερο χρόνο, αλλά και μεγαλύτερη ακρίβεια στον εντοπισμό της πηγής ΑΕ. Η διαδικασία εκτελείται μόνο μια φορά για κάθε κατασκευή.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες μέθοδοι, των οποίων οι τρόποι προσέγγισης τους διαφέρουν στην επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης και του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Η δημοσίευση [1] δίνει μια πλήρη επισκόπηση για τις μεθόδους βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι το 1999.

Πολλές από τις μεθόδους ΒΤΑ στηρίζονται στην βιολογία και στην φυσική. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) στηρίζονται στην προσομοίωση λειτουργίας των νευρικών κυττάρων και είναι πολλά υποσχόμενα [16].

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) (Genetic Algorithms) στηρίζονται σε προσομοίωση των μηχανισμών της φυσικής εξέλιξης όπως παρουσιάστηκαν από τον φυσιοδίφη Δαρβίνο. Είναι μία οικογένεια μεθόδων στοχαστικής αναζήτησης ακρότατων. Η πρώτη χρήση των ΓΑ για το πρόβλημα της τοποθέτησης αισθητήρων παρουσιάστηκε πιθανότατα στο [17]. Η εφαρμογή των ΓΑ στο πρόβλημα της εύρεσης των βέλτιστων λύσεων για σύνθετα προβλήματα τοποθέτησης αισθητήρων συνεχίστηκε στα [18-21]. Σύμφωνα με το [22], οι ΓΑ εφαρμόστηκαν με επιτυχία για να βρεθούν οι βέλτιστες θέσεις πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε σύνθετες αρθρωτές πλάκες. Στο [23] η καλύτερη διάταξη αισθητήρων υπέρηχων προσεγγίζεται με την εφαρμογή των ΓΑ.

Οι Αλγόριθμοι Βραδείας Ψύξεως (ΑΒΨ) (Simulated Annealing Algorithms) είναι μια μέθοδος εύρεσης ελαχίστων που προσφέρει τη δυνατότητα διαφυγής από τα τοπικά ελάχιστα που βασίζεται σε μοντελοποίηση φυσικών μηχανισμών ψύξεως μετάλλων. Γενικά για τους ΑΒΨ βρίσκονται στο [24]. Οι ΑΒΨ χρησιμοποιήθηκαν στο [8] για την ΒΤΑ με στόχο την ανίχνευση αστοχιών. Συνδυασμός αλγορίθμων βραδείας ψύξεως με γενετικούς δείχνει ότι στο μέλλον θα είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης [25,26].

Μια πολύ πρόσφατη προσέγγιση βελτιστοποίησης είναι η αναζήτηση tabu [28] η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και για τον εντοπισμό της ΒΤΑ. Η μέθοδος αποφεύγει τα τοπικά ελάχιστα και υπό αυτήν τη μορφή είναι μια ντετερμινιστική έκδοση των ΑΒΨ. Σε κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης, ένας tabu κατάλογος ενημερώνεται και έτσι απαγορεύει την επιστροφή στα τοπικά ελάχιστα τα οποία έχουν ήδη βρεθεί. Μια συνοπτική συζήτηση σχετικά με την μέθοδο βρίσκεται στο [27] ενώ μια πιο περιεκτική αναφορά της μεθόδου tabu δίνεται στα [28,29].

Οι Kirkegaard και Brincker [30] περιγράφουν μια μέθοδο για την εύρεση της ΒΤΑ, με εφαρμογή σε παραμετρική αναγνώριση γραμμικών συστημάτων. Τα παλαιότερα χρόνια, αρκετές εργασίες έγιναν για τον εντοπισμό της ΒΤΑ για εκτίμηση κατάστασης. Η βελτιστοποίηση βασίζεται είτε στο πίνακα διασπορών ενός φίλτρου Kalman [31-32] ή στην ικανότητα παρατήρησης [33-36]. Στο [37] παρουσιάζεται μια προσέγγιση στην επιλογή της ΒΤΑ θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο την μέτρηση της στατιστικής ανεξαρτησίας των μετρήσεων από τους αισθητήρες.

2. Βέλτιστος αριθμός αισθητήρων

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού αισθητήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις, το σχήμα και το είδος του υλικού της κατασκευής στην οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος. Σύμφωνα με τα [38,39], η διάδοση κύματος ΑΕ γίνεται με 2 τρόπους δόνησης, τον extensional και τον flexural. Σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές (π.χ δεξαμενές) λόγω της μεγάλης απόσβεσης του σήματος, το κύμα θεωρείται ότι μεταδίδεται μόνο σε χαμηλές συχνότητες και με τον flexural τρόπο δόνησης. Με την χρήση των διαφορών των χρόνων άφιξης μεταξύ της πηγής ΑΕ και των αντίστοιχων αισθητήρων απαιτούνται τουλάχιστον τρεις αισθητήρες για τον εντοπισμό της πηγής ΑΕ. Σε μεγάλες κατασκευές απαιτούνται πολλοί αισθητήρες, έτσι ώστε να υπάρχουν πάντα αισθητήρες στους οποίους ο λόγος σήματος προς θόρυβο να είναι υψηλός.

Με την χρήση τριγωνικών τεχνικών, σε συνδυασμό με τις τιμές των διαφορών των χρόνων άφιξης, η πηγή ΑΕ μπορεί να εντοπιστεί σύμφωνα με τα [39-44], υποθέτοντας πάντα ότι το σήμα διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας της κατασκευής ακολουθώντας την συντομότερη διαδρομή (geodesic path). Στο [45] περιγράφεται μια μεθοδολογία για τον εντοπισμό μιας πηγής ΑΕ σε δισδιάστατο υλικό κατασκευασμένο από άνθρακο-ίνα-ενισχυμένο πλαστικό (carbon fiber-reinforced plastics) χρησιμοποιώντας μόνο δύο αισθητήρες και τον μετασχηματισμό wavelet. Οι Hegazy και Vachtsevanos [46] ελαχιστοποιούν τον αριθμό των αισθητήρων που χρειάζεται για τον εντοπισμό μιας τρισδιάστατης σημειακής πηγής, διαμορφώνοντας ένα γραμμικό πρόβλημα.

3. Συμπεράσματα

Η παρούσα δημοσίευση παρέθεσε τις σημαντικότερες επιστημονικές εργασίες, οι οποίες μελετούν τα προβλήματα εύρεσης του βέλτιστου αριθμού και θέσης αισθητήρων, με σκοπό την κατασκευή ενός αποτελεσματικού συστήματος εντοπισμού της θέσης πηγής ακουστικής εκπομπής. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού αισθητήρων είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί αφού ο ίδιος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις, το σχήμα και το είδος του υλικού της κατασκευής. Χρησιμοποιώντας τριγωνικές τεχνικές και τις διαφορές στους χρόνους άφιξης μεταξύ της πηγής και των αισθητήρων απαιτούνται τουλάχιστον τρεις αισθητήρες για την εύρεση της πηγής ΑΕ.

Επιπλέον η συγκεκριμένη εργασία ερευνήσε και παράθεσε εν συντομία σχεδόν όλες τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ΒΤΑ. Κάθε μια από τις πρόσφατες μεθόδους προσδιορισμού της βέλτιστης θέσης αισθητήρων παρουσιάζει ευδιάκριτα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Γνωρίζοντας τον ακριβή αριθμό και την θέση των αισθητήρων για τον έλεγχο των εγκαταστάσεων ελαχιστοποιείται το κόστος ελέγχου της κατασκευής.

4. Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία υποστηρίχθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (πρόγραμμα Νο ΓΓΕΤ-02.04, Επαφή Νο 01 ΕΔ 395). Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την εταιρεία μη καταστροφικού ελέγχου Envirocoustics για την θερμή υποστήριξη της.

5. Αναφορές

[1] Padula S., Kincaid R., "Optimization strategies for sensor and actuator placement" NASA Tech Briefs, 1999, L-17839, pp. 1-12.

- [2] Oh D. Y., No H. C., “Determination of the minimal number and optimal sensor location in a nuclear system with fixed in core detectors”, *Nuclear Engineering and Design*, 1994, 152 (1), pp. 197–212.
- [3] Kang Y. K., Park H. C., Agarwal B., “Optimization of piezoceramic sensor/actuator placement for vibration control of laminated plates”, *AIAA Journal*, 1998, 36 (9), pp. 1763–1765.
- [4] Maghami P. G., Joshi S. M., “Sensor/actuator placement for flexible space structures”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29 (2), pp. 345–351.
- [5] Wang B. T., Burdisso R. A., Fuller C.R., “Optimal placement of piezoelectric actuators for active structural acoustic control”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994, 5 (1), pp. 67–77.
- [6] Kammer D.C., “Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1991, 14, pp. 251–259.
- [7] Kang Y. K., Park H. C., Hwang W., Kan K. S., “Optimum placement of piezoceramic sensor/actuator for vibration control of laminated beams”, *AIAA Journal*, 1996, 34 (9), pp. 1921–1926.
- [8] Worden K., Burrows A.P., “Optimal sensors placement for fault detection”, 2001, *Engineering Structures*, 23, pp. 885-901.
- [9] Hemez FM, Farhat C., “An energy based optimum sensor placement criterion and its application to structural damage detection”, Centre for Aerospace Structures, Department of Aerospace Engineering, University of Colorado at Boulder, preprint, 1994.
- [10] Schulz G., Heimbold G., “Dislocated actuator/sensor positioning and feedback design for flexible structures” *J.Guidance Control Dyn.*, 1983, 5, pp. 361–367.
- [11] Lim K. B., “Method for optimal actuator and sensor placement for large flexible structures”, *J. Guidance Control Dyn.*, 1992, 15, pp. 49–57.
- [12] Hac A., Liu L., “Sensor and actuator location in motion control of flexible structures”, *J. Sound Vib.*, 1993, 167, pp. 239–261.
- [13] Tzou H.S, Fu H. Q., “A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators”, part I: theoretical analysis *J. Sound Vib.*, 1994, 172, pp. 247–59.
- [14] Lympertos E., Dermatas E., “Best sensors position for accurate location of acoustic emission sources on cylindrical surfaces”, 2003, *International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science*, Corfu Hellas.
- [15] Kappatos V., Lympertos E., Dermatas E., “Estimation of the best sensors position for minimum error location of acoustic emission sources on spherical surfaces”, 3rd *International Conference on Non-Destructive Testing of the Hellenic Society for NDT*, Crete Hellas, October 15-17 2003, pp. 123-128.
- [16] Haykin S., “Neural networks, A comprehensive foundation”.
- [17] Yao L., Sethares W.A., Kammer D.C., “Sensor placement for onorbit modal identification via a genetic algorithm”, *AIAA Journal*, 1993, 31, pp. 1167–9.
- [18] Frauchi C.G., Gallieni D., “Pre-test optimisation by genetic algorithm”, *Proceedings of the 19th International Seminar on Modal Analysis*, Leuven, Belgium, 1994.
- [19] Stabb M., Blelloch P., “A genetic algorithm for optimally selecting accelerometer locations”, *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, Nashville, Tennessee, 1995.

- [20] Manolas D. A., Gialamas T., Tsahalis D. T., “A genetic algorithm for the simultaneous optimization of the sensor and actuator positions for an active noise and/or vibration control”, Proceedings of Internoise 96, 25th Anniversary Congress, Liverpool, UK, 1996, pp. 1187–1191.
- [21] Ponslet E., Haftka R. T., Cudney H. H., “Optimal placement of tuning masses on truss structures by genetic algorithm”, Collection of Technical Papers—AIAA/ASME Structures Dynamics, Materials Conference, Part 4, 1993, pp. 2448–2457.
- [22] Jae-Hung Han and In Lee, “Optimal placement of piezoelectric sensors and actuators for vibration control of a composite plate using genetic algorithms”, Smart Mater. Struct., 1999, 8, pp. 257–267.
- [23] Probir Kumar Ray, Ajay Mahajan, “A genetic algorithm-based approach to calculate the optimal configuration of ultrasonic sensors in a 3D position estimation system”, Robotics and Autonomous Systems, 2002, 41, pp. 165–177.
- [24] van Laarhoven PJM, Aarts EHL., “Simulated annealing: theory and applications”, Reidel Publishing Co, 1987.
- [25] Mahfoud S. W., Goldberg D.E., “Parallel recombinative simulated annealing: a genetic algorithm”, 1995, Parallel Computing, 21, pp. 1–28.
- [26] Yip PCP, Pao YH., “Combinatorial optimization with use of guided evolutionary simulated annealing”, 1995, IEEE Trans Neural Networks, 6, pp. 290–5.
- [27] De Werra D, Hertz A., “Tabu search techniques: a tutorial and application to neural networks”, OR Spectrum, 1989, 11, pp. 131–41.
- [28] Glover F., “Tabu search: part I.”, ORSA J Computing, 1989, 1, pp. 190–206.
- [29] Glover F., “Tabu search: part II”, ORSA J Computing, 1990, 2, pp. 4–32.
- [30] Kirkegaard P. H., Brincker R., “On optimal location of sensors for parametric identification of linear structural systems”, Mechanical Systems and Signal Processing, 1994, 8(6), pp. 639-647.
- [31] Kumar S., Seinfeld J. H., “Optimal location of measurements in tubular reactors”, Chem. Eng. Sci., 1978, 33, pp. 1507–1516.
- [32]. Harris T. J., Macgregor J. F., Wright J. D., “Optimal sensor location with an application to a packed bed tubular reactor”, AIChE Journal, 1980, 26, pp. 910–916.
- [33] Jùrgensen S. B., Goldschmidt L., Clement K., “A sensor location procedure for chemical processes”, Comp. Chem. Eng., 1984, 8, pp. 195–204.
- [34] Muller P. C., Weber H. I., “Analysis and optimization of certain qualities of observability and controllability for linear dynamic systems”, Automatica, 1972, 8, pp. 237.
- [35] Damak T., Babary J. P., Nihtila M. T., “Observer design and sensor location in distributed parameter bioreactors”, Proc. DYCORN’92, 1992, pp. 315–320.
- [36] Dochain D., Tali-Maamar N., Babary J. P., “Influence of the sensor location on the practical observability of a fixed-bed bioreactor”, Proc. 13th IFAC World Congress, San Francisco, CA, 1996, pp. 491-496.
- [37] Alain Vande Wouwer, Nicolas Point, Stephanie Porteman, Marcel Remy “An approach to the selection of optimal sensor locations in distributed parameter systems”, Journal of Process Control, 2000, 10, pp. 291–300.
- [38] Gorman M. R., “Plate waves acoustic emission”, J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90, pp. 358-364.

- [39]. Ziola S. M., Gorman M. R, "Source location in thin plates using cross correlation", J. Acoust. Soc. Am., 1991, Vol. 90, (5).
- [40] Asty M., "Acoustic emission source location on spherical or plane surface", NDT International, 1978, Vol. 11 (5), pp. 223-226.
- [41] Barat P., Kalyanasundaram P., Baldev Raj., "Acoustic emission source location on a cylindrical surface", NDT & E, 1993, Vol. 26 (6), pp. 295-297.
- [42] Lympertos E., Dermatas E., "Acoustic emission source location using the lower-frequencies of flexural waves", 6th International Workshop on Mathematical methods in Scattering Theory and Biomedical Engineering, Tsepelovo Hellas, 2003.
- [43] Lympertos E., Kappatos V., Dermatas E., "Acoustic-emission source location in typical structures using genetic algorithms" 3rd Hellenic Conference on Artificial Intelligence, Samos Hellas, 2003 May 5-8, pp.129-138.
- [44] Tobias A., "Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors", Non-Destructive Testing, 1976, Vol. 9(1), pp. 9-12.
- [45] Toyama N., Koo J. H., Oishi R., Enoki M., Kishi T., "Two-Dimensional AE source location with two sensors in thin CFRP plates", Materials Science Letters, 2001, Vol. 20, pp. 1823-1825.
- [46] Hegazy Tamir, Vachtsevanos George, "Sensor placement for isotropic source localization".

Ακουστική σκέδαση από διαπερατό σφαιροειδές

Αριστείδης Δ. Κώτσης
Υ.Δ. ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ
15773 Αθήνα
akotsis@mail.ntua.gr

Ιωάννης Α. Ρουμελιώτης
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ
15773 Αθήνα
iroumel@cc.ece.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα που μελετάται είναι η σκέδαση επίπεδου ακουστικού κύματος από ένα επίμηκες ή πεπλατυσμένο διαπερατό σφαιροειδές. Δύο διαφορετικές μέθοδοι ακολουθούνται για τον υπολογισμό. Στην πρώτη το πεδίο πίεσης αναπτύσσεται κάνοντας χρήση σφαιροειδών κυματικών συναρτήσεων. Στη δεύτερη, μια μέθοδος διαταραχής του συνόρου, το πεδίο εκφράζεται με σφαιρικές κυματικές συναρτήσεις, ενώ η εξίσωση της επιφάνειας του σφαιροειδούς δίνεται σε σφαιρικές συντεταγμένες. Αναλυτικές εκφράσεις προκύπτουν για το σκεδαζόμενο πεδίο πίεσης και τις διάφορες διατομές σκέδασης, για μικρές τιμές της εκκεντρότητας $h=d/(2a)$, ($h \ll 1$), όπου d η εστιακή απόσταση του σφαιροειδούς και $2a$ το μήκος του άξονα περιστροφής του. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτουν ακριβείς εκφράσεις κλειστής μορφής για τους συντελεστές $g^{(2)}$ και $g^{(4)}$ στη σχέση $s(h)=s(0)[1+g^{(2)}h^2+g^{(4)}h^4+O(h^6)]$ που εκφράζει το σκεδαζόμενο πεδίο και τις διάφορες διατομές σκέδασης. Αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτουν για διάφορες τιμές των παραμέτρων. Οι τελικοί τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των διατομών σκέδασης για κάθε μικρή τιμή του h . Η ορθότητα των αποτελεσμάτων μας, πέρα από τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων επίλυσης που δίνουν τα ίδια αποτελέσματα, ελέγχονται κάνοντας χρήση του θεωρήματος πρόσω σκέδασης.

ABSTRACT

The scattering of a plain acoustic wave from a prolate or oblate penetrable spheroid is considered. Two different methods are used for the evaluation. In the first, the pressure field is expressed in terms of spheroidal wave functions. In the second, a shape perturbation method, the field is expressed in terms of spherical wave functions only, while the equation of the spheroidal boundary is given in spherical coordinates. Analytical expressions are obtained for the scattered pressure field and the scattering cross-sections, when the solution is specialized to small values of the eccentricity $h=d/(2a)$, ($h \ll 1$), with d the interfocal distance of the spheroid and $2a$ the length of its rotation axis. In this case exact, closed-form expressions, are obtained for the expansion coefficients $g^{(2)}$ and $g^{(4)}$ in the relation $s(h)=s(0)[1+g^{(2)}h^2+g^{(4)}h^4+O(h^6)]$ expressing the scattered field and the various scattering cross-sections. Numerical results are obtained for various values of the parameters. The final formulas can be used for the calculation of the various cross-sections, for each small value of h . Another check for the correctness of our results, moreover to the use of two different methods for the solution, is the validity of the forward scattering theorem.

Εισαγωγή

Η μελέτη ακουστικής σκέδασης από σφαιροειδές είναι παλιό πρόβλημα με πολυάριθμες εφαρμογές. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την επίλυση του

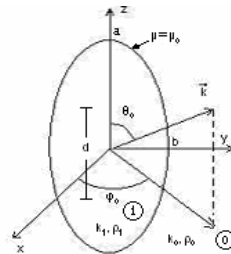
στο παρελθόν. Από τις πολλές δημοσιεύσεις, που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με διάφορες μεθόδους, αναφέρουμε εδώ μόνο μερικές πρόσφατες [1-3].

Σε αυτή την εργασία μελετάται η σκέδαση ενός επίπεδου ακουστικού κύματος από ένα διαπερατό, επίμηκες ή πεπλατυσμένο σφαιροειδές. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η γεωμετρία ενός επίμηκους σφαιροειδούς. Η εστιακή του απόσταση είναι d , ενώ a και b είναι τα μήκη του μεγάλου και του μικρού ημιάξονα του, αντίστοιχα. Το επίμηκες σφαιροειδές είναι και το μόνο που μελετάται αναλυτικά, ενώ άμεσα προκύπτουν οι αντίστοιχες εκφράσεις για το πεπλατυσμένο.

Χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικές μεθόδους για την επίλυση. Στην πρώτη το πεδίο πίεσης εκφράζεται με χρήση σφαιροειδών κυματικών συναρτήσεων, ενώ στη δεύτερη, μια μέθοδο διαταραχής του συνόρου, το πεδίο εκφράζεται με σφαιρικές κυματικές συναρτήσεις και η εξίσωση της επιφάνειας του σφαιροειδούς δίνεται σε σφαιρικές συντεταγμένες. Όταν περιοριζόμαστε σε μικρές τιμές της εκκεντρότητας $h = d/(2a)$, ($h \ll 1$) προκύπτουν αναλυτικές εκφράσεις της μορφής $s(h) = s(0)[1 + g^{(2)}h^2 + g^{(4)}h^4 + O(h^6)]$ για το σκεδαζόμενο πεδίο πίεσης και τις διάφορες διατομές σκέδασης. Οι συντελεστές ανάπτυξης $g^{(2)}$ και $g^{(4)}$ δίνονται από ακριβείς εκφράσεις κλειστής μορφής ανεξάρτητες του h , ενώ το $s(0)$ αντιστοιχεί σε σφαίρα με ακτίνα a ($h=0$).

Το κύριο πλεονέκτημα μιας τέτοιας αναλυτικής λύσης είναι η γενικότερη ισχύς της για κάθε μικρή τιμή του h , ενώ όλες οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν επανάληψη του υπολογισμού για κάθε h .

Η σκέδαση από διαπερατό σφαιροειδές εξετάζεται στην ενότητα 1 ενώ στην ενότητα 2 δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 1. Γεωμετρία του σκεδαστή.

1. Σκέδαση από διαπερατό σφαιροειδές

1.1 Μέθοδος με χρήση σφαιροειδών κυματικών συναρτήσεων

Εφαρμόζουμε πρώτα τη μέθοδο με χρήση σφαιροειδών κυματικών συναρτήσεων. Το προσπίπτον στον σκεδαστή του Σχήματος 1 επίπεδο κύμα πίεσης εκφράζεται ως [4], (ο παράγων χρόνου $\exp(-j\omega t)$ παραλείπεται)

$$p_i = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n j^n \frac{\epsilon_m}{N_{mn}} R_{mn}^{(1)}(c_0, \cosh m) S_{mn}(c_0, h) \cdot S_{mn}(c_0, \cos q_0) \cos[m(f - f_0)] \quad (0.1)$$

όπου οι γωνίες θ_0 και ϕ_0 ορίζουν τη διεύθυνση πρόσπτωσης, m, h, f είναι οι σφαιροειδείς συντεταγμένες, $R_{mn}^{(1)}$ και S_{mn} οι ακτινικές και γωνιακές, αντίστοιχα, σφαιροειδείς συναρτήσεις πρώτου είδους, $\epsilon_0 = 1$ και $\epsilon_m = 2, m \geq 1$ ο παράγοντας

Neumann, $c_0=k_0d/2$ (k_0 ο κυματαριθμός έξω από το σφαιροειδές), ενώ η σταθερά κανονικοποίησης N_{mn} είναι [5]

$$N_{mn} = 2 \sum_{r=0,1}^{\infty} \frac{(d_r^{mn})^2 (r+2m)!}{(2r+2m+1)r!} \quad (0.2)$$

Ο τόνος πάνω από το σύμβολο άθροισης στην (0.2) σημαίνει ότι όταν το $n-m$ είναι άρτιο/περιττό η άθροιση ξεκινά από την πρώτη/δεύτερη τιμή του r και συνεχίζει μόνο με τιμές ίδιας περιττότητας με αυτή. Οι συντελεστές ανάπτυξης d_r^{mn} ορίζονται στις [5,6].

Το σκεδαζόμενο πεδίο και το πεδίο στο εσωτερικό του σφαιροειδούς είναι

$$p_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n R_{mn}^{(3)}(c_0, \cosh m) S_{mn}(c_0, h) (A_{mn} \cos mf + B_{mn} \sin mf) \quad (0.3)$$

$$p_{in} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n R_{mn}^{(1)}(c_1, \cosh m) S_{mn}(c_1, h) (\Gamma_{mn} \cos mf + \Delta_{mn} \sin mf) \quad (0.4)$$

αντίστοιχα, όπου $R_{mn}^{(3)}$ είναι οι ακτινικές σφαιροειδείς συναρτήσεις τρίτου είδους, $c_1=k_1d/2$ (k_1 ο κυματαριθμός στο σφαιροειδές) και A_{mn} , B_{mn} , Γ_{mn} και Δ_{mn} οι άγνωστοι συντελεστές ανάπτυξης. Ικανοποιούμε τις οριακές συνθήκες

$$p_i + p_s = p_{in}, \quad \frac{1}{r_0} \frac{\partial(p_i + p_s)}{\partial m} = \frac{1}{r_1} \frac{\partial p_{in}}{\partial m} \quad (0.5)$$

για $\mu = \mu_0$, όπου r_1 και r_0 οι πυκνότητες του σφαιροειδούς και του περιβάλλοντα χώρου, αντίστοιχα, κάνουμε χρήση των ορθογωνικών ιδιοτήτων των γωνιακών σφαιροειδών και των τριγωνομετρικών συναρτήσεων και στη συνέχεια αναπτύσσουμε τις σφαιροειδείς συναρτήσεις σε σφαιρικές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις [5]

$$R_{mn}^{(1)}(c, \cosh m) S_{mn}(c, h) = \sum_{s=0,1}^{\infty} j^{m-n+s} d_s^{mn}(c) P_{m+s}^m(\cos q) j_{m+s}(kr) \quad (0.6)$$

$$R_{mn}^{(3)}(c, \cosh m) S_{mn}(c, h) = \sum_{s=0,1}^{\infty} j^{m-n+s} d_s^{mn}(c) P_{m+s}^m(\cos q) h_{m+s}(kr)$$

όπου r, θ είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες, P_{m+s}^m είναι οι προσαρτημένες συναρτήσεις Legendre και j_{m+s} και h_{m+s} οι σφαιρικές συναρτήσεις Bessel και Hankel πρώτου είδους αντίστοιχα. Προκύπτει έτσι τελικά ένα άπειρο σύστημα γραμμικών, μη ομογενών εξισώσεων για τους συντελεστές ανάπτυξης A_{mn} (ή B_{mn}) της ακόλουθης μορφής (μέχρι την τάξη h^4):

$$a_{n,n-4} A_{n-4} + a_{n,n-2} A_{n-2} + a_{n,n} A_n + a_{n,n+2} A_{n+2} + a_{n,n+4} A_{n+4} = K_n \quad (0.7)$$

Ο δείκτης n παραλείπεται από τα διάφορα a και A στην (0.7) για λόγους απλότητας.

Για μικρές τιμές του $h=d/2a$ θέτουμε (μέχρι την τάξη h^4)

$$\begin{aligned} a_{n,n} &= D_{n,n}^{(0)} + h^2 D_{n,n}^{(2)} + h^4 D_{n,n}^{(4)} + O(h^6), \\ a_{n,n\pm 2} &= h^2 D_{n,n\pm 2}^{(2)} + h^4 D_{n,n\pm 2}^{(4)} + O(h^6), \quad a_{n,n\pm 4} = h^4 D_{n,n\pm 4}^{(4)} + O(h^6) \end{aligned} \quad (0.8)$$

$$K_{n,n} = K_n^{(0)} + h^2 K_n^{(2)} + h^4 K_n^{(4)} + O(h^6) \quad (0.9)$$

όπου τα D και K είναι γνωστά. Τα A (ή B) προκύπτουν με την επίλυση του συστήματος (0.7) με τη μέθοδο Cramer, ακολουθώντας βήματα ανάλογα με αυτά στην [7]. Χρησιμοποιώντας την ασυμπτωτική ανάπτυξη για την $h_{m+s}(kr)$ βρίσκουμε την έκφραση για το μακρινό πεδίο

$$p_s = \frac{e^{jkr}}{kr} G(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \quad (0.10)$$

όπου

$$G(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{s=0,1}^{\infty} j^{-n-1} d_s^{mn} P_{m+s}^m(\cos q) C_{mn} \cos[m(\mathbf{f} - \mathbf{f}_0)] \quad (0.11)$$

είναι το εύρος σκέδασης.

Η όπισθεν (sonar) (σ_b), η πρόσθια (σ_f) και η ολική (\mathbf{Q}_t) διατομή σκέδασης ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_b}{I^2} &= \frac{1}{p} |G(\mathbf{p} - \mathbf{q}_0, \mathbf{p} + \mathbf{f}_0)|^2, \quad \frac{\sigma_f}{I^2} = \frac{1}{p} |G(\mathbf{q}_0, \mathbf{f}_0)|^2, \\ \frac{\mathbf{Q}_t}{I^2} &= \frac{1}{4p^2} \int_{q=0}^p \int_{f=0}^{2p} |G(\mathbf{q}, \mathbf{f})|^2 \sin q dq d\mathbf{f} \end{aligned} \quad (0.12)$$

με λ το μήκος κύματος των ακουστικών κυμάτων έξω από το σφαιροειδές.

Για μικρές τιμές του h αναλυτικές εκφράσεις, κλειστής μορφής μπορούν να προκύψουν για το $G(\theta, \varphi)$ και για τα σ_b, σ_f και \mathbf{Q}_t έπειτα από μακροσκελείς υπολογισμούς. Οι εκφράσεις αυτές έχουν τη μορφή

$$s(h) = s(0)[1 + g^{(2)}h^2 + g^{(4)}h^4 + O(h^6)] \quad (0.13)$$

Το $s(0)$ αντιστοιχεί σε σφαίρα με ακτίνα a ($h=0$).

1.2 Μέθοδος με χρήση μόνο σφαιρικών κυματικών συναρτήσεων.

Εφαρμόζουμε στη συνέχεια τη δεύτερη μέθοδο κάνοντας χρήση μόνο σφαιρικών κυματικών συναρτήσεων. Το προσπίπτον επίπεδο κύμα εκφράζεται τώρα ως εξής[4]

$$\begin{aligned} p_i &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n j^n (2n+1) \epsilon_m \frac{(n-m)!}{(n+m)!} j_n(k_0 r) P_n^m(\cos q) \cdot \\ &\quad \cdot P_n^m(\cos q_0) \cos[m(\mathbf{f} - \mathbf{f}_0)] \end{aligned} \quad (0.14)$$

όπου η γωνία φ είναι κοινή σε σφαιρικές και σφαιροειδείς συντεταγμένες.

Το σκεδαζόμενο και το πεδίο στο εσωτερικό του σφαιροειδούς είναι

$$p_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n h_n(k_0 r) P_n^m(\cos q) (A_{mn} \cos mf + B_{mn} \sin mf) \quad (0.15)$$

$$P_{in} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n j_n(k_1 r) P_n^m(\cos q) (\Gamma_{mn} \cos mf + \Delta_{mn} \sin mf) \quad (0.16)$$

αντίστοιχα, όπου τα A,B,Γ,Δ είναι διαφορετικά από αυτά της πρώτης μεθόδου.

Για να ικανοποιήσουμε τις οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του σφαιροειδούς, εκφράζουμε την εξίσωση της σαν συνάρτηση των r και θ και χρησιμοποιούμε το αναπτύγμα της ως προς h για $h \ll 1$ [8]

$$r = \frac{a}{\sqrt{1 - \nu \sin^2 q}} = a \left[1 - \frac{h^2}{2} \sin^2 q - \frac{h^4}{2} \left(\sin^2 q - \frac{3}{4} \sin^4 q \right) + O(h^6) \right] \quad (0.17)$$

$$\text{όπου } \nu = 1 - \frac{a^2}{b^2} = -h^2 - h^4 + O(h^6) \quad (0.18)$$

Χρησιμοποιώντας την (0.17) προκύπτουν αναπτύγματα για τα $j_n(kr)$, $h_n(kr)$, $j'_n(kr)$, $h'_n(kr)$, $j_n(kr)/kr$ και $h_n(kr)/kr$, όπου οι τόνοι δηλώνουν παραγώγους ως προς τα ορίσματα. Αντικαθιστούμε τα αναπτύγματα αυτά στις (1.14)-(0.16) ικανοποιώντας τις οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του σφαιροειδούς. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις ορθογωνικές ιδιότητες των συναρτήσεων Legendre και των τριγωνομετρικών συναρτήσεων προκύπτει και πάλι ένα άπειρο σύστημα γραμμικών, μη ομογενών εξισώσεων για τους συντελεστές ανάπτυξης A και Γ (ή B και Δ) της ακόλουθης μορφής (μέχρι την τάξη h^4):

$$\sum_{s=n, n \pm 2, n \pm 4} (a_{n,s} A_s + b_{n,s} \Gamma_s) = K_s, \quad \sum_{s=n, n \pm 2, n \pm 4} (a'_{n,s} A_s + b'_{n,s} \Gamma_s) = K'_s \quad (0.19)$$

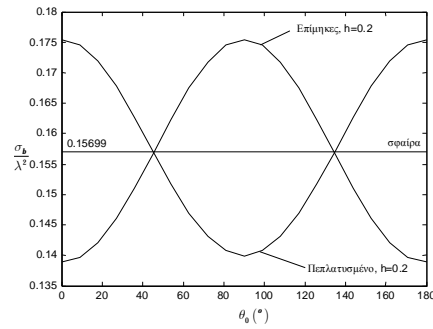
Τα a, b, a', b', K, K' έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτά στις (0.8) και (0.9). Και πάλι με βήματα ανάλογα με αυτά στην [7] χρησιμοποιούμε την μέθοδο Crammer για να υπολογίσουμε τα A,Γ. Χρησιμοποιώντας την ασυμπτωτική έκφραση για την h_n βρίσκουμε ξανά την (0.10), όπου αυτή τη φορά

$$G(q, f) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (-j)^{n+1} P_n^m(\cos q) (A_{mn} \cos mf + B_{mn} \sin mf) \quad (1.20)$$

Τα υπόλοιπα βήματα είναι ανάλογα με αυτά της πρώτης μεθόδου και δε θα επαναληφθούν. Για πεπλατυσμένο σφαιροειδές αντικαθιστούμε το h^2 με $-h^2$ σε κάθε περίπτωση.

2. Αριθμητικά αποτελέσματα

Στο σχήμα 2 φαίνεται το S_b σα συνάρτηση του q_0 , για διαπερατό επίμηκες σφαιροειδές, με $\rho_1 / \rho_0 = 1.22$, $k_0 / k_1 = 1.27$, $a / l = 0.7$ και $h = 0.2$. Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα του ϕ_0 και συμμετρικά γύρω από $\theta_0 = 90^\circ$, όπως επιβάλλει η γεωμετρία του σκεδαστή. Ένας ακόμη έλεγχος για την ορθότητα των αποτελεσμάτων, πέρα από τη χρήση δύο μεθόδων για την επίλυση του προβλήματος, είναι η ισχύς του θεωρήματος της πρόσω σκέδασης που στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει τη μορφή $Q / l^2 = \text{Im}[G(q_0, j_0)] / p$. Επίσης για $\rho_1 \rightarrow 0$ ($\rho_1 \rightarrow \infty$) τα αποτελέσματα πρέπει να συμπίπτουν με αυτά της σκέδασης από μαλακό (σκληρό) σφαιροειδές.



Σχήμα 2. Οπισθεν (sonar) διατομή σκέδασης

3. Αναφορές

- [1] J.P.Barton, N.L.Wolff, H.Zhang and C.Tarawneh, "Near-Field calculations for a rigid spheroid with an arbitrary incident acoustic field", J.Acoust.Soc.Am.,vol 113(3)pp. 1216-1222, March 2003.
- [2] T.M.Acho, "Scalar wave scattering of a prolate spheroid as a parameter expansion of that of a sphere", Quart. Appl. Math, vol.L(3), pp.451-468, Sept.1992.
- [3] G.S.Sammelmann, D.H.Trivett and R.H.Hackman, "High-frequency scattering from rigid prolate spheroids", J.A.S.A. vol.83 (1), pp 46-54, Jan.1988.
- [4] P.M.Morse and H.Feshbach, Methods of Theoretical Physics, McGraw-Hill,New York, 1953.
- [5] C.Flammer, Spheroidal Wave Functions, Stanford CA, Stanford Univ. Press, 1957.
- [6] G.C. Kokkorakis and J.A.Roumeliotis, "Acoustic eigenfrequencies in concentric spheroidal-spherical cavities", J.S.V. Vol.206 (3), pp.287-308, 1997.
- [7] J.A.Roumeliotis and J.G.Fikioris "Scattering of plane waves from an eccentrically coated metallic sphere", J.Franklin Inst., vol.312 (1), pp.41-59, July 1981.
- [8] G.C.Kokkorakis and J.A.Roumeliotis, "Acoustic eigenfrequencies in concentric spheroidal-spherical cavities: calculation by shape perturbation", J.Sound Vibr., vol.212 (2), pp337-355, 1998.

Η Ακουστική ως συνδεδετικός κρίκος ανάμεσα στην Μουσική και την Αρχιτεκτονική

Νίκος Τσινίκας, Αρχιτέκτων, Καθηγητής Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σχέση της μουσικής με την αρχιτεκτονική συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με την ακουστική. Στην ομιλία αυτή θα επιχειρηθεί να αναδειχθεί αυτή η σχέση σε επιμέρους ενότητες.

Στην πορεία ‘από την μουσική προς την ακουστική προς την αρχιτεκτονική’ θα αναφερθούν: η σχέση της συγχορδίας ματζόρε με το ορθό τρίγωνο, η ‘αρχιτεκτονική’ του θορύβου, η περιβάλλουσα επιφάνεια των κομματισμών, η σχέση του λαβύρινθου με τις ηχοπαγίδες, υποκειμενική πρόταση σχέσης των ήχων με τα χρώματα και τέλος ο ρόλος που παίζουν οι συντομογραφίες, οι συντμήσεις, οι συμβολισμοί και οι ενδείξεις εκτέλεσης της μουσικής ως προς την ακουστική.

Στην ενότητα ‘απεικονίσεις ήχων-θορύβων-μουσικής’ θα παρουσιαστούν παραδείγματα: ‘μεταγραφής’ της μουσικής στην ζωγραφική, ‘μουσικά’ γλυπτά και εγκαταστάσεις, καταγραφής-απεικόνισης της μουσικής και τρόποι οπτικής απεικόνισης ήχων.

Στην πορεία ‘από την αρχιτεκτονική της μουσικής προς την μουσική της αρχιτεκτονικής’ παρουσιάζονται: τρόποι ‘μετάφρασης’ των εικόνων σε ήχους, ο ήχος στο τούνελ του M. Brewster, η μουσική ορολογία ως ‘πηγή έμπνευσης’ αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, ο κανόνας και το *stretto* και γίνεται προσπάθεια υποκειμενικής μετάφρασης όρων μουσικής, ακουστικής, αρχιτεκτονικής.

Η ομιλία ολοκληρώνεται με την ενότητα ‘από τα μουσικά όργανα προς τις αίθουσες συναυλιών’ όπου παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογής όπως: *The Temple of Music 1617*, *Misurgia Universalis 1650*, Πύργος νερού, αιολική άρπα, τα έργα του I. Ξενάκη (‘Διάτοπον’, ‘Πολύτοπον’, ‘Musical Scherzo’), ο ‘ηχητικός’ κύλινδρος του B. Leitner, η ‘χωρική’ μουσική του P. Boulez και το μουσικό όργανο - αίθουσα συναυλιών της E. Fullman.

A. ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΟΥΣΙΚΗ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

A.1. Η ματζόρε συγχορδία και το ορθό τρίγωνο

Οι αναλογίες πλευρών 3/4/5 που έχει το ορθό τρίγωνο, αντιστοιχούν στους φθόγγους ντο, φα και λα ή 1η, 4η και 6η νότα της κλίμακας ντο ματζόρε. Οι νότες φα, λα και ντο είναι οι νότες της συγχορδίας φα ματζόρε και επομένως το ορθό τρίγωνο με πλευρές 3/4/5 αντιστοιχεί σε συγχορδία ματζόρε.

Η σχέση των συχνοτήτων σε Hz ή του μήκος κύματος λ των φθόγκων της μουσικής κλίμακας Ντο ματζόρε ως προς το Do, είναι σχέση ακέραιων αριθμών:

Re/Do = 9/8 (8.98/8 απόκλιση 2%), Mi/Do = 5/4 (5.04/4) 4%, Fa/Do = 4/3 (4.003/3) 3%, Sol/Do = 3/2 (2.997/2) 3%, La/Do = 5/3 (5.045/3) 4%, Si/Do = 15/8 (15.102/8) 10%

Re/Mi = 10/9 (10.101/9 απόκλιση 10%), Mi/Fa = 16/15 (15.891/15 απόκλιση 10%), Fa/Sol = 9/8 (8.979/8 απόκλιση 2%), Sol/La = 10/9 (10.102/9 απόκλιση 10%), La/Si = 9/8 (8.979/8 απόκλιση 2%)

A.2. Η 'αρχιτεκτονική' του θορύβου.

Ήχος με συχνότητα 200 κύκλους το δευτερόλεπτο διαθέτει μήκος κύματος 1.7 μέτρα. Η διάσταση αυτή αναφέρεται στην απόσταση των δύο κορυφών της κυματομορφής. Έτσι, υπάρχει σύνδεση των ήχων με τις διαστάσεις ή αλλιώς υπάρχει σύνδεση της μουσικής των ήχων με τις διαστάσεις των στερεών σχημάτων. 'Αν λοιπόν θεωρήσουμε ένα χώρο με πολλές τυχαίες διαστάσεις όπως ένα δωμάτιο με έπιπλα, τότε, το φάσμα των ήχων που αναλογούν στα αντίστοιχα μήκη κύματος δηλώνει ότι πρόκειται για θόρυβο και όχι για μουσική αφού το χάος των τυχαίων διαστάσεων δεν αντιστοιχεί απαραίτητα με διαστάσεις από καθαρούς τόνους αλλά 'φάλτσες' τυχαίες συχνότητες ήχων.

A.3. Η περιβάλλουσα επιφάνεια. Όταν ο άνθρωπος περπατάει, το κεφάλι του ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με το που βρίσκονται τα πόδια στο περπάτημα. Όταν τα πόδια είναι ανοιχτά, τότε το ύψος του ανθρώπου είναι το ελάχιστο και όταν διασταυρώνονται το ύψος του ανθρώπου είναι το μέγιστο. Η κίνηση είναι πολύ αρμονική και έχει και ρυθμό. 'Αν κάποιος ζωγραφίσει μία αόρατη καμπύλη γραμμή στο κεφάλι του θα δει έκθαμβος ότι είναι μία κανονική κυματομορφή. Αυτή η κυματομορφή έχει δύο χαρακτηριστικά που είναι το μέγεθος των ποδιών που ορίζει βασικά το μήκος κύματος και κατ'επέκταση την συχνότητα και την ένταση του περπατήματος που προκύπτει από το νοηλικό έως το αθλητικό περπάτημα. Όταν περπατάς νοηλικά, μικρή ένταση, το κεφάλι σκαμπανεβάζει ανεπαίσθητα ενώ όταν περπατάς αθλητικά, μεγάλη ένταση, το κεφάλι σκαμπανεβάζει πάρα πολύ. 'Αν κάποιος προσέξει την αόρατη αυτή επιφάνεια των κεφαλιών των ανθρώπων που περπατάνε σε ένα πεζοδρόμιο και σκαμπανεβάζει σαν κυματομορφή με διάφορες συχνότητες λόγω διαφορετικού ύψους των ανθρώπων και με διάφορες εντάσεις λόγω της διαφορετικής έντασης στο περπάτημα, τότε αυτή η τυχαία και χαοτική επιφάνεια είναι μάλλον θόρυβος. Αυτός ο θόρυβος ή αυτό το τυχαίο φάσμα ήχων είναι η οπτική 'αόρατη' παράσταση που συμβαίνει συνέχεια χωρίς να φαίνεται. Είναι ο ηχητικός χώρος της κίνησης των ανθρώπων. Είναι ένα μουσικό 'γλυπτό της φύσης που δεν ακούμε ποτέ, δεν βλέπουμε ποτέ αλλά είναι εκεί. Μοιάζει με τα μεγάλα υφάσματα που ξεδιπλώνουν οι φίλαθλοι στις κερκίδες των σταδίων και κατά ανάλογο τρόπο περπατάνε όπως ξεδιπλώνονται.

A.4. Ο λαβύρινθος και οι ηχοπαγίδες

Η αίσθηση της απόλυτης ησυχίας, συνδέεται με τον λαβύρινθο. Το φαινόμενο της μείωσης της ηχοστάθμης λόγω ανακλάσεων συμβαίνει και όταν ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης των υλικών είναι πολύ μικρός όπως τα σκληρά υλικά. Η γεωμετρία της κατασκευής παίζει τον πρωτεύοντα ρόλο και ακολουθεί η ηχοαπορρόφηση. Με την ακουστική ερμηνεία των πολλών ανακλάσεων πρέπει να συμπεράνουμε ότι όσο πιο δαιδαλώδες είναι ένα κτίριο, τόσο πιο 'ήσυχο' είναι το εσωτερικό του, το άδυτό του.

A.5. Τα χρώματα και οι ήχοι Το φως είναι κυματική μορφή ενέργειας όπως και ο ήχος. Το μήκος κύματος του φωτός είναι πολύ μικρότερο από αυτό των ήχων. Όμως, κάθε χρώμα του φάσματος του φωτός διαθέτει και διαφορετικό μήκος κύματος όπως άλλωστε και οι διαφορετικοί ήχοι. 'Άλλο μήκος κύματος έχει το κίτρινο και άλλο μήκος κύματος έχει το πορφυρό. 'Αν βρούμε την σχέση του μήκους κύματος ανάμεσα στην δεσπόζουσα νότα και την πέμπτη της ίσως δημιουργήσουμε αναλογίες μηκών των στερεών σχημάτων. Τότε ίσως χρωματίσουμε τις νότες, αυθαίρετα μεν αφού δεν συνδέονται τα μήκη κύματος αλλά

αληθοφανή δε αφού αυτό που ενδιαφέρει τελικά είναι η αναλογία των μηκών και όχι το πραγματικό μήκος. Θα είναι σαν να λέμε ότι η κυματομορφή που ακούμε ως ντο είναι κόκκινη και η πέμπτη της που είναι το σολ είναι κίτρινη. Αυτό προκύπτει από την σχέση των δύο μεγεθών, δηλαδή το ντο προς το σολ είναι μία αναλογική σχέση 1 προς 2.3 και το ίδιο συμβαίνει με το κόκκινο ως προς το κίτρινο. Τότε μπορούμε να λέμε ότι σχέσεις πέμπτης είναι το κόκκινο με το κίτρινο ή και ανάποδα σχέση κόκκινου προς κίτρινο είναι μία νότα με την πέμπτη της. Κάτι ανάλογο μας έδειξε και ο Σπίλμπεργκ στο έργο στενές επαφές τρίτου τύπου όπου οι νότες είχαν το δικό τους χρώμα. Ο Νεύτων θεωρούσε 'λογική' -αντιστοιχία του κόκκινου με το ντο. Ο Καντίσκι χρησιμοποιούσε τα τρία βασικά χρώματα, κόκκινο, κίτρινο, μπλε με τα σχήματα του κύκλου του τετραγώνου και του τριγώνου.

A.6. Οι συντομογραφίες, οι συντηρήσεις, οι συμβολισμοί και οι ενδείξεις εκτέλεσης μουσικής ως προς την ακουστική

Abbassamento, χαμήλωμα, σβήσιμο φωνής (ένταση, ισχύς...)

Allargando, επιβράδυνση του tempo και αύξηση της έντασης (αντήχηση...)

Accent, τονισμός, μακρά επέρεση κατά βήμα προς τα πάνω ή προς τα κάτω

Arruive, με έμφαση, τονισμένα (ισχύς και διαύγεια,...)

Con affetto, με έκφραση, με αίσθημα, con anima, με ψυχή, ζωνρά, con brio, φλογερά, ζωνρά, con calore, με θέρμη, con gusto, με γούστο, με στυλ, con moto, με κίνηση ... (υποκειμενικά κριτήρια ακουστικής ...)

sordino, dampfer, mute, σιγαστήρας, με σιγαστήρα σουρντίνα, ως αντικραδασμικός μηχανισμός, ως σιγαστήρας

B. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΗΧΩΝ-ΘΟΡΥΒΩΝ-ΜΟΥΣΙΚΗΣ

B.1. Μεταγραφή της μουσικής στην ζωγραφική

Έργα ζωγράφων που μοιάζουν με παρτιτούρες, άλλα που θυμίζουν κυματομορφές και άλλα που παραπέμπουν σε μουσικές φόρμες, έχουν γίνει από τις αρχές του 20ου αιώνα με την επανάσταση της αφηρημένης ζωγραφικής. Τα χρώματα και τα σχήματα που προσπαθούν να αποδώσουν ήχους, θορύβους και δονήσεις αποτελούν ένα σημαντικό ερευνητικό πεδίο στον χώρο της δημιουργικής τέχνης.

Ο αρχιτέκτων A. Endell, γράφει για την αφηρημένη ζωγραφική το 1898, ότι μόνο η μουσική μπορεί να προκαλέσει τόσο βαθιά συναισθήματα όσο μια τέχνη με μορφές που δεν αναπαριστούν τίποτα.

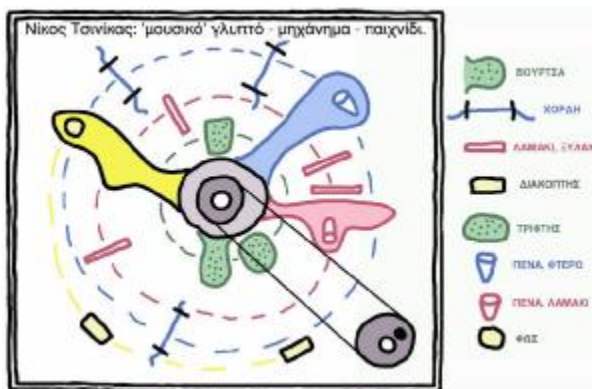
Ο κατάλογος των καλλιτεχνών είναι μεγάλος και περιέχει μεταξύ άλλων τους Wassily Kandinsky, Paul Klee, Piet Mondrian, Marcel Duchamp, Francis Picabia, B. Riley, Arthur Dove, Mikalojus Ciurlionis, Frank Kupka,

Η σχέση του Wassily Kandinsky που έπαιζε τσέλο και πιάνο με τον Arnold Schonberg που ζωγράφιζε, είναι από τις πιο γόνιμες στην ιστορία της τέχνης. Ο Paul Klee ήταν προικισμένος μουσικός. Το έργο του 'Ονειρική πόλη', 1921, παραπέμπει στους αυτοσχεδιασμούς του Kandinski. Χρησιμοποίησε την αρχή της μίμησης και της πολυφωνίας, σαν μία οπτική φούγκα του Bach, αλλά πιο ελεύθερα, με τα σχήματα να αλλάζουν χρώματα να εξελίσσονται και να μετασχηματίζονται από τετράγωνα σε κύκλους...

B.2. 'Μουσικά' γλυπτά και εγκαταστάσεις

Τα μεταμηχανικά-γλυπτά του Jean Tinguely, κίνηση και ήχος, που ονόμαζε metamatics, 1959, με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρα πετούσαν χρώματα σε χαρτί

παράγοντας ταυτόχρονα ‘συγκεκριμένη’ μουσική. Η αντι-μηχανή Baluba, 1961, παράγει θορύβους και κρότους με ανιαρή και άσκοπη επανάληψη μέχρι την αυτοκαταστροφή της.



Σχήμα 1. Περιστρέφοντας την μανιβέλα με σταθερό ρυθμό, ακούγονται ήχοι-θόρυβοι, (αρμονικοί ή όχι), από: α) πένα σε χορδές, β) χτυπήματα από πένες σε λαμάκια και τριπήματα από βούρτσες σε τρίφτες. Κάποια στιγμή ανάβουν και λαμπάκια. Οι θέσεις, οι αποστάσεις και τα κρουδίσματα μπορούν να αλλάζουν. Είναι διαδραστική εγκατάσταση ή μακέτα ήχου;

Ο Martin Riches, σπούδασε αρχιτεκτονική αλλά από πολύ νωρίς ασχολήθηκε με την κινητική τέχνη και την ήχου-τέχνη.

Το έργο του ‘talking machine’, ‘ομιλούσα μηχανή’ που δημιούργησε το 1989, διαθέτει 32 αυλούς φωνής, 4 πνεύμονες αέρα, αερο-βαλβίδες, φουσερά και φουσητήρες. Οι βαλβίδες παίρνουν εντολές από κομπιούτερ. Κάθε αυλός φωνής, αποτελείται από μία φλογέρα που αναλογεί στον λάρυγγα και πάνω της ένα ξύλινο συνηχητής που αναπαριστά την κοιλότητα του στόματός μας όταν μιλάμε. Ο συνηχητής ‘φιλτράρει’ τον ήχο της φλογέρας. Το σχήμα των συνηχητών βασίστηκε σε ‘αποτύπωση’ της κοιλότητας μέσω ακτίνων Χ. Τα σύμφωνα υψηλών συχνοτήτων φ, σσ, τ και θ ακούγονται με ειδικές σφυρίχτρες και μικρούς συνηχητές κοιλότητας. Για τα σύμφωνα μ, ν και γκ, τοποθετήθηκαν ειδικές ‘μύτες’.

Ο Steve Roden δημιουργεί μικρά γλυπτά από την οπτική φόρμα που προκύπτει από την ψηφιακή ανάλυση των φωνηέντων της δικής του φωνής όπως το έργο ‘Vowels Spoken’, ‘Ειπωμένα Φωνήεντα’, 2002. Η έμπνευση του χρωματισμού πηγάζει από ένα ποίημα του Arthur Rimbaud.

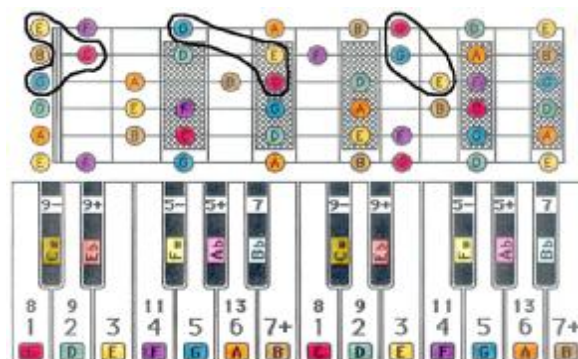
B.3. Καταγραφή, απεικόνιση της μουσικής, παρτιτούρες

Η ‘avant-garde’ μουσική του δεύτερου μισού του 20ου αιώνα ξεκινά με μία ιδέα έξω από την ίδια τη μουσική με ένα ‘θέμα’, μια ιδέα, η οποία εφαρμόζεται στη συνέχεια στον ήχο, τη μουσική (Jorge Silvetti).

Το ρεφρέν του Stockhausen είναι ‘τυπωμένο’ σε μία διαφανή λουρίδα που περιστρέφεται σε διαφορετικές θέσεις για διαφορετικές ερμηνείες.

Μουσικό έργο ‘Continuum’ του Gyorgy Ligeti για πλήκτρα, ‘prestissimo’. Οι 2 νότες που επαναλαμβάνονται στα πρώτα μέτρα, είναι ίδιες για τα 2 χέρια. Δεξί δάχτυλο στο Σιβ, αριστερό στο Σολ και αμέσως αντιστροφή των δαχτύλων. Οι γρήγορες κινήσεις αλληλο-εξουδετερώνουν τον ήχο και δεν ακούγεται τίποτα!. Φαίνεται ότι το κομμάτι αυτό δεν είναι φτιαγμένο για μουσική αλλά είναι ένας

κάποιος περίεργος κάναβος, ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, ένα γραφιστικό κόλπο, μία εικονική μεταφορά, μία οπτική μορφή που παρεπιπτόντως παράγει και ήχο! Θα μπορούσε να θεωρείται ένα μουσικό κομμάτι για απόλυτη ησυχία. Τελικά, η αλήθεια είναι πως γράφτηκε για όργανο με δύο σειρές πλήκτρων, (τσέμπαλο), και ότι τελικά ακούγεται ήχος (Jorge Silveti).



Σχήμα 2. Πάνω: η συγχορδία ντο ματζόρε στην κιθάρα. Οι συγχορδίες βρίσκονται με το συνδυασμό των χρωμάτων, π.χ. το ντο είναι κόκκινο, το μι είναι κίτρινο και το σολ είναι μπλε. Κάτω, οπτική απεικόνιση του πληκτρολόγιου ώστε να βρίσκονται οι φθόγγοι συγχορδιών και κλιμάκων χωρίς πεντάγραμμα.

Η καταγραφή των ήχων-της μουσικής του I. Ξενάκη περιλαμβάνει σχέδιο δενδρώσεων, στοιχεία που χρησιμοποιεί για πρώτη φορά στο κονσέρτο για πιάνο 'Ερίχθων' (1974), σχέδιο με ορθογώνια και σύμβολα στις 'Αχορρίμεις' (1956) όπως και τα περίφημα υπερβολικά παραβολοειδή-σχήματα των γκλιςάντι στο έργο του 'μεταστάσεις' (1955).

B.4. Οπτική απεικόνιση ήχων

Παρουσιάζονται χαρτογραφήσεις ακουστικών ποιτήτων αιθουσών συναυλιών, καμπύλες δονήσεων 'κλάντινι', τρισδιάστατες απεικονίσεις ήχου και απεικονίσεις ήχου από μοντέλα νερού.

Γ. ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΜΟΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

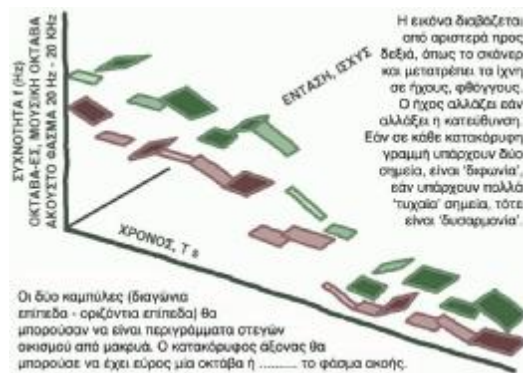
Γ.1. 'Μετάφραση' των εικόνων σε ήχους

Το διάγραμμα με τον άξονα χ , να είναι ο χρόνος, τον άξονα ψ , να είναι οι συχνότητες (όπως η μουσική παρτιτούρα) και την ένταση να απεικονίζεται με το πάτημα ή το έντονο χρώμα, περνάει από ένα σκάνερ και μετατρέπει την εικόνα σε ήχο.

Γ.2. 'Ήχος στο τούνελ 'Geneva by-pass' του M. Brewster

ΤΤΤΤούνελ είναι: σωλήνας, αιολική άρπα, όγκος, συνήχηση, κίνηση, ροή, επανάληψη, ρυθμός, συχνότητα, μήκος, διάστημα, φώτα, σκιές, ήχοι, ανακλάσεις, εστιάσεις, θόρυβος, μήκος κύματος, νότες...

Η αρχιτεκτονική του τούνελ 'βιώνεται' με κίνηση, με προσπέρασμα, με συγκεκριμένη πορεία, με σταθερή ταχύτητα, με ...



Σχήμα 3. 'Μετάφραση' των εικόνων σε ήχους. Το διάγραμμα είναι ακουστική 'μετάφραση' της παρτιτούρας. Εάν χρησιμοποιηθεί τρισδιάστατο σκάνερ εικόνων, τότε ο τρίτος άξονας του διαγράμματος θα παρέχει πληροφορίες έντασης, ισχύος, ενέργειας, πίεσης.

Γ.3. Η μουσική ορολογία ως 'έμπνευση' αρχιτεκτονικού σχεδιασμού

Τυχαία, υποκειμενική, διαισθητική, αυθαίρετη, 'μετάφραση' κάποιων μουσικών όρων προς την αρχιτεκτονική διαμέσου και των συνωνύμων τους.

ΜΟΥΣΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ - ΣΥΝΩΝΥΜΑ = 'μετάφραση' όρων, προς αρχιτεκτονική - 'ΕΡΜΗΝΕΙΑ' σε παρενθέσεις 'ακουστικά' ανάλογα

- Αντιστροφή - Αντίθετο, ανάποδο, από μετάθεση - Ο πιο προσιτός από πολλούς πιθανούς συμμετρικούς μετασχηματισμούς ενός μοτίβου. Καρκινική μουσική ανάγνωση
- Αρμονία - Συμφωνία, ευφωνία, άρθρωση, μελωδικότητα, κλειδί, ταίριασμα, αναλογία
- Διάστημα - Σιωπή, διακοπή, διάκενο, μεσολαβητής, διάλειμμα, κενό, ανάπαυση, χώρος - Απόσταση ανάμεσα σε τόνους (συχνότητες)
- Κλειδί - Γνώμων, απάντηση, εξήγηση, αποσαφήνιση, διεκρίνιση, ιχνοστοιχείο, δείκτης, λύση - Η ταυτότητα, μουσικό σύμβολο, στο πεντάγραμμα που αφορά το όνομα και το τονικό ύψος των φθόγγων (συχνότητες)
- Κλίμακα - Σκάλα, σειρά, ζυγαριά - Σειρά από φθόγγους με συγκεκριμένα διαστήματα μεταξύ τους (φάσμα..)
- Κλίμακα διατονική - Ματζόρε ο+ο+οο+ο+ο+ο όπου ο=φθόγγος κλίμακας +=ημιτόνιο 7φθόγγοι 5ημιτόνια
- Μετατροπία - Διαμόρφωση, χρωματισμός, διακύμανση - Κίνηση από ένα τονικό κέντρο σε άλλο
- Μέτρο - Πρότυπο, κανονισμός, κανόνας, τάξη, τακτοποίηση, ρυθμός
- Μετρονόμος - Μετρητής, ρολόι, ρυθμιστής, ταξινόμος - Προσδιορισμός της τάξης των τόνων του τέμπο, της ταχύτητας του ρυθμού
- Μοτίβο - Δείγμα, πατρών, πρότυπο, κόσμημα, στολίδι, ιδέα, σύμβολο, θέμα
- Παύση - Διακοπή, ανάπαυλα, τομή, έλεγ-χος, καθυστέρηση, δισταγμός, χασμωδία, κατακράτηση - Η μέτρηση της σιωπής ανάλογη με την αξία, (διάρκεια των φθόγγων, συχνότητων)
- Στρέτο - Επικάλυψη του ίδιου μοτίβου με τον εαυτό του ή, αύξηση της ταχύτητας και της (έντασης)

Γ.4. Κανόνας & Stretto

Σε συνέχεια της λογικής του προηγούμενου πίνακα, αυτό που θα διαβάσετε στον κανόνα ως είδος μουσικής σύνθεσης, 'μεταφράστετο' ως προς την αρχιτεκτονική, ως αυτό που δεν περιγράφεται συνήθως σε ένα κτιριολογικό πρόγραμμα.

Κανόνας είναι η σύνθεση στην οποία μία 'φωνή' επαναλαμβάνεται από μία άλλη 'φωνή'. Στον αυστηρό κανόνα οι φωνές είναι ίδιες και αρχίζουν διαδοχικά με χρονική απόσταση εισόδου. Στον κυκλικό κανόνα, οι φωνές ξαναρχίζουν από την αρχή ώστε ο κανόνας να μην τελειώνει. Στον σπειροειδή κανόνα, οι φωνές 'ανεβαίνουν' ένα τόνο ψηλότερα μόλις κλείσει ο κύκλος. Στον αιγιματικό κανόνα, η απόσταση και το διάστημα εισόδου πρέπει να ανακαλυφθούν. Στον μικτό κανόνα συνυπάρχουν ένας αυστηρός κανόνας με μία επιπλέον ελεύθερη φωνή μπάσου.

Τα στοιχεία του κανόνα είναι:

- 1) ο αριθμός των φωνών, 2) η απόσταση εισόδου, 3) το διάστημα εισόδου,
- 4) η κατεύθυνση κίνησης της φωνής και 5) η ρυθμική σχέση των φωνών.

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση εισόδου τόσο δυσκολότερη είναι η αρμονική εξέλιξη.

Ο κυκλικός κανόνας στο πεντάγραμμο μοιάζει εντελώς με κυματομορφή. Η ευθεία κίνηση, ο κατοπτρικός κανόνας, ο καρκινικός κανόνας και ο κατοπτρικός καρκινικός κανόνας σχηματίζουν ένα συμμετρικό σχήμα ως προς δύο άξονες. Ως παράδειγμα εφαρμογής επιλέγεται το Stretto House του αρχιτέκτονα Steven Holl, βασισμένο ως 'παράλληλο' της μουσικής για έγχορδα, κρουστά και τσελέστα του Bela Bartok (1936).

Γ.5. 'Αυθαίρετες' μεταφράσεις όρων μουσικής, ακουστικής, αρχιτεκτονικής

- νότες (τέταρτα, όγδοα,...), - ήχοι, φωνήεντα και σύμφωνα, - εμβάτης, πολλαπλάσια
- παύσεις (τέταρτα, όγδοα,...), - αντήχηση, - κενά και πλήρη
- παρεστιγμένα φθογγόσημα, - επέκταση σε όροφο
- συζεύξεις ως προς τον χρόνο και ως προς την διάρκεια, - αλλοιώσεις των ακουστικών χαρακτηριστικών - 'εν σειρά', σαλοτραπεζαρία, θέατρο-σκηνή
- μέτρο, - βέλτιστη ακουστική, - κάναβος, προδιαγραφές υλικών και στοιχείων

Δ. ΑΠΟ ΤΑ ΜΟΥΣΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΙΘΟΥΣΕΣ ΣΥΝΑΥΛΙΩΝ

Παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογής που δεν μπορούν να ενσωματωθούν ούτε στην κατηγορία των μουσικών οργάνων αλλά ούτε και στην κατηγορία των αιθουσών μουσικής, αφού είναι κάπου ενδιάμεσα.

Δ.1. Robert Fludd, 'The Temple of Music', (1617)

Οι ήχοι - θόρυβοι των χτυπημάτων της σφύρας που ακούγονται διάφορα σύμφωνα, η μέτρηση του βάρους, και η επανάληψη κάνουν τον Πυθαγόρα να θεωρεί ότι η παραγωγή ήχων - μουσικής βασίζεται σε ένα μαθηματικό θεμέλιο. Η μουσική - οργανωμένος ήχος, παράγεται από το πνεύμα της χειροτεχνίας, φυσικής εργασίας, δράσης και το ίδιο συμβαίνει και με τον ρυθμό. Χτυπήματα - ρυθμός - ρολοί - μετρονόμος, πεντάγραμμο, φωνή, μουσικά όργανα - αυλοί, ακοή - κοχλίας..

Δ.2. Athanasius Kircher, 'Musurgia Universalis', (1650)

Φανταστικό, αναγεννησιακό 'ξετρέλαμα', ακουστικών 'λαθών' και ασυνήθιστων ήχων. Ακούγονται έξω, όλοι οι ήχοι που παράγονται εσωτερικά σε 'ειδικούς' χώρους. Ημι-κύλινδροι, ηχο-διαχυτές στους πλευρικούς τοίχους.

Ενσωματωμένη σπείρα στον τοίχο, ενίσχυση, αλλοίωση, κατευθυντικότητα. Εστίαση ηχητικών ακτίνων από κοίλη οροφή.

Δ.3. The Tower Of Memory, Max Eastley

Ένα σύστημα αντλιών που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, κυκλοφορεί το νερό, το φέρνει στο εσωτερικό του πύργου, το ανεβάζει εσωτερικά και το κατεβάζει εξωτερικά. Το κλιμακοστάσιο έχει ανοίγματα-παράθυρα σε συγκεκριμένα σημεία όπου ο καταρράχτης μπορεί, να ακουστεί και να φαίνεται σε διάφορες στάθμες. Στην κορυφή του πύργου υπάρχει μία στοά για να αγναντεύεται το τοπίο. 4 αιολικές άρπες, μία σε κάθε πλευρά, είναι κουρδισμένες διαφορετικά ώστε να δείχνουν την κατεύθυνση και την ένταση του ανέμου. Κάτω, ένα δωμάτιο φωτισμένο με στενές σχισμές στον τοίχο. Σε καθένα από τους 4 τοίχους, γράμματα σχηματίζουν την λέξη μνήμη, φτιαγμένα από μπρούντζο. Τα μπρούντζινα γράμματα αποτελούνται από ομάδες σωλήνων 'αερόφωνα-φλάουτα' που λειτουργούν ως συνηχητές του ήχου που παράγεται από την κίνηση του αέρα από τους απέναντι τοίχους. Εξωτερικά, τα αερόφωνα φλάουτα σχηματίζουν την αντίστροφη και αφηρημένη εικόνα της λέξης μνήμη.

Δ.4. I. Ξενάκης: 'Διάτοπον', 'Πολύτοπον', 'Musical Scherzo'.

Οι 'εγκαταστάσεις' του I. Ξενάκη είχαν τις ιδιαιτερότητές τους ως προς τη θέση των μουσικών, τη θέση του διευθυντή ή των διευθυντών ορχήστρας και την ή τις θέσεις των ακροατών. Θα μπορούσε κάποιος να τις χαρακτηρίσει πολυ-χώρους ή πολυ-όργανα, αλλά για κάποιο μεμονωμένο μουσικό έργο.

Δ.5. 'Ηχητικός' κύλινδρος του B. Leitner, Parc de la Villette, Paris.

Οι 4 διαφορετικές ηχητικές εμπειρίες είναι: α) κυκλικός χώρος, β) μυρμιγκιασμα-αγκάθι, γ) 8 κολώνες ήχου και δ) 'στατικό' ηχητικό πεδίο. Προφανώς, η εγκατάσταση χρησιμοποιεί ηλεκτροακουστικό σύστημα παραγωγής ήχων-θορύβων, πέραν του κυλινδρικού σχήματος των εστιάσεων και των ακουστικών λαθών.

Δ.6. 'Χωρική' μουσική του P. Boulez

Πολυσύνθετη σύνθεση με πραγματική κίνηση των ήχων στον χώρο, (προσφέρει περισσότερα στοιχεία από απλά εφέ και ολοκληρώνει τις χωρικές πληροφορίες μέσα στην 'τυπική' αίθουσα), είναι δυνατό να επιτευχθεί μόνο με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μέσων. Το πείραμα του Boulez, δείχνει την ένταση σύνθεσης 'χωρικής' μουσικής με ψηφιακό εξοπλισμό.

Η διάταξη περιλαμβάνει την ορχήστρα στη μέση και γύρω της τους ακροατές, στην περίμετρο του χώρου 6 όργανα (πίανο, τσέμπαλο, πιάνο, μεταλλόφωνο-vibes, άρπα, μεταλλόφωνο-κουδούνια) και ψηλά στους τοίχους περιμετρικά 6 μεγάφωνα.

Δ.7. Μουσικό όργανο – αίθουσα συναυλιών της E. Fullman

Σε ένα παλιό εργοστάσιο γλυκών στο Austin, τοποθετήθηκαν εσωτερικά, αναρτημένες από τους τοίχους, 120 μεγάλες χορδές. Ο χώρος βάφτηκε μαύρος. Ο μουσικός είναι μέσα στο μουσικό όργανο, ανάμεσα στις χορδές, όπως και οι ακροατές. Είναι αίθουσα συναυλιών – μουσικό όργανο;

Ακουστική εξέλιξη αρχαίου θεάτρου και επίδραση σκηνικού χώρου: Το θέατρο της Μιέζας

Acoustic evolution of ancient theatres and the effects of scenery: A case study of the theatre of Mieza

K. Chourmouziadou and J. Kang
School of Architecture, University of Sheffield,
Sheffield, S10 2TN, U.K.
K.Chourmouziadou@sheffield.ac.uk

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος της συστηματικής μελέτης της ακουστικής ανοιχτών χώρων παραστάσεων της αρχαιότητας. Η εξέλιξη των αρχαίων χώρων παραστάσεων από τη Μινωική Κρήτη έως τη ρωμαϊκή περίοδο έχει πραγματοποιηθεί σε έξι στάδια, βάσει της δομής και των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών τους. Στην εργασία η εξέλιξη αυτή αναφέρεται περιληπτικά, κυρίως όσον αφορά στην ακουστική των χώρων παράστασης, με τη βοήθεια του προγράμματος Raynoise, αποδεικνύοντας, μέσω της προσομοίωσης, ότι το ακουστικό περιβάλλον βελτιώθηκε κατά τη διάρκεια των αιώνων. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην επανάχρηση των θεάτρων τον 20ο αιώνα, στην αποκατάστασή τους και την εξέλιξη της σκηνογραφίας σε αρχιτεκτονική έκφραση. Το προσφάτως ανασκαμμένο Ελληνιστικό θέατρο της Μιέζας εξετάζεται στην αρχική του μορφή, στην πρόταση αποκατάστασης, καθώς και με εγκατεστημένο σκηνικό χώρο. Τα αποτελέσματα της μελέτης επισημαίνουν την επιτυχία της πρότασης αποκατάστασης, ενώ εξετάζονται τα αποτελέσματα της εγκατάστασης τριών περιπτώσεων σκηνικού χώρου και η σημασία επιλογής και σχεδιασμού του από ακουστικής πλευράς.

ABSTRACT

This paper is a part of a systematic study on the acoustics of ancient outdoor performance spaces. The evolution of ancient performance spaces from Minoan Crete to the Roman times was realized in six stages, in terms of layout and architectural characteristics. In this paper this evolution is briefly reviewed from the viewpoint of acoustics based on simulation using software Raynoise, and it is shown that the acoustic environment had been improved during the centuries. The paper then focuses on the re-usage of ancient theatres in the 20th century, their renovations and the development of stage design into architectural expression. It examines the recently discovered Hellenistic theatre of Mieza, in its original form, the restoration proposal and the effects of scenery design. The restoration proposal has been proved generally successful. Corresponding to the restoration proposal, the effectiveness of three scenery designs has been examined, and the importance of scenery for the acoustic conditions has been demonstrated.

Introduction

Extensive research on ancient theatres in Greece started when the first historical excavations revealed evidence of the spaces used for performances, mainly forms built after the 5th century B.C. Previous works relating to ancient performance spaces are found scattered in several fields, including drama, archaeology, architecture, philosophy and acoustics [1-11]. Recently, the acoustics of ancient theatres has been examined through computer simulation [1-3], with carefully selected representation methods and simulation parameters.

This paper first briefly reviews the theatre evolution in antiquity, both in terms of architectural layout and acoustics. It then concentrates on a recently discovered theatre in northern Greece, the theatre of Mieza [4], briefly reviewing its historic information and the new proposals of restoration, and analysing the results from a series of acoustic simulations. Generic types of sceneries are applied to the restoration layout, investigating the acoustic environment.

1. Acoustic evolution of ancient performance spaces

Previous studies have systematically examined six major stages in the evolution of ancient performance spaces in antiquity, both in terms of design and material use [1,3,9]. The earliest form of performance space in ancient Greece was the rectangular Minoan (20th-15th B.C.), found in the courtyards of the palaces of Knossos and Phaestos [5]. This was followed by the Pre-Aeschylean in trapezoid shape, like at Thorikos. Two important phases of the well known Classic theatre, according to their structure and materials [6], the Hellenistic theatre and the advanced Roman design [6-7], were the rest of the major stages of evolution, as illustrated in Figure 1.

Particularly interesting is the process the theatre has undergone from the Classic to the Hellenistic period. Apart from material and layout changes, like the extension of the koilon, or the repositioning of the orchestra, the innovations were connected with changes in the methods of playwriting and performance in that period [8].

A series of computer simulation [9] that has been carried out for the layouts of these performance spaces suggests that the acoustics had been improved in the evolution, both in terms of sound level and reverberation, corresponding for individual types of theatres to previous acoustic research [10-11]. Enclosed forms, steep seating areas, hard materials and high stages had all been useful for improving acoustics. The evolution corresponded to a general increase in sound pressure level (SPL) and a more appropriate reverberation for theatre use [9].

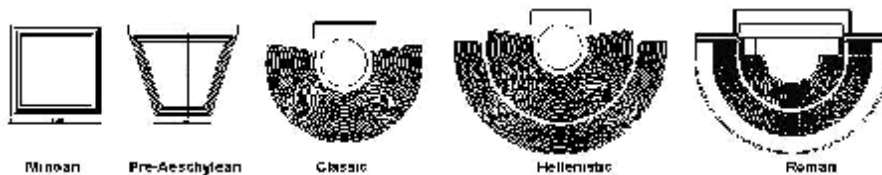


Figure 1. Major types of evolution of outdoor performance spaces in antiquity.

2. The theatre of Mieza

The theatre of Mieza was found by chance in 1992, situated at the southwest part of Mieza, an ancient city at the eastern part of Naoussa. The excavations between 1993 and 1995 uncovered the orchestra, the skene building, and the surviving tiers of seats in the koilon. The theatre was based on a very interesting system of geometrical proportions, that, according to Vitruvius, combines both Greek and Roman guidelines [4]. The theatre is dated to the late Hellenistic to early Roman periods. A research project on its conservation and restoration started by the Aristotle University of Thessaloniki in 1997, funded by the Greek Ministry of Culture. Figure 2 shows the present condition of the theatre.



Figure 2. The theatre of Mieza in its present condition [source: <http://www.akalanthis.gr/mieza-theatro.htm>].

2.1 Characteristics of the theatre and the restoration principles

The theatre is facing east, with a semicircular shape, extending towards the building of the skene. The material of the orchestra is compact earth with 22m diameter. The koilon was divided by four ascending staircases into five wedge-shaped sections of 19 rows of seats, constructed by soft limestone. The skene building, built by soft local limestone, was a two-storied structure. The present condition reveals an asymmetrical theatre, since the initial supporting walls were destroyed. Figure 3 presents the plans of the theatre.

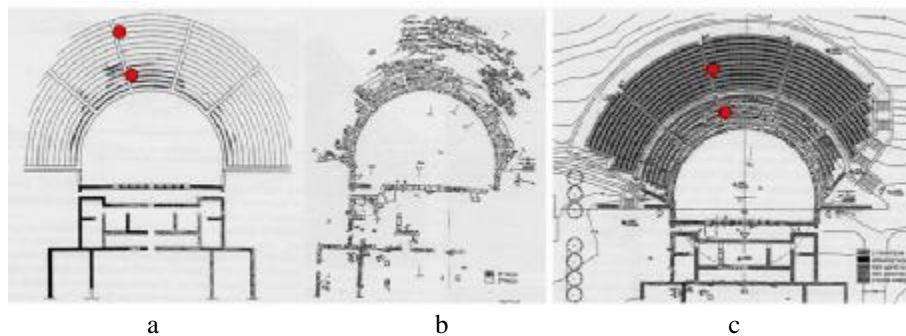


Figure 3. Plans of the theatre of Mieza. a) Original condition, b) Contemporary condition, c) Restoration proposal [4]. The red dots are the receivers in simulation.

The study of the restoration of the theatre was carried out with principles such as authenticity and historical information. The proposed project includes work on the

orchestra, the koilon, the skene building and limited and distinguishable additional structures. Matters like materials and drainage were carefully discussed and the koilon is to retain its present asymmetrical form for avoiding extensive construction and respect the evolution of the theatre. It will include completion of the seven lower rows of seats, using the original material found, construction of the rest of the koilon and new prefabricated temporary structures, which are a metal structural base and movable wooden seats, as illustrated in Figure 3c.

2.2 Acoustic simulation methodology

The acoustic simulation of the theatre of Mieza was carried out using Raynoise [12]. As an input to Raynoise, the 3D representation of the theatre layout with the use of CAAD software is of great importance. Although a simplified representation of the theatre may lead to alterations of reflection patterns, an absolute mimetic representation is usually extremely time consuming. For example, due to software limitations, the theatre of Mieza could be simulated with up to 20,000 rays, while Epidaurus with 10,000 and Aspendus with 5,000, according to their complexity

CAAD software usually represents a circular shape with many linear segments while acoustic software tends to 'break' circular surfaces in triangles with a result of greatly increased memory. Therefore, by representing the circle with linear segments, the calculation time can be reduced. A pilot study with generic configurations has shown that replacing the circular shape with 24 linear segments can produce identical or similar results. Therefore in this study the theatre of Mieza has been represented by 24 segments.

Three configurations are considered in the simulation: the original form of the theatre with boundary diffusion applied to the stage building and the orchestra; the original form with diffusion applied to the whole theatre; and the form based on the restoration proposal. The source is near the centre of the orchestra, simulating a male actor at a height of 1.8m. The absorption and diffusion coefficients are based on the database of Raynoise [12]. It is noted that for the original form they are only an approximation.

For all configurations the orchestra is simulated as soil, the koilon as marble and wood (for the upper part in the restoration proposal), while the skene building is marble with the diffusion characteristics of a flat panel, according to the archaeologists selection of materials [4]. The temperature for these models is at 20°C and the relative humidity is 50%. The frequency for the calculations is from 125 to 4k Hz in 1/3 octaves. Other simulation parameters are selected according to previous studies [1, 3, 9] and the manual's recommendation for external spaces [12].

2.3 Results

Figure 4a shows the SPL at two receiver positions, shown in Figure 3, for all configurations. It can be seen that the additional diffusion in configuration 2 only results in a small SPL reduction, by 1-2dB, since SPL is mainly determined by the direct sound. The SPL values in the restoration proposal are lower than the previous two configurations at large distances, although insignificant. The largest differences appear at low frequencies. The SPL has also been calculated for a receiver line off the central axis of the theatre. Corresponding to the above, although the restoration proposal is effective for the receivers close to the orchestra, for those seated further than 15m from the source the SPL is reduced, compared to the original conditions. It is noted that the absolute values of SPL are generally low, around 30-40dB, with the use of normal human speech power level as the source. Nevertheless, in reality the

actors usually have stronger voices, so that an addition of 12dB should be considered, according to Cavanaugh *et al* [13].

The results of reverberation time (RT) is shown in Figure 4b, demonstrating the effects of the stage building in configurations 1 and 2, although they are mainly presented for comparison, since there are still discussions about whether reverberation is an appropriate index for outdoor spaces. It can be seen that the reflections provided by the stage building contribute to longer RT30 values, by up to 1s, compared to the restoration where the stage building is omitted. The increase of reverberation due to multiple reflections between the koilon and the stage is also a phenomenon of Roman theatres [3, 9], although the Hellenistic theatre type has separate structures, one opposite to the other. As expected, the diffusion results in shorter RT30 values, by about 0.2-0.3s. A similar stage design, like the skene in the original condition, could have the same effect.

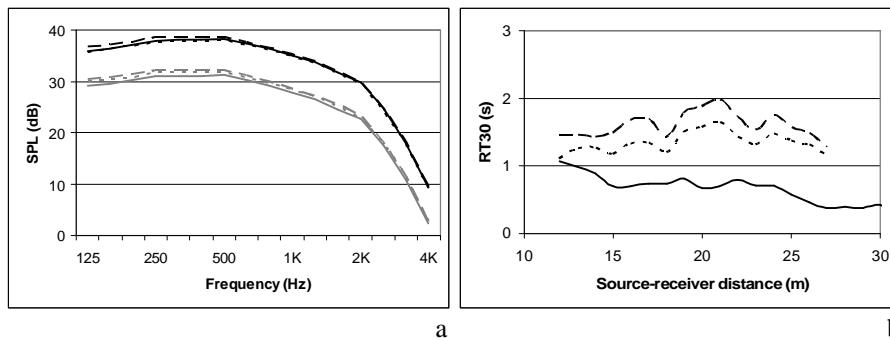


Figure 4. Acoustic indices for all configurations. a) SPL for two receivers, one near (black line) and one far (grey line) from the stage. b) RT30 at 500Hz for a receiver line. Dashed line, original condition; dotted line, original condition with diffusion applied to the whole theatre; solid line, restoration proposal.

The results of definition (Def%), which compares the reflections that arrive to the listener's position within 50ms after the direct sound with the total sound energy, are shown in Figure 5 for all configurations. It is clear that increased diffusion improves the conditions, especially for the sides of the koilon, while the restoration proposal creates an equally advanced acoustic environment for the whole theatre. Similarly, the lateral efficiency (LE), as a measure for the impression of spaciousness based on the ratio of lateral-arriving reflections to total reflections [14], suggests that the restoration proposal is successful. The LE results are also shown in Figure 5. However, the lack of symmetry in the new shape of the theatre seems to differentiate the results significantly between the two sides of the theatre. The speech transmission index (STI) is not considered since in the simulation no background noise was applied.

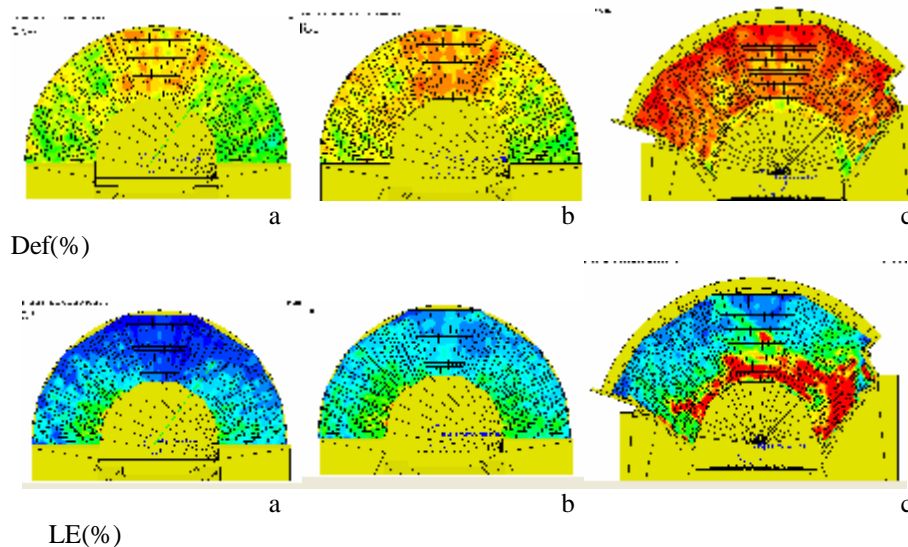


Figure 5. Colour maps presenting definition (%) and lateral efficiency (%) at 500Hz. a) Original condition, b) Original condition with general diffusion, c) Restoration proposal. Blue colour, 0%; red colour, 100%.

The impulse responses at two receivers in the audience area are shown in Figure 6. As can be seen, the reflections in configuration 1 last longer than those in the other two configurations, up to 650ms after the direct source, and are also far more in number. This corresponds to the previous results showing the effect of increased diffusion and the skene building, regarding the restoration proposal.

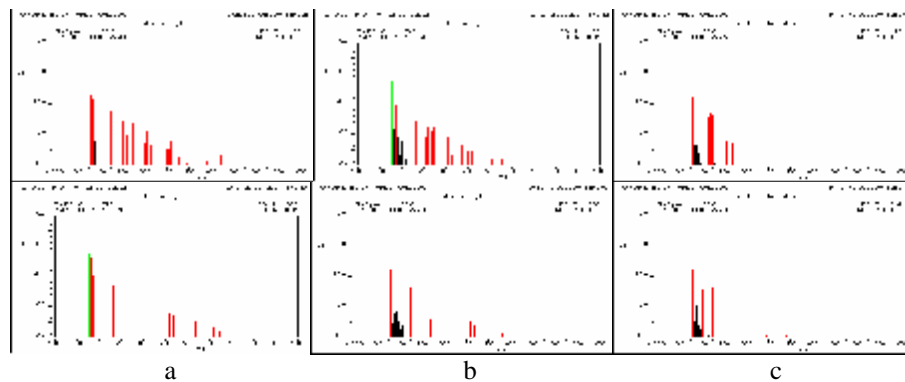


Figure 6. Impulse responses at 500Hz. a) Original condition, b) Original condition with general diffusion, c) Restoration proposal. Green colour, direct sound; red colour, geometrical reflections; black colour, reflections produced by diffusion.

Simulations have also been carried out with diffraction applied to all edges of the theatre. The results show that where the audience plane is above the plane that the seats create, diffraction doesn't affect the results.

2.4 Generic scenery design

This section briefly examines the impact of scenery design on the acoustic environment of ancient performance spaces through the simulation of the theatre of Mieza. Nowadays, temporary stage design is created for each performance. Theatre troupes are travelling during the summer, presenting the play in different ancient and contemporary outdoor theatres each week. Therefore, prefabricated, lightweight scenery is created, which can be adopted by each theatre.

Three generic designs are created in the theatre of Mieza, in order to be compared acoustically and provide initial guidelines for further research and design. The three sceneries are: a simple 10m high wall situated in front of the original building of the skene, a semicircular wall of the same height as in the previous case, and an actual scenery design that has been created by G. Patsas for the performance of *Ecclesiazousai* in Epidaurus in 1993, which involved walls in v-shape, diagonally placed on the orchestra, with different heights [15]. Figure 7 illustrates the SPL and RT30 results for these configurations. It can be seen that SPL differentiates by about 1-2dB, with higher values for the simple wall design. The semicircular wall increases significantly the RT30, by up to 1.2s at specific focus points. It is also noted that in the third case the diagonal walls of the scenery provide additional reflections, sending the sound waves to adjacent areas, thus reducing both SPL and RT30.

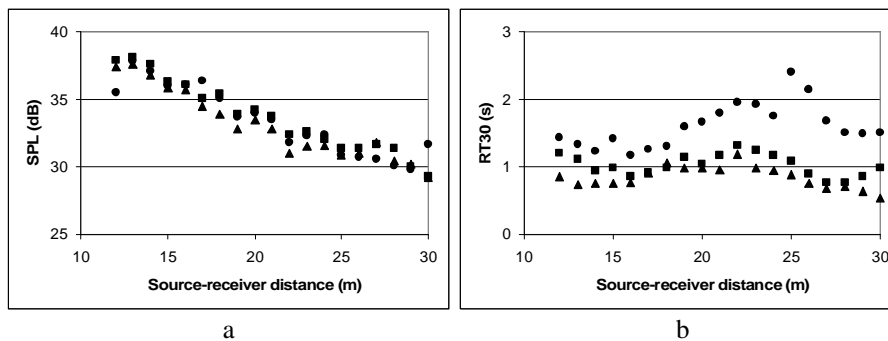


Figure 7. SPL and RT30 at 500Hz along a receiver line. a) SPL, b) RT30. Squares, straight wall; circles, semicircular wall; triangles, scenery designed by G. Patsas.

3. Conclusions

Based on the architectural evolution of ancient performance spaces in antiquity, it has been shown that the acoustic environment improved due to new design and construction methods. The simulation of ancient theatres with circular shapes is based on a new method of representation, which is more accurate and less time consuming. Using this method the acoustic conditions in the theatre of Mieza has been examined in three configurations. The restoration proposal, which is of particular interest, has been proved to be generally successful, especially in terms of definition. Corresponding to the restoration proposal, the effectiveness of three scenery designs has been examined, and the importance of scenery for the acoustic conditions has been demonstrated.

4. Acknowledgements

The authors would like to thank Prof. Tsinikas for his support and Prof. Karadedos for useful discussions regarding the excavations of the theatre sites.

5. References

- [1] Chourmouziadou K., Kang J. "Acoustic simulation of ancient performance spaces: A historical review and auralisation" Auditorium Acoustics: historical and contemporary design and performance. Proceedings of the Institute of Acoustics (IOA), 2002, 24 (4).
- [2] Vassilantonopoulos S.L., Mourjopoulos J.N. "A study of ancient Greek and Roman theatre acoustics" Acta Acustica/Acustica 2003, 89,123-136.
- [3] Chourmouziadou K., Kang J. "Effect of surface characteristics on the acoustic environment of ancient outdoor performance spaces" Research Symposium: Acoustic characteristics of surfaces: measurement, prediction and applications. Proceedings of the Institute of Acoustics (IOA), 2003, 25(4).
- [4] Karadedos G. *et al.* "Restoration of the ancient theatre at Mieza - Archaeological project in Macedonia and Thrace" Thessaloniki, Ministry of Culture, Ministry of Macedonia and Thrace, Aristotle University of Thessaloniki, 2001, 13, 521-534.
- [5] Bell E. "Prehellenic architecture in the Aegean" G. Bell and Sons Ltd, London, 1926.
- [6] Robertson D.S. "Greek and Roman architecture" 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- [7] Vitruvius "The ten books on architecture" translated by Morgan M.H. Harvard University Press, London; Cambridge, 1914.
- [8] Baldry H.C. "The Greek tragic theatre" Chatto & Windus, London, 1971.
- [9] Chourmouziadou K., Kang J. "Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres" Applied Acoustics (under revision).
- [10] Shankland R.S. "Acoustics of Greek theatres" Physics Today 1973, 26, 30-35.
- [11] Canac E. "L'acoustique des theatres antiques. Ses enseignements" Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1967
- [12] LMS Numerical Technologies "Raynoise user's manual: building acoustics and industrial noise simulation" Leuven, 2001.
- [13] Cavanaugh W.J. *et al.* "Speech privacy in buildings" Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34 (4), 475-492.
- [14] Jordan V. "Acoustical design of concert halls and theatres" ASP Ltd., London 1980, 159 and 191.
- [15] Patsas G. "Costumes-Stage design" Ergo Publications, 1995, 158-159.

Μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του θεάτρου της Επιδαύρου

Σταμάτης Βασιλαντωνόπουλος¹

Λέκτορας,

vasilan@mech.upatras.gr

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου¹

Ερευνητής,

Δημήτρης Σκαρλάτος²,

Λέκτορας,

skarlat@mech.upatras.gr

Τηλέμαχος Ζακυνθινός²

Ερευνητής,

Νικόλαος – Αλέξανδρος

Τάτλας¹, Ερευνητής,

Ιωάννης Μουρτζόπουλος¹,

Αναπληρωτής Καθηγητής,

mourjop@wcl.ee.upatras.gr

¹Τμήμα Ηλεκ.Μηχ.&Τεχν. Υπολ., ²Τμήμα Μηχαν-Μηχ. & Αερον.,
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα από πρόσφατες ακουστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου. Οι μετρήσεις αυτές βασίζονται στην χρήση σύγχρονων μεθόδων και επιτρέπουν τον υπολογισμό ακουστικών παραμέτρων όπως: Clarity C-80, Definition D-50, RASTI, IACC, LEF, κ.λ.π. Οι μετρήσεις συγκρίνονται με υπολογιστικό μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης του θεάτρου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζει μερικά πρωτότυπα συμπεράσματα για τις ακουστικές ιδιότητες του θεάτρου σε σχέση με την μορφή και προέλευση των πρώιμων ανακλάσεων, την συχνοτική απόκριση του θεάτρου την χρονο-συχνοτική αλληλοεπίδραση και την αντίληψη του χώρου από τον ακροατή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαιώνουν την πασίγνωστη καλή ακουστική ποιότητα του θεάτρου για την ομιλία, με την καταληπτότητα να παραμένει σε άριστα επίπεδα σε όλες τις θέσεις.

Measurements and Analysis of the Acoustics of the Ancient Theater of Epidaurus

ABSTRACT

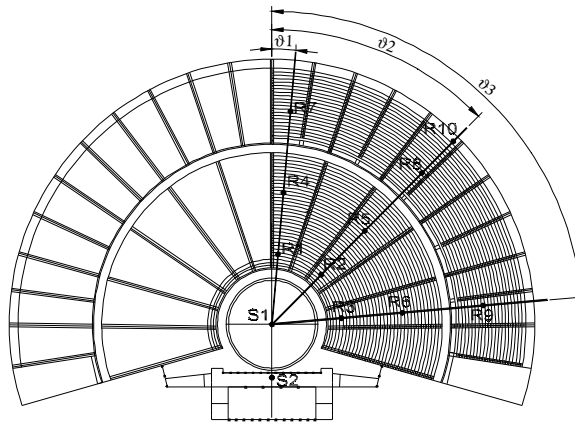
Recent results are presented, from acoustic measurements performed in the ancient open theater of Epidaurus. These measurements were obtained using modern techniques, allowing evaluation of numerous acoustic parameters for the theater, such as: Clarity C-80, Definition D-50, RASTI, IACC, LEF, etc. These measurements and results are also compared to those obtained from a acoustic simulation of the theater's acoustics. The analysis of the results, illustrates many novel aspects of the theater's acoustic properties, such as the pattern and mechanism for the early reflections, the spectral response of the theater, aspects of time-frequency response interaction and aspects of the spatial impression. The results restate the well-known exceptional acoustic quality of the theater for speech, with speech intelligibility remaining nearly perfect at all listener positions.

1. Εισαγωγή

Η καλή ακουστική του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου, προκαλεί το ενδιαφέρον τόσο των ειδικών όσο και των απλών επισκεπτών. Κατά καιρούς υπήρξαν μετρήσεις της ακουστικής του θεάτρου [1,2] αλλά κυρίως λόγω περιορισμών του εξοπλισμού, οι μετρήσεις αυτές παρουσίασαν μόνο μερικές πτυχές του θέματος. Εδώ, παρουσιάζονται νέες αναλυτικές μετρήσεις της ακουστικής του θεάτρου για διάφορες θέσεις ακρόασης, που θα βοηθήσουν στην πληρέστερη κατανόηση των ακουστικών χαρακτηριστικών. Ταυτόχρονα, γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων με ακουστικές προσομοιώσεις για τις ίδιες θέσεις πηγής - δέκτη [3].

2. Μεθοδολογία

Η ακουστική μέτρηση του θεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 28/4/2004 από 2 ομάδες ερευνητών του Παν/μίου Πατρών (Τμήματα Ηλ.-Μηχ. & Τεχ. Υπολ. και Μηχαν.-Μηχ.) και βασίστηκε σε σύγχρονες μετρητικές μεθόδους με χρήση φορητών προσωπικών υπολογιστών (κάρτες ήχου RME και Tascam US 122), λογισμικό WinMLS και B&K Dirac 2.7, μικρόφωνα ACO Pacific και Probe Norsonic 1234, Probe έντασης Norsonic 240, ηχεία ATC SMC 20-2 Active Monitor και JBL EON power 15. Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 1, σε αποστάσεις που δίνονται και στο [3]. Η πηγή τοποθετήθηκε σε ύψος 1,5 m στο κέντρο της ορχήστρας (S1), καθώς και μετατοπισμένη κατά 5m προς το κοίλο. Το σήμα διέγερσης (MLS ή sine sweep) παρήχθη με στάθμη 105 dB-SPL/1m, ενώ ο θόρυβος περιβάλλοντος ήταν κατά μέσο όρο 55 dB (40 dB(A)).

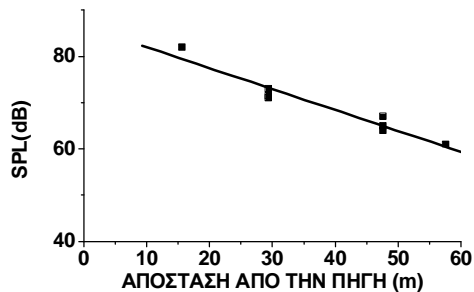


Σχήμα 1. Κάτοψη του αρχαίου θεάτρου και θέσεις πηγής (S_N) και δεκτών (R_N)

3. Αποτελέσματα

Η διακύμανση της ηχητικής στάθμης

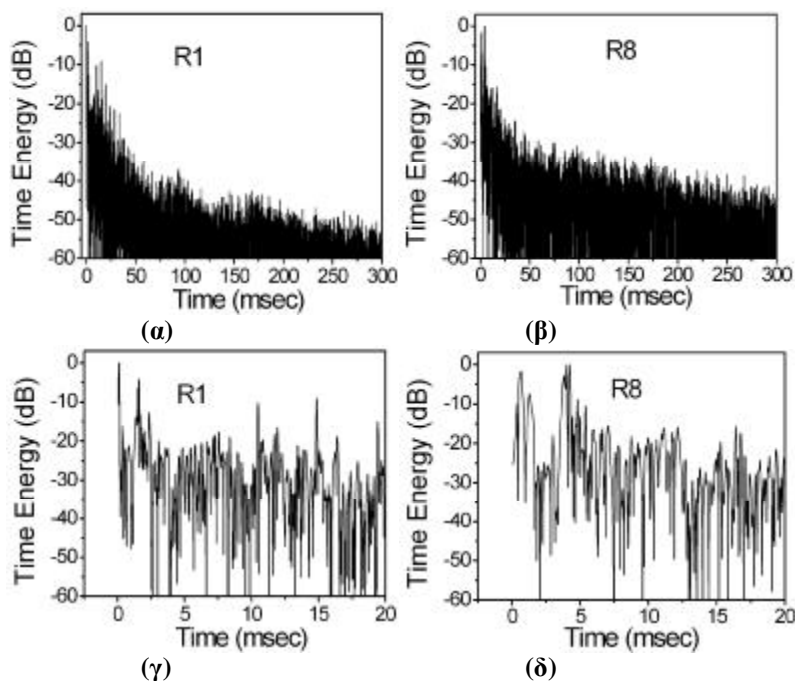
Η ηχητική στάθμη παρουσιάζει την αναμενόμενη για ανοιχτούς χώρους μείωση με την απόσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Μικρές διακυμάνσεις από την ιδανική κλίση εμφανίζονται λόγω του θορύβου (κυρίως από ρεύματα αέρα), αλλά και της διαφοροποίησης της στάθμης των διάχυτων ανακλάσεων (για διαφορετικές γωνίες).



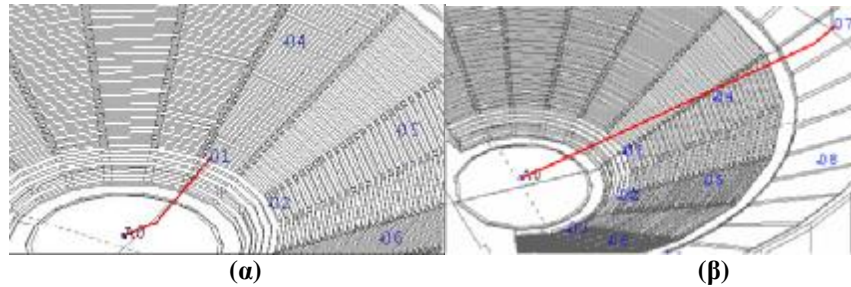
Σχήμα 2: Ηχοστάθμη για διαφορετικές αποστάσεις του δέκτη από την πηγή

Η χρονική σύνθεση του ηχητικού πεδίου

Το ηχητικό πεδίο του θεάτρου [3] σχηματίζεται από ορισμένες διακριτές ανακλάσεις και σημαντική ενέργεια από το διάχυτο πεδίο που φθίνει σχετικά σύντομα (περίπου στα 300 msec), στη στάθμη του θορύβου. Με βάση τις



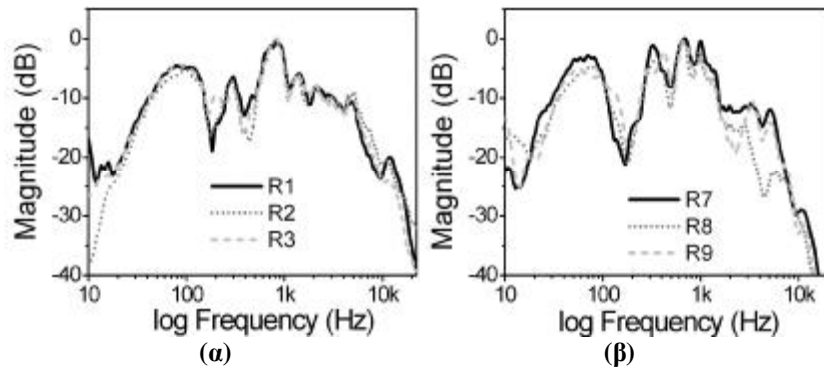
Σχήμα 3: Χρονική απόκριση (κανονικοποιημένη ενέργεια σε dB) του θεάτρου για πηγή στο κέντρο της ορχήστρας (θέση S1) και για τις θέσεις δεκτών: R1 ((α) και (γ)) και R2 ((β) και (δ)). Οι αποκρίσεις λήφθηκαν μετά από αποσυνέλιξη της ανηχοϊκής απόκρισης της πηγής διέγερσης.



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού παραγωγής 1^{ης} ανάκλασης για τις θέσεις ακροατηρίου του θεάτρου της Επιδαύρου: (α) θέση R1 (β) θέση R7.

μετρήσεις που λήφθηκαν (Σχήμα 3), αλλά και με την υπολογιστική προσομοίωση για τις ίδιες θέσεις (με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του θεάτρου, Σχήμα 4), εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα: για τις κοντινές θέσεις (R1, R2, R3), η πρώτη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 1,7 ms μετά το απευθείας σήμα και προέρχεται από το δάπεδο της ορχήστρας (Σχήμα 4(α)). Η δεύτερη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 6 ms και προέρχεται από την πίσω του ακροατή μέτωπο των εδωλίων. Δεύτερης τάξης ανακλάσεις φθάνουν επίσης στα 11 msec και 16 msec περίπου. Λόγω του σχήματος και της κλίσης του κοίλου, στις επάνω θέσεις (R7, R8, R9) παρατηρείται μία διαφορετική σειρά στην άφιξη των ανακλάσεων: η πρώτη ανάκλαση φθάνει στα 1,3 ms και προέρχεται από τα εμπρόσθια εδώλια του ακροατή (Σχήμα 4(β)). Η δεύτερη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 3,5 - 4 ms και προέρχεται από το δάπεδο της ορχήστρας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο εστιασμός ανακλάσεων για αυτές τις μακρύτερες αποστάσεις, έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση του πλάτους αυτής της δεύτερης ανάκλασης, έτσι ώστε να εμφανίζεται σε υψηλότερη στάθμη από το απευθείας σήμα Σχήμα 3 (β), (δ). Όπως είναι αναμενόμενο, όλες αυτές οι πρώιμες ανακλάσεις, ενισχύουν το απευθείας σήμα της πηγής και την καταληπτότητα, ιδίως για τις μακρινές θέσεις ακρόασης.

Η συχνοτική σύνθεση του ηχητικού πεδίου

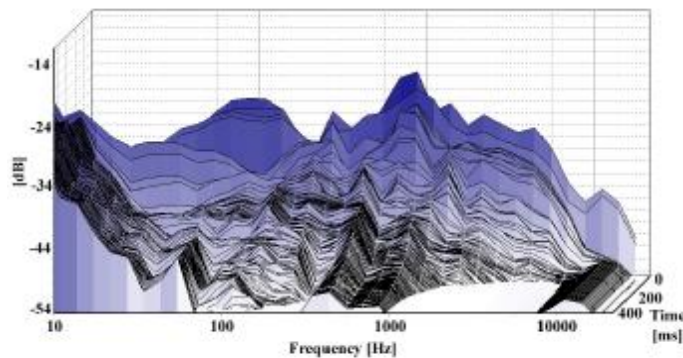


Σχήμα 5: Μέτρο της απόκρισης συχνότητας του θεάτρου σε: (α) κοντινές θέσεις / διαφορετικές γωνίες και (β) για μακρινές θέσεις / διαφορετικές γωνίες.

Το θέατρο εμφανίζει μία χαρακτηριστική διαμόρφωση της ηχητικής χροιάς σε σήματα, η οποία προέρχεται από τη μορφή των αποκρίσεων συχνότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5(α), (β), για μετρήσεις με την πηγή στο κέντρο της ορχήστρας,

η απόκριση αυτή χαρακτηρίζεται από μία σημαντική βύθιση στα 170-200 Hz και ενίσχυση στην περιοχή 800-1500 Hz. Ταυτόχρονα οι χαμηλές συχνότητες (80-100 Hz) μεταδίδονται με ικανοποιητικό πλάτος. Η μορφή της φασματικής απόκρισης δεν μεταβάλλεται δραστικά ούτε με την απόσταση, ούτε με την γωνία ακρόασης. Όμως, εάν η πηγή μετακινηθεί στο μπροστινό μέρος της ορχήστρας (κοντά στα πρώτα εδώλια), τότε το εμφανίζεται μία μετακίνηση προς χαμηλότερες συχνότητες τόσο του βυθίσματος, όσο και της περιοχής ενίσχυσης (από τα 800Hz στα 600Hz). Η χαρακτηριστική αυτή και σταθερή με τη θέση απόκριση, λειτουργεί ευεργετικά για τη μετάδοση σημάτων ομιλίας, αφού η σημαντική για την καταληπτότητα περιοχή του 1 KHz ενισχύεται. Επιπλέον ένα ποσοστό της μη-σημαντικής για την καταληπτότητα ενέργειας κοντά στην τονική συχνότητα μειώνεται, ταυτόχρονα παραμένοντας αναλλοίωτος ο «όγκος» του σήματος. Στις ψηλές συχνότητες υπάρχει η αναμενόμενη μείωση του πλάτους, όπου στις περιπτώσεις με ακροατήριο (δεν πραγματοποιήθηκαν τέτοιες μετρήσεις), αναμένεται να είναι περισσότερο έντονη.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και εξετάζοντας την χρονοσυχνοτική απόκριση του θεάτρου (Σχήμα 6), είναι προφανές ότι ο μηχανισμός των πρώιμων

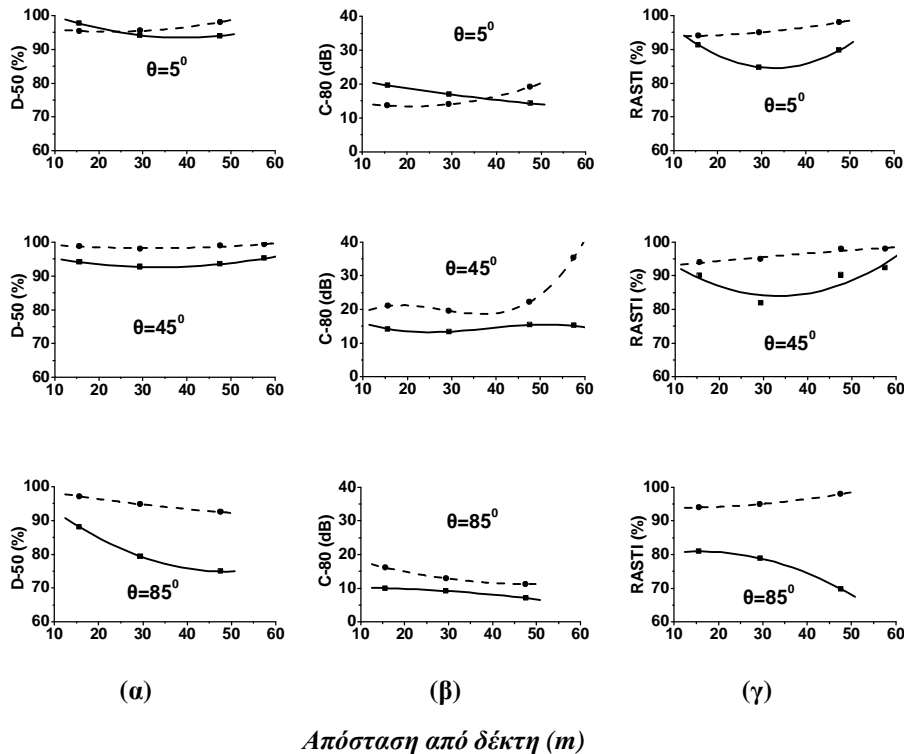


Σχήμα 6: Χρονοσυχνοτική ανάλυση της απόκρισης του θεάτρου για τη θέση δέκτη R1

ανακλάσεων (όπως προαναφέρθηκε, από το δάπεδο της ορχήστρας ή τα εδώλια) είναι υπεύθυνος για τη χαρακτηριστική φασματική απόκριση (μέχρι τα 100 msec περίπου), ενώ για μετέπειτα χρόνους, το διάχυτο πεδίο, παράγει ένα σχεδόν επίπεδο φάσμα. Βέβαια, ο συντονισμός στη περιοχή του 1 KHz (που προσδίδει και την χαρακτηριστική χροιά στο θέατρο), φαίνεται να διατηρείται μέχρι τα 300 msec περίπου, όπου μετά το πλάτος των ανακλάσεων πέφτει στα συνήθη επίπεδα του θορύβου. Στο Σχήμα 6 φαίνεται επίσης και η - αθροιστική στην απόκριση - συμπεριφορά του χαμηλόσυχνου θορύβου του χώρου (κάτω από την περιοχή διέγερσης, π.χ. στα 10 Hz) κυρίως λόγω των ρευμάτων του αέρα, στα οποία στο παρελθόν έχει αναφερθεί ότι εν μέρει συνεισφέρουν στην «καλή ακουστική» του θεάτρου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι πιθανό ότι τα ρεύματα αυτά να συνδυάζονται με την απόκριση του χώρου (κυρίως μετά τα 100 msec) και να δημιουργούν σύνθετες διαμορφώσεις της ακουστικής πίεσης οι οποίες μπορεί να συντελούν στην μεταγενέστερη ομαλοποίηση του φάσματος στις χαμηλές συχνότητες (κοντά στα 200 Hz). Πρακτικά ένα τέτοιο φαινόμενο γίνεται αντιληπτό σαν συνηχήσεις του χαμηλόσυχνου σήματος, συνδυασμένες με την προαναφερθείσα περιορισμένη «αντήχηση» στην περιοχή του 1 KHz, η οποία συνεχίζει να παράγεται από το διάχυτο πεδίο και που σχετίζεται με τη γεωμετρία του κοίλου του θεάτρου.

Ακουστική ευκρίνεια (D-50), διαύγεια (C-80) και καταληπτότητα (RASTI)

Στο Σχήμα 7, δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για όλες τις αποστάσεις και γωνίες ακρόασης ($\theta = 0^\circ$ θεωρείται η γωνία όπου ταυτίζονται ο οριζόντιος ακουστικός άξονας της πηγής και ο άξονας συμμετρίας του θεάτρου, βλέπε Σχήμα 1). Ταυτόχρονα, δείχνονται και τα αποτελέσματα της ακουστικής προσομοίωσης του θεάτρου, για τις ίδιες θέσεις [3]. Εξετάζοντας την Ευκρίνεια D-50 (Σχήμα 7 (α)) και τη Διαύγεια ομιλίας C-80 (Σχήμα 7 (β)) παρατηρείται ότι το



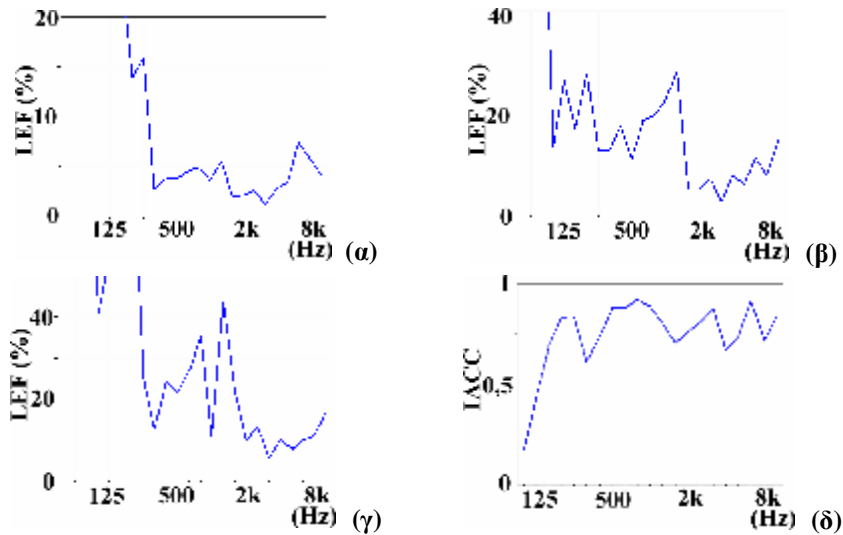
Σχήμα 7 (α): Ευκρίνεια D-50, (β): Διαύγεια C-80, (γ): % Καταληπτότητα ομιλίας RASTI, σε σχέση με την απόσταση του δέκτη από την πηγή (στο κέντρο της ορχήστρας) και τη γωνία ακρόασης. Οι τιμές - - είναι από μετρήσεις, οι τιμές — είναι από προσομοιώσεις.

θέατρο παρουσιάζει αξιόλογη απόδοση, ανεξάρτητα της απόστασης πηγής-δέκτη. Το θέατρο παρουσιάζει ευκρίνεια ομιλίας κοντά στη περιοχή του 95%, η διαύγεια είναι πάνω από 15dB, ενώ για κεντρικές και μεσαίες θέσεις ($\theta = 5^\circ$, $\theta = 45^\circ$) η παράμετρος αυτή αυξάνει με την απόσταση υποδηλώνοντας την ευεργετική ανακατανομή του λόγου πρώιμης προς καθυστερημένης ενέργειας ανάκλασης. Σημαντικό είναι ότι οι αντίστοιχες προσομοιώσεις, παρόλο ότι υποδεικνύουν παραπλήσιες τιμές, φαίνεται ωστόσο να υπολογίζουν σχετικά υποδεέστερη απόδοση, ειδικά για τις πλάγιες θέσεις. Η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση βασίζεται σε λείες

επιφάνειες και απλοποιημένα μοντέλα διάχυσης των ανακλάσεων. Σε αντίθεση, οι μετρήσεις έγιναν με διαβρωμένο το υλικό των επιφανειών του θεάτρου, πράγμα που προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με ακροατήριο.

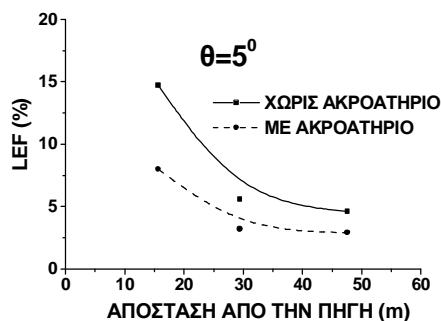
Όμοια εξαιρετική είναι και η καταληπτότητα της ομιλίας RASTI (Σχήμα 7 (γ)), η οποία εμφανίζεται στις μετρήσεις να είναι ανεξάρτητη της απόστασης και γωνίας και σε όλες τις περιπτώσεις κοντά στο ιδανικό (κοντά 100%). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εξαιρετική ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου για ομιλία.

Η ακουστική αίσθηση χώρου (*spatial impression*)



Σχήμα 8: Ποσοστό ενέργειας πλευρικών ανακλάσεων (LEF) συναρτήσει της συχνότητας για την θέση R1. (α) στον άξονα X, (β) στον άξονα Y, (γ) στον άξονα Z. (δ) Δείκτης Ετεροσυσχέτιση (IACC) συναρτήσει της συχνότητας για την θέση R1.

Όπως είναι γνωστό η βέλτιστη κατανομή της ενέργειας των πλευρικών ανακλάσεων (Lateral Energy Fraction, LEF) συμβάλει στη αναβάθμιση της αντίληψης του μεγέθους (όγκου) της πηγής και εισάγει την αίσθηση της ακουστικής άνεσης και οικειότητας του χώρου. Από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων [3] συνάγεται ότι τέτοιες ανακλάσεις επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ακουστική της Επιδαύρου, αφού φαίνεται να φτάνουν στους ακροατές με προοδευτικά οξύτερες γωνίες, με την αύξηση της απόστασης από την πηγή (όπως φαίνεται στο Σχήμα 9 και συζητείται και στις [1,3]). Αυτό το αποτέλεσμα συνδυαζόμενο με πρώιμους χρόνους έλευσης, επιδρά ευεργετικά για την ευκρίνεια λόγου και την καταληπτότητα σε αυτές τις περισσότερο μακρινές θέσεις δεκτών.



Σχήμα 9: Ποσοστό ενέργειας πλευρικών ανακλάσεων (LEF) συναρτήσει της απόστασης για τις κεντρικές θέσεις του δέκτη (από προσομοίωση)

Η κατανομή της LEF με τη συχνότητα (για την θέση R1, Σχήμα 8), δείχνει επίσης ότι ο κύριος όγκος της διάχυτης ενέργειας στην περιοχή «συντονισμού» της απόκρισης του θεάτρου (δηλαδή κοντά στο 1 KHz), προέρχεται από τις πλευρικές ανακλάσεις (άξονας Y, Σχήμα 8(β)) και από τον κάθετο άξονα Z (Σχήμα 8(γ)). Η τιμή της IACC (Inter Aural Cross Correlation, Σχήμα 8(δ)) δείχνει ότι σε όλες τις συχνότητες, η διάσταση της πηγής παραμένει περιορισμένη στο ηχητικό πεδίο, επιτρέποντας τον καλό εστιασμό του ομιλητή.

Συμπεράσματα

- Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την εξαιρετική ακουστική του θεάτρου για ομιλία και την άριστη καταληπτότητα λόγου, ανεξάρτητα της θέσης του ακροατή.
- Οι πρώιμες ανακλάσεις από το δάπεδο της ορχήστρας και τα μέτωπα των εδωλίων, συνεισφέρουν σε χρήσιμη για την ομιλία ενέργεια. Για θέσεις στο επάνω μέρος του κοίλου, υπάρχει και εστιασμός πρώιμων ανακλάσεων
- Σημαντική συνιστώσα του πεδίου, μέχρι περίπου τα 300 msec, παράγεται από διάχυτες ανακλάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται εντονότερα από τις πλευρές του κοίλου και τις οριζόντιες επιφάνειες. Η γωνία άφιξης των ανακλάσεων αυτών γίνεται οξύτερη, για τις απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης.
- Η συχνοτική απόκριση του θεάτρου τονίζει την περιοχή 800Hz – 1 KHz, και αυτός ο συντονισμός διαρκεί για 300 msec περίπου. Το φάσμα γίνεται περισσότερο επίπεδο μετά τα 100 msec περίπου, ενώ παρουσιάζεται και θόρυβος υπό μορφή χαμηλόσυχνων ρευμάτων αέρα.
- Οι εξαιρετικές τιμές C-80, D-50, RASTI που συχνά βελτιώνονται για μακρινές θέσεις, δείχνουν τη θετική συνεισφορά των πρώιμων ανακλάσεων, αλλά και την ευεργετική επίδραση του διάχυτου πεδίου που δεν μπορεί να προβλεφθεί πλήρως από γεωμετρικά ακουστικά μοντέλα του θεάτρου.

7. Αναφορές

- [1] R. Shankland: Acoustics of Greek theaters. Physics Today, pp.30-35, 1973.
- [3] Δ. Γουλαράς: Ακουστική αρχαίων θεάτρων, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1995.
- [3] S. L. Vassilantonopoulos, J. N. Mourjopoulos: A Study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics, Acoustica 89, 2002.

Ακουστική προσομοίωση και ανάλυση ανοιχτών θεάτρων της αρχαιότητας

Σταμάτης, Α. Βασιλαντωνόπουλος
Ηλ/γος Μηχ/κός, Λέκτορας
Πανεπιστήμιο Πατρών

Ιωάννης, Ν. Μουρτζόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται η ακουστική συμπεριφορά, τριών επιλεγμένων ανοιχτών θεάτρων της αρχαιότητας από τα μεγαλύτερα και σπουδαιότερα, μεγάλης ιστορικής σημασίας, με μια εναλλακτική προσέγγιση που βασίζεται στην τεχνική της ακουστικής πρόγνωσης-προσομοίωσης και απεικόνισης με ηλεκτρονικό υπολογιστή και η οποία βοήθησε στο να διευκρινιστούν πολλά ερωτήματα που προέκυψαν στο παρελθόν σχετικά με την καλή ακουστική επίδοση των ανοιχτών θεάτρων αρχαιότητας. Γίνεται λοιπόν μια λεπτομερής ανάλυση και μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς αυτών των θεάτρων, για όμοιες θέσεις ακροατών, όχι μόνο όπως είναι σήμερα αλλά και όπως ήταν στο αρχικό στάδιο κατασκευής τους, επαληθεύοντας έτσι τα αίτια που επέτρεπαν σε αυτούς τους ανοιχτούς χώρους την τέλεια μετάδοση ομιλίας πράγμα το οποίο δεν είναι εφικτό στους περισσότερους σύγχρονους χώρους χωρίς ηλεκτροακουστική βοήθεια.

Τυπικά παραδείγματα των ακουστικών πειραμάτων και των εικονικά ανακατασκευασμένων θεάτρων παρουσιάζονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.wcl.ee.upatras.gr/AudioGroup/AncientAcoustics/index.html>

Acoustic Simulation and Analysis of the Open Ancient Theaters

ABSTRACT

This work analyses the acoustic properties of 3 selected open theaters of ancient Greek antiquity, which have great historic significance. The work is presenting an alternative approach which is based on acoustic prediction - simulation and auralization using computer software, so that many open past questions relating to the good acoustics of such spaces, can be answered. The detailed study of these theaters is performed for identical listener positions, not only using the architectural details of the theaters in their present state, but also for the theater's properties in their earlier states of construction and use. The findings reinstate the known good acoustic performance of these theaters, which allowed for perfect speech communication, something that at present is only possible with the use of electroacoustic support.

Typical examples and demos of these results can be found in the electronic address: <http://www.wcl.ee.upatras.gr/AudioGroup/AncientAcoustics/index.html>

1. Εισαγωγή

Είναι ευρέως γνωστή ακόμη και σε μη ειδικούς η καλή ακουστική των αρχαίων Ελληνικών ανοιχτών θεάτρων. Μολονότι αρκετές μέχρι σήμερα μελέτες [1-6], διάφορες μετρήσεις και βιβλιογραφίες μας επιβεβαιώνουν την πρώτης τάξεως ακουστική επίδοση αυτών των θεάτρων για την μετάδοση ομιλίας, η ακριβής όμως φύση της ακουστικής ποιότητας που έχει παρατηρηθεί σε τέτοιους χώρους παραμένει ακόμη ένα θέμα ασαφές βασισμένο σε διαφορετικές απόψεις. Δεν έχουμε επίσης μια ολοκληρωμένη γνώση της ακουστικής των αρχαίων θεάτρων στο αρχικό στάδιο κατασκευής τους, δεδομένου ότι ένας μικρός αριθμός από αυτά τα θέατρα διατηρούνται σε καλή κατάσταση αφού ανακατασκευάστηκαν μερικώς (συμπεριλαμβανομένων και των Ρωμαϊκών Ωδείων).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι σημαντικό να εξεταστούν με κάθε λεπτομέρεια αυτά τα αρχαία θέατρα και να επαληθευθούν τα αίτια που επέτρεπαν σε αυτούς του ανοιχτούς χώρους την τέλεια μετάδοση ομιλίας για πολυπληθή ακροατήρια (πάνω από 17000 ακροατές) πράγμα το οποίο δεν είναι εφικτό στους περισσότερους σύγχρονους χώρους χωρίς ηλεκτροακουστική βοήθεια.

Παλαιές μελέτες ξεκαθαρίζουν ότι η καλή ακουστική των αρχαίων θεάτρων οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στις γεωμετρικές ιδιότητες που έχουν κυρίως λόγω του σχήματός τους, το οποίο επέτρεπε καλή οπτική γραμμή από όλες τις θέσεις των ακροατών ως προς τη σκηνή, τέλεια μετάδοση του ήχου και ελαττωμένη απορρόφηση του ακροατηρίου. Αναφέρεται επίσης, για το θέατρο της Επιδαύρου, η σημασία των πρώιμων ανακλάσεων και η ακουστική συνεισφορά του διάχυτου ήχου [1]. Για την λεπτομερή ανάλυση και μελέτη όλων των παραπάνω θεωριών έγινε μια εναλλακτική προσέγγιση [7], βασισμένη στην τεχνική της ακουστικής πρόγνωσης-προσομοίωσης και απεικόνισης με ηλεκτρονικό υπολογιστή που βοήθησε στο να διευκρινιστούν πολλά από τα ερωτήματα που έχουν δημιουργηθεί.

2. Μεθοδολογία

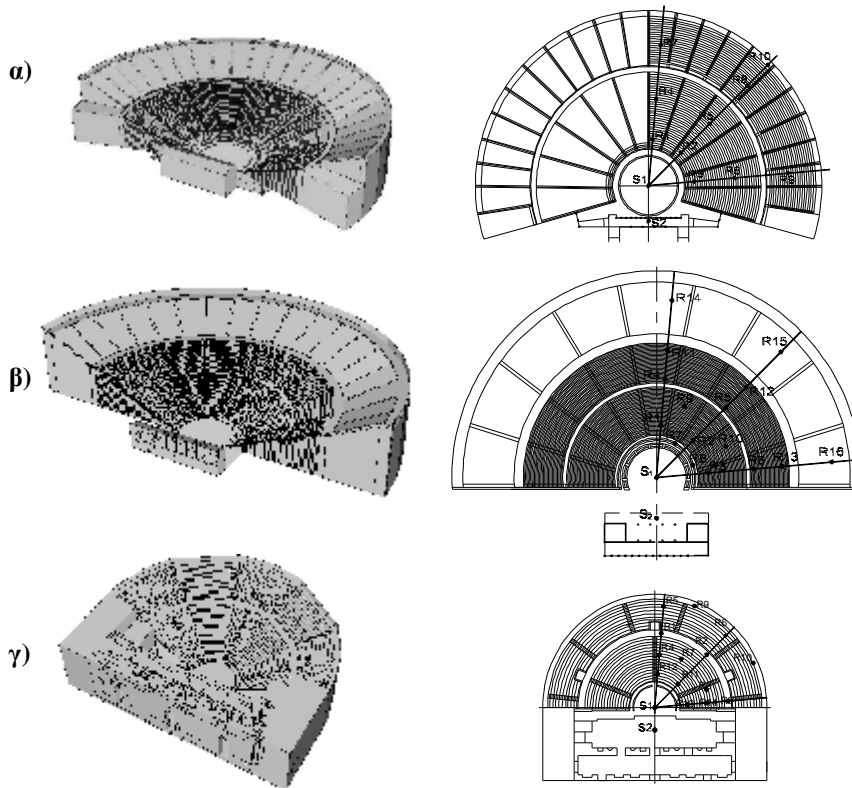
Για την ακουστική μελέτη των αρχαίων θεάτρων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

α) Επελέγησαν δύο αντιπροσωπευτικά ανοιχτά θέατρα της αρχαίας Ελλάδας γνωστά για την ιστορική τους σημασία και τις εξαιρετικές ακουστικές τους ιδιότητες. Το αρχαίο θέατρο του Ασκληπείου της Επιδαύρου, και το θέατρο της Δωδώνης, ένα από τα μεγαλύτερα ανοιχτά θέατρα της αρχαιότητας. Για συγκριτικούς λόγους επελέγη επίσης και ένα αντιπροσωπευτικό ανοιχτό θέατρο της Ρωμαϊκής περιόδου, το Ωδείο της Πάτρας [7]. Τα ακριβή αρχιτεκτονικά σχέδια των κτιρίων αυτών ελήφθησαν από αρχαιολογικές και άλλες καταγραφές [8].

β) Κατασκευάστηκαν ηλεκτρονικά τα γεωμετρικά μοντέλα των χώρων (AutoCad) και στη συνέχεια έγιναν οι ακουστικές προσομοιώσεις εισάγοντας τις γεωμετρικές συντεταγμένες των σημείων των χώρων στο εμπορικό πρόγραμμα ακουστικής προσομοίωσης Catt-Acoustic [9] κατασκευάζοντας έτσι ηλεκτρονικά το ακουστικό μοντέλο των χώρων και εξάγοντας τα ηχογράμματα και τις περισσότερες από τις γνωστές ακουστικές παραμέτρους όπως D-50, C-80, RASTI, Ts, κ.λ.π.

Προσομοίωση των θεάτρων

Για την ακουστική προσομοίωση των θεάτρων ορίστηκαν τυπικές θέσεις της ηχητικής πηγής (S_N) και των δεκτών (R_N). Οι τυπικές θέσεις των δεκτών (ακροατών), ελήφθησαν σε τρεις διαφορετικές οριζόντιες γωνίες θ_N ως προς τον άξονα συμμετρίας του θεάτρου (Σχ.1): (1) κεντρικές θέσεις με γωνία $\theta_1=5^\circ$, (2) μεσαίες θέσεις με γωνία $\theta_2=45^\circ$ και (3) πλάγιες θέσεις με γωνία $\theta_3=85^\circ$. Σε καθένα από τους παραπάνω γωνιακούς τομείς τοποθετήθηκαν οι δέκτες κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να έχουν ίσες αποστάσεις από την πηγή. Αυτό βοηθά στο να μπορούν να συγκριθούν δέκτες με ίσες αποστάσεις από την ηχητική πηγή και στα τρία θέατρα. Είναι βέβαια ευνόητο ότι το ύψος των δεκτών διαφοροποιείται σε κάθε θέατρο. Για την πηγή ορίστηκε μια αντιπροσωπευτική ανδρική δυνατή φωνή στάθμης 73dB-SPL με κατευθυντικότητα ομιλίας η οποία τοποθετήθηκε στις θέσεις S_N και σε ύψος 1.5m από το δάπεδο. Λόγω συμμετρίας των θεάτρων οι προσομοιώσεις (10 για την Επίδαυρο, 16 για την Δωδώνη και 14 για το Ωδείο Πατρών) έγιναν στην μια πλευρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 1α, 1β, και 1γ.

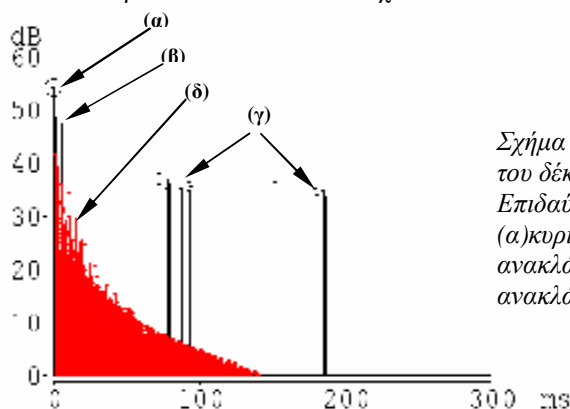


Σχήμα 1. Τα ακουστικά μοντέλα και κατόψεις με τις θέσεις πηγής και ακροατών: α) του αρχαίου θεάτρου της Επίδαυρου, β) του αρχαίου θεάτρου της Δωδώνης και γ) του Ρωμαϊκού Ωδείου Πατρών.

3. Αποτελέσματα

3.1 Η σύνθεση του ηχητικού πεδίου

Από όλες τις δοκιμές των προσομοιώσεων που έγιναν, προέκυψαν ηχογράμματα (κρουστικές αποκρίσεις) από τα οποία φαίνεται η σύνθεση του ηχητικού πεδίου καθενός από τα προαναφερθέντα ανοιχτά θέατρα που εξετάστηκαν και αποτελείται από τα παρακάτω ακουστικά στοιχεία:



Σχήμα 2. Το ηχογράμμα για την θέση του δέκτη R_3 στο θέατρο της αρχαίας Επιδαύρου (χωρίς ακροατήριο): (α)κυρίως ήχος, (β)πρώιμες ανακλάσεις, (γ)καθυστερημένες ανακλάσεις, (δ) διάχυτο πεδίο.

(α) Το κατευθείαν σήμα, το οποίο εξασθενεί και καθυστερεί ανάλογα με την θέση του ακροατή.

(β) Μία ή δύο 1ης τάξης πρώιμες ανακλάσεις (ομάδα (β)), που προέρχονται από το δάπεδο της ορχήστρας και τα μέτωπα των εδωλίων (ποδιές). Αυτές φθάνουν μέσα στα πρώτα 10ms μετά το κατευθείαν σήμα και εξασθενούν περίπου κατά 10-15dB. Όταν ο ομιλητής μετακινείται στην θέση S_2 (στο προσκήνιο), δημιουργούνται επιπρόσθετες πρώιμες ανακλάσεις από το προσκήνιο και τους πίσω τοίχους της σκηνής. Ένα πρώτο προβλεπόμενο συμπέρασμα εξάγεται σε αυτή την περίπτωση αφού τέτοιου είδους πρώιμες ανακλάσεις (μέσα στα πρώτα 50ms) όπως είναι γνωστό [1] βοηθούν την καταληπτότητα ομιλίας και προφανώς εμπλουτίζουν τις ακουστικές ιδιότητες της πηγής.

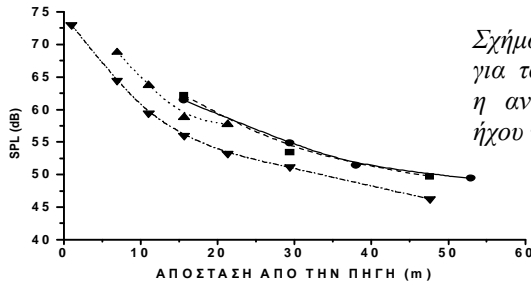
(γ) Καθυστερημένες 2ης και 3ης τάξης ανακλάσεις (ομάδα (γ)), φθάνουν σε διαστήματα από 40-300ms μετά τον (α) όπου εξασθενούν μέχρι και 30dB περίπου, προέρχονται δε από ανακλάσεις με πολλαπλές διαδρομές στις αντίθετες πλευρές του κοίλου ή το δάπεδο της ορχήστρας- κοίλο-πρόσοψη της σκηνής. Ουσιαστικά οι ανακλάσεις αυτής της ομάδας διαχωρίζονται από εκείνες της ομάδας (β) κατά ένα διάστημα από 20-100ms και έχουν ευρείες γωνίες άφιξης (ως προς τον άξονα πηγής- δέκτη). Κυρίως αυτή η ομάδα ανακλάσεων δημιουργείται για θέσεις ακροατών που βρίσκονται εκτός κεντρικής ζώνης και περιέχει μέχρι 10 ανακλάσεις για τις πλάγιες θέσεις και μία ή δύο για τις μεσαίες θέσεις ακροατών. Περιλαμβάνοντας ένα τυπικό περιβαλλοντικό θόρυβο είναι περισσότερο πιθανό ότι αυτή η ομάδα των ανακλάσεων δεν ακούγεται στο ακροατήριο του θεάτρου, εκτός εάν συνέβαινε η ομιλία να είναι πάρα πολύ δυνατή, οπότε η στάθμη των ανακλάσεων υπερβαίνει τη στάθμη θορύβου.

(δ) Ένα διάχυτο πεδίο με εκθετική πτώση, το οποίο εκτείνεται μέχρι τα 150ms μετά το κατευθείαν σήμα και το οποίο αποτελείται από πυκνές διασκορπισμένες προς όλες τις κατευθύνσεις ανακλάσεις στα ακάλυπτα πέτρινα εδώλια (ή στα κεφάλια των ακροατών), της ορχήστρας και των άλλων στοιχείων του κοίλου και οι οποίες δημιουργούνται από τις παραπάνω συνιστώσες (α) και (β).

Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ξεκάθαρα, όπως αναμενόταν, την απουσία ενός κύριου αντηχητικού πεδίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τα προαναφερθέντα θέατρα είναι ανοιχτοί χώροι και η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης T_{60} από τον κεντρικό χρόνο δίνει γενικά τιμές κάτω από 0.2sec. Στη περίπτωση που τα θέατρα έχουν ακροατήριο παρατηρείται μια επιπλέον μείωση του χρόνου αντήχησης, οι δε ομάδες ανακλάσεων (β) και (γ) μειώνονται μέχρι 5dB και το διάχυτο πεδίο παρουσιάζει μια διαφορετική κατανομή στο χρόνο και στην συχνότητα. Είναι σημαντικό ότι για τις περισσότερες θέσεις ακροατών του Ωδείου Πατρών χωρίς σκηνή, το ηχητικό πεδίο περιέχει κυρίως το κατευθείαν σήμα (α), τις πρώιμες ανακλάσεις (β) και το διάχυτο πεδίο (δ), αφού η ομάδα των καθυστερημένων ανακλάσεων (γ) σχεδόν εξαφανίζεται πράγμα που όπως φαίνεται οφείλεται στο ψηλό ανάπτωμα του κοίλου.

3.2 Η στάθμη ηχητικής πίεσης

Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι για τα θέατρα της Επιδαύρου και Δωδώνης υπάρχει μια αύξηση (περίπου 4dB) πάνω από την στάθμη του κατευθείαν ήχου (Σχήμα 3), που οφείλεται στη συμβολή του ανακλώμενου και διάχυτου ηχητικού πεδίου των ομάδων (β), (γ) και (δ). Για το Ωδείο Πατρών οι παραπάνω συμβολές φαίνεται να είναι μικρότερου μεγέθους διότι η Σ.Η.Π. αποτελείται κυρίως (χωρίς σκηνή το Ωδείο) από τον κατευθείαν ήχο.



Σχήμα 3. Η Στάθμη Ηχητικής Πίεσης για τα 3 θέατρα (χωρίς ακροατήριο) και η αντίστοιχη στάθμη του κατευθείαν ήχου για $\theta_1=5^\circ$.

3.3 Η ευκρίνεια (D-50) και η διαύγεια (C-80) της πηγής

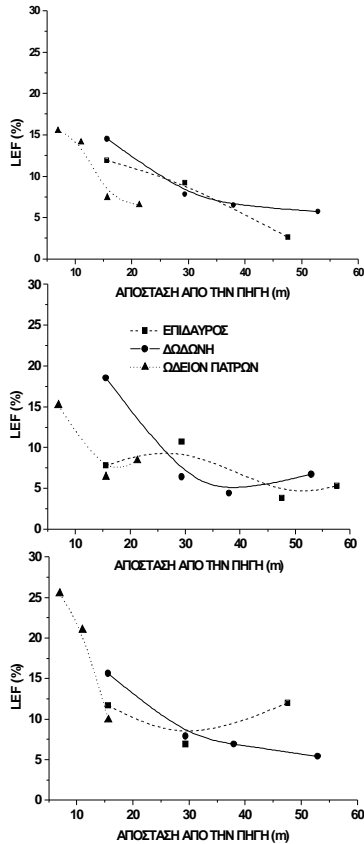
Εξετάζοντας την Ευκρίνεια (D-50) και τη Διαύγεια ομιλίας (C-80) παρατηρείται ότι όλα τα θέατρα παρουσιάζουν αξιόλογη απόδοση, ειδικά για τις κεντρικές και μεσαίες θέσεις δεκτών, ανεξάρτητα της απόστασης πηγής-δέκτη. Όταν είναι άδεια για $\theta=5^\circ$ και $\theta=45^\circ$, τα θέατρα της Επιδαύρου και Δωδώνης επιτυγχάνουν για κοντινές θέσεις ευκρίνεια ομιλίας κοντά στη περιοχή του 95%, ενώ η διαύγεια είναι πάνω από 15dB. Για τις πλάγιες θέσεις των θεάτρων οι δύο παράμετροι πέφτουν σημαντικά (πάνω από 20% η ευκρίνεια και 10dB η διαύγεια) γεγονός που οφείλεται στην επαύξηση των καθυστερημένων ανακλάσεων σε αυτές τις θέσεις και οι οποίες δημιουργούνται από πολλαπλές ανακλάσεις στις πλευρές του κοίλου. Αυτή η επαύξηση της καθυστερημένης ενέργειας δημιουργεί μια εικόνα «διασκορπισμού» του ήχου. Παρατηρείται επίσης ο Κεντρικός Χρόνος (T_s) αυξάνει τουλάχιστον 15ms γι' αυτές τις πλάγιες θέσεις. Όταν τα θέατρα είναι με ακροατήριο, η D-50 βελτιώνεται ακόμη περισσότερο φθάνοντας κοντά στο 100% για τις κεντρικές και μεσαίες θέσεις δεκτών και στο 90% για τις πλάγιες θέσεις. Ωστόσο η C-80 φαίνεται να είναι λιγότερο ευαίσθητη στην απορρόφηση του ακροατηρίου.

3.4 Η ακουστική αίσθηση χώρου των θεάτρων (spatialisation)

Όπως είναι γνωστό η βέλτιστη κατανομή των πλευρικών ανακλάσεων (LEF) συμβάλει στη αναβάθμιση της αντίληψης του μεγέθους (όγκου) της πηγής και εισάγει την αίσθηση της ακουστικής άνεσης και οικειότητας του χώρου. Από τα αποτελέσματα των θεάτρων φαίνεται ότι αυτές οι δομές παράγουν μια ήπια αλλά ωστόσο σημαντική (κατά τρόπο αντιληπτό) στάθμη πλευρικής ενέργειας,

προσδίδοντας έτσι ένα μοναδικό ηχητικό χαρακτήρα, ο οποίος προφανώς μπορεί να διαφοροποιηθεί από άλλους τελείως ανοιχτούς χώρους. Επιπλέον όπως αναφέρεται στην [1] οι ιδιότητες της αίσθησης χώρου (αντίληψης του χώρου) των διασκορπισμένων διάχυτων ανακλάσεων επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ακουστική της Επιδαύρου και των άλλων αρχαίων θεάτρων. Αυτές οι ανακλάσεις (ομάδα (δ)) του ηχητικού πεδίου, φαίνεται να φτάνουν στους ακροατές με προοδευτικά οξύτερες γωνίες, με την αύξηση της απόστασης από την πηγή όπως συζητείται στην [1] και μπορεί να επιβεβαιωθεί από τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 4. Αυτό το αποτέλεσμα συνδυαζόμενο με πρώιμους χρόνους έλευσης, επιδρά ευεργετικά για την ευκρίνεια λόγου και την καταληπτότητα σε αυτές τις περισσότερο μακρινές θέσεις δεκτών, ειδικά αφού η ολική Σ.Η.Π. μειώνεται με αναλογικό τρόπο σε αυτές τις απόμακρες θέσεις.

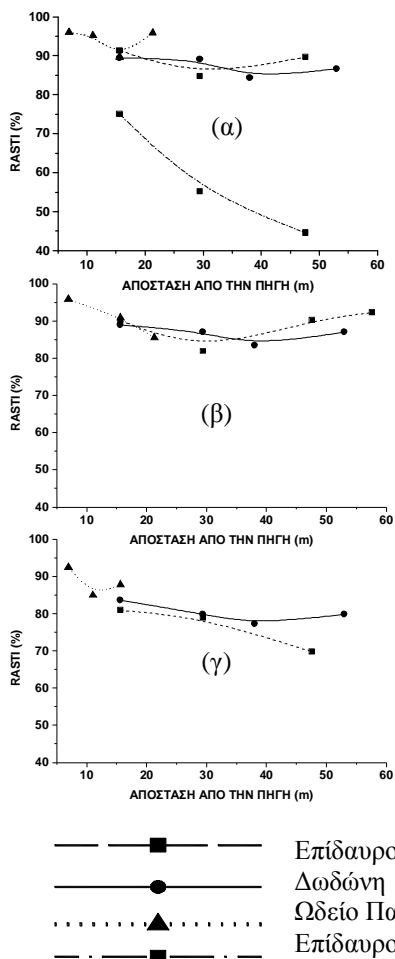
Όταν τα θέατρα είναι με ακροατήριο το LEF μειώνεται ακόμη περισσότερο με τη απόσταση [1], έτσι ώστε η καταληπτότητα λόγου και οι άλλες ακουστικές παράμετροι βελτιώνονται σχετικά και γίνονται ακόμη πιο ανεξάρτητες της απόστασης με την προϋπόθεση ότι το ακροατήριο δεν είναι θορυβώδες.



Σχήμα 4. Οι πλευρικές ανακλάσεις συναρτήσει της απόστασης για τα 3 θέατρα (χωρίς ακροατήριο, από πάνω προς τα κάτω) για: $\theta_1=5^\circ$, $\theta_2=45^\circ$ και $\theta_3=85^\circ$.

Έτσι η αίσθηση του χώρου για την Επιδαυρο είναι βέλτιστη αφού ομαλοποιείται με την απόσταση και υπερτερεί των άλλων θεάτρων στις κεντρικές και μεσαίες θέσεις αν και οι πολύ κλειστές πλευρές του κοίλου φαίνεται να αυξάνουν τις γωνίες ανάκλασης και έτσι μειώνουν την ηχητική ποιότητα σε αυτές τις ακραίες πλάγιες θέσεις του θεάτρου.

3.5 Η καταληπτότητα ομιλίας



Σχήμα 5. Η καταληπτότητα συναρτήσσει της απόστασης για τα 3 θέατρα, (α)-(γ) πηγή S_1 (χωρίς ακροατήριο), για: (α) $\theta_1=5^\circ$; (β) $\theta_2=45^\circ$; και (γ) $\theta_3=85^\circ$. Το Σχήμα 5(α) δείχνει το RASTI της Επιδαύρου με τυπικό θόρυβο ακροατηρίου.

4. Αναφορές

- [1] Robert. S. Shankland: Acoustics of Greek theaters. Physics Today, 1973, pp.30-35.
- [2] M. Bieber: The History of the Greek and Roman Theater. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1961.
- [3] G. E. Tzekakis, G. Schubert: The acoustical design of a new open air theater in Thessaloniki, Greece, J. Acoust. Soc. Am. 105, 1999, pp.1043.
- [4] M. Cognini, A. Farina, R. Pompoli: L' acoustica dell' anfiteatro Romano Arena di Verona, Atti della Conferenza Internazionale "Acoustics and recovery of spaces for music", Ferrara , 1993, pp. 27-28.

Τα αρχαία ελληνικά θέατρα και ειδικά η Επίδαυρος είναι φημισμένα για την καλή καταληπτότητα ομιλίας όπως αποδεικνύεται από τις διάφορες μελέτες , από πρόχειρες δοκιμές επισκεπτών αλλά και από παρατηρήσεις των ίδιων των ηθοποιών που έχουν παίξει παραστάσεις έργων σε αρχαία θέατρα. Οι δοκιμές που έγιναν επιβεβαιώνουν αυτή την ιδιότητα για την παράμετρο RASTI (Σχ. 5). Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέγοντας ένα χαμηλό περιβαλλοντικό θόρυβο, βρέθηκε ότι ο RASTI είναι πάνω από 70% και σχεδόν ανεξάρτητα από την απόσταση πηγής - δέκτη. Η Επίδαυρος παρουσιάζει καλλίτερη καταληπτότητα για τις κεντρικές θέσεις δεκτών ειδικά στη περίπτωση που έχει ακροατήριο. Επιπλέον η μειωμένη συμβολή της χαμηλής στάθμης των καθυστερημένων ανακλάσεων που παρατηρείται για $\theta=45^\circ$, συμβάλλει στην αύξηση της καταληπτότητας συναρτήσσει της απόστασης και για τα δυο αρχαία ελληνικά θέατρα. Για τους περισσότερους συνδυασμούς, το αρχαίο Ωδείο Πατρών παρουσιάζει επίσης μια τέλεια καταληπτότητα λόγω με συντελεστή καταληπτότητας ομιλίας (>70%) για όλες τις θέσεις δεκτών.

- [5] G. Cambourakis: Oiniades Theater Assessment, Dept. of Archaeology Report, Univ. of Vienna, 2001.
- [6] Δ. Γουλαράς : Ακουστική αρχαίων θεάτρων, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1995.
- [7] S. L. Vassilantonopoulos, J. N. Mourjopoulos: A Study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics, *Acoustica* 89, 2002 .
- [8] A. Gergan, W. Müller-Wiener: Das theater von Epidauros, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1961.
- [9] Catt-Acoustic vers.7.0b-7.2b-8.0a: User' s Manual, Gothenburg, Sweden, 1998-2001-2002.

Εφαρμογές ακουστικής και γεωμετρικής προσομοίωσης αιθουσών με τη βοήθεια πλατφόρμας ακουστικής προσομοίωσης προσαρμοσμένης σε σύστημα CAD

Στέλιος Θ. Κουζελέας
PhD Πανεπιστημίου Bordeaux 1, Γαλλία

GRECO, ερευνητικό κέντρο ακουστικής & σύλληψης,
Αρχιτεκτονική σχολή Bordeaux, Γαλλία

stelios_kouzeleas@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τη βοήθεια της πλατφόρμας ακουστικής προσομοίωσης « CAD-Acoustic » αναπτυγμένης στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής και προσαρμοσμένης στο σύστημα σχεδιασμού AutoCAD, η εν λόγω μελέτη παρουσιάζει τα ακουστικά αποτελέσματα υπολογισμού (RT60) των αιθουσών Elmia της Σουηδίας και της Όπερας του Bordeaux, σε σύγκριση με ακουστικές μετρήσεις και αποτελέσματα άλλων ακουστικών προγραμμάτων προσομοίωσης (Odeon, Epidauré). Παράλληλα, παρουσιάζει γεωμετρικές προσομοιώσεις της ακουστικής συμπεριφοράς των μοντελοποιημένων αιθουσών, όπως οι 3D αντανακλάσεις των ακουστικών ακτίνων από επιλεγμένες επιφάνειες, η 3D άποψη της τοποθέτησης των υλικών μέσω χρωματισμού επιφανειών, το συνολικό εμβαδόν σε μ2 των επιλεγμένων απορροφ./αντανακλ. επιφανειών και η μεμονωμένη ή μαζική απόδοση των συντελεστών απορρόφησης στις επιφάνειες. Τέλος, με τη βοήθεια του « CAD-Acoustic » τα ακουστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται με γραφική σύγκριση σε σχέση με τις βέλτιστες ακουστικές τιμές, παρουσίαση που αποτελεί ένα είδος «αρχιτεκτονικής μετάφρασης των ακουστικών αποτελεσμάτων» λαμβάνοντας υπόψη διάφορα αρχιτεκτονικά στοιχεία.

ABSTRACT

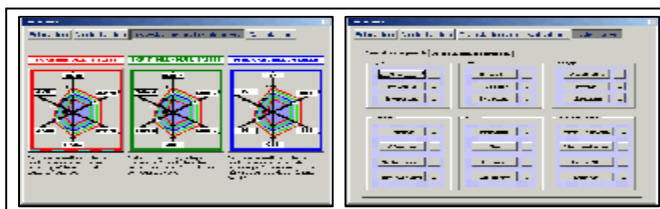
With the aid of the acoustic simulation plate-form named « CAD-Acoustic » which is developed in the context of PhD and adapted on the AutoCAD system, this paper presents the halls acoustic results (RT60) of Elmia (Sweden) and Opera of Bordeaux (France) in relation to acoustic measurements and results of other acoustic simulation software (Odeon, Epidauré). In parallel, it presents geometrical simulations of the modelised halls' acoustic behavior, such as the 3D reflections of the acoustic rays from selected surface, the 3D view of the materials' arrangements through surfaces' coloring, the measurement of the selected absorbing/reflecting surfaces in m2 and the individual or massive absorption coefficients' assignment to the surfaces. Finally, with the aid of « CAD-Acoustic » the acoustic results are compared in a graphic manner in relation to the ideal acoustic rates, a presentation which is a kind of an "architectural translation of the acoustic results" taking into account several architectural elements.

Εισαγωγή

Η πλατφόρμα «CAD-Acoustic» αναπτύχθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής [1]. Λειτουργεί ως πρόγραμμα ακουστικής και γεωμετρικής προσομοίωσης αιθουσών, προσαρμοσμένο στο σύστημα σχεδιασμού AutoCAD, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα μοντελοποίησης και ακουστικού υπολογισμού αιθουσών. Αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες, όπως η «παιδαγωγική», η «μοντελοποίηση», η «μετάφραση» και τέλος ο «υπολογισμός».

Η «παιδαγωγική» χρησιμοποιείται ως εκπαιδευτικό εργαλείο ακουστικής συμπεριφοράς χώρων μέσω παρουσίασης και διαχείρισης βάσης πολυμέσων ακουστικών δεδομένων. Η «μοντελοποίηση» αφορά αυτοματοποιημένες διαδικασίες και τρόπους μοντελοποίησης αιθουσών με σκοπό στην ακουστική προσομοίωση. Η «μετάφραση» αφορά στην «αρχιτεκτονική μετάφραση» των ακουστικών αποτελεσμάτων μέσω γραφικής σύγκρισης βέλτιστων τιμών λαμβάνοντας υπόψη αρχιτεκτονικά στοιχεία των αιθουσών. Τέλος, ο «υπολογισμός» επιτρέπει τον υπολογισμό ακουστικών κριτηρίων και τον υπολογισμό-σχεδιασμό γεωμετρικών ακουστικών στοιχείων (αντανάκλασεις ήχων, διανομή υλικών, κλπ.). Το «CAD-Acoustic» αναπτύχθηκε σε περιβάλλον AutoCAD με τη βοήθεια των γλωσσών VisualLISP, DCL και Visual BASIC (VBA).

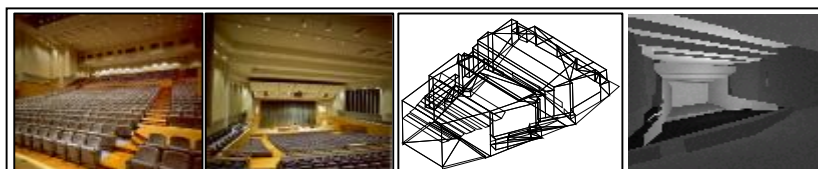
Η μελέτη αφορά σε εφαρμογές των συνιστωσών «υπολογισμός» και «μετάφραση» του «CAD-Acoustic» (Σχ. 1) στην αίθουσα Elmia της Σουηδίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο αναφοράς στο International Round Robin Test II που οργανώθηκε από το Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) της Γερμανίας (1996-1998) και στην αίθουσα της όπερας του Bordeaux Γαλλίας (GTB).



Σχήμα 1. Συνιστώσες «μετάφραση» & «υπολογισμός», πλατφόρμα «CAD-Acoustic».

1. Παρουσίαση αιθουσών / μοντέλων

Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων Elmia στο Jönköping της Σουηδίας έχει όγκο 11000 μ³ και 1100 θέσεις (Σχ. 2). Το απλοποιημένο μοντέλο της αίθουσας αποτε-



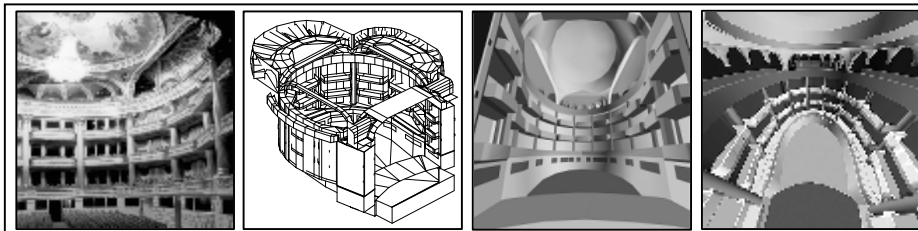
Σχήμα 2. Απόψεις αίθουσας Elmia (Σουηδία) –Φωτογραφίες και μοντέλα AutoCAD

λείται από 170 επιφάνειες συνολικής επιφάνειας 2232 μ². Η απόδοση των υλικών στις επιφάνειες και ο καθορισμός των συντελεστών απορρόφησης Sabine (Πίν. 1), καθορίζονται από το International Round Robin Test II και περιγράφονται λεπτομερειακά στη παρουσίαση του ακουστικού προγράμματος Odeon [2].

Πίνακας 1. Θέση και συντελεστές απορρόφησης υλικών μοντέλου αίθουσας Elmia

Υλικό	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Ξύλινο δάπεδο (σκηνή,σκαλιά,πλατεία)	0.15	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
Ξύλινοι τοίχοι & μέρη τοίχων μπαλκον.	0.21	0.09	0.08	0.07	0.16	0.23
Καθίσματα μπροστινής πλατείας	0.45	0.60	0.73	0.80	0.75	0.64
Καθίσματα πίσω πλατείας	0.50	0.66	0.80	0.88	0.83	0.70
Τοίχοι μη στύβωμ. ξύλου,ανακλασ/ρες	0.20	0.12	0.06	0.04	0.07	0.10
Συμπαγές πλαστικό (control room)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06
Ανακλαστήρες (πάνω από σκηνή)	0.12	0.10	0.04	0.03	0.03	0.02
Τοίχοι ταβανιού	0.20	0.15	0.10	0.08	0.04	0.02

Η αίθουσα της Όπερας του Bordeaux (Grand Théâtre de Bordeaux-GTB) της Γαλλίας έχει όγκο 5227 μ³ (σκηνή κλειστή) και 1200 θέσεις (Σχ. 3). Το απλοποιημένο μοντέλο της αίθουσας αποτελείται από 1784 επιφάνειες. Η απόδοση



Σχήμα 3. Απόψεις της όπερας του Bordeaux Γαλλίας – Φωτογραφία & μοντέλα.

των υλικών στις επιφάνειες καθώς και ο καθορισμός των συντελεστών απορρόφησης Sabin περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα 2 [3].

Πίνακας 2. Θέση και συντελεστές απορρόφησης υλικών μοντέλου όπερας Bordeaux

Υλικό	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Ξύλινα καλύμματα (Πίσω/πάνω τοίχοι)	0.33	0.27	0.24	0.17	0.17	0.14
Υφασμα σε γύψο (οροφή)	0.11	0.09	0.07	0.04	0.04	0.05
Μπετόν (δοκάρια οροφής)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Υφασμάτινα καθίσματα σε ξύλο	0.15	0.30	0.37	0.43	0.40	0.38
Ξύλινο δάπεδο (τελευτ. ορόφου)	0.03	0.04	0.08	0.12	0.12	0.20
Γυαλί (Παράθυρα πλατείας ισογ.)	0.06	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
Δάπεδο σε δοκάρια (προσκήνιο)	0.15	0.10	0.05	0.04	0.04	0.04

2. Εφαρμογές γεωμετρικής ακουστικής προσομοίωσης

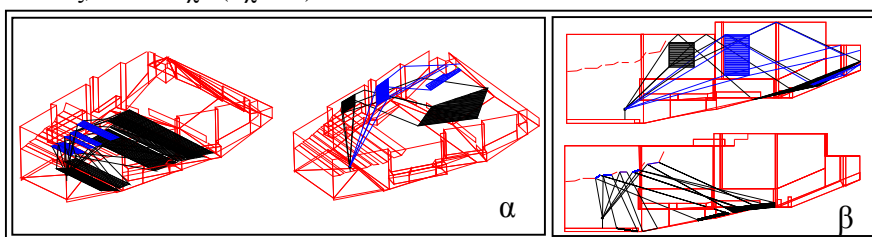
Με τη βοήθεια της συνιστώσας «Υπολογισμός» - «Γεωμετρική προσέγγιση» του «CAD-Acoustic» υπάρχει η δυνατότητα τρισδιάστατης προσομοίωσης των αντανακλάσεων των ηχητικών ακτίνων από πηγή ήχου προς επιλεγμένες επιφάνειες. Αυτή η προσομοίωση επιτυγχάνεται μέσω τριών διαφορετικών προσεγγίσεων. Η πρώτη συνίσταται στο καθορισμό της κατευθυντικότητας των ηχητικών ακτίνων από την πηγή σε σχέση με το καθορισμό ενός τρισδιάστατου σημείου της αίθουσας, η δεύτερη σε σχέση με το καθορισμό δύο γωνιών στο χώρο («αζιμούθιο», «ύψος») και τέλος η τρίτη προσέγγιση σε σχέση με την επιλογή επιφανειών (Σχ. 4).

Η επιλογή των επιφανειών δύναται να είναι μεμονωμένη ή μαζική ενώ ο αριθμός των αντανακλάσεων απεριόριστος (όριο μνήμης και ταχύτητας του υπολογιστή).



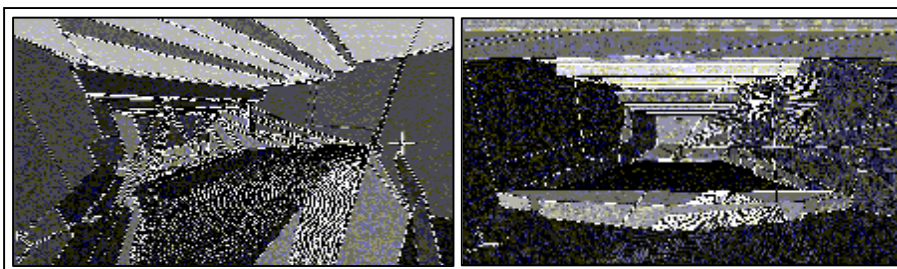
Σχήμα 4. Τρόποι 3D προσομοίωσης ηχητικών ακτίνων από πηγή («CAD-Acoustic»)

Ο σχεδιασμός των αντανακλώμενων ακτίνων ήχου ορίζεται αυτόματα από τις επιφάνειες στις οποίες καταλήγει η ηχητική ακτίνα από τη πηγή (Σχ. 5α), πράγμα που σημαίνει ότι τα σημεία στα οποία καταλήγουν οι αντανακλώμενες ακτίνες από την ηχητική πηγή προς τις επιλεγμένες ανακλαστικές επιφάνειες δεν βρίσκονται, φυσικά, πάντα στο ίδιο επίπεδο επιφάνειας (Σχ. 5β). Στην αίθουσα Elmia παρατηρούμε ότι οι ανακλαστήρες πάνω από τη σκηνή αντανακλούν τον ήχο στο μπροστινό μέρος της πλατείας ενώ οι πλάγιοι ανακλαστήρες στο πίσω μέρος της πλατείας, αντίστοιχα (Σχ. 5-6).



Σχήμα 5. Τρισδιάστατες προσομοιώσεις αντανάκλασης ηχητικών ακτίνων από πηγή μέσω ανακλαστήρων σκηνής ή πλευρικών τοίχων – Elmia («CAD-Acoustic»)

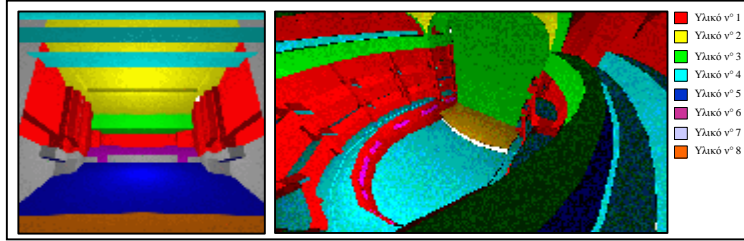
Η δυνατότητα τρισδιάστατης φωτορεαλιστικής προσομοίωσης των επιφανειών της αίθουσας με ταυτόχρονη γραμμική προσομοίωση των αντανακλάσεων των ηχητικών ακτίνων και επιλογή διαγράμμισης των επιφανειών κατάληξης των αντανακλώμενων ακτίνων καθίσταται ένα ισχυρό εργαλείο βοήθειας κατά τη διάρκεια της αρχιτεκτονικής και ακουστικής σύλληψης της αίθουσας (Σχ. 6).



Σχήμα 6. Τρισδιάστατες φωτορεαλιστικές προσομοιώσεις αντανάκλασης ηχητικών ακτίνων - «CAD-Acoustic»

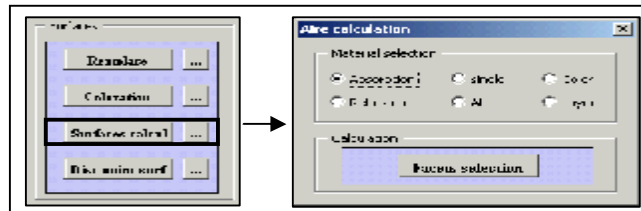
Λόγω της προσαρμογής του «CAD-Acoustic» σε περιβάλλον AutoCAD, η τρισδιάστατη άποψη της τοποθέτησης των υλικών μέσω χρωματισμού επιφανειών (Σχ. 7) επιτυγχάνεται με την επιλογή «surfaces coloration» της συνιστώσας

«υπολογισμός», η οποία επιτρέπει το μεμονωμένο ή μαζικό αυτόματο χρωματισμό των επιφανειών της αίθουσας ανά αποδιδόμενο σ' αυτές υλικό.



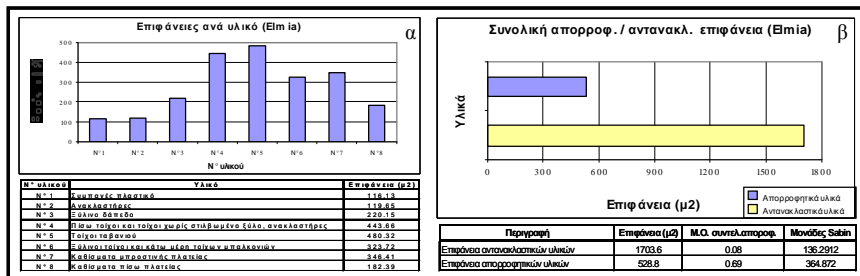
Σχήμα 7. Τρισδιάστατες φωτορεαλιστικές προσομοιώσεις τοποθέτησης των υλικών μέσω χρωματισμού επιφανειών (Αριστερά : Elmia, δεξιά : GTB) - «CAD-Acoustic»

Το « CAD-Acoustic » επιτρέπει, μεταξύ άλλων, τον υπολογισμό του συνολικού εμβαδόντος σε μ2 των επιλεγμένων απορροφ./αντανακλ. επιφανειών μέσω επιλογής ενός ή όλων των απορροφ./ αντανακλ. αποδιδόμενων υλικών σε επιφάνειες, και μέσω επιλογής των υλικών ανά χρώμα ή διαφάνεια (layer) (Σχ. 8). Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν γραφικά με συγκρίσεις εμβαδόντων επιφανειών της αίθουσας σε μ2 ανά υλικό (Σχ.9α) και ανά συνολικό εμβαδόν



Σχήμα 8. Επιλογές υπολογισμού εμβαδόντος επιφανειών- («CAD-Acoustic»)

απορροφ/κών και αντανακλ/κών επιφανειών με παράλληλη παρουσίαση του μέσου όρου των συντελεστών απορρόφησης και τις αντίστοιχες μονάδες Sabin (Σχ. 9β). Από τις συγκρίσεις αυτές παρατηρούμε στην αίθουσα Elmia ότι ενώ η συνολική επιφάνεια των απορροφ. υλικών είναι περίπου το 1/3 της συνολικής αντανακλα-

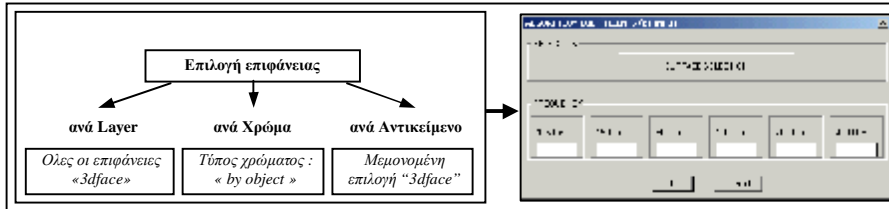


Σχήμα 9. Γραφική σύγκριση εμβαδόντων επιφανειών- («CAD-Acoustic»)

στικής επιφάνειας, παρ'αυτά οι μονάδες Sabin των απορροφ. επιφανειών είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερες των αντίστοιχων μονάδων των αντανακλ. επιφανειών, πληροφορίες πάντοτε χρήσιμες στην ακουστική διεύθετηση της αίθουσας.

3. Εφαρμογές ακουστικού υπολογισμού

Το «CAD-Acoustic», μέσω αλγορίθμου VisualLISP, δίνει τη δυνατότητα ατομικής ή μαζικής απόδοσης συντελεστών απορρόφησης σε ομαδοποιημένες επιφάνειες ανά διαφάνεια (layer), χρώμα ή ατομικό αντικείμενο (entity) (Σχ. 10).



Σχήμα 10. “Πρόσδοση συντελεστών απορρόφησης ανά επιλογή επιφανειών” - διάγραμμα & μερική άποψη της εφαρμογής επικοινωνίας - «CAD-Acoustic» [4].

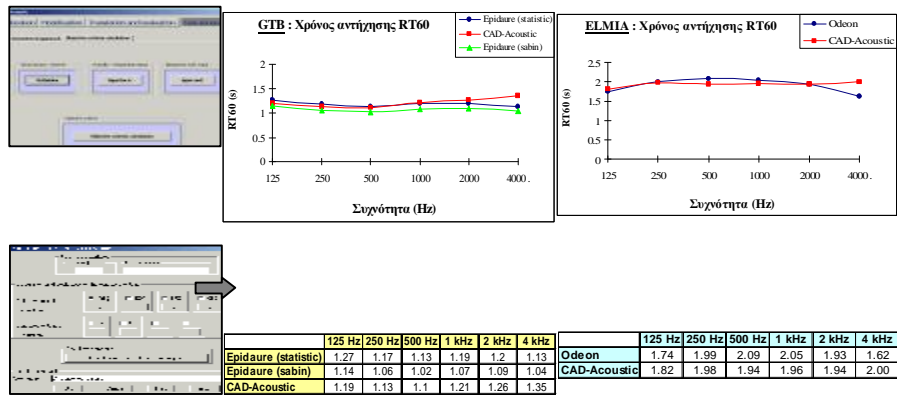
Άποψη του εν λόγω αλγορίθμου VisualLISP (Σχ. 11) καθώς επίσης και αριθμός αλγορίθμων και εφαρμογών σε VisualLISP, προσαρμοσμένοι στο «CAD-Acoustic» οι οποίοι αυτοματοποιούν μεθόδους μοντελοποίησης αιθουσών για ακουστική προσομοίωση περιγράφονται σε ερευνητική εργασία [4].

(defun c:SAISIR_COEF (/...)	Variables declaration
(setq what_next 3) (if (< (setq id (load_dialog ...	Load the DCL dialog box
(while (> what_next 1) (new_dialog "data_fin" id)	Links with the DCL dialog box
(action_tile ...)	Absorb_coef input values via DCL dialog box
(setq what_next (start_dialog))	Start DCL dialog box
(cond :if ((= 2 what_next)	Assign to variables the grouping choice per Object/Color/LAyer
(progn (initget 1 "Object/Color/LAyer")	
(setq choice (getkword "<Object/Color/LAyer:>"))	
(if (= choice "Color") (setq ...	
(if (= choice "LAyer") (setq ...	
(if (= choice "Object") (setq ...))))	
(if (= choice "Color")	Grouping per color choice
(progn (setq ent (ssget "X" (list ...) (repeat num	
(setq list ...)	Additive sub_list
(setq lista (entget (ssname ...) (setq count 10) ...	Counter facettes
(setq list ... (append ...)	Total additive list of facettes cordonates
(setq count (1+ count))	Counter facettes
(setq list ... (append ...)	Additive sub_list
(setq list ... (append ...)	Total additive list corners cordonates and absorption coef.
(setq count_fac (1+ count_fac))))	End counter facettes
(if (= choice "LAyer") ...	Grouping per layer choice
(if (= choice "Object") ...	Grouping per Object choice
(unload_dialog id)	Close DCL dialog box
SOMMETS PLUS COEF)	Gives variable with total corners facettes cordonates with absorption coefficients

Σχήμα 11. Άποψη αλγορίθμου σε VisualLISP που επιτρέπει την απόδοση συντελεστών απορρόφησης σε ομαδοποιημένες επιφάνειες – «CAD-Acoustic» [4].

Με τη βοήθεια της συνιστώσας «Υπολογισμός» («CAD-Acoustic») υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του κριτηρίου χρόνου αντήχησης RT60 (Σχ. 12).

Με τη βοήθεια της συνιστώσας «Μετάφραση» (Σχ. 1-αριστερά) οι τιμές του ακουστικού υπολογισμού συγκρίνονται γραφικά με βέλτιστες τιμές βιβλιογραφίας λαμβάνοντας υπόψη αρχιτεκτονικά στοιχεία, όπως ο όγκος του χώρου, ο τύπος του θεάματος (συναυλία, εγγραφή, ομιλία) και η διαμόρφωση του θεάματος (όργανο, συμφωνική ορχήστρα, όπερα, τζαζ, κλπ.). Η εν λόγω «αρχιτεκτονική μετάφραση» των ακουστικών αποτελεσμάτων αφορά σε τρεις διαφορετικούς τύπους μετάφρασης και παρουσίασης αποτελεσμάτων, όπως ένα κριτήριο ανά μία αίθουσα, ένα κριτήριο ανά πολλές αίθουσες και τέλος πολλά κριτήρια ανά μία αίθουσα (Σχ. 13) [5].

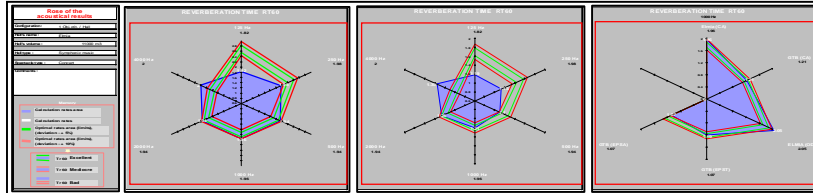


Σχήμα 12. Συγκρίσεις υπολογισμών RT60 των αιθουσών Elmia / GTB με το «CAD-Acoustic» σε σχέση με τα αποτελέσματα των προγραμμάτων Epidauré, Odeon



Σχήμα 13. Τύποι «αρχιτεκτονικής μετάφρασης» ακουστικών αποτελεσμάτων

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η «αρχιτεκτονική μετάφραση» των δύο αιθουσών αφορά τη σύγκριση των RT60 καθεμίας αίθουσας (στις συχνότητες 125Hz – 4kHz) με τις βέλτιστες τιμές βιβλιογραφίας (Σχ. 14 α-Elmia, β-GTB), καθώς επίσης και στη σύγκριση των τιμών υπολογισμού RT60 διαφορετικών προγραμμάτων ακουστικής σε σχέση με τις βέλτιστες τιμές στη συχνότητα των 1000 Hz (Σχ. 14 γ).



Σχήμα 14. Παρουσίαση «αρχιτεκ/νικής μετάφρασης» ακουστικών αποτελεσμάτων

Στις πρώτες δύο συγκρίσεις παρατηρούμε ότι οι τιμές υπολογισμού των RT60 με το «CAD-Acoustic» (μπλέ επιφάνεια) βρίσκονται στα όρια των βέλτιστων τιμών (πράσινα όρια : απόκλιση 5% από βέλτιστες τιμές, κόκκινα όρια : απόκλιση 10%) όσον αφορά στις μεσαίες συχνότητες. Στις συχνότητες των 125 Hz και 4 kHz οι τιμές υπολογισμού βρίσκονται εκτός ορίων των βέλτιστων τιμών κι αυτό διότι οι βέλτιστες τιμές υπολογίζονται για τις μεσαίες και μόνο συχνότητες, ενώ για τις υπόλοιπες συχνότητες οι τιμές υπολογίζονται κατά προσέγγιση. Στη τρίτη σύγκριση (δεξιά), παρατηρούμε ότι οι τιμές υπολογισμού των RT60 των ακουστικών προγραμμάτων στη συχνότητα 1 kHz βρίσκονται στα όρια των βέλτιστων τιμών.

4. Συμπεράσματα

Η πλατφόρμα « CAD-Acoustic » προσαρμοσμένη σε περιβάλλον προγράμματος μοντελοποίησης, εκτός της λειτουργίας ως εκπαιδευτικού εργαλείου ακουστικής συμπεριφοράς χώρων και μέσου βοήθειας μοντελοποίησης για ακουστική προσομοίωση, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού ακουστικών κριτηρίων και γεωμετρικών προσομοιώσεων της ακουστικής συμπεριφοράς.

Μερικές από τις ακουστικές και γεωμετρικές εφαρμογές του « CAD-Acoustic » :

- Γραμμική και φωτορεαλιστική προσομοίωση αντανάκλασεων σε σχέση με επιλεγμένη-ες επιφάνεια-ες.
- Μαζική ή μεμονωμένη απόδοση υλικών και συντ. απορροφ/σης σε επιφάνειες.
- Προσομοίωση και ομαδοποίηση υλικών ανά χρώμα.
- Υπολογισμός και σύγκριση συνολικών ή μεμονωμένων απορροφητικών ή αντανάκλαστικών επιφανειών.
- «Αρχιτεκτονική μετάφραση» ακουστικών αποτελεσμάτων.
- Υπολογισμός ακουστικών κριτηρίων.

Οι συγκεκριμένες εφαρμογές καθίστανται ένα εργαλείο βοήθειας ακουστικής διευθέτησης κατά τη διάρκεια της αρχιτεκτονικής σύλληψης ακουστικού χώρου, ενώ επιτρέπουν κατά κύριο λόγο σε αρχιτέκτονες ή φοιτητές αρχιτεκτονικής, με γνώσεις ακουστικής ή μη, να εκτιμήσουν τα ακουστικά αποτελέσματα με σκοπό την αποδοτικότερη συνεργασία με απαραίτητους συμβούλους ακουστικής.

Οι εν λόγω εφαρμογές επιτρέπουν κατά δεύτερο λόγο σε συμβούλους ακουστικής, μεταξύ άλλων, τον υπολογισμό ακουστικών κριτηρίων, δίνοντας τη δυνατότητα ελέγχου λειτουργίας ακουστικών επιφανειών μέσω προσομοίωσης, αυτόματης προσαρμογής και αλλαγής της γεωμετρίας των επιφανειών του χώρου, σύγκρισης αποτελεσμάτων, σε μια πλατφόρμα ανοιχτή στη προσαρμογή άλλου ισχυρού κώδικα προγραμματισμού ακουστικού υπολογισμού και προσαρμοσμένη σ' ένα ισχυρό περιβάλλον προσομοίωσης και μοντελοποίησης.

5. Αναφορές

[1] Kouzeleas, S., “Développement d’un outil d’aide en simulation acoustique architecturale adaptable à un système de modélisation CAO”, Διδακτορική διατριβή N° 2642, Πανεπιστήμιο Bordeaux 1, Γαλλία, 2002

[2] The ODEON home page <http://www.odeon.dk> , επίσκεψη Μάρτιος 2004

[3] Semidor, C., “Relations entre architecture et qualité acoustique : contribution à la caractérisation acoustique d’un lieu d’écoute”. Διδακτορική διατριβή d’état N° 1460, σελ. 211-213, Πανεπιστήμιο Paul Sabatier, Toulouse, Γαλλία, 1999

[4] Kouzeleas, S., “Computational processes of a hall cad modelisation for acoustic simulation according to accepted geometry format via acoustic software”. 1st International Conference “From Sscientific Computing to Computational Engineering” (1st IC-SCCE), 8-10 September 2004, Athens, Greece, 2004

[5] Kouzeleas, S., Semidor, C., “Architectural translation of the acoustical simulation results”. Institute of Acoustics, subject : Auditorium Acoustics: Historical and contemporary design and performance, Imperial College, Proceedings: Vol. 25 - Part 4 - 2002 - ISBN 1 901656 47 0, 19-21 July 2002, London, England, 2002

Απόδοση ηλεκτρονικά ελεγχόμενων τοίχων ακουστικής σκιάς για τον ενεργό έλεγχο θορύβου μίας κινούμενης ηχητικής πηγής

Χριστόφορος Προβατίδης
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ
cprovat@central.ntua.gr

Σπυρίδων Μουζακίτης
Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ
smouzak@mail.ntua.gr

Γεώργιος
Χαραλαμπίδης
Διδάκτωρ ΕΜΠ
g_charalampo@mail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα δημοσίευση πραγματεύεται την αριθμητική προσομοίωση της εφαρμογής ηλεκτρονικά ελεγχόμενων τοίχων ακουστικής σκιάς (ΗΕΤΑΣ) για τη μείωση του ανεπιθύμητου θορύβου που προκαλείται από μία κινούμενη ηχητική πηγή. Το σύστημα τοίχων ΗΕΤΑΣ δημιουργεί μία ακουστική σκιά προς την πλευρά της ελεγχόμενης περιοχής ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από ηχεία και μικρόφωνα μαζί με έναν ενεργό ηλεκτρικό θορύβου. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται δείχνουν το ιδανικά ελεγχόμενο ακουστικό πεδίο, μεταβαλλόμενο στο χρόνο εξ αιτίας της κίνησης της ηχητικής πηγής, χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο ενός ελεύθερου πεδίου με μία μόνο ανακλαστική επιφάνεια (το έδαφος). Γίνονται επίσης κάποιες προτάσεις σχετικά με την εγκατάσταση πολλών συστημάτων τοίχων ΗΕΤΑΣ με σκοπό τον έλεγχο μίας περιοχής πολύ μεγάλου μήκους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι αυτή η μέθοδος ενεργού ελέγχου θορύβου θα μπορούσε θεωρητικά να αντικαταστήσει τις παθητικές μεθόδους ηχομείωσης, όπως τα συμβατικά ηχοπετάσματα, διότι αποδίδει καλύτερα στο ευρύ συχνοτικό φάσμα.

ABSTRACT

This paper deals with the numerical simulation of the application of electronically controlled acoustic shadow walls (ECAS) for reducing unwanted noise caused by a moving sound source. The ECAS wall system creates an acoustic shadow towards the controlled area of interest using a set of speakers and microphones along with an active noise controller. The simulations performed here demonstrate the ideally controlled sound field, varying in time due to the movement of the sound source, by using the simplified geometry of a free field with a single reflecting surface (the ground). Some suggestions are also made regarding the installation of multiple ECAS wall systems in order to control an area of considerable length. The simulation results show that this active noise control method could theoretically substitute the passive means of noise attenuation, such as conventional sound barriers, because it performs better in broad frequency ranges.

Εισαγωγή

Ο Ενεργός Έλεγχος Θορύβου – ΕΕΘ (Active Noise Control – ANC) είναι η μέθοδος ακύρωσης μίας ανεπιθύμητης ηχητικής εκπομπής προσθέτοντας σε αυτή μία ηχητική εκπομπή αντίθετης φάσης. Το αποτέλεσμα στην ιδανική περίπτωση είναι μία κυματομορφή μηδενικής ηχητικής πίεσης (απόλυτη ησυχία). Στην πράξη βέβαια λόγω φυσικών περιορισμών το αποτέλεσμα συνήθως είναι ένας ήχος πολύ χαμηλότερης στάθμης από τον αρχικό. Στη γενικότητά του, ένα σύστημα ΕΕΘ υλοποιείται από ένα ή περισσότερα μικρόφωνα (*αισθητήρια σφάλματος*), ένα ή περισσότερα ηχεία (*δευτερεύουσες πηγές*) και έναν ελεγκτή για να οδηγήσει τα ηχεία μέσω ενός αλγορίθμου ελέγχου.

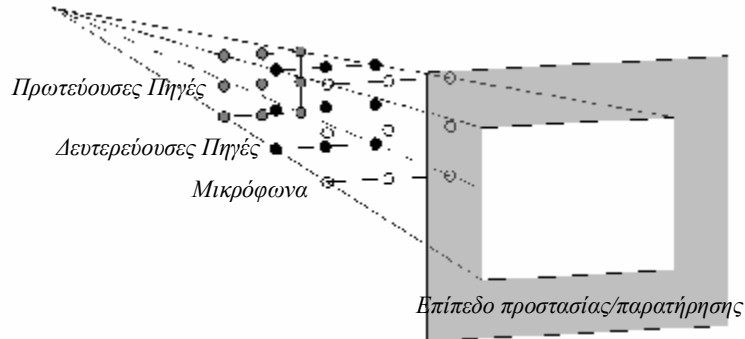
Σήμερα, ο Ενεργός Έλεγχος Θορύβου μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν μόνο παθητικές μέθοδοι ελέγχου. Το χαμηλό κόστος των ψηφιακών μικροελεγκτών σε συνδυασμό με την υψηλή υπολογιστική ισχύ τους, καθώς και η τεχνογνωσία που έχει επέλθει μετά από πολλά χρόνια ερευνών έχουν καταστήσει ιδιαίτερα αποτελεσματική και απολύτως εφικτή τη χρήση του ΕΕΘ τόσο σε περιπτώσεις εξωτερικών όσο και εσωτερικών χώρων [1]. Σε απλές περιπτώσεις, όπως οι αγωγοί αέρος, οι εξατμίσεις, και οι ωτοασπίδες ήδη γίνεται μαζική παραγωγή, ενώ σε κλειστούς χώρους (καμπίνες αεροσκαφών [2], ανελκυστήρες [3]) απαντώνται επίσης αρκετές εφαρμογές.

Στην παρούσα δημοσίευση θα εξεταστεί η περίπτωση της χρήσης ΕΕΘ σε εξωτερικούς χώρους (*Περιβαλλοντικός ΕΕΘ*), με την ιδιαιτερότητα ότι η θέση της πηγής θορύβου (*πρωτεύουσα πηγή*) θα μεταβάλλεται με το χρόνο. Τα τελευταία δέκα χρόνια έχει γίνει σημαντική έρευνα στο αντικείμενο του Περιβαλλοντικού ΕΕΘ, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο [4] όσο και σε τελείως πρακτικό επίπεδο εφαρμογής [5], αλλά η πρωτεύουσα πηγή θορύβου πάντα θεωρούνταν ακίνητη. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές, οι πρωτοπόροι Wright και Vuksanovic απέδειξαν την αποτελεσματικότητα του Περιβαλλοντικού ΕΕΘ σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων με αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Αυτή η αποτελεσματικότητα όμως της θεωρίας και των εφαρμογών τους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην βέλτιστη τοποθέτηση των αισθητηρίων σφάλματος και των δευτερευουσών πηγών σε σχέση με την ακίνητη πρωτεύουσα πηγή θορύβου και του συχνοτικού περιεχομένου του θορύβου, γεγονός που δύσκολα επιτυγχάνεται στην περίπτωση της κινούμενης πηγής [6].

Κάποια θεωρητική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια και για την περίπτωση της κινούμενης πηγής θορύβου. Οι σχετικές δημοσιεύσεις όμως περιορίζονται είτε στην μοντελοποίηση της τροχιάς κίνησης ως μια γραμμική πηγή θορύβου [7], είτε στην αριθμητική προσομοίωση συστημάτων και ελεγκτών [8]. Οι λίγες δημοσιεύσεις που βασίζονταν σε πειραματικές εφαρμογές συνέκριναν κατά κύριο λόγο την αποδοτικότητα διαφόρων υπαρχόντων αλγορίθμων ελέγχου [9]. Είναι εύλογο πόσο χρήσιμη είναι η τεχνογνωσία πάνω στη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς αυτή αντιπροσωπεύει πλήθος περιπτώσεων ηχορρύπανσης (αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, αεροδρόμια). Στη συνέχεια λοιπόν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από την εφαρμογή ΕΕΘ για μία σημειακή κινούμενη πηγή, με την παραδοχή ότι έχουμε *ιδανικό ελεγκτή* (έναν ελεγκτή δηλαδή που χωρίς χρονική καθυστέρηση προσαρμόζεται και ακυρώνει βέλτιστα τον πρωτεύοντα θόρυβο). Έτσι επικεντρωνόμαστε αποκλειστικά στη διερεύνηση του σχεδιασμού της διάταξης, χωρίς να περιοριζόμαστε από τη χρήση συγκεκριμένων αλγορίθμων ελέγχου (πάνω στους οποίους η έρευνα συνεχώς εξελίσσεται).

1. Περιγραφή του συστήματος

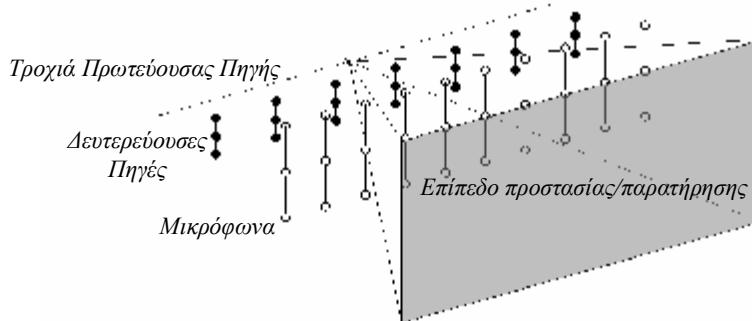
Για τον περιβαλλοντικό ενεργό έλεγχο θορύβου στο παρελθόν έχει ερευνηθεί και χρησιμοποιηθεί το σύστημα του *Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Τοίχου Ακουστικής Σκιάς* – ΗΕΤΑΣ. Το σύστημα αυτό, που εικονίζεται στο Σχήμα 1, αποτελείται από διαδοχικά παράλληλα επίπεδα στα οποία βρίσκονται με τη σειρά πρώτα η πρωτεύουσα πηγή (ή πηγές) θορύβου, μετά οι δευτερεύουσες πηγές, μετά οι αισθητήρες σφάλματος και τέλος η υπό προστασία περιοχή παρατήρησης.



Σχήμα 1. Διάταξη Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Τοίχων Ακουστικής Σκιάς

Όπως είναι εμφανές και από το σχήμα, οι δευτερεύουσες πηγές παράγουν ήχο κατάλληλο ώστε να ταυτιστεί με το μέτωπο του ηχητικού κύματος της πρωτεύουσας πηγής (αλλά αντίθετης φάσης) ελαχιστοποιώντας έτσι την ακουστική πίεση στα μικρόφωνα, και κατά συνέπεια δημιουργώντας μία ηχητική σκιά που εκτείνεται στην περιοχή παρατήρησης (και θεωρητικά μέχρι το άπειρο).

Η παραπάνω διάταξη παρ' όλ' αυτά είναι κατάλληλη μόνο για μία ακίνητη πρωτεύουσα πηγή (ή πλήθος πηγών). Για την περίπτωση της κινούμενης πηγής προτείνεται η διάταξη του Σχήματος 2.



Σχήμα 2. Παραλλαγή Διάταξης για τον έλεγχο κινούμενης πηγής

Στη διάταξη αυτή λαμβάνεται φροντίδα ώστε να υπάρχουν δευτερεύουσες πηγές και αισθητήρια σφάλματος ανάμεσα στην πηγή και στο επίπεδο παρατήρησης για όλο το μήκος της τροχιάς που ακολουθεί η πρωτεύουσα πηγή. Κατά τη λειτουργία του συστήματος δεν είναι απαραίτητο (και σε μερικές περιπτώσεις ούτε επιθυμητό) να λειτουργούν όλα τα μικρόφωνα και όλες οι δευτερεύουσες πηγές ταυτόχρονα. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας ένα αισθητήριο που ανιχνεύει τη θέση της πρωτεύουσας πηγής (με φωτοκύτταρο ή ακόμα και χρησιμοποιώντας το ηχητικό

σήμα της) καθορίζεται από τον αλγόριθμο ελέγχου ποιες είναι οι ωφέλιμες δευτερεύουσες πηγές και ποια τα ωφέλιμα μικρόφωνα κάθε χρονική στιγμή. Καθώς δηλαδή η ενίσχυση των δευτερευουσών πηγής που τίθενται σε λειτουργία αυξάνεται, θα μειώνεται και η ενίσχυση των πηγών που δεν θεωρούνται πια ωφέλιμες από τον ελεγκτή [8].

2. Το Μαθηματικό Μοντέλο

Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του φαινομένου που περιγράφηκε παραπάνω απαιτείται η γνώση των θέσεων και των εκπομπών όλων των πηγών θορύβου κάθε χρονική στιγμή, καθώς και των νόμων που διέπουν τη μετάδοση του ήχου στον εξεταζόμενο χώρο. Στη συνέχεια μπορούμε να θεωρούμε τη θέση και την εκπομπή της πρωτεύουσας πηγής ως δεδομένη, όπως και τις θέσεις των δευτερευουσών πηγών, των αισθητηρίων σφάλματος και της επιφάνειας παρατήρησης. Συνεπώς απομένει ο υπολογισμός της εκπομπής των δευτερευουσών πηγών που ελέγχονται από το σύστημα ΕΕΘ, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η τρισδιάστατη κυματική εξίσωση του αερόφερτου θορύβου είναι

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

ενώ αν θεωρήσουμε σφαιρική συμμετρία για τη διάδοση του κύματος η εξίσωση γράφεται:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.2)$$

όπου p είναι η ακουστική πίεση, c η ταχύτητα του ήχου, r η θέση (ακτινική μεταβλητή) και t ο χρόνος.

Η λύση μπορεί να γραφτεί ως

$$p(r,t) = \frac{F_1\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} + \frac{F_2\left(t + \frac{r}{c}\right)}{r} \quad (2.3)$$

όπου F_1 , F_2 αυθαίρετες συναρτήσεις που παριστάνουν τα εξερχόμενα και τα εισερχόμενα κύματα αντίστοιχα. Για ένα εξερχόμενο μόνο αρμονικό κύμα η εξίσωση (2.3) γίνεται

$$p(r,t) = A \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} \quad (2.4)$$

όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα της αρμονικής διακύμανσης, $k = \omega/c$, και kr είναι η γωνία φάσης με την απόσταση r . Το A είναι ένας μιγαδικός αριθμός που περιγράφει το πλάτος και τη φάση της πίεσης στο σημείο της πηγής. Στη συνέχεια δεν θα γράφουμε τη χρονική μεταβλητή διότι θεωρούμε ότι οι διεγέρσεις και οι αποκρίσεις είναι αρμονικά μεγέθη.

Για μια σφαιρική πηγή με πολύ μικρή ακτίνα (σημειακή πηγή) η μιγαδική πίεση σε ένα σημείο απόστασης r γράφεται:

$$p(r) = qwr \frac{e^{-jkr}}{4pr} \quad (2.5)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και q είναι ο μιγαδικός αριθμός που παριστάνει την παροχή όγκου της πηγής θορύβου (μέτρο και φάση). Χρησιμοποιώντας την

εξίσωση (2.5), η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου μπορεί να υπολογιστεί από την υπέρθεση της δράσης όλων των σημειακών πηγών θορύβου. Έτσι αν θεωρήσουμε την παροχή όγκου μίας πρωτεύουσας πηγής q_p και μίας δευτερεύουσας q_s , η ολική μιγαδική πίεση σε ένα μικρόφωνο m θα είναι το άθροισμα των πιέσεων που προκαλούνται από κάθε μία πηγή:

$$p_m = \sum_p p_{pm} + \sum_s p_{sm} \quad (2.6)$$

Χρησιμοποιώντας εξισώσεις μητρώων για όλα τα μικρόφωνα και όλες τις πηγές, οι πιέσεις στα μικρόφωνα μπορούν να γραφούν:

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_{pm} + \mathbf{P}_{sm} = \mathbf{C}_{pm} \mathbf{Q}_p + \mathbf{C}_{sm} \mathbf{Q}_s \quad (2.7)$$

με τα στοιχεία των μητρώων \mathbf{C} (συντελεστές μετάδοσης) να είναι:

$$c_{pm} = \frac{wr e^{-jkr_{pm}}}{4pr_{pm}}, \quad c_{sm} = \frac{wr e^{-jkr_{sm}}}{4pr_{sm}} \quad (2.8)$$

Ο ΕΕΘ θεωρούμε ότι πραγματοποιείται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στα μικρόφωνα. Ένα κριτήριο για να εκφραστεί αυτό είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος J των τετραγώνων των πιέσεων [1], [4]:

$$J = \sum_m |p_m|^2 = \mathbf{P}_m^H \mathbf{P}_m = \mathbf{P}_{pm}^H \mathbf{P}_{pm} + \mathbf{P}_{sm}^H \mathbf{C}_{sm} \mathbf{Q}_s + \mathbf{Q}_s^H \mathbf{C}_{sm}^H \mathbf{P}_{pm} + \mathbf{Q}_s^H \mathbf{C}_{sm}^H \mathbf{C}_{sm} \mathbf{Q}_s \quad (2.9)$$

Η παραπάνω τετραγωνική μορφή του J ελαχιστοποιείται από το βέλτιστο διάνυσμα:

$$\mathbf{Q}_{s,opt} = -(\mathbf{C}_{sm}^H \mathbf{C}_{sm})^{-1} \mathbf{C}_{sm}^H \mathbf{P}_{pm} \quad (2.10)$$

το οποίο είναι με άλλα λόγια το διάνυσμα των εκπομπών των δευτερευουσών πηγών όταν λειτουργεί ο ιδανικός ελεγκτής ΕΕΘ, ελαχιστοποιώντας τις πιέσεις των αισθητηρίων σφάλματος.

Οι παραπάνω εξισώσεις για απλότητα διατυπώθηκαν για την περίπτωση του απολύτως ελεύθερου πεδίου. Στην περίπτωση της ύπαρξης του εδάφους που ανακλά τον ήχο των πηγών, στις υπολογιζόμενες πιέσεις πρέπει να προστεθεί και το κύμα που φτάνει μετά από την ανάκλαση. Αν για κάθε πηγή θεωρήσουμε τη συμμετρική της ως προς το έδαφος (mirror source), της οποίας το κύμα θα διανύει απόσταση r_m' μέχρι το μικρόφωνο m , οι συντελεστές μετάδοσης των σχέσεων (2.8) θα γίνουν:

$$c_{pm} = \frac{wr e^{-jkr_{pm}}}{4pr_{pm}} + a \frac{wr e^{-jkr'_m}}{4pr'_m}, \quad c_{sm} = \frac{wr e^{-jkr_{sm}}}{4pr_{sm}} + a \frac{wr e^{-jkr'_m}}{4pr'_m} \quad (2.11)$$

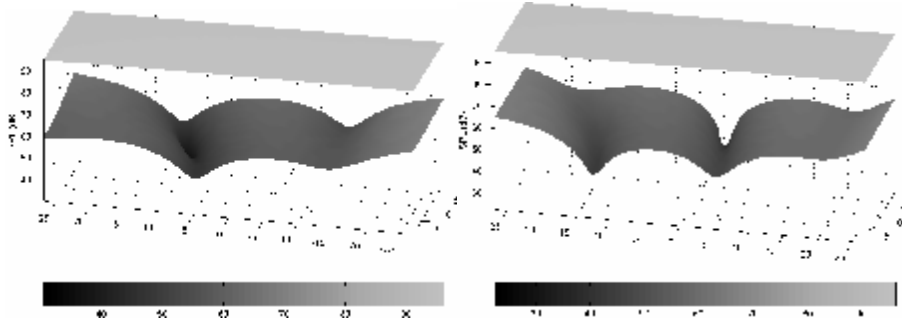
όπου ο συντελεστής ανάκλασης a είναι ένας μιγαδικός αριθμός που παριστάνει το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται από το έδαφος (έχει μέτρο από 0 έως 1) και την οποιαδήποτε αλλαγή φάσης υφίσταται το κύμα κατά την ανάκλαση.

3. Αριθμητική Προσομοίωση

Στην εφαρμογή μας, η πρωτεύουσα πηγή θορύβου κινείται με ταχύτητα 90km/h παράλληλα με τον άξονα y και πάνω στο επίπεδο $y-z$, σε ύψος 1,5m από το έδαφος, και εκπέμπει με μοναδιαίο πλάτος διέγερσης στα 100Hz. Η περιοχή προστασίας – παρατήρησης είναι ορθογωνική 50m × 20m, παράλληλη με το επίπεδο $y-z$ σε απόσταση $x_o=100m$ από την τροχιά της πηγής. Τα μικρόφωνα και οι δευτερεύουσες

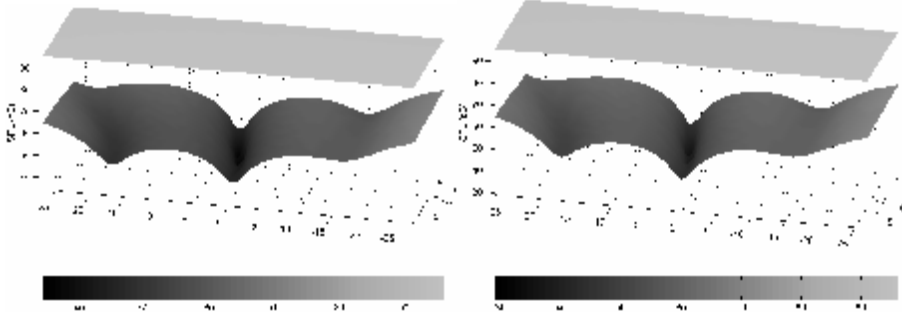
πηγές διατάσσονται σύμφωνα με το Σχήμα 2, σε απόσταση $x_s=1,715\text{m}$ οι πηγές και $x_m=34,3\text{m}$ τα μικρόφωνα. Η διάταξη των μικροφώνων είναι 30×3 , των πηγών 20×3 .

Ακολουθώς παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηχητικών πεδίων στην περιοχή παρατήρησης ανά δέκατο του δευτερολέπτου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται μία επιφάνεια που παριστάνει την πίεση χωρίς ΕΕΘ και μία χαμηλότερη επιφάνεια που παριστάνει την πίεση κατά τη λειτουργία του συστήματος.



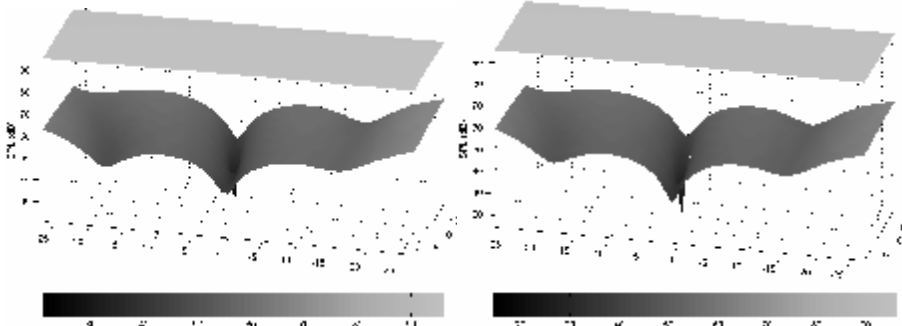
Σχήμα 3. Κατανομή SPL – $t=0$

Σχήμα 4. Κατανομή SPL – $t=0,1\text{sec}$



Σχήμα 5. Κατανομή SPL – $t=0,4\text{sec}$

Σχήμα 6. Κατανομή SPL – $t=0,3\text{sec}$



Σχήμα 7. Κατανομή SPL – $t=0,4\text{sec}$

Σχήμα 8. Κατανομή SPL – $t=0,5\text{sec}$

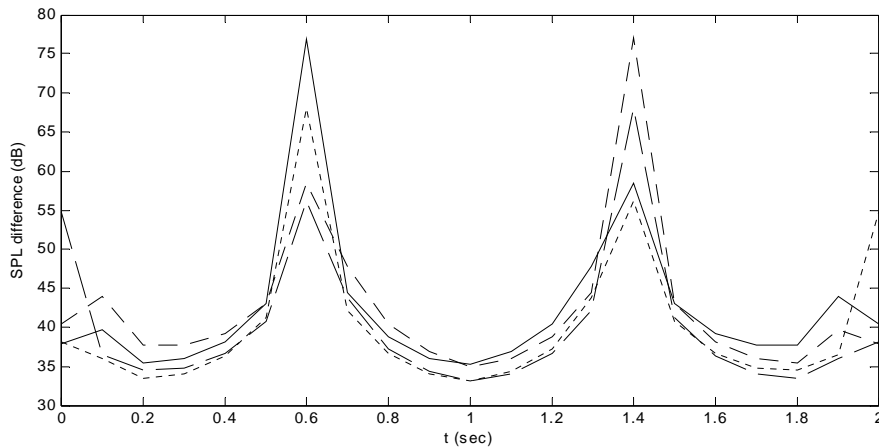
Στα διαγράμματα, ο άξονας που εκτείνεται από -25 έως 25m παριστάνει το μήκος της υπό προστασία περιοχής, ο άξονας που εκτείνεται από 0 έως 20m παριστάνει το ύψος της, ενώ ο τρίτος άξονας παριστάνει τη στάθμη της ηχητικής πίεσης (SPL) σε dB. Ας σημειωθεί ότι χρονική στιγμή $t=0$ θεωρείται η στιγμή που η

κινούμενη πηγή «βλέπει» κάθετα την πρώτη γωνία της υπό προστασία περιοχής και οι συντεταγμένες της είναι $(x_p, y_p, z_p) = (0, -25, 1,5)$.

Επειδή τα παραπάνω διαγράμματα περιγράφουν μόνο τα πρώτα 0,5sec του φαινομένου (ενώ για να καλύψει όλο το μήκος της περιοχής η κινούμενη πηγή χρειάζεται περίπου 2sec), στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η ηχομείωση σε τέσσερα επιλεγμένα σημεία της υπό προστασία περιοχής συναρτήσει του χρόνου. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται επίσης οι συντεταγμένες αυτών των σημείων.

Πίνακας 1. Συντεταγμένες επιλεγμένων σημείων

Σημείο	X	Y	Z	Καμπύλη
A	100,0	-10,0	5,0	————
B	100,0	-10,0	15,0
Γ	100,0	10,0	5,0	- · - · - · -
Δ	100,0	10,0	15,0	- - - - -



Σχήμα 9. Ηχομείωση τεσσάρων επιλεγμένων σημείων συναρτήσει του χρόνου

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται το μέγεθος της ηχομείωσης που μπορεί να επιτευχθεί με το προτεινόμενο σύστημα. Καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου (όπου η κινούμενη πηγή περνάει μπροστά από την περιοχή προστασίας) η στάθμη θορύβου μειώνεται τουλάχιστον 34dB στα τέσσερα αντιπροσωπευτικά σημεία (ενώ σε κάποιες στιγμές φτάνει μέχρι και τα 77dB). Τα μεγέθη αυτά είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που μπορούν να επιτευχθούν με οποιονδήποτε τρόπο παθητικής προστασίας στη συχνότητα που αναφερόμαστε (100Hz). Είναι σημαντικό να αναφερθεί επίσης ότι η απόδοση των ΗΕΤΑΣ δεν εξαρτάται από τη συχνότητα όπως έχει αποδειχτεί από τους Wright και Vuksanovic [4], [5], και συνεπώς το σύστημα θα μπορούσε θεωρητικά να αντικαταστήσει τις παθητικές μεθόδους προστασίας στο ευρύ συχνотικό φάσμα. Τεχνοοικονομικά βέβαια η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται (προς το παρόν) από έναν συνδυασμό των δύο μεθόδων.

4. Περιοχή μεγάλου μήκους

Για την προστασία μίας περιοχής πολύ μεγάλου μήκους θεωρητικά η διάταξη του Σχήματος 2 θα πρέπει να εκτείνεται επίσης σε αντίστοιχα πολύ μεγάλο μήκος

και συνεπώς να περιλαμβάνει πολύ μεγάλο αριθμό αισθητήρων και ηχείων. Στην πράξη όμως υφίστανται περιορισμοί που αφορούν την υπολογιστική ισχύ του ελεγκτή και τις εισόδους/εξόδους που μπορεί να ελέγξει. Στην περίπτωση αυτή, προτείνεται η διαδοχική τοποθέτηση *περισσότερων του ενός* ελεγκτών, ο καθένας εκ των οποίων θα ελέγχει περιορισμένο αριθμό αισθητήρων και ηχείων, και θα επικοινωνεί με τους γειτονικούς του για την χρονική στιγμή που πρέπει να αναλάβει ή να σταματήσει τον έλεγχο.

5. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι ο ΕΕΘ μπορεί να επιτύχει μεγέθη ηχομείωσης (34-77dB στα 100Hz) που είναι απρόσιτα από παθητικές μεθόδους. Στην πράξη βέβαια η παραδοχή του ιδανικού ελεγκτή περιορίζει αυτά τα μεγέθη, αλλά είναι γεγονός ότι η μεγάλη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των σημερινών μικροελεγκτών σταδιακά κάνει αυτήν την προσέγγιση πιο ρεαλιστική. Σήμερα η βέλτιστη τεχνοοικονομική λύση επιτυγχάνεται από έναν συνδυασμό παθητικών και ενεργητικών μεθόδων (ηχοπέτασμα και τοποθέτηση ενεργά ελεγχόμενων ηχείων στους στύλους αυτού) ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος ταυτόχρονα με την μεγιστοποίηση της ηχοπροστασίας.

6. Αναφορές

- [1] P.A. Nelson & S.J. Elliott “Active Control of Sound”, 1992
- [2] S.M. Hirsch, N.E. Meyer, M.A. Westervelt, P. King, F.J. Li, M.V. Petrova, J.Q. Sun, “Experimental Study of smart segmented trim panels for aircraft interior noise control”, J. of Sound and Vibration, 2000, 231(4), 1023-1037
- [3] J. Landaluze, I. Portilla, J.M. Pagalday, A. Martinez, R. Reyero, “Application of active noise control to an elevator cabine”, Control Engineering Practice, 2003, 11, 1423-1431
- [4] S.E. Wright & B. Vuksanovic, “Active control of Environmental Noise”, J. of Sound and Vibration, 1996, 190(3), 565-585
- [5] S.E. Wright & B. Vuksanovic, “Active control of Environmental Noise III: Implementation of theory into practice”, J. of Sound and Vib, 1999, 220(3), 469-496
- [6] J. Guo & J. Pan, “Active control of a moving noise source – Effect of off-axis source position”, J. of Sound and Vibration, 2002, 251(3), 457-475
- [7] D. Duhamel & P. Sergent, “Active control of an incoherent line source”, J. of Sound and Vibration, 1998, 212(1), 141-164
- [8] V. Martin, “Active control of moving sound source radiation – Numerical modelling in the space-frequency and space-time domains”, J. of Sound and Vibration, 1999, 228(3), 477-509
- [9] A. Omoto, T. Matsui, K. Fujiwara, “The behaviour of an adaptive algorithm with a moving primary source”, J. of Acoustical Society of Japan, 1998, 19, 211-221

Elastic protection of cultural monument, using Sylomer[®] elastomer material

Mag. Michael Rümmele, Dipl.-Ing. (FH) Andreas Stofleth
Getzner Werkstoffe, sylomer@getzner.at

Maria Pavlidou, Mech. Eng., MSc, Dimitris Fragos, Mech. Eng., TE
Ergoakoustiki, info@ergoakoustiki.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διάρκεια των κατασκευών για το νέο Μουσείο της Αρχαίας Ολυμπίας προέκυψε η ιδιαίτερη ανάγκη για προστασία μνημείων, όπως το παγκοσμίου φήμης άγαλμα του Ερμή του Πραξιτέλους. Οι υπεύθυνοι του μουσείου, από το Υπουργείο Πολιτισμού, είχαν ως στόχο την προστασία του αγάλματος από πτώση, είτε λόγω αστοχίας του βάθρου, είτε λόγω οποιασδήποτε κίνησης, που θα ήταν δυνατό να οδηγήσει σε θρυμματισμό μίας ανεκτίμητης πολιτιστικής κληρονομιάς.

Αυτή η προστασία επετεύχθη μέσω της εγκατάστασης μίας ελαστικής βάσης γύρω από το βάθρο του αγάλματος, χρησιμοποιώντας το ελαστομερές υλικό SYLOMER[®], προϊόν της εταιρείας GETZNER Werkstoffe Ges.m.b.H. Ο κατάλληλος τύπος του υλικού ως προς τις ιδιότητες απόσβεσης και τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, επιλέχθηκε κατόπιν διερεύνησης της συμπεριφοράς ενός τμήματος του αγάλματος που πέφτει κάτω. Αυτή η επιλογή έγινε μετά από μία σειρά προσομοιώσεων της πρόσκρουσης του τμήματος του αγάλματος στην ελαστομερή βάση. Αυτά τα πειράματα οδήγησαν στον κατάλληλο τύπο και στο κατάλληλο πάχος του ελαστομερούς υλικού για την εφαρμογή.

Η εργασία αυτή περιγράφει το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε, καθώς και τη θεωρητική και πειραματική προσέγγιση προς την επίλυσή του.

ABSTRACT

In the constructions for the new Museum of Ancient Olympia there came about a special need for the protection of certain monuments, such as the world known statue of Hermes of Praxitelus. The museum authorities from the Greek Ministry of Culture were aiming to protect the statue against falling either due to pedestal failure or other arbitrary movement, which could result to the shattering to pieces of an invaluable cultural heritage.

This protection was achieved through the installation of an elastic base around the pedestal of the statue, using SYLOMER[®] elastomer material, a product of the company GETZNER Werkstoffe Ges.m.b.H. The suitable type of material regarding its damping properties and energy absorption capacity was selected after examining the behaviour of a part of the statue falling down. This selection was made through a series of simulations of the impact of part of the statue to the elastomer base. This experimentation concluded to the right type and thickness of elastomer material for the area of application.

This paper describes the problem encountered and the theoretical and experimental approach towards its solution.

1. Introduction

370 B.C Praxiteles, one of the famous artists of this time, created Hermes of Olympia. The statue's height is 2,15 m with a weight of 2500 kg. It stands on a 1,25 m high pedestal showing Hermes the ancient messenger of the gods. In this position he carries his brother Dionysos, at Zeus command, away from his mortal mother Semele into the protective outback to deprive him of the range of his jealous step-mother Hera. The scene captured by Praxiteles shows the messenger of gods resting in the woods, stepping or leaning on a lopped trunk in the classic extreme "hip-shot" sway of Praxiteles' works, dangling (once) a bunch of grapes high up in his outstretched right arm to amuse the baby god who will grow up to show men how to make wine (Figure 1) [2].

This heritage is one of the best known cultural assets all over the world. For this reason lots of efforts are being taken to minimize the number of parts being split into when the statue or more respectively parts of it fall down. This protection should be achieved by the installation of an elastic base around the pedestal of the statue, using Sylomer® elastomer material. This paper describes the theoretical and experimental approach towards the solution of this problem.

2. Experimental Setup

The shock responses of different materials with different thicknesses were measured with a servo-hydraulic testing machine PSB250 from Schenck/Instron, from now on referred as Hydropuls. This testing device consists of an aligned frame capable of 250 kN, two testing boards for mounting of the test sample, a 250 kN servo hydraulic actuator, a load cell for forces up to 250 kN and a built-in position transducer for strokes up to 160 mm. The controller for this configuration is named "Fast Track 8000" from Instron. The controlling of the actuator is done by a closed loop control (PID). Via GPIB the tower is connected to a PC with a special testing software, RSBasLab, where the tower can be controlled from. The modules of this software primarily were designed to test the stiffness of elastomers. Besides also a lot of other tests controlling force and position can be done.

It was only possible to have a closer look at one scenario simulating the fall of parts from the statue. Reason is that the dynamic forces which can be applied to the material by means of the Hydropuls are limited. This is, because of the amplitudes and velocities being that high. Therefore it was decided to look only at the fall of the approximately 30 kg heavy head of the Hermes statue from a height of 3 m. The results of this test were a good indicator for the suitability of the selected material since greater masses will have greater bearing areas and/or less fall heights. For testing, the head was simulated by a stone showing similar dimensions and surface areas.

This stone was inserted into the pick-up device of the Hydropuls. The dimensions of the elastic pad where in all cases 500 mm x 500 mm x 75 mm (length x width x thickness) (Figure 2). The resulting load deflection curves were finally used to identify the absorbed energy at a certain deflection. Since the potential energy of the system was known it was possible to select the material which had the lowest restoration force.

3. Proceeding and Results

The first step was to select the best suited material from the product range offered by Getzner. The materials are: Sylodyn, a product with closed cells and best

dynamical performance due to the little mechanical loss factor, Sylodamp, a product with a high mechanical loss factor for vibration and damping applications, Sylomer, a combination between spring and damper. Sylodyn was not taken into consideration since the loss factor of this material is too small. The small damping characteristic of the material could result in bouncing of the fallen part away from the elastically protected area. Therefore only Sylomer and Sylodamp were taken into consideration. To limit the testing effort only Sylomer M, L and Sylodamp HD100 of the product range were chosen for further tests by means of a rough approximation of the resulting forces and deflections. The thickness was known from the beginning because a greater thickness will reduce the resulting restoration force, since this force is inversely proportional to the travel, applied to the falling part of the statue. Therefore the maximum by the costumer allowed thickness of 75 mm was chosen.

The contact area of the tested stone was in unloaded case 27000 mm² and increased continuously up to a value of 60800 mm² (Figure 3). This punctual load at the beginning and the subsequent increase of the contact area describes the impingement of the head onto the elastomer protection bed.

To get an idea which material should be tested more closely in a first step a half-sinusoidal wave was applied over 0.5 s to 500 mm x 500 mm x 75 mm (length x width x thickness) test samples of all three material types. These first rough tests resulted in case of Sylodamp HD100 at a deflection of 55mm in a maximum force of 127 kN, for Sylomer L in a maximum force of 36 kN at 56mm and for Sylomer M in a maximum force of 59 kN at 57 mm (Figure 4). The minimal force at the same deflection is obtained in case of Sylomer L. This material is not able to absorb 900Nm - which is the potential energy of the head with 30 kg when falling down from 3 m – due to the fact that the load deflection curve is flat at the beginning and gets progressive at the end which is an indicator that the material is overloaded. Therefore it was decided to exclude Sylomer L from further tests.

Sylodamp HD100 and Sylomer M are both capable to absorb the required 900 Nm. Therefore these two materials were looked at closer. Because of the fact that the possible velocity v_T (equation 1) of the used Hydropuls testing device was limited for that great amplitudes of 55 mm and at that high falling velocities v_F (equation 2) it was necessary to use a characteristic stiffening curve of an elastomer damper to be able to evaluate the resulting restoration force.

$$v_T = A w \cos(wt) = 2A pf \cos(2pf * t) = 0.346 \frac{m}{s} \quad (1)$$

$$v_F = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9.81 * 3} = 7.7 \frac{m}{s} \quad (2)$$

where h=fall height(3m), A=amplitude(55mm), f=testing frequency (1Hz sinusoidal) and t=time (maximum velocity at t=0)

The characteristic curve (Figure 5) shows the stiffening of an elastomer damper in correlation to the testing velocity up to a value of 4 m/s. To obtain this curve it was necessary to calculate the ratio between the dynamic and the static force at certain deflections (Figure 5). Because of the fact that this graph is describing the material's behaviour up to a testing-velocity of 4 m/s it was necessary to extrapolate up to 7.7 m/s. Sylodamp has a similar loss factor as the material showing this

characteristic curve behaviour, so it was possible to put this curve directly onto the measurements with the inclusion of a safety factor, taken into consideration for a possible lighter stiffening. But Sylomer - like Sylodamp - has also a viscose-elastic damping part, indeed much smaller compared to Sylodamp, which results in a stiffening of the material under these testing conditions. Therefore this curve can also be applied to the measurements in reduced form, due to the smaller damping coefficient of Sylomer M (Figure 6). By means of this acquired stiffening functions, the measured load deflection curves had to be extrapolated for higher velocities. To do so all forces were multiplied with the calculated stiffening factors. With the obtained curves it was possible to get the resulting deflection at the energy of 900 Nm which is 32 mm for Sylodamp HD100 and 39 mm for Sylomer M (Figure 7). With these deflections the restoration force could be defined. In case of Sylodamp HD100 the result was 61,5 kN at a deflection of 32 mm. For Sylomer M the result was 54,5 kN at 39 mm deflection (Figure 8). So we decided to take Sylomer M with a thickness of 75 mm because of the lower restoration force: The lower the restoration force, the lower the forces applied on the falling part.

4. Conclusion

Nevertheless an exact simulation of the problem was not possible due to the limitation of the utilized testing device. The described approach, using a stiffening curve, showed that Sylomer M with a thickness of 75 mm is the right choice for this elastic bedding. All other tested materials were not able to bear the load or created higher restoration forces than accepted. In case of higher possible falling masses the limits of the material would still not be reached because in this scenario it is not loaded at its maximum. In addition, greater masses will inherit greater impinge areas confirming the usage of the material type. In a whole the pedestal was placed in the middle of 6 m x 6 m of the elastomer Sylomer M75.

5. References

- [1] All company and product names that appear in this paper are trademarks of their respective owners, including: Sylodamp, Sylomer, Sylodyn
- [2] Department of the history of art, August 2004, Monument Lists
<http://www.arthistory.upenn.edu/fall98/101/noteweekVIII.html>
- [3] Getzner Werkstoffe, Data sheets, 1999
- [4] W. T. Thomson and M. D. Dahleh, Theory of Vibrations and Application 5th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998
- [5] Schenck Instron, Technical manual, 1994
- [6] Stroppe, Physik, Fachbuchverlag, Leipzig, 1994

6. Appendix of used pictures and graphs used in the paper



Figure 1: Picture of the Hermes statue



Figure 2: Setup of the experiment, showing the Hydropuls testing device, the stone representing the head of the statue and the elastic bedding with Sylomer M75

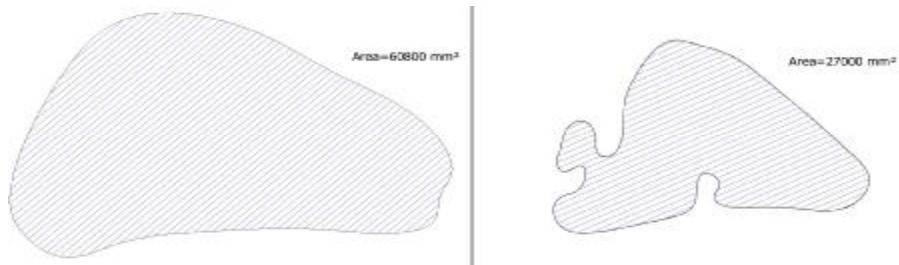


Figure 3: Calculation of the contact area between stone and elastic material without load applied by the Hydropuls (right side) and after loading (left side)

Load Deflection Curves

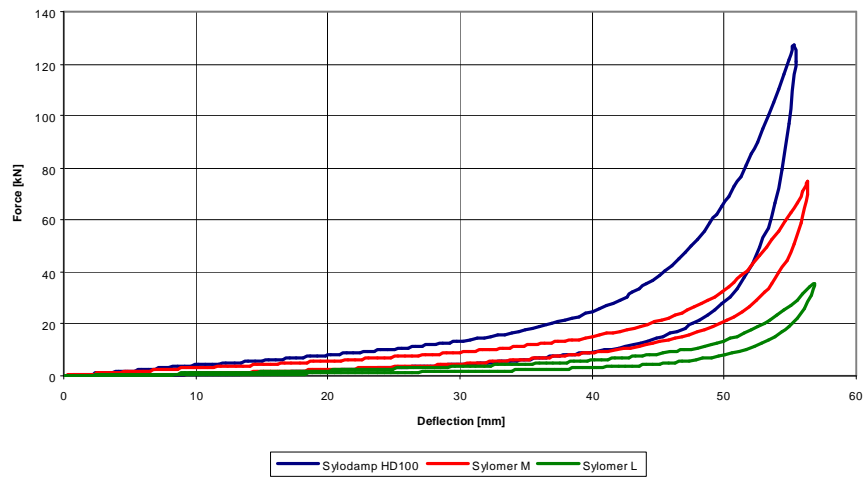


Figure 4: Load deflection curve measured with an impinge duration of 0.5 s

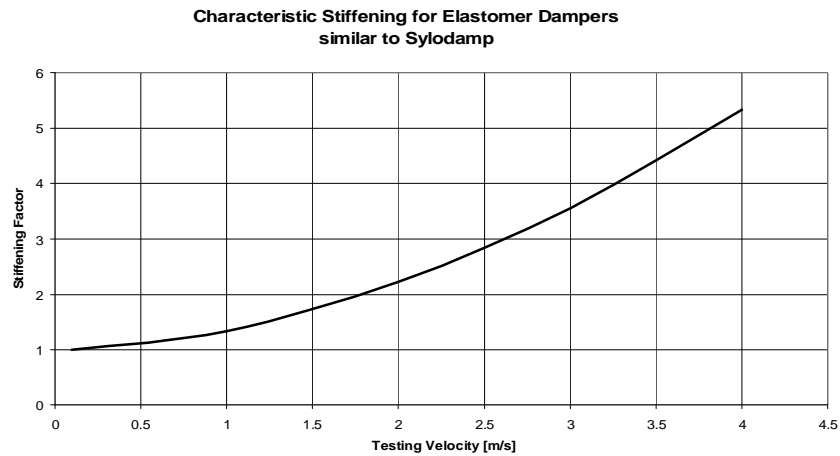


Figure 5: Characteristic curve for stiffening of viscose - elastic dampers

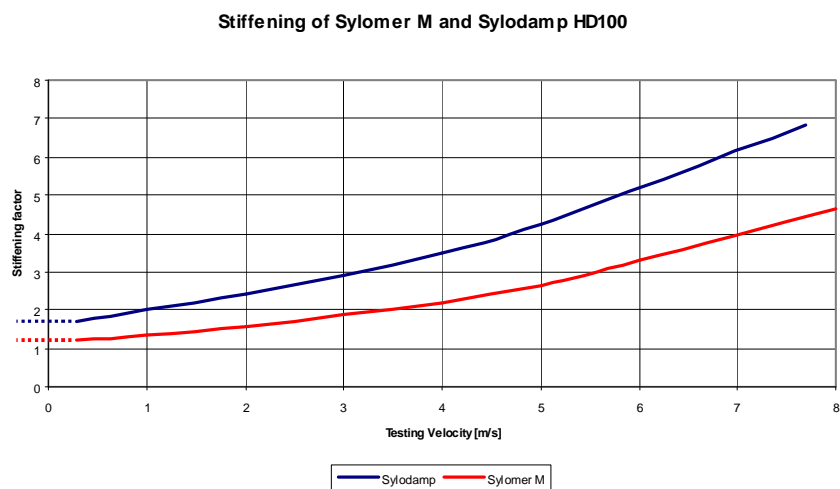


Figure 6: Stiffening of Sylomer and Sylodamp. It is the nature of all elastomers that the dynamic behaviour is stiffer than the static one. Whereas the magnitude of this ratio – static to dynamic- is mainly influenced by the loss factor or rather the viscosity and plasticity of the material. To take this stiffening effect into consideration an offset was added to the stiffening curves, corresponding to a measured average stiffening of the material at small velocities.

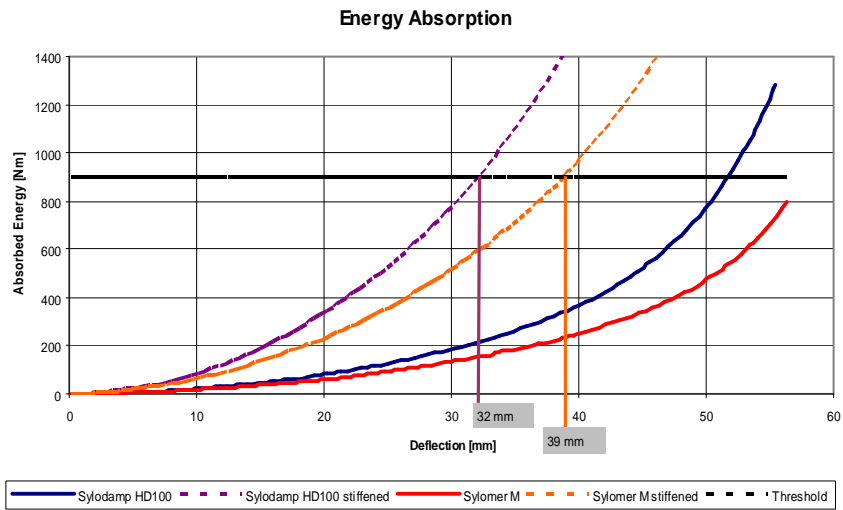


Figure 7: Energy absorption curves based on the measurements illustrated in figure 4. The dashed lines represent the energy absorption after taking into account the stiffening of Sylomer and Sylodamp.

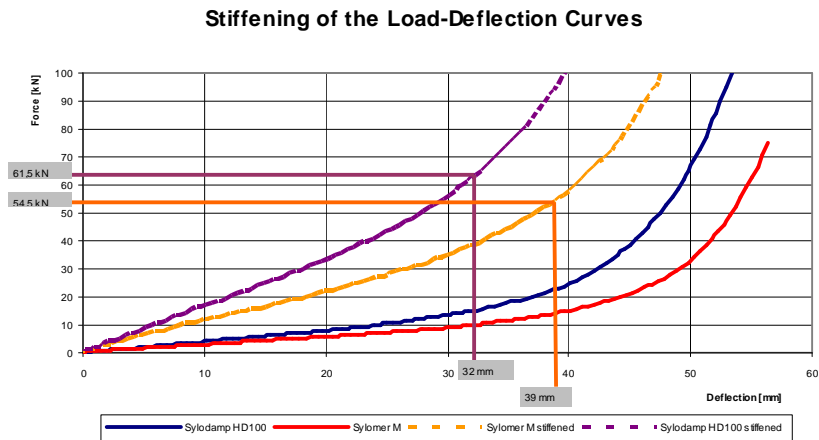


Figure 8: Load deflection curves based on the measurements illustrated in figure 4. The dashed lines represent the load deflection curve after taking into account the stiffening of Sylomer and Sylodamp.

Απώλεια μετάδοσης διπλών τοιχωμάτων με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz ή συνηχητές μεμβράνης

Σ. Κουζούπης
Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής
ΤΕΙ Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου

Α. Τροχίδης
Τομέας Φυσικής, Γενικό Τμήμα
Πολυτεχνική Σχολή
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέσω της μεθόδου του λόγου των πιέσεων, υπολογίζεται η απόδοση, και γίνονται συγκρίσεις, διαφόρων διπλών τοιχωμάτων που ενσωματώνουν συνηχητές Helmholtz ή συνηχητές μεμβράνης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και οι δύο τύποι των συνηχητών παρέχουν σημαντική αύξηση της απώλειας μετάδοσης, σε επιλεγμένες συχνότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την ηχοαπομόνωση των ελαφρών διπλών χωρισμάτων. Στη περίπτωση των ενσωματωμένων συνηχητών Helmholtz, η αύξηση συνοδεύεται από μία μείωση πάνω από τη συχνότητα συντονισμού. Στη περίπτωση των ενσωματωμένων συνηχητών μεμβράνης, η αύξηση έχει μικρότερο εύρος χωρίς όμως μείωση, πάνω από τη συχνότητα συντονισμού της διάταξης του διπλού τοιχώματος.

ABSTRACT

The transmission loss of double partitions with internal Helmholtz or membrane resonators is investigated. By using the pressure ratio method, the performance of different double partitions with incorporated resonators are calculated and compared. The results show that both types of resonators provide substantial increase in transmission loss at selected frequencies and can be used to improve the insulation performance of lightweight double partitions. In case of Helmholtz resonators, the increase is accompanied by a decrease above the resonance frequency. In case of membrane resonators, the increase in transmission loss is more narrow-banded with no decrease, however, above the resonance frequency of the arrangement.

1. Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ελαφρών χωρισμάτων με υψηλή απώλεια μετάδοσης (TL), είναι ένα σημαντικό θέμα για πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπως είναι οι κλωβοί μηχανημάτων, οι άτρακτοι αεροσκαφών ή τα απλά χωρίσματα χώρων. Συνήθως επιλέγονται διπλά χωρίσματα σε αυτές τις περιπτώσεις, αλλά ο αέρας ανάμεσα τους, ακόμα και με την προσθήκη απορροφητικού υλικού, προκαλεί τη δυναμική σύζευξη των δύο φύλλων και μειώνει την αποδοτικότητα του όλου χωρίσματος. Για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των χωρισμάτων αρκετοί ερευνητές [1], [2], [4], [5] χρησιμοποίησαν συνηχητές Helmholtz. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του πίνακα μεταφοράς [2] και η μέθοδος του λόγου των πιέσεων που αναπτύχθηκε από τον Beranek [3]. Οι δύο μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Λόγω της παρουσίας των συνηχητών Helmholtz, η απώλεια μετάδοσης των διπλών τοιχωμάτων παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε επιλέξιμες περιοχές συχνοτήτων. Ταυτόχρονα η βελτίωση συνοδεύεται από μικρή μείωση της απώλειας μετάδοσης εκατέρωθεν της επιλεγμένης περιοχής συχνοτήτων. Εδώ θα εξετάσουμε το αποτέλεσμα που έχει η χρήση συνηχητών μεμβράνης στη θέση των συνηχητών Helmholtz και θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων.

2. Θεωρία

Για να εξετάσουμε και τις δύο περιπτώσεις με ένα ενοποιημένο τρόπο θα χρησιμοποιήσουμε εδώ την μέθοδο του λόγου των πιέσεων. Για κάθετη ηχητική πρόσπτωση, η απώλεια μετάδοσης στην περίπτωση ενός χωρίσματος αποτελούμενου από n στρώματα μπορεί να εκφραστεί [3], σε σχέση με το γινόμενο του λόγου των πιέσεων εκατέρωθεν κάθε στρώματος που συνιστά το τοίχωμα:

$$TL = 20 \log \left[\left(\frac{Z_1 + r c}{2Z_1} \right) \frac{p_1 p_2 p_3 \mathbf{K} p_n}{p_2 p_3 p_4 \mathbf{K} p_t} \right]$$

Η αριθμηση αρχίζει από την πλευρά της πηγής, ενώ $p_1 = p_{inc}$ είναι η συνολική πίεση στο πρόσωπο του πρώτου στοιχείου, p_t είναι η μεταδιδόμενη πίεση, p_n/p_{n+1} είναι ο λόγος των πιέσεων εκατέρωθεν του n -οστού στοιχείου, rc είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του αέρα και Z_1 είναι η αντίσταση εισόδου του πρώτου στοιχείου.

Στην παρούσα μελέτη θα εξετάσουμε τοίχωμα αποτελούμενο από δύο φύλλα (εμπρόσθιο και οπίσθιο), όπου ενδιάμεσα έχει ενσωματωθεί μία συστοιχία συνηχητών Helmholtz ή εναλλακτικά μία συστοιχία συνηχητών μεμβράνης. Η απώλεια μετάδοσης εκφράζεται μέσω του συντελεστή μετάδοσης, ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου της μεταδιδόμενης προς την προσπίπτουσα πίεση. Ο λόγος αυτός γράφεται,

$$\frac{p_{inc}}{p_t} = \frac{Z_1 + r c}{2Z_1} \left[Z_2 \left(\frac{A}{r c} - i \frac{B}{Z_B} \right) \right]$$

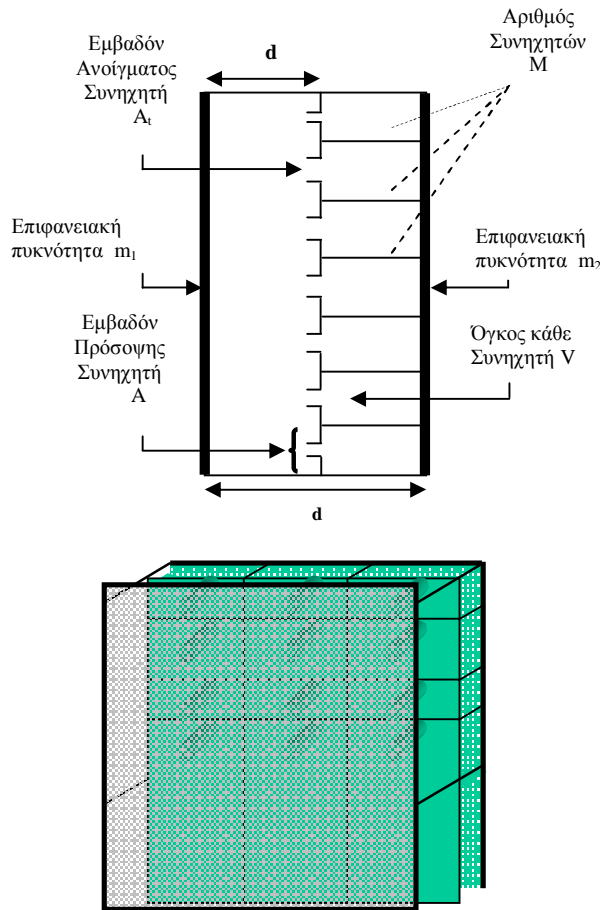
όπου Z_1 είναι η σύνθετη αντίσταση του εμπρόσθιου φύλλου του τοιχώματος, Z_2 η αντίσταση του οπίσθιου φύλλου, ενώ τα A και B δίνονται από τις σχέσεις:

$$A = \cos kd_f - \frac{w m_1 \sin kd_f}{r c} \quad , \quad B = \sin kd_f + \frac{w m_1 \cos kd_f}{r c}$$

Στις παραπάνω σχέσεις m_1 είναι η επιφανειακή πυκνότητα του εμπρόσθιου φύλλου, d_f είναι το εύρος του διάκενου μεταξύ του εμπρόσθιου φύλλου και της συστοιχίας των συνηχητών, ενώ Z_B είναι ο παράλληλος συνδιασμός της σύνθετης αντίστασης Z_2 του οπίσθιου φύλλου με τη συνολική σύνθετη αντίσταση Z της συστοιχίας των συνηχητών Helmholtz ή συνηχητών μεμβράνης αντίστοιχα. Δηλαδή θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$Z_B = \frac{Z Z_2}{Z + Z_2} \quad , \quad Z_2 = r c - i w m_2$$

Οι δύο περιπτώσεις όπου έχουμε διπλό τοίχωμα με ενσωματωμένη συστοιχία συνηχητών Helmholtz ή συνηχητών μεμβράνης εξετάζονται συνοπτικά παρακάτω.



Σχήμα 1: Η διάταξη του διπλού τοιχώματος με συνηχητές Helmholtz.

2.1 Συνηχητές Helmholtz

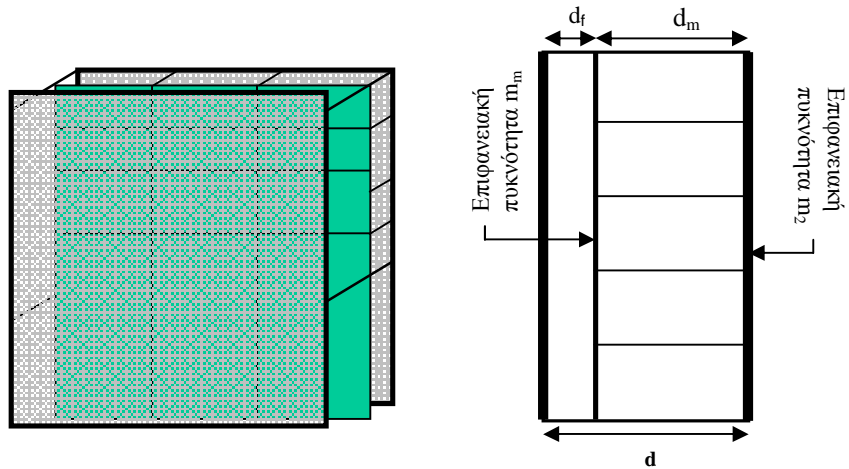
Θεωρούμε τη διάταξη όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η σύνθετη αντίσταση κάθε συνηχητή δίνεται από την:

$$Z_r = R - i \left(\omega L - \frac{1}{\omega G} \right)$$

Η αδράνεια L δίνεται από την $\rho(1+1.6r)/(\pi r^2)$, όπου l και r είναι αντίστοιχα, το μήκος του λαιμού και η ακτίνα της κυκλικής διατομής του λαιμού του συνηχητή. Η ακουστική χωρητικότητα ισούται με $G=V/\rho c^2$, όπου V είναι ο όγκος της κοιλότητας του συνηχητή. Η αντίσταση παρέχεται από την $R=2(\pi \mu r f)^{1/2}/(\pi r^2)(2+(1+1.6r)/r)$ όπου μ είναι το διατμητικό ιξώδες για τον αέρα και f η συχνότητα. Στην περίπτωση όπου ενδεχομένως θέλουμε να έχουμε M το πλήθος συνηχητές με διαφορετικές ιδιότητες, τότε η συνολική σύνθετη αντίσταση τους θα δίνεται από την,

$$Z = \left(\sum_{j=1}^M \frac{1}{Z_j} \right)^{-1}$$

όπου Z_j είναι η σύνθετη αντίσταση του j -οστού συνηχητή.



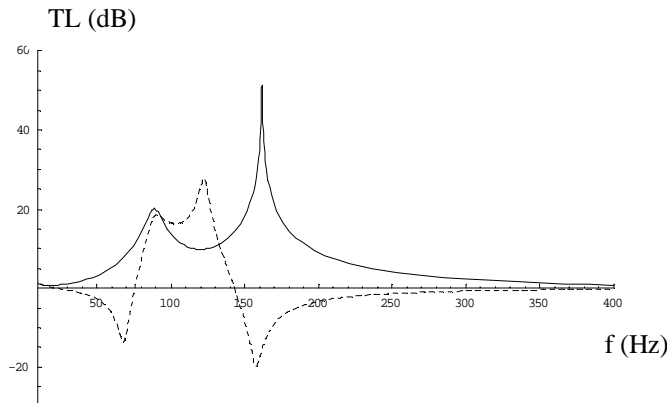
Σχήμα 2: Η διάταξη του διπλού τοιχώματος με συνηχητές μεμβράνης.

2.2 Συνηχητές Μεμβράνης

Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2, όπου d_f είναι η απόσταση του εμπρόσθιου φύλλου από τη συστοιχία των συνηχητών, ενώ d_m είναι το πάχος κάθε συνηχητή στη συστοιχία το οποίο λαμβάνουμε κοινό για όλους. Σαν παραμέτρους στο σχεδιασμό χρησιμοποιούμε την επιφανειακή πυκνότητα της μεμβράνης m_m και την απόσταση d_f . Η σύνθετη αντίσταση για έναν συνηχητή μεμβράνης, αγνοώντας τις εσωτερικές απώλειες [6], είναι:

$$Z_m = i\omega m_m - \frac{rc}{i \tan\left(\frac{\omega d_m}{c}\right)}$$

Η ακριβής συχνότητα συντονισμού βρίσκεται ως λύση της εξίσωσης: $\omega m_m + \rho c \cot(\omega d_m/c) = 0$. Η συνολική σύνθετη αντίσταση του διπλού τοιχώματος υπολογίζεται μέσω της μεθόδου που περιγράφηκε στην παραπάνω κύρια ενότητα. Η αντίσταση Z_m κάθε συνηχητή μεμβράνης αντικαθιστά την αντίσταση Z_r κάθε συνηχητή Helmholtz. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει απορροφητικό υλικό ανάμεσα στα δύο φύλλα (εύκολα μπορεί να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, αν χρειαστεί). Ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή και σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δύο περιπτώσεις.

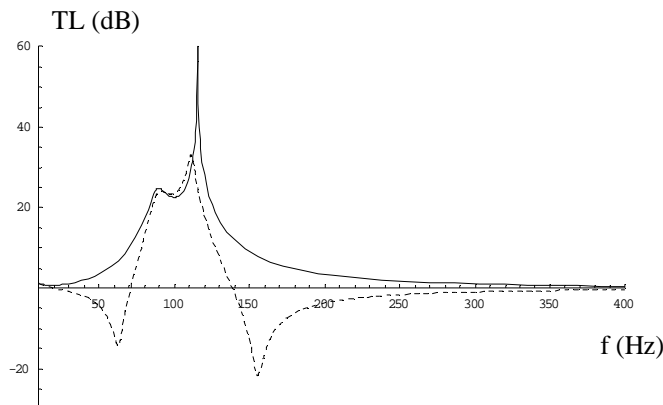


Σχήμα 3: Προβλεπόμενη βελτίωση του δείκτη ηχομείωσης διπλού τοιχώματος με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz (διακεκομμένη καμπύλη) και συνηχητές μεμβράνης (συμπαγής καμπύλη). Οι ιδιότητες των συνηχητών δίνονται στη στήλη Α του Πίνακα 1.

3. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Βασίζομενοι στην ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων δίνουμε σε αυτή την ενότητα αριθμητικά αποτελέσματα για την απώλεια μετάδοσης διπλών τοιχωμάτων με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz και μεμβράνης. Σε όλα τα σχήματα που θα ακολουθήσουν εμφανίζεται η βελτίωση της απώλειας μετάδοσης σε dB σε σχέση με την απώλεια μετάδοσης του χωρίσματος χωρίς την ύπαρξη των συνηχητών Helmholtz ή μεμβράνης. Ως εκ τούτου μία αρνητική βελτίωση υποδηλώνει μείωση της απώλειας μετάδοσης σε σχέση με την μη ύπαρξη συνηχητών. Για να γίνουν ευκολότερα οι συγκρίσεις θεωρούμε ένα τοίχωμα με σταθερό πάχος $d=0.15$ m, αποτελούμενο από δύο φύλλα με ίδια επιφανειακή πυκνότητα, $m_1=m_2=6$ Kg/m². Σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα συντονισμού του διάκενου είναι 89 Hz. Για την περίπτωση των συνηχητών Helmholtz οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σαν μεταβλητές στον όλο σχεδιασμό ήταν οι εξής: Το εύρος του διάκενου μπροστά από τη συστοιχία των συνηχητών d_f , ο αριθμός των συνηχητών M ανά μονάδα επιφάνειας, το εμβαδόν της επιφάνειας πρόσωσης του κάθε συνηχητή A , η επιφάνεια διατομής A_t και το μήκος L του λαιμού των συνηχητών. Όλες αυτές οι

παράμετροι προσδιορίζουν επακριβώς τον όγκο και την ιδιοσυχνότητα κάθε συνηχητή. Αντίστροφα, ανάλογα με την επιθυμητή συχνότητα συντονισμού οι παράμετροι αυτοί μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα. Στην περίπτωση των συνηχητών μεμβράνης οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό είναι το εύρος του διάκενου μπροστά από τη συστοιχία των συνηχητών d_f και η επιφανειακή πυκνότητα της μεμβράνης m_m . Θα θεωρήσουμε εδώ ότι οι συστοιχίες των συνηχητών αποτελούνται μόνον από μία ομάδα συνηχητών με κοινές χαρακτηριστικές παραμέτρους, με κοινή ιδιοσυχνότητα. Είναι δυνατόν να αυξηθεί το εύρος της περιοχής όπου θα έχουμε σημαντική βελτίωση στο δείκτη ηχομείωσης, αν συμπεριλάβουμε δύο ή περισσότερες ομάδες συνηχητών με διαφορετικές ιδιότητες. Λόγω του περιορισμένου χώρου δεν θα εκτεθούν εδώ οι περιπτώσεις αυτές. Το Σχήμα 3 παρουσιάζει τη βελτίωση στο δείκτη ηχομείωσης διπλού τοιχώματος με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz (διακεκομμένη καμπύλη) και συνηχητές μεμβράνης (συνπαγής καμπύλη). Η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε 49 πανομοιότυπους συνηχητές, που συντονίζονται στα 122 Hz, ενώ το διάκενο μπροστά από τη συστοιχία των συνηχητών είναι $d_f = 8$ cm. Οι συνηχητές μεμβράνης συντονίζονται στα 161 Hz, το διάκενο μπροστά από τη συστοιχία των συνηχητών είναι $d_f = 2$ cm και η επιφανειακή πυκνότητα της μεμβράνης είναι $m_m = 1$ Kg/m². Οι ιδιότητες των ενσωματωμένων συνηχητών Helmholtz και μεμβράνης δίνονται στη στήλη Α του Πίνακα 1.



Σχήμα 4: Προβλεπόμενη βελτίωση του δείκτη ηχομείωσης διπλού τοιχώματος με ενσωματωμένους συνηχητές Helmholtz (διακεκομμένη καμπύλη) και συνηχητές μεμβράνης (συνπαγής καμπύλη). Οι ιδιότητες των συνηχητών δίνονται στη στήλη Β του Πίνακα 1.

Μία δεύτερη περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 4, όπου πάλι έχουμε μία ομάδα με 49 ίδιους συνηχητές, εκ των οποίων οι συνηχητές Helmholtz συντονίζονται στα 111 Hz ενώ οι συνηχητές μεμβράνης συντονίζονται σε παραπλήσια συχνότητα (115 Hz). Οι ιδιότητες τους εμφανίζονται αντίστοιχα στη στήλη Β του Πίνακα 1. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του τοιχώματος με συνηχητές Helmholtz έχουμε μεγάλη βελτίωση στο δείκτη ηχομείωσης στην περιοχή συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα συντονισμού του διάκενου. Αυτή όμως η βελτίωση συνοδεύεται πάντα από μία μείωση του δείκτη ηχομείωσης (σε σχέση με το απλό διπλό τοίχωμα), σε μία περιοχή κάτω και πάνω από τη συχνότητα συντονισμού του διάκενου. Αντίθετα,

στην περίπτωση του διπλού τοιχώματος με συνηχητές μεμβράνης, ενώ έχουμε σημαντική βελτίωση στο δείκτη ηχομείωσης, στην προαναφερθείσα περιοχή, μία παρόμοια μείωση του δείκτη εκατέρωθεν της συχνότητας συντονισμού του διάκενου, δεν παρατηρείται. Το γεγονός ότι η καμπύλη της βελτίωσης εμφανίζεται με πολύ οξεία κορυφή, στη περίπτωση των συνηχητών μεμβράνης, αποδίδεται στο ότι απώλειες δεν ελήφθησαν υπόψη.

Πίνακας 1

Ιδιότητες των συνηχητών Helmholtz	A	B
Εύρος διάκενου μπροστά από τη συστοιχία d_f (cm)	8	5
Αριθμός συνηχητών σε κάθε πάνελ του τοιχώματος, M	49	49
Εμβαδόν πρόσοψης κάθε συνηχητή A (cm ²)	204	204
Εμβαδόν καθέτου διατομής του λαιμού A_l (cm ²)	2	2.5
Όγκος κάθε συνηχητή (cm ³)	1428	2040
Ακτίνα κυκλικής διατομής λαιμού (cm)	0.79	0.89
Μήκος λαιμού (cm)	1.5	1.5
Συχνότητα συντονισμού f_r (Hz)	122	111
Ιδιότητες των συνηχητών Μεμβράνης		
Εύρος διάκενου μπροστά από τη συστοιχία d_f (cm)	2	2
Επιφανειακή πυκνότητα της μεμβράνης m_m (Kg/m ²)	1	2
Αριθμός συνηχητών σε κάθε πάνελ του τοιχώματος, M	49	49
Συχνότητα συντονισμού f_r (Hz)	161	115

4. Αναφορές

- [1] J. Enger and T.E. Virgan, "Transmission loss of double partitions containing resonant absorbers", Proceedings of the Institute of Acoustics **7**, 125-128 (1985).
- [2] R.A. Prydz, L.S. Wirt, H.L.Kuntz and L.D. Pope, "Transmission loss of a multiplayer panel with internal tuned Helmholtz resonators", The Journal of the Acoustical Society of America **87**(4), 1597-1602, (1990).
- [3] L.L. Beranek and G.A. Work, "Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets" The Journal of the Acoustical Society of America **21**, 419-428, (1949).
- [4] L.M. Mason and F.J. Fahy, "The use of acoustically tuned resonators to improve the sound transmission loss of double-panel partitions", Journal of Sound and Vibration, Vol. 124(2), 367-379, (1988).
- [5] H.L. Kuntz, R.A. Prydz, F.J. Balena and R.J. Gattineau, "Development and testing of cabin sidewall acoustic resonators for the reduction of cabin tone levels in propfan-powered aircraft", Noise Control Engineering Journal, Vol. 37(3), p.129, (1991).
- [6] W. Frommhold, H.V. Fuchs and S. Sheng, "Acoustic performance of membrane absorbers", Journal of Sound and Vibration, Vol. 170(5), 621-636, (1994).

Μελέτη και σχεδιασμός ειδικών σεισμικών αναστολέων

Θεόδωρος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός / Καμπούρογλου 19, 11525 Αθήνα
Σύμβουλος ΑΛΦΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΕ
info@vibro.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μηχανήματα που εδράζονται σε αντικραδασμικές βάσεις, όπως ελατήρια, ελαστικά εφέδρανα κλπ., κατά τη διάρκεια σεισμών, μπορεί να αναπτύξουν μεγάλες μετατοπίσεις οι οποίες να σταματήσουν τη λειτουργία του μηχανήματος ή και να προκαλέσουν την καταστροφή του.

Μελετήθηκαν οι ανάγκες συγκράτησης των μηχανημάτων σε περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων και σχεδιάστηκαν ειδικά συστήματα αναστολέων που να περιορίζουν αυτές τις μετατοπίσεις, και προς τις τρεις διευθύνσεις. Τα ειδικά εσωτερικά ελαστικά παρεμβύσματα που διαθέτουν οι αναστολείς εμποδίζουν τη δημιουργία ηχογέφυρας και μεταφοράς δονήσεων από το μηχάνημα στη βάση έδρασης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

ABSTRACT

Machines based on antivibration mounts such as springs, elastic pads etc., during an earthquake, can develop big displacements, which maybe stop the operation of the machine or even cause its destruction.

The needs of machines restraining, in cases of seismic stimulations, have been studied, and designed special systems of snubbers that would limit these displacements to all three directions. The special rubber bushings of the snubbers prevent the creation of sound bridge and the transmission of vibrations from the machine to the base.

Εισαγωγή

Μηχανήματα που εδράζονται σε αντικραδασμικές βάσεις, όπως ελατήρια, ελαστικά εφέδρανα κλπ., μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες μετατοπίσεις σχετικά με το κτίριο όπου βρίσκονται εδρασμένα, κατά τη διάρκεια εξωγενών διεγέρσεων (σεισμοί, ανεμοστρόβιλοι, τυφώνες κλπ).

Οι μετακινήσεις αυτές μπορούν να σταματήσουν τη λειτουργία του μηχανήματος ή και να προκαλέσουν την καταστροφή του.

Οι καταστροφές από σεισμούς σε μηχανήματα που δεν είχαν συγκρατηθεί κατάλληλα μπορεί να είναι εκτεταμένες. Όταν μάλιστα τα μηχανήματα αυτά θα πρέπει να λειτουργήσουν κατά την διάρκεια αλλά και αμέσως μετά τον σεισμό η μη σωστή συγκράτηση αυτών μπορεί να αποβεί μοιραία σε ανθρώπους αλλά και στο κτίριο.

Ας φανταστούμε τι μπορεί να συμβεί αν δεν λειτουργήσει το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ανάγκης ή ο κλιματισμός ενός χειρουργείου σε ένα νοσοκομείο ή σε ένα κέντρο τηλεπικοινωνιών ή διοίκησης.

Για το λόγο αυτό θα πρέπει παράλληλα με την στατική επάρκεια ενός κτιρίου σε σεισμό, να εξετάζεται και η κατάλληλη στερέωση όλων των ευαίσθητων

εγκαταστάσεων αυτού. Ας σημειωθεί ότι το κόστος της κατάλληλης στερέωσης είναι μηδαμινό σε σχέση με το κόστος αντικατάστασης ή αποκατάστασης λειτουργίας του μηχανήματος μετά το σεισμό ούτε συγκρίνεται με το κόστος της μη λειτουργίας μιας εγκατάστασης που θα πρέπει να λειτουργεί τη δεδομένη περίοδο.

Στόχος μας για την ικανοποίηση αυτών των αναγκών ήταν ο καθαρισμός των απαιτήσεων συγκράτησης των μηχανημάτων κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων όταν αυτά είναι εδρασμένα πάνω σε αντικραδασμικές βάσεις.

1. Κανονισμοί-Νομοθεσία

Σύμφωνα με τον ισχύοντα **Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.)**, (ΦΕΚ 2184 Β' 20-12-99) στη σεισμική απόκριση των κατασκευών, στα κριτήρια σχεδιασμού και στους κανόνες εφαρμογής των κεφ 3 και 4 προβλέπονται τα ακόλουθα:

"Προσαρτήματα (παράγραφος 4.2.3, Ε.Α.Κ.)

Τα προσαρτήματα καθώς και τα στοιχεία στηρίξεως και οι αγκυρώσεις τους θα ελέγχονται σε υπολογιστική αστοχία υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων και οριζόντιας σεισμικής δύναμης

$$H_p = \varepsilon W_p \gamma_p / q_p \quad (4.1)$$

όπου:

W_p : το βάρος του προσαρτήματος,

ε : ο σεισμικός συντελεστής που ορίζεται στην εξίσωση 3.1

γ_p : συντελεστής σπουδαιότητας του προσαρτήματος (βλ. Πίνακα 4.1) και

q_p : μειωτικός συντελεστής που εκφράζει την ικανότητα του προσαρτήματος να υποστεί σημαντικές μεταλαστικές παραμορφώσεις χωρίς να αστοχήσει.

Γενικά ο συντελεστής σπουδαιότητας γ_p θα λαμβάνεται ίσος με το συντελεστή σπουδαιότητας του κτιρίου (γ_1) αλλά στις ακόλουθες περιπτώσεις προσαρμογών υψηλού κινδύνου δεν θα λαμβάνεται μικρότερος από 1,50:

- α) Αγκυρώσεις εγκαταστάσεων και εξοπλισμού συστημάτων διατήρησης ζωής.
- β) Δεξαμενές και δοχεία που περιέχουν ικανή ποσότητα έντονα τοξικών ή εκρηκτικών ουσιών ώστε να αποτελούν κίνδυνο για τη δημόσια ασφάλεια.

Οι ακόλουθες μέγιστες τιμές του συντελεστή q_p θα χρησιμοποιούνται για τις αντίστοιχες κατηγορίες προσαρμογών:

$$q_p = 1,00$$

α) Στήθαία και διακοσμητικά στοιχεία σε μορφή προβόλου.

β) Σήματα και πινακίδες.

γ) Καπνοδόχοι, ιστοί και υπερυψωμένες δεξαμενές, που δρουν σαν ελεύθεροι πρόβολοι σε ύψος μεγαλύτερο από το 1/2 του συνολικού ύψους τους.

δ) Τα προσαρτήματα υψηλού κινδύνου που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο.

$$q_p = 2,50$$

α) Εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι. Μανδρότοιχοι ύψους μεγαλύτερου των 2,00 m.

β) Καπνοδόχοι, ιστοί και υπερυψωμένες δεξαμενές, που διαθέτουν αντιστηρίξεις ή αγκυρώσεις με επίτονους ώστε να δρουν σαν ελεύθεροι πρόβολοι σε ύψος που δεν υπερβαίνει το 1/2 του συνολικού ύψους τους.

γ) Δεξαμενές μαζί με το περιεχόμενό τους.

δ) Αγκυρώσεις μόνιμων ραφιών ή παταριών εδραζομένων στο δάπεδο.

ε) Αγκυρώσεις ψευδοροφών και φωτιστικών σημαντικού βάρους.

στ) Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και συναφείς αγωγοί, σωληνώσεις και αεραγωγοί, βάρους μεγαλύτερου των 2 KN.

Εξαιρούνται από την υποχρέωση ελέγχου προσαρτήματα σε κτίρια σπουδαιότητας Σ1 και Σ2 σε περιοχές σεισμικότητας Ι και προσαρτήματα της κατηγορίας $q_p = 2.50$ σε κτίρια σπουδαιότητας Σ2 σε περιοχές σεισμικότητας ΙΙ.

Πίνακας 4.1

Κατηγορία Σπουδαιότητας		γ_1
Σ1	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, π.χ. αγροτικά οικήματα, υπόστεγα, στάβλοι κλπ.	0,85
Σ2	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κλπ.	1,00
Σ3	Εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια δημόσιων συναθροίσεων, αίθουσες αεροδρομίων και γενικώς κτίρια στα οποία βρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου. Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας (π.χ. κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες) κλπ.	1,15
Σ4	Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά τη διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών. Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας (π.χ. μουσεία κλπ.)	1,30

Προσαρτήματα κτιρίων (παράγραφος 3.7, Ε.Α.Κ.)

Προσαρτήματα κτιρίων είναι κατασκευές ή τμήματα κατασκευών που δεν αποτελούν οργανικό μέρος του σκελετού όπως π.χ. στηθαία, καπνοδόχοι κλπ. Η σεισμική απόκριση ενός προσαρτήματος επηρεάζεται από την σεισμική απόκριση του κτιρίου επειδή η κίνηση του σημείου στήριξης πάνω στο κτίριο είναι διαφορετική από την κίνηση του εδάφους.

Εάν δεν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός η οριζόντια σεισμική δύναμη για τον υπολογισμό των προσαρτημάτων και των στοιχείων στήριξης τους υπολογίζεται από την εξίσωση (2.1), όπου ο σεισμικός συντελεστής ε δίδεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \alpha \beta (1 + Z I H) \quad (3.1)$$

όπου:

$$\alpha = A/g \quad (\text{βλ. Πίνακα 3.1})$$

A : σεισμική επιτάχυνση εδάφους.

Πίνακας 3.1

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	I	II	III	IV
a	0,12	0,16	0,24	0,36

$$b = \frac{2}{1 + (1 - T_p / T)^2} \geq 1$$

T_p : η ιδιοπερίοδος του προσαρτήματος για πλήρη πάκτωση στο στηρίζον υπόβαθρο,

T : η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου,

Z : η στάθμη στήριξης του προσαρτήματος και

H : το ύψος κτιρίου. "

2. Σεισμικοί Αναστολείς

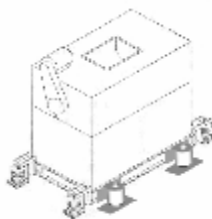
Με την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζουμε την σεισμική δύναμη που εξασκείται επί της εγκατάστασης που θα πρέπει να προστατευτεί. Η δύναμη αυτή εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους αυτής. Στη συνέχεια εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που θα δεχτεί ο σεισμικός αναστολέας έτσι ώστε να μπορούμε να επιλέξουμε τον πλέον κατάλληλο για την κάθε εφαρμογή.

Κατά την επιλογή - σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος σεισμικής συγκράτησης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- α) Προσάρτηση του μηχανήματος στον αναστολέα.
- β) Σχεδιασμός-υπολογισμός του σεισμικού αναστολέα.
- γ) Εγκατάσταση του αναστολέα στην βάση έδρασης αυτού.

Τα αντικραδασμικά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των δονήσεων από μηχανήματα με περιστροφική κίνηση. Δεδομένου ότι το μηχάνημα πρέπει να είναι ελεύθερο να πάλλεται στα αντικραδασμικά που εδράζεται, οι σεισμικοί αναστολείς πρέπει να διαθέτουν ένα κενό αέρα κατά την εγκατάσταση. Το κενό επιτρέπει την ελεύθερη ταλάντωση του μηχανήματος όσο αυτό λειτουργεί με κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορεί να υπάρξει προσωρινή διαδοχική φόρτιση αλλά και περιορισμός της μετατόπισης του μηχανήματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι επικίνδυνες κρούσεις.

Κατά την εγκατάσταση των σεισμικών αναστολέων θα πρέπει να ελέγχεται η δυναμική ακαμψία και γενικά η αντοχή της βάσης του μηχανήματος δεχθεί τα φορτία από το σεισμό. Εάν αποδειχθεί ότι η αντοχή της βάσης δεν είναι ικανοποιητική θα πρέπει να κατασκευάζεται συμπληρωματικά χαλύβδινο πλαίσιο πάνω στο οποίο θα βιδωθεί κατάλληλα το μηχάνημα. Οι σεισμικοί αναστολείς και τα αντικραδασμικά μπορούν να στερεωθούν στο μεταλλικό αυτό πλαίσιο. Καλό θα ήταν οι κατασκευαστές των μηχανημάτων να λαμβάνουν υπόψη τους στον επί μέρους σχεδιασμό αυτών και τις δυνάμεις που θα εξασκηθούν από σεισμούς.



ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ - ΑΝΤΙΚΡΑΔΑΣΜΙΚΗ ΕΡΑΣΗ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι σεισμικών αναστολέων: μονής, διπλής, οριζόντιας κατεύθυνσης και τριών κατευθύνσεων (all directional).

Το κύριο πλεονέκτημα των αναστολέων τριών κατευθύνσεων είναι ότι μπορούν να περιορίσουν την κίνηση του μηχανήματος και στις τρεις κατευθύνσεις. Εντούτοις άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των αναστολέων είναι ότι είναι προκαθορισμένη εργοστασιακά η συνολική επιτρεπόμενη μετατόπιση καθότι είναι καθορισμένα τα υπάρχοντα κενά.

Η επιτόπια ομοιόμορφη ρύθμιση του κενού ενός κοινού ανοικτού αναστολέα, επί τόπου του έργου, είναι πολύ δύσκολη και με αμφίβολα αποτελέσματα.

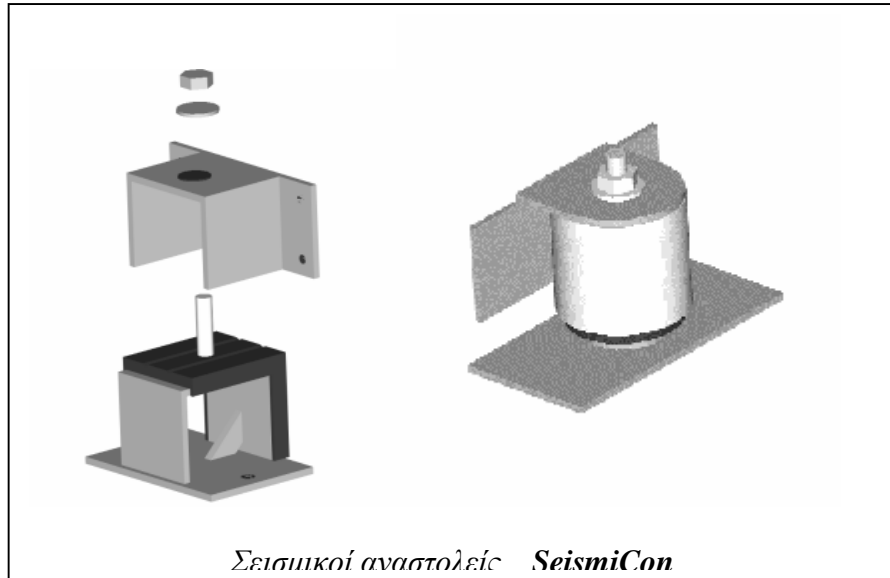
Για τη σωστή αγκύρωση του αναστολέα στη βάση έδρασης θα πρέπει να ελέγχεται η αντοχή της βάσης να δεχθεί τα απαιτούμενα φορτία – δυνάμεις (ποιότητα μπετόν) καθώς και να ελέγχεται η αντοχή του μέσου αγκύρωσης όπως βίδες, συγκολλήσεις ή αγκύρια.

Θα πρέπει να εγκαθίστανται τουλάχιστον τέσσερις σεισμικοί αναστολείς (ένας σε κάθε πλευρά)

3. Σχεδιασμός - Δημιουργία σεισμικού αναστολέα

Με βάση τα παραπάνω και την μελέτη πολλών συγγραμμάτων σχετικά με το πρόβλημα των σεισμών και ειδικότερα την ανάγκη συγκράτησης των μηχανολογικών εγκαταστάσεων, προβήκαμε σε μια σειρά εξελικτικών κατασκευών σεισμικών αναστολέων βελτιστοποιώντας τη σχεδίαση αυτών έτσι ώστε να προσφέρουν ευκολία στην εγκατάσταση, χαμηλό κόστος και αξιοπιστία.

Σχεδιάσαμε σειρά σεισμικών αναστολέων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζονται καθ' ύψος. Με τον τρόπο αυτό προσαρμόζονται καλλίτερα με αντικραδασμικά ιδιαίτερα αυτά με ελατήριο.



Οι σεισμικοί αναστολείς με την εμπορική ονομασία **SEISMICON** είναι τριών διευθύνσεων(all-directional). Απαρτίζονται από αλληλοεπικαλυπτόμενα μεταλλικά κελύφη. Μεταξύ των μεταλλικών μερών παρεμβάλλεται ειδικό ελαστικό παρέμβυσμα για την αποφυγή ηχογένεψης. Διαθέτουν ελεγχόμενο διάκενο για την διευκόλυνση της τοποθέτησης αυτών. Η στερέωση των αναστολέων τόσο στη βάση του μηχανήματος όσο και στη βάση έδρασης αυτών γίνεται με τα ειδικά σχεδιασμένα ελάσματα που διαθέτουν. Στο πάνω μέρος αυτών είναι εφοδιασμένοι με βίδα και περικόχλια ειδικής αντοχής που παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης καθ' ύψος.

Η διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στους λιμένες. Η περίπτωση του λιμένα Θεσσαλονίκης

Εύα Βαφάκη¹, Τεχνικός Ασφαλείας Ο.Λ.Θ. Α.Ε.
Γιώργος Παλάντζας², Πολ. Μηχανικός, M.Sc. Environment, Υπ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.
Δημήτρης Ναλμπάντης³, Πολ. Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.

¹ Ο.Λ.Θ. Α.Ε., Τμήμα Περιβάλλοντος Υγιεινής και Ασφάλειας, Τ.Θ. 10467, 54110,
Θεσσαλονίκη, evafaki@thpa.gr

² Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, palatzas@civil.auth.gr

³ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, dnalba@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο εργασιακός θόρυβος στους εμπορικούς λιμένες μπορεί να ξεπερνά σε ορισμένες περιπτώσεις τα όρια των 85 και 90 dBA που τίθενται από την κείμενη νομοθεσία, οπότε και πρέπει να ληφθούν οργανωμένα μέτρα αντιμετώπισης. Στην παρούσα εργασία γίνεται μερική παρουσίαση του σχεδίου δράσης που εφαρμόζει ο Οργανισμός Λιμένος Θεσσαλονίκης Α.Ε. για την διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στο εργασιακό περιβάλλον της. Γίνεται συνοπτική αναφορά των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την αξιολόγηση του εργασιακού θορύβου στους λιμένες, και παρουσιάζονται τα στοιχεία του σχεδίου δράσης αναφορικά με την κατηγοριοποίηση του προσωπικού και των θέσεων εργασίας στον λιμένα, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τον εκπεμπόμενο θόρυβο και τα μέτρα τεχνικής, οργανωτικής και ιατρικής πρόληψης που εφαρμόζονται σήμερα.

ABSTRACT

Noise at work throughout a commercial port, as the one of Thessaloniki, may be above the permitted by the law noise levels for a working day, set at 85 and 90 dBA. In such cases organizational and technical measures must be taken. In this paper, the action plan developed and implemented by the Thessaloniki Port Authority S.A. for the management of the noise at its workplace is presented. Initially, a brief presentation of the main factors that affect the assessment of noise exposure at work is done. Following, the main contents of the action plan are presented, regarding the categorization of the port personnel and the noise sources, the assessment of the noise measurements taken and the technical, organizational and medical measures applied today for the protection of the port personnel

Εισαγωγή

Το ενεργό πλέον ενδιαφέρον και οι απαιτήσεις των εργαζομένων για προστασία της υγείας τους [1], η πίεση της κείμενης νομοθεσίας και η αυξημένη ανταγωνιστικότητα [2] είναι οι κύριοι παράγοντες που συμβάλουν σήμερα, στην οργανωμένη λήψη των απαραίτητων μέτρων και μεθόδων από τις επιχειρήσεις για αποτελεσματική προστασία της υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων τους. Αναφορικά με τον θόρυβο, αυτός αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του εργασιακού περιβάλλοντος, αναλογιζόμενοι το γεγονός ότι η οι βλάβες στην ακοή αντιπροσωπεύουν την δεύτερη σε συχνότητα επαγγελματική πάθηση [3].

Στο πλαίσιο ανταπόκρισης του Οργανισμού Λιμένος Θεσσαλονίκης Α.Ε. (Ο.Λ.Θ. Α.Ε.) με τις ανωτέρω επιταγές, αλλά και της ανάγκης πλήρωσης των δεσμεύσεών της για συνεχή βελτίωση των θεμάτων που διέπουν το εργασιακό περιβάλλον στον λιμένα της Θεσσαλονίκης [4], προχώρησε στην διαμόρφωση ενός σχεδίου δράσης για την προαγωγή των συνθηκών εργασίας από απόψεως θορύβου στους χώρους της. Το σχέδιο δράσης ξεκίνησε πριν δύο περίπου χρόνια και βρίσκεται σήμερα στο στάδιο της εξέλιξης και τροποποίησής του. Ανάλογες δράσεις για τους υπόλοιπους λιμένες της χώρας μας δεν είναι σήμερα γνωστές.

Στην συνέχεια της παρούσας εργασίας, αφού αναφερθούν οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στους λιμένες, παρουσιάζονται τα στοιχεία του σχεδίου δράσης αναφορικά με την διακριτοποίηση των θέσεων εργασίας στον λιμένα, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τον εκπεμπόμενο θόρυβο και τα μέτρα τεχνικής, οργανωτικής και ιατρικής πρόληψης που εφαρμόζονται σήμερα.

1. Παράγοντες που επηρεάζουν την διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στους λιμένες

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαμόρφωση των απαιτούμενων μέτρων για αποτελεσματική διαχείριση του εκπεμπόμενου θορύβου στο εργασιακό περιβάλλον των λιμένων συνοψίζονται ως εξής:

α) Η φύση των λιμενικών εργασιών.

Στο εργασιακό περιβάλλον των εμπορικών λιμένων, όπως αυτός της Θεσσαλονίκης, χωροθετούνται πολλοί χώροι εργασίας που χαρακτηρίζονται από αυξημένες εκπομπές θορύβου. Επιπλέον, η διαφορετικότητα των πηγών θορύβου σε κάθε θέση εργασίας, σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη λειτουργία διαφορετικών μηχανημάτων/εργασιών σε συνδεδεμένους κατά το μάλλον ή ήττον χώρους, καθιστούν την χάραξη και υπόδειξη μέτρων δύσκολη, καθόσον πρέπει να προβλεφθεί η επίδραση κάθε πηγής θορύβου ή ο συνδυασμών αυτών.

β) Η δυσκολία προσαρμογής του εργατοτεχνικού προσωπικού στους κανόνες για την προστασία από τον θόρυβο.

Παρόλο που είναι γνωστές πλέον στις συνδικαλιστικές οργανώσεις των εργαζομένων οι διεθνείς επιστημονικές διαπιστώσεις ότι ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει διάφορες παθήσεις (ακουστικές και μη) [5], σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζεται απροθυμία του ίδιου του εργατοτεχνικού προσωπικού να συμμορφωθεί προς τις υποδείξεις του Τεχνικού Ασφαλείας (π.χ. μη χρησιμοποίηση ωτασπίδων και βυσμάτων, είσοδος σε απαγορευμένους χώρους εργασίας, εφαρμογή ανορθόδοξων μεθόδων εργασίας, όπως καρφώματα τεμαχίων αντί συγκόλλησή τους, χρήση κοινού σφυριού αντί αυτόματου μηχανήματος).

γ) Εφαρμογή καθηκόντων από τον Τεχνικό Ασφαλείας – Υποχρεώσεις εργοδότη

Ο παράγοντας αυτός δεν αφορά αποκλειστικά μόνο τις περιπτώσεις του θορύβου, αλλά το σύνολο των θεμάτων που άπτονται της υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων [6]. Αναφέρεται στην πλημμελή εκτέλεση των καθηκόντων από τον Τ.Α., την ελλιπή κατάρτισή τους και την περιορισμένη ευαισθητοποίηση διοικούντων σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας.

2. Περιεχόμενα του σχεδίου δράσης

Προκειμένου να τεθεί σε ισχύ το πρόγραμμα του Ο.Λ.Θ. Α.Ε. για την υγιεινή και ασφάλεια και, κατά συνέπεια, του σχεδίου δράσης για τον θόρυβο στην εργασία, προηγήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες:

Στελέχωση με ανθρώπινο δυναμικό (μόνιμη θέση Τεχνικού Ασφαλείας, Γιατρού Εργασίας) του Τμήματος Υγιεινής και Ασφάλειας, σήμερα αποκαλούμενο «Τμήμα Περιβάλλοντος, Υγιεινής και Ασφάλειας». Σημειώνεται, ότι η μετονομασία αυτή προήλθε από την πρόθεση του Ο.Λ.Θ. Α.Ε. για συνδιαχείριση του εργασιακού και του ευρύτερου περιβάλλοντος, δίδοντας, κατά το δυνατόν, ισοδύναμη σημασία και στα δυο ζητήματα και λειτουργώντας στο πλαίσιο της οργανωτικής συνέργειας [7].

Δημιουργία κατάλληλης υλικοτεχνικής υποδομής (ηχόμετρα, ηχοδοσίμετρα, ακοόμετρα).

Κατάρτιση του σχεδίου δράσης και καθορισμός στόχων.

Παρουσίαση των ενεργειών του Τμήματος στους ενδιαφερόμενους (Διεύθυνση, εργαζόμενοι).

Για την επίτευξη του στόχου σχετικά με την αποτίμηση και βελτίωση του εργασιακού περιβάλλοντος από απόψεως του θορύβου, το σχέδιο δράσης στηρίζεται κυρίως στους παρακάτω τομείς:

§ Διακριτοποίηση θέσεων εργασίας και πηγών θορύβου.

§ Καταρτισμός προγράμματος μετρήσεων.

§ Ιατρικές εξετάσεις.

§ Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου.

§ Ενημέρωση και εκπαίδευση του προσωπικού.

§ Ανασκόπηση των μέτρων που έχουν ληφθεί.

§ Λήψη νέων μέτρων και επανεκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου.

3. Διακριτοποίηση θέσεων εργασίας και πηγών θορύβου

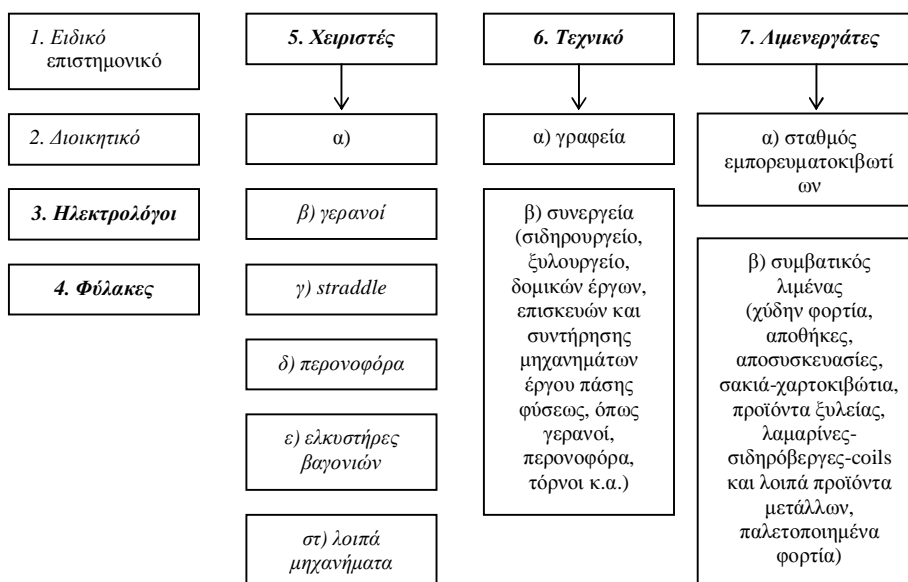
Προκειμένου να διευκολυνθεί η συνολική διαδικασία εκτίμησης του θορύβου, αλλά και να δημιουργηθεί μια εύχρηστη και λειτουργική βάση δεδομένων, το σύνολο του προσωπικού του λιμένα της Θεσσαλονίκης ταξινομήθηκε βάσει του Σχήματος 1. Στο τεχνικό προσωπικό ανήκουν τόσο υπάλληλοι κατηγορίας Π.Ε. (χώροι γραφείων), όσο και εργαζόμενοι στα συνεργεία.

Οι χειριστές διαφοροποιούνται αναλόγως της άδειας που κατέχουν, ενώ οι λιμενεργάτες ανάλογα με την φύση του φορτίου που φορτοεκφορτώνεται.

Ναυπηγικές εργασίες δεν λαμβάνουν χώρα στον λιμένα της Θεσσαλονίκης. Ο θόρυβος είναι αναμφίβολα ιδιαίτερος αυξημένος σ' αυτούς τους χώρους εργασίας, αναλογιζόμενοι την φύση των εργασιών που διεξάγονται (σιδηροκατασκευής, μηχανουργικές, ηλεκτρολογικές, σωληνουργικές, υδραυλικές, ξυλουργικές, εγκατάσταση μηχανημάτων και λοιπών μέσων, αμμοβολές) και την ταυτόχρονη εργασία διαφορετικών συνεργείων [8].

4. Καταρτισμός προγράμματος μετρήσεων και αποτελέσματα

Με βάση τους παραπάνω διαχωρισμούς, έγινε μια πρώτη «επί τόπου» εκτίμηση του εκπεμπόμενου θορύβου στους χώρους εργασίας, μετά από επισκέψεις του Τ.Α., καθώς και προφορικές εκτιμήσεις των εργαζομένων σε κάθε θέση.



Σχήμα 1. Διακριτοποίηση θέσεων εργασίας στον λιμένα της Θεσσαλονίκης

Πίνακας 1. Πηγές θορύβου ανά κατηγορία προσωπικού και θέση εργασίας, στον λιμένα της Θεσσαλονίκης.

α) Ειδικό επιστημονικό, Διοικητικό, Τεχνικό Π.Ε. Η/Υ, εκτυπωτές, κλιματιστικά μηχανήματα
β) Φύλακες κίνηση οχημάτων (φορτηγών, επιβατικών) και περονοφόρων, διέλευση συρμών τρένων και προειδοποιητικές σειρήνες αυτών
γ) Ηλεκτρολόγοι χρήση ηλεκτρικών εργαλείων, μηχανοστάσια γερανών-γερανογεφυρών, ψυκτικοί μηχανισμοί των εμπορευματοκιβωτίων-ψυγεία
δ) Τεχνικό (συνεργεία) λειτουργία εργαλειομηχανών (τρυπάνια, τórνοι, πριόνια, κ.λπ.) και εργαλείων χειρός (συγκολλήσεις, καρφώματα, κ.λπ.)
ε1) Λιμενεργάτες στον σταθμό εμπορευματοκιβωτίων βομβητής γερανογέφυρας και διασκελετικών μεταφορέων, κίνηση φορτηγών, απόθεση και αρπαγή εμπορευματοκιβωτίων, απόθεση καπακίων από τα αμπάρια, μηχανές πλοίων
ε2) Λιμενεργάτες στον συμβατικό λιμένα κίνηση φορτηγών και αυτοκινήτων, βομβητές γερανών και μηχανημάτων διαχείρισης φορτίου, χρήση κοχλίων, φορτοεκφόρτωση φορτίου
στ1) Χειριστές γερανογέφυρας, γερανών, διασκελετικών μεταφορέων, περονοφόρων με κλειστή καμπίνα βομβητής των μηχανημάτων κατά την πορεία ή οπισθοπορεία, μικρόφωνο ενδοεπικοινωνίας
στ2) Χειριστές ελκυστήρων βαγονιών μικρόφωνα ενδοεπικοινωνίας, κίνηση συρμών, προειδοποιητικά σφυρίγματα

στ3) Χειριστές λοιπών μηχανημάτων έργου
 θόρυβος που εκπέμπει το ίδιο το μηχάνημα, βομβητής του μηχανήματος
 κατά την πορεία ή οπισθοπορεία, θόρυβος από τις εργασίες

Σε πρώτη φάση διαπιστώθηκε ότι οι πάσης φύσεως εργαζόμενοι σε χώρους γραφείων (Ειδικό επιστημονικό, Διοικητικό, Τεχνικό-υπάλληλοι γραφείου) δεν εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα θορύβου, αφού έχουν τοποθετηθεί κουφώματα διπλής μόνωσης, δεν υπάρχουν θορυβώδη μηχανήματα εντός του χώρου των γραφείων, όπως μεγάλοι εκτυπωτές, ενώ τα φωτοτυπικά μηχανήματα βρίσκονται σε ξεχωριστούς, καλά αεριζόμενους χώρους. Επίσης, στο σύνολο σχεδόν των χώρων των γραφείων δεν παρατηρείται συνωστισμός εργαζομένων και ο διαθέσιμος για κάθε εργαζόμενο χώρος είναι πολλαπλάσιος του προβλεπόμενου από τη νομοθεσία.

Έτσι, το σχέδιο δράσης για τον εκπεμπόμενο θόρυβο επικεντρώθηκε στο εργασιακό περιβάλλον για το υπόλοιπο προσωπικό (Ηλεκτρολόγοι, Φύλακες, Χειριστές, Λιμενεργάτες, Τεχνικό-συνεργεία).

Για την διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό ατομικό ηχοδοσίμετρο, πιστοποιημένο και βαθμονομημένο σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από την ελληνική και διεθνή νομοθεσία (Π.Δ. 85/91, ISO R 1999).

Οι καταγραφές αφορούν, μεταξύ άλλων παραμέτρων, την ημερήσια ατομική ηχοέκθεση του εργαζομένου $L_{EP,d}$ (dBA).

Αν κατά σύμφωνα με την νομοθεσία πρέπει η μέτρηση του θορύβου να γίνεται κατά προτίμηση σε αδιατάρακτο ηχητικό πεδίο στην θέση εργασίας (δηλαδή χωρίς να βρίσκεται το μικρόφωνο επί του εργαζόμενου) [9], η φύση και το ωράριο των λιμενικών εργασιών δεν ευνοούν αυτήν την πρακτική. Π.χ. ένας εργαζόμενος που εργάζεται επί μια ώρα στο περνοφόρο, μπορεί στη συνέχεια να εργαστεί επί δίωρο σε άλλο μηχάνημα, μικρότερης ή μεγαλύτερης ηχητικής πίεσης. Δηλαδή ο χώρος εργασίας δεν είναι αυστηρά καθορισμένος, αλλά ποικίλει βάσει του καθημερινού προγράμματος εργασίας. Η λογική προσάρτησης του ηχοδοσίμετρου πάνω στον εργαζόμενο προτιμήθηκε επίσης για τον λόγο, ότι για κάθε μέτρηση που διεξάγεται καταγράφονται όλες οι δυνητικές πηγές θορύβου στις οποίες εκτέθηκε ο εργαζόμενος κατά την διάρκεια της ηχομέτρησης, με προσέγγιση και του εκάστοτε χρόνου έκθεσης. Έτσι, δημιουργείται για κάθε μέτρηση και η αντίστοιχη πορεία εξαγωγής της, από την οποία μπορεί κανείς να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα.

Το ηχοδοσίμετρο προσαρτάται κατάλληλα στον εργαζόμενο, σε απόσταση περίπου 10εκ. από το αυτί του, για περισσότερες από 3 ώρες, συνοδεύοντάς τον σε όλες τις δραστηριότητες. Για κάθε κατηγορία προσωπικού και θέση εργασίας έγιναν πολλές μετρήσεις, επιλέγοντας κυρίως το χειρότερο δυνατό σενάριο από απόψεως εκπεμπόμενου θορύβου, δηλαδή την ημέρα με την περισσότερη εργασία ή/και τον χειρισμό φορτίου που εκπέμπει τα υψηλότερα επίπεδα θορύβου π.χ. scrap.

Βάσει του συνόλου των μετρήσεων που μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί, έχει παραχθεί, μεταξύ άλλων, μια βάση δεδομένων για την διακύμανση της ημερήσιας ατομικής ηχοέκθεσης για κάθε επιμέρους κατηγορία προσωπικού (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Διακυμάνσεις της ημερήσιας ατομικής ηχοέκθεσης για κάθε επιμέρους κατηγορία προσωπικού.

<i>Κατηγορία προσωπικού και θέση εργασίας</i>	<i>Εύρος διακύμανσης της ημερήσιας ατομικής ηχοέκθεσης $L_{EP,d}$ (dBA)</i>
<i>Ηλεκτρολόγοι</i>	<i>70,9-84,7</i>
<i>Χειριστές Ηλεκτροκίνητων και Αυτοκινούμενων Γερανών</i>	<i>75,1-83,2</i>
<i>Χειριστές Γερανογεφυρών</i>	<i>74-78</i>
<i>Χειριστές straddle carriers</i>	<i>75,2-79,3</i>
<i>Χειριστές περονοφόρων</i>	<i>76,2-89,1</i>
<i>Χειριστές ελκυστήρων βαγονιών</i>	<i>79,2-83,7</i>
<i>Χειριστές λοιπών μηχανημάτων έργου</i>	<i>78,2-88,3</i>
<i>Τεχνικό προσωπικό σιδηρουργείου</i>	<i>79,3-92,8</i>
<i>Τεχνικό προσωπικό ξυλουργείου</i>	<i>80,5-93,1</i>
<i>Τεχνικό προσωπικό δομικών έργων</i>	<i>77,3-82,5</i>
<i>Τεχνικό προσωπικό συντήρησης και επισκευής μηχανημάτων έργου</i>	<i>76,7-84,3</i>
<i>Λιμενεργάτες στο σταθμό εμπορευματοκιβωτίων</i>	<i>78,4-83,5</i>
<i>Λιμενεργάτες σε χύμα φορτία</i>	<i>77,6-89,9</i>
<i>Λιμενεργάτες σε αποσυσκευασίες</i>	<i>76,5-80,1</i>
<i>Λιμενεργάτες σε προϊόντα μετάλλου (λαμαρίνες, σιδηρόβεργες, coils, k.a.)</i>	<i>79,2-83,5</i>
<i>Λιμενεργάτες σε σακιά, χαρτοκιβώτια</i>	<i>78,5-82,8</i>
<i>Λιμενεργάτες σε προϊόντα ξυλείας</i>	<i>74,3-83,4</i>
<i>Λιμενεργάτες σε παλετοποιημένα φορτία</i>	<i>75,6-83,2</i>
<i>Φύλακες</i>	<i>73,9-80,5</i>

5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Όπως διαπιστώνεται από τον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται υπέρβαση του ορίου των 85 dB(A) στις περιπτώσεις των χειριστών περονοφόρων, λοιπών μηχανημάτων έργου και στους λιμενεργάτες σε χύμα φορτία ενώ το όριο των 90 dB(A) υπερβαίνεται στο σιδηρουργείο και το ξυλουργείο. Η παραπάνω υπέρβαση των ορίων στο σιδηρουργείο και το ξυλουργείο θεωρείται αναμενόμενη, λόγω του αυξημένου εν γένει εκπεμπόμενου θορύβου από τις εγκατεστημένες εργαλειομηχανές και τα εργαλεία χειρός.

Η μεγάλη σε κάποιες περιπτώσεις διακύμανση οφείλεται στη διαφορετικότητα των χώρων εργασίας, όπως στην περίπτωση των ηλεκτρολόγων, όπου είναι διαφορετική η εργασία στο εσωτερικό ενός κτιρίου από αυτή στο μηχανοστάσιο ενός γερανού ή σε έναν υποσταθμό.

Λόγω του μεμονωμένου, κατά βάση, τύπου θορύβου στον οποίο εκτίθενται οι φύλακες (φορτηγά και αυτοκίνητα), οι τιμές έκθεσης κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Στην περίπτωση των λιμενεργατών, η στάθμη του θορύβου επηρεάζεται σημαντικά από το εάν η εργασία γίνεται επί του κρηπιδώματος ή στο αμπάρι ενός πλοίου, από τη σύγχρονη παρουσία μηχανημάτων έργου στον χώρο, καθώς και από την φύση του διακινούμενου φορτίου. Στον σταθμό εμπορευματοκιβωτίων, οι τιμές

επηρεάζονται έντονα από τους βομβητές των διασκελετικών μεταφορέων. Η υπέρβαση του ορίου στην περίπτωση των χύμα φορτίων παρατηρείται κατά την διακίνηση δημητριακών με κοχλίες. Τα συγκεκριμένα μηχανήματα, άλλωστε, παράγουν εν γένει υψηλά επίπεδα θορύβου.

Για τους χειριστές, οι τιμές επηρεάζονται σημαντικά από την ύπαρξη κλειστής καμπίνας στο μηχανήμα, καθώς και από την φύση του διακινούμενου φορτίου. Υπερβάσεις των ορίων παρατηρούνται στα περονοφόρα μικρής ανυψωτικής ικανότητας, ανοιχτού τύπου.

Σημειώνεται, ότι το σύνολο των μηχανημάτων έργου στον Ο.Λ.Θ. Α.Ε. ελέγχεται τακτικά, ώστε τα επίπεδα εκπεμπόμενου θορύβου να είναι σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από τη νομοθεσία, φέροντας τις σχετικές ενδείξεις συμμόρφωσης.

6. Λήψη μέτρων

Βάσει της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, αλλά και της συνήθους βέλτιστης πρακτικής και εμπειρίας, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα τεχνικά, οργανωτικά και ιατρικά μέτρα (πρόληψης και αντιμετώπισης) που λήφθηκαν.

Μέτρα τεχνικής πρόληψης

Σε όλους τους χώρους όπου παρατηρήθηκε υπέρβαση των ορίων της στάθμης θορύβου τοποθετήθηκε η σχετική σήμανση της υποχρεωτικής χρήσης των μέσων ωτοπροστασίας, και απαγορεύτηκε αυστηρά η είσοδος και παραμονή στους μη έχοντες εργασία.

Για τις περιπτώσεις του ξυλουργείου και του σιδηρουργείου απομακρύνθηκαν μηχανήματα ιδιαίτερα θορυβώδη, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ανοικτούς στεγασμένους χώρους, δίπλα στα συνεργεία.

Για τους λιμενεργάτες γίνεται τακτική και επισταμένη συντήρηση των κοχλιών για τα χύμα δημητριακά.

Για τον στόλο των μικρών περονοφόρων οχημάτων καταρτίστηκε πρόγραμμα σταδιακής αντικατάστασης τους με πλέον σύγχρονα.

Μέτρα οργανωτικής πρόληψης

Για το λιμενεργατικό προσωπικό έχει προβλεφθεί η κυκλική εναλλαγή σε όλους τους χώρους εργασίας, σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση. Επομένως, θα ξαναβρεθεί ο εργαζόμενος στο ίδιο θορυβογενές περιβάλλον μετά από μήνες, καθώς τα εν λόγω φορτία δεν είναι σε μόνιμη βάση και, ίσως, είναι και από τα λιγότερο συνηθισμένα.

Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τους χειριστές των περονοφόρων, μέσω του περιορισμού της κατοχής της προβλεπόμενης άδειας.

Μέτρα ιατρικής πρόληψης

Όπου διαπιστώθηκε υπέρβαση των ορίων, έχουν χορηγηθεί τα προβλεπόμενα ωτοπροστατευτικά μέσα (ωτοασπίδες ή βύσματα), ενώ συστηματικά παρέχεται εκπαίδευση και ενημέρωση του προσωπικού για την σημασία και την χρήση τους.

Επιπλέον, το προσωπικό βρίσκεται σε πρόγραμμα ιατρικής παρακολούθησης. Στα πλαίσια του προληπτικού ιατρικού ελέγχου εφαρμόστηκε από τον Γιατρό Εργασίας του Ο.Λ.Θ. Α.Ε. πρόγραμμα ακουομετρήσεων, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο της τελικής αξιολόγησής του.

Εφόσον κριθεί σκόπιμο, σε συνεργασία του Γιατρού Εργασίας με τον αιτούντα εργαζόμενο, μπορεί να ληφθούν επιπρόσθετα μέτρα, όπως μόνιμη απομάκρυνση του εργαζόμενου από το συγκεκριμένο εργασιακό αντικείμενο ή/και μετάταξή του σε άλλη κατηγορία.

7. Συμπεράσματα

Η εργασία που παρουσιάστηκε σκοπό έχει να αναδείξει τις δυνατότητες που προσφέρονται στους ελληνικούς εμπορικούς λιμένες να αξιολογήσουν και να διαχειριστούν αποτελεσματικά τον θόρυβο στο εργασιακό περιβάλλον τους.

Η κατηγοριοποίηση των θέσεων εργασίας και η αναγνώριση των πηγών θορύβου, σε συνδυασμό με συστηματικές μετρήσεις παρέχουν το βασικό υπόβαθρο για αποτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου που διατρέχουν οι εργαζόμενοι που εμπλέκονται συχνά σε θορυβώδεις εργασίες. Η εκτίμηση του κινδύνου, η κατάλληλη ενημέρωση και εκπαίδευση του προσωπικού και τα μέτρα τεχνικής, οργανωτικής και ιατρικής πρόληψης συμπληρώνουν το αναγκαίο πλαίσιο στο οποίο πρέπει να χαράσσεται μια σταδιακά ολοκληρωμένη διαχείριση του επαγγελματικού θορύβου στους λιμένες [10].

Τα συμπεράσματα που έχουν μέχρι τώρα αποκομισθεί από την εφαρμογή του σχεδίου δράσης για τον θόρυβο στον λιμένα της Θεσσαλονίκης αποτελούν αφενός, οδηγούς για τα μέτρα και τις προτεραιότητες που πρέπει να ληφθούν από την Ο.Λ.Θ. Α.Ε. και αφετέρου, μέτρο σύγκρισης για ανάλογες δράσεις στους υπόλοιπους λιμένες της χώρας μας.

8. Αναφορές

- [1] Πρωτόπαπας Χ., «Ομιλία», Τεχνικά Χρονικά, Μαρτ.-Απρ. 2000, σελ. 11.
- [2] Κουζής Γ., «Εργασιακές Σχέσεις και Ευρωπαϊκή Ένωση», Μελέτες, Ινστιτούτου Εργασίας ΓΣΕΕ-ΑΔΕΔΥ, Ιούνιος 2001, Τεύχος 14.
- [3] <http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
- [4] Port Environmental Review System, “Th.P.A. S.A.-Environmental Policy”, 2003
- [5] Σαραφόπουλος Ν., «Πηγές και όρια θορύβου στην εργασία και στην πόλη», Πρακτικά Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2002, 30/09-01/10/2002, σελ. 13-24.
- [6] Λάμπρου Α., «Προβλήματα και εμπειρίες από τη μέχρι σήμερα πορεία στην άσκηση του θεσμού του τεχνικού ασφαλείας στη βιομηχανία – υπηρεσίες», Τεχνικά Χρονικά, Ιαν.-Φεβ. 1997, σελ. 13-14.
- [7] Θεοχάρη Χ., «Οικολογική διαχείριση και υγιεινή και ασφάλεια της εργασίας», Ενημερωτικό Δελτίο Τ.Ε.Ε., Τεύχος 2030, 07/12/1998.
- [8] Φίλιππας Α., «Προβλήματα και εμπειρίες από τη μέχρι σήμερα πορεία στην άσκηση του θεσμού του τεχνικού ασφαλείας στις ναυπηγοεπισκευαστικές εργασίες», Τεχνικά Χρονικά, Ιαν.-Φεβ. 1997, σελ. 15-18.
- [9] Π.Δ. 85/91, ΦΕΚ 38Α-18/03/1991, «Προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της έκθεσής τους στον θόρυβο κατά την εργασία, σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 86/188/ΕΟΚ.
- [10] Britain's Health and Safety Executive (HSE), “Noise Assessments – Getting what you need”, Leaflet, 2003 Edition.

Θόρυβος και Δονήσεις σε εργασιακούς χώρους: Εκτίμηση – πρόβλεψη, μέτρα προστασίας

Καλλίρης Γ.**	Αβδελίδης Κ.*	Βαγιόκας Ν.***	Γούσσιος Χ.*
Επίκ. Καθηγητής	Διπλ. ΗΜΜΥ	Διπλ. Χημ. Μηχ.	Διπλ. ΗΜΜΥ
gkal@auth.gr	avdel@auth.gr	vayiokas@elinayae.gr	cgoussios@hotmail.com
Δημούλας Χ.*	Παπανικολάου Γ.*	Παστιάδης Κ.*	Σεβαστιάδης Χ.*
Διπλ. ΗΜΜΥ	Αν. Καθηγητής	Δρ ΗΜΜΥ	Διπλ. ΗΜΜΥ
babis@eng.auth.gr	pap@eng.auth.gr	pastiadi@eng.auth.gr	csevast@ad.auth.gr

* Εργαστήριο Ηλεκτροακουστικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ), ΑΠΘ

** Εργαστήριο Ηλεκτρονικών ΜΜΕ, Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μέσων Μαζικής Επικοινωνίας, ΑΠΘ

*** Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά σε θέματα υγιεινής και ασφάλειας στον εργασιακό χώρο που σχετίζονται με την εκπομπή θορύβου και δονήσεων. Πρόκειται για τρέχουσα έρευνα που στόχο έχει την εκτίμηση αυτών των παραγόντων και την αντιμετώπισή τους. Πραγματοποιούνται μετρήσεις σε ένα αντιπροσωπευτικό αριθμό ελληνικών βιομηχανιών, σύμφωνα με τα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται, αξιοποιούνται για το σχεδιασμό μοντέλων πρόβλεψης των κατανομών ηχητικών σταθμών και σταθμών δονήσεων με βάση τα χαρακτηριστικά των πηγών που υπάρχουν σε ένα εργασιακό περιβάλλον, αλλά και τα χαρακτηριστικά του χώρου. Στόχος είναι τα μοντέλα υπολογισμού που πρόκειται να υλοποιηθούν σε περιβάλλοντα λογισμικού να παρέχουν εκτίμηση της εκπομπής θορύβου και δονήσεων σε ένα χώρο χωρίς να είναι απαραίτητη η διεξαγωγή όλων των μετρήσεων στο χώρο αυτό.

Noise and Vibration in the working environment: Evaluation – estimation, protection

ABSTRACT

This paper deals with problems concerning health and safety at work, specifically noise and vibration exposure. A current research project is running for the estimation and evaluation of these factors. Measurements in the local industry are taking place. The results are used to design estimation models of the sound and vibration level distributions using the given machinery specifications and the industrial environment acoustic parameters. A software development for the calculation and plot of level distributions using a minimum number of in-situ measurements is the final target.

Εισαγωγή

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα πρώτα αποτελέσματα, έρευνας που είναι σε εξέλιξη με αντικείμενο το θόρυβο και τις δονήσεις στους εργασιακούς χώρους στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος, από την παραπάνω ομάδα.

Ο θόρυβος και οι δονήσεις στους εργασιακούς χώρους αντιμετωπίζονται από τις οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της θέσπισης ελάχιστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας των εργαζόμενων και εντάσσονται στην κατηγορία των κινδύνων που προέρχονται από φυσικούς παράγοντες (physical agents). Προβλήματα που συνδέονται με το θόρυβο κατά την εργασία είναι¹, βλάβες στην ακοή από υψηλές στάθμες, ελλιπής ασφάλεια από τη δυσκολία να ακούγονται τα προειδοποιητικά μηνύματα (warnings), προβληματική επικοινωνία μεταξύ των εργαζόμενων όταν εργάζονται ομαδικά, μείωση της αποδοτικότητας λόγω κόπωσης και απώλειας συγκέντρωσης. Επίσης πέρα από επιδράσεις στην ακοή αναφέρονται ως «μη ακουστικές επιδράσεις»² προβλήματα που αφορούν κυρίως το νευρικό σύστημα, τις ψυχικές λειτουργίες, το κυκλοφορικό, το γαστρεντερικό, το ενδοκρινικό και άλλα συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού. Προβλήματα που συνδέονται με τις δονήσεις³ (vibration - μεταφράζεται και ως ‘κραδασμοί’) αφορούν σε διαταραχές αγγειακές, οστών ή αρθρώσεων, νευρολογικές ή μυϊκές, οσφυαλγία και τραυματισμό της σπονδυλικής στήλης.

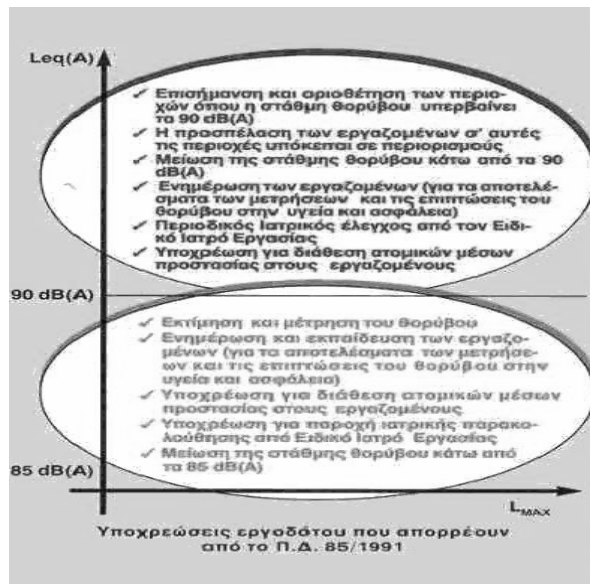
Ελληνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Στον πίνακα 1 συνοψίζονται οι μέχρι σήμερα κοινοτικές οδηγίες για την υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων που αφορούν την έκθεση σε φυσικούς φυσικούς παράγοντες δηλαδή, θόρυβο και δονήσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΚΟΙΝΟΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΙΕΙΝΗ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ (ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ)

ΑΡ.ΟΔΗΓΙΑΣ	ΤΙΤΛΟΣ	ΕΝΑΡΜΟΝΙΣΗ
2003/10/ΕΚ	Οδηγία 2003/10/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 6ης Φεβρουαρίου 2003, περί των ελάχιστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας για την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (θόρυβος) (17η ειδική οδηγία κατά την έννοια του άρθρου 16 παράγραφος 1 της οδηγίας 89/391/ΕΟΚ) - 1 ^η Τροποποίηση της οδηγίας 86/188/ΕΟΚ - Θόρυβος	(προθεσμία 15.02.2006)
2002/44/ΕΚ	Περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφαλείας όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (κραδασμοί) (δέκατη έκτη ειδική οδηγία κατά την έννοια του άρθρου 16 παράγραφος 1 της οδηγίας 89/391/ΕΟΚ)	(προθεσμία 06.07.2005)
89/391/ΕΟΚ	Σχετικά με την εφαρμογή των μέτρων για την προώθηση της βελτίωσης της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων κατά την εργασία.	ΠΔ 17/96
86/188/ΕΟΚ	Περί προστασίας των εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της εκθέσεως τους κατά την διάρκεια της εργασίας στον θόρυβο . (Υπό τροποποίηση)	ΠΔ 85/91

Στην τελευταία στήλη του πίνακα 1 εμφανίζεται η κατάσταση εναρμόνισης της κάθε οδηγίας από την ελληνική νομοθεσία. Σύμφωνα με τις διατάξεις του υπό τροποποίηση Π.Δ. 85/91 «Προστασία εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της έκθεσής τους στο θόρυβο κατά την εργασία» (Φ.Ε.Κ/ 38/α/18-3-1991), η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με δύο τρόπους: **1. Τεχνική πρόληψη**, η οποία βασίζεται στην απομάκρυνση των γενεσιουργών αιτιών κινδύνου και τη μείωση του θορύβου στην πηγή του. Αυτό πετυχαίνεται με την αντικατάσταση της θορυβώδους παραγωγικής διαδικασίας με άλλη λιγότερο θορυβώδη, την τήρηση των οδηγιών εγκατάστασης και συντήρησης των μηχανών, καθώς και με τη μείωση της μετάδοσης του θορύβου τόσο στην πηγή (εγκλωβισμός των πηγών θορύβου) όσο και στο περιβάλλον εργασίας (υλικά κατασκευής με κατάλληλο συντελεστή ηχοαπορρόφησης, ηχοπαραπετάσματα κλπ) Επίσης στην τεχνική πρόληψη εντάσσονται τα μέσα ατομικής προστασίας (Μ.Α.Π.) αποτελούν την τελευταία γραμμή άμυνας κατά του θορύβου και πρέπει η χρήση τους να έχει προσωρινό χαρακτήρα. **2. Ιατρική και οργανωτική πρόληψη**, η οποία βασίζεται αφ' ενός μεν σε οργανωτικές επεμβάσεις που στοχεύουν στη μείωση του χρόνου έκθεσης των εργαζομένων στον βλαπτικό παράγοντα, αφ' ετέρου δε στην ιατρική παρακολούθηση των εργαζομένων που εκτίθενται σε θόρυβο και η οποία αποτελεί και εργοδοτική υποχρέωση. Ο εργοδότης έχει την υποχρέωση να χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του γιατρού εργασίας όπως αυτός ορίζεται στο ν.1568/85, ανεξάρτητα από τον αριθμό των εργαζομένων στην επιχείρηση. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζει σύμφωνα με τις υποδείξεις του γιατρού εργασίας ότι κάθε εργαζόμενος πριν από την έκθεση και στη συνέχεια σε τακτά χρονικά διαστήματα, υπόκειται σε ακουομετρικό έλεγχο για την εκτίμηση της κατάστασης της ακοής του. Οι υποχρεώσεις του εργοδότη συνοψίζονται στο σχήμα 1



Σχήμα 1. Υποχρεώσεις του εργοδότη σύμφωνα με το Π.Δ. 85/1991²

Επίσης σύμφωνα με το Π.Δ. 85/1991 η ημερήσια ατομική ηχοέκθεση ενός εργαζόμενου εκφράζεται σε dB(A) με την εξίσωση:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,Te} + 10 \log \frac{Te}{To}$$

$$\text{οπου, } L_{Aeq,Te} = 10 \log \left\{ \frac{1}{Te} \int_0^{Te} \left[\frac{P_A(t)}{Po} \right]^2 dt \right\}$$

και, Te : η ημερήσια διάρκεια της ατομικής ηχοέκθεσης ενός εργαζομένου, To : 8 ώρες = 28.800 δευτερόλεπτα, Po : 20 μ Pa, P_A : η τιμή σε PASCAL της στιγμιαίας Α-σταθμισμένης ηχητικής πίεσης στην οποία εκτίθεται, στον αέρα από ατμοσφαιρική πίεση, ένα άτομο ανεξάρτητα από τις μετακινήσεις του κατά την εργασία. Προσδιορίζεται με μετρήσεις που διενεργούνται στις θέσεις όπου βρίσκονται τα αυτιά του ατόμου κατά την εργασία, κατά προτίμηση την στιγμή της απουσίας του, χρησιμοποιώντας τεχνική που να ελαχιστοποιεί την επίδραση στο ηχητικό πεδίο. Στην ημερήσια ατομική ηχοέκθεση δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση οποιουδήποτε ατομικού ακουο-προστατευτικού μέσου, που θα μπορούσε να έχει χρησιμοποιηθεί.

Ο εβδομαδιαίος μέσος όρος των ημερήσιων τιμών υπολογίζεται με την εξής εξίσωση:

$$L_{EP,W} = 10 \log \left[\frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0,1(L_{EP,d})_k} \right]$$

όπου $(L_{EP,d})_k$ είναι οι τιμές της $L_{EP,d}$ για κάθε μία από τις m ημέρες εργασίας της υπόψη εβδομάδας.

Από την άλλη πλευρά στη **νέα οδηγία για το θόρυβο⁴**, περιλαμβάνονται οι παρακάτω ορισμοί: α) αιχμή της ηχητικής πίεσης (P_{peak}), β) ημερήσιο επίπεδο έκθεσης στο θόρυβο ($LEX,8h$) [dB(A) re. 20 μ Pa] κατά το ISO 1999:1990, γ) εβδομαδιαίο επίπεδο έκθεσης στο θόρυβο ($LEX,8h$). Παρόλο που οι συμβολισμοί έχουν αλλάξει, στην πραγματικότητα οι ορισμοί των ημερήσιων και εβδομαδιαίων μέσων τιμών ηχοέκθεσης παραμένουν οι ίδιοι με αυτούς του Π.Δ. 85/1991. Η ουσιαστική αλλαγή που εισάγει η νέα οδηγία αφορά στις οριακές τιμές έκθεσης και στις τιμές έκθεσης για ανάληψη δράσης που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν 'ηπιότερες' για τον Εργοδότη.

Οι νέες οριακές τιμές έκθεσης και τιμές έκθεσης για ανάληψη δράσης είναι: α) οριακές τιμές έκθεσης: $LEX,8h = 87$ dB(A) και $P_{peak} = 200$ Pa [140 dB(C)], β) ανώτερες τιμές για ανάληψη δράσης: $LEX,8h = 85$ dB(A) και $P_{peak} = 140$ Pa [137 dB(C)], γ) κατώτερες τιμές για ανάληψη δράσης: $LEX,8h = 80$ dB(A) και $P_{peak} = 112$ Pa [135 dB(C)] Κατά την εφαρμογή των οριακών τιμών έκθεσης, ο καθορισμός της πραγματικής έκθεσης του εργαζομένου **συνυπολογίζει τη μείωση που παρέχεται από τα ατομικά μέσα προστασίας** της ακοής που φέρει ο εργαζόμενος. Στις τιμές έκθεσης για ανάληψη δράσης η επίπτωση αυτών των μέσων προστασίας δεν συνυπολογίζεται.

Στην πρόσφατη οδηγία για τις δονήσεις⁵, όπου για πρώτη φορά εφαρμόζονται ποσοτικά κριτήρια για την έκθεση στις δονήσεις, περιλαμβάνονται οι παρακάτω

ορισμοί: α) «κραδασμός μεταδιδόμενος στο σύστημα χεριού-βραχίονα» β) «κραδασμός σε ολόκληρο το σώμα»

Οι οριακές τιμές έκθεσης και τιμές έκθεσης για την ανάληψη δράσης είναι:

1. Σύστημα χεριού-βραχίονα: α) η ημερήσια οριακή τιμή έκθεσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε 5 m/s², β) η ημερήσια τιμή έκθεσης για την ανάληψη δράσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε 2,5 m/s².

2. Ολόκληρο το σώμα: α) η ημερήσια οριακή τιμή έκθεσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε 1,15 m/s² ή, κατ' επιλογήν του κράτους μέλους, σε τιμή δόσης κραδασμών 21 m/s^{1,75}, β) η ημερήσια τιμή έκθεσης για την ανάληψη δράσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε 0,5 m/s² ή, κατ' επιλογήν του κράτους μέλους, σε τιμή δόσης κραδασμών 9,1 m/s^{1,75}.

Εθνικοί και Ευρωπαϊκοί Επιβλέποντες Φορείς

Στην Ελλάδα έχει δημιουργηθεί το εθνικό δίκτυο φορέων πληροφόρησης για την υγιεινή και ασφάλεια στην εργασία, με μέλη:

Τη ΓΕΝΙΚΗ Δ/ΝΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ & ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ του Υπουργείου Απασχόλησης η οποία αποτελείται από τη ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ που προετοιμάζει τις νομοθετικές πράξεις, εισηγείται μέτρα, παρέχει ενημέρωση και πληροφόρηση, και το ΚΕΝΤΡΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΚΥΑΕ) με εργαστηριακό εξοπλισμό μετρήσεων χημικών και φυσικών παραγόντων

Το ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ & ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ που ιδρύθηκε από την συνεργασία των κύριων εργοδοτικών & συνδικαλιστικών οργανώσεων της χώρας (ΣΕΒ - ΓΣΕΕ -ΓΣΕΒΕΕ). Παρέχει υπηρεσίες προς τις επιχειρήσεις και τις συνδικαλιστικές οργανώσεις στους τομείς της ενημέρωσης, έρευνας, εκπαίδευσης & κατάρτισης.

Στην Ευρώπη λειτουργεί το «EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK». Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια και την Υγεία στην Εργασία έχει στόχο να καταστήσει τους χώρους εργασίας στην Ευρώπη ασφαλέστερους, υγιέστερους και παραγωγικότερους.

Το Έργο

Στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα» της ΓΓΕΤ εγκρίθηκε το έργο με τίτλο: «Πρότυπο για την αξιολόγηση των συνθηκών υγιεινής και ασφάλειας στον εργασιακό χώρο». Ανάδοχος ήταν το ΕΛΙΝΥΑΕ. Στόχος, η ανάπτυξη λογισμικού για την αξιολόγηση του εργασιακού περιβάλλοντος από την άποψη της υγιεινής και ασφάλειας της εργασίας και χρήση του ως εργαλείου για τη συμπλήρωση και τήρηση της Μελέτης Εκτίμησης Επαγγελματικού Κινδύνου. Τα μοντέλα καταγραφής που αναπτύχθηκαν ήταν: 1. Διασποράς χημικών παραγόντων, 2. Θορύβου, 3. Δονήσεων, 4. Εργονομικών Παραγόντων.

Μοντέλο Καταγραφής Θορύβου

Για το μοντέλο καταγραφής θορύβου, η απαίτηση του Έργου ήταν η παροχή της δυνατότητας παραγωγής του χάρτη θορύβου του εργασιακού χώρου με ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων. Έχοντας στα χέρια του ο Μηχανικός έναν τέτοιο χάρτη, μπορεί στη συνέχεια να εκτιμήσει με αρκετή ακρίβεια τις τιμές που θα προέκυπταν από τη διεξαγωγή μετρήσεων κατά το ISO

1999:1990 σε κάθε εργαζόμενο, δηλαδή το ημερήσιο επίπεδο έκθεσης στο θόρυβο και το εβδομαδιαίο επίπεδο έκθεσης στο θόρυβο.

Οι δυνατότητες ελαχιστοποίησης των απαιτούμενων μετρήσεων στηρίζονται πρώτον στη μείωση του χρόνου μέτρησης (όσο περισσότερο αμετάβλητη είναι η έκθεση) και δεύτερον στην εκτίμηση της χωρικής κατανομής από λιγότερες μετρήσεις. Ειδικά για την περίπτωση της εκτίμησης από λιγότερες μετρήσεις αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος θεωρώντας τις μηχανές ως ηχητικές πηγές, τις διαχωρίζει σε τρεις περιπτώσεις ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης και εκτίμησης της κατανομής L_{eq} από κάθε πηγή. Η πρώτη περίπτωση αφορά σύνθετες πηγές των οποίων το ακουστικό κέντρο δεν μπορεί να εντοπιστεί από το Μηχανικό. Η δεύτερη περίπτωση αφορά μέτρηση σημειακών πηγών υπό την προϋπόθεση ότι ο Μηχανικός είναι σε θέση να εντοπίσει το ακουστικό κέντρο. Η τρίτη περίπτωση είναι αυτή όπου από τις προδιαγραφές του μηχανήματος δίδεται η στάθμη ηχητικής ισχύος L_w έχουμε τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε την κατανομή του L_{eq} χωρίς να χρειαστεί να μετρήσουμε. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι στη συνολική χωρική κατανομή προστίθεται και η συνεισφορά της αντήχησης του εργασιακού χώρου η οποία είτε υπολογίζεται με βάση τις διαστάσεις και τα υλικά, ή μετρείται σε μία απομακρυσμένη από πηγές θέση.

Η διαδικασία υπολογισμού της κατανομής του L_{eq} περιγράφεται στη συνέχεια. Έστω ότι για κάθε σημειακή ηχητική πηγή 'i' που βρίσκεται σε ένα χώρο ισχύει ότι η στάθμη πίεσης σε ένα σημείο A δίδεται από τη σχέση⁶

$$L_{p,i,A} = L_{w,i} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{4p r_{i,A}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

στην παραπάνω σχέση αν ο όρος $\frac{Q_i}{4p r_{i,A}^2} \gg \frac{4}{R}$ δηλαδή κοντά στην πηγή τότε

$$L_{p,i,A} \approx L_{w,i} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{4p r_{i,A}^2} \right) = L_{p,i,A, free - field}$$

για ελεύθερο πεδίο, ενώ για απομακρυσμένη μέτρηση όπου $\frac{Q_i}{4p r_{i,A}^2} \ll \frac{4}{R}$, τότε

$$L_{p,i,A} \approx L_{w,i} + 10 \log \left(\frac{4}{R} \right) = L_{p,i,rev}$$

που είναι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου της πηγής 'i' ανεξάρτητη του $r_{i,A}$

Αν λοιπόν σε ένα μηχανήμα έχουμε n πηγές τότε η συνεισφορά τους σε ένα κοντινό σημείο A θα δίνει στάθμη ηχητικής πίεσης

$$10^{\frac{L_{pA}}{10}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4p r_{i,A}^2} x_i \quad \text{όπου} \quad x_i = Q_i \cdot 10^{\frac{L_{w_i}}{10}}$$

δηλαδή ο όρος x_i μπορεί να θεωρηθεί σταθερός με την παραδοχή ότι και το Q_i είναι σταθερό

Έχοντας m κοντινά σημεία μέτρησης γύρω από το μηχανήμα μπορούμε να έχουμε m εξισώσεις της παραπάνω μορφής με n αγνώστους x_i , υπό την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τις θέσεις των πηγών. Επειδή όμως δεν γνωρίζουμε ούτε τις θέσεις των πηγών, ορίζουμε n υποθετικές πηγές ομοιόμορφα καταναμημένες στο οριζόντιο

επίπεδο της μηχανής και ουσιαστικά προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τις στάθμες τους λύνοντας ένα σύστημα m εξισώσεων με n αγνώστους.

$$A \cdot X = B$$

$$\text{όπου } A = \begin{bmatrix} \frac{1}{4pr_{1,1}^2} & \mathbf{L} & \frac{1}{4pr_{n,1}^2} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \frac{1}{4pr_{1,m}^2} & \mathbf{L} & \frac{1}{4pr_{n,m}^2} \end{bmatrix}$$

και $r_{j,i}$ είναι η απόσταση της πηγής j από την θέση μέτρησης i .

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \mathbf{M} \\ x_n \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad B = \begin{bmatrix} 10^{\frac{L_{p_1}}{10}} \\ \mathbf{M} \\ 10^{\frac{L_{p_m}}{10}} \end{bmatrix}$$

Έτσι, αν A^{-1} συμβολίζει τον ψευδο-αντίστροφο του A , η minimum-norm λύση του συστήματός μας είναι:

$$X = A^{-1} \cdot B$$

Έχοντας πλέον γνωστά τα $x_k = Q_k \cdot 10^{\frac{L_{w_k}}{10}}$, $k = 1 \mathbf{K} n$, η στάθμη σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

$$10^{\frac{L_{p_A}}{10}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4pr_{i_A}^2} x_i$$

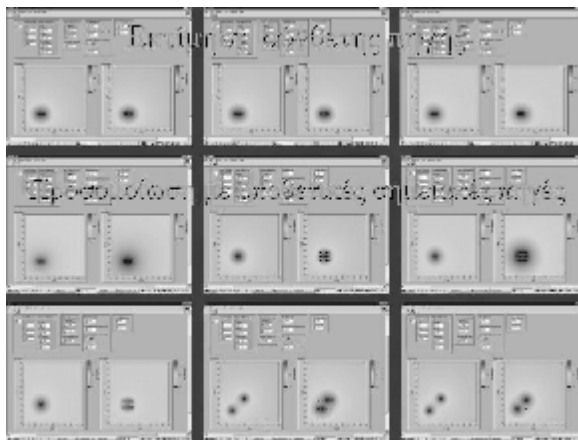
ενώ η ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί για κάθε μηχανή που βρίσκεται στο χώρο. Για τον προσδιορισμό της συνολικής στάθμης σε κάθε σημείο του χώρου απαιτείται επίσης και μία απομακρυσμένη από όλες τις μηχανές μέτρηση που εκφράζει τη συνολική στάθμη αντήχησης απ' όλες τις μηχανές στο χώρο.

Η συνολική στάθμη από όλες τις μηχανές σε κάθε σημείο του χώρου υπολογίζεται από τη σχέση

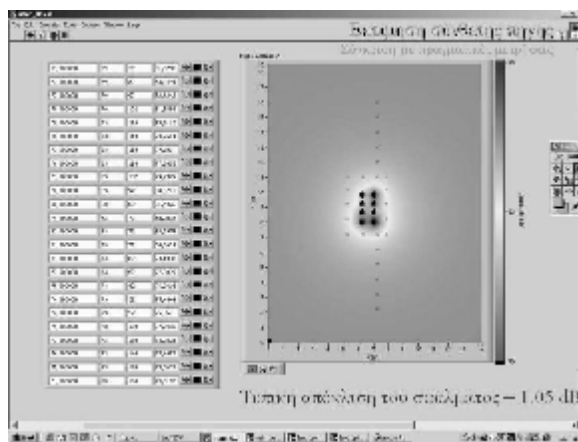
$$Lp_{tot,A} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^N 10^{Lp,i,A/10} + 10^{Lr/10} \right\}$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των μηχανών και Lr η συνολική στάθμη αντήχησης

Στο σχήμα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης μιας σύνθετης πηγής που έχει προσομοιωθεί με υποθετικές σημειακές πηγές έχοντας σαν μεταβαλλόμενη παράμετρο τον αριθμό υποθετικών πηγών. Στο σχήμα 3. φαίνονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης μιας σύνθετης πηγής και της σύγκρισης με πραγματικές μετρήσεις. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος στην περίπτωση αυτή είναι 1.05dB



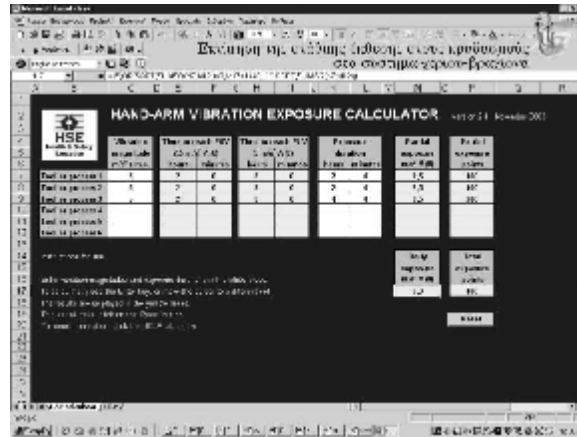
Σχήμα 2. Εκτίμηση σύνθετης πηγής, προσομοίωση με υποθετικές σημειακές πηγές



Σχήμα 3. Εκτίμηση σύνθετης πηγής και σύγκριση με πραγματικές μετρήσεις

Μοντέλο Δονήσεων

Για το μοντέλο καταγραφής δονήσεων η απαίτηση ήταν ανάλογη με την περίπτωση του θορύβου δηλαδή η εκτίμηση των κατανομών των δονήσεων με ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων για τις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση χρειάζεται αρχικά να γίνει εκτίμηση της στάθμης έκθεσης στους κραδασμούς στο σύστημα χεριού-βραχίονα με υπολογισμό της ημερήσιας έκθεσης A, ανηγμένης σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών A (8) κατά ISO 5349-1. Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται η εκτίμηση της στάθμης έκθεσης στους κραδασμούς σε ολόκληρο το σώμα με υπολογισμό της ημερήσιας έκθεσης A (8), εκφραζόμενη ως η ισοδύναμη συνεχής επιτάχυνση για περίοδο οκτώ ωρών για εργαζόμενο καθήμενο ή όρθιο, κατά ISO 2631-1 (1997). Οι υπολογισμοί της έκθεσης γίνονται με κατάλληλα φύλλα υπολογισμού για κάθε εργαζόμενο και θέση εργασίας (σχήμα 4) ενώ για την στάθμη παραγωγής δονήσεων του μηχανήματος εκτός από τη μέτρηση υπάρχει και η δυνατότητα εύρεσης της τιμής από βάσεις δεδομένων στο διαδίκτυο (σχήμα 5).



Σχήμα 4. Φύλλα υπολογισμού ημερήσιας έκθεσης σε δονήσεις⁷

Μοντέλο Μηχανήματος	Μέγιστη Στάθμη	Μέγεθος	Χρόνος Έκθεσης	Τύπος Μηχανήματος
LL1	100	100	100	100
LL2	100	100	100	100
LL3	100	100	100	100
LL4	100	100	100	100
LL5	100	100	100	100
LL6	100	100	100	100
LL7	100	100	100	100
LL8	100	100	100	100
LL9	100	100	100	100
LL10	100	100	100	100
LL11	100	100	100	100
LL12	100	100	100	100
LL13	100	100	100	100
LL14	100	100	100	100
LL15	100	100	100	100
LL16	100	100	100	100
LL17	100	100	100	100
LL18	100	100	100	100
LL19	100	100	100	100
LL20	100	100	100	100
LL21	100	100	100	100
LL22	100	100	100	100
LL23	100	100	100	100
LL24	100	100	100	100
LL25	100	100	100	100
LL26	100	100	100	100
LL27	100	100	100	100
LL28	100	100	100	100
LL29	100	100	100	100
LL30	100	100	100	100
LL31	100	100	100	100
LL32	100	100	100	100
LL33	100	100	100	100
LL34	100	100	100	100
LL35	100	100	100	100
LL36	100	100	100	100
LL37	100	100	100	100
LL38	100	100	100	100
LL39	100	100	100	100
LL40	100	100	100	100
LL41	100	100	100	100
LL42	100	100	100	100
LL43	100	100	100	100
LL44	100	100	100	100
LL45	100	100	100	100
LL46	100	100	100	100
LL47	100	100	100	100
LL48	100	100	100	100
LL49	100	100	100	100
LL50	100	100	100	100

Σχήμα 5. Βάση δεδομένων καταχωρημένων τιμών στάθμης δονήσεων ανά μοντέλο και κατασκευαστή μηχανήματος⁸

Συμπέρασμα – μελλοντικές εργασίες

Στην παρούσα φάση του Έργου θα πρέπει να επισημάνουμε τα ικανοποιητικά αποτελέσματα του μοντέλου εκτίμησης των σύνθετων πηγών και κατά συνέπεια της συνολικής κατανομής του L_{eq} . Επόμενο στάδιο αποτελεί η δοκιμή στην πράξη με την πραγματοποίηση επιτόπου μετρήσεων και επαλήθευση του μοντέλου. Στις μελλοντικές εργασίες το βάρος της έρευνας μετατίθεται στην ανάπτυξη αντίστοιχης μεθοδολογίας για τις δονήσεις.

Αναφορές

- ¹ HASSALL J. R. and ZAVERI K., *Acoustic Noise Measurements*, Bruel & Kjaer, Naerum, Denmark, 1979.
- ² Εκδόσεις ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, *Θόρυβος αυτός ο άγνωστος*, <http://www.elinyae.gr/>
- ³ DIRECTIVE 2002/44/EC, <http://europa.eu.int/eur-lex/>

⁴ DIRECTIVE 2003/10/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 February 2003, on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise)

⁵ ΟΔΗΓΙΑ 2002/44/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 25ης Ιουνίου 2002, περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφαλείας όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (κραδασμοί) (δέκατη έκτη ειδική οδηγία κατά την έννοια του άρθρου 16 παράγραφος 1 της οδηγίας 89/391/ΕΟΚ)

⁶ ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ Δ., *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 1998.

⁷ <http://www.hse.gov.uk/vibration/calculator.htm>

⁸ <http://umetech.niwl.se/eng/havsearch.lasso>

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

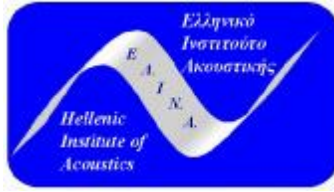
Όνοματεπώνυμο	σελ.	Όνοματεπώνυμο	σελ.
Adamy J.	187	Λυμπέρτος Ευστράτιος	333
Clemens M.	305	Μαλαφής Γ. Ι.	101
Ekaterinaris A. John	311	Μανατάκη Ιωάννα	235
Fragos Dimitris	397	Μανατάκης Μανώλης	235
Frantzis A.	281	Μουζακίτης Σπυρίδων	389
Kalogerakis M.	281	Μουρτζόπουλος Ιωάννης	221, 365, 373
Masson Bertrand	255	Μπακαρέζος Μ.	93
Nelson A. P.	143	Μπάμνιος Γεώργιος	267
Pavlidou Maria	397	Μπάρκας Κ. Νίκος	25
Pinnington J. R.	1	Ναθαναήλ Χρυσάνθη	255
Rümmerle Michael	397	Ναλμπάντης Δημήτριος	419
Schubert Gottfried	37, 45	Νικολίτσα Ελίνα	77
Skarlatos A	305	Ξύδας Γεράσιμος	157
Skarsoulis E.	281	Ορφανός Γ.	93
Stofleth Andreas	397	Παλάντζας Γιώργος	419
Touloopoulos Ioannis	311	Παναγιωτάκου Ε. Χρ.	101
Tsakostas Christos	19, 149	Παναγόπουλος Χάρης	85
Voutsas K.	187	Παντελάκης Μιχάλης	115
Weiland T.	305	Παπαδάκης Παναγιώτης	275
Αβδελίδης Κων/νος	181, 426	Παπαδέας Ε.	325
Αργουδέλης Θεόδωρος	413	Παπαδέλης Γεώργιος	165, 173
Αργυρόπουλος Βασίλης	157	Παπαδογιάννης Α. Ν.	93
Βαγιόκας Ν.	426	Παπαδοπούλου Χ. Μαρία	69
Βασιλαντωνόπουλος Σταμάτης	365, 373	Παπανικολάου Γ.	123, 181, 209, 426
Βασιλειάδης Αναστάσιος	143	Παστιάδης Κων/νος	165, 173, 209, 426
Βαφάκη Εύα	419	Πετρουτσέα Σταυρούλα	295
Γεωργάκη Αναστασία	195	Προβατίδης Χριστόφορος	389
Γούσιος Χ.	123, 426	Ρουμελιώτης Α. Ιωάννης	341
Γυμνόπουλος Σ.	93	Ρουσουνέλος Ανδρέας	45
Δερματάς Ευάγγελος	333	Σαρρής Ιωάννης	31, 215
Δημούλας Χαράλ.	181, 426	Σεβαστιάδης Χ.	123, 426
Δοσχόρης Μιχ.	325	Σέργης Βλάσσης	115
Δουκάκης Ευστράτιος	295	Σκαρλάτος Δημήτρης	261, 325, 365
Ευθυμιάτος Διονύσιος	13	Σκουρουπάθης Απόστολος	85
Ζακυνθινός Τηλέμαχος	261, 365	Σπυρίδης Χ. Χαράλαμπος	61, 69, 101
Ζήσιμος Ιωάννης	243, 249	Στεφανάκης Νικόλαος	31, 215
Κακκαβάς Π.	325	Ταρνανάς Ιωάννης	173
Καλλίρης Γεώργιος	123, 181, 426	Ταρουδάκης Μ.	287
Καμπουράκης Γεώργιος	31, 215	Ταταράκης Μ.	93
Καμπουρόπουλος Αιμίλιος	173	Τάτλας Νικόλαος – Αλέξανδρος	221, 365
Καππάτος Βασίλειος	333	Τζαγκαράκης Γ.	287
Καρακώστα Θεοδώρα	157	Τζεβελέκος Παναγιώτης	49
Καρδάρης Χαράλ.	181	Τιμαγένης Θ.	135
Κεραμίδης Δημήτριος	129	Τροχίδης Αθανάσιος	267, 405
Κουζελέας Θ. Στέλιος	381	Τσινίκας Νικόλαος	347
Κουζούπης Σπύρος	93, 405	Φλώρος Ανδρέας	229
Κουρουπέτρογλου Γεώργιος	49, 157	Χαραλαμπόπουλος Γεώργιος	389
Κουτσοδημάκης Χρήστος	109	Χατζηαντωνίου Παναγιώτης	365
Κουτσομήτσος Σωτήρης	221	Χατζημανολάκης Ε. Παν.	101
Κωστάζος Ηλίας	115	Χουρμουζιάδου Καλλιόπη	357
Κώτσης Δ. Αριστείδης	341		



EUROPEAN ACOUSTICS ASSOCIATION (E.A.A.)

The **European Acoustics Association** was founded in 1992 by eleven European acoustical societies. Organized in the form of a non-profit making enterprise under Spanish law, it provides a firm base for many activities in acoustics which earlier European groupings could not achieve. The European Acoustics Association EAA:

- is a service provider to 29 Acoustical Societies throughout Europe, with more than 8500 individual members
- offers a range of Products which can only be efficiently provided by means of pan-European cooperation
- is democratically organized - based on the federal principles of one vote per society, regardless of size, with adherence to the concept of subsidiarity
- has an efficient Management Structure - managers being assigned due to competence and not simply for political balance
- is economically powerful since the full members share the running costs of the business
- is open to all European acoustical societies due to the concept of associate-member societies, which are entitled to economic privileges in accordance with their economic status - associate members can become full members at any time
- provides a good basis for the general growth and expansion of activities in acoustics to meet future demands of its member societies
- provides attractive opportunities for responsible volunteers who want to devote part of their working power and expertise to activities at the pan-European level
- works on the principle of subsidiarity - that is, it complements, and does not replace the activities of national and regional societies
- gathers together 29 National Societies of Acoustics and serves more than 8500 individual members in the following countries: Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Great Britain, Greece, Hungary, Italy, Latvia, Lithuania, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Russia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, Ukraine, Yugoslavia.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ (ΕΛ.ΙΝ.Α.)

www.helina.gr

Μέλος της *Ευρωπαϊκής Ένωσης Ακουστικών Εταιριών (E.A.A.)*

Το ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ, δημιουργήθηκε με στόχο να συσπειρώσει την Ελληνική Επιστημονική κοινότητα που σχετίζεται ερευνητικά, εκπαιδευτικά ή επαγγελματικά με την ακουστική. Η ίδρυση του Ινστιτούτου υπαγορεύτηκε από την ανάγκη δημιουργίας ενός φορέα κοινής έκφρασης όλων όσων επιθυμούν την ανάπτυξη τη περιοχής αυτής στην Ελλάδα και την συνεργασία του με τα αντίστοιχα Ινστιτούτα και Εταιρίες της Ευρώπης, Αμερικής και Ιαπωνίας. Έτσι θα επιτευχθεί κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο η διάχυση της Τεχνογνωσίας και της Εμπειρίας που αναπτύσσεται στην περιοχή καθώς και η διακίνηση νέων ιδεών.

Το Ινστιτούτο εντάχθηκε ήδη στην Ευρωπαϊκή Ένωση των Ακουστικών Εταιριών (European Acoustics Association), η οποία χαιρέτησε με ενθουσιασμό την ίδρυση του Ινστιτούτου.

Έδρα του Ινστιτούτου είναι η Αθήνα, αλλά προβλέπεται η δημιουργία παραρτημάτων σε όλη την Ελληνική Περιφέρεια, καθώς και η δημιουργία θεματικών ομάδων μέσα στο Ινστιτούτο σε αναλογία με τα μεγαλύτερα ακουστικά Ινστιτούτα του εξωτερικού και η ένταξη σ' αυτά των μελών του με δυνατότητα πολλαπλής ένταξης.

Το ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ καλεί όλους τους συναδέλφους που επιθυμούν να ενταχθούν στο Ινστιτούτο να συμπληρώσουν την αίτηση εγγραφής που μπορούν να βρουν στην ιστοσελίδα του ινστιτούτου (www.helina.gr) και να την αποστείλουν ταχυδρομικά ή με FAX στον Γενικό Γραμματέα κ. Μιχαήλ Ταρουδάκη (Πανεπιστήμιο Κρήτης – Τμήμα Μαθηματικών – Λεωφ. Κνωσού, 714 09 Ηράκλειο Κρήτης, Αρ. FAX 2810393881).

Σύμφωνα με το Καταστατικό του Ινστιτούτου, όλοι όσοι έχουν πτυχίο ΑΕΙ με ενεργό συμμετοχή στην περιοχή της Ακουστικής εντάσσονται στην κατηγορία των «Εταίρων». Συνάδελφοι χωρίς πτυχίο ΑΕΙ αλλά με ενασχόληση στην περιοχή της Ακουστικής εντάσσονται στην κατηγορία των «Μελών». Όσοι σπουδάζουν σε αντικείμενο σχετικό με την Ακουστική, εντάσσονται στην κατηγορία των «Σπουδάζοντων Μελών». Η ετήσια συνδρομή για τους Εταίρους και τα Μέλη είναι 60 ΕΥΡΩ και για τα Σπουδάζοντα Μέλη 20 ΕΥΡΩ.