

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Οι πολύχρονες **μετρήσεις** των **ακουστικών παραμέτρων** στους **βυζαντινούς ναούς** της **συμπρωτεύουσας**, οι οποίες **πραγματοποιήθηκαν** από τον **ειδήμονα** στην κτιριακή και αρχαιολογική ακουστική κ. **Παναγιώτη Καραμπατζάκη**, έδειξαν πως η **αύξηση** της **πολυπλοκότητάς** τους σήμαινε παράλληλα και **βελτιστοποίηση** της **ακουστικής** τους

ΤΟΥ ΑΛΚΗ ΓΑΛΔΑΔΑ
algaldadas@yahoo.gr

ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΙ ΝΑΟΙ: ΣΥΜΠΟΡΕΥΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΚΑΙ ΗΧΟΥ

Είναι το καλύτερο μέρος στα Βαλκάνια ως προς αυτό το θέμα και βρίσκεται στην Ελλάδα. Για τη Θεσσαλονίκη ο λόγος και για το αν θέλει κάποιος να μελετήσει την εξέλιξη στην αρχιτεκτονική των ορθόδοξων χριστιανικών ναών. Λες και έχει επιτηδες στηθεί εκεί, αγκαλιάζοντας ολόκληρη την πόλη με απόλυτη αυθεντικότητα, μια έκθεση σε τρεις διαστάσεις και εντελώς φυσικό μέγεθος. Εκεί βρίσκονται όλες οι τάσεις και οι εμπνεύσεις που είχαν αυτό το θέμα ως αντικείμενό τους.

Από ρωμαϊκά κτίσματα που μετατράπηκαν σε εκκλησίες, όπως η Ροτόντα, όντας μέρος του Γαλεριανού συμπλέγματος, έως οικοδομήματα όπως η Αχειροποιίτος, που βασίστηκαν σε εκείνον του πρωταρχικού ρυθμού της «Βασιλικής», αντιγραφή του ρωμαϊκού Forum. Προχωρώντας στη συνέχεια σε εκκλησίες με ρυθμό σταυροειδή αλλά και κάποιες ακόμη πιο διαφορετικές, με σπάνια έμπνευση ναοδομία. Όπως αυτή με τον δυσότερο τετρακόντιο σταυροειδή εγγεγραμμένο με «πλάγιους χορούς μετά λιτίς», του Προφήτη Ηλία από τον 14ο αιώνα. Με άλλα λόγια, όρεξη να έχει κάποιος και τη δυνατότητα μιας μακροχρόνιας παραμονής στην πόλη, για να επισκεπτεί αδιάκοπα μια τόσο αξιοπρόσεκτε «έκθεση».

Αναζήτηση σε βάθος χρόνου
Αυτή την όρεξη έδειξε να έχει εδώ και χρόνια και κάποιος έποικος της πόλης, που έφθασε εκεί πρώτα για να σπουδάσει στην Αρχιτεκτονική Σχολή του Πολυτεχνείου. Τελειώνοντας με τις σπουδές του, και για τα προς το ζην, ξεκίνησε να εργάζεται ως αρχιτέκτονας και σύμβουλος ακουστικής. Με ερευνητικό πεδίο την κτιριακή ακουστική, την αρχαιολογική ακουστική και τα μαθηματικά μοντέλα ακουστικών εσομοιώσεων. Δεν αφιέρωσε όμως όλο τον χρόνο του μόνο στο επάγγελμα επειδή, για τον **Παναγιώτη Καραμπατζάκη**, μεράκι και νταλκάς του έγιναν οι ακουστικές μετρήσεις και η συμπεριφορά του ήχου μέσα σε παλαιά έως και πανάρχαια κτίρια. Κάποια στιγμή μάλιστα πήγε και έστησε τα μηχανήματά του στο νεκρομαντείο του Αχέρωνα, στις υπόγειες αίθουσες τις προοριζόμενες για την επικοινωνία (τάχα) με τους νεκρούς. Για να αποδείξει τελικά πως οι άνθρωποι εκείνη την εποχή, 50



Ο Παναγιώτης Καραμπατζάκης



Τα τεχνικά στοιχεία των ερευνών του ανακοίνωσε χθες ο κ. Καραμπατζάκης στο πλαίσιο του Που Συνέδριο Ακουστικής του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής (ΕΑΙΝΑ), οι εργασίες του οποίου άρχισαν στις 14 Οκτωβρίου και ολοκληρώνονται σήμερα στο κτίριο της ΕΕ του ΑΠΘ.



ακουστικά «αποδεκτοί». Παραδείγματός χάριν, σε χώρο περίπου 700 κυβικών μέτρων, με μορφή ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (shoebbox) και σκληρά υλικά, ο χρόνος αντήχησης RT=3,2 sec υπολογίστηκε στα 500 Hz. Τιμή 100% πάνω από αυτό που θα όριζε μια σύγχρονη θεωρία για το μέγεθος της αντήχησης σε έναν χώρο μουσικής. Ακόμη περισσότερο δε για έναν χώρο ομιλίας.

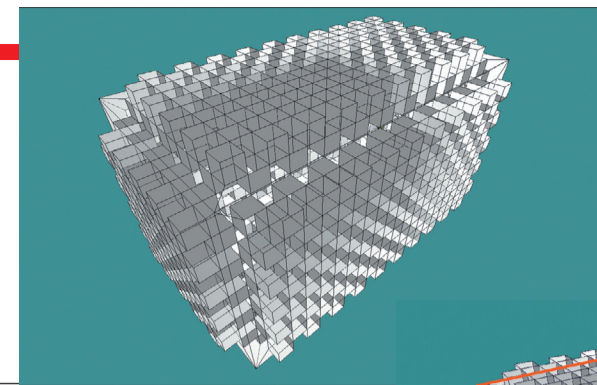
● Από τους προηγούμενους συλλογισμούς, είναι φανερό ότι η μόνη λειτουργική επέμβαση που θα μπορούσε να γίνει προκειμένου να βελτιωθεί ο χρόνος αντήχησης σε αυτά έχει καταλήξει μέχρι στιγμής ο συνολικός όγκος του χώρου, ο χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε για τις ίδιες συχνότητες σε πραγματικό χώρο στον ναό της Παναγίας Χαλκείων (χτιστηκε γύρω στο 1.028, έχει όγκο 1.290 κυβικά μέτρα και είναι «σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο»), γίνεται αντιληπτό το πόσο καλά ανταποκρίνεται από ηχητικής πλευράς η κατασκευή της, χάρη στην πρόσθετη πολυπλοκότητά της.

● Όταν ο ήχος επηρεάζει μια αρχιτεκτονική Μετά τον 8ο αιώνα λοιπόν, που αποκαθίσταται η χρήση των εικόνων για λατρευτικούς σκοπούς, γίνεται ευρεία χρήση τοιχογραφιών για την «στόρωση» των ναών, διότι η εφαρμογή τους ευνοούσε τη διακόσμηση. Ηδη πριν την περίοδο της εικονομαχίας, είχε ξεκινήσει η κάλυψη σχεδόν όλης της εσωτερικής επιφάνειας των ναών με ψηφιδωτά ή άλλα μέσα, αλλά μετά τον 8ο αιώνα η τεχνική αυτή,

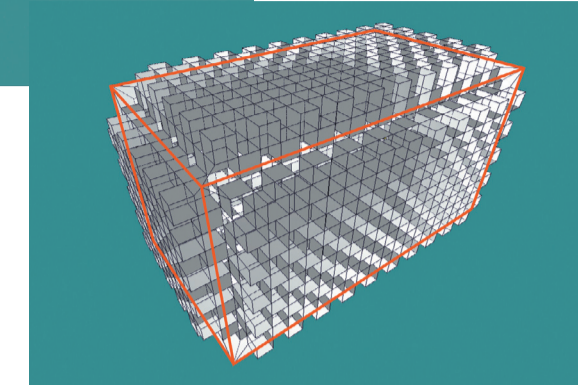
που άφηνε στο εσωτερικό των ναών πολύ «σκληρές» ανακλαστικές επιφάνειες, εξαπλώθηκε σημαντικά. Τα συμπεράσματα λοιπόν που σε αυτά έχει καταλήξει μέχρι στιγμής ο συνολικός όγκος του χώρου, ο χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε για τις ίδιες συχνότητες σε πραγματικό χώρο στον ναό της Παναγίας Χαλκείων (χτιστηκε γύρω στο 1.028, έχει όγκο 1.290 κυβικά μέτρα και είναι «σταυροειδής εγγεγραμμένος με τρούλο»), γίνεται αντιληπτό το πόσο καλά ανταποκρίνεται από ηχητικής πλευράς η κατασκευή της, χάρη στην πρόσθετη πολυπλοκότητά της.

● Τα προβλήματα ακουστικής που είχαν προκύψει κατά τη λειτουργία των Βασιλικών, μειώθηκαν εν μέρει με τη μετάβαση σε μικρότερου ναούς (για παράδειγμα στην Αγία Σοφία Θεσσαλονίκης) και την επικράτηση των σταυροειδών ναών. ● Παρά τη βελτίωση του χρόνου αντήχησης, οι χώροι των ναών εξακολουθούσαν να κατέχουν τόσον όγκο (από 800 έως και 5.000 κυβικά μέτρα), ώστε και πάλι να χρειάζονται «ειδική θεραπεία» για να γίνουν

Η πολύπλοκη δομή του ναού της Παναγίας Χαλκείων, ο οποίος ανοικοδομήθηκε κατά τον 10ο αιώνα, εξασφαλίζει και την εξαιρετική ακουστική του



Το τρισδιάστατο σύνθετο μοντέλο το οποίο σχεδιάστηκε για να μελετηθούν οι παράμετροι που επιδρούν στην ακουστική των ναών φέρει 5.024 επίπεδα



Ενσωματωμένο (με κόκκινο) πάνω στο σύνθετο μοντέλο απεικονίζεται το απλό μοντέλο, η έλλειψη πολυπλοκότητας του οποίου έχει συνέπειες στην ακουστική του

ένας χώρος ήταν απολύτως απλός (Shoebbox) με παράλληλες τις 6 πλευρές του. Ο άλλος χώρος όμως ήταν πολύ πιο σύνθετος, με κύβους όγκου 1 m³ να προστίθενται και να αφαιρούνται ώστε ο όγκος να παραμένει ίδιος αλλά να αυξάνεται κατά πολύ η συνολική επιφάνεια. Και οι δύο παραπάνω χώροι είχαν τον ίδιο όγκο, V_{tot}=3.168 m³. Για τη διερεύνηση των παραπάνω χώρων «τοποθετήθηκαν» 38 δέκτες σε τυχαιές θέσεις μέσα στον χώρο και σε απόσταση από τα όρια αυτού, άνω του 1,5 m. Ως συντελεστές απορρόφησης χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που προέκυψαν, μετά από στατιστική ανάλυση των χώρων της Αχειροποιίτου και της Παναγίας Χαλκείων, από τα δεδομένα μετρήσεων που είχαν ξεκινήσει να γίνονται από το 2008» εξήγησε ο κ. Καραμπατζάκης.

...και τα ευρήματά της

Όταν έγινε η γραφική παράσταση της σχέσης ανάμεσα στον χρόνο αντήχησης και στο εύρος συχνοτήτων από 125 έως 16 kHz, βρέθηκε ότι ενώ όλες οι παράμετροι (εκτός της συνολικής επιφάνειας; S_{tot}) παραμένουν σταθερές, στη μετάβαση από το απλό στο σύνθετο μοντέλο, ο χρόνος αντήχησης, που αυτό είναι και το επιθυμητό, μειώνεται δραματικά. Ταυτόχρονα από τα ακουστικά μοντέλα στην περίπτωση των υπό μελέτη ναών). «Για τις ανάγκες της έρευνας που έγινε σχεδιάστηκαν στον υπολογιστή δύο εικονικοί ορθογώνιοι χώροι με διαστάσεις 22X12X12 μέτρων, άρα συνολικού όγκου 3.168 κυβικών μέτρων. Ο

υλικά (βελτιωτικά της ακουστικής απόδοσης του κτίριου), πώς χώροι με όγκο από 800 έως 4.000 ή και 5.000 κυβικά μέτρα, κατασκευασμένοι κυρίως από πέτρα, σοβά, κεραμικά, χωρίς τη χρήση ηχοαπορροφητικών, διαμόρφωναν την αντήχηση τους σε επίπεδα αποδεκτά ακόμα και από σύγχρονες οδηγίες ακουστικής συμπεριφοράς όπως το DIN18041. Την ίδια στιγμή που άλλες μορφές (π.χ. Βασιλικές κ.λπ.) ακόμα και με χρήση περισσότερων απορροφητικών στοιχείων είναι μακριά από τα προσδοκώμενα.

Μετρήσεις και συγκρίνοντας

Οι πολυάριθμες μετρήσεις που είχε κάνει τα προηγούμενα χρόνια, από το 2008 μέχρι σήμερα στις εκκλησίες της πόλης, ήταν καιρός να συγκριθούν με αυτές που θα έδινε η προσομοίωση με τη χρήση ενός ιδανικά συμπεριφερόμενου κτιρίου από πλευράς όγκου. Δηλαδή ένα κτίριο που θα μπορούσε ο μελετητής να του αλλάξει όχι μόνο τον όγκο αλλά και τις αντίστοιχες πλευρικές επιφάνειες κατά βούληση. Προκειμένου λοιπόν να αναλυθούν βαθύτερα οι χώροι και τα ακουστικά τους αποτελέσματα, σχεδιάστηκαν τελικά δύο εικονικά μοντέλα, με τον ίδιο όγκο, αλλά με πολύ διαφορετική πολυπλοκότητα. Ένας απλός χώρος (simplex) και ένας σύνθετος (complex). Για την προσομοίωση του προβλήματος υπάρχει ένας γνωστός και γενικά αποδεκτός τύπος της ακουστικής επιστήμης για τον υπολογισμό

του χρόνου αντήχησης και απλοποιώντας τον με κάποιες ρεαλιστικές προσεγγίσεις προκύπτει ότι για να επηρεαστεί ο χρόνος αντήχησης του χώρου πρέπει να μεταβληθούν ο όγκος του χώρου, η συνολική επιφάνεια, η ηχοαπορροφητική ικανότητα. Είτε διαζευκτικά κάποια από αυτά είτε και όλα μαζί. Στην περίπτωση που αυξηθεί ο όγκος του χώρου, ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται, ενώ αντίθετα αν αυξηθεί ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης του χώρου ή η συνολική επιφάνεια απορρόφησης, ο χρόνος αντήχησης μειώνεται. Και είναι αυτό το τελευταίο που επιδιώκουμε.

Η μοντελοποίηση...

Στην περίπτωση της ναοδομίας (γενικά αλλά και στις περισσότερες περιπτώσεις) ο όγκος του χώρου είναι δεδομένος. Για την κατασκευή του σε υποθέσουμε ότι συντίθεται από ομοιογενή «σκληρά» υλικά, άρα με πολύ χαμηλό συντελεστή ηχοαπορρόφησης. Μόνη λύση για τη βελτίωση της αντήχησης του χώρου είναι η μεταβολή της συνολικής επιφάνειας αφού οι τιμές του όγκου του χώρου και της ηχοαπορρόφησης των υλικών παραμένουν σταθερές (ό,τι δηλαδή συμβαίνει στην περίπτωση των υπό μελέτη ναών). «Για τις ανάγκες της έρευνας που έγινε σχεδιάστηκαν στον υπολογιστή δύο εικονικοί ορθογώνιοι χώροι με διαστάσεις 22X12X12 μέτρων, άρα συνολικού όγκου 3.168 κυβικών μέτρων. Ο

ΜΙΚΡΟΣ ΟΔΗΓΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

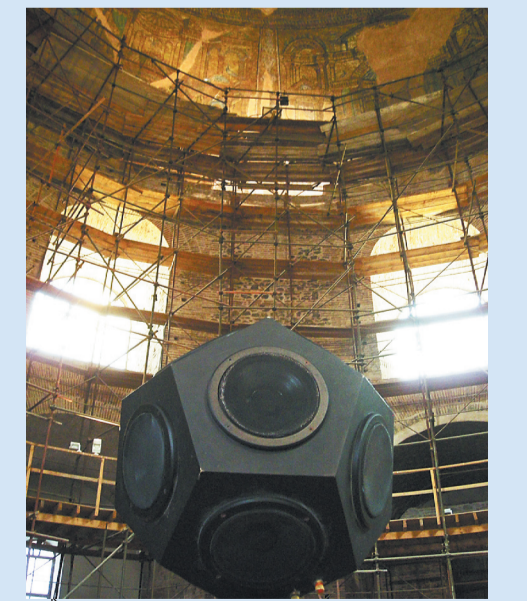
Οι μετρήσεις στους διάφορους ναούς της Θεσσαλονίκης έγιναν χρησιμοποιώντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη:

Χρόνος αντήχησης (RT: Reverberation Time): Είναι, ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης μέσα σε έναν χώρο κατά 60 dB (ντισσιπέλ), μετά τη διακοπή της λειτουργίας της ηχητικής πηγής που δημιουργεί την ηχητική πίεση.

Δείκτης διαύγειας C80 (σε dB): Είναι ο λογάριθμος του λόγου της ενέργειας που φτάνει σε ένα σημείο του χώρου κατά τα πρώτα 80 msec της παλμικής απόκρισης του χώρου μετά τον άμεσο ήχο, προς τη λοιπή ηχητική ενέργεια. Η διαύγεια αποτελεί κριτήριο ανάλογο με την ευκρίνεια, με τη διαφορά ότι το όριο για τη χρήση της πρώτης ενέργειας επεκτείνεται εδώ στα 80 msec, θεωρώντας ότι κάθε ανάκλαση που φτάνει στον ακροατή μέσα στο όριο αυτό προσθέτει στη διαύγεια του ήχου, ενώ η λοιπή ενέργεια, αν και χρήσιμη για άλλους λόγους, μειώνει τη διαύγεια.

Καταληπτότητα D50 (σε %): Είναι ο λόγος της ενέργειας που φτάνει σε ένα σημείο του χώρου κατά τα πρώτα 50 msec της παλμικής απόκρισης του χώρου μετά τον άμεσο ήχο, προς τη συνολική ενέργεια. Δεδομένου ότι τα 50 msec αντιστοιχούν σε διαδρομή ήχου 17 m, που αποτελεί το όριο για τη δημιουργία ηχού, το κριτήριο αυτό θεωρείται επαρκής δείκτης για την ευκρίνεια ενός χώρου που χαρακτηρίζει την άνεση της κατανόησης της ομιλίας.

MFP, μέση απόσταση ανάκλασης (Mean Free Path): Ορίζεται ως η μέση απόσταση που μια ηχητική «ακτίνα» μπορεί να διανύσει προτού συναντήσει κάποιο εμπόδιο. Μια προσεγγιστική τιμή δίδεται από τη σχέση MFP = 4(V/S), όπου V ο όγκος και S η επιφάνεια ενός κλειστού χώρου.



Η εγκατάσταση για τις μετρήσεις ακουστικής στη Ροτόντα το 2008