

Σύγκριση ακουστικών χαρακτηριστικών ορθόδοξων ναών.

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμήμα
Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Κοντομίχος Φώτης
Μεταδιδάκτορ / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
fotkon@upatras.gr

Χαράλαμπος Παπαδάκος
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμήμα
Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
papadakos@upatras.gr

Νικόλαος-Αλέξανδρος Τάτλας
Επίκ. Καθηγητής,
Τμ.Ηλεκτρονικών Μηχ. Τ.Ε.,
Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. / Θηβών
250 Αιγάλεω
ntatlas@teipir.gr

Στέλιος Μ. Ποτηράκης
Αν. Καθηγητής, Τμ.
Ηλεκτρονικών Μηχ. Τ.Ε.,
Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. / Θηβών
250 Αιγάλεω
spoti@teipir.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμήμα
Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αρχιτεκτονική των ναών της ορθόδοξης πίστης παρουσιάζει κάποιες βασικές ιδιαιτερότητες. Διαφορετικοί αρχιτεκτονικοί ρυθμοί, διαφορετικό μέγεθος και πολλές φορές διαφορετικά υλικά οικοδόμησης προσδίδουν στον χώρο διαφορετική ακουστική συμπεριφορά. Ναοί οι οποίοι κατασκευάστηκαν σε διαφορετικές ιστορικές περιόδους επίσης παρουσιάζουν ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον.

Σκοπός της εργασίας είναι να καταγράψει την ακουστική συμπεριφορά τέτοιων χώρων λατρείας που βασίζονται σε διαφορετικές σχεδιαστικές σχολές και να εξαγάγει κάποια συμπεράσματα για την διαφοροποίηση της ακουστικής συμπεριφοράς των χώρων αυτών με βάση τον αρχιτεκτονικό ρυθμό, το μέγεθος του χώρου και τα υλικά κατασκευής.

Για τις ανάγκες της εργασίας έχει καταγραφεί η ακουστική του ναού του Αγ. Ανδρέα Πατρών που ακολουθεί τον ρυθμό της βασιλικής με τρούλο και του ναού της Κοίμησης της Θεοτόκου της Κομοτηνής που είναι δείγμα των εκκλησιών της μεταβυζαντινής περιόδου με χαμηλό προφίλ, ρυθμό τρίκλιτης βασιλικής με νάρθηκα και βασικό υλικό κατασκευής το ξύλο. Πέρα από την ανάλυση των μετρήσεων δημιουργήθηκε και μία βάση δεδομένων εικονικών ακροάσεων βυζαντινών ψαλμών που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα ακρόασης που εξετάζουν το κατά πόσο η διαφορετική ακουστική συμπεριφορά των χώρων είναι αντιληπτή και αναγνωρίσιμη.

Acoustic Parameters comparison of Orthodox Churches

ABSTRACT

The structure and geometry of Orthodox churches follows different stylistic architectural characteristics and such churches also vary in size and surface materials, often due to their construction during different historic periods. As a result, such variations result to significant differences in acoustic properties. This paper attempts to quantify such differences by examining the characteristic examples of two churches with different architectural styles: the Basilica with dome and the three-aisle Basilica with antetemple.

The work presents comparative results of acoustic measurements carried out in these churches, together with subjective listener tests based on auralisation of anechoic psalm material with binaurally recorded impulse responses of the churches. A generic orthodox church was also simulated in a computer application and was used as reference for both objective and subjective results.

1. Εισαγωγή

Στην πρόωμη αυτή η μελέτη εξετάζεται η ακουστική δύο αρχιτεκτονικά ετερόκλιτων ορθόδοξων ναών, του Αγίου Ανδρέα Πατρών και του ναού κοιμήσεως της Θεοτόκου στην Κομοτηνή [7,2].

Επιπλέον, με την παρούσα εργασία διευρύνεται και επαληθεύεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων προηγούμενης έρευνας των συγγραφέων [1] η οποία βασιζόταν αποκλειστικά στη χρήση γενικευμένου προτύπου (generic) υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της ακουστικής των ιερών ορθόδοξων ναών. Στην παρούσα εργασία οι ακουστικές παράμετροι υπολογίζονται τόσο από πολλαπλές μετρήσεις όσο και από η εικονική ακρόαση ψαλμών με τη χρήση μετρημένων αμφιωτικών κρουστικών αποκρίσεων των χώρων. Οι ακροάσεις αυτές αξιοποιούνται σε πείραμα ακρόασης για την αξιολόγηση των αντιληπτικά και υποκειμενικά αποδεκτών ακουστικών χαρακτηριστικών των ναών αυτών, σε σύγκριση μάλιστα και με αντίστοιχες ακροάσεις που προκύπτουν από την υπολογιστική εξομοίωση του προτύπου (generic) ναού.

2. Χαρακτηριστικά των ναών

(α) Ο ιερός ναός του Α. Ανδρέα Πατρών είναι ορθόδοξη εκκλησία που βρίσκεται στην ανατολική παραλιακή ζώνη της Πάτρας. Είναι ρυθμού βυζαντινής βασιλικής και η ανέγερση του έγινε τα έτη 1908-1974. Το εμβαδό της επιφάνειάς του είναι περίπου 1800m² και μπορεί να φιλοξενήσει 7.000 πιστούς (4 άτομα/ m²). Είναι η μεγαλύτερη εκκλησία στην Ελλάδα και η τρίτη μεγαλύτερη βυζαντινού ρυθμού στα Βαλκάνια, μετά τον Καθεδρικό Ναό του Αγίου Σάββα στο Βελιγράδι και τον Καθεδρικό Ναό Αλεξάντρ Νέφσκυ στη Σόφια [7].

(β) Ο Ιερός Μητροπολιτικός Ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου Κομοτηνής είναι ορθόδοξη εκκλησία που βρίσκεται στο εσωτερικό του φρουρίου της ομώνυμης πόλης και ανεγέρθηκε το 1800. Ο ναός είναι τρίκλιτος με νάρθηκα, ξυλόστεγος και το δάπεδο του βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό του γύρω χώρου. Στη

σημερινή του μορφή, είναι αναστηλωμένος και έχει κηρυχθεί ιστορικό διατηρητέο μνημείο [2].

(γ) Το γενικευμένο πρότυπο (generic model) ορθόδοξου ναού βασιλικής με τρούλο, αναπτύχθηκε στο CATT-Acoustics και έχει μεταβλητές γεωμετρικές παραμέτρους όγκου και υλικών [1,6].

3. Διαδικασία μετρήσεων

Σε όλες τις περιπτώσεις, η θέση ηχητικής πηγής (αυτοενισχυόμενο ηχείο με ευρεία απόκριση συχνότητας και ονομαστική ισχύ 650watt) τοποθετήθηκε στο κέντρο μπροστά από το ιερό, θέση από την οποία ψέλνει ο ιερέας. Πάρθηκαν μετρήσεις σε τέσσερις θέσεις που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του κεντρικού χώρου όπως και μία μέτρηση κάτω από το γυναικωνίτη. Στο Σχ. 1(α) παρουσιάζεται η κάτοψη του ναού του Αγίου Ανδρέα Πατρών με της θέσεις πηγής και δεκτών. Το ύψος τοποθέτησης των μικροφώνων είναι ίσο με 1.2m που αντιπροσωπεύει το ύψος καθήμενου ακροατή.

Στην περίπτωση του Ιερού ναού Κοιμήσεως της Θεοτόκου Κομοτηνής, οι θέσεις των μικροφώνων φαίνονται στο Σχ.1(β) Το ύψος τοποθέτησης των μικροφώνων αντιστοιχεί στο ύψος καθιστών ακροατών 1.2m.

Στις παραπάνω θέσεις μετρήθηκαν 2 κατηγορίες αποκρίσεων: (α) μονοκαναλικές-,κρουστικές αποκρίσεις με χρήση παντοκατευθυντικού μετρητικού μικροφώνου DPA 4000, (β) δικάναλες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις με χρήση μετρητικού ανδρικού KEMAR της εταιρίας G.R.A.S..

Ύστερα από τη διεξαγωγή των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η επεξεργασία των αρχείων που προέκυψαν, προκειμένου να είναι κατάλληλα για τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων, αλλά και για την παραγωγή των αντίστοιχων αρχείων για τις εικονικές ακροάσεις. Έτσι, η αρχική καθυστέρηση εμφάνισης του απευθείας σήματος αποκόπτεται και υιοθετείται σταθερή αρχική καθυστέρηση για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων. Ακολούθως, οι κρουστικές αποκρίσεις κανονικοποιούνται και τέλος εφαρμόζεται παράθυρο για τον περιορισμό της χρονικής τους διάρκειας υιοθετώντας ίδια διάρκεια για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων.

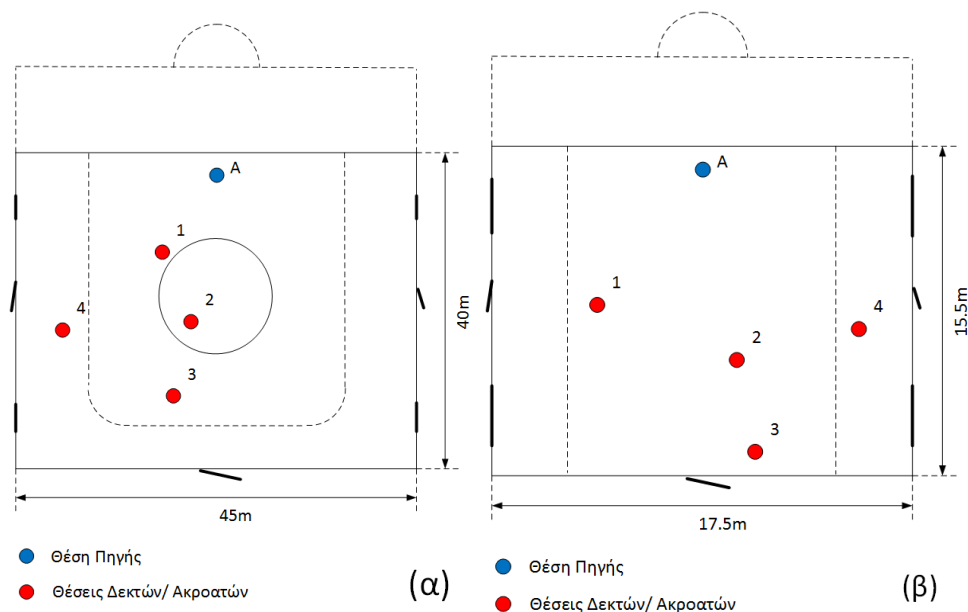
4. Αποτελέσματα

4.1 Ακουστικές παράμετροι

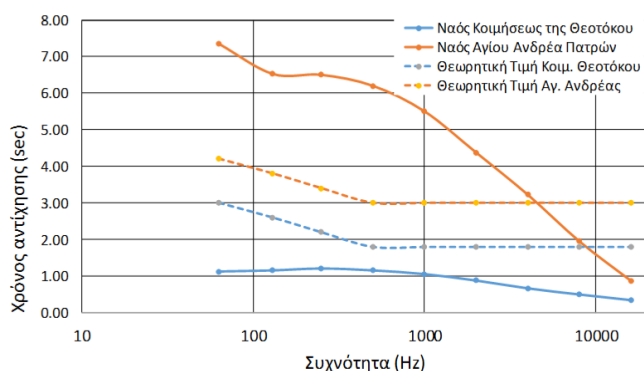
Για τους χώρους που μελετήθηκαν και με βάση τις μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτούς, υπολογίστηκαν οι παρακάτω αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι:

- Χρόνος αντήχησης (Reverberation Time, RT)
- Ακουστική ευκρίνεια (Clarity, C50)
- Δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index, STI)

Οι μέσες τιμές Χρόνου Αντήχησης για όλες τις μετρημένες θέσεις στους 2 ναούς, δίνονται στο Σχήμα 2. Στο ίδιο σχήμα παρατίθενται και οι ιδανικές μορφές της συνάρτησης RT-συχνότητας όπως προτείνονται για λατρευτική χρήση (ναούς), αντίστοιχου όγκου με τις 2 περιπτώσεις ναών που εξετάστηκαν [3].



Σχήμα 1. Κατόψεις των δύο ιερών ναών και θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. (α) Άγιος Ανδρέας Πατρών. (β) Κοίμηση της Θεοτόκου Κομοτηνής.



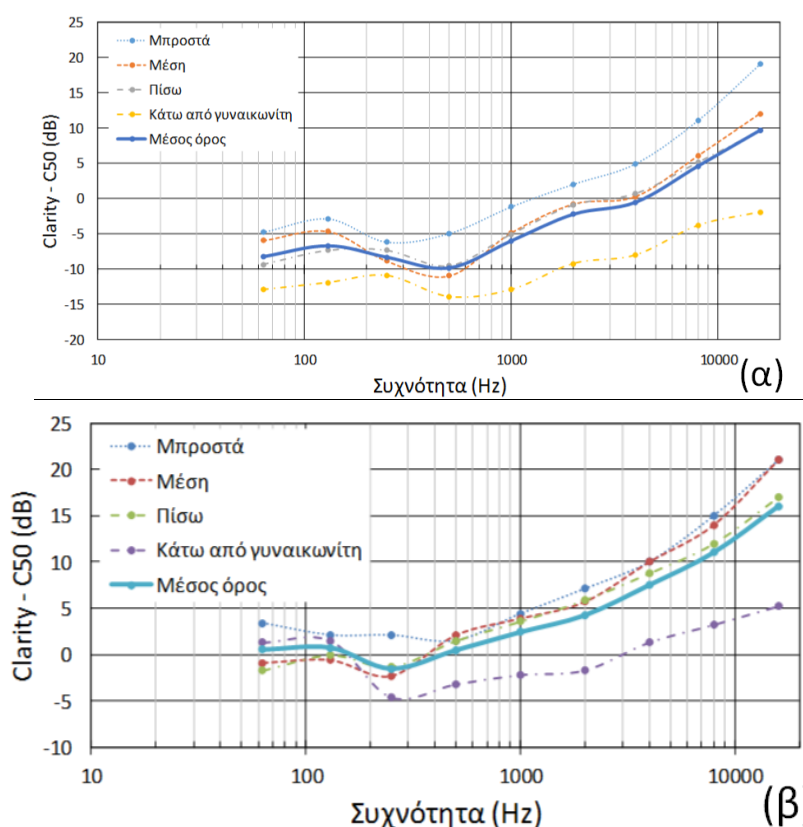
Σχήμα 2. Χρόνος Αντίληψης ανά συχνότητα για τους 2 ναούς και ιδανικές τιμές για ναούς με αντίστοιχο όγκο.

4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μετρήσεων

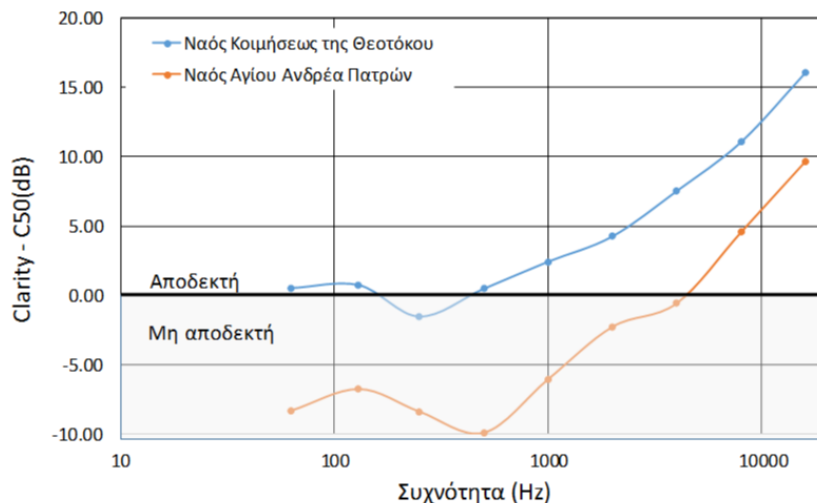
Από την παραπάνω σύγκριση φαίνεται ότι και οι δύο ναοί εμφανίζουν Χρόνο Αντίληψης που δε συμπίπτει με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή για λατρευτικούς χώρους αντίστοιχου όγκου [3], δεδομένα που βεβαίως αφορούν μη-ορθόδοξους ναούς. Ο ναός του Αγίου Ανδρέα παρουσιάζει σχεδόν διπλάσιο χρόνο αντίληψης από τον θεωρητικά αναμενόμενο, ενώ ο ναός Κοιμήσεως τη Θεοτόκου παρουσιάζει μικρότερο χρόνο αντίληψης από τον αναμενόμενο. Και στις 2 περιπτώσεις, η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις επιφάνειες

και στα επιμέρους αρχιτεκτονικά στοιχεία: για τον ναό Αγ. Ανδρέα, τα υλικά είναι εξαιρετικά ανακλαστικά, ενώ για την εξαιρετικά υψηλή τιμή RT σε χαμηλές συχνότητες, επιδρά ο όγκος και το μέγεθος του τρούλου. Ο ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου περιέχει εσωτερικά ασυνήθιστα και απορροφητικά υλικά όπως το ξύλο.

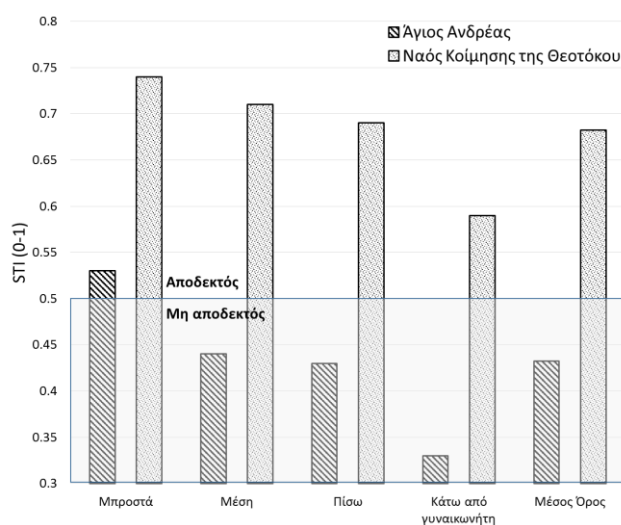
Με δεδομένη την εξαιρετικά υψηλή αντήχηση, για το ναό του Αγ. Ανδρέα, η ευκρίνεια είναι μη αποδεκτή στις κρίσιμες μπάντες συχνοτήτων για την ομιλία (500 - 4.000Hz) ενώ στο ναό κοιμήσεως της Θεοτόκου, όπου η αντήχηση είναι χαμηλή, ο δείκτης αυτός παρουσιάζει αποδεκτές τιμές. Είναι λοιπόν αναμενόμενο, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα στο Σχ.4, ότι ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας παρουσιάζει μη αποδεκτή τιμή στην περίπτωση του Αγίου Ανδρέα και αποδεκτή τιμή στην περίπτωση του ναού κοιμήσεως της Θεοτόκου. Παρατηρώντας τις μετρήσεις για κάθε χώρο είναι επίσης προφανές, ότι οι μπροστινές θέσεις παρουσιάζουν την καλύτερη καταληπτότητα που είναι και αποδεκτή, ενώ στις μεσαίες και πίσω θέσεις η καταληπτότητα μειώνεται και γίνεται μη αποδεκτή για την περίπτωση του ναού του Αγ. Ανδρέα. Τέλος, οι χειρότερες θέσεις ως προς την καταληπτότητα βρίσκονται κάτω από το μπαλκόνι του γυναικωνίτη.



Σχήμα 3. Ευκρίνεια σε διαφορετικές θέσεις: (α) I.N. Αγίου Ανδρέα, (β) I.N. Κοιμήσεως Θεοτόκου.



Σχήμα 4. Σύγκριση ακουστικής ευκρίνειας για τους δύο ναούς.



Σχήμα 5. Σύγκριση του δείκτη μετάδοσης ομιλίας στις αντίστοιχες θέσεις ανάμεσα στους δύο ναούς.

4.3 Πειράματα ακρόασης

Το πείραμα ακρόασης υλοποιήθηκε με εικονικές ακροάσεις που προέκυψαν από μετρημένες και προσομοιωμένες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις των ναών μετά από συνέλιξη με τα 30 πρώτα δευτερόλεπτα ανηχοϊκών ηχογραφήσεων από τις βάσεις δεδομένων της εργασίας CAHRISMA [5] και DAMASKINOS [4]. Το πείραμα έχει ως σκοπό να εξετάσει την υποκειμενική προτίμηση του κοινού όσον αφορά την ακρόαση ψαλμών. Το τεστ είναι τύπου AB, οι ακροατές ακούνε ψαλμούς σε

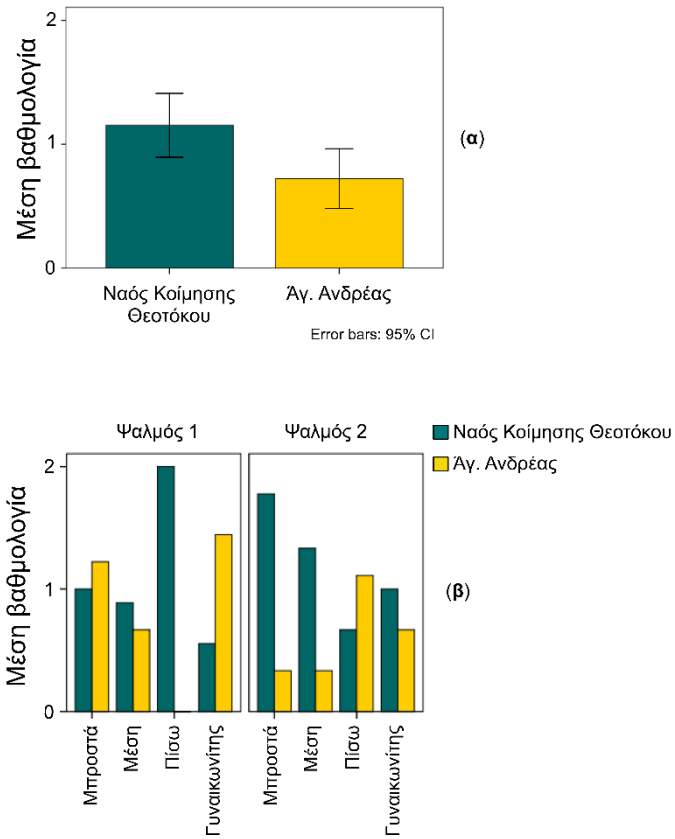
αντίστοιχες θέσεις των δύο ναών με τη διαφορετική αντήχηση και βαθμολογούν κατά την υποκειμενική τους εκτίμηση – προτίμηση. Στο τεστ πήραν μέρος 10 μη ειδικοί ακροατές, οι οποίοι όμως έχουν συμμετάσχει και άλλες φορές σε παρόμοια τεστ. Σε κάθε ερώτημα ο ακροατής ακούει τον ίδιο ύμνο στην αντίστοιχη θέση στον πρώτο και στο δεύτερο ναό και ψηφίζει ποιο άκουσμα από τα δύο του αρέσει περισσότερο δίνοντας βαθμολογώντας ποσοτικά την προτίμηση του. Σε ένα δεύτερο σκέλος του πειράματος, ο ακροατής συγκρίνει τους ίδιους ψαλμούς σε αντίστοιχες θέσεις του Ναού του Αγίου Ανδρέα και του πρότυπου μοντέλου (generic model), όπως έχει προκύψει από την εξομοίωση σε υπολογιστή ναού με παρόμοιο όγκο, ψηφίζοντας αντίστοιχα ποιο άκουσμα από τα δύο προτιμάει.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Σε αυτή την ανάλυση ο παράγοντας p (p -factor) για $p < 0.05$, δείχνει αν η μεταβλητή που εξετάζεται προκύπτει ότι είναι σημαντική στην υποκειμενική κρίση των ακροατών. Με δεδομένο ότι δείκτης p της στατιστικής ανάλυσης παίρνει τιμή $p = 0.011$ σε σχέση με το συγκεκριμένο ναό, στο Σχ. 6(α) παρουσιάζεται η μέση βαθμολογία προτίμησης του ενός έναντι του άλλου ναού. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, οι ακροατές προτιμούν το ναό Κοιμήσεως της Θεοτόκου, ο οποίος παρουσιάζει μικρότερη αντήχηση και καλύτερη καταληπτότητα. Με δεδομένο ότι το είδος του ψαλμού φαίνεται ως στατιστικά ισχυρά σημαντική παράμετρος ($p = 0.000$), στο Σχ.6(β) παρουσιάζεται η προτίμηση των δύο ψαλμών στις αντίστοιχες θέσεις των ναών. Παρατηρείται η συμπληρωματικότητα των απαντήσεων, καθώς ο κάθε ναός παρουσιάζεται κατάλληλος για ένα από τα δύο είδη ψαλμού.

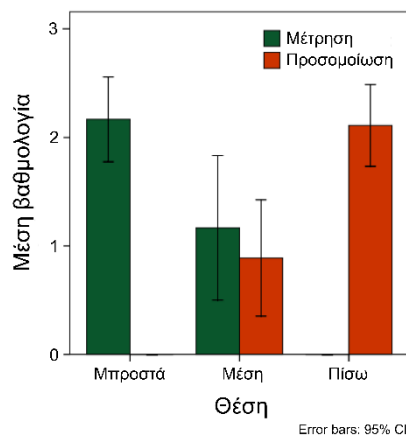
Στο δεύτερο μέρος του τεστ εξετάστηκε η προτίμηση των ακροατών ανάμεσα σε ηχητικά δείγματα που παρήχθησαν από μετρημένες και προσομοιωμένες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις αντίστοιχων θέσεων στο ναό του Αγίου Ανδρέα και στο γενικευμένο μοντέλο ναού αντίστοιχων διαστάσεων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 7 στις προστινές και μεσαίες θέσεις οι ακροατές εμφανίζουν σημαντική προτίμηση ως προς τις μετρήσεις στον Αγ. Ανδρέα σε σχέση με τις προσομοιώσεις, ενώ στις πίσω θέσεις εμφανίζεται προτίμηση ως προς την εξομοίωση, με δεδομένο ότι για τη θέση αυτή δεν παρουσιάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό η επίδραση της υψηλής αντήχησης του πραγματικού ναού.

5. Συμπεράσματα

Από τη μελέτη αυτή, διαφαίνεται ότι η ακουστική των ορθόδοξων ναών, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αρχιτεκτονική μορφή, τη γεωμετρία και τα υλικά των χώρων αυτών. Ο ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου, που κατά τη συγκεκριμένη μέτρηση είχε μοκέτα στο πάτωμα και μικρό όγκο, παρουσιάζει μεγαλύτερη ηχοαπορρόφηση και τελικά μικρότερο χρόνο αντήχησης από το προβλεπόμενο, με αποτέλεσμα η καταληπτότητα και ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας να παρουσιάζουν αποδεκτές τιμές. Σε σχέση με την υποκειμενική αποδοχή και προτίμηση που αφορά την ακουστική των ναών, τα αποτελέσματα του τεστ ακρόασης δείχνουν μεν κάποιες τάσεις, αλλά δεν μπορούν να οδηγήσουν σε γενικευμένα συμπεράσματα, κάτι που θα προκύψει εν δυνάμει από την εξέταση περισσότερων ναών. Επιπλέον, διαφαίνεται ότι το είδος του ψαλμού,



Σχήμα 6. (α) Μέση προτίμηση του ενός έναντι του άλλου ναού (β) συσχέτιση του κάθε ψαλμού με τη θέση σε κάθε ναό.



Σχήμα 7. Η μέση βαθμολογία της μέτρησης έναντι της προσομοίωσης.

είναι συσχετισμένο με την προτίμηση της ακουστικής και επιπλέον είναι εμφανές ότι η υπερβολική συνεισφορά του αντηχητικού πεδίου όπως π.χ. για τις απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης, οδηγεί σε αρνητική υποκειμενική αντίληψη για τη συνεισφορά της ακουστικής του ναού.

6. Ευχαριστίες

“The research leading to these results has received funding from the [EEA] Mechanism 2009-2014 under Project Contract n° [3768].

7. Βιβλιογραφία

[1] John Mourjopoulos, Charalambos Papadakos, Gavriil Kamaris, Georgios Chryssochoidis, Georgios Kouroupetroglou, ‘Optimal Acoustic Reverberation Evaluation of Byzantine Chanting in Churches’, 40th International Computer Music Conference joint with the 11th Sound and Music Computing Conference, At Athens, Greece, Volume: II, pp. 941-947

[2] Τριάρχη Φ. Ο νομός Ροδόπης χθες και σήμερα, Αρχείο Θράκης, τομ. 39ος, 1976.

[3] L. Beranek – Acoustics. Acoustical Society of America. NY (1996).

[4] Δ.Δελβηγιώτης, Γ. Κουρουπέτρογλου, «DAMASKINOS: The prototype corpus of Greek Orthodox ecclesiastical chant voices”, Proc. Of the International Conference “Crossroads Greece as an Intercultural Pole of Musical Thought and Creativity”, Thessaloniki, Greece, June 6-10 2011, pp. 289-302.

[5] CAHRISMA project acustica.ing.unife.it

[6] CATT-Acoustics. www.catt.se

[7] Κώστας Τριανταφύλλου, «Ο νέος μεγάλος ναός στην Πάτρα του Πολιούχου της Αγίου Ανδρέα», Πελοποννησιακή Πρωτοχρονιά, τ. ΣΤ' (1962), σελ. 306-309.