

Διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ιερού Ναού Παναγίας Καπνικαρέας

Γιώργος Γουβιανάκης, Ασπασία Κόκκαλη, Πηνελόπη-Μαρία Πιερρουτσάκου,
Αρετή Ανδρεοπούλου*

Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)

Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

*a.andreopoulou@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ακουστική ανάλυση του Ιερού Ναού Παναγίας Καπνικαρέας, με σκοπό την καταγραφή και διατήρηση του ακουστικού του αποτυπώματος. Η διαδικασία βασίστηκε σε επιτόπιες ακουστικές και φυσικές μετρήσεις καθώς και στη χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic για την ανάπτυξη ενός πλήρως βαθμονομημένου ακουστικού μοντέλου του χώρου. Βάσει προκαταρκτικών αναλύσεων, προσδιορίστηκαν τα ακουστικά χαρακτηριστικά του Ναού σε δύο συνθήκες πληρότητας (0% και 100%), με τα αποτελέσματα να συνάδουν με τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές. Μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνουν περαιτέρω μετρήσεις για την ακριβέστερη βαθμονόμηση του συστήματος και για την ενσωμάτωση στοιχείων θορύβου περιβάλλοντος.

On the investigation of the acoustic characteristics of the Greek Orthodox church of Panagia Kapnikarea

ABSTRACT

This study explores the acoustic properties of the Orthodox Church of Panagia Kapnikarea, in order to record and digitally preserve its unique acoustic profile. The research combines in-situ acoustic measurements with CATT-Acoustic modeling to develop a fully calibrated model of the space. Preliminary analyses revealed the acoustic characteristics of the Church under two occupancy conditions (0% and 100%), with results aligning closely with the existing literature. Future steps will involve more comprehensive in-situ acoustic measurements as a way to enhance model accuracy, as well as the integration of environmental noise parameters to refine the understanding of the church's acoustic profile.

Εισαγωγή

Η μελέτη της ακουστικής χώρων ενδιαφέροντος όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση κόσμου, όπως θέατρα και χώροι λατρείας, είναι μείζονος σημασίας προκειμένου αφενός να κατανοηθεί ο αντίκτυπος συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών επιλογών στην ακουστική τους, αφετέρου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή ακουστική εμπειρία για τους ακροατές. Τέτοιες μελέτες υλοποιούνται είτε μέσω ακουστικών μετρήσεων και αναλύσεων [3] είτε συνδυάζοντας τη μέθοδο αυτή με ακουστικές προσομοιώσεις [1, 4, 2].

Η ανάλυση της ακουστικής εκκλησιών και καθεδρικών ναών έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνών. Στον ελλαδικό χώρο, ωστόσο, οι μελέτες ακουστικών χαρακτηριστικών ελληνορθόδοξων και βυζαντινών ναών είναι αρκετά περιορισμένες. Από τις πιο πρόσφατες είναι η [7] κατά την οποία μετρήθηκαν τα ακουστικά χαρακτηριστικά οκτώ βυζαντινών εκκλησιών της Θεσσαλονίκης με σκοπό τη διερεύνηση του θεμελιώδους ρόλου που διαδραματίζει ο ήχος στον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον χώρο καθώς και η ηχητική διέγερση των ιερών σε εκκλησίες που χτίστηκαν σε διαφορετικές περιόδους, ακολουθώντας διαφορετικά σχέδια. Επιπλέον, μελέτες με υπολογιστικές ακουστικές προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί τόσο σε Καθεδρικούς [13] όσο και Ορθόδοξες εκκλησίες, με πιο γνωστό παράδειγμα, την ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και για διάφορες χρήσεις του Ναού [15, 9] ανά τους αιώνες.

Οι μελέτες αυτές βασίζονται σε ακουστικά βαθμονομημένα μοντέλα, τα οποία προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια και αποτυπώνουν στον μέγιστο δυνατό βαθμό τα ακουστικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες των χώρων που εξετάζουν. Μέσω τέτοιων μοντέλων αναδεικνύεται ο αντίκτυπος των ιδιαίτερων αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών και των αρχιτεκτονικών τροποποιήσεων στην ακουστική, καθιστώντας έτσι εφικτή τόσο την αντικειμενική όσο και την υποκειμενική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των χώρων αυτών, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη ακουστική εμπειρία του εκάστοτε ακροατή [1]. Τα εργαλεία ακουστικών προσομοιώσεων επιτρέπουν επίσης την εικονική αναπαράσταση των ακουστικών χαρακτηριστικών χώρων ενδιαφέροντος τόσο στην τωρινή τους κατάσταση, όσο και σε παρελθοντικές και πιθανές μελλοντικές τους καταστάσεις, αφενός διατηρώντας αναλλοίωτο το ακουστικό τους αποτύπωμα, αφετέρου προβλέποντας τον αντίκτυπο πολυάριθμων χωρικών μεταμορφώσεων τους στον χρόνο [2].

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην καταγραφή και στην ανάδειξη των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, με σκοπό τη συστηματική μελέτη και την ψηφιακή διατήρηση του ακουστικού του αποτυπώματος. Η ακουστική μελέτη υλοποιήθηκε στο λογισμικό CATT-Acoustic, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία [13] και βασίστηκε σε επιτόπιες ακουστικές και φυσικές μετρήσεις χώρου.

1 Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας

Ο Ι.Ν. των Εισοδίων της Θεοτόκου, ή αλλιώς Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας όπως είναι ευρέως γνωστός στις μέρες μας, βρίσκεται στην οδό Ερμού στο κέντρο της

Αθήνας. Είναι ένας από τους καλύτερα σωζόμενους βυζαντινούς ναούς, ο οποίος από το 1934 βρίσκεται στην κυριότητα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Αποτελείται από τρεις επιμέρους κτιριακές δομές, οι οποίες ανεγέρθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ο αρχικός ναός οικοδομήθηκε περί τα 1050 μ.Χ. σε ρυθμό τετρακίονιο σταυροειδή εγγεγραμμένο με τρούλο Αθηναϊκού τύπου. Στο εσωτερικό του ναού έχουν ενσωματωθεί στοιχεία όπως αρχαίοι κίονες και αρχαία και παλαιοχριστιανικά γλυπτά, καθώς έχει χτιστεί πάνω στα θεμέλια αρχαιοελληνικού ναού. Το Ιερό Βήμα έχει τριμερή μορφή με δύο παραβήματα εκατέρωθεν του κεντρικού. Λίγο μετά την οικοδόμηση του κυρίως ναού προστέθηκε στη βόρεια πλευρά το Παρεκκλήσιο της Αγίας Βαρβάρας. Στη δυτική πλευρά κατά μήκος των δύο ναών, υπήρχε ανοιχτή στοά η οποία κλείστηκε και μετατράπηκε σε εξωνάρθηκα, όταν ο ναός περιήλθε στην κυριότητα του Πανεπιστημίου. Με το πέρασμα των χρόνων οι παραπάνω τρεις ανεξάρτητοι λειτουργικά χώροι ενοποιήθηκαν, δημιουργώντας έναν ενιαίο με ιδιόμορφα αρχιτεκτονικά στοιχεία, τα οποία ευθύνονται για τα ιδιαίτερα ακουστικά χαρακτηριστικά του.

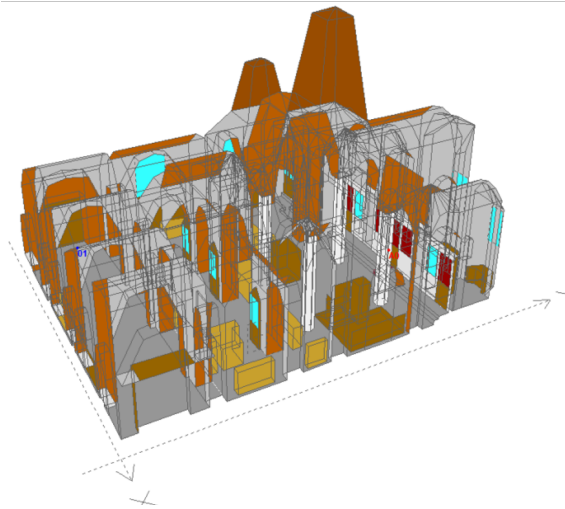


Εικόνα 1.1 I.N. Εισοδίων της Θεοτόκου, Αθήνα

Τέσσερις αρχαίοι κίονες με παλαιοχριστιανικά κιονόκρανα διακοσμούν το εσωτερικό του ναού, οι οποίοι στηρίζουν τον τρούλο και τις αψίδες του. Διάφορες περίπλοκες δομές όπως τρούλοι, ημικυκλικές κόγχες που σχηματίζονται στους τοίχους εντός του Ιερού Βήματος, καμάρες και αψίδες σε διάφορα σημεία εντός του χώρου συμπληρώνουν την εικόνα ενός περίτεχνου αρχιτεκτονικά κτίσματος και συμβάλλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση των ακουστικών χαρακτηριστικών του. Ο κυρίως ναός διαθέτει μαρμάρινο τέμπλο το οποίο μάλλον μιμείται το αντίστοιχο που κοσμούσε τον ναό στα βυζαντινά χρόνια, ενώ το παρεκκλήσι της Αγίας Βαρβάρας ξύλινο. Το κτίσμα συνολικά είναι πλήρως τοιχογραφημένο. Οι αγιογραφίες που κοσμούν το εσωτερικό του ακολουθούν κατά κύριο λόγο την βυζαντινή τεχνοτροπία με εξαίρεση τον εξωνάρθηκα οι αγιογραφίες του οποίου αποτελούν έργο αγνώστου καλλιτέχνη και ακολουθούν περισσότερο το στυλ μιας δυτικής τεχνοτροπίας.

2 Δημιουργία και Βαθμονόμηση Μοντέλου Γεωμετρικής Ακουστικής

Ελλείπει λεπτομερών σχεδίων κάτοψης και τομών, η δημιουργία του μοντέλου γεωμετρικής ακουστικής (GA) του Ιερού Ναού στο λογισμικό CATT-Acoustic βασίστηκε σε επιτόπιες λεπτομερείς μετρήσεις του χώρου, φωτογραφίες, και παλαιά σχέδια που ήταν διαθέσιμα στο αρχείο του πανεπιστημίου. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας, ο χώρος χωρίστηκε σε τέσσερις επιμέρους ζώνες: εξωνάρθηκας, παρεκκλήσι Αγίας Βαρβάρας, κυρίως Ναός και Ιερά. Η κάθε ζώνη μοντελοποιήθηκε ξεχωριστά, και σταδιακά ενώθηκαν σε ένα ενιαίο κτίσμα, δημιουργώντας την ιδιαίτερη και χαρακτηριστική γεωμετρία του χώρου. Υπολογίζοντας όλες τις επιμέρους ζώνες, το μέγεθος του κτίσματος είναι 2.660 m^3 , με μέγιστες διαστάσεις L: 16.56 m, W: 13.8 m, H: 11.64 m. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ μιας ακριβούς ακουστικής μοντελοποίησης του χώρου και μιας ρεαλιστικής υπολογιστικής απόδοσής του, αποφεύχθηκε η δημιουργία μιας υπερβολικά λεπτομερούς γεωμετρικής αναπαράστασης του Ναού. Διατηρήθηκαν, ωστόσο, κατά το δυνατόν οι κύριες αρχιτεκτονικές δομές του χώρου, ακολουθώντας τις διαδικασίες μοντελοποίησης που περιγράφονται στο [13]. Ως εκ τούτου, το απλοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο που προέκυψε αποτελείται συνολικά από 990 επίπεδα (planes), τα οποία καλύπτονται από 11 διαφορετικά υλικά και έχουν ταυτοποιηθεί ως τα συνηθέστερα σε λατρευτικούς χώρους [9] (βλ. Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής του Ναού

Η μοντελοποίηση συνοδεύτηκε από σειρά ακουστικών μετρήσεων εντός του Ναού. Ως σήμα διέγερσης, χρησιμοποιήθηκε λογαριθμικό sine-sweep, διάρκειας 5 δευτερολέπτων και συχνοτικού εύρους 200 Hz - 5000 Hz. Για τη διεξαγωγή των ακουστικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα πολυεδρικό ηχείο Briel & kjaer 4296 και ένα μετρητικό μικρόφωνο MM1 t.bone. Επιλέχθηκαν δύο θέσεις εκπομπής για την ηχητική πηγή, μία μπροστά και μία πίσω από το τέμπλο του κυρίως ναού, αντιπροσωπεύοντας τις κύριες θέσεις του Ιερέα κατά τη διάρκεια της Θείας Λειτουργίας, καθώς και 17 θέσεις δεκτών καταναμημένες ομοιόμορφα στον χώρο. Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν τόσο για το ιδιαίτερο ακουστικό ενδιαφέρον που

παρουσιάζουν όσο και επειδή αποτελούν ρεαλιστικές θέσεις ακρόασης εντός του Ναού. Οι κρουστικές αποκρίσεις καταγράφηκαν στο περιβάλλον Matlab με χρήση του εργαλείου ScanIR [5]. Οι εν λόγω ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου αφενός να καταστεί εφικτή η βαθμονόμηση του γεωμετρικού μοντέλου για περαιτέρω μελέτες και ακουστικές προσομοιώσεις και αφετέρου να καταστεί δυνατή η σύγκριση των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου με εκείνα άλλων ναών που έχουν μελετηθεί αποκλειστικά βάσει ακουστικών μετρήσεων [7].



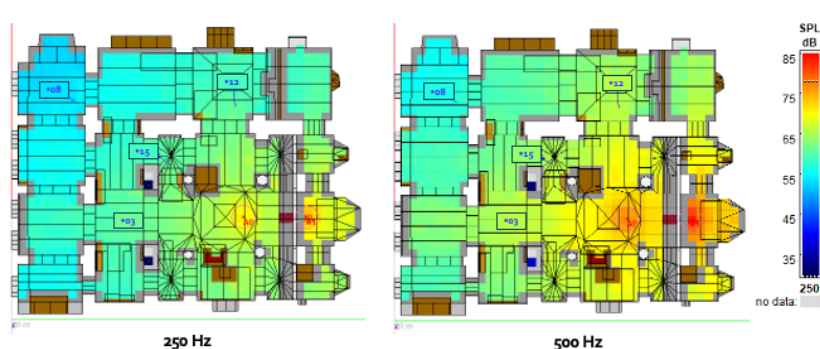
Εικόνα 2.2 (αριστερά) Ηχομετρήσεις στο εσωτερικό του Ναού (δεξιά) Κάτοψη του Ναού όπου φαίνονται οι 2 θέσεις ηχητικής διέγερσης (A0 και A1) και οι 17 θέσεις ηχομέτρησης

Το μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής βαθμονομήθηκε συγκρίνοντας τα προσομοιωμένα ακουστικά χαρακτηριστικά με τις φυσικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο. Στόχος ήταν να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των ακουστικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων, διασφαλίζοντας έτσι ότι η προσομοίωση μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικές παρατηρήσεις και αποτελέσματα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην μεθοδολογική προσέγγιση των Postma et. al [13], και περιελάμβανε τη σταδιακή προσαρμογή των συντελεστών απορρόφησης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, βάσει της βιβλιογραφίας [10, 9] έως ότου να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων για βασικές ακουστικές παραμέτρους.

3 Ακουστική Ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε, η δημιουργία του ακουστικά βαθμονομημένου μοντέλου του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας στο λογισμικό CATT-Acoustic επιτρέπει πλέον την αναλυτική και εις βάθος μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου, ακόμα

και σε καταστάσεις πέραν εκείνων των επιτόπιων ηχομετρήσεων. Το παρόν κείμενο, χάρη συντομίας, θα παρουσιάσει προκαταρκτικές αναλύσεις των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ναού σε 2 ακραίες καταστάσεις πληρότητας: α) 0% (άδειος ναός) και β) 100% (πλήρως γεμάτος ναός) σύμφωνα με τον Vorländer [14], επιτρέποντας με τον τρόπο αυτόν και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα άλλων δημοσιευμένων πηγών [15]. Η ανάλυση εστιάζει σε 2 θέσεις διέγερσης (A0 και A1) εμπρός και πίσω από την Ωραία Πύλη του κεντρικού Ναού και 4 θέσεις ακρόασης εντός του Ναού (03, 08, 12, και 15), οι οποίες επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές καθώς βρίσκονται είτε σε μονοπάτι απευθείας ήχου από την πηγή, είτε σε ηχητική σκιά (βλ. Εικόνα 2.2) .



Εικόνα 3.1 Κατανομή ηχητικής ενέργειας εντός του Ναού στις οκταβικές συχνотικές ζώνες των 250 Hz και 500 Hz

3.1 Κατανομή ηχητικής ενέργειας

Στην Εικόνα 4.1 αποτυπώνεται η κατανομή της ηχητικής ενέργειας (dB SPL) στο εσωτερικό του Ναού σε 2 οκταβικές συχνотικές ζώνες ενδιαφέροντος, τα 250Hz και τα 500 Hz, για τις 2 προαναφερθείσες θέσεις διέγερσης και τις 4 θέσεις ακρόασης. Οι εν λόγω συχνотικές ζώνες επιλέχθηκαν καθώς στην ομιλούσα και την άδουσα φωνή, οι οποίες αποτελούν τις 2 βασικές ηχητικές πηγές διέγερσης σε ορθόδοξους ναούς, περιλαμβάνουν τις θεμελιώδεις συχνότητες και τους πρώτους αρμονικούς των μεταδιδόμενων ηχητικών σημάτων. Η συχνотική ζώνη των 125 Hz η οποία για τους ίδιους λόγους θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης, δεν περιλαμβάνεται στις αναλύσεις καθώς βρίσκεται εκτός του συχνотικού εύρους των επιτόπιων ηχομετρήσεων του Ναού και κατά συνέπεια της βαθμονόμησης του ακουστικού μοντέλου (βλ. Ενότητα 2).

Όπως παρατηρείται, θέσεις στο εσωτερικό του Ναού οι οποίες βρίσκονται σε απευθείας διαδρομή ήχου (03 και 12), λαμβάνουν ικανοποιητική ποσότητα ηχητικής ενέργειας από την πηγή A0 (μπροστά από την Ωραία Πύλη), ενώ όσες βρίσκονται σε “ηχητική σκιά” (08 και 15) έχουν απώλεια ηχητικής ενέργειας έως και 20 dB SPL. Αντιθέτως, η ηχητική πηγή A1, η οποία βρίσκεται εντός του Ιερού, δεν δύναται να διεγείρει επαρκώς τον χώρο του Ναού, πέρα από το ίδιο το Ιερό. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται και βιωματικά κατά τη διάρκεια της Θείας λειτουργίας, όταν ομιλίες και ψαλμωδίες εντός του Ιερού, οι οποίες δεν λαμβάνουν ηλεκτρακουστική ενίσχυση,

δεν γίνονται εύκολα καταληπτές σε θέσεις εκτός αυτού. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν τόσο για τη συχνοτική ζώνη των 250 Hz όσο και των 500 Hz.

3.2 Χρόνος Αντήχησης, Ευκρίνεια και Διακριτότητα

Στους Πίνακες 3.2.1 και 3.2.2 συγκεντρώνονται οι βασικές ακουστικές παράμετροι του Ναού: Χρόνος Αντήχησης (T20, T30 και EDT), Ευκρίνεια (C50 και C80) και διακριτότητα (D50) για τις 5 οκταβικές συχνοτικές ζώνες από 250 Hz έως 4000 Hz, για 2 καταστάσεις πληρότητας (0% και 100%) και τις 2 υπό εξέταση θέσεις διέγερσης A0 και A1, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, οι χρόνοι αντήχησης μεταξύ των δύο καταστάσεων πληρότητας διαφέρουν από 1 s έως 2,5 s, αναλόγως της συχνοτικής ζώνης, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται στις συχνοτικές ζώνες από 1000 Hz και πάνω. Ανάλογοι χρόνοι T20 και T30 έχουν διαπιστωθεί και σε άλλους ορθόδοξους ναούς παρόμοιων διαστάσεων και όγκου [16, 12, 11].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι παρατηρούμενοι χρόνοι αντήχησης είναι αντίστοιχοι και στις 2 θέσεις διέγερσης A0 και A1, οι παράμετροι της ευκρίνειας και τις διακριτότητας αλλάζουν σημαντικά μεταξύ των 2 καταστάσεων. Όπως είναι αναμενόμενο, σε έναν λατρευτικό χώρο μικρών διαστάσεων, όπως είναι ο Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, οι τιμές Ευκρίνειας (C50 και C80) και διακριτότητας (D50) κυμαίνονται εντός των αποδεκτών ορίων ανεξαρτήτως κατάστασης πληρότητας, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται μπροστά από την Ωραία Πύλη (A0), όταν δηλαδή βρίσκεται στον ίδιο χώρο με τις θέσεις ακρόασης. Ωστόσο, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται εντός του χώρου του Ιερού (βλ. Πίνακα 3.2.2), οι εν λόγω τιμές βρίσκονται κάτω από τα ευρέως αποδεκτά όρια, δηλώνοντας τη δυσκολία καταληπτότητας του μεταδιδόμενου σήματος.

Πίνακας 3.2.1 Ακουστικές Παράμετροι Ναού για καταστάσεις πληρότητας 0% (Empty) και 100% (Full) από τη θέση διέγερσης A0

Empty /Full	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T20	2,55 / 1,56 s	2,78 / 1,19 s	3,36 / 1,04 s	2,85 / 1,01 s	2,30 / 0,88 s
T30	2,46 / 1,53 s	2,90 / 1,20 s	3,30 / 1,08 s	2, 87 / 1,04 s	2, 28 / 0,92 s
EDT	2,69 / 2,13 s	3,15 / 0,93 s	3,36 / 1,09 s	2,99 / 0,95 s	2,29 / 0,88 s
C50	-7,35 / -6,07 dB	-3,91 / 2,37 dB	-5,96 / 2,07 dB	-4,33 / 2,54 dB	-3,31 / 3,08 dB
C80	-3,55 / -3,32 dB	-2,34 / 5,24 dB	-3,63 / 4,27 dB	-2,87 / 5,07 dB	-1,20 / 6,01 dB
D50	15,56 / 19,84 %	28,92 / 63,30 %	20,24 / 61,72 %	26,94 / 64,22 %	31,80 / 67,01 %

Πίνακας 3.2.2 Ακουστικές Παράμετροι Ναού για καταστάσεις πληρότητας 0% (Empty) και 100% (Full) από τη θέση διέγερσης A1

Empty /Full	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T20	2,46 / 1,57 s	3,03 / 1,24 s	3,46 / 1,15 s	2,82 / 1,00 s	2,32 / 0,90 s
T30	2,44 / 1,53 s	3,02 / 1,24 s	3,41 / 1,14 s	2,88 / 1,02 s	2,31 / 0,91 s
EDT	3,00 / 2,11 s	2,96 / 1,40 s	3,51 / 1,28 s	3,25 / 1,18 s	2,43 / 1,08 s
C50	-10,11 / -9,53 dB	-10,15 / -5,01 dB	-11,48 / -6,74 dB	-10,77 / -3,72 dB	-9,62 / -4,35 dB
C80	-4,73 / -6,24 dB	-6,65 / -1,53 dB	-7,89 / -2,02 dB	-6,54 / 0,51 dB	-5,68 / 0,23 dB
D50	8,89 / 10,03 %	8,81 / 23,99 %	6,64 / 17,48 %	7,73 / 29,79 %	9,83 / 26,84 %

4 Επίλογος - Συμπεράσματα

Η μελέτη παρουσίασε τη διαδικασία μελέτης των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, η οποία βασίστηκε τόσο σε επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις χώρου, όσο και στη δημιουργία ενός πλήρως βαθμονομημένου ακουστικού μοντέλου με τη χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic. Η προκαταρκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, ανέδειξε τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου σε 2 συνθήκες πληρότητας. Τα αποτελέσματα συνάδουν με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας και αποδεικνύουν τις κατάλληλες ακουστικές συνθήκες που διαμορφώνονται, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται στον κυρίως χώρο του Ναού.

Μελλοντικά βήματα θα περιλαμβάνουν πιο συστηματικές ακουστικές μετρήσεις εντός του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας οι οποίες θα επιτρέψουν αφενός μια πιο πλήρη βαθμονόμηση του εικονικού ακουστικού μοντέλου, για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, αφετέρου την εισαγωγή στο μοντέλο του επιπέδου των θορύβων περιβάλλοντος και βάθους, οι οποίοι αναμένεται να αλλάξουν έως ένα βαθμό τα ακουστικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

5 Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών καθώς και το προσωπικό του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας που κατέστησαν εφικτή και διευκόλυναν την πρόσβασή στον χώρο του Ναού. Επίσης, ευχαριστούμε θερμά τους συναδέλφους φοιτητές του μαθήματος “Μελέτη και προσομοίωση ακουστικών χαρακτηριστικών χώρων λατρείας” του Τμήματος Μουσικών Σπουδών, ΕΚΠΑ χωρίς τη βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν εφικτές οι επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις του χώρου και η εικονική μοντελοποίησή του.

6 Αναφορές

- [1] Alonso, A., Sendra, J. J., Suarez, R., & Zamarreño, T. (2014). Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *J. of Building Performance Simulation*, 7(5), 360-378.
- [2] Alonso, A., Suarez, R., & Sendra, J. J. (2017, August). Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: The case of the Cathedral of Granada. In *Building Simulation* (Vol. 10, pp. 431-446). Tsinghua University Press.
- [3] Álvarez-Morales, L., Giron, S., Galindo, M., & Zamarreno, T. (2016). Acoustic environment of Andalusian cathedrals. *Building and Environment*, 103, 182-192.
- [4] Álvarez-Morales, L., Zamarreño, T., Girón, S., & Galindo, M. (2014). A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Building and Environment*, 72, 102-115.
- [5] Boren, B., & Roginska, A. (2011, October). Multichannel impulse response measurement in matlab. In *Audio Engineering Society Convention 131*. Audio Engineering Society.
- [6] Brezina, P. (2015). Measurement of intelligibility and clarity of the speech in romanesque churches. *Journal of Cultural Heritage*, 16(3), 386-390
- [7] Gerstel, S. E., Kyriakakis, C., Raptis, K. T., Antonopoulos, S., & Donahue, J. (2018). Soundscapes of Byzantium: The Acheiropoietos basilica and the cathedral of Hagia Sophia in Thessaloniki. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, 87(1), 177-213.
- [8] Gül, Z. S., Çalıřkan, M., Tavukçuođlu, A., & Xiang, N. (2018). Assessment of acoustical indicators in multi-domed historic structures by non-exponential energy decay analysis. *Acoustics Australia*, 46, 181-192.
- [9] Gül, Z. S. (2019, July). Acoustical impact of architectonics and material features in the lifespan of two monumental sacred structures. In *Acoustics*, 1(3), 493-516.
- [10] Kosała, K. (2016). Calculation models for acoustic analysis of St. Elizabeth of Hungary Church in Jaworzno Szczakowa. *Archives of Acoustics*, 41(3), 485-498
- [11] Kosała, K., & Małecki, P. (2018). Index assessment of the acoustics of Orthodox churches in Poland. *Applied Acoustics*, 130, 140-148.
- [12] Małecki, P., Wiciak, J., & Nowak, D. (2017). Acoustics of the Orthodox Churches in Poland. *Archives of acoustics*, 42(4), 579-590.
- [13] Postma, B.N., & Katz, B.F. (2015). Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations. *Virtual Reality*, 19, 161-180.
- [14] Vorländer, M. (2020). *Auralization*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing.
- [15] Weitze, C. A., Rindel, J. H., Christensen, C. L., & Gade, A. C. (2002, September). The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation. In *Forum Acusticum*. Citeseer.