



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του
Πειραματικού Μουσικού Γυμνασίου και Λυκείου Παλλήνης»

Γιάννη Φ. Τσέκα

Επιβλέπουσα: Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

Φεβρουάριος 2022

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του Πειραματικού Μουσικού
Γυμνασίου και Λυκείου Παλλήνης»**

Γιάννη Φ. Τσέκα

A.M.: 1569201100081

Τριμελής Επιτροπή:

Αναστασία Γεωργάκη, Καθηγήτρια

Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

Σημείωμα του συγγραφέα

Το δοκίμιο αυτό αποτελεί πτυχιακή εργασία η οποία συντάχθηκε για το Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και υποβλήθηκε προς εξέταση τον Φεβρουάριο του 2022. Ο συγγραφέας βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο του παρόντος έργου είναι αποτέλεσμα προσωπικής εργασίας και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων, όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Οι απόψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και όχι την επιβλέπουσα Καθηγήτρια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του Πειραματικού Μουσικού Γυμνασίου και Λυκείου Παλλήνης (Π.Μ.Γ.Λ.Π.). Η ακουστική μέτρηση του χώρου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ISO περί ακουστικών μελετών. Από τις κρουστικές αποκρίσεις των μετρήσεων, υπολογίστηκαν οι ακουστικές παράμετροι σε συχνотικό εύρος 250 Hz έως 4k Hz για οκτώ θέσεις ακρόασης, μοιρασμένες εντός του χώρου. Μέσω του λογισμικού CATT Acoustic, κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο της αίθουσας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων της αίθουσας, παρουσιάζονται σε ποσοτικούς πίνακες και συγκριτικά γραφήματα. Τα αποτελέσματα της παρούσης μελέτης μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη χρήση της αίθουσας.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ακουστική

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ακουστικές μετρήσεις, Γεωμετρική ακουστική, μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής, Ακουστική κλειστών χώρων, ακουστική προσομοίωση, CATT-Acoustic

ABSTRACT

This thesis examines the acoustic properties of the Concert Hall of the Music School of Pallini (P.M.G.L.P.). The acoustic measurements were performed following the recommendations of the current ISO standards. Acoustic parameters were calculated from the measured impulse responses, within the frequency range of 250 Hz to 4k Hz, for eight different listening positions across the room. The room model was created in CATT Acoustic. The results of both the measurements and the room simulation are presented in quantitative tables and comparative graphs. The results of the present study can be utilized for the efficient use of the Concert Hall.

SUBJECT AREA: Acoustics

KEYWORDS: Acoustic Measurement, Geometrical acoustic, geometrical acoustic model, room acoustics, acoustic simulation, CATT-Acoustic, Music School of Pallini.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την επιβλέπουσα, Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Αρετή Ανδρεοπούλου για την πολύτιμη συμβολή και υπομονή που ανέδειξε τη χρονική διάρκεια συγγραφής της εργασίας. Τους κ. Βασίλη Αντωνόπουλο, διευθυντή του Π.Μ.Γ.Λ.Π., και τον κ. Γιώργο Λάσκο, υπεύθυνο της Αίθουσας Συναυλιών, για την συνεργασία και την άμεση τους ανταπόκριση σε αυτό εγχείρημα, σε μια πολύ δύσκολη περίοδο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ιωάννη Πεικίδη και Κώστα Κατσαντώνη για την βοήθεια μέσω της φυσικής τους παρουσίας και των συμβουλών τους, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τέλος, να ευχαριστήσω τους φίλους μου Πέτρο Τζερεφό και Δημήτρη Αναστασίου για τη συνεισφορά τους στα πιο κρίσιμα στάδια αυτής της διπλωματικής, που οδήγησε και στην ολοκλήρωση της, όπως και τη μητέρα μου για την υποστήριξη.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	11
Εισαγωγή	12
1. Ακουστική Κλειστών Χώρων	14
1.1 Κρουστική Απόκριση	14
1.2 Ακουστικές Παράμετροι	16
1.3 Γεωμετρική Ακουστική	19
1.3.1 Γεωμετρικά μοντέλα	20
1.3.2 Τεχνικές υπολογισμού	21
1.3.3 Auralization	23
1.4 Λογισμικά Γεωμετρικής Μοντελοποίησης	23
2. Παρουσίαση και Ακουστικός Χαρακτηρισμός της Αίθουσας Συναυλιών	
Π.Μ.Γ.Λ.Π.	25
2.1 Χαρακτηριστικά Αίθουσας	25
2.2 Ακουστικές μετρήσεις	31
2.2.1 Εξοπλισμός	32
2.2.2 Εκτέλεση ακουστικών μετρήσεων	32
2.2.3 Ακουστικός χαρακτηρισμός εξοπλισμού	36
2.3 Ανάλυση Κρουστικών Αποκρίσεων	40
2.3.1 Επεξεργασία των ακουστικών μετρήσεων	40
2.3.2 Ακουστικά Χαρακτηριστικά Αίθουσας	46
3. Ψηφιακή προσομοίωση και ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών της	
Αίθουσας	52
3.1 Σχεδιασμός Μοντέλου Αίθουσας	53

3.1.1 Σχεδιασμός Καθισμάτων	54
3.1.2 Σχεδιασμός Πάνελ	55
3.1.3 Σχεδιασμός Κυρτών επιφανειών	56
3.2 Βαθμονόμηση μοντέλου	57
3.2.1 Ανακλαστική επιφάνεια Πάνελ	62
3.2.2 Διάτρητη επιφάνεια Πάνελ.....	63
3.2.3 Σύγκριση.....	64
3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	66
3.3.1 Παρατηρήσεις θέσης «ΤΣκηνηπ»	69
3.4 Heat-maps.....	73
Συμπεράσματα.....	76
Επίλογος	79
Βιβλιογραφία	81
Παράρτημα 1.....	84
Παράρτημα 2.....	86
Παράρτημα 3.....	88
EDT HeatMaps	88
C80 HeatMaps.....	90
D50 HeatMaps	92
SPL HeatMaps	93
STI HeatMap	95

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, στην κατεύθυνση της «Μουσικής Τεχνολογίας», την ακαδημαϊκή περίοδο του 2021-2022. Σε αυτή παρουσιάζονται βασικές αρχές της ακουστικής κλειστών χώρων και έχει ως βασικό σκοπό την ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του Πειραματικού Μουσικού Γυμνασίου και Λυκείου Παλλήνης.

Παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν από τις ακουστικές μετρήσεις στην Αίθουσα καθώς και στο Studio LabMAT, μέχρι την επεξεργασία του ακουστικού σήματος σε υπολογιστικό περιβάλλον, ώστε να προκύψει το τελικό ακουστικό αποτέλεσμα, η κρουστική απόκριση. Επίσης, γίνεται αναλυτική αναφορά στη διαδικασία κατασκευής ενός ψηφιακού ακουστικού μοντέλου στο λογισμικό CATT Acoustic και στη διαδικασία βαθμονόμησης του, δημιουργώντας τις κατάλληλες προϋποθέσεις για εφαρμογή της Ακουστοποίησης (Auralization).

Γίνεται αναφορά σε μερικές τροποποιημένες εκδοχές του μοντέλου, οι οποίες εμφανίζουν διαφορετικές ακουστικές συνθήκες και παρουσιάζονται οι ακουστικές παράμετροι για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις. Εξάγονται ποσοτικοί χάρτες (HeatMaps) που απεικονίζουν το βαθμό της ενέργειας σε ολόκληρο το εύρος της Αίθουσας, ανά συχνотική περιοχή, και γίνεται προσπάθεια για την αποκωδικοποίηση μέρους αυτών των πληροφοριών που προκύπτουν για την κατανόηση της ακουστικής συμπεριφοράς της.

Η αναλυτική περιγραφή του τρόπου διεξαγωγή και επεξεργασίας ακουστικών μετρήσεων και της χρήσης του CATT Acoustic, μπορεί να διευκολύνουν σημαντικά τις σχετικές μελλοντικές έρευνες που αφορούν την ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του Π.Μ.Γ.Λ.Π. και να δημιουργήσουν το κίνητρο για περαιτέρω προσπάθειες βελτίωσης της ακουστικής διαμόρφωσης της.

Εισαγωγή

Ακουστική είναι η επιστήμη του Ήχου. Οι πρώτες αναφορές πηγάζουν από φιλοσόφους και μαθηματικούς της Αρχαία Ελλάδα, με κύριο εκπρόσωπο τον Πυθαγόρα. Μέσα από την παρατήρηση του, στα ακουστικά φαινόμενα, κατανόησε τη σημαντικότητα της και οι ιδέες του επηρέασαν σημαντικά την διαδικασία του ακουστικού σχεδιασμού πολλών χώρων εκείνης την εποχή. (Dimarogonas, 1990) Το κύριο κατασκευαστικό οικοδόμημα που εκπροσωπεί την Ακουστική ήταν τα εξωτερικά αμφιθέατρα. Η λογική της αρχιτεκτονικής τους ήταν σύμφωνη με τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής, έτσι ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση του λόγου σε ευρύ κοινό, μια εποχή κατά την οποία δεν υπήρχαν άλλα μέσα ενίσχυσης του ήχου. Οι ακροατές στη προσπάθειά τους να βρουν σημεία με καλύτερη ακουστική συμπεριφορά σχημάτισαν σταδιακά το πολικό διάγραμμα της φωνής. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός ημικυκλικού σχήματος, λίγο μεγαλύτερο των 180° , το οποίο κατασκευαζόταν συνήθως πρόποδες λόφων με ανοιχτή θέα, πιθανότατα για να μειωθεί το στοιχείο της έντονης αντήχησης. (Long, 2005)

Η πρώτη καταγραφή και ανάλυση για την ακουστική των θεάτρων έγινε από τον Ρωμαίο Αρχιτέκτονα Marco Vitruvius Pollione, ο οποίος μέσα από το έργο *De Architectura*, που συνέγραψε το 27 π.Χ. περιέγραψε την οπτική του σε διάφορα θέματα περί αρχιτεκτονικής, που αφορούν τον σχεδιασμό και η ακουστική συμπεριφορά των θεάτρων. Η σταδιακή αύξηση της έντασης των μουσικών οργάνων, έδωσε τη δυνατότητα παρακολούθησης θεαμάτων από μεγαλύτερο ακροατήριο. Προφανώς κάτι τέτοιο οδήγησε στη δημιουργία μεγαλύτερων συναυλιακών αιθουσών και ένα κίνητρο για την βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς αυτών, γνώση η οποία μέχρι τότε ήταν θέμα εμπειρίας και παρατήρησης και δεν είχε ακόμα καθοριστεί κάποια ποσοτική παράμετρος. (Long, 2005)

Τον 19^ο αιώνα η ακουστική γνώρισε μεγάλη άνθιση καθώς μεγάλο κομμάτι της τότε επιστημονικής κοινότητας εργάστηκε πάνω σε αυτή. Παραδείγματα τέτοιων ερευνητών αποτελούν οι J.Tyndall, Hermann von Helmholtz, Rayleight, G.Stokes,

A.G.Bell, T.Edison, R.Koenig. Πατέρας, όμως, της Αρχιτεκτονικής ακουστικής θεωρείται ο Wallace Clement Sabine (1868-1919), καθώς υπήρξε ο πρώτος που κατάφερε να δημιουργήσει ποσοτικές μετρήσεις για την ακουστική δωματίου. (Long, 2005)

Σήμερα, υπάρχουν αρκετές πληροφορίες που αφορούν την Αρχιτεκτονική ακουστική και για τον σχεδιασμό μιας αίθουσας. Κάποια από τα εργαλεία που διατίθενται, όπως η δημιουργία μοντέλων, εξετάζουν την συμπεριφορά του ηχητικού πεδίου ενός χώρου πριν ακόμα αυτό δημιουργηθεί. Η βασική πηγή πληροφοριών σχετικά με τις ακουστικές δυνατότητες του ηχητικού πεδίου ενός δωματίου είναι η κρουστική απόκριση, μέσα στην οποία περιέχονται όλα τα στοιχεία και χαρακτηριστικά που λαμβάνει ένας ήχος, κατά την διάρκεια που ταξιδεύει από μια πηγή προς έναν δέκτη. (Long, 2005)

1. Ακουστική Κλειστών Χώρων

Η ακουστική κλειστών χώρων είναι το πεδίο τη Ακουστικής που μελετά τη διάδοση και τα χαρακτηριστικά του ήχου σε ένα περιτοιχισμένο περιβάλλον. Κάθε χώρος έχει το δικό του «ηχητικό αποτύπωμα», που επηρεάζει την ποιότητα ενός ήχου, είτε πρόκειται για ομιλία, είτε για μουσική είτε για οποιοδήποτε είδος ηχητικού σήματος. Τα κριτήρια για τον ακουστικό σχεδιασμό ενός κλειστού χώρου εξαρτώνται από χρήση που προβλέπεται να έχει. Οι νέες μέθοδοι είναι αυτές πλέον που επιτρέπουν τη δημιουργία προσομοιώσεων σύμφωνα με το αρχιτεκτονικό τους σχεδιασμό, δημιουργώντας συνθήκες για την εφαρμογή της Ακουστοποίησης (Auralization). (Savioja, 2015)

1.1 Κρουστική Απόκριση

Η βασική πηγή εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τις ακουστικές δυνατότητες του ηχητικού πεδίου ενός δωματίου, είναι η κρουστική απόκριση. Μέσα σε αυτή περιέχονται πληθώρα δεδομένων που αφορούν τον αριθμό των ανακλάσεων, την ευκρίνεια του ήχου, την διακριτότητα της ανθρώπινης ομιλίας κ.α., τα οποία κωδικοποιούνται κατά την χρονική διάρκεια που χρειάζεται η ηχητική ενέργεια να διανύσει την απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη. Αυτές οι πληροφορίες διαμορφώνονται καθ' όλη την διάρκεια που χρειάζεται το ηχητικό σήμα να ταξιδέψει, ανακλώντας σε όλες τις επιφάνειες του χώρου, έως ότου φτάσει στα αυτιά του ακροατή. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά πλέον μπορούν να εκφραστούν ποσοτικά και ονομάζονται ακουστικές παράμετροι, οι οποίες αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ακουστική μελέτη ενός χώρου.

Κρουστική απόκριση ονομάζεται η έξοδος που παράγει ένα σύστημα όταν στην είσοδό του εφαρμοστεί η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Στην περίπτωση της ακουστικής χώρων, σύστημα είναι ο υπό μελέτη χώρος και κρουστική συνάρτηση ο ήχος κρούσης με τον οποίο αυτό διεγείρεται. Πρόκειται για την σύνθεση του άμεσου ήχου (direct sound) και των πολυάριθμων επαναλήψεων του αρχικού ηχητικού

σήματος που προκαλούνται από τις ανακλάσεις στο περίβλημα διαμόρφωσης του χώρου, και οι οποίες χωρίζονται σε πρώιμες και μεταγενέστερες. Κάθε μια από αυτές καθορίζεται από την ένταση και την χρονική απόσταση της, σε σχέση με τον άμεσο ήχο. (Kuttruff, 2009)

Η κρουστική απόκριση αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την ακουστική κατανόηση μιας αίθουσας και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι για τον υπολογισμό της. Ένας από τους συνηθέστερους τρόπους είναι χρήση ενός σύντομου παλμικού ηχητικού σήματος ικανής ενέργειας να διεγείρει ακουστικά τον προς μελέτη χώρο. Παραδείγματα πηγών ηχητικού παλμού αποτελούν το σκάσιμο ενός μπαλονιού ή η πυροδότηση ενός όπλου.

Με τη χρήση όμως των παραπάνω μεθόδων, παρατηρούνται δυο πολύ σημαντικά προβλήματα. Λόγω της φύσης των συγκεκριμένων πηγών, η ισχύς του ηχητικού τους σήματος και η κατευθυντικότητα του δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν. Αυτό έχει ως συνέπεια κάθε φορά που θα επαναλαμβάνεται η διαδικασία τα αποτελέσματα που θα προκύπτουν να παρεκκλίνουν έως έναν βαθμό. (Rossing, 2007) Έτσι, για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο και να λαμβάνονται μετρήσεις που έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, άρχισε να γίνεται χρήση πανκατευθυντικών ηχείων που δύνανται να παράξουν σήμα με σταθερή και καθορισμένη κατευθυντικότητα, για την οποία γίνεται αναλυτική αναφορά περί πανκατευθυντικότητας στο index ISO3382.

Πέρα των σύντομων παλμικών ήχων δημιουργήθηκαν σταδιακά και άλλοι μέθοδοι με τη χρήση ψηφιακών ηχητικών σημάτων ορισμένου χρόνου, όπως λευκός θόρυβος και σήματα μεταβαλλόμενης συχνότητας, τα οποία μέσω της αποσυνέληξης (deconvolution) οδηγούν στον υπολογισμό της κρουστικής απόκρισης του υπό μελέτη χώρου. Παραδείγματα τέτοιων ψηφιακών σημάτων είναι τα ακόλουθα:

- 1) MLS (Maximum Length Sequence), βασίζεται στη διέγερση του ακουστικού χώρου από ένα περιοδικό ψευδοτυχαίο σήμα που έχει παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του λευκού θορύβου. Πρόκειται για μια ντετερμινιστική ακολουθία διπολικών παλμών συνολικού μήκους $L = 2^n - 1$, με n που δηλώνει τη σειρά της ακολουθίας. (Vorländer, 1997)

- 2) IRS (Inverse Repeated Sequence), έχει συνολικό μήκος διπλάσιο από αυτό του MLS, δηλαδή 2L, καθώς η ακολουθία της αποτελείται από δυο περιόδους, όπου η δεύτερη είναι αντίστροφη της πρώτης, εξού και όρος inverse. (Rosell, 2009)
- 3) Time-Stretched Pulses, βασίζεται στη τεχνική χρονικής επέκτασης και συμπίεσης ενός παλμικού σήματος. Στόχος της είναι να αυξηθεί η ποσότητα ηχητικής ισχύος που εκπέμπεται για ένα σταθερό μέγεθος αυτού του σήματος και επομένως να αυξηθεί η αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio), χωρίς να αυξηθούν οι μη γραμμικότητες που εισάγονται από το σύστημα μέτρησης. (Stan, 2002)
- 4) Sine Sweeps (Log/Linear), πρόκειται για μια σάρωση συχνοτήτων, εκθετική ή γραμμική, που αυξάνει στον χρόνο. (Stan, 2002)

1.2 Ακουστικές Παράμετροι

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η κρουστική απόκριση περιέχει ένα εύρος σημαντικών πληροφοριών για την κατανόηση της Ακουστικής μιας αίθουσας. Ίσως το πιο σημαντικό από όλα στοιχεία είναι αυτό του Χρόνου Αντήχησης (T). Πρόκειται για ένα αντικειμενικό χαρακτηριστικό και το οποίο ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται η ένταση ενός ήχου να μειωθεί κατά 60 dB από τη στιγμή που η ηχητική πηγή έχει σταματήσει. Και σύμφωνα με τον τύπο του Sabine υπολογίζεται ως :

$$T = 0.164 V/A$$

,όπου V είναι ο όγκος και A ο μέσος συντελεστής απορρόφησης.

Μια παρόμοια παράμετρος με τον Χρόνο Αντήχησης (T), η οποία όμως αξιολογεί το διάστημα μεταξύ 0 και -10dB , είναι το EDT. Η κύρια τους διαφορά αφορά πως η τελευταία επηρεάζεται σημαντικά από τις πρώιμες ανακλάσεις και λόγω αυτού παρατηρείται ότι η τιμή EDT διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με θέση μέσα σε μια αίθουσα, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει για τη τιμή T.

Το EDT περιγράφει καλύτερα την αντήχηση από ότι κάνει το T, παρόλα αυτά το T εξακολουθεί να θεωρείται η βασική αντικειμενική παράμετρος. Αυτό οφείλεται στη εμπλοκή του με πολλές άλλες ακουστικές παραμέτρους που αφορούν την ισχύ του ήχου και την απορροφητικότητα των υλικών. Επιπλέον το T είναι μια σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με την νομοθεσία όσον αφορά την ακουστική συνθήκη των δωματίων ενός κτιρίου. (Rossing, 2007)

Άλλες παράμετροι που μπορούν να μας προσφέρουν τιμές που περιγράφουν το Χρόνο Αντήχησης είναι οι T10, T20 και T30. Κάθε μια από αυτές διαφοροποιείται στη διαδικασία του υπολογισμού της μείωσης της ηχητικής ενέργειας, από όπου διαμορφώνεται και ο αριθμός στο όνομα του. Για παράδειγμα, το T10 ορίζεται ως ο χρόνος από τα -5 στα -15dB, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 6.

Επιπλέον, μέσω αυτού του χρόνου T μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε πολλές ακουστικές παραμέτρους. Μια από αυτές είναι η ευκρίνεια (Clarity), η οποία μας περιγράφει σε ποιο βαθμό γίνονται οι αντιληπτές οι ακουστικές λεπτομερείς μιας ομιλίας. Για να συμβεί αυτό χρειάζεται να θέσουμε ως όριο τα πρώτα 50-80 ms του ήχου και να εντοπίσουμε πως αλληλοεπιδρούν ο άμεσος ήχος (direct sound) με τις πρώιμες ανακλάσεις (early reflections) εντός αυτού του χρονικού πλαισίου.

Όταν λοιπόν ο άμεσος ήχος και οι πρώιμες ανακλάσεις φτάσουν στον δέκτη πριν από το χρονικό όριο που θέσαμε (50-80 ms), τότε το ανθρώπινο αυτί ενισχύει το αρχικό σήμα δίνοντας του την ευκρίνεια που αναζητάμε. Έτσι προκύπτουν οι τιμές C50 και C80, όπου αφορούν πρώτα 50 και 80 ms αντίστοιχα. Οπότε όσο μεγαλύτερο το C τόσο πιο πολύ κυριαρχεί ο πρώιμος ήχος άρα μεγαλύτερη ευκρίνεια. Η συγκριμένη παράμετρος προσδιορίζει την καθαρότητα της μουσικής και τη φωτεινότητα ως υποκειμενικές παραμέτρους της ακουστικής ποιότητας του δωματίου. Προκειμένου να προσδοθεί μουσική ευκρίνεια οι τιμές του C80 χρειάζεται να κινηθούν σε ένα εύρος ± 4 dB. Για έναν, όμως, συναυλιακό χώρο προτείνεται οι τιμές αυτές να ξεκινούν από 0 dB έως -4 dB, όταν η Αίθουσα θα είναι μη κατειλημμένη, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στις συχνοτικές ζώνες 500 Hz, 1k Hz και 2k Hz. (Long, 2005)

Μια ακόμα αντικειμενική παράμετρος είναι το D50, που αφορά τη διακριτότητα του ήχου, και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κατανοητότητας της ομιλίας. Το μέγεθος αυτό εξετάζει τα μοτίβα πρόσληψης των ανακλάσεων από έναν ομιλητή σε έναν ακροατή. Οι ακουστικές ανακλάσεις που φτάνουν λίγο μετά τον άμεσο ήχο μπορούν να βοηθήσουν στην ενίσχυση της ικανότητας του εγκεφάλου μας να διακρίνει την ομιλία. Αντίθετα αυτές που φτάνουν 50 ms μετά τον άμεσο ήχο δυσκολεύουν την ικανότητα του εγκεφάλου μας να διακρίνει την ομιλία. Η αναλογία αυτών των μεγεθών καθορίζει το πόσο κατανοητός είναι ο ήχος που λαμβάνεται. Οι τιμές για τη παράμετρο D50 εκφράζονται επί τοις εκατό και στο πλαίσιο αυτό έχουν οριστεί κάποια εύρη τα οποία χαρακτηρίζουν την ποιότητα αντίληψης της ομιλίας. Τιμές όπως 50% ή υψηλότερες υποδεικνύουν «καλή» ευκρίνεια ομιλίας. (Mackel, 2018)

Επίσης, το STI (Speech Transmission Index) είναι ένας αντικειμενικός δείκτης, που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας μετάδοσης της ομιλίας από έναν ομιλητή σε έναν ακροατή ενός δεδομένου δωματίου. Κυμαίνεται σε εύρος τιμών 0 έως 1 και στο Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται, με ποιον τρόπο διαχωρίζονται οι ποιότητες αντίληψης της ομιλίας σε ένα χώρο. (Houtgast, 2002)

STI value	Quality
0.00 - 0.30	bad
0.30 - 0.45	poor
0.45 - 0.60	fair
0.60 - 0.75	good
0.75 - 1.00	excellent

Πίνακας 1.1 Τιμές που χαρακτηρίζουν την αντιληπτότητα της ομιλίας για παράμετρο STI¹.

¹ Kari, H., & Kilpikari, J. (2012). *Effects of Acoustic Treatment on Sound Environment in Public Buildings*.

Τέλος, για να γίνει αντιληπτή από τον ακροατή μία μεταβολή σε κάποια από τις παραπάνω ακουστικές παραμέτρους, πρέπει να είναι μεγαλύτερη μιας ελάχιστης ποσότητας. Αυτή ονομάζεται ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά (just noticeable difference) και συμβολίζεται με το ακρωνύμιο JND. Η τιμή αυτή για τον χρόνο αντήχησης T30, το χρόνο πρώιμης απόσβεσης EDT και τη διακριτότητα D50 είναι το 5%, ενώ για την παράμετρο της ευκρίνειας C80 είναι 1 dB. Γενικά, αποδεκτή ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά για τις παραμέτρους αντήχησης είναι το 5% ενώ για τις παραμέτρους ευκρίνειας το 1dB. (Postma, 2015)

1.3 Γεωμετρική Ακουστική

Η Γεωμετρική Ακουστική είναι μια απλοποίηση της διάδοσης του ήχου και εφαρμόζεται για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του ήχου σε κλειστούς χώρους. Χρησιμοποιεί την αρχή του Fermat, κατά την οποία ο ήχος διαδίδεται χρησιμοποιώντας τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ πηγής και δέκτη, επιτρέποντας μια πιο απλή διάδοση του ήχου, όπου η έννοια του κύματος αντικαθίσταται από την έννοια της ακτίνας. Δηλαδή, αντί η πηγή να παράγει ημιτονοειδή κύματα προς πασαά κατεύθυνση, δημιουργεί ακτίνες. (Vorländer, 2020)

Με τον όρο ακτίνα εννοούμε ένα μικρό τμήμα μιας σφαιρικής οντότητας, το οποίο ξεκινάει από ένα συγκεκριμένο σημείο και ταξιδεύει σε μια καλά καθορισμένη κατεύθυνση και υπόκειται τους ίδιους νόμους διάδοσης με μια ακτίνα φωτός, με μόνη διαφορά τη ταχύτητα. Στόχος είναι να προσομοιωθεί η κρουστική απόκριση μιας συγκεκριμένης θέσης σε ένα δωμάτιο, η οποία θα διαμορφώνεται από τον απευθείας ήχο και τις αντανakλάσεις που θα προκύπτουν. Μέσω του υπολογισμού της μείωσης της ηχητικής ενέργειας ενός δωματίου θα προκύπτουν οι ακουστικές παράμετροι του χώρου. (Kravanja, 2018)

Η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται από μια ηχητική ακτίνα παραμένει σταθερή εφόσον το μέσο διάδοσης δεν προκαλεί απώλειες ενέργειας. Ένα άλλο θεμελιώδες γεγονός είναι τρόπος με τον οποίο μια ακτίνα ήχου ανακλάται από μια επίπεδη επιφάνεια. Επιπλέον, η οριστική ταχύτητα διάδοσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε

πολλές περιπτώσεις, καθώς είναι υπεύθυνη για πολλά σημαντικά αποτελέσματα, όπως η αντήχηση, ηχώ και ούτω καθεξής. (Long, 2005)

Η ηχητική ενέργεια μέσα στο μοντέλο υποβάλλεται τις συνέπειες τριών συνθηκών έως ότου σβήσει οριστικά. Αυτές είναι η κατοπτρική ανάκλαση, η διάχυτη ανάκλαση και η απορρόφηση. Η κατοπτρική ανάκλαση υπόκειται στο νόμο του Snell, όπου γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης. Η διάχυση δημιουργείται μέσω ενός συντελεστή, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Το 0 δηλώνει μια πλήρως κατοπτρική επιφάνεια και το 1 μια πλήρως διαχυτική. Τέλος, η απορρόφηση διαμορφώνεται επίσης από συντελεστές από 0 έως 1 για κάθε ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. (Long, 2005)

Σε γενικές γραμμές η Γεωμετρική Ακουστική χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση των συμπεριφορών μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων ενός δωματίου. Αυτό οφείλεται στις αδυναμίες που παρουσιάζουν τα γεωμετρικά μοντέλα, καθώς σε υψηλές συχνότητες είναι σχετικά ακριβή, σε αντίθεση με τις χαμηλότερες συχνότητες, οι οποίες λόγω της έλλειψης κυματικών φαινομένων, που παίζουν σημαντικό ρόλο, καθιστούν τα αποτελέσματα στις συγκεκριμένες περιοχές ανακριβή. (Long, 2005)

1.3.1 Γεωμετρικά μοντέλα

Μια κατηγορία γεωμετρικών μοντέλων ονομάζεται Μοντέλο μικρής κλίμακας. Πρόκειται για την απομίμηση ενός χώρου σε πιο μικρή κλίμακα, εξού και το όνομα της. Άρχισε να εφαρμόζεται ως μέθοδος προσομοίωσης από το 1930 και εφόσον γίνει κατάλληλη ρύθμιση στη γεωμετρία και στην επιλογή των υλικών κατασκευής του μοντέλου, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα. Ως προτεραιότητα όλων αυτών είναι η κρουστική απόκριση ή οποία μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή αντικειμενικών ή υποκειμενικών ακουστικών παραμέτρων του χώρου.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ξεπερνά αυτή των υπολογιστικών μοντέλων ακόμα και σήμερα, ειδικά σε περιπτώσεις που εμπλέκεται στο στοιχείο της διάχυσης ή της διάθλασης. Είναι φανερό ότι για οποιαδήποτε τροποποίηση, είτε αυτό πρόκειται για τη γεωμετρία είτε τα υλικά των επιφανειών, χρειάζεται χρόνος αναδιαμόρφωσης, ο οποίος σε σύγκριση με μια σειρά αλλαγών σε ένα λογισμικό ακουστικής μοντελοποίησης, είναι αρκετά μεγαλύτερος. (Rindel, 2011)

Με τη σειρά τους τα υπολογιστικά μοντέλα αποτελούν μεταγενέστερη μέθοδο προσομοίωσης, η οποία χρονολογείται από το 1960. Για τη δημιουργία ενός μοντέλου, χρειάζεται κάποιος μελετητής να εισάγει στο πρόγραμμα τη γεωμετρία του χώρου και να εντάξει τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για προσομοίωση. Η πιο σημαντική εξ αυτών είναι ο συντελεστής απορρόφησης για κάθε ένα υλικό ξεχωριστά που χρησιμοποιείται ως επιφάνεια. Επιπλέον μπορεί να προσδιοριστούν συντελεστές σκέδασης(ή διάχυσης) και transparency.

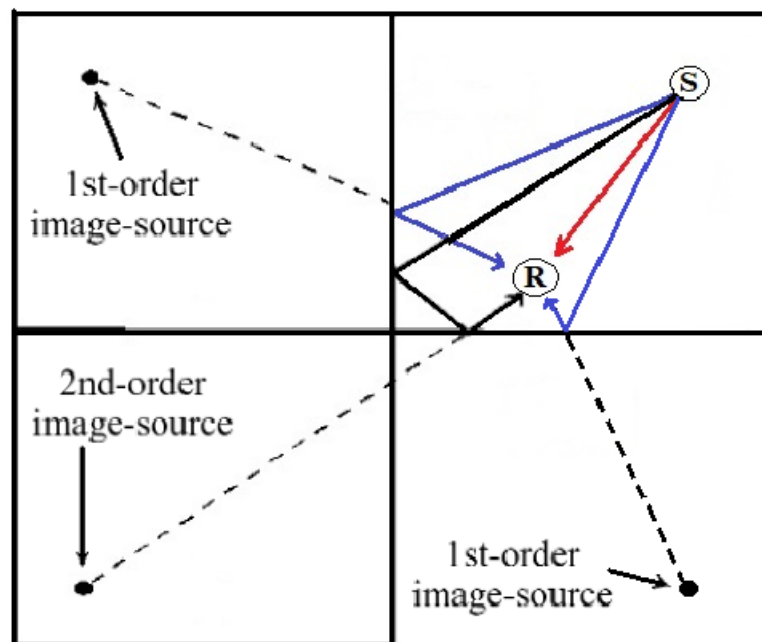
Η διάδοση των ηχητικών κυμάτων εντός του ψηφιού μοντέλου προσομοιώνεται με την μορφή ακτίνων (rays), όπως συμβαίνει και στην Οπτική. Οι τεχνικές οι οποίες καθορίζουν τον υπολογισμό της πορείας των ακτίνων μέσα στο χώρο προς πάσα κατεύθυνση ,έως ότου η δυναμική τους μειωθεί κάτω από το εύρος ενδιαφέροντος, αναφέρονται στη παρακάτω υποενότητα.

1.3.2 Τεχνικές υπολογισμού

Μια από τις κύριες τεχνικές υπολογισμού είναι η Ray tracing. Πρόκειται για τη παραγωγή ακτίνων από μια ηχητική πηγή, την ανάκλαση αυτών και ύστερα την καταγραφή των διαδρομών τους. Ο αριθμός των ακτίνων που χρησιμοποιούνται δεν είναι πάντα σταθερός αλλά αλλάζει ανά μοντέλο ώστε να εξάγει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα. (Savioja, 2015)

Η δεύτερη πιο διαδεδομένη τεχνική υπολογισμού στη διαδικασία προσομοίωσης είναι η Image Source. Κύριος στόχος της είναι ο εντοπισμός των ανακλάσεων που φτάνουν στον δέκτη και είναι περισσότερο αποτελεσματική στις πρώιμες. Ένας

αριθμός ακτινών παράγεται εντός του μοντέλου. Ταυτόχρονα μια εικονική πηγή δημιουργείται, η οποία βρίσκεται αντιδιαμετρικά της πραγματικής. Όταν μια ακτίνα φτάσει στον δέκτη τότε υπολογίζεται η διαδρομή που διένυσε και μαζί υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ δέκτη και εικονικής πηγής. Εφόσον αυτοί οι δυο αριθμοί είναι όμοιοι τότε η ανάκλαση είναι πρώτη. Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας. (Vorländer, 2020)



Εικόνα 1.1 Μέθοδος *Image Source*².

Τα περισσότερα λογισμικά προσομοίωσης χρησιμοποιούν συνδυασμούς διαφόρων τεχνικών. Αυτό γίνεται με σκοπό να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου, έτσι ώστε να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και σε μικρότερο χρόνο υπολογισμού.

² Rathnayake, R. A., & Wanniarachchi, W. K. I. L. (2019). *International Journal of Scientific & Technology Research* , 8(11).

1.3.3 Auralization

Ο όρος Auralization χρησιμοποιείται σε αντιστοιχία με τον όρο Visualization και μπορεί να μεταφραστεί ως «Ακουστοποίηση», δηλαδή η δημιουργία μιας Ακουστικής. Παρακάτω δύνανται ένας ορισμός της λειτουργίας του:

«Auralization μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία κατά την οποία ερμηνεύεται ακουστικά, με φυσικό ή μαθηματικό μοντέλο, το ηχητικό πεδίο μιας πηγής εντός του χώρου, με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώσει την εμπειρία της αμφιωτικής ακρόασης σε μια δεδομένη θέση.» (Kleiner, 1993)

Αποτελεί ιδανική μέθοδο επαλήθευσης των υπολογισμών που έχουν γίνει για την κατασκευή ενός χώρου με συγκεκριμένα ακουστικά χαρακτηριστικά. Ο πιο άμεσος τρόπος χρήσης αυτής της μεθόδου είναι μέσω της αναπαραγωγής ανηχοϊκών σημάτων, δηλαδή σημάτων που έχουν ηχογραφηθεί σε περιβάλλον που υπάρχει έλλειψη ανακλάσεων. Το συγκεκριμένο ηχητικό σήμα ενώνεται μέσω της συνέλιξης (convolution) με το παραγόμενο κρουστική απόκριση του μοντέλου και δημιουργεί την αίσθηση αμφιωτικής ακρόασης του παραγόμενου ήχου μέσα στον συγκεκριμένο χώρο. (Long, 2005)

Σήμερα η τεχνική Auralization χρησιμοποιείται και σε προσομοιώσεις που συνήθως έχουν διαδραστικό χαρακτήρα, ώστε να δημιουργεί στον χρήστη την αίσθηση ενός αληθοφανούς ακουστικού περιβάλλοντος που προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τον ρεαλισμό. Μια από αυτές τις περιπτώσεις είναι τα video games. (Moloney, 2004)

1.4 Λογισμικά Γεωμετρικής Μοντελοποίησης

Υπάρχουν αρκετά λογισμικά μοντελοποίησης, τα οποία διαφέρουν ως προς την χρήση και τις δυνατότητες τους κάποια από αυτά είναι τα εξής Raynoise, Fohhn Designer, I-Simpa, Ramsete, Comsol κ.α. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση των δυο πιο δημοφιλών προγραμμάτων ακουστικής μοντελοποίησης,

ODEON και CATT Acoustic. Θα αναφερθούν τα βασικά τους χαρακτηριστικά, οι μέθοδοι υπολογισμού που χρησιμοποιούν, καθώς κάποιες διαφορές που παρουσιάζουν.

Το ODEON είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης για ακουστικής κλειστών χώρων, το οποίο αναπτύχθηκε στο Technical University of Denmark. Η πρώτη έκδοση του ODEON δημιουργήθηκε το 1991 με σκοπό τον υπολογισμό της ακουστικής των αμφιθέατρων. Με τον καιρό ανέπτυξε τη δυνατότητα να υπολογίζει σε βιομηχανικά και αμφιθεατρικά περιβάλλοντα ή και συνδυασμό των δυο. Για τους υπολογισμούς του χρησιμοποιεί μια υβριδική προσέγγιση βασισμένη στον συνδυασμό images-source και ray-tracing. (Hodgson, 2008)

Το CATT Acoustic δημιουργήθηκε το 1989 με τη δυνατότητα μοντελοποίησης των ηχητικών φαινομένων, εντός του υπολογιστικού περιβάλλοντος και τη προσθήκη του Auralization μετά από ένα χρονικό διάστημα. Ο πρόγονος της μεθόδου υπολογισμού που χρησιμοποιούμε σήμερα εμφανίστηκε το 1998 και ονομάζεται Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC). Πρόκειται για μια προσέγγιση υπολογισμού που συνδυάζει τις μεθόδους όπως image-source και cone-tracing, όπου εκτελείται ανεξάρτητα για κάθε ζώνη οκτάβας. (James, 2001)

Τα δύο λογισμικά είναι παρόμοια από πολλές απόψεις. Οι διαφορές τους είναι περιορισμένες. Για παράδειγμα χρησιμοποιούν παρόμοιες υβριδικές μεθόδους υπολογισμού, αλλά με διαφορετική προσέγγιση, καθώς και στα δυο υπάρχει η μέθοδος χρήσης των images sources, αλλά με άλλους αλγόριθμους πρόβλεψης, cone-tracing για το CATT-Acoustic και ray-tracing για το ODEON. Επίσης, το CATT-Acoustic περιλαμβάνει συντελεστές επιφανειακής διάχυσης μεταβαλλόμενης συχνότητας, ενώ η έκδοση της ODEON όχι. Για την πρόβλεψη αποκρίσεων αμφιωτικών παλμών, το CATT-Acoustic χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη γεωμετρία δωματίου. (Hodgson, 2008)

2. Παρουσίαση και Ακουστικός Χαρακτηρισμός της Αίθουσας Συναυλιών Π.Μ.Γ.Λ.Π.

Η Αίθουσα Συναυλιών του Πειραματικού Μουσικού Γυμνασίου και Λυκείου Παλλήνης κατασκευάστηκε το 2003 και αποτέλεσε μέρος των νέων εγκαταστάσεων του σχολείου. Σύμφωνα με τα συλλεχθέντα αρχεία αποτέλεσε μέρος μιας μεγαλύτερης κατασκευής η οποία σχεδιάστηκε και μελετήθηκε με τη συνεργασία των Δ. Κουτσού, Χ. Δεληγιάννη, Ε. Παπαστάμου και Α. Παπαδόπουλος και δημιουργήθηκε με σκοπό τις κατάλληλες ακουστικές προδιαγραφές για έναν συναυλιακό χώρο.

Φιλοξενεί σημαντικό αριθμό εκδηλώσεων μέσα στο χρόνο στα πλαίσια του σχολικού προγράμματος, των οποίων ο χαρακτήρας ποικίλει. Κατά βάση πραγματοποιούνται οργανικές μουσικές συναυλίες συνόλων ή σολιστικές. Δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στο ύψος, αρά η Αίθουσα θα πρέπει να διαχειρίζεται διαφορά είδη μουσικής από Ορχηστικά, χορωδιακά, παραδοσιακά και σύγχρονα. Εκτός αυτών χρησιμοποιείται επίσης και για τη παρουσίαση θεατρικών παραστάσεων από μαθητές, για ομιλίες, για παρουσιάσεις κ.α.

Στο πλαίσιο έρευνας των πληροφοριών που αφορούν την Αίθουσα, πέρα από το κατασκευαστικά αρχεία δεν εντοπίστηκε κάτι που να αναφέρεται σε κάποια πιθανή ακουστική μελέτη που να έχει προηγηθεί, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει στοιχείο σύγκρισης με την παρούσα μελέτη της Αίθουσας. Άρα η συγκεκριμένη, πιθανότατα να αποτελεί η πρώτη προσπάθεια να καταγραφούν τα ακουστικά χαρακτηριστικά της και ευελπιστώ να αποτελέσει έναυσμα για περεταίρω έρευνα.

2.1 Χαρακτηριστικά Αίθουσας

Η αίθουσα έχει μήκος 33,6 μ., μέγιστο πλάτος 20,5 μ. και μέγιστος ύψος 7,75 μ.. Επιπλέον ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνει είναι 3545 m³. Κατασκευαστικά χωρίζεται σε δυο κύρια τμήματα, ο περιβάλλων χώρος της σκηνής και ο περιβάλλων χώρος του ακροατήριου, ο οποίος έχει το χαρακτηριστικό πως είναι κεκλιμένος. Το

σχήμα της αίθουσας είναι ανισόπεδο τραπέζιο, το οποίο συγκλίνει κατά μήκος της σκηνής. Η χωρητικότητα της, υστέρη από τις προσαρμογές που έχουν γίνει, είναι 626 θέσεων.

Η σκηνή καταλαμβάνει συνολικά ολόκληρο το εμπρός τμήμα της αίθουσας και έχει εμβαδόν 101,5 μ². Βρίσκεται σε ύψος 0,75 μ. από το έδαφος και όλη η επιφάνεια της είναι κατασκευασμένη από ξύλο. Στους τοίχους, που την οριοθετούν από τις δυο πλευρές, έχουν τοποθετηθεί, σε δυο επίπεδα, πάνελ με ανακλαστικό χαρακτήρα κατά μήκος της σκηνής. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι έξι εξ' αυτών έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται.

Η δεύτερη όψη αυτών των πάνελ έχει διαφορετική κατασκευή όσον αφορά το υλικό αλλά και την γεωμετρία. Είναι επίπεδη και ακολουθεί το σχεδιασμό του τοίχου. Η ιδιαιτερότητα της όμως οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελείται από μια ομοιόμορφα διατρητή επιφάνεια δίνοντας τη δυνατότητα να δημιουργεί διαφορετικές ακουστικές συνθήκες καθώς αυτές ενεργοποιούνται.



Εικόνα 2.1 Η αίθουσα από τη πλευρά του ακροατήριου.

Η οροφή ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία, καθώς δεν παρουσιάζει παραλληλία με το δάπεδο, αλλά σχηματίζει επιφάνειες που παίζουν τον ρόλο ανακλαστών, οι οποίες

έχουν κλίση προς το ακροατήριο, Εικόνα 2.2. Δημιουργώντας με αυτό το τρόπο μια σκηνή αρκετά ενεργητική όσον αφορά τη μέθοδο για τη διάδοση της ηχητικής ενέργειας μέσα στην Αίθουσα.

Είναι απαραίτητο σε αυτό σημείο να αναφερθεί, ότι κατά την περίοδο των μετρήσεων μερικές επιφάνειες επάνω στη σκηνή ήταν καλυμμένες με μαύρα πανιά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 και 2.2. Γνωρίζοντας ότι αυτή η συνθήκη θα επηρέαζε τις μετρήσεις, ήταν όμως αδύνατο να αφαιρεθούν και να επανατοποθετηθούν μέσα στα χρονικά πλαίσια που υπήρχαν. Οπότε επιλέχθηκε να ξεκινήσει η διαδικασία των ακουστικών μετρήσεων και η συνθήκη αυτή να ληφθεί υπόψη στη μοντελοποίηση του ακουστικού περιβάλλοντος.

Επιπλέον στοιχεία που βρίσκονται σε αυτό το χώρο είναι μια ξύλινη κατασκευή, σε μορφή σκαλοπατιών, που χρησιμοποιείται κυρίως για χορωδιακούς σκοπούς και τέλος το πίσω μέρος της σκηνής που διαμορφώνεται από μια ξύλινη συρόμενη κατασκευή, καλυμμένη και αυτή από παρόμοια μαύρα πανιά.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων επιλέχθηκε τα περιστρεφόμενα πάνελ να παραμείνουν σε ανακλαστική συνθήκη, με τα μαύρα πανιά τοποθετημένα επάνω τους, καθώς αυτή η προκαθορισμένη διάταξη στην οποία έχει σχεδιαστεί να βρίσκεται η Αίθουσα.

Μεταξύ της σκηνής και του ακροατηρίου υπάρχει μια απόσταση 2,5 μ., το Προσκήνιο. Ο χώρος αυτός αναφέρεται καθώς θα γίνει ξεχωριστή μνεία σε αυτόν αργότερα, αφού σε αρκετές περιπτώσεις μουσικοί, ορχήστρες ή ηθοποιοί τον χρησιμοποιούν ως κομμάτι της παράστασης τους. Δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό πλην του ότι βρίσκεται πάνω στο επίπεδο και όχι το κεκλιμένο τμήμα της Αίθουσας.



Εικόνα 2.2 Περιστρεφόμενα πάνελ σκηνής καλυμμένα με μαύρο πανί και ανακλαστικά πάνελ οροφής.

Ο χώρος του ακροατήριου, έχει εμβαδόν $416,6 \text{ μ}^2$ και κλίση $6,71^\circ$. Το μήκος του τμήματος αυτού είναι $22,4 \text{ μ.}$ και καταλαμβάνεται τμηματικά από καθίσματα που βρίσκονται σε προκαθορισμένη κατανομή. Αυτή διαμορφώνεται από μια κεντρική διάταξη και δυο πτέρυγες, με δυο διάδρομους να διαχωρίζουν τα τμήματα μεταξύ τους.

Κάθε σειρά αποτελείται από ανόμοιο αριθμό καθισμάτων και βρίσκεται σε διαφορετική υψομετρική απόσταση από τις υπόλοιπες. Αυτή διαμορφώνεται από το μήκος σειράς- ισόπεδου τμήματος επί της εφαπτομένης της κλίσης. Δημιουργώντας με αυτό το τρόπο τη συνθήκη όπου τα τελευταία καθίσματα παρακολουθούν από ύψος $2,69 \text{ μ.}$, σε σχέση με το ισόπεδο τμήμα του Προσκηνίου. Σε αντίθεση με τα του κεντρικού κορμού, τα καθίσματα στις πτέρυγες είναι τοποθετημένα με μια ελαφρά κλίση που εστιάζει προς το κεντρικό χώρο της σκηνής.

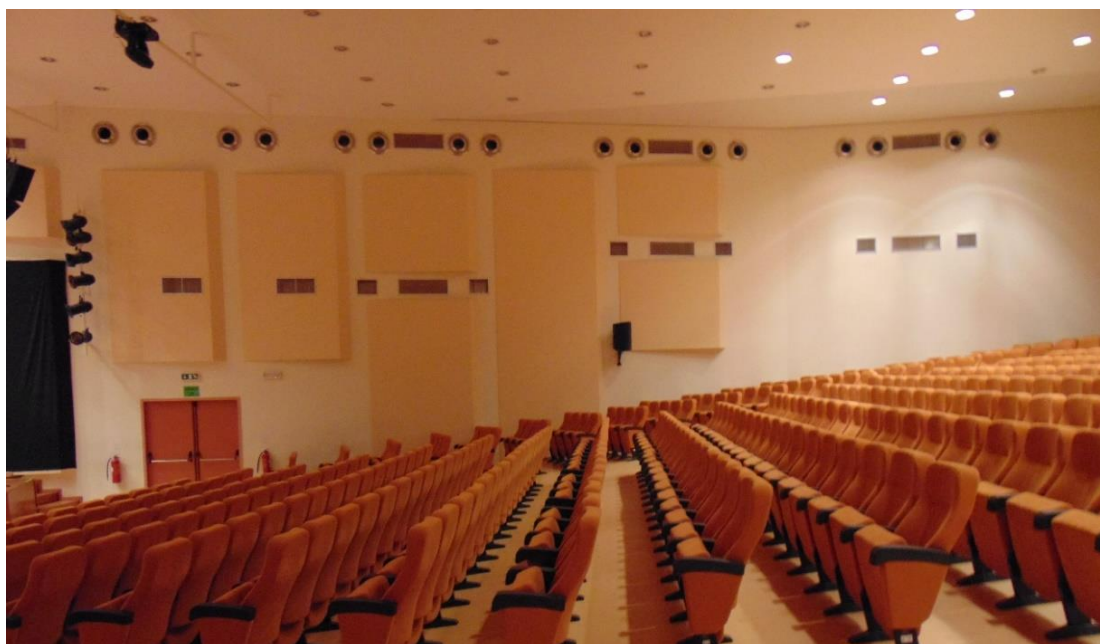
Η κατασκευή των καθισμάτων είναι η συνήθης που συναντάται σε μεγάλους χώρους Μουσικών εκδηλώσεων ή Θεατρικών παραστάσεων. Πρόκειται για αναδιπλωμένα καθίσματα με μια μέτρια προς ελαφριά επικάλυψη υφασμάτινης

ταπετσαρίας, για την οποία, όμως, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες όσον αφορά το είδος, ενώ τα μπράτσα είναι απλές πλαστικές κατασκευές.



Εικόνα 2.3 Ο χώρος του ακροατήριου, κεκλιμένο με την χωροταξική τοποθέτηση των καθισμάτων όπως φαίνεται από τη σκηνή.

Λόγω κάποιων τροποποιήσεων, στο τελευταίο κομμάτι της Αίθουσας έχουν τοποθετηθεί όλα τα μηχανήματα διαχείρισης των συστημάτων ήχου και φωτισμού, πιθανότατα για χρηστικούς και εκπαιδευτικούς λόγους. Για το λόγο αυτό έχουν αφαιρεθεί από τις δυο τελευταίες σειρές τα μισά καθίσματα εκ των δεξιών του κεντρικού τμήματος, επιτρέποντας την πρόσβαση σε αυτό το χώρο. Πιθανότατα μια τέτοια κίνηση επηρεάζει την ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας σε αυτό το σημείο καθώς μειώνεται το στοιχείο της απορρόφησης, δημιουργώντας ίσως πιο έντονο το στοιχείο της ανάκλασης.

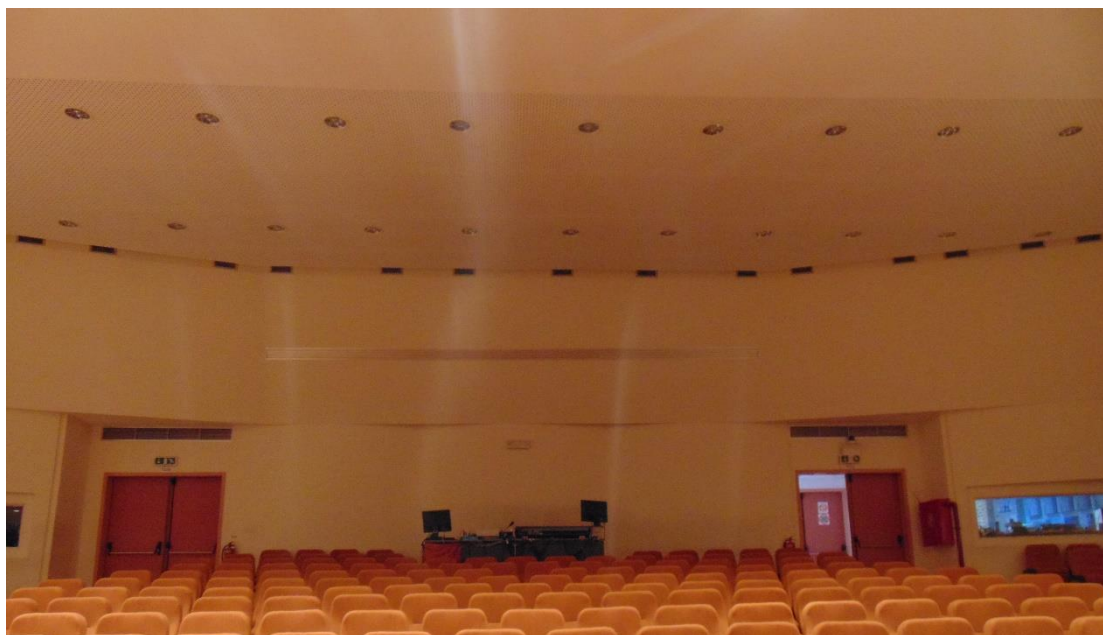


Εικόνα 2.4 Τα πέντε ανακλαστικά πάνελ στο χώρο του ακροατήριου.

Ένα πολύ ενδιαφέρον κατασκευαστικό στοιχείο της Αίθουσας βρίσκεται μετά την τελευταία σειρά καθισμάτων και πιο ψηλό επίπεδο της Αίθουσας. Πρόκειται για πέντε κυρτές επιφάνειες οι οποίες μοιράζονται κατά μήκος του τοίχου. Μια πίσω από κάθε πτέρυγα καθισμάτων και οι υπόλοιπες τρεις τοποθετημένες στο κέντρο. Έχουν μήκος 3m και μέγιστο πλάτος της κυρτότητας του φτάνει τα 30cm. Παρότι έχουν ίδιο χαρακτήρα και παίζουν τον ίδιο κατασκευαστικό ρόλο όσον αφορά την ακουστική, παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά την γεωμετρία και την κλίση την οποία εμφανίζουν. Αποτελούν μια ακόμα σημαντική κατασκευή για τη διάχυση της ηχητικής ενέργειας εντός της αίθουσας και η αναλυτική περιγραφή των διαφορών τους θα γίνει στο Κεφάλαιο 3.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των σημαντικών κατασκευών που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ακουστική, στο χώρο του ακροατηρίου επανεμφανίζονται τα ανακλαστικά πάνελ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Με παρόμοια χαρακτηριστικά όπως αυτών που βρίσκονται επί σκηνής και ελάχιστες αποκλίσεις που αφορούν κυρίως το μέγεθος τους. Επιπλέον, στην οροφή έχει τοποθετηθεί μια διάτρητη επιφάνεια η οποία ξεκινάει από το πίσω μέρος της Αίθουσας και εκτείνεται κατά μήκος πάνω από τις δυο πτέρυγες του ακροατηρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5.

Τέλος, παρατηρώντας την Εικόνα 2.3, στα δυο άκρα της Αίθουσας, στην κορυφή και πίσω από κάθε πτέρυγα καθισμάτων διακρίνονται δυο επιφάνειες τζαμιού. Πρόκειται για δωμάτια που χρησιμοποιούνται ως Control Rooms ώστε να έχουν οπτική επαφή με τον χώρο για την διαχείριση των συστημάτων φωτισμού και εξαερισμού.



Εικόνα 2.5 Οι κυρτές επιφάνειες στον πίσω τοίχο της. Στην οροφή διακρίνεται η διάτρητη επιφάνεια που καλύπτει μεγάλο μέρος του ακροατήριου.

2.2 Ακουστικές μετρήσεις

Οι ακουστικές μετρήσεις στην Αίθουσα διεξήχθησαν στις 5 Ιουνίου του 2020 εντός χρονικού διαστήματος 5 ωρών. Λόγω των υγειονομικών συνθήκων η πρόσβαση στο χώρο αποτέλεσε δύσκολο κομμάτι της διαδικασίας και είχε ως αντίκτυπο την αναπροσαρμογή της διαδικασίας. Καθώς ο χώρος χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς ήταν απαραίτητο πριν την έναρξη των μετρήσεων να αφαιρεθούν από τη σκηνή οποιαδήποτε αντικείμενα θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία. Οπότε όσα όργανα βρίσκονταν εντός του χώρου τοποθετήθηκαν στα

παρασκήνια. Τα περιστρεφόμενα πάνελ τοποθετήθηκαν σε ανακλαστική κατάσταση μαζί με τη επικάλυψη πανιών που έφεραν. Επίσης, τα συστήματα εξαερισμού και κλιματισμού απενεργοποιήθηκαν και υπήρξε ειδική μνεία ώστε να μην υπάρχουν σχολικές δραστηριότητες εντός των εγκαταστάσεων, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν με κάποιο τρόπο το τελικό αποτέλεσμα. Λόγω του όγκου της αίθουσας ο εξοπλισμός ήταν απαραίτητο κάθε φορά να μετακινείται στο σημείο καταγραφής. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένα σχολικό κάθισμα. Αυτή η βάση μετακινούνταν στο χώρο καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων σε καθένα από τα οκτώ σημεία μέτρησης που επιλέχθηκαν, για τα οποία θα γίνει σχετική αναφορά της διάταξης τους παρακάτω.

2.2.1 Εξοπλισμός

Ως μέσο ηχογράφησης και διαχείρισης των ηχητικών αρχείων των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής Dell inspiron 3583 με επεξεργαστή intel i5-8562U CPU και μνήμη RAM 8 GB. Σε αυτόν συνδέθηκε μια κάρτα ήχου Steinberg ur824 με οκτώ κανάλια εισόδου. Η συχνότητα δειγματοληψίας ρυθμίστηκε στα 48k Hz και το ψηφιακό βάθος στα 16 bit. Στην πρώτη είσοδο της Steinberg ur824 συνδέθηκε το μικρόφωνο Audio-technica AT4050/CM5 σε πανκατευθυντικό πολικό διάγραμμα, με τις επιλογές PAD στα -10dB και Low Cut να είναι απενεργοποιημένες.

2.2.2 Εκτέλεση ακουστικών μετρήσεων

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για τη ηχητική διέγερση της αίθουσας και τη δημιουργία κρουστικής απόκρισης ήταν το σκάσιμο μπαλονιών. Αυτός ο τρόπος έχει το πλεονέκτημα πως δεν απαιτεί τη μεταφορά μεγάλου εξοπλισμού, όπως πανκατευθυντικό ηχεία, στην Αίθουσα. Παρόλη όμως την αμεσότητα αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται μια αδυναμία κατά την οποία κάθε επανάληψη των μετρήσεων, τα χαρακτηριστικά της έντασης του συχνοτικού φάσματος και της

κατευθυντικότητα της ηχητικής ενέργειας αλλάζουν έως ένα βαθμό. Παρά τις διακυμάνσεις αυτές όμως η μέθοδος παραμένει έως και σήμερα μια από τις συνηθέστερες στη συλλογή κρουστικών αποκρίσεων (Barron, 2010)

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Ένα άτομο καθισμένο στο σημείο κρούσης κρατούσε το μπαλόνι σε ύψος 1,70 μ. με τέτοιον τρόπο ώστε καμία επιφάνεια του σώματός του να παρεμβαίνει στη διάδοση της ηχητικής ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο. Το σημείο κρούσης ήταν το κέντρο της σκηνής σε απόσταση 3,14 μ. από την άκρη της, ακολουθώντας τη φιλοσοφία τοποθέτησης των μουσικών επάνω στη σκηνή, ώστε ο ήχος να διαδίδεται ισορροπημένα προς το ακροατήριο. Επίσης, ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο ύψος για το μπαλόνι ήταν για προσομοιάσει την στάση ενός ερμηνευτή κατά τη διάρκεια μιας συναυλίας.



Εικόνα 2.6 Το σκαμπό απεικονίζει το σημείο κρούσης επάνω στη σκηνή.

Το μικρόφωνο μετακινούνταν κάθε φορά στο σημείο που είχε οριστεί από την αρχή ως ενδιαφέρον για καταγραφή. Η τοποθέτηση του γινόταν πίσω από το επιλεγμένο κάθισμα και σε ύψος περίπου 1,35 μ. με κλίση προς το κέντρο της σκηνής. Το συγκεκριμένο ύψος, αν και δεν αντιπροσωπεύει το πραγματικό ύψος του

συστήματος ακοής ενός ανθρώπου, καθώς απέχει 10 εκ., επιλέχθηκε ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος ένα μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας να απορροφηθεί από τα κατασκευαστικά υλικά του καθίσματος, πριν αυτή προλάβει να φτάσει στο μικρόφωνο. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλα τα επιλεγόμενα σημεία καταγραφής.



Εικόνα 2.7 Τοποθέτηση μικρόφωνο για τη θέση ΤΠ3.2.

Κύριος σκοπός ήταν να καλυφθεί όσον το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος της Αίθουσας. Με αυτό το τρόπο τα αποτελέσματα θα ήταν πιο ισορροπημένα, δημιουργώντας μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τι συμβαίνει ακουστικά στο σύνολο της. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί καλύτερες συνθήκες για τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου και ως συνέπεια για τη διαδικασία Ακουστοποίησης (Auralization). Έτσι, η κατανομή των θέσεων καταγραφής έγινε σε όλο τον χώρο, εστιάζοντας, όμως, παράλληλα και σε αρκετά σημεία που βρίσκονται γύρω από τη περιοχή ηχητικής διέγερσης, τη σκηνή.

Τα επιλεγόμενα, λοιπόν, σημεία καταγραφής είναι οκτώ και η ακριβής τοποθέτηση τους φαίνεται στην Εικόνα 2.8, που αποτελεί κάτοψη της Αίθουσας. Παρακάτω αναφέρεται η κωδική ονομασία κάθε θέσης, η οποία θα χρησιμοποιείται σε όλη τη διάρκεια της μελέτης, καθώς και πληροφορίες που την περιγράφουν αναφορικά με τα στοιχεία της και την πραγματική – κεκλιμένη – απόσταση από την πηγή.

- 1) **ΤΣκηνή:** Μπροστά από τη σκηνή σε απόσταση 4,5 μ.
- 2) **ΤΣκηνήπ:** Πίσω τμήμα σκηνής σε απόσταση 5,5 μ.
- 3) **T1.1:** Δεξιά πτέρυγα, 22^η σειρά, 1^ο κάθισμα, απόσταση 26,1 μ.
- 4) **T1.3:** Δεξιά πτέρυγα 2^η σειρά, 1^ο κάθισμα απόσταση 9,6μ.
- 5) **T2.2:** Κεντρική πτέρυγα 12^η σειρά, 11^ο κάθισμα 16 μ.
- 6) **T2.3:** Κεντρική πτέρυγα , 2^η σειρά, 3^ο κάθισμα 7,4 μ.
- 7) **T3.2:** Αριστερή πτέρυγα , 2^η σειρά, 4^ο κάθισμα 18,8 μ.
- 8) **T3.3:** Αριστερή πτέρυγα, 13^η σειρά , 2^ο κάθισμα 9,6 μ.

2.2.3 Ακουστικός χαρακτηρισμός εξοπλισμού

Για την συνέχεια της διαδικασίας, ήταν απαραίτητο ένα κομμάτι των μετρήσεων να λάβει χώρα στο Στούντιο LabMAT του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Ε.Κ.Π.Α. Αυτό αφορούσε την δημιουργία ενός ηχητικού αποτυπώματος του μικροφώνου, το οποίο θα χρησιμοποιούνταν στη συνέχεια, μέσω της διαδικασίας της αποσυνέληξης (deconvolution) ως «φίλτρο» για τη εξαγωγή των κρουστικών αποκρίσεων.

Οι επισκέψεις στο χώρο έγιναν τον Σεπτέμβριο του 2020 και συνολικά διήρκησαν 3 ώρες. Από το Στούντιο απομακρυνθήκαν όλα όσα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία, στο βαθμό που ήταν δυνατόν, όπως καθίσματα, τραπέζια, drum set κλπ., ώστε να είναι πλέον κατάλληλος για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ο εξοπλισμός για τη διαδικασία ήταν ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην Αίθουσα Συναυλιών. Η σημαντική διαφορά, όμως, αφορά τη πηγή που θα διεγείρει

τον χώρο, καθώς στη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το πανκατευθυντικό ηχείο Bruel & Kjaer 4296, Εικόνα 2.9. Η επιλογή της συγκεκριμένης πηγής θεωρήθηκε σωστή αφού στη συγκεκριμένη περίπτωση, θέλαμε οι μετρήσεις να είναι περισσότερο ελεγχόμενες, για στοιχεία αφορούσαν την κατευθυντικότητα αλλά και την ένταση του ήχου.



Εικόνα 2.9 Κάρτα ήχου Steinberg ur824 (πάνω) και προενισχυτής πανκατευθυντικού μεγάφωνου Bruel & Kjaer 4296 (κάτω).

Η διάταξη η οποία ακολουθήθηκε, ήταν η τοποθέτηση του πανκατευθυντικού μεγάφωνου στο κέντρο του Στούντιο και σε ύψος 1,5 μ., ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στη διάχυση του ήχου και αποφευχθεί το φαινόμενο των έντονων ανακλάσεων από τις επιφάνειες του τοίχου. Ο εξοπλισμός καταγραφής τοποθετήθηκε κοντά στο παράθυρο του Control Room. Πριν γίνει η τοποθέτηση του

μικροφώνου, έγινε έλεγχος στην πηγή για την οποία ρυθμίστηκε η ένταση στην οποία θα παράγει το ηχητικό σήμα στα 93-94 dB. (Long, 2005)



Εικόνα 2.10 Ποτενσιόμετρο σε απόσταση 1 μ. υπολογίζει τη στάθμη έντασης του μεγαφώνου.

Τελευταίο τοποθετήθηκε το μικρόφωνο Audio-technica AT4050/CM5 σε πανκατευθυντικό πολικό διάγραμμα, όπως ακριβώς είχε γίνει και στο πρώτο σκέλος των μετρήσεων. Η διάταξη του στο χώρο ήταν σημαντική, καθώς από αυτή εξαρτιόταν τα αποτελέσματα για τη διαδικασία της αποσυνέληξης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11 η απόσταση μεταξύ μικροφώνου και πλησιέστερου μεγαφώνου προέκυψε να είναι στα 2 μ., οτιδήποτε πιο μικρό δημιουργούσε προβλήματα ανάδρασης των δυο συστημάτων.

Ένα ακόμα στοιχείο, που ήταν απαραίτητο να προσεχθεί, ήταν να εντοπίσουμε την επιφάνεια που βρίσκονταν πιο κοντά στο μικρόφωνο. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να γνωρίζουμε κοιτώντας την κυματομορφή, από που προέρχονται οι πρώιμες

ανακλάσεις και πόσο χρόνο κάνουν για να φτάσουν σε αυτό. Εδώ ορίστηκε, ως τέτοια επιφάνεια το πάτωμα το οποίο έχει απόσταση 1.68 μ. από το μικρόφωνο, αλλά οι πρώτες ανακλάσεις θα χρειαστεί να διανύσουν την διπλάσια τιμή, δηλαδή 3.36 μ..



Εικόνα 2.11 Απόσταση μικροφώνου από ηχείο και από πάτωμα.

Η διαδικασία της προετοιμασία ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση του μικροφώνου στην πρώτη είσοδο της Steinberg ur824 και εν συνέχεια τη παραγωγή λευκού θορύβου από το πανκατευθυντικό ηχείο, στη προκαθορισμένη στάθμη έντασης των 94 dB, ώστε να ρυθμιστούν καταλλήλα οι στάθμες κέρδους της κάρτας ήχου. Η συχνότητα δειγματοληψίας ρυθμίστηκε στα 48kHz και η δυναμική ανάλυση στα 16 bit, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, όμοιος δηλαδή με αυτόν στην Αίθουσα Συναυλιών.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή γραμμικών και λογαριθμικών SineSweeps ήταν το Room EQ Wizard (REW). Παρήχθησαν γραμμικά

και λογαριθμικά SineSweeps των 10 και 15 sec. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των ηχητικών σημάτων ήταν το Reaper.

2.3 Ανάλυση Κρουστικών Αποκρίσεων

Υστέρα από την καταγραφή ήταν απαραίτητο να γίνει η επεξεργασία των ηχητικών σημάτων. Στην Εικόνα 2.12 καταγράφεται η διαδικασία που απαιτούνταν να ακολουθηθεί, ώστε να προκύψουν οι κρουστικές αποκρίσεις για κάθε επιλεγόμενο σημείο καταγραφής στην Αίθουσα. Το υπολογιστικό σύστημα που έγινε η επεξεργασία των ηχητικών σημάτων είναι στο ίδιο που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή τους. Το λογισμικό MATLAB ήταν το εργαλείο για την διαδικασία της αποσυνέλιξης (deconvolution) και για την απεικόνιση και εξαγωγή των ακουστικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Room EQ Wizard (REW). Τέλος, η στατιστική επεξεργασία των τιμών των στατιστικών παραμέτρων έγινε σε περιβάλλον Microsoft excel.

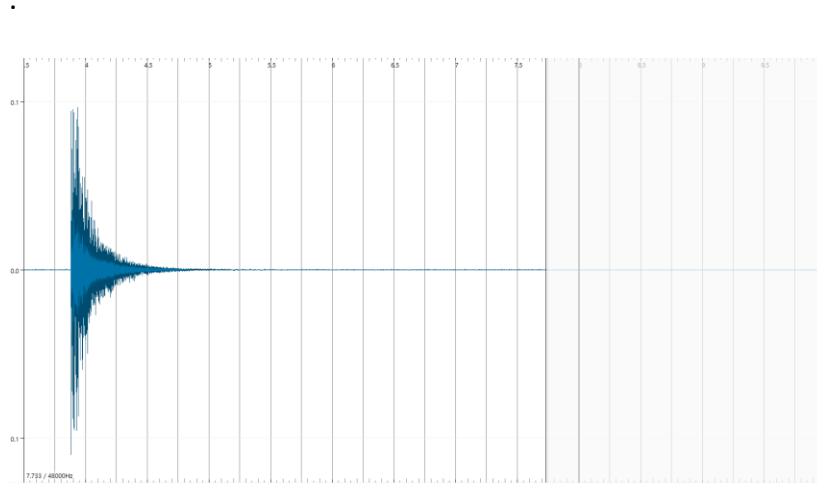
- | | |
|-----------------------|--|
| i. Αίθουσα Εκδηλώσεων | → BallonSweep (1) |
| ii. Studio LabMat | → Recorded Sweep – PreRecorded Sweep = MicIR (2) |
| iii. | → BallonSweep (1) – MicIR (2) = HallIR (3) |

Εικόνα 2.12 Στάδια επεξεργασίας ηχητικού σήματος για τη δημιουργία κρουστικής απόκρισης.

2.3.1 Επεξεργασία των ακουστικών μετρήσεων

Το πρώτο στάδιο αφορά τη πρώτη υποενότητα του Κεφαλαίου 2, που έγινε στην Αίθουσα Συναυλιών, κατά την οποία ως πηγή διέγερσης χρησιμοποιήθηκε το σκάσιμο των μπαλονιών. Για κάθε μια από τις επιλεγμένες θέσεις έγιναν τρεις επαναλήψεις, δημιουργώντας συνολικά 24 ηχητικά σήματα. Τα σήματα αυτά για να χρησιμοποιηθούν χρειαζόταν, μέσω της χρήσης ενός φίλτρου να αφαιρεθούν

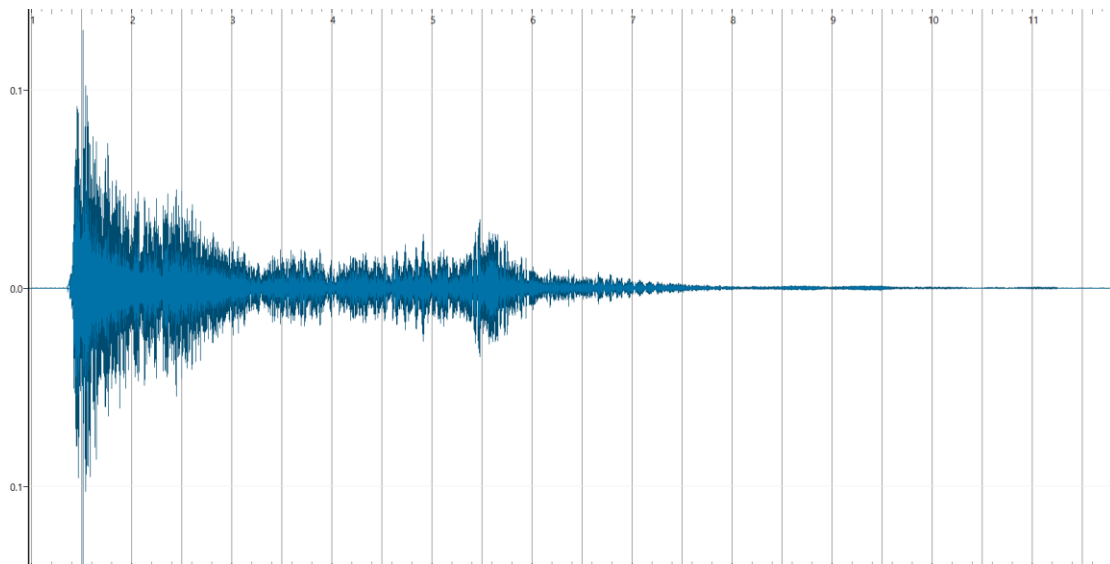
στοιχεία του μικροφώνου και προκύψουν οι κρουστικές αποκρίσεις κάθε θέσης. Ως σημείο αναφοράς των μετρήσεων χρησιμοποιείται η θέση ΤΠ2.2, η οποία βρίσκεται στο κέντρο της Αίθουσας και στην Εικόνα 2.13 απεικονίζεται η κυματομορφή της μετά την ηχητική διέγερση, πριν την επεξεργασία.



Εικόνα 2.13 Κυματομορφή της θέσης ΤΠ2.2 πριν από την διαδικασία της αποσυνέληξης.

Στο δεύτερο στάδιο, χρειαζόταν να γίνει ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών του μικροφώνου και για αυτό το λόγο οι μετρήσεις συνεχίστηκαν στο Στούντιο LabMAT. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν αυτή που επιγράφηκε στη δεύτερη υποενότητα του Κεφαλαίου 2 μέσω του πανκατευθυντικού ηχείου. Εδώ το στοιχείο της διέγερσης ήταν παραγόμενα SineSweeps, όπου για το καθένα έγιναν τρεις επαναλήψεις. Δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές εκδοχές των SineSweeps:

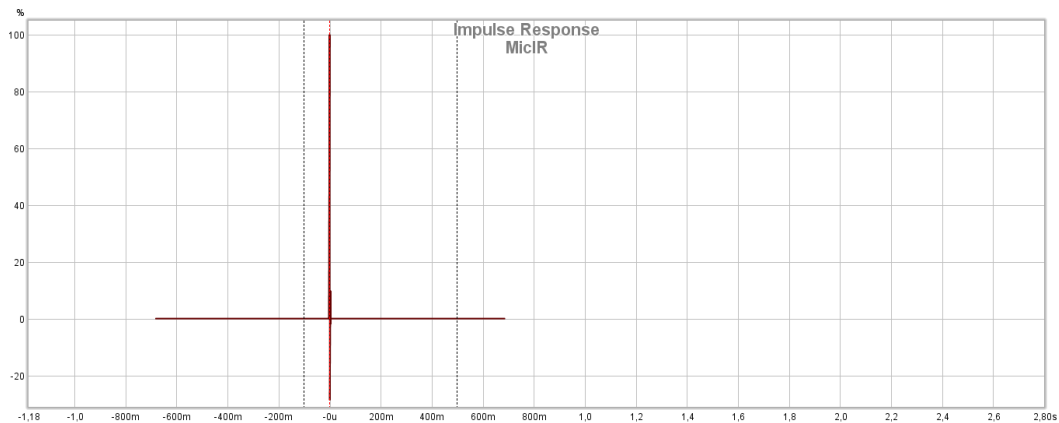
- Linear SineSweep 20-20k Hz διάρκειας 10sec.
- Logarithmic SineSweep 20-20k Hz διάρκειας 10 sec.
- Linear SineSweep 20-20k Hz διάρκειας 15 sec.
- Logarithmic SineSweep 20-20k Hz διάρκειας 15 sec.



Εικόνα 2.14 Κυματομορφή καταγεγραμμένου *Linear SineSweep*.

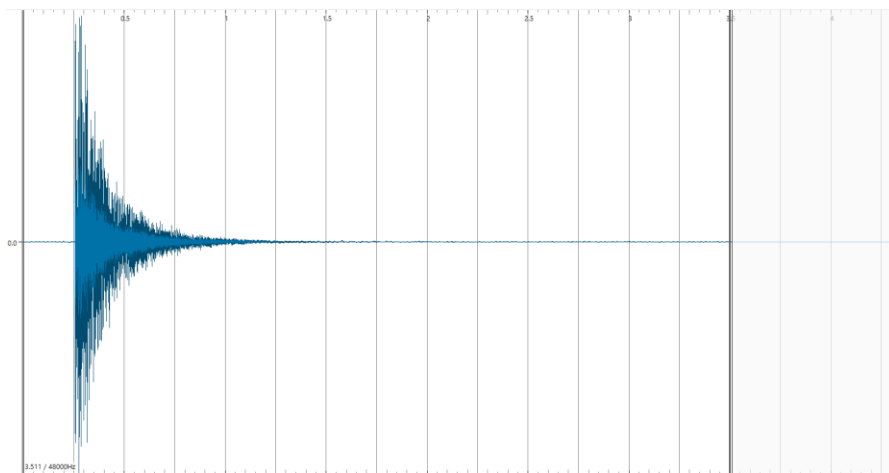
Η δημιουργία των SineSweeps έγινε μέσω του Generator που παρέχει το λογισμικό REW. Καθώς το συγκεκριμένο δεν διαθέτει προηχογραφημένες σαρώσεις, αλλά δημιουργεί εκ νέου καινούργιες, πιθανώς κάποιες εκ των καταγράφων να έχουν μικρές αποκλίσεις. Στην Εικόνα 2.14 παρουσιάζεται η κυματομορφή μιας εκ των γραμμικών σαρώσεων που έγιναν.

Η συγκεκριμένη διαδικασία ήταν απαραίτητη ώστε να δημιουργηθεί το «φίλτρο» που απαιτούνταν για την δημιουργία των κρουστικών αποκρίσεων της Αίθουσας Συναυλιών. Μέσω της διαδικασίας της αποσυνέληξης, που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό MATLAB, αφαιρέθηκε από το ηχογραφημένο γραμμική σάρωση, το SineSweep που παρήγαγε το REW. Το αποτέλεσμα αυτού ήταν το MicIR, Εικόνα 2.15, δηλαδή η κρουστική απόκριση του μικροφώνου στην οποία περιέχονταν τα ακουστικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 2.15 Η Κυματομορφή κρουστικής απόκρισης του Μικροφώνου (MicIR).

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της διαδικασίας γίνεται πάλι με τη χρήση της αποσυνέλιξης στο λογισμικό MATLAB. Από τα καταγεγραμμένα ηχητικά σήματα στη Αίθουσα Συναυλιών αφαιρέθηκε το MicIR, εξάγοντας την τελική κρουστική απόκριση για κάθε ένα από τα σημεία. Στην Εικόνα 2.16, φαίνεται η κυματομορφή της θέσης TP2.2 ύστερα από την επεξεργασία που υπέστη.



Εικόνα 2.16 Κυματομορφή Κρουστικής Απόκρισης θέσης TP2.2 μετρά την αποσυνέλιξη.

Ολοκληρώνοντας, τη σημαντική διαδικασία της αποσυνέλιξης, για τη δημιουργία των κρουστικών αποκρίσεων, είναι πλέον εφικτό να διακρίνουμε τις ακουστικές παραμέτρους, μέσω του λογισμικού REW. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται οι

τιμές και για τις τρεις σαρώσεις των παραμέτρων T30, EDT, C80 και D50 για τη θέση ΤΠ2.2.

T30(s)	Τοποθεσία Μικροφώνου ΤΠ 2.2					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μπαλόνι #1	1,42	1,302	1,287	1,402	1,436	1,376
Μπαλόνι #2	1,473	1,307	1,226	1,368	1,426	1,324
Μπαλόνι #3	1,483	1,318	1,122	1,33	1,433	1,386
Μ.Ο.	1,459	1,309	1,245	1,367	1,431	1,362
Τυπική απόκλιση	0,03	0,027	0,019	0,057	0,006	0,038
JND	0,073	0,065	0,062	0,068	0,072	0,068
Απόκλιση σε JND	0,41	0,415	0,306	0,838	0,083	0,558

Πίνακας 2.1 Υπολογισμός της παραμέτρου T30 για τη θέση ΤΠ2.2.

EDT(s)	Τοποθεσία Μικροφώνου ΤΠ 2.2					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μπαλόνι #1	1,231	0,734	0,887	1,004	1,028	0,976
Μπαλόνι #2	1,274	0,974	0,959	1,157	0,942	0,973
Μπαλόνι #3	1,242	0,965	0,981	1,11	0,976	0,902
Μ.Ο.	1,249	0,891	0,942	1,09	0,982	0,95
Τυπική απόκλιση	0,018	0,111	0,04	0,063	0,035	0,034

JND	0,095	0,053	0,061	0,049	0,0458	0,049
Απόκλιση σε JND	0,189	2,094	0,655	1,285	0,764	0,693

Πίνακας 2.2 Υπολογισμός της παραμέτρου EDT για τη θέση ΤΠ2.2.

C80(dB)	Τοποθεσία Μικροφώνου ΤΠ 2.2					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μπαλόνι #1	-2,38	5,18	2,82	3,11	3,47	2,47
Μπαλόνι #2	-5,09	2,41	2,27	3,27	3,24	3,13
Μπαλόνι #3	-4,97	2,34	2,37	3,27	3,88	3,92
Μ.Ο.	-4,147	3,31	2,487	3,217	3,53	3,173
Τυπική απόκλιση	1,013	1,25	1,323	0,239	0,075	0,265
JND	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Απόκλιση σε JND	1,013	1,25	1,323	0,239	0,075	0,265

Πίνακας 2.3 Υπολογισμός της παραμέτρου C80 για τη θέση ΤΠ2.2.

D50(%)	Τοποθεσία Μικροφώνου ΤΠ 2.2					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μπαλόνι #1	29,9	71,9	41,4	49,9	55,8	42,3
Μπαλόνι #2	19,2	49,7	46	40,8	52,8	44,9
Μπαλόνι #3	19,5	52,8	46,2	49	51,5	47,1
Μ.Ο.	22,87	58,13	44,53	46,56	53,36	50,03

Τυπική απόκλιση	5,282	4,975	9,816	2,217	4,094	1,801
JND	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Απόκλιση σε JND	1,056	0,995	1,963	0,4434	0,818	0,36

Πίνακας 2.4 Υπολογισμός της παραμέτρου D50 για τη θέση ΤΠ2.2.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε μια από τις οκτώ θέσεις στην Αίθουσα. Οι τιμές που θα αναφέρονται από δω και στο εξής θα αφορούν τον μέσο όρο των τριών επαναλήψεων κάθε θέσης, όπως έγινε και για τη θέση ΤΠ2.2. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι ακουστικές παράμετροι T30, EDT, C80 και D50 για κάθε μια από αυτές, από τις οποίες προκύπτει και η μέση τιμή για το Σύνολο της Αίθουσας. Στο Κεφάλαιο 3, θα γίνει μια συνολική παρουσίαση των τιμών αυτών και σύγκριση των θέσεων ανά παράμετρο, επιτρέποντας να διακρίνουμε τις ιδιαιτερότητες που προκύπτουν ανά θέση.

2.3.2 Ακουστικά Χαρακτηριστικά Αίθουσας

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με τιμές για κάθε θέση καταγραφής, για τις ακουστικές παραμέτρους T30, EDT, C80 και D50. Η πρώτη αναφορά τον χρόνο αντήχησης T30, η οποία αποτελεί πολύ σημαντικό μέγεθος για την κατανόηση της συμπεριφοράς της αίθουσας, όσον αφορά το στοιχείων των ανακλάσεων σε σχέση με τον χρόνο. Διακρίνονται οι χρόνοι για κάθε μια ξεχωριστά, οι οποίοι μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, αλλά και με το συνολικό μέσο ορό.

T30(s)	Σύνολο Αίθουσας					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
ΤΣκηνή	1,535	1,312	1,282	1,426	1,417	1,294
ΤΣκηνήπ	1,491	1,24	1,231	1,316	1,33	1,206
ΤΠ 1.1	1,502	1,294	1,286	1,411	1,476	1,466
ΤΠ 1.3	1,339	1,239	1,19	1,291	1,349	1,276
ΤΠ 2.2	1,459	1,309	1,245	1,367	1,431	1,362
ΤΟ 2.3	1,523	1,252	1,275	1,321	1,358	1,26
ΤΠ 3.2	1,422	1,33	1,289	1,374	1,423	1,374
ΤΠ 3.3	1,543	1,249	1,207	1,298	1,34	1,246
Μ.Ο.	1,484	1,278	1,251	1,351	1,391	1,31
Τυπική απόκλιση	0,077	0,036	0,04	0,051	0,053	0,081
JND	0,074	0,064	0,063	0,068	0,07	0,066
Απόκλιση σε JND	1,032	0,57	0,632	0,75	0,77	1,24

Πίνακας 2.5 Υπολογισμός της παραμέτρου T30 για το σύνολο της Αίθουσας.

Ως μια εναλλακτική ακουστική χρονική παράμετρος παρουσιάζεται ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης EDT. Για τις αίθουσες συναυλιών το EDT συχνά θεωρείται ακριβέστερο μέτρο

απόδοσης της αίθουσας από ότι ο χρόνος αντήχησης T, το οποίο είναι και το μέγεθος που χρησιμοποιείται περισσότερο από μαθηματικούς τύπους για τους υπολογισμών άλλων ακουστικών παραμέτρων. Επίσης παρατηρείται η τιμή του EDT συχνά βρίσκεται να ποικίλλει σε μια αίθουσα, κάτι που σπάνια συμβαίνει με το T.

EDT(s)	Σύνολο Αίθουσας					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Σκηνή	1,901	1,063	1,229	0,1	0,916	0,929
ΤΣκηνηπ	1,412	0,725	1,005	0,899	0,861	0,869
ΤΠ 1.1	0,961	0,854	0,831	0,731	0,886	0,813
ΤΠ 1.3	1,466	0,972	1,14	1,364	1,166	1,142
ΤΠ 2.2	1,249	0,891	0,942	1,09	0,982	0,95
ΤΟ 2.3	1,256	0,942	0,875	1,248	1,139	0,938
ΤΠ 3.2	1,02	1,03	1,024	1,067	1,015	0,917
ΤΠ 3.3	1,079	1,072	1,215	1,091	0,997	0,958
Μ.Ο.	1,293	0,944	1,33	1,061	0,995	0,947
Τυπική απόκλιση	0,291	0,126	0,153	0,191	0,124	0,124
JND	0,065	0,047	0,052	0,053	0,05	0,047
Απόκλιση σε JND	4,503	2,67	2,97	3,603	2,484	2,62

Πίνακας 2.6 Υπολογισμός της παραμέτρου EDT για το σύνολο της Αίθουσας.

Κρίθηκε απαραίτητο η λεπτομερής παρουσίαση των τιμών της ακουστική παράμετρο C80 που προκύπτουν για κάθε σημείο εντός του χώρου. Σε αυτήν εξετάζεται πόσο διαυγής είναι οι μουσικές φράσεις και ευκρινής η αναγνώριση των μουσικών λεπτομερειών. Μέσω του πίνακα μπορεί να γίνει εύκολα η διάκριση των διαφορών ανά θέση και να συγκριθούν σημεία που παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις.

C80(dB)	Σύνολο Αίθουσας					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Σκηνή	2,637	1,312	1,282	1,426	1,417	1,294
ΤΣκηνηπ	5,557	7,023	7,7	7,093	7,37	6,74
ΤΠ 1.1	2,35	5,103	4,837	5,787	4,377	3,847
ΤΠ 1.3	4,27	4,127	4,327	3,747	4,287	4,463
ΤΠ 2.2	-4,147	3,31	2,487	3,217	3,53	3,173
ΤΟ 2.3	3,753	4,537	5,027	3,007	3,29	5,55
ΤΠ 3.2	1,55	1,547	-1,037	2,877	4,127	3,233
ΤΠ 3.3	3,683	1,81	1,747	2,17	5,61	6,863
Μ.Ο.	2,457	4,04	3,707	4,051	4,824	4,896
Τυπική απόκλιση	2,842	1,849	2,499	1,63	1,433	1,506
JND	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Απόκλιση σε JND	2,842	1,849	2,499	1,63	1,433	1,506

Πίνακας 2.7 Υπολογισμός της παραμέτρου C80 για το σύνολο της Αίθουσας.

Παρόμοια λογική έχει και η παρουσίαση των τιμών για την παράμετρο D50 σε αναλυτικό πίνακα για κάθε θέση. Μπορεί να εξεταστεί το ποσοστό αντίληψης της ομιλίας που παρουσιάζεται μέσα στο συχνотικό φάσμα που μας ενδιαφέρει, δηλαδή από 250 Hz έως 1k Hz. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί τι ρόλο παίζει η απόσταση σε σχέση με την πηγή και πως αυτή η σχέση αποτυπώνεται ως μέγεθος. Τέλος διακρίνεται σε ποια σημεία υπάρχει σοβαρό πρόβλημα αντίληψης, σε βαθμό που μπορεί να γίνει οριακά αδύνατη η κατανόηση της ομιλίας.

D50(%)	Σύνολο Αίθουσας					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Σκηνή	52,33	51,73	60,57	53,8	64,8	59,27
ΤΣκηνηπ	48,57	48,37	75,87	73,5	75,6	70,47
ΤΠ 1.1	37,83	51,73	50,67	49,6	49	47,37
ΤΠ 1.3	57,8	54,2	59,5	61,07	60,8	63,53
ΤΠ 2.2	22,87	58,13	44,53	46,57	53,37	50,03
ΤΟ 2.3	57,7	48,13	54,73	51,07	50,8	62,77
ΤΠ 3.2	9,9	41,77	32,47	51,7	55,2	53,5
ΤΠ 3.3	41,67	32,47	37,57	39,5	67,67	75,97
Μ.Ο.	41,08	48,32	51,99	53,35	59,65	60,36
Τυπική απόκλιση	16,85	9,92	13,44	9,98	9,73	11,18
JND	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Απόκλιση σε JND	3,37	1,984	2,688	1,996	1,946	2,236

Πίνακας 2.8 Υπολογισμός της παραμέτρου D50 για το σύνολο της Αίθουσας.

Οντάς μια Αίθουσα που προορίζεται αρχικά για συναυλίες, έχει πολύ ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τη παράμετρο C80 και να διακρίνουμε τη συμπεριφορά της ανά θέση. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για τη θέση ΤΣκηνηπ, που βρίσκεται επάνω στη σκηνή και η οποία σχεδόν σε ολόκληρο το συχνотικό της εύρος αντιλαμβάνεται τον ήχο με ευκρίνεια των 7 dB. Αυτό σημαίνει ότι στο συγκεκριμένο περιβάλλον υπάρχει πιο έντονα το στοιχείο της ανάκλασης, κάτι το οποίο είναι αρκετά φυσιολογικό καθώς περικλείεται από αρκετές επιφάνειες. ενώ η θέση που παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές , για τη παράμετρο C80, είναι η ΤΣκηνη, η οποία βρίσκεται μπροστά από τη πρώτη σειρά καθισμάτων. Σε όλο συχνотικό εύρος έχει

τιμή κάτω των 1,5 dB, πλην των 125 Hz. Ο μέσος όρος, για το σύνολο των θέσεων στο συχνοτικό εύρος που μελετήθηκε ξεκινάει από 2,46 dB έως 4,9 dB, με τις περισσότερες τιμές να βρίσκονται γύρω στα 4 dB.

Ως εναλλακτική οπτική, όπου η Αίθουσα φιλοξενεί ομιλίες και παρουσιάσεις, μπορούμε να δούμε τη παράμετρο D50. Παρατηρώντας τις μέσες τιμές για τις συχνοτικές ζώνες 250 Hz – 1k Hz, καθώς μέσα σε αυτές συμπεριλαμβάνεται η ανθρώπινη ομιλία, φαίνεται ότι η διακριτότητα του χώρου κυμαίνεται από 48,32 % έως 53,35 %. Αυτό δηλώνει ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από μέτρια έως καλή αντιληπτότητα της ομιλίας. (Anzy, 2016) Οι θέσεις που ξεπερνούν τον μέσο όρο και έχουν την καλύτερη κατανόηση είναι οι ΤΠ1.3 και ΤΣκηνη, οι οποίες μπαίνουν οριακά στο φάσμα της αρκετά καλής αντίληψης της ομιλίας. Κάτι τέτοιο προφανώς οφείλεται στην απόσταση που έχουν από την πηγή, 9,6 μ. και 5,5 μ. αντίστοιχα, χωρίς όμως να ξεπερνούν τα ποσοστά της θέσης ΤΣκηνηπ που είναι κοντά στο 75%.

Από την άλλη, κάποιες θέσεις που είναι αρκετά απομακρυσμένες, όπως η ΤΠ3.3 φαίνεται ότι αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα, καθώς σε συχνοτικές περιοχές των 500 Hz και 1k Hz δεν ξεπερνούν το 40 %. Αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές αυτή χαρακτηρίζεται από αρκετά φτωχή αντίληψη της ομιλίας. Ένα συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πέρα από την απόσταση, παίζει σημαντικό ρόλο αν η θέση βρίσκεται κοντά σε κάποια ανακλαστική επιφάνεια, που θα μπορούσε να επηρεάσει σε κάποιο βαθμό το μέγεθος της διακριτότητας.

Συνολικά, όμως, φαίνεται ότι οι τιμές για κάθε μια από τις παραμέτρους που εξετάζουμε εδώ, βρίσκονται μέσα σε επιθυμητά πλαίσια. Η μεγάλη απόκλιση που παρατηρείται σε παραμέτρους όπως C80 και D50, διαμορφώνεται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η απόσταση θέσης - πηγής, αλλά και ο τρόπος με τον οποίον η ηχητική ενέργεια προσεγγίζει αυτό το σημείο. Για παράδειγμα, βλέποντας τις θέσεις ΤΠ1.3 και ΤΠ3.3, οι οποίες έχουν ίδια απόσταση από την πηγή, να μοιράζονται πολύ διαφορετικές τιμές σε ευκρίνεια και διακριτότητα. Επίσης, σημεία που βρίσκονται κοντά σε αρκετές επιφάνειες αλλά με μεγάλη απόσταση από τη πηγή, όπως η ΤΠ1.1, βιώνουν έντονη ανακλαστική συμπεριφορά, σε βαθμό που μειώνεται η ευκρίνεια του ήχου, σε αντίθεση με σημεία που βρίσκονται στο κέντρο της Αίθουσας, ΤΠ2.2, η οποία έχει ελάχιστη απόκλιση με την μέση τιμή του χώρου.

3. Ψηφιακή προσομοίωση και ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών της Αίθουσας

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του υπολογιστικού γεωμετρικού μοντέλου στο λογισμικό CATT Acoustic. Θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου με την οποία κατασκευάστηκαν τα κύρια στοιχεία που απαρτίζουν την Αίθουσα και παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ακουστικής δραστηριότητας. Επιπλέον, παρατίθενται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη βαθμονόμηση και πληροφορίες για τα κατασκευαστικά υλικά του χώρου.

Η αρχική κατασκευή του μοντέλου βασίστηκε στην αρχιτεκτονική κάτοψη της αίθουσας, η οποία είχε σχεδιαστεί σε κλίμακα 1:100. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στον φυσικό χώρο, παρατηρήθηκε μια μικρή απόκλιση που αφορούσε τις κλίσεις κάποιων τοιχωμάτων στο περιβάλλοντα χώρο του ακροατήριου, σε σχέση με αρχιτεκτονική κάτοψη. Αποφασίστηκε για τη τελική διαμόρφωση πως ήταν σωστό να μοντελοποιηθεί η εκδοχή της φυσικής αίθουσας και όχι βάση του πρωτότυπου αρχιτεκτονικού σχεδίου του μοντέλου.

Λόγω της αδυναμίας του αρχιτεκτονικού σχεδίου να παρουσιάσει σημαντικές πληροφορίες, όπως το ύψος για όλες τις κατασκευές της αίθουσας, έγινε χρήση αποστασιόμετρου λέιζερ και μέτρου ώστε να καλυφθούν αυτές οι βασικές ανάγκες. Θα ήταν φρόνιμο να πούμε ότι λόγω του μεγάλου όγκου της αίθουσας, κάποια στοιχεία ήταν αδύνατο να υπολογιστούν με μεγάλη ακρίβεια, όπως για παράδειγμα τα ύψη των πάνελ ή στοιχεία που βρίσκονταν στην οροφή της Αίθουσας. Για τον λόγο αυτό όλα τα στοιχεία έχουν υπολογισθεί κατά προσέγγιση και με μια πιθανή απόκλιση των 5 εκ., όσον αφορά το ύψος, χρησιμοποιώντας ως μέτρο σύγκρισης την οροφή.

3.1 Σχεδιασμός Μοντέλου Αίθουσας

Η διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου στο λογισμικό CATT Acoustic γίνεται σε καρτεσιανό επίπεδο τριών διαστάσεων. Ως σημείο A(0,0) τοποθετήθηκε το πίσω μέρος της σκηνής με τον άξονα y να χωρίζει το μοντέλο σε δυο όμοια τμήματα, λόγω της συμμετρίας του. Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα της κατοπτρικής μοντελοποίησης, δηλαδή τη κατασκευή ενός τμήματος της Αίθουσας που συμπληρώνεται από το είδωλο της. Έτσι, λοιπόν, σχεδιάστηκε η μισή κατά μήκος αίθουσα και μέσω της εντολής MIRROR διαμορφώθηκε ο συνολικός χώρος προσομοίωσης. Αυτή η δυνατότητα μειώνει τον χρόνο κατασκευής και υπολογισμών στο μισό.

Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης το μοντέλο υπέστη αρκετές τροποποιήσεις έως ότου φτάσει στο τελικό αποτέλεσμα που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική. Κάποιες τροποποιήσεις αφορούσαν την γεωμετρία του χώρου και πιο συγκεκριμένα τους τοίχους που βρίσκονταν γύρω από τον περιβάλλοντα χώρο του ακροατηρίου. Η τάση που έχουν να συγκλίνουν, μαζί με την ταυτόχρονη καθοδική κλίση του δαπέδου δημιουργούσε προβλήματα αναδιπλώσεων των επιφανειών. Η λύση ήταν η απλοποίηση της γεωμετρίας των τοιχωμάτων, παραλείποντας δυο μικρές γωνίες που σχημάτιζαν λίγο πριν την κορυφή, και οι οποίες δεν επηρεάζουν στο τελικό αποτέλεσμα.

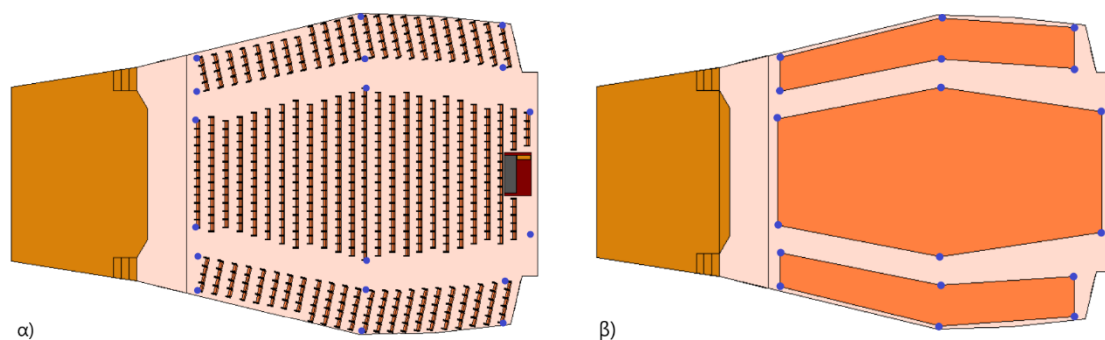
Ένα ακόμα ζήτημα που παρουσιάστηκε, αφορούσε την ένωση τοίχου και οροφής στο πίσω μέρος της Αίθουσας, πάνω από κάθε πτέρυγα καθισμάτων. Τα στοιχεία που βρίσκονταν σε αυτό το σημείο, καθώς ήταν αυτόνομες τραπέζιες κατασκευές, ήταν δύσκολο να ακολουθήσουν κατά μήκος τη πορεία του τοίχου και αρκετές φορές ξεπερνούσαν τα όρια της Αίθουσας. Για το λόγο αυτό, μετά από αρκετές εναλλαγές εντοπίστηκε το πρόβλημα και αφαιρέθηκε από τη κατασκευή ένα κομμάτι των 2,4 εκ.. Η τιμή αυτή βρέθηκε προσεγγιστικά μετά από συνεχής πειραματισμούς, καθώς ήταν δύσκολο να εντοπιστεί με μαθηματικές πράξεις.

Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία τα οποία θεωρήθηκαν σημαντικότερες κατασκευές της Αίθουσας. Αναφέρεται η φιλοσοφία με

την οποία σχεδιάστηκαν και τα προβλήματα που προέκυψαν καθ' όλη τη διαδικασία. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός λειτουργικού και ξεκάθαρα, σε δομή, μοντέλου. Δέχεται εύκολα εσωτερικές αλλαγές και τροποποιήσεις, οι οποίες θα φανούν χρήσιμες για την κατανόηση της Αίθουσας σε διάφορες συνθήκες, όπως θα φανεί στη συνέχεια, Τέλος, έχει απλοποιηθεί όσο χρειάζεται και για αυτό το λόγο έχει αρκετά μικρή διάρκεια υπολογισμών της τάξης των 10 sec.

3.1.1 Σχεδιασμός Καθισμάτων

Η αρχική μοντελοποίηση των καθισμάτων του ακροατήριου έγινε με μιμητική διάθεση, προσεγγίζοντας όσο γίνεται τη φυσική τους γεωμετρία. Αυτή διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε ένα από τα καθίσματα και με την αντίστοιχη κλίση του σε σχέση με τους κεντρικούς άξονες χ'γ'. Αποδείχτηκε, όμως, ότι μια τέτοια προσέγγιση δημιουργούσε δυσκολίες αρχικά στο στάδιο της βαθμονόμησης, καθώς ο όγκος των πληροφοριών που απαιτούνταν ήταν αρκετά μεγάλος με αποτέλεσμα να αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό ο χρόνος των υπολογισμών. Εν συνεχεία, ένα άλλο πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν ότι αυτή η σχεδιαστική μέθοδος δεν επέτρεπε την παρατήρηση της κατανομής της ενέργειας στο χώρο του ακροατήριου μέσω του Audience mapping στο CATT/TUCT.

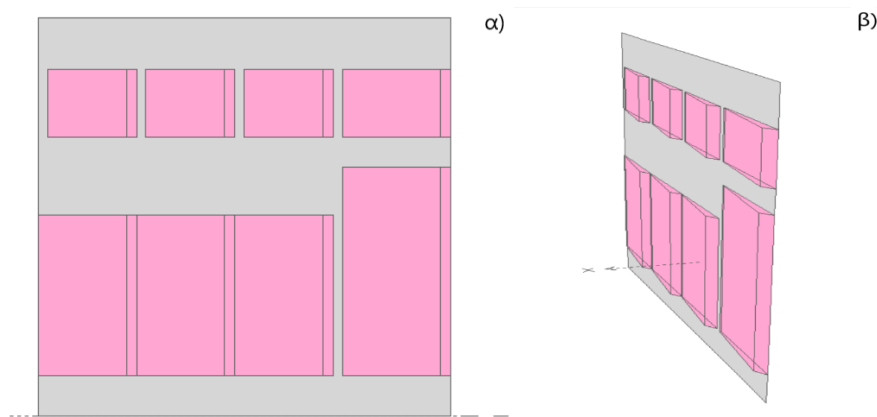


Εικόνα 3.1 Μοντελοποίηση καθισμάτων (α) σύμφωνα με τη φυσική τους γεωμετρία και (β) ως ενιαίες επιφάνειες ακροατηρίου.

Συνέπεια αυτού ήταν η αναθεώρηση του σχεδιασμού των καθισμάτων. Η προσέγγιση η οποία θα επέτρεπε στις προαναφερθέντες λειτουργίες να ανταποκριθούν ήταν η αντικατάσταση των μεμονωμένων καθισμάτων με τρεις ενιαίες επιφάνειες σχήματος τραπεζίου συγκείμενων διαστάσεων. Για να προκύψει ο συγκεκριμένος σχεδιασμός και η γεωμετρία των επιφανειών αυτών, λήφθηκαν υπόψη οι κορυφές των καθισμάτων που βρίσκονταν σε καίρια σημεία ανά διάταξη. Πρόκειται για την πρώτη, την ενδιάμεση και την τελευταία σειρά καθισμάτων, που όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3.1, αποτελούν σημαντικά σημεία για την δημιουργία της περιμέτρου των καθισμάτων. Ακριβώς η ίδια προσέγγιση ακολουθήθηκε και για τις πτέρυγες.

3.1.2 Σχεδιασμός Πάνελ

Όλα τα πάνελ εντός του μοντέλου έχουν σχεδιαστεί ως αυτόνομα γεωμετρικά σχήματα που εφάπτονται επάνω στους μοντελοποιημένους τοίχους της Αίθουσας. Τα περιστρεφόμενα, που μπορούν να αλλάζουν συνθήκη (απορροφητικά / ανακλαστικά), αποτελούν σημαντικό χαρακτηριστικό της αίθουσας, καθώς επιτρέπουν τη δημιουργία διαφόρων καταστάσεων για τη τροποποίηση της ακουστικής συμπεριφοράς εντός της Αίθουσας. Αναφορικά με τα τοποθετημένα πανιά επάνω στη σκηνή και τον τρόπο που θα μοντελοποιούνταν, αποφασίστηκε να μην δημιουργηθούν επιπλέον κατασκευές, αλλά να αντικατασταθεί το υλικό front plane από κάθε πάνελ που ήταν καλυμμένο με πανί μέσα στην αίθουσα από Plasterboard (γυψοσανίδα) σε Light-Medium Curtain.



Εικόνα 3.2 Μοντελοποίηση πανελ πανω στη σκηνη, περιστρεφομενα και μη, σε ανακλαστικη συνθηκη.

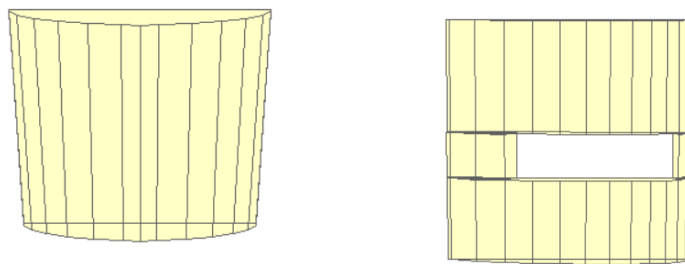
3.1.3 Σχεδιασμός Κυρτών επιφανειών

Η σχεδίαση των κυρτών επιφανειών εντός του CATT Acoustic αποτελεί μια ιδιαίτερη και απαιτητική διαδικασία, καθώς υπολογιστικά προσεγγίζονται από ένα πλήθος επίπεδων επιφανειών, ο αριθμός των οποίων δεν είναι συγκεκριμένος και ορίζεται από δυο παραμέτρους, τις δυνατότητες του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιείται και τις απαιτήσεις που έχει ο σχεδιαστής από το μοντέλο. Στη συγκεκριμένη αίθουσα οι κυρτές επιφάνειες σχεδιάστηκαν κατά ανάγκη με δυο διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Η πρώτη εκδοχή, η οποία συναντάται τρεις φορές μέσα στο μοντέλο, αποτελείται από δώδεκα panels ιδίων διαστάσεων που βρίσκονται σε κλίση 15° μοιρών μεταξύ τους. Η δεύτερη εκδοχή, συναντάται δυο φορές και είναι μια αποσύνθεση της πρώτης καθώς, υποχρεούται στο εσωτερικό της να φιλοξενεί τμήμα μιας άλλης κατασκευής, το τζάμι του Control Room.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος ο αριθμός επιφανειών ανά πάνελ, ήταν αποτέλεσμα των προκαθορισμένων διαστάσεων την κατασκευής, όπου το μέγιστο πλάτος της δεν μπορούσε να ξεπερνάει τα 30 εκ., και η επιλογή μοιρών που θα ήταν εύκολες για τη διαχείριση των υπολογισμών. Μια διαφορετική προσέγγιση με

περισσότερα πάνελ ανά κυρτότητα πιθανότατα δεν θα πρόσδιδε ακρίβεια στο μοντέλο ενώ θα απορροφούσε μεγάλο μέρος τη υπολογιστικής ισχύος.

Μια μικρή παρατήρηση, όσον αφορά τις επιφάνειες που βρίσκονται μπροστά από το Control Room. Η διαφορά τους, πλην της προσθήκης sub-plane, οφείλεται και σε μια μικρή κλίση του τοίχου σε αυτό το σημείο. Οπότε, παρότι και εδώ οι μοίρες που το διαμορφώνουν είναι 15° , ο αριθμός των επιφανειών του είναι δεκατέσσερις. Μάλιστα σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη κλίση του δαπέδου, δημιουργείται μια λειτουργική κυρτότητα μεν, αλλά μη ισορροπημένη εντός της ψηφιακής προσομοίωσης δε.



Εικόνα 3.3 Μοντελοποίηση κυρτών επιφανειών. Το πρότυπο μοντέλο (αριστερά) και τροποποιημένο εμπρός του Control Room (δεξιά).

3.2 Βαθμονόμηση μοντέλου

Με την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του μοντέλου χρειάζεται να γίνει η βαθμονόμηση του. Αναφορά στη διαδικασία αυτή κάνει ο Postma (2015), ο οποίος προτείνει κάποια βήματα τα οποία χρειάζεται ακολουθηθούν. Σε πρώτη φάση είναι απαραίτητο όλη η κατασκευή να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση που βρισκόταν και ο χώρος κατά την διαδικασία των ακουστικών μετρήσεων και το γεωμετρικό μοντέλο θα πρέπει να παραμένει αμετάβλητο καθ' όλη την διαδικασία βαθμονόμησης.

Σε κάθε επιφάνεια του γεωμετρικού μοντέλου ανατίθενται συντελεστές απορρόφησης οι οποίοι προκύπτουν μέσα από βάσεις δεδομένων με διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως από χώρους αντίστοιχης χρήσης. Είναι σημαντικό ο εντοπισμός πληροφοριών από διαφορετικές βάσεις δεδομένων για παρόμοια υλικά, καθώς βοηθά στην δημιουργία ενός εύλογου εύρους τιμών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία βαθμονόμησης. Κατά τη διαδικασία αυτή αναμένεται να υπάρχει διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε φορά που εκτελείται η προσομοίωση, οπότε χρειάζεται να γίνουν πολλαπλές επαναλήψεις της αρχικής προσομοίωσης, έως ότου τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να προσεγγίσουν αυτά των ακουστικών μετρήσεων.

Στόχος είναι οι συντελεστές απορρόφησης να προσαρμόζονται για να φέρουν τις παραμέτρους αντήχησης εντός 1 JND από τη καταγεγραμμένη τιμή, το οποίο εκφράζεται ως 5%. Για να συμβεί αυτό χρειάζεται τα υλικά που θα προσαρμοστούν πρώτα να είναι αυτά με τα μεγαλύτερα εμβαδά επιφάνειας, καθώς οι μικρές παραλλαγές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά αποτελέσματα.

Στη πρώτη προσπάθεια βαθμονόμησης εντοπίστηκαν διαφορές στους χρόνους αντήχησης T30 μεταξύ φυσικής και ψηφιακής Αίθουσας, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, με τις περισσότερες τιμές να βρίσκονται κοντά στην ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά JND. Η κύρια διαφωνία που εντοπίζεται, ήταν στο περιβάλλον των 125 Hz, κάτι όμως που δεν δημιούργησε ανησυχία καθώς, όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, τα γεωμετρικά μοντέλα παρουσιάζουν αστάθεια στη συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων.

T30(s)	Αβαθμονόμητο Μοντέλο					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μ.Ο.	1,484	1,278	1,251	1,351	1,391	1,31
Μοντέλο	1,06	1,19	1,29	1,44	1,43	1,24
Διαφορά	0,424	0,088	0,039	0,089	0,039	0,07
JND	0,074	0,064	0,063	0,068	0,07	0,066
Απόκλιση σε JND	5,73	1,38	0,62	1,31	0,56	1,06

Πίνακας 3.1 Χρόνος Αντήρησης Αβαθμονόμητου Μοντέλου.

Ύστερα από τις αλλαγές και τροποποιήσεις των μεγάλων επιφανειών της Αίθουσας (οροφή, δάπεδο, τοίχων και καθίσματα), πρόκυπτε μια απόκλιση στις συχνοτικές περιοχές 125 Hz και 4k Hz. Οπότε, οι δεύτερες σε τάξη μεγέθους επιφάνειες οι οποίες χρειαζόταν να ατμοποιηθούν ήταν τα πανιά και η διατηρητή επιφάνεια της οροφής. Έγινε σημαντική ερευνά για τον εντοπισμό των σωστών τιμών που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν και τελικά παρατηρήθηκε ότι επηρέασαν τις περιοχές που φαίνονταν ότι είχαν απόκλιση.

Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2. Διακρίνεται ότι οι διαφορές που προκύπτουν στους χρόνους αντήρησης T30 μεταξύ της φυσικής Αίθουσας και του ψηφιακού μοντέλου, υστέρα από την βαθμονόμηση του, βρίσκονται εντός της ελάχιστης παρατηρήσιμης διαφοράς JND, πλην της συχνοτικής περιοχής των 4k Hz, της οποίας η διαφορά απείχε 2 JND από την επιθυμητό στόχο. Καθώς ήταν αρκετά δύσκολο να επετευχθή τιμή που να προσεγγίζει περισσότερο αυτό που απαιτείται, παρέμεινε ως έχει.

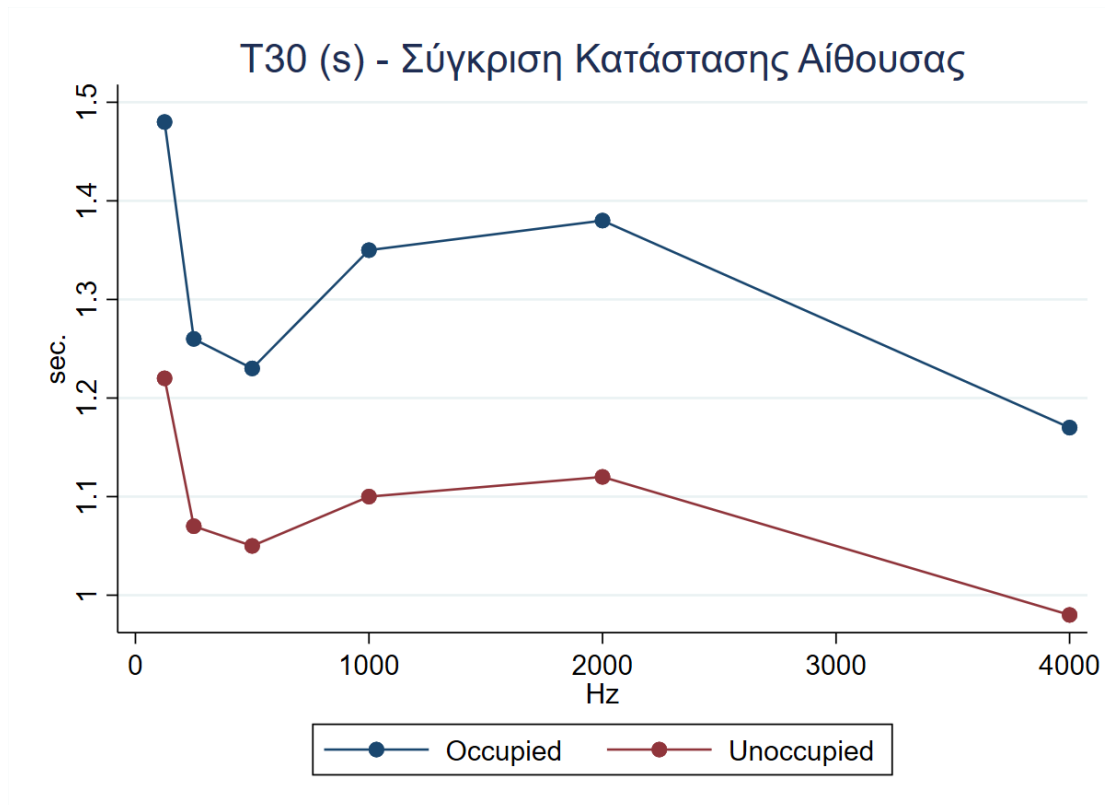
T30(s)	Βαθμονομημένο Μοντέλο (Unoccupied)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
M.O.	1,484	1,278	1,251	1,351	1,391	1,31
Μοντέλο	1,48	1,26	1,23	1,35	1,38	1,17
Διαφορά	0,004	0,018	0,021	0,001	0,011	0,14
JND	0,074	0,064	0,063	0,068	0,07	0,066
Απόκλιση σε JND	0,054	0,281	0,333	0,014	0,16	2,121

Πίνακας 3.2 Σύγκριση Χρόνου Αντήρησης Βαθμονομημένου Μοντέλου με Αίθουσα Συναυλιών.

Όλες οι προηγούμενες προσπάθειες προσομοίωσης αφορούσαν την Αίθουσα χωρίς την παρουσία ακροατηρίου, όπως δηλαδή έγιναν οι μετρήσεις. Ύστερα από τη σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου δίνεται η δυνατότητα να δούμε πως θα αλλάζαν οι ακουστικές παράμετροι αν ήταν πλήρως κατειλημμένη. Για τον χρόνο αντήρησης T30 παρατίθενται τα αποτελέσματα στον παρακάτω Πίνακα 3.3 και την Εικόνα 3.4.

T30(s)	Σύγκριση Βαθμονομημένο μοντέλο Occupied και Unoccupied					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
M.O.(CATT) unoccupied	1,48	1,26	1,23	1,35	1,38	1,17
M.O.(CATT) occupied	1,22	1,07	1,05	1,1	1,12	0,98

Πίνακας 3.3 Σύγκριση Χρόνου Αντήρησης T30 σε κατάσταση Occupied και Unoccupied.



Εικόνα 3.4 Σύγκριση Χρόνου Αντήλησης T_{30} σε κατάσταση *Occupied* και *Unoccupied*.

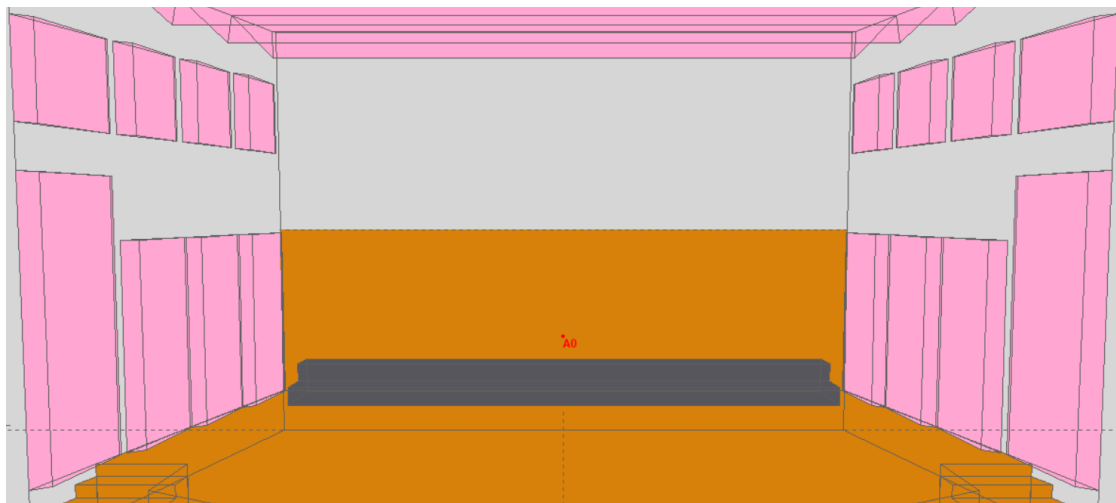
Βλέποντας το γράφημα της Εικόνας 3.4, διακρίνεται η ομοιόμορφη μείωση του χρόνου αντήλησης T_{30} σε όλες τις συχνотικές περιοχές, κάτι το οποίο είναι φυσιολογικό καθώς αυξάνεται η απορροφητικότητα σε ολόκληρο το συχνотικό εύρος. Στο Παράρτημα 2 γίνεται αναφορά στις τιμές των συντελεστών απορρόφησης που χρησιμοποιήθηκαν για τα κατασκευάστηκα υλικά της Αίθουσας Συναυλιών.

Ύστερα από την σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί η ακουστική συμπεριφορά σε όλο το εύρος της αίθουσας. Μπορεί να γίνει επεξεργασία των υλικών που την διαμορφώνουν, καθώς και τροποποιήσεις στοιχείων ώστε να μελετηθούν εκδοχές που μπορεί να προσφέρονται. Τέλος, η σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου αποτελεί προϋπόθεση για τη χρήση της Ακουστοποίησης (Auralization) του.

Στις υποενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν οι δυο φυσικές κατασκευαστικές καταστάσεις της αίθουσας καθώς και οι ακουστικές παράμετροι

που προκύπτουν. Οι δυο αυτές εκδοχές αφορούν τον τρόπο τοποθέτησης των περιστρεφόμενων πάνελ (ανακλαστική και διάτρητη κατάσταση) χωρίς τη χρήση των επιπρόσθετων πανιών. Στο τέλος θα γίνει μια σύγκριση των τιμών που προκύπτουν ανά συνθήκη.

3.2.1 Ανακλαστική επιφάνεια Πάνελ



Εικόνα 3.5 Μοντέλο CATT Acoustic σε Ανακλαστική κατάσταση, χωρίς πανιά.

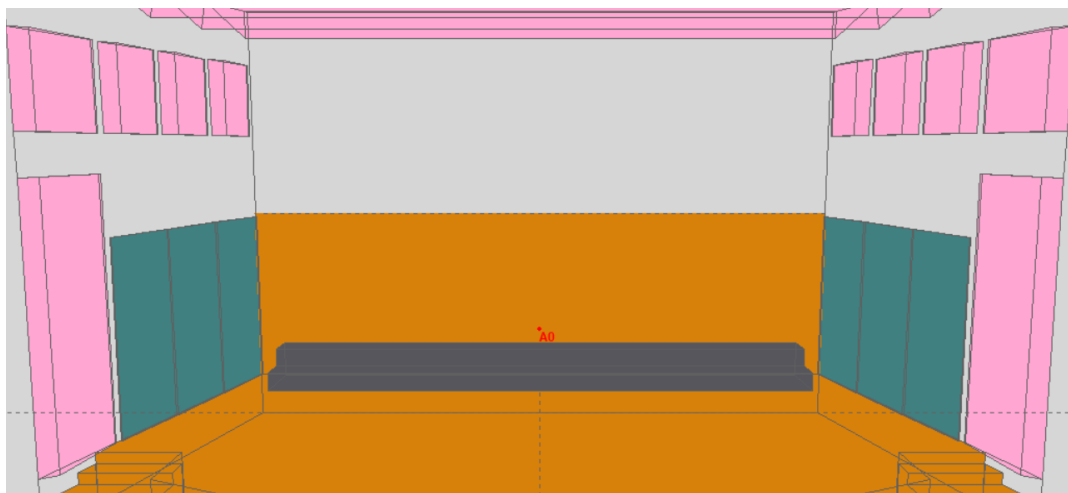
Αφαιρώντας τα πανιά, ο χώρος επανέρχεται στις προκαθορισμένες κατασκευαστικές του συνθήκες. Στην Εικόνα 3.5 παρατηρείται ότι έχει αφαιρεθεί το συγκεκριμένο στοιχείο και όλες επιφάνειες πλέον αποτελούνται από γυψοσανίδα (Plasterboard). Αυτή η διαφορά αντικατοπτρίζεται και στον Πίνακα 3.4 όπου ο Χρόνος Αντήρησης είναι μεγαλύτερος για όλες σχεδόν τις συχνотικές περιοχές σε αντίθεση με αυτόν που παρουσιάστηκε στην πρώτη υποενότητα, μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

T30(s)	Μοντέλο Occupied σε Ανακλαστική κατάσταση					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Occ. [panel]	1,29	1,2	1,24	1,34	1,28	1,1

Πίνακας 3.4 Χρόνος Αντήχησης σε Ανακλαστική κατάσταση, πλήρως κατειλημμένη.

3.2.2 Διάτρητη επιφάνεια Πάνελ

Η κατασκευή των διάτρητων επιφανειών ήταν αρκετά πιο απλή, σε αντίθεση με τις ανακλαστικές, καθώς έχουν μια ορθογώνια γεωμετρία, Και σε αυτή τη περίπτωση κατασκευάστηκαν ως ανεξάρτητα γεωμετρικά σχήματα που εφάπτονται επάνω στην επιφάνεια του τοίχου. Όπως φαίνεται και στη Εικόνα 11.3 κάπως έτσι θα έμοιαζε χώρος αν γινόντουσαν αυτές οι αλλαγές και σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5 οι χρόνοι αντήχησης θα μειώνονταν, όπως είναι λογικό, καθώς λόγω των διατρητών επιφανειών το στοιχείο της απορροφητικότητας μέσα στην Αίθουσα αυξάνεται.



Εικόνα 3.6 Μοντέλο CATT Acoustic σε Διάτρητη κατάσταση, χωρίς πανιά.

T30(s)	Μοντέλο Occupied σε Διάτρητη κατάσταση					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Occ.[perforated]	1,26	1,14	1,2	1,07	1,16	1,05

Πίνακας 3.5 Χρόνος Αντήχησης σε Διάτρητη κατάσταση, πλήρως κατειλημμένη.

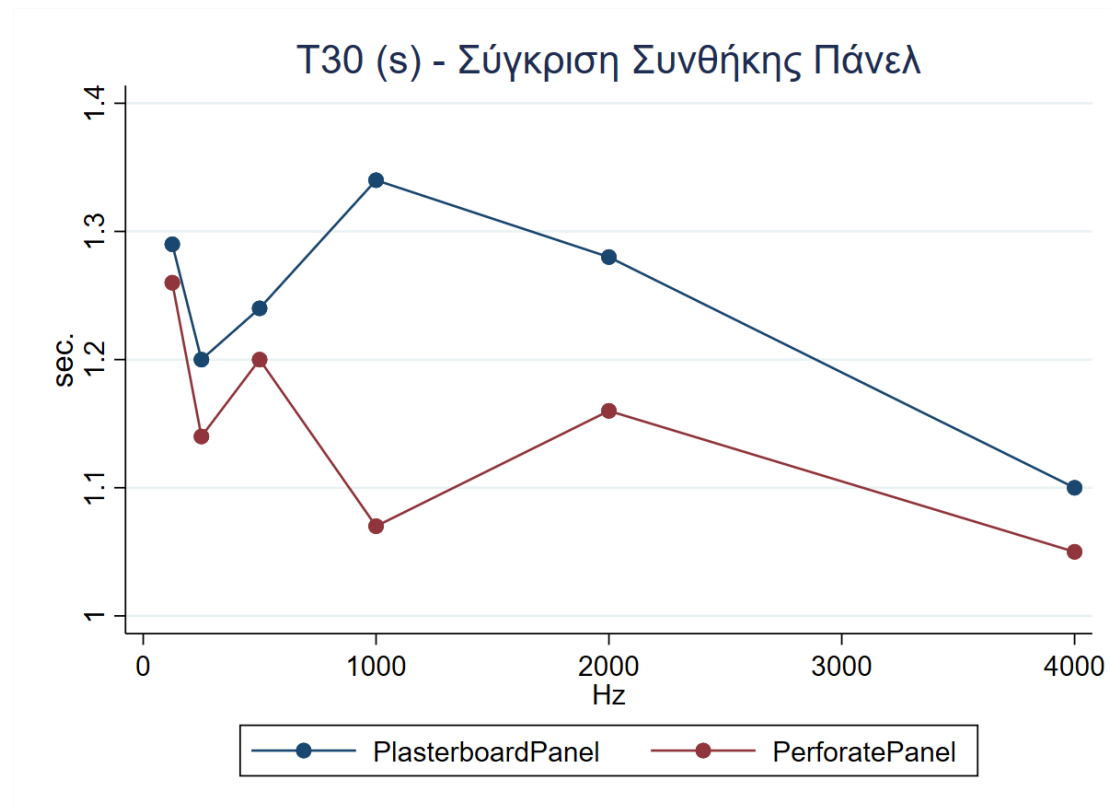
Αυτό που φαίνεται κρίνοντας τις τιμές του χρόνου αντήχησης είναι ότι τείνουν να είναι όμοιες με αυτές όταν ήταν τοποθετημένα τα πανιά. Οπότε διεγείρεται το ερώτημα είναι αν τα πανιά επηρεάζουν με άλλο τρόπο την ακουστική της Αίθουσας, ο οποίος δεν περιγράφεται με αυτά τα νούμερα ή αν πρόκειται για τη προσπάθεια δημιουργίας μιας ακουστικής κατάστασης, η οποία όμως ήδη υπήρχε. Σε κάθε περίπτωση είναι επιθυμητή η προσπάθεια κατασκευής ενός πιο προσιτού ακουστικού περιβάλλοντος, όταν αυτό είναι εφικτό, παρόλα αυτά εδώ παρουσιάζονται οι δυνατότητες του ψηφιακού μοντέλου να εξαγάγει πληροφορίες που αναζητούμε, χωρίς να απαιτείται μεγάλη προσπάθεια.

3.2.3 Σύγκριση

Είναι πολύ ενδιαφέρουσα η παρατηρήση και η σύγκριση των δυο συνθήκων. Ρίχνοντας μια ματιά στον Πίνακα 3.7 και στο γράφημα στην Εικόνα 3.6 διακρίνεται η διαφορά για το χρόνο αντήχησης όταν η Αίθουσα είναι πλήρως κατειλημμένη. Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται μεταξύ των συχνοτικών περιοχών 500 Hz έως 2k Hz, οι οποίες θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές περιοχές καθώς αφορούν σίγουρα πολλά μουσικά όργανα, αλλά και την ανθρώπινη φωνή.

Ίσως σε κάποια μελλοντική μελέτη να ερευνηθούν και οι υπόλοιπες ακουστικές παράμετροι, ώστε να προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση πάνω στο θέμα, για γίνει αντιληπτό σε ποιες περιπτώσεις θα ήταν ιδανικότερο να χρησιμοποιήσουμε κάποια από τις δυο συνθήκες. Μέχρι αυτό το σημείο, η μόνη παρατηρήση ίσως που θα μπορούσε να γίνει είναι πως σε Ανακλαστική συνθήκη, ο χρόνος αντήχησης

φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές που ενός χώρου συναυλιών θα ήταν ιδανικό να έχει.



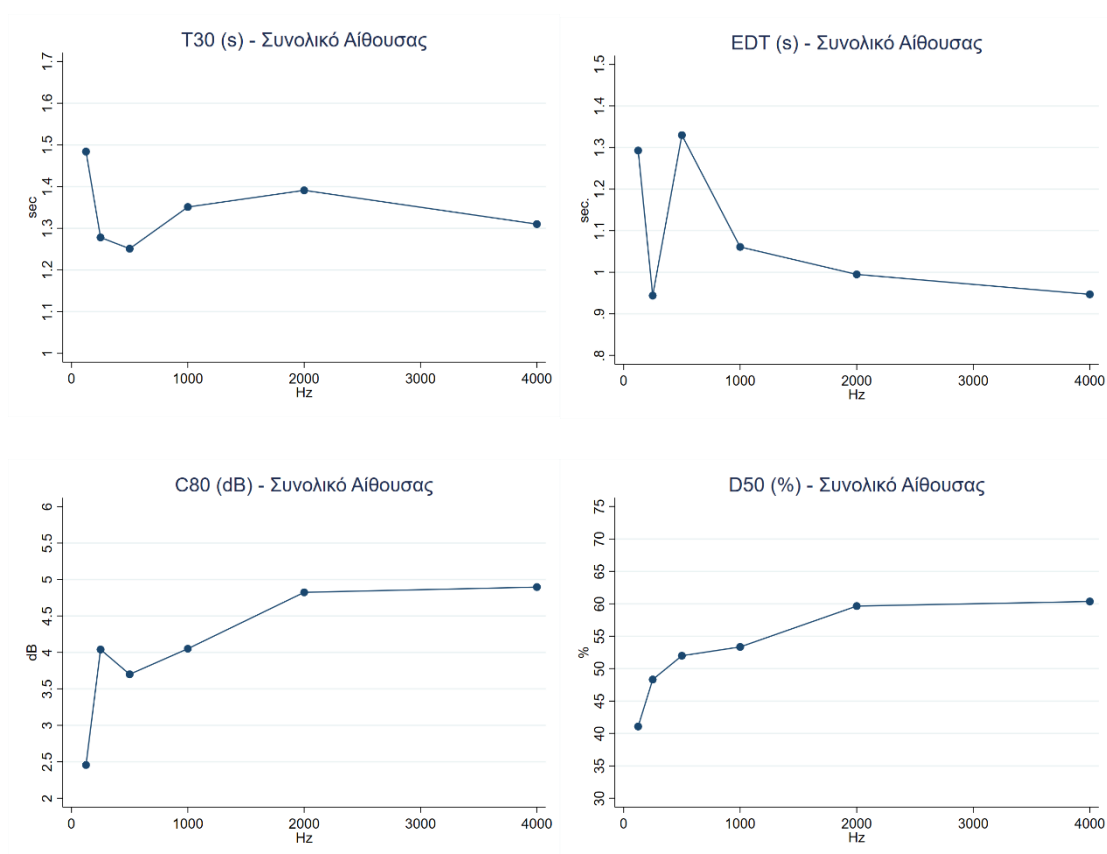
Εικόνα 3.7 Σύγκριση Χρόνου Αντήχησης για καταστάσεις Ανακλαστικής και Διάτρητης.

T30(s)	Σύγκριση τιμών Ανακλαστική - Διάτρητη					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
CATT Occupied [panel]	1,29	1,2	1,24	1,34	1,28	1,1
CATT Occupied [perforated-out curtain]	1,26	1,14	1,2	1,07	1,16	1,05

Πίνακας 3.6 Σύγκριση Χρόνου Αντήχησης για καταστάσεις Ανακλαστικής και Διάτρητης.

3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

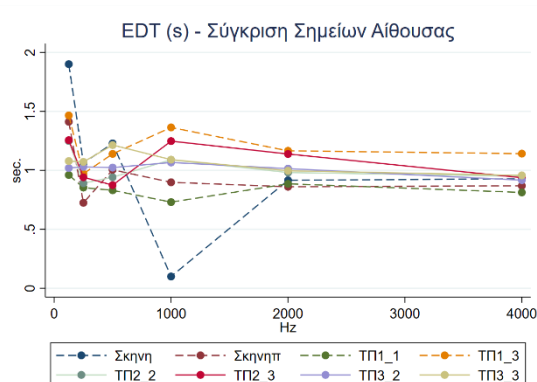
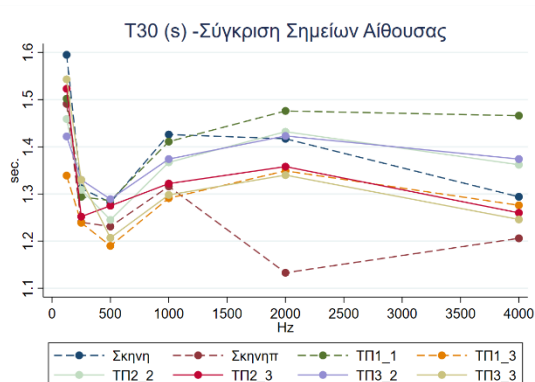
Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η μέση τιμή για κάθε ακουστική παράμετρο, όπως αυτή αποδίδεται μετά την επεξεργασία των ηχητικών σημάτων και όπως καταγράφεται στους πίνακες της υποενότητας 2.3 . Το συχνотικό εύρος των γραφημάτων είναι από 125 Hz έως 4 kHz και αφορά τις ακουστικές παραμέτρους T30, EDT, C80 και D50. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την διαμόρφωση τους είναι το Stata.

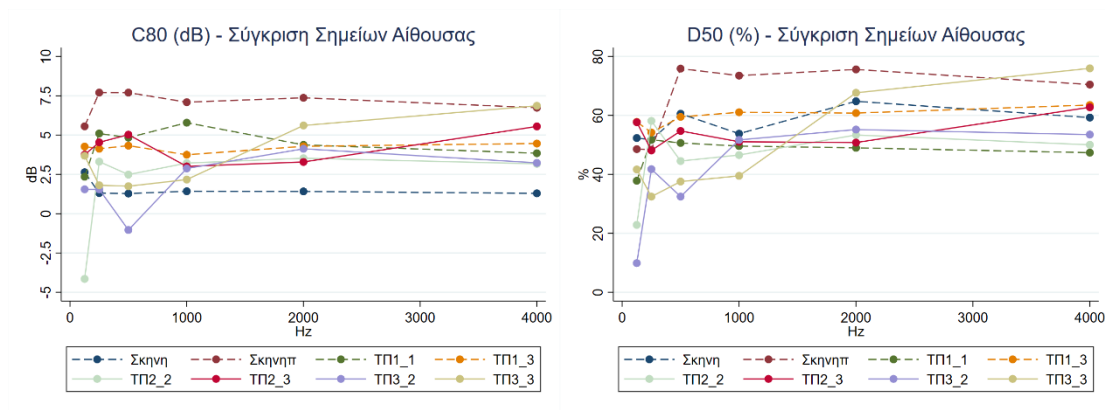


Εικόνα 3.8 Συνολικό αποτέλεσμα των ακουστικών μετρήσεων για τις παραμέτρους T30 – EDT – C80 – D50.

Ο μέσος χρόνος αντήχησης κυμαίνεται μεταξύ 1,2 sec. έως 1,5 sec., τιμές που βρίσκονται εντός των πλαισίων που απαιτείται για μια Αίθουσα, που φιλοξενεί καλλιτεχνικά δρώμενα. Για την παράμετρο C80 παρατηρείται μια σταθερή αύξηση η οποία δεν ξεπερνά, όμως, την τιμή των 5 dB και βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζουν αν το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από υψηλή ευκρίνεια αντίληψής του ήχου. (Barron, 2010) Η μέγιστη τιμή αγγίζει τα 4,89 dB και αφορά την συχνοτική περιοχή των 4k Hz, Όσον αφορά τη παράμετρο D50 αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 41% έως 60 % κάτι που χαρακτηρίζει τη διακριτότητα και τη δυνατότητα κατανόησης της ομιλίας, για το σύνολο της Αίθουσας, ως μέτρια. Αυτό σημαίνει πως σε αρκετά σημεία, και κυρίως τα πιο απομακρυσμένα, οι ακροατές θα χάνουν μέρος της αντιληπτότητας της ομιλίας. Άρα θα έχουν μια μικρή δυσκολία στο να κατανοήσουν πλήρως και να ακολουθήσουν με συνέπεια έναν ομιλητή. (Ansay , 2016)

Στα παρακάτω γραφήματα, αποκειονίζονται τιμές για κάθε θέση καταγραφής ξεχωριστά. Με αυτό το τρόπο γίνεται πιο εύκολος ο εντοπισμός σημαντικών χαρακτηριστικών που προκύπτουν ανά περίπτωση, αλλά και η σύγκριση μεταξύ τους. Επιπλέον, θα δούμε σε ποιες συχνοτικές περιοχές εντοπίζεται μεγαλύτερη απόκλιση, και πως αυτή επηρεάζεται από την απόσταση σε σχέση με την πηγή. Οι ακουστικές παραμέτρους που εξετάζονται είναι το T30, EDT, C80 και D50.





Εικόνα 3.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων για όλες τις θέσεις, για τις ακουστικές παραμέτρους $T30 - EDT - C80 - D50$.

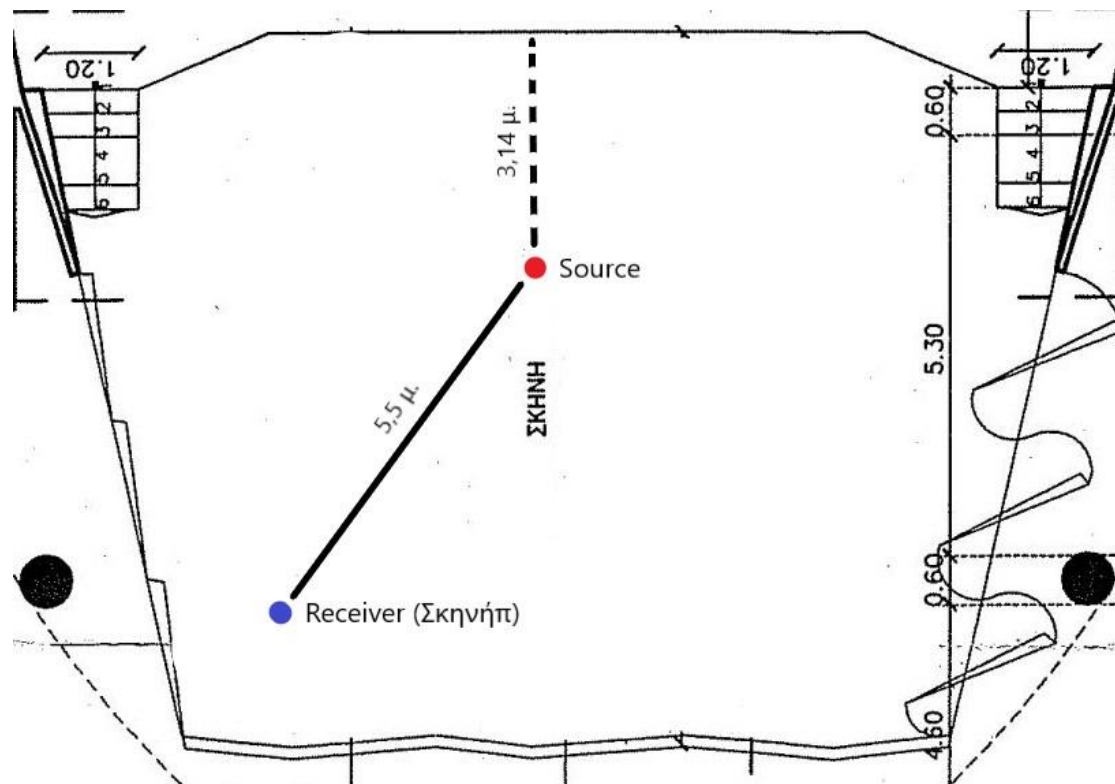
Για την παράμετρο C80, Εικόνα 3.9, που αφορά την ευκρίνεια του ήχου, παρατηρείται ότι για τις θέσεις που βρίσκονταν πιο κοντά στη πηγή παρουσιάζεται μια σταθερότητα σε ολόκληρο το συχνотικό τους εύρος. Όμως το ερώτημα που δημιουργείται, είναι για ποιον λόγο η θέση «ΤΣκηνή», που βρίσκεται πιο κοντά από όλες στη πηγή έχει και την μικρότερη τιμή ευκρίνειας, σε αντίθεση μάλιστα με τη δεύτερη πιο κοντινή θέση «ΤΣκηνήπ», η οποία έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Η απάντηση πιθανότατα βρίσκεται στις πρώιμες ανακλάσεις που δέχεται κάθε σημείο και τον χρόνο που απαιτείται σε αυτές για να φτάσουν. Κρίνοντας, λοιπόν, από τη τοποθέτηση του κάθε σημείου, είναι εύκολο να διακρίνει κανείς, πως επάνω στην σκηνή το στοιχείο την ανάκλασης είναι πιο έντονο και άρα μάλλον με αυτό το τρόπο διαμορφώνεται αυτή η διαφορά.

Η διακριτότητα D50 του ήχου φαίνεται να κυμαίνεται σε εύρος εντός του 30%. Στο γράφημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 8.8 βλέπουμε μια σχετική απόκλιση μεταξύ των τιμών ανά θέση, η οποία όμως δικαιολογείται. Όλες οι θέσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή περιστρέφονται γύρω από το 60% της διακριτότητας, σε αντίθεση με τις απομακρυσμένες. Ξανά ιδιαίτερη εντύπωση αποτελεί η θέση «ΤΣκηνήπ», καθώς πάλι δείχνει πως η αντιληπτότητα επάνω στη σκηνή διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από οποιοδήποτε άλλο σημείο κοντά στη πηγή.

Παρατηρώντας το σύνολο των μετρήσεων που έγιναν, θα δούμε ότι προκύπτει μια απόκλιση των τιμών της θέσης Σκηνήπ σε σχέση με τις υπόλοιπες. Πιθανότατα επειδή

το σημείο βρίσκεται επάνω στη σκηνή και 5,4 μ. πίσω από τη πηγή , κοντά σε πολλές επιφάνειες και έτσι δημιουργείται πολύ έντονα το φαινόμενο της ανάκλασης. Αναφορικά με τις διαφοροποιήσεις αυτές, γίνεται μια προσέγγιση παρακάτω.

3.3.1 Παρατηρήσεις θέσης «ΤΣκηνήπ»



Εικόνα 3.10 Κάτοψη Σκηνής, θέσεις «ΤΣκηνήπ» και πηγής.

Μια εκ των καταγραφών μέσα στην Αίθουσα έγινε στο πίσω μέρος της σκηνής, ώστε να παρατηρηθεί με ποιον τρόπο συμπεριφέρεται ο ήχος σε αυτό το «κρυφό» σημείο της Αίθουσας. Μπορεί να εντοπιστεί με ποιον τρόπο τον αντιλαμβάνονται όσοι βρίσκονται εκεί είτε πρόκειται για μουσικούς, εν μέσω μιας συναυλίας είτε για ηθοποιούς κατά τη διάρκεια μιας θεατρικής παράστασης

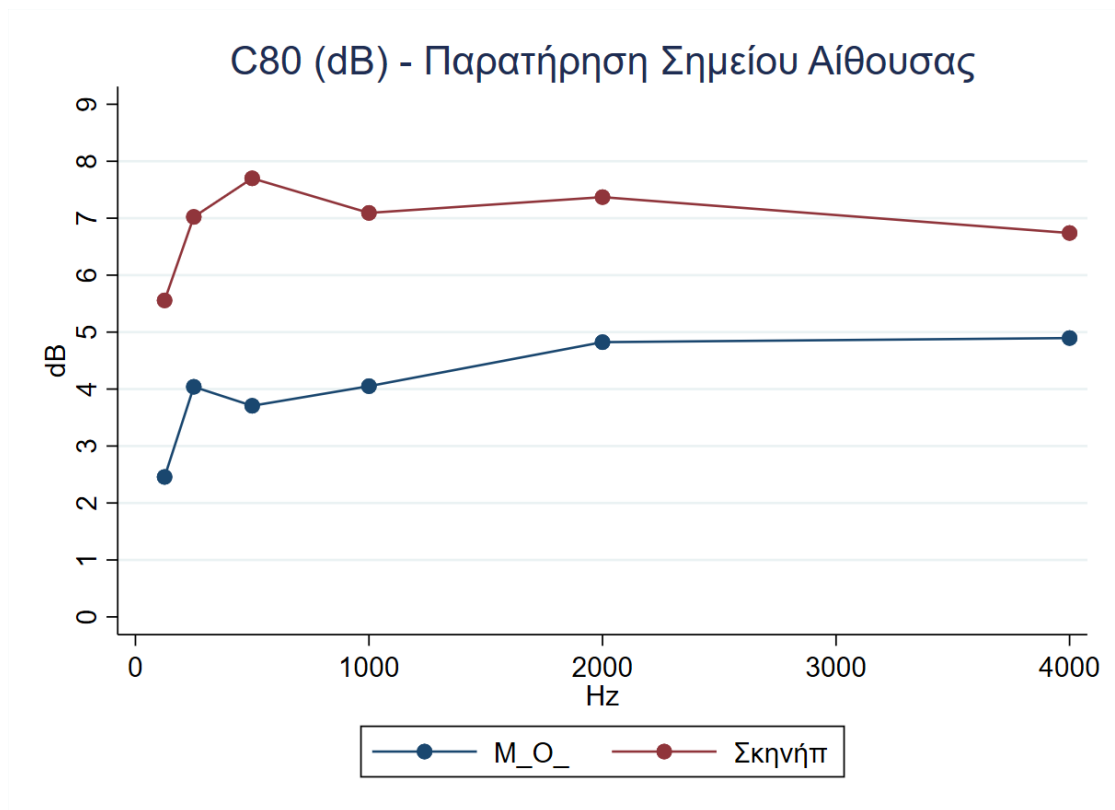
Όπως φαίνεται και στη Εικόνα 3.10 το μικρόφωνο ως δέκτης είχε τοποθετεί στη πίσω γωνιά της σκηνή και όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2, ήταν τοποθετημένο μπροστά από τα σκαλοπάτια. Άρα βρισκόταν πολύ κοντά στις μεγάλες επιφάνειες, κάτι που σίγουρα θα επηρεάζει τις ακουστικές παραμέτρους.

Χωρίς απαραίτητα να υπάρχει κάποια συγκριμένη προσδοκία για τα αποτελέσματα, αλλά κυρίως ένα ενδιαφέρον, παρατηρήθηκε ότι διαφορές ήταν αρκετά μεγάλες. Όχι μόνο από τις θέσεις που βρίσκονταν πολύ μακριά από τη πηγή, αλλά από σημεία τα ίση ή και μικρότερη απόσταση. Στους παρακάτω Πίνακες και Εικόνες παρατίθενται οι τιμές για τη συγκεκριμένη θέση και συγκρίνεται με το μέσο όρο της Αίθουσας για κάθε παράμετρο. Αυτές που επιλέχθηκαν να παρουσιασθούν, είναι οι C80 και η D50, δηλαδή αυτές που έχουν να κάνουν με την αντίληψη του ήχου.

Ως τιμή σύγκρισης θα πάρουμε τον μέσο όρο για κάθε χαρακτηριστικό της Αίθουσας ώστε να δούμε την διαφορά σύμφωνα με το συνολική συμπεριφορά της Αίθουσας. Επίσης στη τιμή του μέσου όρου συμπεριλαμβάνεται και η συγκεκριμένη θέση. Ξεκινώντας με το C80 βλέποντας το γράφημα ήδη φαίνεται ότι οι τιμές της θέσης αυτής δεν βρίσκουν κάποιο σημείο συμφωνίας με τον μέσο όρο.

C80(dB)	Σύγκριση Μ.Ο - Σκηνήπ					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μ.Ο.	2,457	4,04	3,707	4,051	4,824	4,896
Σκηνήπ	5,557	7,023	7,7	7,093	7,37	6,74

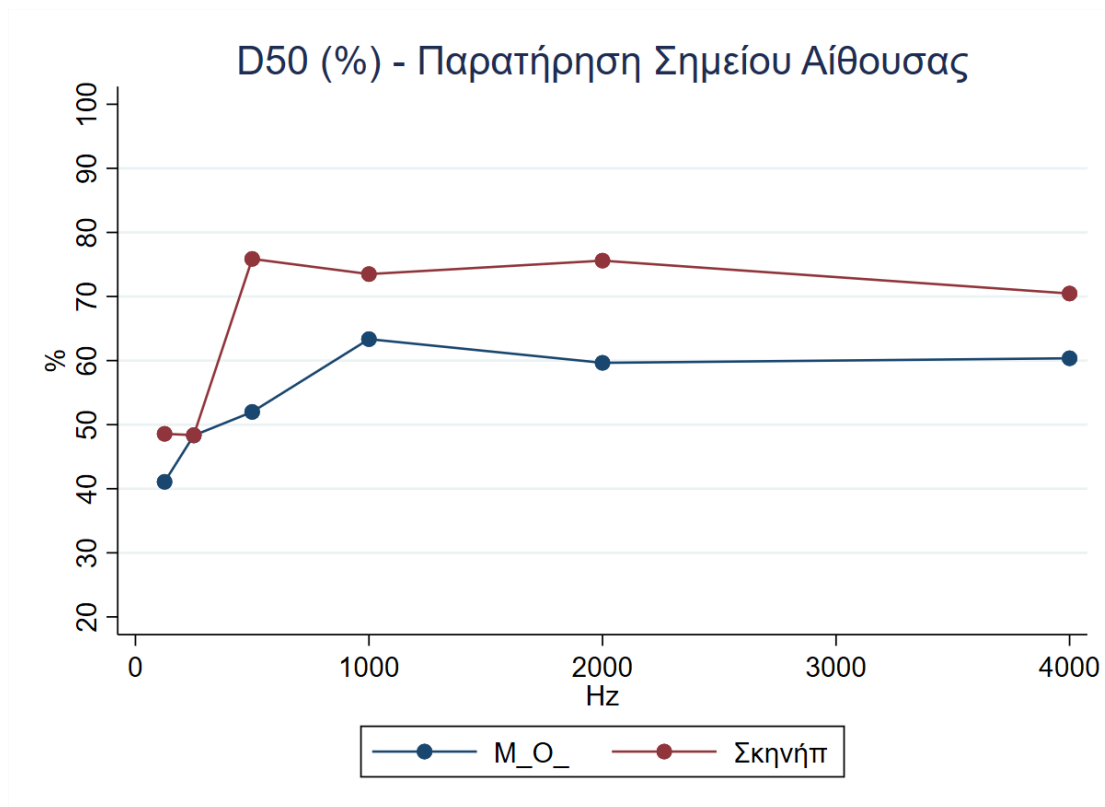
Πίνακας 3.7 Τιμές ακουστικής παραμέτρου C80 για Αίθουσα συνολικά και Σκηνήπ.



Εικόνα 3.11 Σύγκριση ακουστικής παραμέτρου C80 για θέση Σκηνήπ με μέση τιμή.

D50(%)	Σύγκριση Μ.Ο - Σκηνήπ					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Μ.Ο.	41,08	48,32	51,99	53,35	59,65	60,36
Σκηνήπ	48,57	48,37	75,87	73,5	75,6	70,47

Πίνακας 3.8 Τιμές ακουστικής παραμέτρου D50 για Αίθουσα συνολικά και Σκηνήπ.

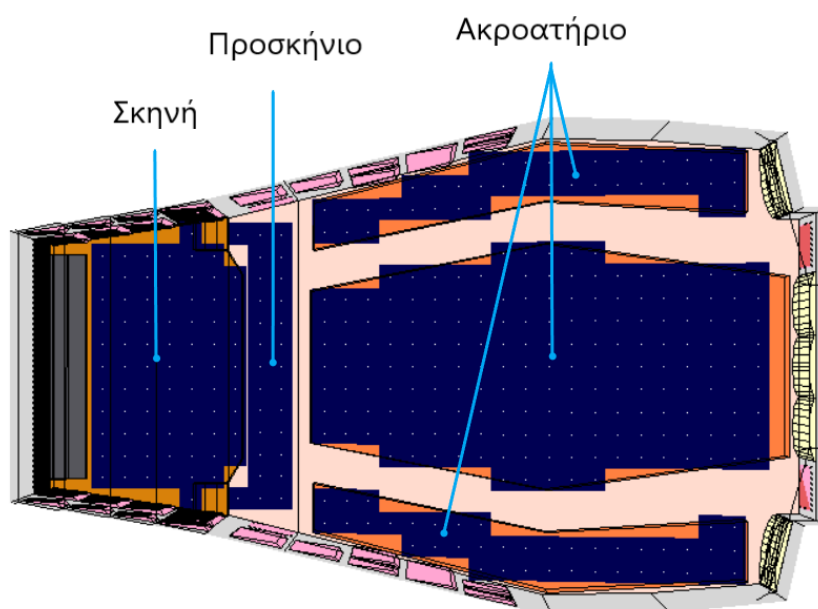


Εικόνα 3.12 Σύγκριση ακουστικής παραμέτρου D50 για θέση Σκηνήπ με μέση τιμή.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η διαφορετικότητα χαρακτηριστικών για τη θέση «Σκηνήπ» παρουσιάζεται σε όλες τις πιθανές συνθήκες της Αίθουσας. Κάτι τέτοιο φαίνεται πως είναι αρκετά φυσιολογικό καθώς, οι άλλες καταστάσεις του χώρου έχουν εντονότερο το στοιχείο της ανάκλασης και άρα επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις ακουστικές παραμέτρους.. Όμως κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα καλό, καθώς δημιουργούνται ακουστικά προβλήματα για τα άτομα που βρίσκονται επάνω στη σκηνή, δημιουργώντας τους δυσκολίες για το τρόπο αντίληψης της μουσικής και του ήχου.

3.4 Heat-maps

Μέσω του CATT/ TUCT δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί το μέγεθος της ενέργειας που φτάνει σε διάφορες επιφάνειες μέσα στην Αίθουσα ανά συχνοτική περιοχή. Με αυτό το τρόπο διακρίνονται πιθανές ιδιαιτερότητες ή ακουστικές αδυναμίες που προκύπτουν εντός του χώρου. Για να συμβεί αυτό χρειάζεται να ενημερωθεί το CATT με τα ακριβή δεδομένα του χώρου. Οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται Audience planes, καθώς αντιπροσωπεύουν επιφάνειες στις οποίες θα μπορούσαν να υπάρχουν πιθανοί ακροατές. Πρόκειται για πλέγματα τα οποία παρουσιάζουν πληροφορίες για τις ακουστικά παραμέτρους ανά συχνοτική ζώνη.



Εικόνα 3.13 Οι πέντε επιφάνειες που επιλέχθηκαν ως Audience planes, σε μορφή πλέγματος.

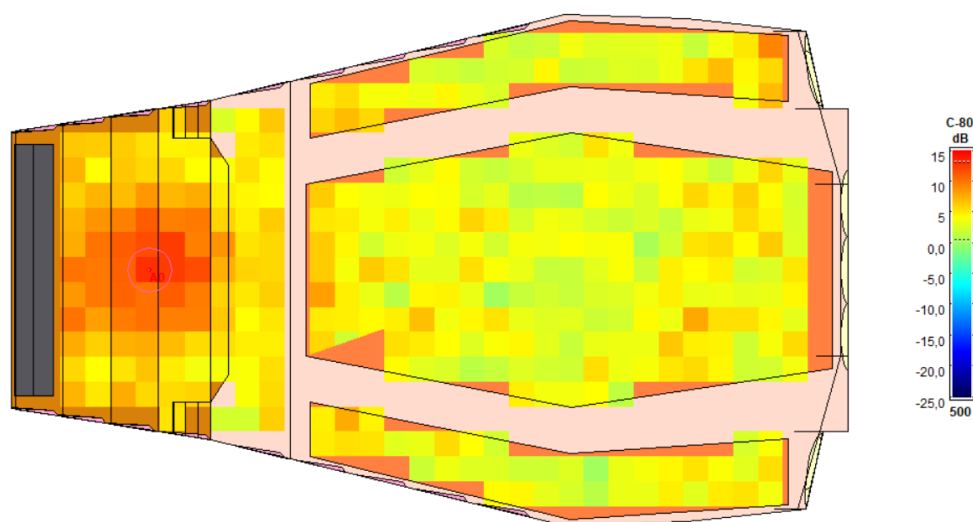
Στο μοντέλο κρίθηκε σωστό να οριστούν πέντε τέτοιες επιφάνειες. Αρχικά, το προφανές είναι να οριστούν οι χώροι που αντιπροσωπεύουν το ακροατήριο, δηλαδή οι τρεις κατασκευές σε σχήμα τραπεζίου. Επόμενη επιφάνεια ήταν το Προσκήνιο, όπου όπως έχει προαναφερθεί, είναι ο χώρος που βρίσκεται ανάμεσα σε σκηνή και ακροατήριο. Τέλος, ορίστηκε και η Σκηνή, καθώς έχει πολύ ενδιαφέρον να δούμε πως

οι μουσικοί λαμβάνουν τον ήχο που οι ίδιοι παράγουν. Πάνω σε αυτές στηρίζεται η δημιουργία χαρτών που δείχνουν την κατανομή της ενέργειας και ονομάζονται Heatmaps.

Εντός του μοντέλου η αρίθμηση των επιφανειών είναι η εξής:

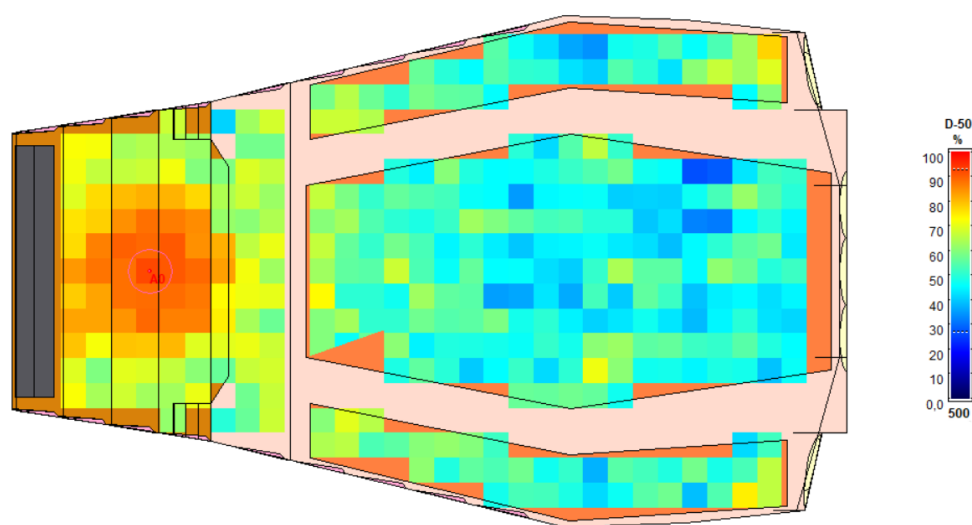
1. Ακροατήριο [3 planes: 4940, 4948, 10940]
2. Προσκήνιο [1 plane: 4954]
3. Σκηνή [1 plane: 14]

Στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται το Heatmap που εξετάζει την παράμετρο C80 για την συχνотική περιοχή των 500 Hz. Διακρίνεται πως σε Ακροατήριο και Προσκήνιο οι τιμές δεν ξεπερνούν τα 5 dB. Επίσης στο περιβάλλοντα χώρο του Ακροατηρίου, προς το κέντρο, εντοπίζεται πως για ελάχιστες θέσεις η τιμή πέφτει έως περίπου -4 dB. Η μέση τιμή για τη συγκεκριμένη συχνотική ζώνη, όπως αναφέρεται και στον Πίνακα 2.8, είναι 3,707 dB και κρίνοντας από το συγκεκριμένο Heatmap, οι περισσότερες θέσεις μάλλον δεν απέχουν περισσότερο από 1 JND.



Εικόνα 3.14 C80 στα 500 Hz.

Το Heatmap της Εικόνας 3.15 εξετάζει την παράμετρο D50 για την συχνотική περιοχή των 500 Hz. Διακρίνεται ότι η αντιληπτότητα για το μεγαλύτερο κομμάτι του ακροατηρίου δεν ξεπερνάει το 60%, πλην των θέσεων που βρίσκονται πιο κοντά στη σκηνή. Επίσης, στο Προσκήνιο κατά κύριο λόγο οι τιμές κυμαίνονται από 55% έως 70%. Ενδιαφέρον, προκαλεί ότι κάποιες πολύ απομακρυσμένες θέσεις από τη πηγή φτάνουν από 70 % έως και 80%. Κρίνοντας από τους πίνακες με τις τιμές για κάθε θέση, κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να συμβαίνει και πιθανότατα οφείλεται σε κάποια κατασκευαστική ιδιαιτερότητα του μοντέλου. Άλλωστε οι συγκεκριμένες θέσεις βρίσκονται μπροστά από τις κυρτές επιφάνειες, οι οποίες σε αυτά τα σημεία δημιουργούν έντονη εσοχή και αρά εγκλωβίζεται πιθανότατα μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας.



Εικόνα 3.15 D50 στα 500 Hz.

Ως συνέχεια της παραπάνω παρουσίασης δημιουργήθηκε το Παράρτημα 3. Σε αυτό παρατίθενται επιπλέον Heatmaps που αφορούν τις ακουστικές παραμέτρους EDT, C80, D50, SLP και STI σε συχνотικό εύρος από 250 Hz έως 2k Hz.

Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακουστική μελέτη της Αίθουσας Συναυλιών του Π.Μ.Γ.Α.Π, όπου διερευνάται η ακουστική της συμπεριφορά, όντας μη κατειλημμένη, και εξετάζονται οι ακουστικές παράμετροι που προκύπτουν μετά την επεξεργασία των ακουστικών σημάτων. Επίσης, η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του χώρου στο CATT Acoustic, όπου παρατηρείται όλο το εύρος της Αίθουσας και εξετάζονται άλλες εκδοχές της, μετά από τροποποιήσεις που υποβάλλεται.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή της ακουστικής μελέτης χωρίστηκε σε τρία στάδια. Το πρώτο απαιτούσε της καταγραφή της ακουστικής συμπεριφοράς της Αίθουσας ύστερα από την διέγερση της μέσω κάποιας στιγμιαίας παλμικής πηγής, όπου και χρησιμοποιήθηκε το σκάσιμο των μπαλονιών. Το σημείο τοποθέτησης της πηγής ορίστηκε το κέντρο της σκηνής, ενώ οι θέσεις καταγραφής ήταν 8, μοιρασμένες σε όλο το εύρος της Αίθουσας (Ακροατήριο, Σκηνή και Προσκήνιο), όπου για τη κάθε μια έγιναν 3 επαναλήψεις.

Το δεύτερο στάδιο, απαιτούσε τον ακουστικό χαρακτηρισμό του εξοπλισμού, ώστε να δημιουργηθεί το «φίλτρο» για την εξαγωγή των κρουστικών αποκρίσεων. Το σκέλος αυτών των μετρήσεων διεξήχθη στο Στούντιο LabMAT, με τη χρήση ενός πανκατευθυντικού ηχείου, ως πηγή, και ως μέθοδος διέγερσης, Linear και Logarithmic SineSweeps διάρκειας 15 sec. Ύστερα από τη διαδικασία της αποσυνέλιξης (deconvolution) προέκυψε το ακουστό αποτύπωμα του μικροφώνου.

Το τελευταίο μέρος αποτελούσε την παραγωγή των κρουστικών αποκρίσεων για κάθε θέση της Αίθουσας Συναυλιών, οι οποίες δημιουργήθηκαν με την αφαίρεση του ακουστικού αποτυπώματος του μικροφώνου, από τα ηχητικά σήματα που καταγράφηκαν στο φυσικό χώρο, έτσι προέκυψαν και οι ακουστικές παράμετροι. Μετά από αυτή τη διαδικασία απέμενε μόνο η σωστή βαθμονόμηση του ψηφιακού μοντέλου στο CATT, ώστε να γίνει η χρήση της Ακουστοποίησης (Auralization)

Κρίνοντας από τις ακουστικές παραμέτρους παρατηρείται, πως οι χρόνοι αντήχησης T30 για το σύνολο των θέσεων που κυμαίνονται σε μικρό εύρος από 1,2

sec. έως 1,5 sec, σε αντίθεση με το χρόνο πρώιμης απόσβεσης EDT όπου οι τιμές ξεκινούν από 0,7 sec. έως 1,4 sec. Όσον αφορά την ευκρίνεια C80 η διακύμανση είναι αρκετά μεγάλη και διαφοροποιείται ανάλογα με το απόσταση πηγής – δέκτη, άλλα και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε θέσης. Όλα τα σημεία που βρίσκονται εκτός σκηνής χαρακτηρίζονται από τιμές που κυμαίνονται από -1 dB έως 5 dB. Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και με την αντίληψη της ομιλίας, που εκφράζεται από τη παράμετρο D50, καθώς θέσεις που βρίσκονται σε Ακροατήριο και Προσκήνιο οριακά φτάνουν την τιμή του 60% κάτι που τις χαρακτηρίζει σε μέτριας ποιότητας καταληπτότητας της ομιλίας. Ενώ η θέση που βρίσκεται πιο κοντά στη πηγή και επάνω σκηνή φτάνει το 75 % καθώς ευνοείται από το πλήθος των ανακλάσεων που δέχεται. Πολλές από τις συγκεκριμένες παραμέτρους βρίσκονται μέσα εύρος που ο Barron (2010) έχει προτείνει ως τιμές, που χρειάζεται χώρος που φιλοξενεί μουσικές εκδηλώσεις, να έχει.

Διαφορετική προσέγγιση προσέφερε και η προσθήκη των πανιών στη σκηνή. Αποτέλεσε μια ενδιαφέρουσα συνθήκη και ευκαιρία, ώστε να παρατηρηθεί με ποιον τρόπο επηρεάζεται η ακουστική συμπεριφορά ενός χώρου με την προσθήκη ενός εξωγενούς στοιχείου. Καθώς όλες οι μετρήσεις και τα δεδομένα που προέκυψαν έγιναν υπό τις συγκεκριμένες προϋπόθεσης, μπορεί πλέον με σιγουριά να κριθεί το συγκεκριμένο εγχείρημα. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις παρατηρείται πως οι ακουστικές παράμετροι τείνουν να έχουν κοινά χαρακτηριστικά, με αυτές οντάς τα περιστρεφόμενα πάνελ σε διάτρητη κατάσταση. Άρα τίθεται το ερώτημα αν η τοποθέτηση τους οφείλεται σε κάποια λειτουργικά κριτήρια ή λόγω έλλειψης της συγκεκριμένης γνώσης. Πέρα όμως από όλα αυτά, είναι ξεκάθαρο ότι η χρήση της προσομοίωσης του χώρου μπορεί να βοηθήσει σε αυτό το κομμάτι κατανόησης του προβλήματος που μπορεί να υπάρχει, και να δημιουργήσει τις συνθήκες για άμεσους πειραματισμούς.

Συγκεκριμένα για την Αίθουσα Συναυλιών του Π.Μ.Γ.Λ.Π, λόγω της ποικιλίας των χρήσεων της, ο χαρακτήρας της μπορεί να προσαρμόζεται σύμφωνα με τις ανάγκες που απαιτούνται ανά περίπτωση. Μέσα από την συγκεκριμένη ακουστική μελέτη εντοπίστηκαν στοιχεία που αφορούσαν την αντίληψη της ηχητικής ενέργειας από το ακροατήριο, αλλά και τους ερμηνευτές.

Ύστερα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ψηφιακού μοντέλου και των δυνατοτήτων που προσφέρονται μέσα από το λογισμικό του CATT/TUCT, μπορούμε να διακρίνουμε ότι σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, δεν έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα που χρειαζόμαστε ώστε να καλύψουμε τις ανάγκες μιας καλλιτεχνικής ή μη δραστηριότητας. Οι παράμετροι που δημιουργούν ένα αίσθημα προβληματισμού είναι όλες αυτές που έχουν να κάνουν με την αντίληψη της ανθρώπινης ομιλίας.

Το στοιχείο της διακριτότητας είναι σε μέτρια επίπεδα, καθώς σε κανένα σημείο εκτός σκηνής η μέση τιμή δεν ξεπερνάει το 60% και αυτό επηρεάζει όχι μόνο πιθανές ομιλίες, οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν με τη χρήση κάποιου ηλεκτροακουστικού συστήματος, αλλά και θεατρικές παραστάσεις που φιλοξενούνται στο χώρο. Υπάρχουν σημεία μέσα στην αίθουσα, όπου ο ακρατής δυσκολεύεται σημαντικά να αντιληφθεί μέρος της ομιλίας και αυτό συμβαίνει κατά βάση σε θέσεις που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα του ακροατηρίου.

Επιπλέον, ενδιαφέρον στοιχείο παρατήρησης είναι ο εντοπισμός της συμπεριφοράς του ήχου επάνω στη σκηνή. Ήταν εφικτό να διακρίνουμε το τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται τον ήχο ένα άτομο που συμμετέχει σε ένα καλλιτεχνικό δρώμενο. Μια τέτοια πληροφορία πιθανότατα να φανεί χρήσιμη για ζωντανές ηχογραφήσεις κάποιων συναυλιών και για τη μέθοδο την οποία θα μπορούσε να ακολουθηθεί για την καταγραφή του ήχου. Μπορούμε να δούμε λίγο ή πολύ σε ποια σημεία της σκηνής εστιάζεται το μεγαλύτερο μέρος της ηχητικής ενέργειας .

Τέλος, παρατηρώντας το συνδυασμό κάποιων παραμέτρων, όπως είναι η ευκρίνεια του ήχου και οι χρόνοι αντήχησης για όλο το εύρος της Αίθουσας, διακρίνονται οι δυνατότητες για τη φιλοξενία μουσικών συναυλιών. Οι τιμές και στις δυο περιπτώσεις, βρίσκεται εντός επιθυμητού πλαισίου και ευνοούν τις μουσικές δραστηριότητες, επιβεβαιώνοντας τον ισχυρισμό ότι η Αίθουσα δημιουργήθηκε με σκοπό τις κατάλληλες ακουστικές προδιαγραφές για έναν συναυλιακό χώρο.

Επίλογος

Ολοκληρώνοντας αυτή τη προσπάθεια που έγινε για την ακουστική μελέτη στο χώρο του Μουσικού Σχολείου Παλλήνης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ψηφιακή αποτύπωση ενός χώρου, αποτελεί σημαντικό και πιθανότατα απαραίτητο κομμάτι της διαδικασίας για την κατανόηση και την διαμόρφωση του. Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, το οποίο στα χέρια ενός Τεχνικού ήχου δίνει τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για να διακρίνει με ποιόν τρόπο ανταποκρίνεται ο ήχος σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Η αμεσότητα που προσφέρει, η ψηφιακή προσομοίωση, μέσω της εύκολης τροποποίησης σε μικρό χρονικό διάστημα, την κάνει εύχρηστη σε βαθμό που μπορεί κάποιος πολύ εύκολα να εξάγει οποιεσδήποτε πληροφορίες επιθυμεί. Από την άλλη, προφανώς, δεν μπορεί να βασιστεί κάποιος μόνο στα δεδομένα αυτά, καθώς τα αποτελέσματα είναι ένα κομμάτι της διαδικασίας καθώς εμπίπτει και το κομμάτι της προσωπικής αισθητικής. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί ένα πρώτο στάδιο για την ακουστική διαμόρφωση ενός χώρου. (Dalenbäck, 2018)

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη Αίθουσα που μελετήθηκε, οι δυνατότητες που προσφέρονται για την τροποποίηση της είναι πολλές, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται. Προφανώς μια τέτοια διαδικασία δεν μπορεί να αποτελεί εύκολη λύση, ειδικά όταν ο χώρος ανήκει σε ένα σχολικό περιβάλλον και η χρήση του ποικίλει σε μεγάλο βαθμό. Πιθανότατα, όμως, θα μπορούσε σε συγκεκριμένες εκδηλώσεις να τροποποιείται στοχευμένα με μια πιο καλλιτεχνική διάθεση. Θα είχε πάρα πολύ ενδιαφέρον να εξεταστεί μέσα από το μοντέλο τη προσπάθεια συνδυασμού δυο διαφορετικών πηγών με διαφορετικά ηχοχρωματικά χαρακτηριστικά. Ένα τέτοιο εγχείρημα μάλλον θα ήταν πολύ χρήσιμο καθώς ένας από τους σκοπούς ύπαρξης της Αίθουσας είναι να υποστηρίζει την παρουσία διαφόρων Μουσικών Συνόλων.

Η συγκεκριμένη ακουστική μελέτη έγινε με σκοπό την ανάπτυξη της ικανότητας κατασκευαστικής ενός ψηφιακού μοντέλου στο λογισμικό CATT Acoustic και την

κατανόηση της διαδικασίας που απαιτείται, ώστε να ληφθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τη βαθμονόμησή του. Μέσα από αυτή τη διαδικασία έγιναν αντιληπτές οι ακουστικές παράμετροι και το πώς αυτές μπορούσαν να επηρεάσουν τις ηχητικές συνθήκες που λαμβάνουν χώρα εντός της αίθουσας.

Το συγκεκριμένο εγχείρημα κατάφερε να φτάσει σε ένα ικανοποιητικό στάδιο για την ακουστική κατανόηση του χώρου. Επιπλέον, προσφέρει κάποιες βασικές ιδέες για την ψηφιακή κατασκευή και κάποιες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις για τη συμπεριφορά του ήχου σε διάφορα σημεία της Αίθουσας. Δεν μπόρεσε, όμως, να εμβαθύνει σε πιο απαιτητικά μονοπάτια, όπως η αξιοποίηση των πληροφοριών για βελτίωση κάποιων στοιχείων ή ακόμα τη διαμόρφωση της για πολύ συγκεκριμένες καλλιτεχνικές συνθήκες.

Ευελπιστώ η συγκεκριμένη μελέτη να γίνει σκαλοπάτι για μελλοντικές προσπάθειες οι οποίες θα εμβαθύνουν στο ακουστικό κομμάτι της Αίθουσας και θα καλύψουν πιθανά κενά που προκύπτουν, βοηθώντας με τη σειρά τους στη δημιουργία ενός καλύτερου ακουστικού περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

- Dimarogonas, A. D. (1990). The origins of vibration theory. *Journal of Sound and Vibration*, 140(2), 181–189. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(90\)90523-3](https://doi.org/10.1016/0022-460x(90)90523-3)
- Kleiner, M., Dalenback, B.-I., & Svensson, P. (1993). Auralization - An Overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41(11), 861–875.
<https://doi.org/https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6976>
- Vorländer, M., & Kob, M. (1997). Practical aspects of MLS measurements in building acoustics. *Applied Acoustics*, 52(3-4), 239–258. [https://doi.org/10.1016/s0003-682x\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/s0003-682x(97)00029-7)
- James, A., Dalenbäck, B.-I., & Amber, N. (2001). Computer Modelling with CATT-Acoustic - Theory and Practice of Diffuse Reflection and Array Modeling.
- Houtgast, T., & Steeneken, H. J. M. (2002). Basics of the STI measuring method. In *Past, present and future of the speech transmission index (pp. 13–43). essay, TNO Human Factors.*
- Stan, G.-B., Embrechts, J. J., & Archambeau, D. (2002). Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*. <https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/242019371>
- Moloney, J., & Harvey, L. (2004). Visualization and 'auralization' of architectural design in a game engine based collaborative virtual environment. *Proceedings. Eighth International Conference on Information Visualisation, 2004. IV 2004.* <https://doi.org/10.1109/iv.2004.1320236>
- Long, M. (2005). *Architectural Acoustics*. Elsevier.
- Rossing, T. D. (2007). *Handbook of Acoustics*. Springer.

- Hodgson, M., York, N., Yang, W., & Bliss, M. (2008). Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using Catt-acoustic and Odeon. *Acta Acustica United with Acustica*, 94(6), 883–890. <https://doi.org/10.3813/aaa.918106>
- Kuttruff, H. (2009). *Room acoustics* (Fifth). Spon Press.
- Rosell, A. T. (2009). *Methods of measuring impulse responses in architectural acoustics* (thesis). Technical University of Denmark, Copenhagen.
- Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and architectural design*. Spon Press/Taylor & Francis.
- Rindel, J. H. (2011). Room Acoustic Modelling Techniques: A Comparison of a Scale Model and a Computer Model for a New Opera Theatre. *Building Acoustics*, 18(3–4), 259–280. <https://doi.org/10.1260/1351-010x.18.3-4.259>
- Postma, B. N., & Katz, B. F. (2015). Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations. *Virtual Reality*, 19(3-4), 161–180. <https://doi.org/10.1007/s10055-015-0275-3>
- Savioja, L., & Svensson, U. P. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2), 708–730. <https://doi.org/10.1121/1.4926438>
- Ansary, S., & Zannin, P. H. T. (2016). Using the Parameters of Definition, D50, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. *Canadian Acoustics*, 44(4), 6–11. Retrieved from <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2653>
- Dalenbäck, B.-I. (2018). *Whitepaper: What is Geometrical Acoustics (GA)?*. CATT, Gothenburg.

Kravanja, N. (2018). Comparative research in Room Acoustics Simulation Software (thesis). Department of Architecture and Civil Engineering, Gothenburg.

Vorländer, M. (2020). Chapter 11/Simulation of Sound in Rooms. In Auralization (Second, pp. 171–224). Springer.

Ιστοσελίδες

Mackel, S. (2018, October 3). *What did you say?* Aercoustics. Retrieved February 20, 2022, from <https://aercoustics.com/designing-community-spaces-acoustics/>

Acoustic Materials & Technologies Ltd. (2010). *Absorption coefficients* .

<http://www.akustik.ua/>. Retrieved February 7, 2022, from https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf

Sound absorption coefficient chart: JCW acoustic supplies. Acoustic Supplies. (n.d.).

Retrieved February 8, 2022, from <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/>

Sengpiel, E. (n.d.). *Absorption Coefficients α of Building Materials and Finishes*.

Absorption coefficients building materials finishes RT60 alpha coefficient
acoustic absorbing absorption floor seating wall ceiling miscellaneous materials
- sengpielaudio Sengpiel Berlin. Retrieved February 8, 2022, from <http://www.sengpielaudio.com/calculator-RT60Coeff.htm>

Knauf. (n.d.). *Room Acoustics with Knauf*. Retrieved from

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_ivKJhe_1AhUtQ_EDHdtQAjkQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.knauf.de%2Fwmv%2F%3Fid%3D20536&usg=AOvVaw0zKHbnTM7FGzPS2K5aE4bf

Παράρτημα 1

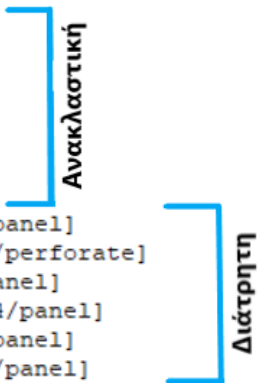
Στο συγκεκριμένο παράρτημα θα αναφερθούν κάποια χαρακτηριστικά του μοντέλου και επίσης το τρόπο με τον οποίο δέχεται τις τροποίηση για τα περιστρεφόμενα πάνελ. Ξεκινώντας, είχε ήδη αναφερθεί, πως για τη κατασκευή του χωρίστηκε σε δυο τμήματα, το επίπεδο και το κεκλιμένο. Με αυτό το διαχωρισμό ήταν ευκολότερη η διαχείριση των δυο κυρίων τμημάτων της αίθουσας, Σκηνής και Ακροατήριου. Λόγω των πολλών κλίσεων το μοντέλο έχει κατασκευαστεί με τριγωνομετρική προσέγγιση, καθώς γίνεται χρήση εφαπτομένων και ημιτόνων κάποιων γωνιών. Εξ αρχής ορίστηκαν κάποιες από αυτές τι γωνίες ως σταθερές τιμές πάνω στις οποίες χτίστηκε μεγάλο τμήμα των κατασκευών. Μια εξ αυτών η $h6dgr$, που αφορά την κλίση του δαπέδου, 6,71 μοίρες, και πάνω σε αυτήν κατασκευάστηκαν τα καθίσματα και τα ανακλαστικά πάνελ του Ακροατηρίου. Επίσης ορίστηκε η $w5dgr$, 76,48 μοίρες, που αφορά τη κλίση των τοίχων ως προς τον άξονα γγ', Πάνω σε αυτή τιμή έχουν χτιστεί, τα σκαλοπάτια της σκηνής, η πόρτα καθώς και τα ανακλαστικά πάνελ του Ακροατηρίου.

Επιπλέον, για την επίλυση μικρών προβλημάτων του μοντέλου, ορίστηκε μια σταθερή τιμή mnd (minimum distance), η οποία πρόκειται για τη μικρότερη δυνατή μεταβολή που αναγνωρίζει το CATT. Το μέγεθος της είναι 0,001 και χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις που οι τριγωνομετρικές πράξεις, είτε δημιουργούσαν προβλήματα, με στοιχεία να βγαίνουν εκτός ορίων του χώρου, είτε για ασυνεννοησία μεταξύ διαφόρων κατασκευών. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση τους στα σκαλοπάτια της σκηνής, τα οποία για κάποιο λόγο έβγαιναν εκτός ορίων της Αίθουσας. Με σταδιακή χειροκίνητη μείωση του τμήματος που προεξείχε και αρκετές επαναλήψεις η δυσκολία αυτή επιλύθηκε.

Τέλος, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα της φυσικής Αίθουσας να τροποποιεί κάποια από τα εσωτερικά της στοιχεία, κρίθηκε απαραίτητο να επιτρέπεται και στο ψηφιακό μοντέλο να μιμείται αυτή την αλλαγή. Για τον λόγο αυτό εντός του CATT Acoustic έχουν δημιουργηθεί οι δυο εκδοχές, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1. Καθώς δεν είναι δυνατόν να συνυπάρχουν, θα χρειαστεί κάθε φορά να επιλεγεί μια από αυτές, ανάλογα με την συνθήκη που θέλουμε να εξετάσουμε. Στο συγκεκριμένο

παράδειγμα, το panel 70 είναι αυτό προσδίδει κάθε φορά την κατάσταση από Ανακλαστική [panel] σε Διάτρητη [perforate].

```
[69 panelR(1)Back/104 105 115 114/panel]
[70 panelR(1)Front/106 107 117 116/curtain]*
;[70 panelR(1)Front/106 107 117 116/panel]**
[71 panelR(1)Top/114 115 116 117/panel]
[72 panelR(1)Bottom/107 106 105 104/panel]
[73 panelR(1)Left/105 106 116 115/panel]
[74 panelR(1)Right/114 117 107 104/panel]
;[69 perforate panelR(1)Back/104 105 115 114/panel]
;[70 perforate panelR(1)Front/106 118 119 116/perforate]
;[71 perforate panelR(1)Top/114 115 116 119/panel]
;[72 perforate panelR(1)Bottom/118 106 105 104/panel]
;[73 perforate panelR(1)Left/105 106 116 115/panel]
;[74 perforate panelR(1)Right/114 119 118 104/panel]
```



Εικόνα 4.1 Μέθοδος σχεδιασμού Ανακλαστικής και Διάτρητης επιφάνειας.

Οι επιφάνειες που απαιτείται να ατμοποιηθούν για την αφαίρεση των πανιών είναι οι εξής:

- *Sub-plane 12*
- *Panels 41, 47, 53, 59, 65, 70, 76, 82.*

Παράρτημα 2

Εδώ παρατίθεται ο πίνακας με τους συντελεστές απορρόφησης για κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο ψηφιακό μοντέλο. Αρκετά από αυτά τα υλικά βρίσκονται σε βάσεις δεδομένων καθώς είναι κοινά για την κατασκευή συναυλιακών χώρων ή θεάτρων. Υπάρχουν όμως και με αρκετές παραλλαγές, οι οποίες φαίνεται ότι διαφέρουν σημαντικά στην απορρόφηση του ήχου. Μια από αυτές είναι οι διάτρητες οι επιφάνειες, που εντοπίζονται στη οροφή και τα περιστρεφόμενα πάνελ. Για να βρεθούν πληροφορίες χρειάστηκε εξετασθούν κατάλογοι κατασκευαστικών εταιριών και να επιλεγεί αυτός που προσεγγίζει περισσότερο τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Μια διαφορετική προσέγγιση έγινε για τα μαύρα πανιά που είχαν τοποθετηθεί στα πάνελ της σκηνής. Καθώς στη βάση δεδομένων η διαφοροποίηση του πάχους των πανιών γινόταν ποιοτικά, δηλαδή hard, medium, light, δεν ήταν ξεκάθαρο ποια από αυτές αφορούσε τη συγκεκριμένη περίπτωση. Επιλέχθηκε μια συνδυαστική προσέγγιση, με τη χρήση μέσων τιμών της light και medium εκδοχής. Τελικά, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης αποδείχθηκε πως τα μαύρα πανιά έτειναν περισσότερο στην medium εκδοχή.

Συντελεστές απορρόφησης βαθμονομημένου μοντέλου						
Υλικό κατασκευής	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Wood (Stage Floor)	0.18	0.12	0.1	0.09	0.08	0.07
Plasterboard (Wall/Panels/C	0.18	0.15	0.1	0.05	0.04	0.04
Plasterboard with air-space above	0.2	0.15	0.1	0.08	0.04	0.02
Perforate	0.45	0.7	0.8	0.8	0.65	0.45
Doors	0.35	0.39	0.44	0.49	0.54	0.57

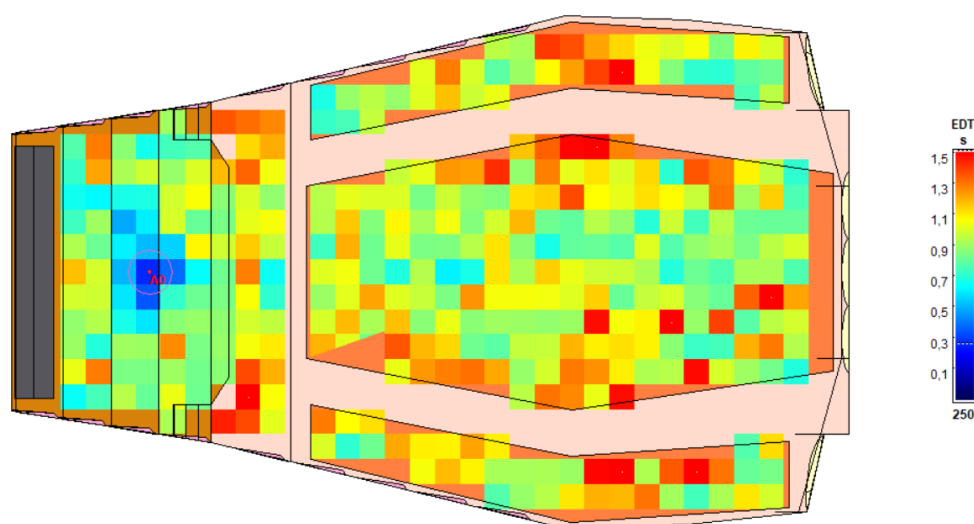
Glass (Window)	0.1	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
Auditorium unoccupied	0.36	0.49	0.57	0.57	0.61	0.6
Auditorium full occupied	0.37	0.48	0.68	0.73	0.77	0.74
Velour Light- Medium	0.07	0.29	0.49	0.41	0.39	0.45

Πίνακας 4.1 Συντελεστές απορρόφησης των κατασκευαστικών υλικών

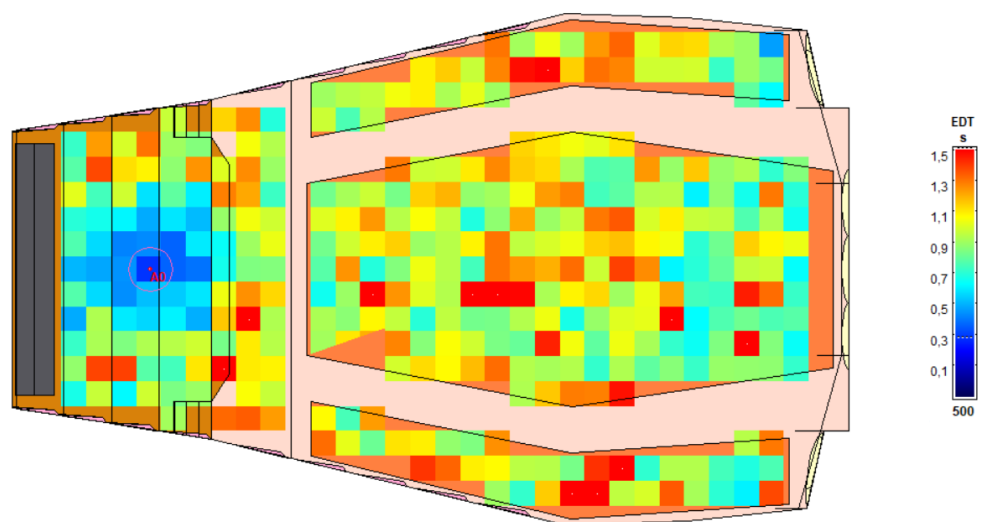
Παράρτημα 3

Ως συνέχεια της υποενότητας 3.4, παρουσιάζονται τα Heatmaps των παραμέτρων EDT, C80, D50, SPL και STI για τις συχνотικές περιοχές από 250 Hz έως 2k Hz. Ο λόγος που επιλέχθηκαν αυτές οι συχνότητες είναι καθώς τα περισσότερα μουσικά όργανα και η ανθρωπιστή φωνή κινούνται γύρω από αυτό το συχνотικό εύρος. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται αφορούν την Αίθουσα στην συνθήκη κατά την οποία έγιναν οι μετρήσεις. Κάποια από τα παρακάτω HeatMaps μπορούν συγκριθούν με τις τιμές που υπάρχουν στους Πίνακες της υποενότητα 2.3, δηλαδή αυτές της φυσική Αίθουσας όπως προέκυψαν μετά την επεξεργασία των ηχητικών σημάτων. Μπορεί εύκολα κάποιος να διακρίνει ότι για όλες ακουστικές παραμέτρους υπάρχει συμφωνία του μοντέλου με τις πραγματικές τιμές για όλες τις θέσεις.

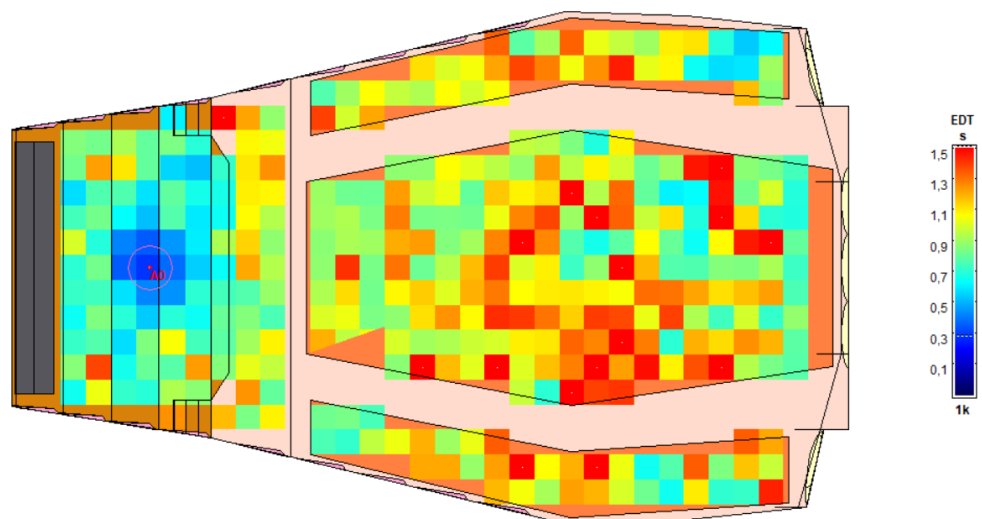
EDT HeatMaps



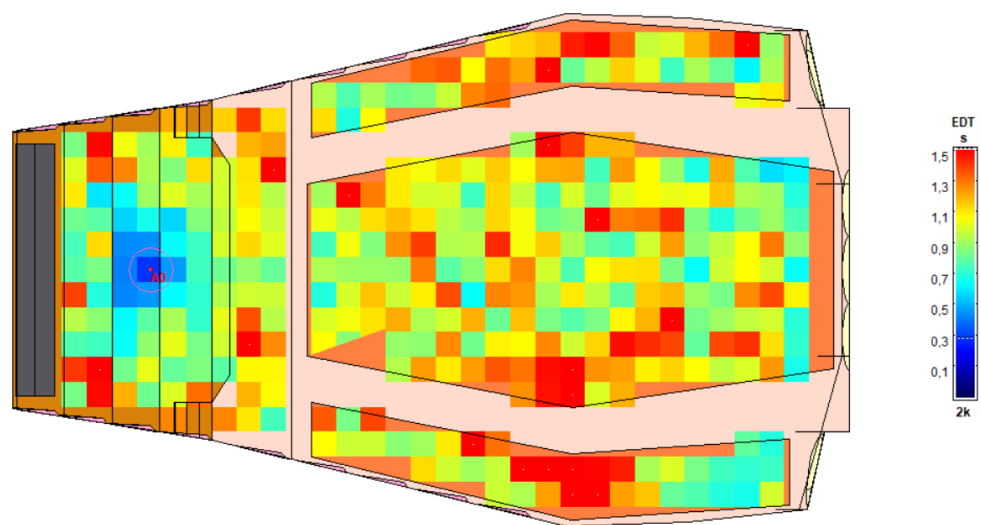
Εικόνα 5.1 EDT στα 250 Hz.



Εικόνα 5.2 EDT στα 500 Hz.

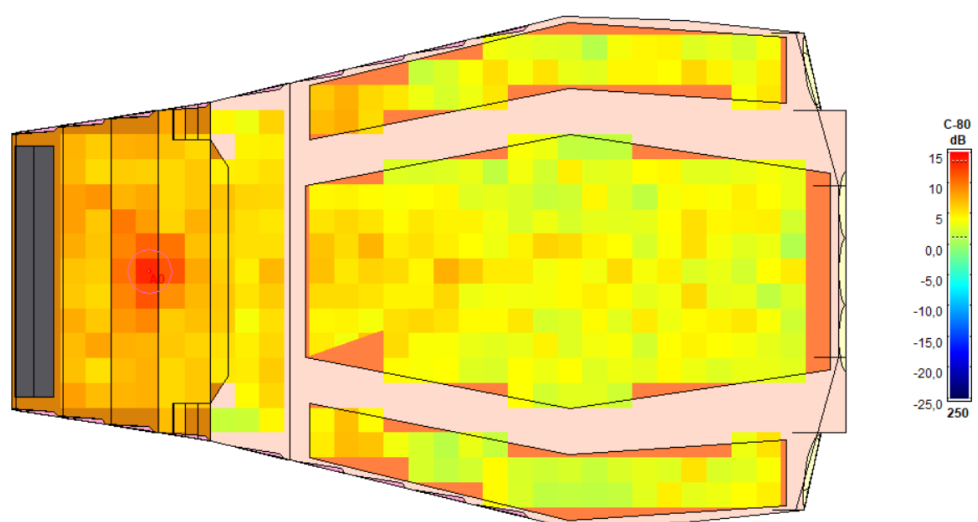


Εικόνα 5.3 EDT στα 1k Hz.

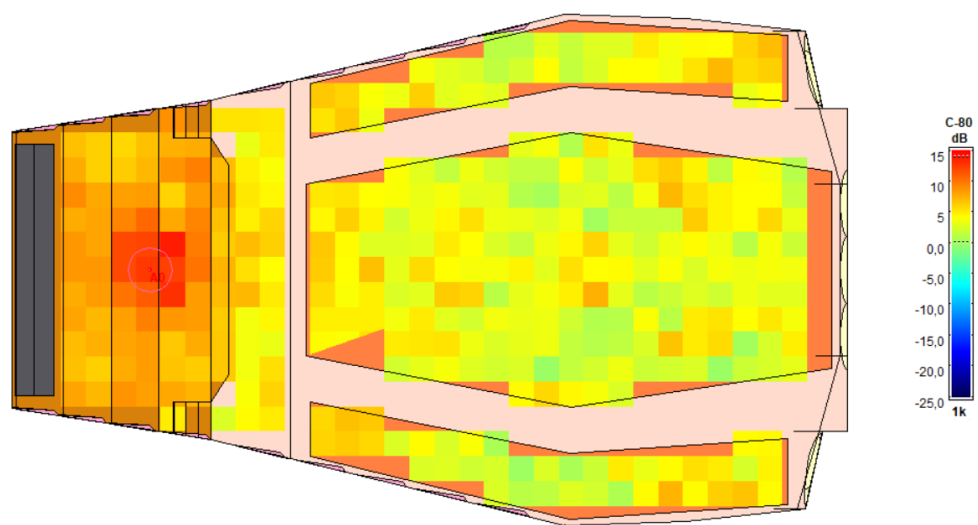


Εικόνα 5.4 EDT στα 2k Hz.

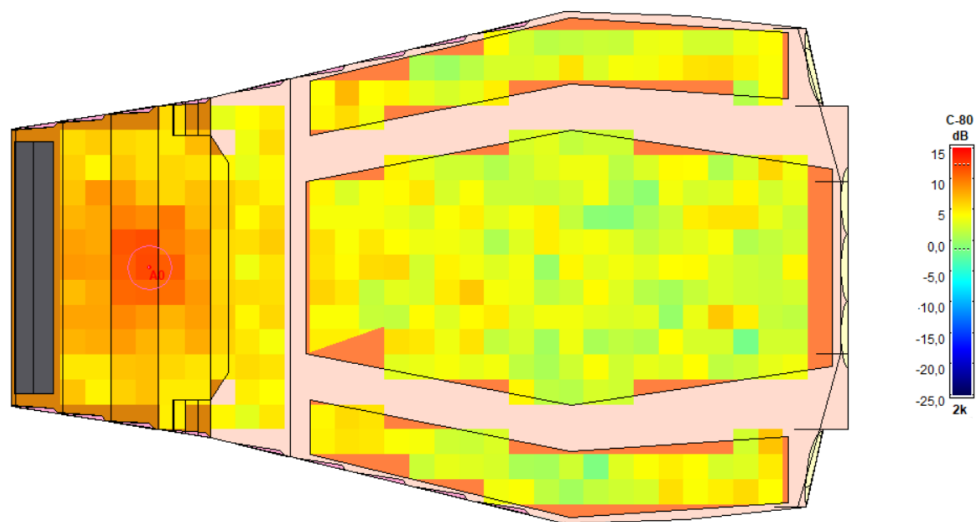
C80 HeatMaps



Εικόνα 5.5 C80 στα 250 Hz.

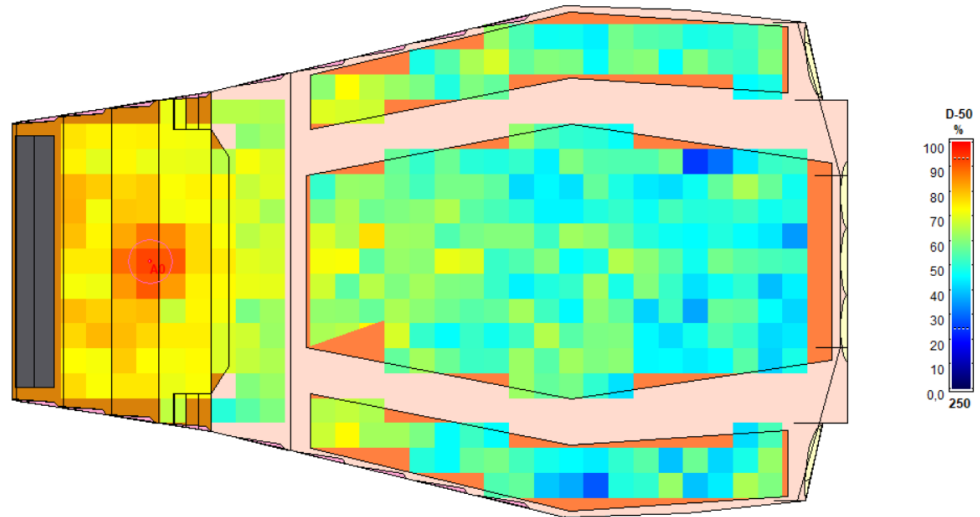


Εικόνα 5.6 C80 στα 1k Hz.

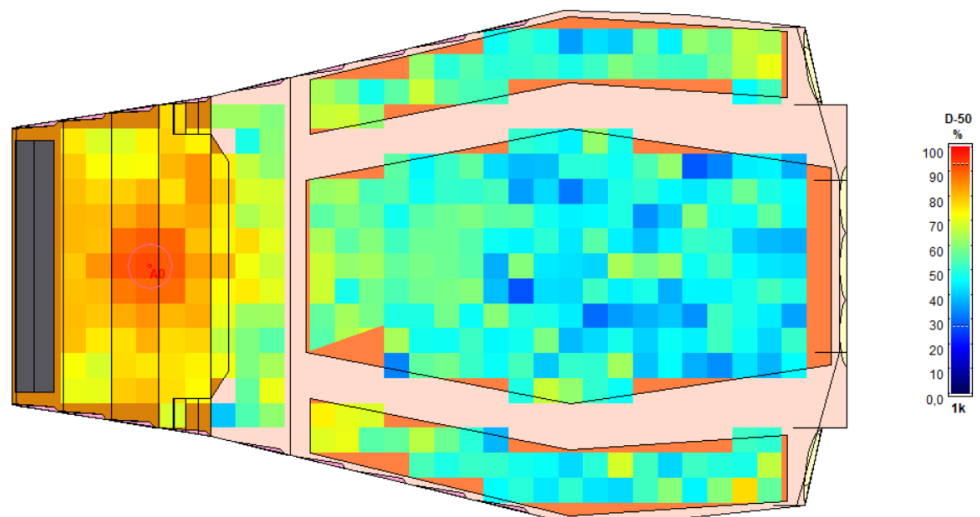


Εικόνα 5.7 C80 στα 2k Hz.

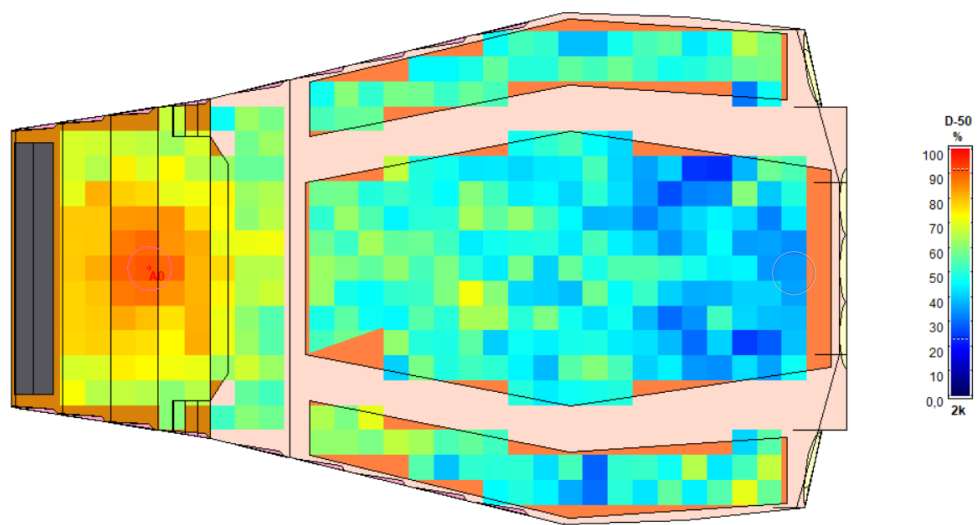
D50 HeatMaps



Εικόνα 5.8 D50 στα 250 Hz.

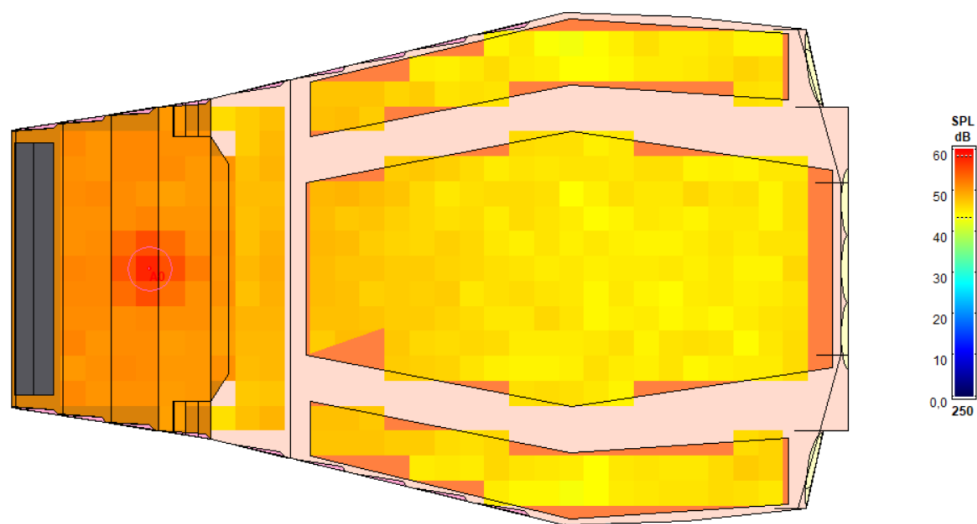


Εικόνα 5.9 D50 στα 1k Hz.

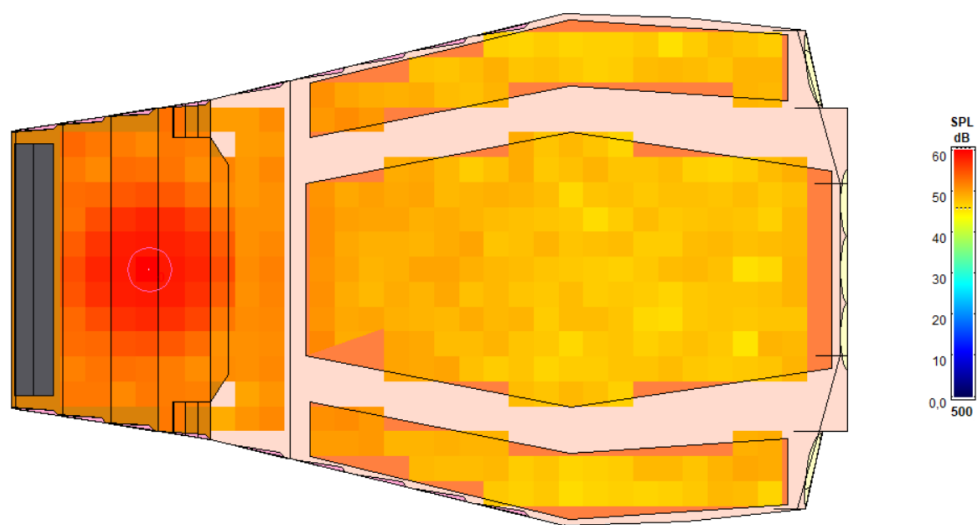


Εικόνα 5.10 D50 στα 2k Hz.

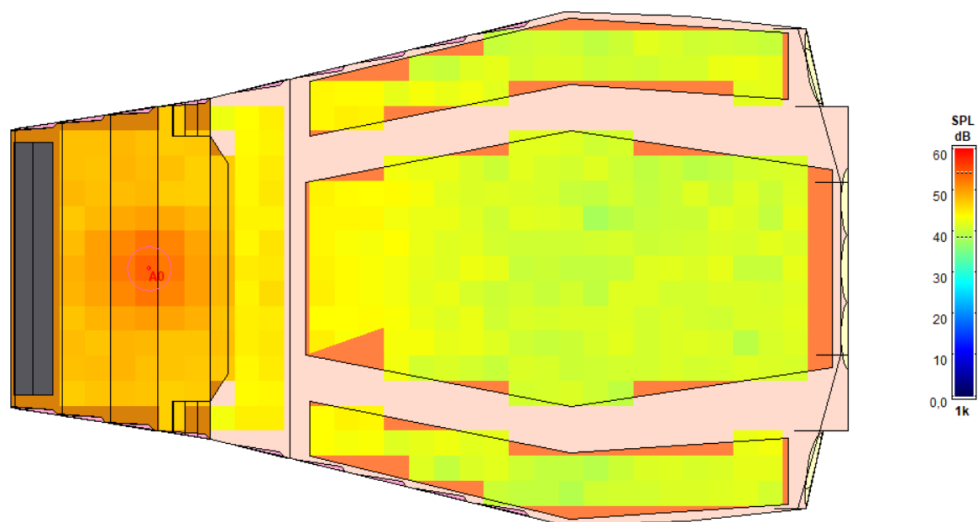
SPL HeatMaps



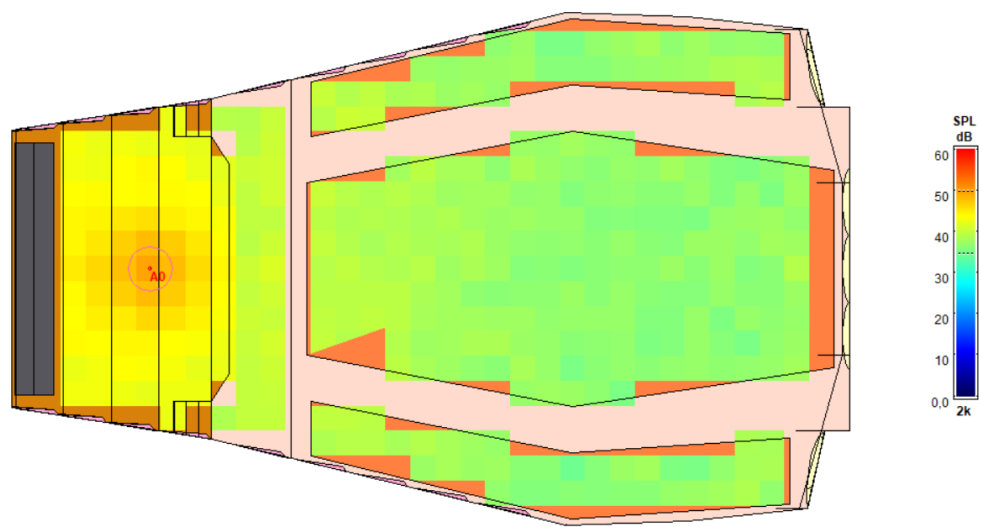
Εικόνα 5.11 SPL στα 250 Hz.



Εικόνα 5.12 *SPL στα 500 Hz.*

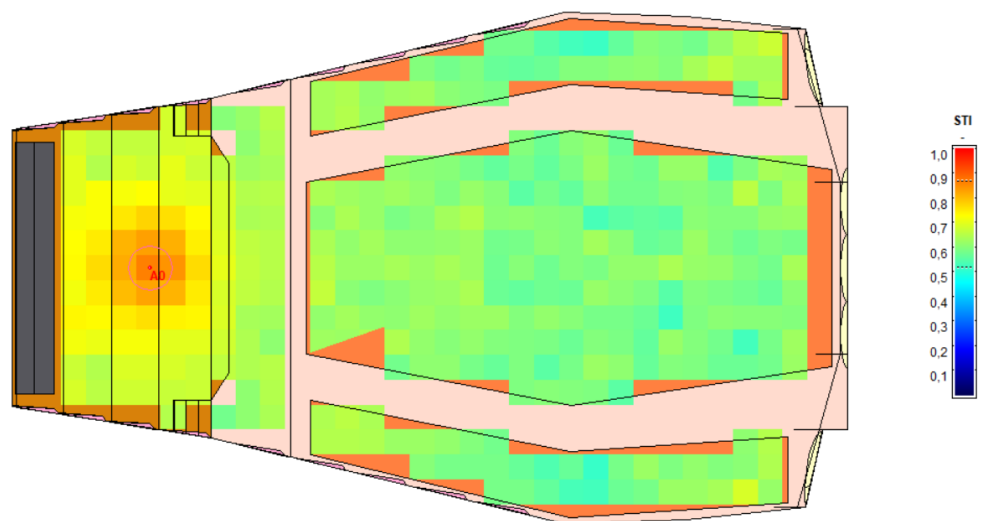


Εικόνα 5.13 *SPL στα 1k Hz.*



Εικόνα 5.14 SPL στα 2k Hz.

STI HeatMap



Εικόνα 5.15 STI για σύνολο Αίθουσας.

