



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Ακουστική και ψυχοακουστική μελέτη του στούντιο
LabMAT: διερεύνηση της επίδρασης της διάταξης των
περιστρεφόμενων ακουστικών πάνελ”**

Απόστολος Π. Θεοδοσίου

Επιβλέπουσα: Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

Σεπτέμβριος 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Ακουστική και ψυχοακουστική μελέτη του στούντιο LabMAT: διερεύνηση της επίδρασης της διάταξης των περιστρεφόμενων ακουστικών πάνελ”

Απόστολος Π. Θεοδοσίου

A.M.: 160303

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: **Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακουστική μελέτη του μεγάλου τμήματος της διαχωρισμένης αίθουσας ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT, και η επίδραση της διάταξης των περιστρεφόμενων πάνελ. Ακολουθώντας τις σύγχρονες προδιαγραφές ISO περί ακουστικών μελετών, πραγματοποιήθηκε ακουστική μέτρηση του χώρου για 58 διαφορετικές διατάξεις των πάνελ. Από τις κρουστικές αποκρίσεις των μετρήσεων, υπολογίστηκαν οι ακουστικές παράμετροι για έξι συχνотικές περιοχές και οκτώ θέσεις ακρόασης, για τις καταστάσεις μέγιστης και ελάχιστης απορρόφησης. Μέσω του CATT Acoustic, δημιουργήθηκε το εικονικό μοντέλο της αίθουσας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων της αίθουσας, παρουσιάζονται και αντιπαραβάλλονται με τα αποτελέσματα προηγούμενων ακουστικών μελετών της αίθουσας. Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη χρήση της αίθουσας ηχογραφήσεων.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ακουστική

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ακουστικές μετρήσεις, ακουστικές παράμετροι, μεταβλητή ακουστική, γεωμετρική ακουστική, μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής, CATT Acoustic

ABSTRACT

This thesis examines the acoustic properties of the larger part of the separated studio LabMAT's recording room, and the effect of the rotating wall panels' layout. Acoustic measurements of 58 different layouts have been performed, following the recommendations of the current ISO standards. Acoustic parameters have been calculated from the measurements' impulse responses, across six frequency bands and eight listening positions, for maximum and minimum absorption layouts. The room's model was created using CATT Acoustic. The results of both measurements and simulations are presented and compared to those of previous acoustic studies of the room. The results of this study can be used towards the better use of the recording room.

SUBJECT AREA: Acoustics

KEYWORDS: Acoustic measurements, acoustic parameters, variable acoustics, geometrical acoustics, geometrical acoustic model, CATT Acoustic

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερως την επιβλέπουσα, Επίκουρη Καθηγήτρια κα Αρετή Ανδρεοπούλου για τη εξαιρετική συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή στην ολοκλήρωση της. Επίσης, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα Αναστασία Γεωργάκη για την υπόδειξη του αντικειμένου αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ι.Πεϊκίδη, Θωμά Καρδακάρη και Σάββα Ρακιντζάκη για την παροχή του απαραίτητου ηχητικού εξοπλισμού.

Πίνακας περιεχομένων

1	Πρόλογος.....	8
2	Εισαγωγή.....	9
2.1	Ιστορική αναδρομή.....	9
2.2	Εξέλιξη της ακουστικής.....	11
3	Ακουστική κλειστών χώρων.....	13
3.1	Κρουστική απόκριση και συνέλιξη.....	13
3.2	Ανακλάσεις και σκέδαση.....	15
3.3	Γεωμετρική ακουστική.....	17
3.4	Προδιαγραφές ακουστικών μελετών και μέθοδοι.....	18
3.5	Ακουστικές παράμετροι.....	20
4	Η αίθουσα ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT.....	23
4.1	Χαρακτηριστικά της αίθουσας και υποδομές.....	24
4.2	Προηγούμενες ακουστικές μελέτες.....	27
5	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	29
5.1	Εξοπλισμός.....	29
5.2	Ισοστάθμιση κέρδους προενισχυτών.....	30
5.3	Εκτέλεση μετρήσεων για εξισορρόπηση φάσματος.....	31
5.4	Εκτέλεση των ακουστικών μετρήσεων.....	32
6	Λογισμικό και επεξεργασία των δεδομένων.....	35
6.1	Επεξεργασία των ακουστικών μετρήσεων.....	35
7	Ψηφιακή προσομοίωση της αίθουσας στο CATT Acoustic.....	43
7.1	Σχεδιασμός της αίθουσας (δημιουργία του μοντέλου).....	43
7.2	Έλεγχος διακύμανσης της επαναληψιμότητας.....	47
7.3	Βαθμονόμηση μοντέλου.....	49
8	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	56
9	Συζήτηση.....	64
9.1	Τεχνικά ζητήματα.....	64
9.2	Καλλιτεχνικές προεκτάσεις.....	67
10	Επίλογος.....	69
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....	77
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.....	81

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5.....	84
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	88

1 Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Μουσικολογία», με κατεύθυνση την «Μουσική Τεχνολογία», του τμήματος Μουσικών Σπουδών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κατά την ακαδημαϊκή περίοδο 2017-2018. Σε αυτήν, παρουσιάζονται βασικές αρχές της ακουστικής κλειστών χώρων, με τρόπο ο οποίος αποβλέπει στην ποιοτική κυρίως κατανόηση του φαινομένου από τον μελλοντικό αναγνώστη. Επίσης, περιγράφεται η μέθοδος της γεωμετρικής ακουστικής, οι περιορισμοί και οι εφαρμογές της. Παράλληλα, γίνεται αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας δημιουργίας ψηφιακού ακουστικού μοντέλου στο λογισμικό CATT Acoustic, της βαθμονόμησης του, της εξαγωγής ακουστικών παραμέτρων και κρουστικών αποκρίσεων. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται διεξοδικά η μέθοδος εκτέλεσης ακουστικών μετρήσεων, σύμφωνα με τις διεθνείς οδηγίες. Τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, των προσομοιώσεων του ακουστικού μοντέλου, όπως επίσης αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης του συγκεκριμένου χώρου και η μελέτη της κατασκευάστριας εταιρίας, παρουσιάζονται και αντιπαραβάλλονται.

Η ευρύτητα του αντικειμένου της παρούσας μελέτης, μπορεί να αποδειχθεί εκπαιδευτικά χρήσιμη, κατά την εισαγωγική προσέγγιση της ακουστικής κλειστών χώρων, καθώς άπτεται πτυχών της, απαραίτητων για τη βαθύτερη κατανόηση του ήχου και κατά συνέπεια της ίδιας της μουσικής δημιουργίας. Η αναλυτική περιγραφή του τρόπου διεξαγωγή και επεξεργασίας ακουστικών μετρήσεων και της χρήσης του CATT Acoustic, μπορεί να διευκολύνουν σημαντικά τις σχετικές μελλοντικές έρευνες. Τέλος, η συγκέντρωση όλων των μέχρι στιγμής μελετών του μεγάλου τμήματος της διαχωρισμένης αίθουσας του στούντιο LabMAT, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της παρούσας και με την ύπαρξη πλέον ενός ακριβούς ψηφιακού μοντέλου, αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υλικοτεχνικών υποδομών του στούντιο, ενώ μπορεί να αποτελέσει την αρχή μιας σειράς αντίστοιχων μελλοντικών μελετών προς αυτή την κατεύθυνση.

2 Εισαγωγή

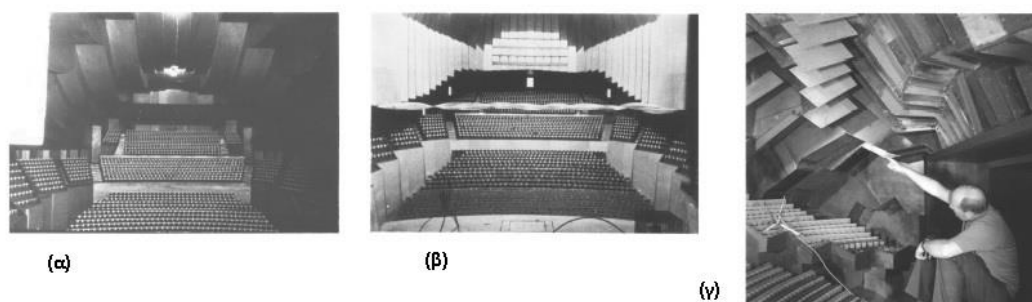
2.1 Ιστορική αναδρομή

Η εμπειρία ενός χώρου με «καλή ή κακή» ακουστική αποτελεί καθημερινό φαινόμενο για όλους, είτε πρόκειται για μια αίθουσα συναυλιών, για μια εκκλησία ή για ένα δωμάτιο σπιτιού. Η επίδραση της ακουστικής στην καθημερινότητα του ανθρώπου, δεν μπορεί παρά να υπάρχει όσο και αυτός, ανεξάρτητα του πότε άρχισε να αντιμετωπίζεται ως παράγοντας κατά την διαμόρφωση των χώρων δραστηριότητας του. «Χώροι που να προορίζονται για τη μουσική εκτέλεση υπήρχαν ανέκαθεν και παντού, αφού η μουσική συναντάται ιστορικά σε όλα τα εξελικτικά στάδια των ανθρωπίνων κοινωνιών, είτε πρόκειται για προϊστορικούς κυνηγούς που μεταφερόντουσαν από το δάσος στις σπηλιές για τη διεξαγωγή των τελετών τους, είτε για τον σύγχρονο άνθρωπο ο οποίος σχεδιάζει χώρους συγκεκριμένης ακουστικής για την κάθε του δράση» [33].

Σύμφωνα με ιστορικές ενδείξεις η ακουστική συνυπολογίζεται στον σχεδιασμό, κυρίως θεάτρων και χώρων εκδηλώσεων, τα τελευταία 2500 χρόνια. Ο Ρωμαίος μηχανικός Βιτρούβιος αφιέρωσε εκτεταμένο όγκο του συγγράμματός του στον σχεδιασμό των θεάτρων. Σε αυτό θίγει ζητήματα και παραθέτει προτάσεις σχετικά με την προτιμώμενη θέση για την κατασκευή ενός θεάτρου βάσει γεωγραφικών και μετεωρολογικών παραμέτρων. Αναφέρεται σε διάφορα ζητήματα, όπως η εξασφάλιση της ανεμπόδιστης θέασης της σκηνής από τις κερκίδες, τη θέση των εισόδων, αλλά και σε ζητήματα ακουστικής. Κατά κύριο λόγο, αναπαράγει και στηρίζεται σε ευρήματα και θεωρίες οι οποίες είχαν διατυπωθεί δύο περίπου αιώνες νωρίτερα από τον Πυθαγόρα, ο οποίος εισήγαγε το αντικείμενο της ακουστικής περίπου το 530 π.Χ. Βασισμένος στην πρώτη αυτή γνώση γύρω από την ακουστική, ο Βιτρούβιος αναφέρεται στη διάδοση του ήχου από τη σκηνή προς το ακροατήριο παρομοιάζοντας την με την μετάδοση μίας διαταραχής στην επιφάνεια του νερού. Παρατηρεί και προτείνει οδηγίες σχετικά με την καταληπτότητα της ομιλίας, την ηχώ, την επίδραση των ανακλάσεων στην εντύπωση του απ' ευθείας ήχου, την χρήση των ηχητικών αγγείων κ.α. Το σύγγραμμα του Βιτρούβιου εκδόθηκε στα τέλη του 15^{ου} αιώνα και εκτιμάται ότι αποτελούσε συμβουλευτικό εγχειρίδιο για τους κατασκευαστές των μεγάλων κτηρίων της εποχής. Άλλα αξιόλογα συγγράμματα γύρω από την ακουστική δεν διασώζονται από την εποχή του μεσαίωνα και της αναγέννησης [5].

Για το μεγαλύτερο μέρος αυτού του πρώιμου χρονικού διαστήματος, ο ακουστικός σχεδιασμός των κτηρίων γινόταν βάσει εμπειρίας, καθώς η επιστήμη της ακουστικής άρχισε να αναπτύσσεται τον 18^ο και 19^ο αιώνα. Κατά την περίοδο αυτή, η ακουστική ήταν άμεσα συνυφασμένη με τη φύση των μουσικών οργάνων και μόνο κατά τον 20^ο αιώνα άρχισε να θεμελιώνεται επιστημονικά και να ποσοτικοποιούνται οι παράμετροί της. Περίπου το 1895, ο φυσικός Wallace Sabine ανακάλυψε τους παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο αντήχησης ενός δωματίου, και ξεκίνησε να εφαρμόζει τροποποιητικές παρεμβάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής κλειστών χώρων [5].

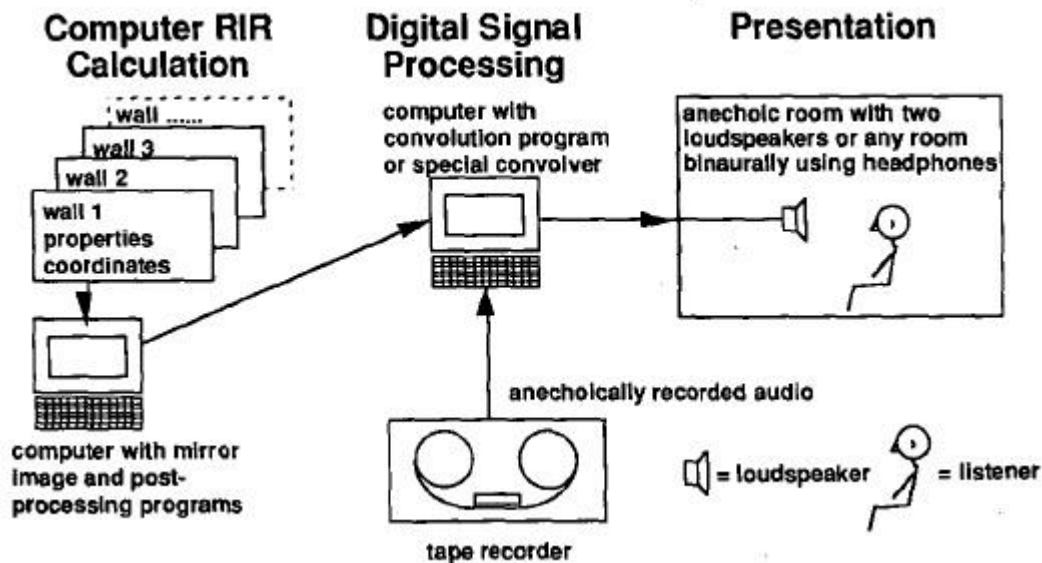
Η μέτρηση του ήχου κατέστη πρακτικά δυνατή περίπου το 1920, με την ανάπτυξη των πρώτων μικροφώνων, ενισχυτών και παλμογράφων, ενώ από το 1930 καταγράφονται οι πρώτες κατασκευές μοντέλων κλίμακας, με σκοπό να μετρηθεί η ακουστική απόκριση ενός πραγματικού χώρου [5]. Οι πρώτες απόπειρες ακουστικής αναπαράστασης έγιναν το 1930 από τον Spandock και την ερευνητική του ομάδα, χρησιμοποιώντας φυσικά μοντέλα σε κλίμακα 1:5 και αργότερα 1:10. Ένα ειδικό μεγάφωνο αναπαρήγαγε ηχητικό σήμα μέσα σε αυτά τα μοντέλα και η απόκριση τους ηχογραφούνταν και αναπαραγόταν σε αμφιωτική (binaural) μορφή. Για τον έλεγχο της ακρίβειας του μοντέλου και της διαδικασίας, ως ηχητικό αρχείο δοκιμής χρησιμοποιούνταν αρχείο ομιλίας και στην συνέχεια γινόταν σύγκριση της καταληπτότητας της ομιλίας μεταξύ του μοντέλου και του πραγματικού χώρου [11].



Εικόνα 1 - Μοντέλο κλίμακας 1:10 α)αρχικού, β) ενδιάμεσου, γ) τελικού σταδίου του εσωτερικού σχεδίου της Όπερας του Σίδνεϋ [5]

Παράλληλα, εξελίσσονται οι δημιουργίες εικονικής πραγματικότητας, οι οποίες μπορεί να επικεντρώθηκαν αρχικά στην οπτική πτυχή, σύντομα όμως ανέκυψε η δυνατότητα ακριβούς αναπαράστασης της ακουστικής εμπειρίας του περιβάλλοντος. Ο όρος ακουστικοποίηση (auralization) εισήχθη από τον Kleiner το 1993, ως ένα ακουστικό ανάλογο της οπτικοποίησης (visualization) [10]. «Ακουστικοποίηση ονομάζεται η διαδικασία του να καταστεί ακουστό το ηχητικό πεδίο μιας πηγής στον χώρο, μέσω φυσικής και μαθηματικής μοντελοποίησης, με τρόπο τέτοιο που να προσομοιάζει την αμφιωτική ακουστική εμπειρία σε μια συγκεκριμένη θέση του μοντελοποιημένου χώρου» [11]. Κατά έναν πιο ευρύ ορισμό από τον Vorlander, «η ακουστικοποίηση είναι η τεχνική δημιουργίας ηχητικών αρχείων από αριθμητικά δεδομένα (προσομοίωσης, μέτρησης ή σύνθεσης), τα οποία να μπορούν να ακουστούν»[13].

Με τη χρήση της πρώιμης ψηφιακής επεξεργασίας ήχου πολλά από τα μειονεκτήματα των μεθόδων φυσικών μοντέλων κλίμακας μπορούσαν να υπερπηδηθούν. Οι Meyer και Klein χρησιμοποίησαν μια πρότυπη μέθοδο ακουστικοποίησης μέσω πολλαπλών ηχείων, λογισμικών ψηφιακής μοντελοποίησης της πηγής και εντοπισμού ακτίνας (ray tracing model), για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της κρουστικής απόκρισης μιας αίθουσας. Η μέθοδος αυτή απαιτούσε τουλάχιστον 50 μεγάφωνα τοποθετημένα σε ημισφαιρική διάταξη εντός ανηχικής αίθουσας, ώστε να είναι κατά το δυνατόν ακριβείς οι γωνίες πρόσπτωσης προς τον ακροατή, από τα σημεία ανάκλασης προς την θέση ακρόασης. Τροφοδοτώντας τα μεγάφωνα με σήματα που είχαν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία φιλτραρίσματος, εξασθένησης, χρονικής καθυστέρησης, και με σήματα αντήχησης, ήταν δυνατόν να σημειωθούν αποδεκτά αποτελέσματα ως προς την καταληπτότητα της ομιλίας [11].



Εικόνα 2 Βασικές αρχές συστήματος πλήρως αυτοματοποιημένης ακουστικοποίησης [11]

Η μοντελοποίηση της ακουστικής κλειστών χώρων, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, προτάθηκε το 1962 αρχικά από τον Schroeder και εφαρμόστηκε στην πράξη από τον Krokstad το 1968 και τον Schroeder το 1973. Η νέα αυτή δυνατότητα δεν αντικατέστησε άμεσα τα μοντέλα κλίμακας στον τομέα της συμβουλευτικής ακουστικής. Για την ακρίβεια, μοντέλα κλίμακας εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα, σε συνδυασμό με υπολογιστικά μοντέλα, από όλες τις διεθνούς βεληνεκούς εταιρίες ακουστικού σχεδιασμού, για να αποκτήσουν πλήρη εικόνα της ακουστικής ενός υπό κατασκευή χώρου. Κατά τον χρόνο που μεσολάβησε έως ότου εδραιωθούν τα υπολογιστικά μοντέλα, τα λογισμικά τους έγιναν πιο φιλικά προς τον χρήστη, πιο ακριβή ως προς τα αποτελέσματα και αρκετά φθηνότερα από τα αντίστοιχα μοντέλα κλίμακας [13].

Τα λογισμικά γεωμετρικής ακουστικής εξακολουθούν να υπόκεινται σε συνεχείς εξελίξεις των επί μέρους μονάδων τους, όπως οι αλγόριθμοι δημιουργίας κρουστικών αποκρίσεων ή οι βάσεις δεδομένων των διαθέσιμων υλικών. Τα περισσότερα από αυτά προσφέρουν εργαλεία επεξεργασίας ηχητικού σήματος, εργαλεία οπτικοποίησης και ακουστικοποίησης σε διάφορες μορφές ηχητικών αρχείων. Παράλληλα, οι αλγόριθμοι γεωμετρικής ακουστικής συνεχώς εξελίσσονται καθώς τα τελευταία χρόνια ο τομέας προσομοίωσης της ακουστικής κλειστών χώρων αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς [13].

2.2 Εξέλιξη της ακουστικής

Η προσπάθεια προσέγγισης της φύσης της ακουστικής, μπορεί να διευκολυνθεί από την αντιπαράβολή της με αυτή των μουσικών οργάνων. Παρ' όλο που μια τέτοια σχέση δεν μοιάζει προφανής, αρκεί να αναλογιστεί κανείς την λειτουργία μιας αίθουσας συναυλιών ως ένα μεγάλο μουσικό όργανο, καθώς το σχήμα και τα υλικά της επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακουστική εμπειρία του ακροατή. Τα μουσικά όργανα δεν κατασκευάζονται από επιστημονικά εκπαιδευμένο προσωπικό, αλλά από άτομα που απέκτησαν την απαραίτητη εμπειρία μέσω μακράς και συστηματικής εκπαίδευσης. Παρ' όλα αυτά, ο τρόπος λειτουργίας και παραγωγής ήχου των μουσικών οργάνων, αποτελεί φυσική διαδικασία η οποία μπορεί,

τουλάχιστον θεωρητικά, να περιγραφεί πλήρως με επιστημονικούς κανόνες. Τα τελευταία χρόνια, πράγματι, η κατασκευή των μουσικών οργάνων μπορεί να προβλεφθεί και να διεξαχθεί πλήρως με επιστημονικές μεθόδους. Αντίθετα, η ακουστική χώρων διαφέρει κυρίως ως προς το μέγεθος και το κόστος του τελικού προϊόντος, αλλά και ως προς το πλήθος των αιθουσών που κατασκευάζονται. Επίσης, σε αντίθεση με ένα συγκεκριμένο μουσικό όργανο το οποίο κατασκευάζεται με τις ίδιες προδιαγραφές και βελτιώνεται επί μακρά σειρά ετών, κάθε αίθουσα είναι διαφορετική ως προς την γεωμετρία της, τα διαθέσιμα υλικά συνεχώς μεταβάλλονται και ο αρχιτέκτονας καλείται κάθε φορά να δημιουργήσει ένα πρωτότυπο και διαφορετικό χώρο. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατη η συγκέντρωση εμπειρικής τεχνογνωσίας, από την οποία να μπορούν να προκύψουν αξιόπιστοι κανόνες για τον ακουστικό σχεδιασμό των μελλοντικών αιθουσών.

Για τους παραπάνω λόγους, η ακουστική αναγκαστικά στράφηκε προς την επιστημονική της τεκμηρίωση και ξεκίνησε να αποτελεί επιστημονικό κλάδο από τα μέσα του 20^ο αιώνα. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και σήμερα, πολλοί παράγοντες που ευθύνονται για τη διαμόρφωση της ακουστικής ενός κλειστού χώρου παραμένουν μερικώς ή και καθόλου κατανοητοί, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου και του μεγάλου πλήθους βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Επιπλέον, το αποτέλεσμα του ακουστικού σχεδιασμού και η ποιότητα της ακουστικής πρέπει να αξιολογηθούν βάσει υποκειμενικών κριτηρίων. Επομένως, ενώ η μέτρηση ή η πρόβλεψη αντικειμενικών ακουστικών παραμέτρων αποτελεί σημαντικό και αναπόσπαστο εργαλείο κατά τη διαδικασία του ακουστικού σχεδιασμού, δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την υποκειμενική εκτίμηση της ακουστικής, αφού ο ακροατής είναι αυτός που τελικά θα αποφασίσει υπέρ ή κατά της επιτυχίας της.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι ακουστικές μετρήσεις μπορούν να βοηθήσουν αντικαθιστώντας μερικώς τη γνώμη του ακροατηρίου, χωρίς όμως να μπορούν να αντικαταστήσουν και την τελική έκφανση για την επίτευξη ή όχι των επιθυμητών ακουστικών στόχων. Εξ άλλου, λόγω της πολυπλοκότητας του ακουστικού φαινομένου, δεν υπάρχει απόλυτη μαθηματική περιγραφή του, και η χρήση απλουστεύσεων και παραδοχών είναι αναπόφευκτη. Στόχος της ακουστικής είναι η εφαρμογή των παραδοχών αυτών με τέτοιο τρόπο, ώστε οι παράμετροί της να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο στην υποκειμενική τους εκτίμηση. Για τον λόγο αυτό, η εξέλιξη της ακουστικής κλειστών χώρων εξαρτάται σημαντικά από τις εξελίξεις στον τομέα της φυσιολογίας της ακοής. Όσο οι φυσιολογικές και ψυχοακουστικές διαδικασίες που εμπλέκονται στη διαδικασία της ακρόασης δεν είναι πλήρως κατανοητές, η σχέση του αντικειμενικού ερεθίσματος με την υποκειμενική αίσθηση που δημιουργεί πρέπει να ερευνάται εμπειρικά και να συνυπολογίζεται κατά τον ακουστικό σχεδιασμό [6].

3 Ακουστική κλειστών χώρων

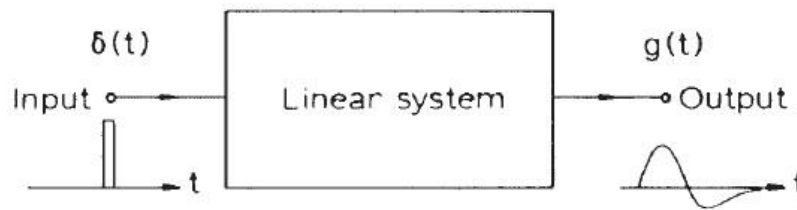
Η ακουστική κλειστών χώρων μελετά την διάδοση του ηχητικού σήματος εντός αίθουσας κλειστών περιβλημάτων. Όπως και σε πολλά άλλα τεχνικά πεδία, έτσι και στην ακουστική κλειστών χώρων, η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών επέφερε ραγδαία εξέλιξη κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Νέες, πιο εξελιγμένες, ακριβείς και λιγότερο κοστοβόρες μέθοδοι προσφέρουν υπολογισμό και προσομοίωση της ακουστικής κλειστών χώρων, επιτρέποντας βάσει των αρχιτεκτονικών τους σχεδίων την πρόβλεψη του πώς αυτοί θα ακούγονται μετά την κατασκευή τους, όπως και την ακουστικοποίηση τους (auralization).

Οι βασικές αρχές της ακουστικής κλειστών χώρων άπτονται δύο πτυχών της φύσης του ηχητικού φαινομένου. Πρώτον, της δημιουργίας και διάδοσης του ήχου, οι οποίες ως διαδικασίες μπορούν να περιγράψουν επακριβώς από τους νόμους της φυσικής και της μηχανικής. Δεύτερον, της βιολογικής και ψυχολογικής επίδρασης του ήχου στον άνθρωπο, η οποία είναι πολύ σημαντική, αλλά αδύνατον να περιγραφεί επακριβώς. Η αλληλεξάρτηση των δύο αυτών πτυχών είναι χαρακτηριστική της ακουστικής κλειστών χώρων, είτε συζητείται μια μέθοδος ακουστικής μέτρησης ή σχεδιασμού, είτε η εγκατάσταση ενός ηχητικού συστήματος [6].

Κάθε σύνθετο ηχητικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση απλών ηχητικών κυμάτων. Οι φυσικές ποσότητες που περιγράφουν το φαινόμενο, όπως για παράδειγμα η πίεση του αέριου μέσου διάδοσης, η πυκνότητα της μάζας του, η ταχύτητα των σωματιδίων, η κατεύθυνση και ταχύτητα της διάδοσης του, το μήκος κύματος και η συχνότητα του ηχητικού κύματος, η διαδιδόμενη ενέργεια, τα φαινόμενα ανάκλασης, περίθλασης, σκέδασης κ.α., μπορούν να εκφραστούν επακριβώς με μαθηματικές σχέσεις και νόμους της φυσικής. Αντίστοιχα, κάθε ακουστικό σήμα μπορεί να περιγραφεί μονοσήμαντα από τη συνάρτηση πίεσης ως προς τον χρόνο. Τα σύνθετα σήματα μπορούν, επίσης, να θεωρηθούν ως υπέρθεση απλών αρμονικών, γεγονός που αποτελεί και την βάση του θεωρήματος Fourier. Εν ολίγοις, η γνώση γύρω από κάθε φυσικό φαινόμενο που εμπλέκεται και η δυνατότητα επακριβούς περιγραφής του είναι πλέον στη διάθεση του σύγχρονου μελετητή της ακουστικής. Παρ' όλα αυτά, για την διεξαγωγή και περαίωση της παρούσας μελέτης, εκτενέστερη αναφορά και ανάλυση στη φυσική των ηχητικών κυμάτων δεν είναι απαραίτητη, για αυτό και θα περιοριστεί στον βαθμό που είναι αναγκαία για την ποιοτική κατανόηση των μεθοδολογιών ή των ποσοτήτων που θα αναφερθούν παρακάτω.

3.1 Κρουστική απόκριση και συνέλιξη

Μία από τις πλέον δημοφιλείς και πολυχρησιμοποιημένες μαθηματικές εκφράσεις στην περιγραφή και μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών ενός χώρου, είναι η κρουστική απόκριση. Ως κρουστική απόκριση (impulse response) ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος ορίζεται η έξοδος του όταν αυτό διεγερθεί από την συνάρτηση Dirac, ή αλλιώς την κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Ένας κλειστός χώρος, κατά την ακουστική του μελέτη, μπορεί να θεωρηθεί τέτοιο σύστημα. Οι ιδιότητες του συστήματος, που διαμορφώνουν την παλμική απόκριση, την χαρακτηρίζουν πλήρως [6].



Εικόνα 3 - παλμική απόκριση γραμμικού συστήματος [6]

Αν $s(t)$ είναι η κρουστική απόκριση, τότε η σύνθετη συνάρτηση $S(f)$ ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς και προκύπτει από την κρουστική απόκριση μέσω του μετασχηματισμού Fourier [29]:

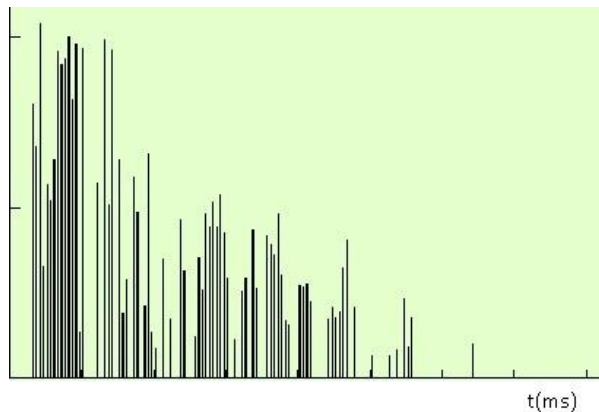
$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

Όταν είναι γνωστή η κρουστική απόκριση, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόκριση του συστήματος για οποιοδήποτε σήμα εισόδου, μέσω της σχέσης:

$$g'(t) = s(t) * g(t) \text{ και}$$

$$G'(f) = S(f) * G(f),$$

όπου το σύμβολο $*$ υποδηλώνει την συνέλιξη (convolution) των συναρτήσεων $g(t)$ και $s(t)$ [8].



Εικόνα 4 - σειρά χρονικά μετατοπισμένων και εξασθενημένων συναρτήσεων δ [7]

Αναλυτικότερα, αν διεγείρουμε έναν κλειστό χώρο με ένα κρουστικό σήμα και ηχογραφήσουμε την απόκρισή του, εκτός από το απευθείας σήμα θα ηχογραφήσουμε και τις διάφορες ανακλάσεις, οι οποίες θα αποτελούνται από μια σειρά χρονικά μετατοπισμένων και εξασθενημένων συναρτήσεων δ , όπως φαίνεται στην εικόνα 4 [7]. Οι ανακλάσεις αυτές είναι διαφορετικές για κάθε χώρο και εξαρτώνται από τη γεωμετρία του, τα χαρακτηριστικά των υλικών που τον αποτελούν, και τις

θέσεις της πηγής και του δέκτη. Συνεπώς, αυτή η σειρά των χρονικά μετατοπισμένων και εξασθενημένων συναρτήσεων δ , είναι χαρακτηριστική του υπό μελέτη χώρου και αποτελεί κατά κάποιον τρόπο το ηχητικό του αποτύπωμα.

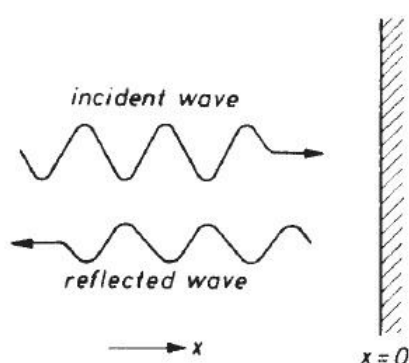
Η συνέλιξη ενός ηχητικού σήματος με τη διαδοχή κρουστικών αποκρίσεων ενός χώρου, μας δίνει ως αποτέλεσμα το πώς θα ακουγόταν αυτό το ηχητικό σήμα αν αναπαραγόταν εντός του χώρου αυτού. Έστω ότι το σήμα εισόδου $s(t)$ είναι συνεχές. Μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα διακριτό άθροισμα στοιχειωδών σημάτων $s(t_1)$, $s(t_2)$, $s(t_3)$, πολύ μικρής διάρκειας. Ο υπολογισμός της εξόδου του συστήματος $s'(t_1)$, $s'(t_2)$, $s'(t_3)$, για

καθένα από αυτά και η άθροιση των αποτελεσμάτων είναι η πράξη της συνέλιξης (convolution) του ηχητικού σήματος εισόδου με την κρουστική απόκριση του χώρου[7].

Ο υπολογισμός της κρουστικής απόκρισης των κλειστών χώρων αποτελεί βασικό εργαλείο της ακουστικής τους μελέτης. Οι μέθοδοι λήψης τους ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο διέγερσης του δωματίου και είναι πλέον αρκετά τα διαθέσιμα λογισμικά για την επεξεργασία τους. Στην παρούσα μελέτη γίνεται χρήση των λογισμικών *Autora* για τη λήψη των κρουστικών αποκρίσεων από τις ηχητικές μετρήσεις του χώρου μελέτης και το *CATT Acoustic* για την πρόβλεψη της κρουστικής απόκρισης βάσει του εικονικού μοντέλου.

3.2 Ανακλάσεις και σκέδαση

Η ακουστική κλειστών χώρων μελετά τη διάδοση του ηχητικού σήματος εντός κλειστών περιβλημάτων, τα οποία περιορίζουν το μέσο διάδοσης από όλες τις πλευρές με τοίχους, δάπεδο και οροφή. Τα όρια αυτά του δωματίου ανακλούν μέρος της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο μέρος της απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα ή μεταδίδεται μέσω των εξωτερικών τοίχων στο περιβάλλον. Αυτός ο συνδυασμός των πολυάριθμων ανακλάσεων είναι υπεύθυνος για την ακουστική του κάθε δωματίου και τη διαμόρφωση του ηχητικού πεδίου [6]. Για την περιγραφή των φαινομένων αντήχησης εντός ενός κλειστού χώρου, σύμφωνα με τη στατιστική θεωρία της αντήχησης, ορίζεται το πεδίο διάχυσης, ως ένας χώρος εντός του οποίου ο ήχος αναμένεται να διαδοθεί προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια πιθανότητα και ένταση. Αντίστοιχα, για κάθε σημείο του χώρου η κατανομή των διευθύνσεων του προσπίπτοντος ήχου είναι ομοιογενής. Η μελέτη πραγματικών ηχητικών πεδίων έχει δείξει ότι η έννοια του πεδίου διάχυσης αποτελεί έγκυρη προσέγγιση για χώρους με συνηθισμένες διαστάσεις και επαρκή κατανομή των απορροφητικών επιφανειών. Σε ειδικές περιπτώσεις, όπως διάδρομοι ή πολύ μεγάλες αίθουσες με συγκεντρωμένα απορροφητικά υλικά, δεν παρατηρούνται πεδία διάχυσης [13].



Εικόνα 5 – Ανάκλαση ηχητικού κύματος [6]

Όταν το ηχητικό κύμα προσπέσει σε έναν επίπεδο τοίχο πολύ μεγάλης επιφάνειας, τότε αυτό ανακλάται ή απορροφάται αναλόγως των ιδιοτήτων της επιφάνειας. Υπό πραγματικές όμως συνθήκες, κάθε γωνία μεταξύ των επίπεδων επιφανειών σκεδάζει την ηχητική ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις. Το ίδιο ισχύει για αντικείμενα εντός του δωματίου, ανομοιογενείς επιφάνειες και κάθε είδους εμπόδιο.

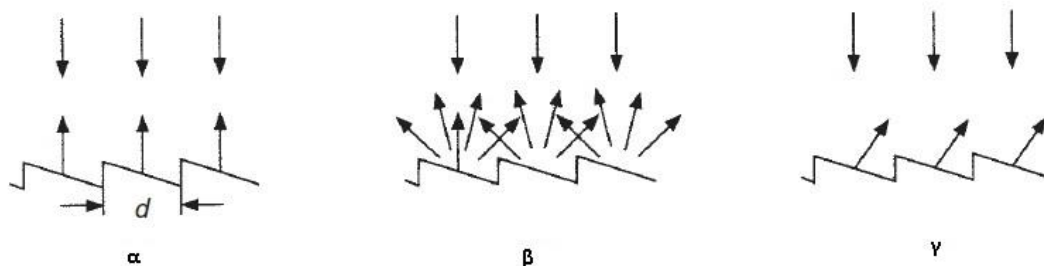
Στην απλή περίπτωση κατά την οποία ένα επίπεδο κύμα προσπέσει σε μια επίπεδη επιφάνεια άπειρου εμβαδού, το ανακλώμενο κύμα θα διαφέρει από το προσπίπτον ως προς την ένταση και τη φάση. Η αλλαγή αυτή εκφράζεται μέσω του σύνθετου παράγοντα ανάκλασης $R = |R|e^{ix}$ ο οποίος εξαρτάται από τις ιδιότητες της επιφάνειας. Το ποσό της ενέργειας που χάθηκε κατά την ανάκλαση εκφράζεται από τον συντελεστή απορρόφησης $\alpha = 1 - |R|^2$. Για μία επιφάνεια μηδενικής ανάκλασης ($R=0$) ο συντελεστής απορρόφησης ισούται με 1 και η επιφάνεια είναι πλήρως απορροφητική. Η ακουστικές ιδιότητες μιας επιφάνειας περιγράφονται πλήρως από τον σύνθετο παράγοντα

ανάκλασης, για όλες της γωνίες πρόσπτωσης και για κάθε συχνότητα. Εξίσου σημαντική ποσότητα για την περιγραφή της συμπεριφοράς των επιφανειών είναι η εμπέδηση τοίχου (wall impedance), η οποία σχετίζεται ακόμα πιο στενά με τη φυσική συμπεριφορά της επιφάνειας του τοίχου και της κατασκευής του, βάσει της ταχύτητας των σωματιδίων που διεγείρονται για δεδομένη ηχητική πίεση στην επιφάνεια του [6].

Σε ένα κλειστό δωμάτιο, το ακουστικό πεδίο δεν αποτελείται από ένα μόνο επίπεδο ηχητικό κύμα, αλλά από πολλά, το καθένα με τη δική του ένταση, φάση και διεύθυνση. Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της επιφάνειας σε ένα τέτοιο σύνθετο κύμα, είναι απαραίτητη η θεώρηση του κάθε ενός ξεχωριστά και ύστερα η άθροιση των ηχητικών τους πιέσεων.

Επίσης, είναι σημαντική η επίδραση των ορίων των πεπερασμένων επιφανειών, τα οποία δημιουργούν πρόσθετα ηχητικά κύματα, τα κύματα περίθλασης, τα οποία διαχέονται προς όλες σχεδόν τις κατευθύνσεις και περιπλέκουν το ηχητικό πεδίο. Το αποτέλεσμα της περίθλασης εξαρτάται από τη συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας πρόσπτωσης. Για παράδειγμα, για ένα πολύ μικρό αντικείμενο, ένα ηχητικό κύμα μεγάλου μήκους κύματος περιθλάται πλήρως γύρω του και ως προς την διαμόρφωση του ηχητικού πεδίου το αντικείμενο μοιάζει να μην υπάρχει. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του αντικειμένου ή η συχνότητα του κύματος, η επίδραση του φαινομένου γίνεται ολοένα πιο εμφανής.

Με παρόμοιο τρόπο επιδρούν οι ανωμαλίες των επιφανειών στη διαμόρφωση του ηχητικού πεδίου, σκεδάζοντας το προσπίπτον κύμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6 – Επίδραση του μεγέθους των ανωμαλιών της επιφάνειας στην ανάκλαση του ηχητικού κύματος [6]

Στην περίπτωση (α) οι διαστάσεις των ανωμαλιών της επιφάνειας είναι πολύ μικρότερες του μήκους κύματος του προσπίπτοντος κύματος ($\lambda \gg d$) ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ανύπαρκτες και ως εκ τούτου δεν επηρεάζουν την κατοπτρική ανάκλαση του κύματος, η οποία συμβαίνει όπως θα συνέβαινε αν η επιφάνεια ήταν επίπεδη και λεία. Στην περίπτωση (β) το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των ανωμαλιών ($\lambda \sim d$), με αποτέλεσμα τη διάχυση του κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ στην περίπτωση (γ) το μήκος κύματος είναι τόσο μικρότερο της διάστασης των ανωμαλιών ($\lambda \ll d$) ώστε η επιφάνεια να συμπεριφέρεται σαν ένα σύνολο μικρότερων επίπεδων επιφανειών. Οι ανακλάσεις στην κάθε επί μέρους επιφάνεια γίνονται κατοπτρικά, με διαφορετική όμως γωνία ανάκλασης ως προς την ενιαία επιφάνεια [6].

3.3 Γεωμετρική ακουστική

Η περιγραφή και ερμηνεία των ηχητικών πεδίων των κλειστών χώρων μέσω της κυματικής, σίγουρα αποτελεί την επιστημονικά άρτια προσέγγιση του φαινομένου. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της κατά την επίλυση πρακτικών προβλημάτων, όπως ο σχεδιασμός μιας αίθουσας συναυλιών ή η ανάλυση ενός υπάρχοντος χώρου, δεν είναι εύκολα εφικτή ή αποτελεσματική. Αυτό οφείλεται, μεταξύ άλλων, στο μεγάλο πλήθος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης που πρέπει να υπολογισθούν ώστε να καλυφθεί το απαραίτητο συχνοτικό εύρος και στην δυσκολία των υπολογισμών όταν οι τοίχοι της αίθουσας δεν είναι συμπαγείς ή όταν το σχήμα της είναι περίπλοκο [6].

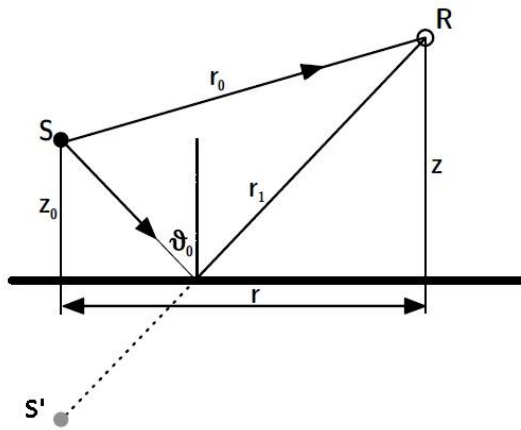
Για την προσπέλαση των παραπάνω δυσκολιών, υιοθετήθηκε η προσέγγιση του ζητήματος της ακουστικής κλειστών χώρων, μέσω μιας σειράς παραδοχών και απλουστεύσεων, οι οποίες συγκεντρώνονται υπό τον όρο «Γεωμετρική Ακουστική». Η προσέγγιση αυτή αντικαθιστά την έννοια του ηχητικού κύματος με τις ηχητικές ακτίνες. Όπως και στην γεωμετρική οπτική, η ηχητική ακτίνα αποτελεί ένα μικρό τμήμα του σφαιρικού ηχητικού κύματος, το οποίο εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο σημείο κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής και διέρχεται από μια απείρως μικρή οπή της σφαιρικής επιφάνειας του μετώπου του ηχητικού κύματος [6]. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η στοιχειώδης επιφάνεια $d\Omega$ του μετώπου του ηχητικού κύματος, από την οποία διέρχεται η θεωρούμενη ηχητική ακτίνα. Σύμφωνα με τις παραδοχές της γεωμετρικής ακουστικής, το ηχητικό κύμα αντικαθίσταται από ένα πλήθος τέτοιων ακτινών, στις οποίες αποδίδεται η ιδιότητα μεταφοράς της ηχητικής του ενέργειας [13].



Εικόνα 7 - Ηχητική ακτίνα [13]

Η διεύθυνση της ηχητικής ακτίνας είναι ακριβώς ορισμένη και υπόκειται στους ίδιους κανόνες όπως και οι ακτίνες φωτός, με διαφορετική όμως ταχύτητα διάδοσης. Η μεταφερόμενη ενέργεια παραμένει σταθερή για κάθε ακτίνα, δεδομένου ότι το μέσο διάδοσης δεν προκαλεί απώλεια, όμως η ένταση μεταξύ μιας ομάδας αποκλινουσών ακτινών, μειώνεται όπως συμβαίνει στα σφαιρικά κύματα, κατά $1/r^2$, όπου r είναι η απόσταση από το σημείο εκπομπής. Θεμελιώδες αξίωμα αποτελεί η διάδοση των ακτινών σε ευθείες γραμμές και ως εκ τούτου τα φαινόμενα περίθλασης και η καμπύλωση των ακτινών εντός ανομοιογενούς μέσου διάδοσης, δεν λαμβάνονται υπόψη [6].

Θεωρώντας ότι οι ανακλάσεις εντός ενός μοντέλου γεωμετρικής ακουστικής πραγματοποιούνται απολύτως κατοπτρικά, οι διαδρομές των ηχητικών ακτινών μπορούν να εντοπιστούν, από την πηγή έως τον δέκτη, χρησιμοποιώντας εικονικές πηγές (image sources). Αυτές κατασκευάζονται προβάλλοντας την πραγματική πηγή στις επιφάνειες των τοίχων και τοποθετώντας τις στο συμμετρικό σημείο του χώρου ως προς τον κάθε τοίχο. Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τις εικονικές πηγές, ώστε να δημιουργηθούν εικονικές



Εικόνα 8 - Εικονική πηγή 1^{ης} τάξης [13]

πηγές δευτέρας τάξης κ.ο.κ. Κατά τη δημιουργία των εικονικών πηγών, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι συνδυασμοί μεταξύ των επιφανειών των τοίχων, εκτός από αυτούς που περιλαμβάνουν τον ίδιο τοίχο κατά ακολουθία. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, κάποιοι τοίχοι μπορεί να εξαιρεθούν της διαδικασίας, για παράδειγμα λόγω σχηματιζόμενων διαδρομών των ηχητικών ακτινών οι οποίες δεν είναι γεωμετρικά συνεπείς [13].

Ήδη με την εξαίρεση των φαινομένων περίθλασης, αρχίζουν να διαφαίνονται οι περιορισμοί λόγω των παραδοχών της γεωμετρικής ακουστικής. «Τα μοντέλα εικονικών πηγών είναι ντετερμινιστικά και οι προϋποθέσεις της γεωμετρικής ακουστικής εισάγουν αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Οι εικονικές πηγές είναι αναγκαίο να περιοριστούν από κάποια συγκεκριμένη τάξη και πάνω, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος [13]. «Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, είναι συνήθως πολύ δύσκολο να υπολογιστεί η επίδραση των πραγματικών επιφανειών και αντικειμένων στη διάδοση του ήχου. Τα λογισμικά πρόβλεψης τα οποία βασίζονται αποκλειστικά στη γεωμετρική ακουστική αδυνατούν να το κάνουν» [10]. Επίσης, «στην γεωμετρική ακουστική η περιγραφή του ηχητικού πεδίου περιορίζεται στον υπολογισμό της ενέργειας, του χρόνου μετάβασης και της διεύθυνσης των ακτινών. Η προσέγγιση αυτή είναι σωστή, μόνο εφόσον οι διαστάσεις του δωματίου είναι αρκετά μεγάλες συγκριτικά με τα μήκη κύματος και εφόσον χρησιμοποιούνται σήματα ευρέως φάσματος» [13].

Είναι προφανές ότι μέσω της γεωμετρικής ακουστικής μπορεί να περιγραφεί μόνο ένα μέρος του ακουστικού φαινομένου, όπως αυτό πραγματικά συμβαίνει εντός ενός κλειστού χώρου. Ακόμα και αυτό όμως, είναι μεγάλης πρακτικής αξίας λόγω της απλότητάς του και της ευκολίας των υπολογισμών. Η μέθοδος της γεωμετρικής ακουστικής χρησιμοποιείται στο λογισμικό CATT Acoustic, με το οποίο κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο της αίθουσας ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT.

3.4 Προδιαγραφές ακουστικών μελετών και μέθοδοι

Η φυσική ποσότητα η οποία περικλείει την πληροφορία του ηχητικού φαινομένου είναι η πίεση του ηχητικού κύματος. Οι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η τιμή της είναι η θέση του χώρου μέτρησης και η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει η μέτρηση. Για κάθε μία δεδομένη θέση του χώρου, είναι δυνατή η μέτρηση και καταγραφή των τιμών της ηχητικής πίεσης, η αναπαράσταση των οποίων ως συνεχή συνάρτηση του χρόνου αποτελεί την κυματομορφή του ηχητικού σήματος. Κατά την διεξαγωγή μιας ακουστικής μελέτης, από τη κυματομορφή του σήματος μπορούμε να εξάγουμε διάφορων ειδών πληροφορίες, ανάλογα με το πώς επιλέγουμε να την επεξεργαστούμε. Δύο από τις σημαντικότερες είναι το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος και η καμπύλη απόσβεσης.

Η τελευταία πρόκειται για μια γραφική απεικόνιση της απόσβεσης της πίεσης του ηχητικού σήματος εντός μιας αίθουσας ως συνάρτηση του χρόνου, αφού η ηχητική πηγή έχει σιγάσει. Αφορά δηλαδή το ηχητικό σήμα της απόκρισης του χώρου και ως εκ τούτου περιέχει πληροφορία για την ακουστική του συμπεριφορά. Συνεπώς η καμπύλη απόσβεσης είναι αυτή η οποία αποτυπώνεται και μελετάται κατά την ακουστική ανάλυση ενός χώρου. Στις περιπτώσεις όπου αυτή προκύπτει από μια μη συνεχή διέγερση του χώρου, όπως ένας πυροβολισμός ή άλλος παρόμοιος κρουστικός ήχος, η ηχογράφηση που προκύπτει αποτελεί και την καμπύλη απόσβεσης. Η μέθοδος αυτή που αποτελούσε συνήθη πρακτική στο παρελθόν, δεν συνιστάται πλέον για τον ακριβή υπολογισμό του χρόνου αντήχησης, όπως αναφέρεται στις οδηγίες ISO 3382 [4]. Αντ' αυτής, προτείνεται πλέον η διέγερση του χώρου με σάρωση εκθετικού ημιτονοειδούς σήματος (exponential sine sweep), μέθοδος η οποία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, κυρίως ως προς τον διαχωρισμό του γραμμικού μέρους της μετρούμενης κρουστικής απόκρισης από την αρμονική παραμόρφωση [34].

Κατά τη διεξαγωγή μιας ακουστικής μελέτης είναι απαραίτητη η γνωστοποίηση της κατάστασης πληρότητας της αίθουσας (state of occupancy). Με αυτή προσδιορίζεται το πλήθος των αντικειμένων ή των ατόμων που βρίσκονται εντός της αίθουσας, τη στιγμή κατά την οποία λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις. Η αναγκαιότητα αυτού έγκειται στο γεγονός ότι η ύπαρξη αντικειμένων στον χώρο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας, καθώς ο μετρούμενος χρόνος αντήχησης θα διαφέρει μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων πληρότητας. Αυτές χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: την μη κατειλημμένη κατάσταση, την κατάσταση στούντιο και την κατειλημμένη κατάσταση. Στην πρώτη, η αίθουσα είναι έτοιμη προς χρήση χωρίς όμως οι καλλιτέχνες και το κοινό να είναι παρόντες, με τα μουσικά όργανα, τις καρέκλες και τα λοιπά αντικείμενα κατά προτίμηση στην θέση τους. Στην κατάσταση στούντιο, εντός της αίθουσας βρίσκονται οι εκτελεστές και το απαραίτητο τεχνικό προσωπικό (όπως θα συνέβαινε κατά την διεξαγωγή μιας πρόβας ή ηχογράφησης), χωρίς όμως να υπάρχει ακροατήριο, ενώ στην κατειλημμένη κατάσταση το ακροατήριο καλύπτει το 80% έως 100% των διαθέσιμων θέσεων [4].

Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης μπορούν να γίνουν σε οποιαδήποτε κατάσταση πληρότητας. Η λεπτομερής περιγραφή της κατάστασης είναι απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και πρέπει να συμπεριλαμβάνεται κατά την αναφορά των αποτελεσμάτων. Σε περιπτώσεις όπου η υπό μελέτη αίθουσα διαθέτει ρυθμιζόμενα εξαρτήματα για τη διαφοροποίηση της ακουστικής, είναι χρήσιμη η εκτέλεση ξεχωριστών μετρήσεων για την κάθε κατάστασή τους. Στα θέατρα είναι απαραίτητη η διάκριση των μετρήσεων ανάλογα με την κατάσταση των κουρτινών αυλαίας ή της κοιλότητας της ορχήστρας (orchestra pit). Επίσης, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία πρέπει να μετρούνται με ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ και $\pm 5\%$ αντίστοιχα [4].

Η ηχητική πηγή πρέπει να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο την πανκατευθυντική εκπομπή και να παρέχει αρκετή ένταση ώστε να είναι δυνατή η λήψη καμπυλών απόσβεσης με το απαραίτητο δυναμικό εύρος πάνω από το επίπεδο στάθμης θορύβου. Η μέγιστη διακύμανση της κατευθυντικότητάς της πρέπει να είναι $\pm 1\text{dB}$ για τις φασματικές ζώνες των 125, 250 και 500 Hz, $\pm 3\text{dB}$ για εκείνες των 1000Hz, $\pm 5\text{dB}$ για τα 2000Hz και $\pm 6\text{dB}$ για εκείνη των 4000 Hz. Τα μικρόφωνα λήψης πρέπει να είναι επίσης πανκατευθυντικά και το σήμα εξόδου τους μπορεί να καταγραφεί ώστε να αναλυθεί αργότερα, ή να τροφοδοτήσει κάποιο

σύστημα φίλτρων, ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο και προβολής των καμπυλών απόσβεσης. Το μέγεθος τους πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο και η διάμετρος του διαφράγματός τους έως 13mm. Τα μικρόφωνα και ο υπόλοιπος εξοπλισμός της μέτρησης πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των διεθνών προτύπων IEC 61672-1 [4].

Κατά την καταγραφή των καμπυλών απόσβεσης δεν πρέπει να γίνεται χρήση μεθόδων αυτόματης ρύθμισης του κέρδους (gain) των προενισχυτών, ή άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio). Ο χρόνος ηχογράφησης της απόσβεσης πρέπει να είναι αρκετός ώστε να εξασφαλίζεται ο εντοπισμός του τελικού θορύβου υποβάθρου που την ακολουθεί. Για να επιτευχθεί αυτό με ασφάλεια συνιστάται η επέκταση της διάρκειας ηχογράφησης κατά 5 sec πέραν του αναμενόμενου χρόνου απόσβεσης της αντήχησης. Η ηχογραφική διάταξη πρέπει να προσφέρει γραμμική συχνοτική απόκριση με διακυμάνσεις μικρότερες του $\pm 3\text{dB}$, το δυναμικό της εύρος πρέπει να επαρκεί για την ορθή αποτύπωση των καμπυλών απόσβεσης και η αναλογία των ταχυτήτων αναπαραγωγής και ηχογράφησης να παραμένει όσο το δυνατόν σταθερή. Επίσης, σε κανένα στάδιο της διαδικασίας δεν επιτρέπεται η υπεροδήγηση (overload) των ηλεκτρονικών διατάξεων και συνιστάται η χρήση μετρητών στάθμης ώστε αυτό να διασφαλιστεί [4].

3.5 Ακουστικές παράμετροι

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα οι ακουστικές παράμετροι υπόκεινται σε διαρκή εξέλιξη, ώστε να καλύψουν τις ανάγκες περιγραφής και μελέτης της ακουστικής κυρίως συναυλιακών αιθουσών. Σήμερα απαριθμούνται περίπου 38 διαφορετικές ακουστικές παράμετροι, κάθε μία από τις οποίες αναφέρεται σε διαφορετικές πτυχές του ακουστικού φαινομένου. Η αρχή έγινε με τον χρόνο αντήχησης (Reverberation Time), ο οποίος εισήχθη το 1922 από τον Sabine και επαναδιατυπώθηκε το 1930 από τους Eyring και Norris. Μεταξύ άλλων, ακολούθησε ο Thiele εισάγοντας την σαφήνεια (D50, D80) το 1953, ο Jordan με τον χρόνο πρώιμης πτώσης (EDT, Early Decay Time) το 1970, ο Kurer με τον κεντρικό χρόνο (T_s , Center Time) το 1971, ο Abdel με την καθαρότητα (C50, C80) το 1974 κ.α. [16].

Ο χρόνος αντήχησης ενός κλειστού χώρου θεωρούνταν επί μακρόν ως ο κυρίαρχος δείκτης των ακουστικών του ιδιοτήτων. Ενώ αυτό παραμένει αληθές, έγινε από νωρίς αποδεκτό ότι χρειάζονται περισσότερα είδη μετρήσεων για την πλήρη αξιολόγηση των ιδιοτήτων του. Ο χρόνος αντήχησης, ή όπως συναντάται συχνά η παράμετρος RT_{60} , είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται έως ότου η ηχητική ενέργεια εντός ενός χώρου μειωθεί κατά 60dB, αφότου η εκπομπή της πηγής έχει σταματήσει.

Ο απ' ευθείας ήχος είναι αυτός που διαμορφώνει την εντύπωση της θέσης της πηγής στον χώρο. Οι πρώτες ανακλάσεις έπονται χρονικά, λόγω της μεγαλύτερης διαδρομής του ήχου και δεν είναι σε θέση να αλλοιώσουν την εκτιμώμενη χωροτοποθέτηση της πηγής, σύμφωνα με το φαινόμενο Haas [15]. Παρ' όλα αυτά, οι πρώτες αυτές ανακλάσεις που ονομάζονται πρώιμες αντηχήσεις (early reflections), συνεισφέρουν στην αντίληψη του απ' ευθείας ήχου από τον ακροατή. Ενισχύουν την ακουστότητα, διευκολύνουν την καταληπτότητα της ομιλίας, την καθαρότητα της μουσικής και την αίσθηση χωρικού εύρους της πηγής. Οι ανακλάσεις που παρατηρούνται με καθυστέρηση μεγαλύτερη των 50-80ms (late reflections) συνεισφέρουν στον σχηματισμό της αντήχησης [13].

Η παράμετρος T μπορεί να υπολογισθεί για δυναμικό εύρος διαφορετικό των 60dB. Για παράδειγμα ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των στιγμών κατά τις οποίες η αντήχηση είναι 5dB και στη συνέχεια 25dB χαμηλότερα από το αρχικό επίπεδο στάθμης, ονομάζεται T₂₀, με τον δείκτη να υποδηλώνει κάθε φορά το δυναμικό εύρος. Η μέτρηση της παραμέτρου T γίνεται σε δευτερόλεπτα (sec). Από την καμπύλη αντήχησης προσδιορίζονται ο χρόνος T₃₀, και η παράμετρος EDT (early decay time). Η τελευταία προκύπτει από τον χρόνο που μεσολαβεί κατά την μείωση των πρώτων 10 dB της αντήχησης (μεταξύ 0dB και -10dB) και σχετίζεται με την αίσθηση του μεγέθους του χώρου όπως αυτός εκλαμβάνεται από τον ακροατή [4]. Για τις αίθουσες συναυλιών η EDT συχνά θεωρείται ακριβέστερο μέτρο απόδοσης της αίθουσας από ότι ο χρόνος αντήχησης [30].

Ως ένδειξη της καθαρότητας (clarity) του ήχου χρησιμοποιούνται οι παράμετροι C₅₀ και C₈₀, για ομιλία και μουσική, αντίστοιχα. Η ποσότητα C_t είναι ένας δείκτης που υπολογίζει την αναλογία των ενεργειών μεταξύ του ήχου που φτάνει πριν και μετά τον χρόνο t (early- and late-arriving energy). Υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης, όπου t είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την άφιξη του απ' ευθείας ηχητικού κύματος και h(t) η κρουστική απόκριση.

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_t^\infty h^2(t) dt}$$

Με την C₈₀ μπορεί να συσχετιστεί η εντύπωση της διαύγειας σε γρήγορα μουσικά περάσματα και η ικανότητα αναγνώρισης λεπτομερειών της μουσικής ανάμεσα στην αντήχηση [13]. Η εγκυρότητα του δείκτη βασίζεται κυρίως στην πρακτική εμπειρία από τον σχεδιασμό συναυλιακών αιθουσών, όμως η ποσοτική σχέση ανάμεσα στην εντύπωση της καθαρότητας όπως εκλαμβάνεται από τον ακροατή και στον δείκτη καθαρότητας, δεν έχει μελετηθεί συστηματικά. Η πιο διαδεδομένη μελέτη, δημοσιεύθηκε το 1975 από τον Reichardt και σύμφωνα με αυτή τα υποκείμενα-ακροατές αξιολόγησαν την καθαρότητα ενός αποσπάσματος συμφωνικής μουσικής σε κατηγορίες «κακής, οριακής και καλής» καθαρότητας, για τιμές του δείκτη χαμηλότερες του -1,6db, από -1,6db έως 1,6db και άνω του 1,6db αντίστοιχα. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν μια γενικότερη συσχέτιση μεταξύ της υποκειμενικής αξιολόγησης του βαθμού καθαρότητας και των αντίστοιχων τιμών υπολογιστικής εκτίμησης [17].

Με παρόμοιο τρόπο, υπολογίζεται η παράμετρος D_t, ως η αναλογία της ενέργειας που φτάνει πριν τον χρόνο t προς την συνολική ενέργεια και ονομάζεται σαφήνεια (definition), συνήθως όταν υπολογίζεται για t=50s [4].

$$D_t = 10 \log \frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_0^\infty h^2(t) dt}$$

Οι περισσότερες ακουστικές παράμετροι που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής, υπολογίζονται διαχωρίζοντας τον χρόνο αντήχησης σε περιόδους προ και μετά μιας κρίσιμης τιμής. Σε αντίθεση με αυτές, ο «κεντρικός χρόνος» (center time) T_s είναι η χρονική στιγμή στην οποία εντοπίζεται το κέντρο βάρους της ενέργειας της αντήχησης. Άλλες ακουστικές παράμετροι οι οποίες υπολογίζονται συχνά, σε πιο αναλυτικές ακουστικές μελέτες, είναι ο δείκτης

μετάδοσης ομιλίας (speech transmission index) STI και οι μετρήσεις σύντομης και καθυστερημένης πλάγιας ενέργειας [4].

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. Για την ακουστότητα του ήχου(dB) αυτή είναι 1dB, για τον χρόνο πρώιμης απόσβεσης ETD(ms) 5%, για την καθαρότητα C80(dB) 1 dB και για τη σαφήνεια D50(%) 5% [4]. Η γενικά αποδεκτή ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά για τις παραμέτρους αντήχησης είναι 5% και για τις σχετικές με την καθαρότητα το 1dB [10].

Δεν υπάρχει σαφής και απόλυτος ορισμός για τις ακριβείς τιμές που πρέπει να λαμβάνει κάθε μια από τις ακουστικές παραμέτρους, ανάλογα με την χρήση της κάθε αίθουσας. Η διαμόρφωση τους κατά τον ακουστικό σχεδιασμό και η αξιολόγησή τους υπόκεινται σε υποκειμενικά κριτήρια. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν γενικές οδηγίες, οι οποίες εξυπηρετούν ως κατευθυντήριες γραμμές, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται η κάθε αίθουσα. Μία από αυτές βασίζεται στην εξίσωση των Stephens και Bate (1950) για τον υπολογισμό του προτεινόμενου χρόνου αντήχησης:

$$T_{60} = K(0,0118V^{1/3} + 0,1070)$$

όπου V είναι ο όγκος της αίθουσας και K μια σταθερά οι οποία παίρνει την τιμή 4 για ομιλία, 4,5 για όπερα, 5 για ορχήστρα και 6 για χορωδία. Ο χρόνος αυτός προτείνεται για τις συχνοτικές περιοχές των 500Hz, 1K, 2K και 4K, ενώ συστήνεται αύξηση της τιμής κατά 10% για τα 250Hz, 50% για τα 125Hz και 100% για τα 63Hz. Επιπλέον, για ομιλία, η παράμετρος C50 πρέπει να είναι μεγαλύτερη των -3dB και για συμφωνική μουσική η C80 μεταξύ -2dB και +2dB [30].

4 Η αίθουσα ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT

Η αίθουσα ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT βρίσκεται στον τρίτο όροφο του κτηρίου της Φιλοσοφικής σχολής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η ακουστική μελέτη που προηγήθηκε της κατασκευής του στούντιο, υλοποιήθηκε στην Αθήνα τον Μάρτιο του 2001 από την εταιρία «ΕΤΑ Ακουστική ΕΠΕ», όπως προκύπτει από έγγραφα της τεχνικής υπηρεσίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδραση των περιστρεφόμενων πάνελ στην ακουστική του μεγάλου τμήματος της διαχωρισμένης αίθουσας ηχογραφήσεων. Οι πλευρές της αίθουσας που φέρουν διατάξεις περιστρεφόμενων πάνελ είναι δύο και το πλήθος των διατάξεων είναι τέσσερεις για την κάθε πλευρά. Οι πιθανές ακουστικές καταστάσεις του κάθε πάνελ είναι δύο, ανακλαστικό ή απορροφητικό. Επομένως μεταβάλλοντας την κατάσταση μεταξύ των οκτώ, οι δυνατές διαφορετικές μεταξύ τους ακουστικές καταστάσεις της αίθουσας είναι $2^8 = 256$. Αν στις μεταβλητές εντάξουμε και την επιφάνεια του διαχωριστικού τοίχου ως ενιαία, με δύο δηλαδή επιπλέον καταστάσεις, το πλήθος των συνολικών καταστάσεων αμέσως διπλασιάζεται στις 512. Αν μάλιστα δεν την αντιμετωπίσουμε ως ενιαία, αλλά λάβουμε υπόψη τον διαχωρισμό της σε 8 τμήματα που επιτρέπουν την επιλογή διαφορετικής κατάστασης για το καθένα, ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων φτάνει τις 65.536. Ο δυσθεώρητος αυτός αριθμός αφορά το πλήθος των δυνατών διαφορετικών ακουστικών επιλογών, αποκλειστικά και μόνο λόγω της κατάστασης των πάνελ.

Εισάγοντας ως επιπλέον μεταβλητές τη θέση και την κατευθυντικότητα της ηχητικής πηγής και τη θέση ακρόασης (ή τοποθέτησης του μικροφώνου), το πλήθος των δυνατών διαφορετικών καταστάσεων γίνεται εκθετικά μεγαλύτερο. Μια τέτοια προσέγγιση εξάλλου, πιθανά να στερείται επιστημονικής αλλά και πρακτικής αξίας, αφού οι διαφορές μεταξύ κάποιων καταστάσεων πιθανά να είναι ασήμαντες για να ληφθούν υπόψη κατά την πραγματική χρήση μιας αίθουσας ηχογραφήσεων, ή εν τέλει πολύ μικρότερες από την διαφορά που θα επιφέρει στο τελικό ηχητικό προϊόν η χρήση ενός διαφορετικού μικροφώνου, τεχνικής ηχογράφησης ή μουσικού οργάνου. Εξ άλλου η αίθουσα είναι προϊόν ακουστικής μελέτης, η οποία εξασφαλίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την ακουστική ομοιογένεια για τα διάφορα σημεία της.

Συνεπώς, η μελέτη του χώρου μέσω καταγραφής και ανάλυσης της ηχητικής του συμπεριφοράς για κάθε δυνατή κατάσταση, δεν είναι πρακτικά εφικτή, ούτε μπορεί να αποτελέσει αξιοποιήσιμο εργαλείο για τον τεχνικό ήχου στην προσπάθειά του να αποτυπώσει τη μουσική πληροφορία με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αντίστοιχα για τον μελετητή της ακουστικής, η καταγραφή και ανάλυση όλων των δυνατών συνδυασμών είναι πρακτικά πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη, αφού το πλήθος των δυνατών συνδυασμών είναι απαγορευτικό. Μια τέτοια ερευνητική προσέγγιση μπορεί πιθανά να καταστεί υλοποιήσιμη, εάν κατευθύνεται από υποδείξεις των χρηστών της αίθουσας, οι οποίες να συσχετίζουν την πρακτική εμπειρία της ακουστικής σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, για επίσης συγκεκριμένες διατάξεις των πάνελ. Με τον τρόπο αυτό, από το πλήθος των δυνατών καταστάσεων, μπορεί κάθε φορά να επιλέγεται μία ή ένα μικρό σύνολο, και η ακουστική μελέτη αυτών να οδηγεί σε συμπεράσματα που να είναι άμεσα αξιοποιήσιμα. Παρ' όλα αυτά,

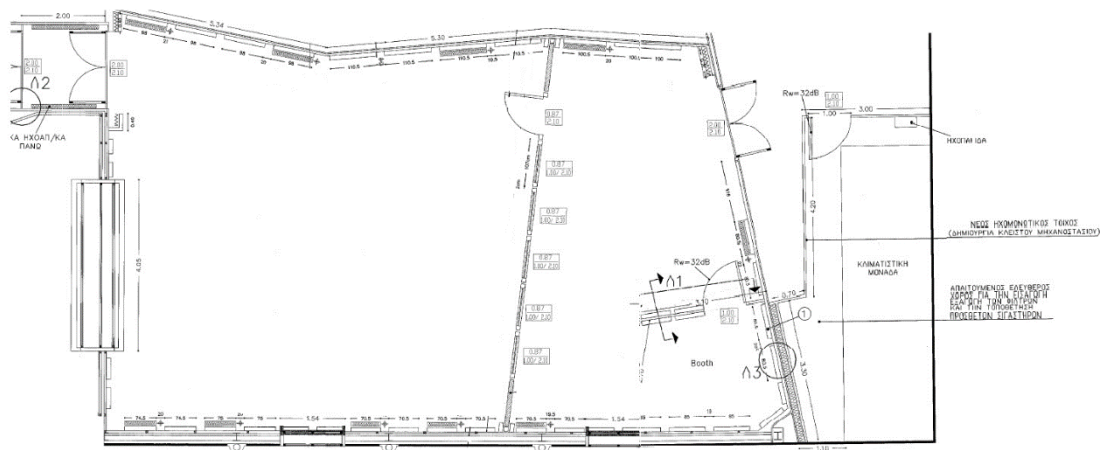
τα αποτελέσματα της ανάλυσης του πραγματικού χώρου είναι σαφώς πιο αξιόπιστα από αυτά ενός ψηφιακού μοντέλου, το οποίο όμως επιτρέπει την πρόβλεψη κάθε δυνατής κατάστασης, μεταβολής ή παρέμβασης.

Για τους παραπάνω λόγους, οι μετρήσεις που διεξήχθησαν ηχογραφώντας την ηχητική απόκριση της αίθουσας, είχαν ως πρωταρχικό στόχο να χρησιμοποιηθούν κατά την σχεδίαση του ψηφιακού μοντέλου, ως σημείο αναφοράς της ακουστικής της συμπεριφοράς, ώστε να τροποποιηθούν οι απαραίτητες παράμετροι και να διαμορφωθεί ένα ακριβές ψηφιακό μοντέλο. Η διαδικασία αυτής της βαθμονόμησης (calibration) του μοντέλου, βασίστηκε στις δύο ακραίες ακουστικές συνθήκες, δηλαδή τις καταστάσεις μέγιστης και ελάχιστης ανάκλασης. Παρ' όλα αυτά, καταγράφηκαν πολύ περισσότερες καταστάσεις, ώστε να είναι δυνατή η μελλοντική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, ή να μπορεί να εξυπηρετηθεί κάποια ανάγκη που πιθανά να προκύψει σε μελλοντική σχετική μελέτη. Οι διαφορετικές διατάξεις των πάνελ που ηχογραφήθηκαν είναι συνολικά 58 και για κάθε διάταξη πραγματοποιήθηκε και μια διαφορετική ηχογράφιση. Οι καταστάσεις που καταγράφηκαν και είναι διαθέσιμες προς ανάλυση και εξαγωγή ακουστικών παραμέτρων είναι:

- Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης (όλα τα πάνελ και το διαχωριστικό στην ανακλαστική κατάσταση, πλην ενός ελαττωματικού πάνελ που παρέμεινε στην απορροφητική)
- Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης (όλα τα πάνελ και το διαχωριστικό στην απορροφητική κατάσταση)
- Σειρά μετρήσεων αύξουσας απορρόφησης (με το διαχωριστικό απορροφητικό)
- Όλοι οι συνδυασμοί καταστάσεων των πάνελ ενός τοίχου (με το διαχωριστικό απορροφητικό)
- Όλοι οι συνδυασμοί με τα τέσσερα γωνιακά πάνελ απορροφητικά (με το διαχωριστικό απορροφητικό και ανακλαστικό)
- Με τα απέναντι πάνελ σε διαφορετική κατάσταση (με το διαχωριστικό απορροφητικό και ανακλαστικό)

4.1 Χαρακτηριστικά της αίθουσας και υποδομές

Το στούντιο LabMAT αποτελείται από μια αίθουσα υποδοχής, δύο αίθουσες επεξεργασίας ήχου και την αίθουσα ηχογράφησης, η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9 - Κάτοψη ολόκληρης της αίθουσας ηχογραφήσεων του στούντιο LabMAT (πηγή: ETA Ακουστική)

Η αίθουσα είναι ηχομονωμένη, συνολικού όγκου $595,32\text{m}^3$ και περιέχει στο έσω δεξιά τμήμα της κλειστό booth (δωμάτιο ηχογράφησης) όγκου $31,18\text{m}^3$. Μια σειρά πτυσσόμενων πάνελ δίνει την δυνατότητα διαχωρισμού της αίθουσας σε δύο μέρη, εκ των οποίων το μικρό (δεξιά στην εικόνα) έχει όγκο $228,76\text{m}^3$ και το μεγάλο (αριστερά στην εικόνα) όγκο $397,32\text{m}^3$.

Στο δάπεδο της αίθουσας υπάρχει μοκέτα και σε διάφορα σημεία του ταβανιού διαχυτές ήχου (diffusers) και απορροφητικά πάνελ. Αριστερά της αίθουσας βρίσκεται το control room, με το οποίο υπάρχει οπτική πρόσβαση μέσω ενός παραθύρου μήκους 4 περίπου μέτρων. Σε διάφορα σημεία αυτού του τοίχου βρίσκονται μόνιμα τοποθετημένα απορροφητικά πάνελ.

Οι δύο απέναντι τοίχοι, κατά μήκος της μεγάλης διάστασης της αίθουσας, διαθέτουν διατάξεις περιστρεφόμενων πάνελ, των οποίων η μία πλευρά είναι ηχοαπορροφητική, ενώ η άλλη ανακλαστική. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στον τεχνικό ήχου να ρυθμίσει την αντήχηση της αίθουσας στα επιθυμητά επίπεδα για την κάθε είδους ηχογράφηση, περιστρέφοντας τα πάνελ και επεμβαίνοντας έτσι στο μέγεθος της απορροφητικής ή ανακλαστικής επιφάνειας της αίθουσας. Η περιστροφή των πάνελ γίνεται με τη βοήθεια ασύρματου χειριστήριου. Λόγω της παραπάνω ιδιότητας, η αίθουσα χαρακτηρίζεται ως «αίθουσα μεταβλητής ακουστικής» (variable acoustics).



Εικόνα 10 - Διάταξη περιστρεφόμενου επιτοιχείου πάνελ

Η διάταξη αυτή των πάνελ φαίνεται στην εικόνα. Κάθε διάταξη αποτελείται από τρία πάνελ. Τα δύο από αυτά είναι μόνιμα στερεωμένα στον τοίχο και έχουν αντίστροφη ηχητική λειτουργία. Δηλαδή το ένα είναι ανακλαστικό και το άλλο απορροφητικό. Το τρίτο πάνελ στηρίζεται στον μηχανισμό στρέψης, όπως φαίνεται στην εικόνα, και είναι από την μία πλευρά ανακλαστικό και από την άλλη απορροφητικό. Ο σχεδιασμός της διάταξης προβλέπει κατά την στρέψη του κινούμενου πάνελ, αυτό να επικαλύπτει πλήρως ένα από τα δύο μόνιμα στερεωμένα, με τρόπο τέτοιο ώστε οι επιφάνειες ίδιας ηχητικής λειτουργίας να είναι στην εξωτερική πλευρά. Συνεπώς η διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συνολικό πάνελ διπλάσιας επιφάνειας από τα μέρη του, το οποίο είναι ανακλαστικό ή απορροφητικό, ανάλογα με την ρύθμιση που επιλέγουμε. Το

ύψος των πάνελ είναι 4m, το πάχος τους 10cm και το μήκος τους 1m και 1,10m για τα πάνελ της μιας πλευράς και 0,75m για τα πάνελ της απέναντι πλευράς.

Παρόμοια πάνελ, αυτή τη φορά πτυσσόμενα και στηριζόμενα σε ειδικούς διαδρόμους οι οποίοι στερεώνονται στο ταβάνι και στο πάτωμα, μπορούν να χωρίζουν την αίθουσα σε δύο μέρη. Τα ενδιάμεσα αυτά πάνελ έχουν επίσης την ιδιότητα να είναι ηχοαπορροφητικά από την μία τους πλευρά και ανακλαστικά από την άλλη. Ο χρήστης μάλιστα έχει την δυνατότητα να επιλέξει οποιονδήποτε επιθυμητό συνδυασμό, ανεβάζοντας έτσι τις δυνατές ακουστικές επιλογές κατά πολύ. Η περιστροφή αυτών των πάνελ γίνεται χειροκίνητα και ένα από αυτά περιέχει κινητό μέρος το οποίο εξυπηρετεί ως είσοδος από το μεγάλο στο μικρότερο τμήμα της διαχωρισμένης αίθουσας ηχογραφήσεων. Η κατακόρυφη τους διάσταση εκτείνεται από το δάπεδο σχεδόν έως την οροφή, αφήνοντας ένα κενό περίπου 20cm, το μήκος τους είναι 1m και το πάχος τους 10cm. Μπορούν επομένως να θεωρηθούν ως ενιαία ηχοαπορροφητική πλευρά, όχι όμως και ως ηχομονωτική μεταξύ των δύο χώρων της αίθουσας, λόγω κενού που σχηματίζεται μεταξύ της οροφής και της πάνω πλευράς τους.

4.2 Προηγούμενες ακουστικές μελέτες

Η πρώτη ακουστική μελέτη της αίθουσας έγινε από την κατασκευάστρια εταιρία, και περιλαμβάνει τους ακουστικούς στόχους για ολόκληρη την αίθουσα, τα δύο της μέρη όταν αυτή διαχωρίζεται και για το booth. Επίσης, περιγράφεται η γεωμετρία, ο όγκος της αίθουσας και τα υλικά των πλευρών της με τους αντίστοιχους συντελεστές απορρόφησης και την επιφάνεια που καταλαμβάνει το καθένα. Η μελέτη προβλέπει τον μέγιστο και ελάχιστο χρόνο αντήχησης, κατά πάσα πιθανότητα λαμβάνοντας υπόψη τις δύο ακραίες ακουστικές καταστάσεις της αίθουσας, με τις διατάξεις των πάνελ πλήρως ανακλαστικές και πλήρως απορροφητικές. Εικόνες των εγγράφων παρατίθενται παρακάτω.

ΣΤΟΥΝΤΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ														
10,5 8,8 4,3 a *b *h														
ΜΕΓΑΛΟ ΤΜΗΜΑ ΑΙΘΟΥΣΑΣ-ΕΛΑΧΙΣΤΟ														
ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ														
ΟΓΚΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ:			397,32		ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ ΑΙΘΟΥΣΑΣ					0%				
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ			συντ.ηχοαπορρόφησης α						ηχοαπορρόφηση aS sab					
			ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)						ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
a/a	ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	S(m ²)	0,05	0,05	0,05	0,08	0,09	0,09	4,62	4,62	4,62	7,392	8,316	8,316
1	ΔΑΠΕΔΟ	92,4	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	21,06	31,2	37,05	37,05	37,05	37,05
2	ΤΟΙΧΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΙ	39	0	0,5	0,3	0,08	0,05	0,05	0	0	0	0	0	0
3	ΤΟΙΧΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΙ	0	0,15	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	13,86	8,316	7,392	4,62	4,62	4,62
4	ΟΡΟΦΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗ	92,4	0	0,54	0,8	0,95	0,95	0,85	0	0	0	0	0	0
5	ΟΡΟΦΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΗ	0	0,59	0,38	0,19	0,1	0,03	0,06	26,55	17,1	8,55	4,5	1,35	2,7
6	ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	0	0,02	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	0	0	0	0	0	0
7	ΜΟΚΕΤΑ	45	0,3	0,69	0,77	0,89	0,88	0,86	3,6	8,28	9,24	10,68	10,56	10,32
8	ΚΟΥΡΤΙΝΕΣ	0	0,5	0,3	0,08	0,05	0,05	0,05	35	21	5,6	3,5	3,5	3,5
9	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΧΑΜΗΛΩΝ	12	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	21,6	32	38	38	38	38
10	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΜΕΣΑΙΩΝ	70	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	-2,7	-4	-4,75	-4,75	-4,75	-4,75
11	ΑΝΟΙΓΜΑ	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12		-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	ΑΕΡΑΣ ΧΩΡΟΥ (M3)	397,32	0	0	0	0,003	0,007	0,02	0	0	0	1,192	2,781	7,946
ΟΛΙΚΗ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ (Sab)			0,52	0,54	0,61	0,63	0,63	0,6	123,6	118,5	105,7	102,2	101,4	107,7
ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (Sabine)			0,42	0,44	0,51	0,53	0,52	0,47						
ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (Eyring)			0,32	0,307	0,274	0,265	0,263	0,279						
α μεσ.														
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)			125	250	500	1000	2000	4000						

Εικόνα 11 – Εκτίμηση του ελάχιστου χρόνου αντήχησης για το μεγάλο τμήμα της αίθουσας (πηγή: ETA Ακουστική)

ΣΤΟΥΝΤΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ																
10,5 8,8 4,1 a *b *h																
ΜΕΓΑΛΟ ΤΜΗΜΑ ΑΙΘΟΥΣΑΣ-ΜΕΓΙΣΤΟ																
ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ																
ΟΓΚΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ:			378,84		ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ ΑΙΘΟΥΣΑΣ					0%						
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ			συντ.ηχοαπορρόφησης α						ηχοαπορρόφηση aS sab							
			ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)						ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)							
a/a	ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	S(m ²)	125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000		
1	ΔΑΠΕΔΟ	92,4	0,05	0,05	0,05	0,08	0,09	0,09	4,62	4,62	4,62	7,392	8,316	8,316		
2	ΤΟΙΧΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΙ	-23	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	-12,4	-18,4	-21,9	-21,9	-21,9	-21,9		
3	ΤΟΙΧΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΙ	26	0,5	0,3	0,08	0,05	0,05	0,05	13	7,8	2,08	1,3	1,3	1,3		
4	ΟΡΟΦΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗ	92,4	0,15	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	13,86	8,316	7,392	4,62	4,62	4,62		
5	ΟΡΟΦΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΗ	0	0,54	0,8	0,95	0,95	0,85	0,6	0	0	0	0	0	0		
6	ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	45	0,59	0,38	0,19	0,1	0,03	0,06	26,55	17,1	8,55	4,5	1,35	2,7		
7	ΜΟΚΕΤΑ	0	0,02	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	0	0	0	0	0	0		
8	ΚΟΥΡΤΙΝΕΣ	12	0,3	0,69	0,77	0,89	0,88	0,86	3,6	8,28	9,24	10,68	10,56	10,32		
9	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΧΑΜΗΛΩΝ	70	0,5	0,3	0,08	0,05	0,05	0,05	35	21	5,6	3,5	3,5	3,5		
10	ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΜΕΣΑΙΩΝ	50	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	27	40	47,5	47,5	47,5	47,5		
11	ΑΝΟΙΓΜΑ	5	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95	2,7	4	4,75	4,75	4,75	4,75		
12									0	0	0	0	0	0		
13									0	0	0	0	0	0		
ΑΕΡΑΣ ΧΩΡΟΥ (M3)			378,84		0						0					
ΟΛΙΚΗ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ (Sab)			0		0						0					
ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (Sabine)									113,9 92,72 67,88 63,53 62,7 68,73							
ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (Eyring)									0,54 0,66 0,9 0,97 0,98 0,89							
α μεσ.									0,44 0,56 0,8 0,85 0,85 0,76							
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(Hz)									0,308 0,251 0,184 0,172 0,17 0,186							
									125 250 500 1000 2000 4000							

Εικόνα 12 - Εκτίμηση του μέγιστου χρόνου αντήχησης για το μεγάλο τμήμα της αίθουσας (πηγή: ETA Ακουστική)

Η δεύτερη ακουστική μελέτη, πραγματοποιήθηκε το 2016 από τους Σπυρίδη, Φωτεινού και Ταβελίδου. Η μελέτη αυτή αφορά το μεγάλο τμήμα της διαχωρισμένης αίθουσας, για τρεις διαφορετικές καταστάσεις των πάνελ, κλιμακούμενης απορρόφησης. Για κάθε μία από αυτές, υπολογίζεται η κρουστική απόκριση της αίθουσας, με χρήση εκθετικής σάρωσης σήματος ημιτόνου (exponential sine sweep) και του λογισμικού Aurora. Από την ανάλυση των μετρήσεων υπολογίστηκαν οι ακουστικές παράμετροι T30, EDT, C50, C80, D50, Ts, IACC και LF για συχνότητες μεταξύ 125Hz και 4KHz, όπως επίσης και οι εκτιμώμενοι χρόνοι αντήχησης μέσω των εξισώσεων Sabine και Eyring [25]. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις παραμέτρους T30 και C80, όπως υπολογίστηκαν από τα γραφήματα που παρατίθενται στην μελέτη αυτή, καθώς τα αποτελέσματα δεν δίνονται σε αριθμητικές τιμές.

T30 (s)	Μεγάλο τμήμα αίθουσας [25]					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μέγιστη απορρόφηση	0,46	0,52	0,38	0,28	0,29	0,28
Μέγιστη ανάκλαση	0,47	0,61	0,56	0,54	0,52	0,48

Πίνακας 1 – Αποτελέσματα υπολογισμού της παραμέτρου T30 [25]

C80 (dB)	Μεγάλο τμήμα αίθουσας [25]					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μέγιστη απορρόφηση	11,5	14,5	14,8	19,1	18,8	18,6
Μέγιστη ανάκλαση	12,0	11,0	8,8	10,9	10,1	11,2

Πίνακας 2 - Αποτελέσματα υπολογισμού της παραμέτρου C80 [25]

5 Διεξαγωγή μετρήσεων

Οι ακουστικές μετρήσεις της αίθουσας ηχογραφήσεων διεξήχθησαν τον Ιανουάριο του 2018, ολοκληρώθηκαν σε τρεις επισκέψεις στον χώρο και η συνολική διαδικασία διήρκεσε περίπου είκοσι ώρες.

Αρχικά, ο χώρος άδειασε από κάθε αντικείμενο που δεν αποτελούσε μέρος του λειτουργικού του σχεδιασμού και εξασφαλίστηκε η λειτουργία του συστήματος κλιματισμού για την διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, σε ένταση λειτουργίας που δεν επέφερε παρατηρήσιμη αύξηση των επιπέδων θορύβου εντός της αίθουσας. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η ορθή λειτουργία των πάνελ και διαπιστώθηκε ότι ένα από αυτά δεν περιστρεφόταν λόγω προβληματικού μηχανισμού στρέψης. Το πάνελ αυτό παρέμεινε στην απορροφητική κατάσταση καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων.

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής τοποθετήθηκε κοντά στο διαχωριστικό των τμημάτων, αλλά εντός του μικρού τμήματος, έτσι ώστε ο χρήστης να είναι εκτός του υπό μελέτη χώρου και οποιοσδήποτε τυχόν θόρυβος να μην καταγράφεται μέσω των μικροφώνων μαζί με την απόκριση της αίθουσας. Από την άλλη πλευρά του διαχωριστικού, εντός του μεγάλου τμήματος, τοποθετήθηκαν οι κάρτες ήχου, ο ενισχυτής του ηχείου που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή, τα μικρόφωνα με τις βάσεις τους, τα καλώδια και έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ του εξοπλισμού.

5.1 Εξοπλισμός

Ως κέντρο αναπαραγωγής, ηχογράφησης και διαχείρισης των ηχητικών αρχείων των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής Lenovo T410, intel i5 CPU, 6GB RAM. Σε αυτόν συνδέθηκε μέσω πρωτοκόλλου firewire μία κάρτα ήχου M-Audio profire 2626, η οποία διαθέτει οκτώ προενισχυτές μικροφώνων και συχνότητα δειγματοληψίας έως



Εικόνα 13 – Εξοπλισμός ακουστικών μετρήσεων. Επάνω: ο τελικός ενισχυτής του πανκατευθυντικού μεγάφωνου Bruel & Kjaer 4296. Κάτω: οι κάρτες ήχου που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις ακουστικές μετρήσεις.

192KHz. Στην είσοδο ADAT της κάρτας ήχου, συνδέθηκε η ψηφιακή έξοδος μιας προενίσχυσης Focusrite Octopre η οποία διαθέτει επίσης οκτώ προενισχυτές μικροφώνων, ανεβάζοντας τον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων για ηχογράφηση εισόδων στις δεκαέξι. Η συχνότητα δειγματοληψίας ρυθμίστηκε στα 96Khz και η δυναμική ανάλυση στα 32 bit, για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Στις εισόδους της κάρτας M-Audio συνδέθηκαν οκτώ πανκατευθυντικά

(omnidirectional) μικρόφωνα Behringer ECM8000 και σε δύο εισόδους της κάρτας Focusrite το αριστερό και δεξί κανάλι ενός Neumann KU100. Σε μία από τις εξόδους της κάρτας M-Audio, συνδέθηκε ο τελικός ενισχυτής του δωδεκαεδρικού, πανκατευθυντικού μεγάλου φωνου Bruel & Kjaer 4296. Ο εξοπλισμός αυτός φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, σε κλειστή διάταξη ακτίνας ενός μέτρου.



Εικόνα 14 – Η αίθουσα κατά την εκτέλεση των μετρήσεων για την ισοστάθμιση του κέρδους των προενισχυτών. Τα οκτώ μικρόφωνα είναι διατεταγμένα σε κύκλο ακτίνας ενός μέτρου γύρω από την πηγή.

Το μεγάλο φωνο Bruel & Kjaer 4296 αποτέλεσε την ηχητική πηγή η οποία διηγείρε τον χώρο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων. Είναι εξοπλισμένο με δώδεκα μεγάφωνα τοποθετημένα σε κάθε μια από τις δώδεκα έδρες του και έχει την ιδιότητα να κατευθύνει το ηχητικό σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις (πανκατευθυντικό), με σφαιρική κατανομή, όπως απαιτείται από τις διεθνείς οδηγίες ISO 16283, ISO 10140 και ISO 3382 περί ακουστικών μελετών. Με την ομοιογενή κατανομή του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις εξασφαλίζεται η ομοιότητα του ηχητικού σήματος διέγερσης κατά τις επαναλαμβανόμενες διεγέρσεις και ως εκ τούτου η εγκυρότητα των μετρήσεων [9].

5.2 Ισοστάθμιση κέρδους προενισχυτών

Για την εγκυρότητα των ακουστικών μετρήσεων και την δυνατότητα να εξάγουμε από αυτές όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικά συμπεράσματα, είναι απαραίτητο οι διαφορές που αποτυπώνονται κατά την ηχογράφηση μεταξύ των διαφορετικών μικροφώνων να οφείλονται σε ιδιαιτερότητες λόγω της χωρικής τους θέσης και να χαρακτηρίζουν την ακουστική της αίθουσας στο σημείο αυτό. Αυτό εξασφαλίζεται ήδη εν μέρει κατά την επιλογή της συγκεκριμένης πανκατευθυντικής ηχητικής πηγής και την χρήση οκτώ πανομοιότυπων μικροφώνων και προενισχυτών. Επίσης όμως, είναι απαραίτητη η εξασφάλιση του ότι και για τα οκτώ μικρόφωνα, η ρύθμιση του κέρδους (gain) μέσω των ποτενσιόμετρων της κάρτας ήχου, έχει διαμορφώσει ίδια μεταξύ τους ευαισθησία, έτσι ώστε για ηχητικά σήματα ίσης

έντασης να ηχογραφούνται ίσης έντασης αρχεία. Για να επιτευχθεί αυτό ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Το ηχείο τοποθετήθηκε στο κέντρο της αίθουσας (προσεγγιστικά, καθώς η αίθουσα δεν είναι απολύτως συμμετρική) και τα οκτώ μικρόφωνα σε κύκλο ακτίνας ενός μέτρου γύρω από αυτό. Το ύψος της πηγής ρυθμίστηκε στο 1,5m και των μικροφώνων στο 1,4m. Με την τοποθέτηση των μικροφώνων πιο κοντά στην πηγή, από ότι κατά τις κύριες ακουστικές μετρήσεις, επιδιώκουμε να καταγράψουμε μεγαλύτερη αναλογία απευθείας σήματος προς αυτό που οφείλεται στην αντήχηση του χώρου. Για τον ίδιο λόγο, τα πάνελ ρυθμίστηκαν στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης.

Μέσω του λογισμικού Audition, δημιουργήθηκε ένα σήμα ροζ θορύβου διάρκειας δέκα δευτερολέπτων. Ο ροζ θόρυβος επιλέχθηκε έναντι άλλων σημάτων γιατί φέρει ίσα ποσά ενέργειας ανά οκτάβα. Το σήμα αναπαράχθηκε από την πηγή και ηχογραφήθηκε από τα μικρόφωνα, μέσω του ίδιου λογισμικού, σε διαφορετικά κανάλια. Για το κάθε κανάλι εκτελέστηκε υπολογισμός του μέσου τετραγώνου της ενέργειας (RMS average) και με χειροκίνητη ρύθμιση των ποτενσιόμετρων της ευαισθησίας, εφαρμόστηκε η κατάλληλη διορθωτική κίνηση για όσα παρουσίαζαν αποκλίνουσες τιμές ενέργειας. Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε κατ' επανάληψη έως ότου επετεύχθη το επιθυμητό αποτέλεσμα. Χρειάστηκαν έντεκα επαναλήψεις της διαδικασίας μέτρησης και ρύθμισης, μέχρι να εξασφαλιστούν ίσα ποσά ηχογραφούμενης ενέργειας με απόκλιση $\pm 0,3\text{db}$ μεταξύ των οκτώ μικροφώνων.

5.3 Εκτέλεση μετρήσεων για εξισορρόπηση φάσματος

Εκτός από τις διαφορές στην ευαισθησία των συσκευών εισόδου, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν και διαφορές στη συχνοτική τους απόκριση, λόγω κατασκευαστικών αποκλίσεων. Το ηχητικό σήμα με το οποίο θα διεγερθεί η αίθουσα είναι ίσης έντασης για κάθε συχνότητα, ο εξοπλισμός όμως είναι αδύνατον να τις αναπαράξει ή και να τις καταγράψει όλες με την ίδια ένταση. Η αδυναμία αυτή του εξοπλισμού παρατηρείται εντονότερα όσο πλησιάζουμε στα άκρα του ακουστικού φάσματος. Το να υπολογίσουμε την απόκλιση από την γραμμική φασματική απόκριση, όπου και αν οφείλεται αυτή, παρ' όλο που δεν είναι απαραίτητο βήμα κατά την διεξαγωγή ακουστικών μετρήσεων βάσει των διεθνών προτύπων, μπορεί πιθανά να αποδειχτεί χρήσιμο εκ των υστέρων. Δεδομένου ότι για να χρησιμοποιηθεί επικουρικά στις κύριες μετρήσεις απαιτείται ο υπολογισμός της υπό τις ίδιες συνθήκες και μέσω του ίδιου εξοπλισμού, κρίθηκε σωστό να καταγραφεί με την ευκαιρία της διεξαγωγής των υπολοίπων μετρήσεων.

Ο εξοπλισμός τοποθετήθηκε σε διάταξη ίδια με αυτή της ισοστάθμισης των ευαισθησιών (ύψος πηγής 1,5m και ύψος μικροφώνων 1,4m) και η κατάσταση των πάνελ ρυθμίστηκε για μέγιστη απορρόφηση, καθώς και σε αυτή την περίπτωση επιδιώκουμε να καταγράψουμε μεγαλύτερη αναλογία απευθείας σήματος προς αντήχηση χώρου. Ένα ημιτονοειδές σήμα εκθετικής σάρωσης διάρκειας τριών δευτερολέπτων, ακολουθούμενο από δύο δευτερόλεπτα σιγής και επαναλαμβανόμενο για πέντε φορές, δημιουργήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Audora. Το ηχητικό αυτό αρχείο αναπαρήχθη από το ηχείο και η απόκριση των μικροφώνων καταγράφηκε σε ξεχωριστά αρχεία ήχου. Από τα αρχεία αυτά και με την βοήθεια της σχετικής μονάδας του λογισμικού Audora, είναι δυνατόν να υπολογιστεί για κάθε μικρόφωνο ξεχωριστά το αντίστροφο φασματικό του φίλτρο με την μορφή

κρουστικής απόκρισης. Η συνέλιξη αυτού του φίλτρου με τις κύριες μετρήσεις του κάθε μικροφώνου, μπορεί να αναιρέσει τις φασματικές αλλοιώσεις, απαλείφοντας την επιρροή των κατασκευαστικών αποκλίσεων μεταξύ των μονάδων του εξοπλισμού.

5.4 Εκτέλεση των ακουστικών μετρήσεων

Ο χώρος μετρήθηκε σε μη κατειλημμένη κατάσταση (unoccupied state), όπως προβλέπεται από το ISO 3382. Για την εκτέλεση των μετρήσεων η πηγή τοποθετήθηκε σε ύψος 1,5m και τα μικρόφωνα σε ύψος 1,4m. Η πηγή τοποθετήθηκε περίπου στο κέντρο του δαπέδου της αίθουσας (η αίθουσα δεν είναι συμμετρική) και τα οκτώ μικρόφωνα τοποθετήθηκαν σε κύκλο ακτίνας 2,5m γύρω της, σε ίσα μεταξύ τους τόξα. Η απόσταση όλων των μικροφώνων από τους κοντινούς τους τοίχους ήταν μεγαλύτερη του 1m, όπως προβλέπεται από το σχετικό ISO. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η διάταξη του εξοπλισμού εντός της αίθουσας, κατά την διεξαγωγή των κύριων μετρήσεων.

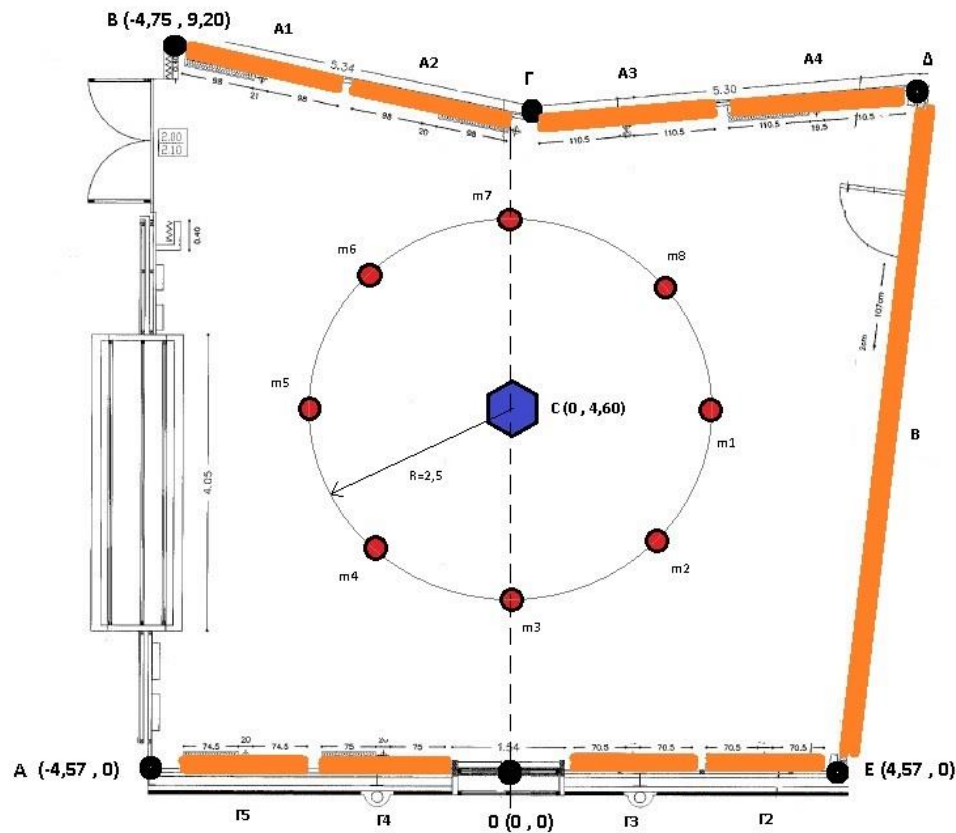


Εικόνα 15 – Η αίθουσα κατά την διεξαγωγή των ακουστικών μετρήσεων, με τα μικρόφωνα διατεταγμένα γύρω από την πηγή σε κύκλο ακτίνας 2,5m

Η ακριβής τοποθέτηση των μονάδων του εξοπλισμού, όπως και τα πάνελ φαίνονται στην παρακάτω κάτοψη της αίθουσας. Η ονομασία των πάνελ διατηρήθηκε ίδια με αυτή που αναγράφεται στα χειριστήρια τους. A1, A2, A3 και A4 για τα πάνελ της μίας πλευράς, Γ2, Γ3, Γ4, Γ5 για τα πάνελ της απέναντι πλευράς, ενώ στο διαχωριστικό, το οποίο αντιμετωπίστηκε ως ενιαίο, δόθηκε η ονομασία Β.

Οι πλευρές AB και AE, σύμφωνα με την το σχέδιο της κάτοψης, προκύπτουν κάθετες μεταξύ τους, για αυτό προτιμήθηκαν ως σύστημα αξόνων. Ως σημείο αναφοράς επιλέχθηκε το μέσον της πλευράς AE για λόγους που αφορούν την εξυπηρέτηση των υπολογισμών του ψηφιακού μοντέλου και θα αναλυθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Έτσι, ως κέντρο της αίθουσας δεχόμαστε το σημείο C (0 , 4,60), ενώ οι συντεταγμένες των μικροφώνων δεν είναι απαραίτητες σε αυτό το στάδιο της μελέτης και θα υπολογιστούν επίσης παρακάτω. Το πάνελ

το οποίο παρέμεινε καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων στην απορροφητική κατάσταση λόγω προβληματικού μηχανισμού είναι το A1.



Εικόνα 16 – Κάτοψη της αίθουσας. Παρουσιάζεται η διάταξη της πηγής και των μικροφώνων στον υπό μελέτη χώρο, όπως και οι ονομασίες που δόθηκαν στο κάθε πάνελ

Μέσω του aurora plugin δημιουργήθηκε ένα αρχείο exponential sine sweep διάρκειας 10 sec, ακολουθούμενο από σιγή 10 sec, με τρεις επαναλήψεις. Το λογισμικό δημιουργεί επίσης το αντίστροφο (inverse) αρχείο, το οποίο θα χρειαστεί κατά την ανάλυση των μετρήσεων για την εξαγωγή των κρουστικών αποκρίσεων. Το αρχείο αυτό αναπαράχθηκε από την πηγή και η διέγερση του χώρου καταγράφηκε από τα οκτώ μικρόφωνα σε διαφορετικά ηχητικά αρχεία. Για κάθε διάταξη των πάνελ πραγματοποιήθηκε και μια διαφορετική ηχογράφηση. Οι διαφορετικές διατάξεις που ηχογραφήθηκαν είναι συνολικά 58. Οι συνδυασμοί των διατάξεων των πάνελ, που διαμορφώνουν την κάθε κατάσταση, επιλέχθηκαν με στόχο την πειραματική διερεύνηση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων καταστάσεων κατά την ηχογράφηση.

Σε μια σειρά οκτώ μετρήσεων, αποτυπώθηκε η απόκριση της αίθουσας κατά την σταδιακή αύξηση του συντελεστή ανάκλασης. Ξεκινώντας αρχικά με όλα τα πάνελ στην απορροφητική τους κατάσταση και περιστρέφοντας κάθε φορά και από ένα στην ανακλαστική, αποτυπώθηκε η απόκριση της αίθουσας για κανένα πάνελ με ανάκλαση, για ένα μόνο πάνελ

με ανάκλαση και ούτω κάθε εξής, μέχρι και τα επτά πάνελ να γίνουν ανακλαστικά (δηλαδή όλα εκτός του προβληματικού A1). Κατά την σειρά αυτή των μετρήσεων ο διαχωριστικός τοίχος απέναντι από το control room παρέμεινε πλήρως απορροφητικός. Οι μετρήσεις αυτές στόχο έχουν την αποτύπωση και μελέτη της ακουστικής του χώρου σε διάφορα γνωστά και σταδιακά αυξανόμενα επίπεδα ανάκλασης.

Σε μία δεύτερη σειρά, αποτελούμενη από δεκαέξι μετρήσεις, ηχογραφήθηκε η απόκριση του χώρου για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των πάνελ ενός μόνο τοίχου, διατηρώντας τις υπόλοιπες πλευρές πλήρως απορροφητικές. Με τις μετρήσεις αυτές επιδιώκεται η αποτύπωση τυχόν ακουστικών διαφοροποιήσεων, οι οποίες πιθανά να οφείλονται, πέρα από τον αριθμό των ανακλαστικών πάνελ και του συνολικού βαθμού ανάκλασης, στη διάταξη τους.

Η επόμενη σειρά τριάντα δύο μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε διατηρώντας τα πάνελ τα οποία βρίσκονται κοντά στις γωνίες (A1, A4, Γ2 και Γ5) στην απορροφητική τους κατάσταση, διάταξη η οποία παρατηρείται πολύ συχνά στις αίθουσες ηχογραφήσεων και αποτελεί συνήθη πρακτική για τη διαμόρφωση μιας γενικότερα επιθυμητής ακουστικής συμπεριφοράς. Με τις γωνίες σταθερά απορροφητικές, αποτυπώθηκε η απόκριση της αίθουσας με κάθε άλλο πιθανό συνδυασμό της κατάστασης των υπολοίπων πάνελ. Οι δεκαέξι πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη διαχωριστική πλευρά απέναντι από το control room πλήρως απορροφητική, ενώ στην συνέχεια επαναλήφθηκαν για την ίδια πλευρά πλήρως ανακλαστική.

6 Λογισμικό και επεξεργασία των δεδομένων

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων, η ηχογράφηση των σημάτων αποτυπώθηκε σε ψηφιακά αρχεία με συστηματοποιημένες ονομασίες ώστε να είναι δυνατή εκ των υστέρων η σαφής αναγνώριση τους. Οι ονομασίες των αρχείων περιέχουν πληροφορία για την ταυτότητα του δέκτη και την κατάσταση των πάνελ, η οποία εκφράζεται με αριθμούς. Για παράδειγμα, στην κατάσταση με διακριτικό αριθμό «33», όλα τα πάνελ είναι απορροφητικά εκτός από τα πάνελ Γ2 και Γ4 τα οποία είναι ανακλαστικά. Για αυτή την κατάσταση και για το κάθε μικρόφωνο τα αρχεία ήχου που δημιουργήθηκαν έχουν τις ονομασίες «m1_33, m2_33, m3_33....» κ.ο.κ, όπου m1, m2, m3... είναι το αναγνωριστικό σύμβολο για το κάθε μικρόφωνο.

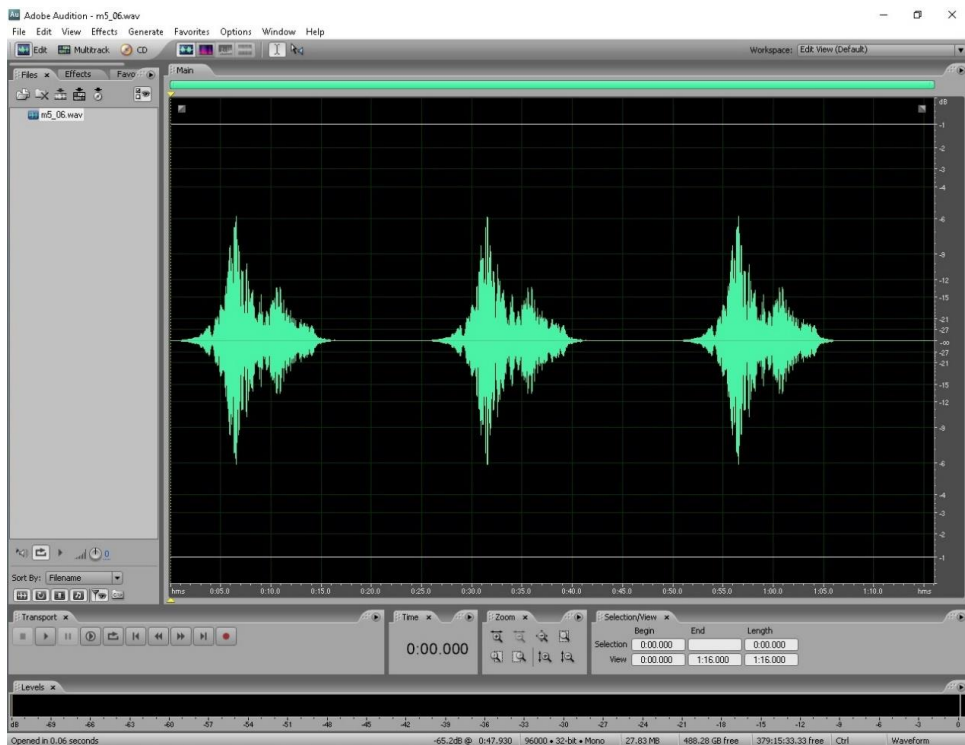
Η επεξεργασία των ηχητικών αρχείων έγινε στον ίδιο ηλεκτρονικό υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, επίσης μέσω του λογισμικού Audition v3 της εταιρίας Adobe και των πρόσθετων σε αυτό λογισμικών Aurora plugins. Λεπτομέρειες σχετικά με το Aurora και τον τρόπο λειτουργίας του, παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

6.1 Επεξεργασία των ακουστικών μετρήσεων

Η επεξεργασία των μετρήσεων αφορά τον τρόπο με τον οποίο από τα ηχητικά αρχεία τα οποία δημιουργήθηκαν κατά τις μετρήσεις, εξάγουμε τις τιμές των ακουστικών παραμέτρων. Πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Audition και του πακέτου πρόσθετων λογισμικών Aurora, στα οποία έγινε εκτενέστερη αναφορά παραπάνω. Η στατιστική επεξεργασία των τιμών των ακουστικών παραμέτρων έγινε σε περιβάλλον Microsoft Excel.

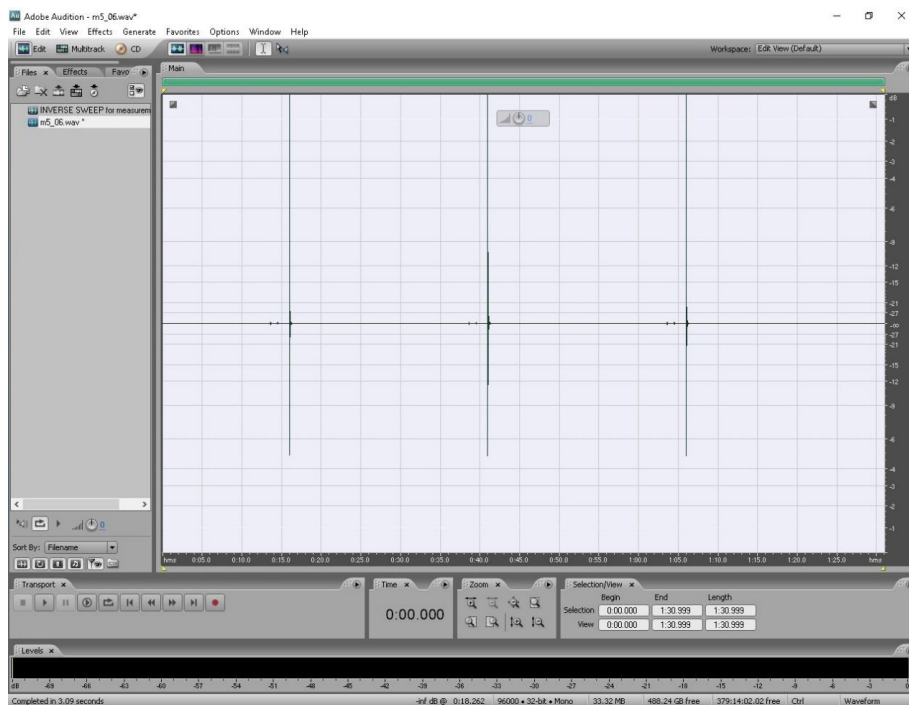
Κατά τη διαδικασία διεξαγωγής των κύριων ακουστικών μετρήσεων, ηχογραφήθηκε η απόκριση της αίθουσας για 58 διαφορετικές καταστάσεις των πάνελ, σε οκτώ διαφορετικά σημεία του χώρου. Το σύνολο των ηχητικών αρχείων που δημιουργήθηκαν είναι 464 και δεδομένης της επανάληψης του σήματος σάρωσης για τρεις φορές, το πλήθος των κρουστικών αποκρίσεων που μπορούμε τελικά να εξάγουμε ανέρχεται στις 1.392. Για την περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία, θα παρουσιαστεί παρακάτω η περίπτωση της κατάστασης «06», η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση κατά την οποία όλα τα περιστρεφόμενα πάνελ και ο διαχωριστικός τοίχος είναι στην απορροφητική τους κατάσταση, για το μικρόφωνο στην θέση «5».

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κυματομορφή της απόκρισης της αίθουσας κατά την διέγερση της με το εκθετικό σήμα ημιτονοειδούς σάρωσης διάρκειας 10 sec, ακολουθούμενο από σιγή 10 sec, με τρεις επαναλήψεις.



Εικόνα 17 - κυματομορφή της απόκρισης της αίθουσας

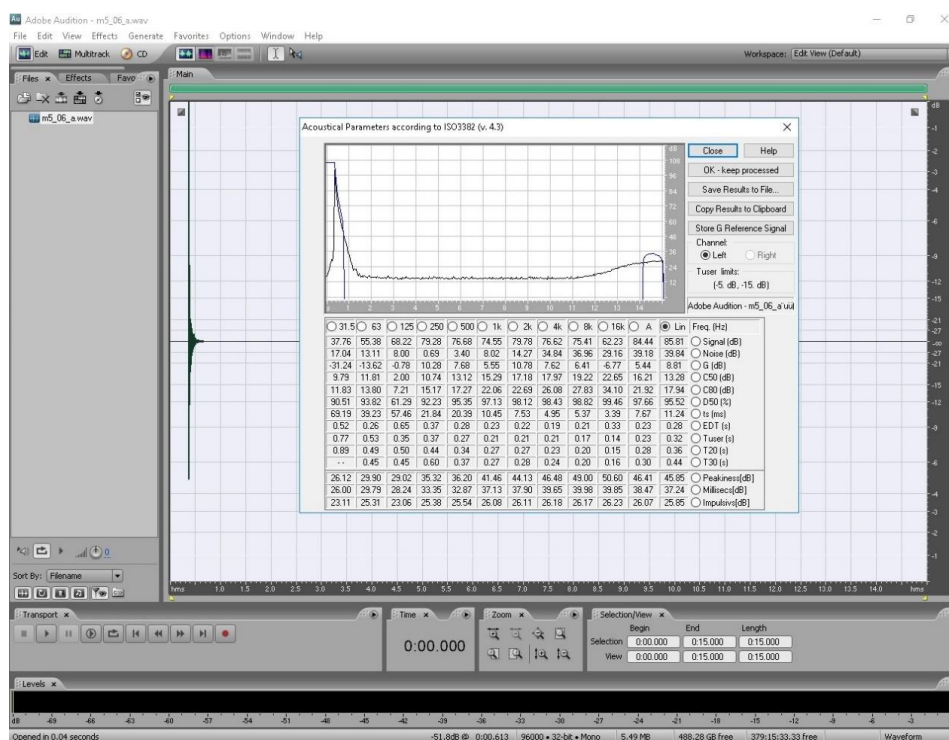
Στο παραπάνω ηχητικό αρχείο εφαρμόζεται συνέλιξη με το αντίστροφο αρχείο της σάρωσης (inverse sweep) μέσω του πρόσθετου λογισμικού Aurora «convolve with clipboard» και με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι κρουστικές αποκρίσεις για κάθε μια από τις τρεις σαρώσεις, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 18 – Κυματομορφή των κρουστικών αποκρίσεων

Για την κάθε μία από τις παραπάνω κρουστικές αποκρίσεις δημιουργούνται τρία ηχητικά αρχεία τα οποία ξεκινούν περίπου την χρονική στιγμή του παλμού και έχουν διάρκεια 15s. Η επιλογή ενός τόσο μεγάλου χρόνου περικυψής του κάθε αρχείου, δεν είναι απαραίτητη στην παρούσα μελέτη, καθώς οι αναμενόμενοι χρόνοι αντήχησης της συγκεκριμένης αίθουσας είναι κάτω του ενός δευτερολέπτου. Η πρακτική αυτή προτείνεται κατά την ακουστική ανάλυση χώρων με πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις και χαμηλότερους συντελεστές απορρόφησης, όπως συναντάται τυπικά στις μεγάλες αίθουσες συναυλιών. Η εφαρμογή της στην συγκεκριμένη μελέτη δεν επιφέρει αλλοίωση των αποτελεσμάτων ούτε επιβαρύνει τον υπολογιστικό χρόνο και για αυτό δεν αποφεύχθηκε.

Για κάθε ένα από τα τρία ηχητικά αρχεία των κρουστικών αποκρίσεων, γίνεται χρήση του λογισμικού Aurora «acoustical parameters», το οποίο υπολογίζει τις ακουστικές παραμέτρους και τις συγκεντρώνει σε πίνακα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 19 – Πίνακας υπολογισμού των ακουστικών παραμέτρων μέσω του Aurora

Οι τρεις αυτές επαναληπτικές σαρώσεις και κατ' αναλογία οι τρεις εξαγόμενες κρουστικές αποκρίσεις και οι τρεις αντίστοιχοι πίνακες ακουστικών παραμέτρων, δεν αναμένεται να παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους, καθώς ο υπό μελέτη χώρος είναι ακουστικά ελεγχόμενος. Εκτελούνται όμως για την θεμελίωση της στατιστικής εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, όπως προτείνεται από τις διεθνείς προδιαγραφές ακουστικών μελετών. Ο εντοπισμός σημαντικής απόκλισης μεταξύ των τιμών ενός μικροφώνου κατά τις επαναλαμβανόμενες σαρώσεις, θα υποδείκνυε πιθανή τεχνική βλάβη. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια της στατιστικής ανάλυσης. Ενδεικτικά παρουσιάζεται

στους παρακάτω πίνακες ο υπολογισμός των παραμέτρων T30 και C80, για το μικρόφωνο 5, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης.

T30(ms)	Μικρόφωνο 5 Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Σάρωση #1	0,448	0,595	0,368	0,269	0,278	0,241
Σάρωση #2	0,477	0,594	0,369	0,269	0,278	0,240
Σάρωση #3	0,477	0,595	0,368	0,269	0,278	0,245
Μ.Ο.	0,477	0,595	0,368	0,269	0,278	0,242
Τυπική απόκλιση	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,003
JND	0,022	0,030	0,018	0,013	0,014	0,012
Απόκλιση σε JND	0,026	0,019	0,031	0,000	0,000	0,219

Πίνακας 3 - ο υπολογισμός της παραμέτρου T30, για το μικρόφωνο 5, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

C80(dB)	Μικρόφωνο 5 Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Σάρωση #1	7,215	15,167	17,267	22,062	22,687	26,082
Σάρωση #2	7,196	15,163	17,293	22,098	22,715	26,138
Σάρωση #3	7,178	15,150	17,287	22,103	22,693	26,000
Μ.Ο.	7,196	15,160	17,282	22,088	22,698	26,073
Τυπική απόκλιση	0,019	0,009	0,014	0,022	0,015	0,069
JND	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Απόκλιση σε JND	0,019	0,009	0,014	0,022	0,015	0,069

Πίνακας 4 - ο υπολογισμός της παραμέτρου C80, για το μικρόφωνο 5, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για καθένα από τα 8 μικρόφωνα, σε κάθε μια από τις ακουστικές καταστάσεις της αίθουσας, οι οποίες μελετήθηκαν κατά την παρούσα έρευνα. Εφεξής, η αναφορά σε ακουστικές παραμέτρους μιας συγκεκριμένης θέσης και κατάστασης, θα υπονοεί τον μέσο όρο των τριών μετρήσεων για την κάθε μία, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω για το μικρόφωνο 5, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης. Η αποκλίσεις των τιμών από τους μέσους όρους της κάθε ακουστικής παραμέτρου, βρέθηκαν ποσοτικά

ασήμαντες και κατά πολύ μικρότερες από την ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά (JND) για την κάθε παράμετρο, καταδεικνύοντας μεγάλη πειραματική ακρίβεια μέτρησης.

Προκειμένου να διαμορφωθεί μια ευρύτερη εικόνα της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας και προσβλέποντας στην ύστερη αξιοποίησή τους κατά την βαθμονόμηση του ψηφιακού μοντέλου, υπολογίστηκαν οι ακουστικές παράμετροι T30 και C80, από τους μέσους όρους των τιμών των 8 μικροφώνων, για τις καταστάσεις μέγιστης απορρόφησης και μέγιστης ανάκλασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

T30(ms)	Σύνολο αίθουσας Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μικρόφωνο 1	0.543	0.567	0.333	0.275	0.283	0.260
Μικρόφωνο 2	0.507	0.483	0.477	0.284	0.287	0.260
Μικρόφωνο 3	0.512	0.712	0.529	0.268	0.284	0.248
Μικρόφωνο 4	0.536	0.475	0.390	0.250	0.276	0.240
Μικρόφωνο 5	0.447	0.595	0.368	0.269	0.278	0.242
Μικρόφωνο 6	0.490	0.603	0.417	0.263	0.276	0.245
Μικρόφωνο 7	0.462	0.648	0.475	0.283	0.280	0.244
Μικρόφωνο 8	0.557	0.571	0.403	0.286	0.276	0.253
Μ.Ο.	0.507	0.582	0.424	0.272	0.280	0.249
Τυπική απόκλιση	0.039	0.079	0.065	0.012	0.004	0.008
JND	0.025	0.029	0.021	0.014	0.014	0.012
Απόκλιση σε JND	1.532	2.714	3.060	0.906	0.297	0.634

Πίνακας 5 – Υπολογισμός της παραμέτρου T30 για το σύνολο της αίθουσας, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

C80(dB)	Σύνολο αίθουσας Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μικρόφωνο 1	11.13	17.03	17.45	22.58	20.68	21.83

Μικρόφωνο 2	8.85	15.02	15.82	21.98	18.90	21.85
Μικρόφωνο 3	4.93	15.42	18.35	20.45	20.23	21.65
Μικρόφωνο 4	10.62	16.46	16.73	21.04	19.50	19.63
Μικρόφωνο 5	7.20	15.16	17.28	22.09	22.70	26.07
Μικρόφωνο 6	7.04	13.61	16.62	20.26	19.78	22.06
Μικρόφωνο 7	10.90	13.88	15.42	19.67	18.76	21.03
Μικρόφωνο 8	12.71	13.87	14.57	21.39	19.04	19.69
Μ.Ο.	9.17	15.06	16.53	21.18	19.95	21.73
Τυπική απόκλιση	2.62	1.25	1.22	1.01	1.29	2.00
JND	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Απόκλιση σε JND	2.62	1.25	1.22	1.01	1.29	2.00

Πίνακας 6 - Υπολογισμός της παραμέτρου C80 για το σύνολο της αίθουσας, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

T30(ms)	Σύνολο αίθουσας Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μικρόφωνο 1	0.511	0.507	0.576	0.506	0.491	0.430
Μικρόφωνο 2	0.453	0.561	0.599	0.510	0.502	0.430
Μικρόφωνο 3	0.489	0.649	0.634	0.517	0.457	0.408
Μικρόφωνο 4	0.578	0.587	0.582	0.479	0.495	0.413
Μικρόφωνο 5	0.556	0.593	0.586	0.507	0.501	0.427
Μικρόφωνο 6	0.513	0.657	0.577	0.510	0.504	0.427
Μικρόφωνο 7	0.496	0.634	0.554	0.520	0.501	0.427
Μικρόφωνο 8	0.523	0.612	0.495	0.509	0.489	0.428
Μ.Ο.	0.515	0.600	0.575	0.507	0.493	0.424

Τυπική απόκλιση	0.039	0.050	0.040	0.012	0.015	0.008
JND	0.026	0.030	0.029	0.025	0.025	0.021
Απόκλιση σε JND	1.515	1.659	1.386	0.488	0.628	0.386

Πίνακας 7 - Υπολογισμός της παραμέτρου T30 για το σύνολο της αίθουσας, στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

C80(dB)	Σύνολο αίθουσας Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μικρόφωνο 1	6.19	12.52	7.90	11.60	11.43	12.90
Μικρόφωνο 2	9.93	12.13	7.07	11.47	11.24	13.48
Μικρόφωνο 3	8.22	10.18	8.11	12.08	10.52	12.59
Μικρόφωνο 4	9.75	13.83	7.86	11.35	10.76	11.38
Μικρόφωνο 5	8.10	12.41	9.05	10.40	12.63	16.55
Μικρόφωνο 6	5.73	10.74	9.03	10.64	11.24	12.12
Μικρόφωνο 7	8.07	7.86	7.46	8.52	9.71	12.50
Μικρόφωνο 8	6.68	12.67	6.80	10.40	9.51	11.66
M.O.	7.83	11.54	7.91	10.81	10.88	12.90
Τυπική απόκλιση	1.55	1.88	0.82	1.11	1.00	1.62
JND	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Απόκλιση σε JND	1.55	1.88	0.82	1.11	1.00	1.62

Πίνακας 8 - Υπολογισμός της παραμέτρου C80 για το σύνολο της αίθουσας, στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

Από την παραπάνω ανάλυση των μετρήσεων παρατηρούμε σημαντική διακύμανση των τιμών μεταξύ των διαφορετικών μικροφώνων. Η διακύμανση του χρόνου T30 είναι μεγαλύτερη για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, με τις περιοχές των 250 και 500Hz να επηρεάζονται περισσότερο, το ίδιο και η διακύμανση της καθαρότητας C80. Οι διακυμάνσεις είναι στην περιοχή της τάξεως της ελάχιστης παρατηρούμενης διαφοράς (JND), με κάποιες περιπτώσεις να φτάνουν έως 2 ή 3 φορές την τιμή της. Οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούν την ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας όταν η πηγή είναι πανκατευθυντική και τοποθετημένη στο κέντρο της. Πιθανά, ένας διαφορετικός συνδυασμός κατευθυντικότητας και τοποθέτησης της πηγής να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα. Στην συγκεκριμένη όμως διάταξη, τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευτούν

ποιοτικά, αποδίδοντας τις διαφοροποιήσεις αυτές των παραμέτρων στον μικρό χώρο της αίθουσας και στην ανομοιογενή κατανομή των απορροφητικών υλικών.

Η αίθουσα στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, δείχνει να απέχει από την συμπεριφορά του διαχυμένου πεδίου. Ως διαχυμένο πεδίο, ορίζεται το ηχητικό πεδίο που διαμορφώνεται τυπικά σε μεγάλες αίθουσες με αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των απορροφητικών επιφανειών, του οποίου η ακουστική απόκριση είναι ομοιογενής, η ηχητική πίεση ομοιόμορφα κατανεμημένη (χωρική διάχυση ή ομογένεια) και η ροή ενέργειας ισοτροπική από όλες τις πιθανές κατευθύνσεις (κατευθυντική διάχυση ή ομογένεια) [22]. Μέθοδοι αξιολόγησης του βαθμού διάχυσης και κριτήρια αξιολόγησης του κατά πόσο ένας κλειστός χώρος αποτελεί διαχυμένο πεδίο, είναι διαθέσιμα [23]. Μια τόσο ενδελεχής μελέτη του φαινομένου εκτείνεται πέρα από το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, παρ' όλα αυτά η ποιοτική του ερμηνεία και οι πιθανές επιπτώσεις αυτού κατά την χρήση του χώρου για ηχογράφηση είναι χρήσιμο να αναφερθούν.

Όταν η αίθουσα βρίσκεται στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, η ανομοιογένεια μεταξύ των επιφανειών της είναι έντονη. Τρεις από τις έξι πλευρές είναι σχεδόν εξολοκλήρου απορροφητικές με μεγάλους συντελεστές, ενώ το δάπεδο, η οροφή, το παράθυρο του control room και οι τοίχοι γύρω από την είσοδο χαρακτηρίζονται από αντίθετη ακουστική συμπεριφορά. Η ανομοιογένεια του πεδίου δεν οφείλεται τόσο στις διαφορές μεταξύ των συντελεστών απορρόφησης αυτών των επιφανειών, αλλά κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η κατανομή τους στην αίθουσα γίνεται με λίγα σε αριθμό και μεγάλα σε επιφάνεια τμήματα. Με την κατανομή αυτή, οι περιοχές κοντά στην κάθε επιφάνεια χαρακτηρίζονται έντονα από την ακουστική συμπεριφορά των υλικών της και σε συνδυασμό με τις μικρές διαστάσεις της αίθουσας δεν επιτρέπεται εν τέλει η πλήρης διαμόρφωση ενός διαχυμένου πεδίου. Στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης, η ακουστική συμπεριφορά των επιμέρους επιφανειών είναι περισσότερο παρεμφερής, μειώνοντας εν μέρει την ανομοιογένεια, γεγονός που αποτυπώνεται και από την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων.

7 Ψηφιακή προσομοίωση της αίθουσας στο CATT Acoustic

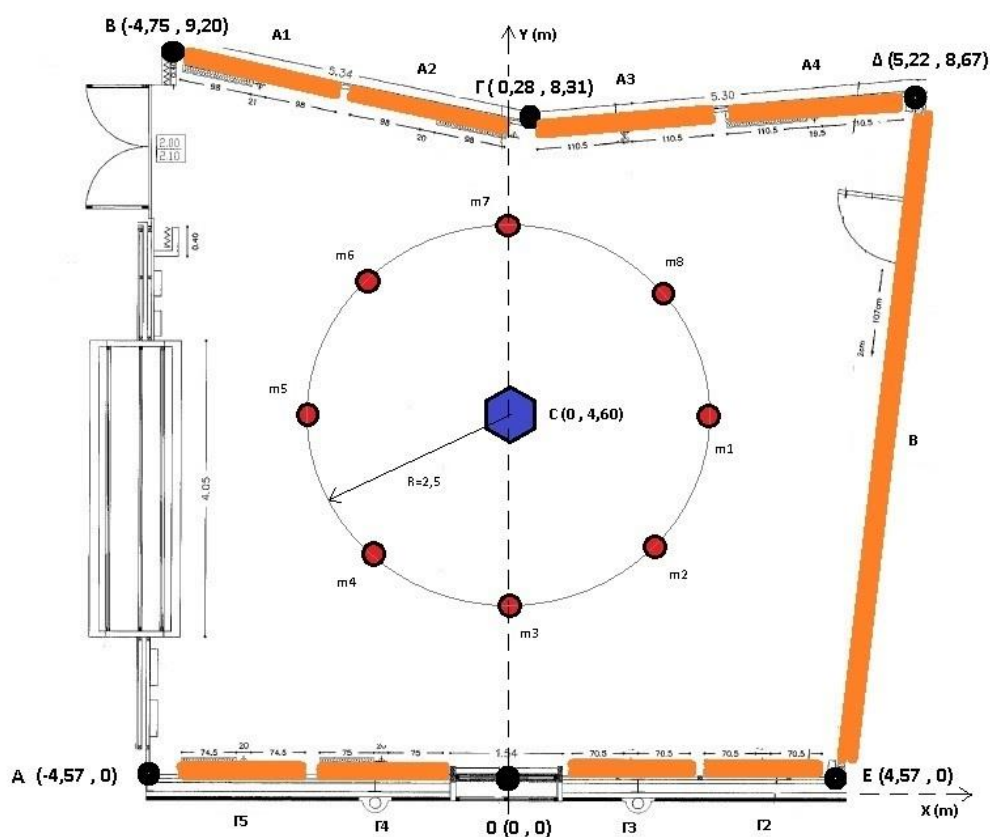
Το γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό CATT Acoustic. Η δημιουργία του αποσκοπεί στη διευκόλυνση της μελέτης οποιασδήποτε πιθανής ακουστικής κατάστασης του στούντιο, λόγω της ευκολίας και της ταχύτητας εξαγωγής των αποτελεσμάτων. «Παρ' όλο που τα λογισμικά γεωμετρικής ακουστικής δεν είναι απολύτως ακριβή, μπορούν να αποτελέσουν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο της συμβουλευτικής ακουστικής. Μπορούν να δώσουν το 80% των απαντήσεων» [12].

«Το γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται μόνο από το σύνολο των επιφανειών που ορίζονται σε αυτό. Αποτελεί μια σχετικά απλή έννοια, με μόνη μεταβλητή τον βαθμό πολυπλοκότητας του. Το γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο, είναι το γεωμετρικό μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει τις ακουστικές ιδιότητες του κάθε υλικού, οι οποίες αντιστοιχούνται στην κάθε επιφάνεια. Οι ιδιότητες αυτές, όπως ο συντελεστής απορρόφησης, εφαρμόζονται στους αλγόριθμους της γεωμετρικής ακουστικής ελαττώνοντας την ενέργεια των προσπιπτουσών ακτινών μετά από μια ανάκλαση» [10].

7.1 Σχεδιασμός της αίθουσας (δημιουργία του μοντέλου)

Η ακριβής αποτύπωση της γεωμετρίας της αίθουσας με τα διαθέσιμα όργανα μέτρησης (αποστασιόμετρο και μέτρο) αποτελεί εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, ειδικά κατά τον προσδιορισμό των γωνιών. Ενώ η μέτρηση αποστάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια, η τοποθέτηση σημείων με συντεταγμένες σε κάποιο σύστημα αναφοράς, προϋποθέτει την εξασφάλιση της καθετότητας κατά την μέτρηση ή την γνώση της γωνίας μεταξύ των σημείων. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός του μοντέλου βασίστηκε στην κάτοψη του χώρου της μελετητικής εταιρίας.

Η κλίμακα του σχεδίου χρειάστηκε να υπολογισθεί, διότι παρόλο που τα σχέδια της κατασκευάστριας εταιρείας είναι σε κλίμακα 1:50, αυτή αφορά τις διαστάσεις του πρωτότυπου εγγράφου, το οποίο δεν ήταν διαθέσιμο κατά την εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Έτσι ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός της κλίμακας του σχεδίου το οποίο εκτυπώθηκε από ψηφιακό αρχείο του πρωτότυπου εγγράφου. Παρακάτω φαίνεται εικόνα της κάτοψης, στην οποία έχουν ορισθεί οι άξονες του επιπέδου του δαπέδου, οι συντεταγμένες των γωνιών της αίθουσας, οι θέσεις των μονάδων του εξοπλισμού και των πάνελ.



Εικόνα 20 – Κάτοψη της αίθουσας με τους άξονες συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό του γεωμετρικού ακουστικού μοντέλου

Τα μήκη των πλευρών AB, AE και ΔΕ μετρήθηκαν με αποστασιόμετρο και βρέθηκαν ίσα με 9,20m, 9,14m και 8,30m αντίστοιχα. Τα ίδια ευθύγραμμα τμήματα μετρήθηκαν σε εκτυπωμένη κάτοψη και βρέθηκαν ίσα με 17,8cm, 17,4cm και 16,9cm. Οι λόγοι κλίμακας μεταξύ της εκτυπωμένης κάτοψης και του πραγματικού χώρου για κάθε μία από τις τρεις μετρήσεις προκύπτει 1:51,6, 1:52,5 και 1:49,1. Η απόκλιση μεταξύ των τριών τιμών είναι πιθανό να οφείλεται σε σφάλμα κατά τις μετρήσεις στον πραγματικό χώρο, σε σφάλμα κατά τον σχεδιασμό της κάτοψης, ή το πιθανότερο σε σφάλμα κατά την μέτρηση των ευθυγράμμων τμημάτων της εκτυπωμένης κάτοψης, καθώς κάθε χιλιοστό της αντιστοιχεί σε περίπου 5cm του πραγματικού χώρου. Από τον μέσο όρο τους, λαμβάνουμε συντελεστή κλίμακας 1:51 με την βοήθεια του οποίου μπορούμε πλέον να δώσουμε σε σημεία του χώρου συντεταγμένες.

Ως σημείο αναφοράς (0,0) θέτουμε το μέσον της πλευράς AE για λόγους συμμετρίας και ευκολίας των υπολογισμών του CATT Acoustic. Στο σύστημα αυτό των αξόνων, μετρώντας τις αποστάσεις των σημείων ενδιαφέροντος επί της εκτυπωμένης κάτοψης και μετατρέποντας τις σε πραγματικές, είναι πλέον εφικτό να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες με τις οποίες η κάθε επιφάνεια θα εισαχθεί στο ψηφιακό μοντέλο. Αυτές είναι:

- οι γωνίες του δαπέδου της αίθουσας: A(-4,57 , 0,00), B(-4,75 , 9,20), Γ(0,28 , 8,31), Δ(5,22 , 8,67), E(4,75 , 0,00),

- η θέση της πηγής C(0,00 , 4,60),
- οι θέσεις των μικροφώνων: m1(2,50 , 4,60), m2(1,77 , 2,83), m3(0,00 , 2,10), m4(-1,77 , 2,83), m5(-2,50 , 4,60), m6(-1,77 , 6,73), m7(0,00 , 7,10), m8(1,77 , 6,73)

Για τη θέση των πάνελ στον χώρο, ή οποιουδήποτε άλλου αντικειμένου βρίσκεται επί κάποιας πλευρικής επιφάνειας, η μέτρηση η οποία ήταν δυνατόν να γίνει ήταν αυτή της απόστασης τους ως προς κάποια από τις κοντινές τους γωνίες και η μέτρηση των διαστάσεων τους. Από τις μετρήσεις αυτές, προκειμένου να μπορέσουμε να αποδώσουμε στο κάθε πάνελ συγκεκριμένες συντεταγμένες, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των εξισώσεων των ευθειών από τις οποίες αυτά διέρχονται. Για την απλούστευση του ψηφιακού μοντέλου και χωρίς αξιολογικό περιορισμό στην ακρίβεια του, θεωρήθηκε ότι τα πάνελ βρίσκονται όχι απλά παράλληλα με τις πλευρικές επιφάνειες, αλλά ότι είναι μέρος τους. Συνεπώς οι συντεταγμένες τους θα ικανοποιούν τις εξισώσεις των ευθειών που διέρχονται από τους πλευρικούς τοίχους της αίθουσας. Αυτές, για το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς και κατόπιν υπολογισμών βρέθηκαν ως εξής για την κάθε πλευρά:

- AB: $x = -4,57$
- ΒΓ: $y = -0,18x + 8,36$
- ΓΔ: $y = 0,07x + 8,29$
- ΔΕ: $y = 13,34x - 60,96$
- ΑΕ: $y = 0$

Δεδομένου ότι όλες οι πλευρές και τα αντικείμενα σε αυτές είναι κάθετα ως προς το επίπεδο του δαπέδου, οι παραπάνω εξισώσεις ικανοποιούν τις συντεταγμένες των σημείων για κάθε ύψος μέχρι και το ταβάνι. Κάνοντας χρήση των παραπάνω εξισώσεων και των μετρήσεων της απόστασης του κάθε πάνελ από τις γωνίες, υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους.

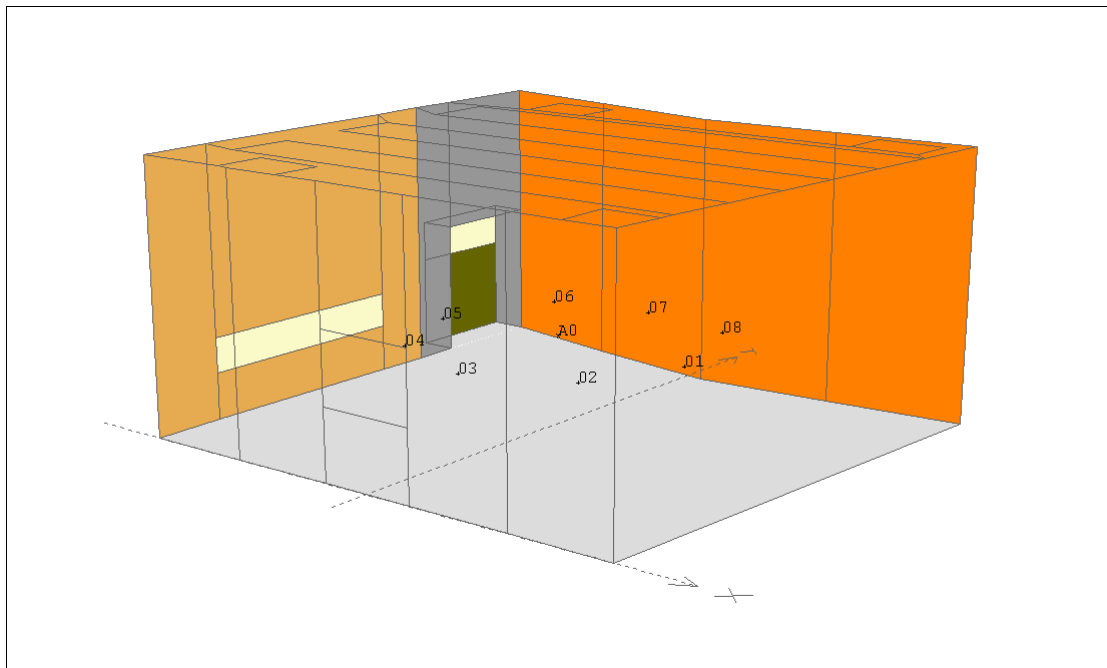
Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο βαθμός λεπτομέρειας είναι πρωταρχικής σημασίας στην κατασκευή ενός μοντέλου γεωμετρικής ακουστικής. «Ένα μοντέλο με μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας θα απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα θα είναι ανακριβές. Υλικά των επιφανειών, τα οποία είναι πολύ μικρά συγκριτικά με το μήκος κύματος του ήχου, υπολογίζονται ανεπαρκώς από τους αλγορίθμους της γεωμετρικής ακουστικής, με μεγαλύτερα ποσά ανακλώμενης ενέργειας από αυτά που πραγματικά δικαιολογούνται βάσει της επιφάνειας τους, ή αγνοούνται λόγω της πολύ μικρής τους επιφάνειας. Ένα πολύ λεπτομερές μοντέλο είναι καταλληλότερο για υπολογισμό μόνο των υψηλών συχνοτήτων. Συνεπώς είναι προτιμότερο να αποφεύγεται η δημιουργία μοντέλων με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας, ο σχεδιασμός τους να βασίζεται στις ιδιότητες μεγαλύτερων επιφανειών και ο συνυπολογισμός της επίδρασης της υψής των μικρότερων επιφανειών να γίνεται με την εισαγωγή του ισοδύναμου διάχυσης» [10] .

Για τους παραπάνω λόγους, δεν συμπεριλήφθηκαν στον σχεδιασμό του γεωμετρικού ακουστικού μοντέλου αντικείμενα μικρής επιφάνειας ή μικρές μεταβολές της γεωμετρίας των επιφανειών όπως οι παρακάτω:

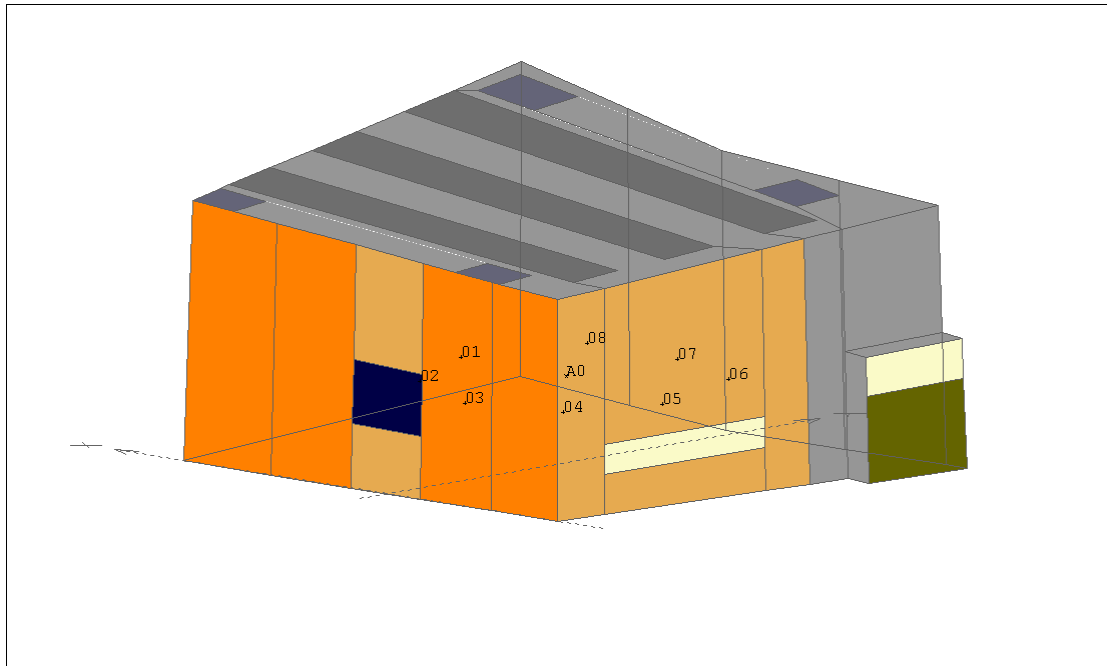
- Τα περβάζια των παραθύρων του control room και της πλευράς ΑΕ, τα οποία είναι κάθετα στις πλευρικές επιφάνειες, πάχους περίπου 2cm και μήκους περίπου 10cm

- Η κλίση του παραθύρου του control room, η οποία ισοδυναμεί με διαφορά στην προβολή των κατακόρυφων άκρων του στο δάπεδο, της τάξης των 10cm
- Η εξοχή των μόνιμα τοποθετημένων απορροφητικών υλικών, ή και των περιστρεφόμενων πάνελ από τους πλαϊνούς τοίχους, μεγέθους περίπου από 10cm έως 20cm
- Η ύπαρξη επιφάνειας τοίχου ανάμεσα στα μόνιμα τοποθετημένα απορροφητικά υλικά, ανάμεσα στα περιστρεφόμενα πάνελ και γύρω από τα παράθυρα, πλάτους από 10cm έως 20cm
- Η διαφοροποίηση της κλίσης σε ορισμένες περιοχές του ταβανιού, με μεταβολή στο ύψος της αίθουσας κατά περίπου 10cm

Στις δύο παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το ακουστικό γεωμετρικό μοντέλο, όπως σχεδιάστηκε στο CATT Acoustic. Στην πρώτη, φαίνεται το δάπεδο, η πλευρά ΒΔ, η είσοδος και ο τοίχος προς το control room, ενώ στην δεύτερη η οροφή, η πλευρά ΑΕ, η είσοδος και ο τοίχος προς το control room. Στις επιφάνειες, ανατέθηκαν συντελεστές απορρόφησης και ισοδύναμα διάχυσης σύμφωνα με το Παράρτημα 3.



Εικόνα 21 – Το γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο στο CATT Acoustic. Με ανοιχτό γκρι χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια της μοκέτας του δαπέδου, με ανοιχτό κίτρινο τα τζάμια της πόρτας και του control room, με σκούρο πράσινο η μεταλλική πόρτα, με σκούρο γκρι οι τοίχοι που δεν καλύπτονται από απορροφητικό υλικό, με μπλε οι τοίχοι που καλύπτονται μερικώς από απορροφητικό υλικό και με πορτοκαλί τα επιτοιχία πάνελ στην απορροφητική τους κατάσταση.



Εικόνα 22 – Διαφορετική οπτική του γεωμετρικού ακουστικού μοντέλου. Με ανοιχτό κίτρινο χρώμα απεικονίζονται τα τζάμια της πόρτας και του control room, με σκούρο πράσινο η μεταλλική πόρτα, με σκούρο γκρι οι τοίχοι και τα μέρη της οροφής που δεν καλύπτονται από απορροφητικό υλικό, με μπεζ οι τοίχοι που καλύπτονται μερικώς από απορροφητικό υλικό, με πορτοκαλί τα επιτοιχία πάνελ στην απορροφητική τους κατάσταση, με σκούρο μπλε η κουρτίνα, με μπλε τα απορροφητικά της οροφής και με ανθρακί οι διαχυτές της οροφής.

7.2 Έλεγχος διακύμανσης της επαναληψιμότητας

Λόγω των παραδοχών της γεωμετρικής ακουστικής και λόγω της αδυναμίας των σύγχρονων λογισμικών προσομοίωσης να λάβουν υπόψη, ή να υπολογίσουν πλήρως, όλες τις φυσικές παραμέτρους που εμπλέκονται στην διαμόρφωση της ακουστικής μίας κλειστής αίθουσας, είναι αναμενόμενο ότι τα αποτελέσματα του ψηφιακού μοντέλου θα αποκλίνουν από την πραγματική ακουστική συμπεριφορά της. Εν μέρει, το ίδιο μπορεί να ισχυριστεί κανείς και για τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω ηχογράφησης της αίθουσας, λόγω πιθανών αλλοιώσεων που εισάγονται εξ αιτίας των χαρακτηριστικών του ηχητικού εξοπλισμού, ή και της μεθόδου με την οποία το κάθε λογισμικό εξάγει τις ποσοτικοποιημένες ηχητικές παραμέτρους από τα ηχητικά αρχεία. Μεταξύ όμως των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων ενός βαθμονομημένου ακόμα μοντέλου, αναμφισβήτητα τα πρώτα προσεγγίζουν ακριβέστερα την πραγματικότητα και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως τιμές αναφοράς κατά την βαθμονόμηση.

Σε αντίθεση με μία μελέτη πρόβλεψης, στις περιπτώσεις όπου ο υπό μελέτη χώρος ήδη υπάρχει, όπως στην παρούσα, είναι δυνατή η μέτρηση των ακουστικών του παραμέτρων και η τροποποίηση του μοντέλου ώστε να ανταποκρίνεται στον πραγματικό χώρο. Μια γενική μέθοδος βαθμονόμησης μοντέλων γεωμετρικής ακουστικής προτείνεται από τους Postma και Katz [10], τα σημαντικότερα στάδια της οποίας αναφέρονται εν συντομία παρακάτω.

- Αρχικά, εκτελούνται μετρήσεις υπολογισμού των κρουστικών αποκρίσεων του χώρου, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια ως μετρήσεις αναφοράς για την βαθμονόμηση.
- Δημιουργείται το γεωμετρικό μοντέλο το οποίο παραμένει αμετάβλητο κατά την διαδικασία βαθμονόμησης
- Σε κάθε επιφάνεια του γεωμετρικού μοντέλου ανατίθενται ακουστικές ιδιότητες (συντελεστές απορρόφησης και ισοδύναμα διάχυσης, ανά συχνοτική περιοχή) και έτσι προκύπτει το γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο
- Λόγω των στοχαστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στα λογισμικά γεωμετρικής ακουστικής, αναμένεται διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε φορά που εκτελείται προσομοίωση [12]. Συνεπώς είναι απαραίτητη η πολλαπλή εκτέλεση προσομοίωσης για την ίδια ακουστική κατάσταση και ο υπολογισμός της διακύμανσης αυτής
- Οι ακουστικές ιδιότητες των επιφανειών μεταβάλλονται ώστε η τυπική απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των αποτελεσμάτων των μετρήσεων να βρίσκεται εντός των ορίων JND, ή εντός του εύρους επαναληψιμότητας του γεωμετρικού μοντέλου (όποιο από τα δύο είναι μικρότερο)

Επιπλέον, η διαδικασία δημιουργίας μίας κρουστικής απόκρισης δεν είναι ανεξάρτητη του λογισμικού με το οποίο δημιουργείται και το ίδιο ισχύει και για την διαδικασία ανάλυσης της. Συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση του ίδιου λογισμικού εξαγωγής ακουστικών παραμέτρων από τις κρουστικές αποκρίσεις την προσομοίωσης και των μετρήσεων, καθ' όλη την διάρκεια της βαθμονόμησης [10].

Το πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της διακύμανσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου μεταξύ των επαναλαμβανομένων προσομοιώσεων. Η διακύμανση αυτή πιθανά επηρεάζεται, μεταξύ άλλων, από την υφή των επιφανειών, την θέση και την κατευθυντικότητα της πηγής, ή την θέση και την κατευθυντικότητα του δέκτη και για τον λόγο αυτό προσδιορίζεται για περισσότερες από μία καταστάσεις των μεταβλητών που σκοπεύουμε να μελετήσουμε στην συνέχεια. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η πηγή και οι δέκτες είναι πανκατευθυντικοί, η γεωμετρία της αίθουσας αμετάβλητη και η υφή των επιφανειών συγκεκριμένη. Δεδομένου όμως ότι πρόκειται για μία αίθουσα μεταβλητής ακουστικής, με κύριο αντικείμενο μελέτης τις διαφοροποιήσεις λόγω αυτής της μεταβλητότητας, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η διακύμανση των αποτελεσμάτων τουλάχιστον για τις δύο ακραίες ακουστικές καταστάσεις (μέγιστης και ελάχιστης απορρόφησης).

Ξεκινώντας από την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, εκτελέστηκαν δέκα προσομοιώσεις του ψηφιακού μοντέλου και τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν σε πίνακες για κάθε μια από τις ακουστικές παραμέτρους T15, T30, D50, C80 και για κάθε ένα από τα οκτώ μικρόφωνα. Για την κάθε επανάληψη της προσομοίωσης, υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών των ακουστικών παραμέτρων, μεταξύ των 8 μικροφώνων. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών των δέκα τυπικών αποκλίσεων, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή τους. Από τις συνολικά 80 τιμές για το κάθε μικρόφωνο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος και ως προς αυτόν, υπολογίστηκε η ελάχιστη παρατηρήσιμη διαφορά (JND) για την κάθε παράμετρο. Αυτή είναι 5% επί του χρόνου για τις T15, T30, 5% για την D50 και 1db για την

C80. Τέλος ο μέσος όρος των 10 τυπικών αποκλίσεων της κάθε ακουστικής παραμέτρου εκφράστηκε ως κλάσμα της ελάχιστης παρατηρήσιμης διαφοράς, όπως αυτή υπολογίστηκε για την κάθε παράμετρο. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ακρίβειας του μοντέλου κατά τις επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις, και η έκφραση της συνέπειας των αποτελεσμάτων ως προς την ποσότητα που υποδεικνύει το κατά πόσο αυτές οι μεταβολές είναι πρακτικά παρατηρήσιμες. Η διαδικασία αυτή βασίστηκε στον μέσο όρο των τιμών όλων των μικροφώνων και όχι στις τιμές ενός μόνο (δηλαδή μίας μόνο θέσης του δέκτη), καθώς στόχο αποτελεί η δημιουργία ενός μοντέλου του οποίου τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα για οποιοδήποτε σημείο της αίθουσας. Ο υπολογισμός βάσει των αποτελεσμάτων και των οκτώ μικροφώνων, εξασφαλίζει μια ευρεία εκτίμηση της απόκλισης κατά την επαναληψιμότητα της προσομοίωσης. Στους πίνακες του παραρτήματος 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης και μέγιστης ανάκλασης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τιμών των αποκλίσεων σε JND μεταξύ των καταστάσεων μέγιστης απορρόφησης και μέγιστης ανάκλασης του ψηφιακού μοντέλου, προκύπτει μια σαφώς αυξημένη συνέπεια των τιμών κατά την επανάληψη των προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης. Ενώ για την μέγιστη απορρόφηση η τυπική απόκλιση των τιμών της παραμέτρου T30 είναι έως και 2 JND, η αντίστοιχη απόκλιση για την μέγιστη ανάκλαση είναι της τάξης του 0,25 JND, δηλαδή μη παρατηρήσιμη από τον ακροατή. Δεδομένου ότι και για τις δύο καταστάσεις η γεωμετρία του χώρου είναι η ίδια, το λογισμικό και η μέθοδος στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων παραμένει το ίδιο, ενώ η μόνη διαφορά βρίσκεται στους συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών των περιστρεφόμενων πάνελ, τα αίτια αυτής της διαφοροποίησης στην συνέπεια των αποτελεσμάτων πιθανά να αποδίδονται εν μέρει και σε παράγοντες που δεν αφορούν το ψηφιακό μοντέλο και τους εμπλεκόμενους αλγόριθμους της γεωμετρικής ακουστικής. Εξ άλλου παρόμοια συμπεριφορά χαρακτηρίζει και τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, καταδεικνύοντας ότι υπεύθυνη για την διακύμανση αυτή είναι σε μεγάλο βαθμό η γεωμετρία και η κατανομή των διαφορετικών υλικών στις επιφάνειες της ίδιας της αίθουσας.

7.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

Έχοντας πλέον δημιουργήσει και προσδιορίσει την συνέπεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου κατά τις επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις, είναι δυνατή η βαθμονόμησή του, στον βαθμό που επιτρέπεται από τις μέσες τυπικές αποκλίσεις όπως προσδιορίστηκαν παραπάνω. Η βαθμονόμηση είναι μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, με στόχο την σύγκλιση των αποτελεσμάτων της ψηφιακής προσομοίωσης με αυτά των μετρήσεων, εντός του εύρους των υπολογισμένων JNDs των ακουστικών παραμέτρων ή των μέσων τυπικών αποκλίσεων των τιμών του μοντέλου, όποιο από τα δύο είναι μικρότερο. Χωρίς αυτή, η χρήση του μοντέλου δεν μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα και χρήσιμα αποτελέσματα.

Για την ορθότητα της σύγκρισης των τιμών, η άμεση εξαγωγή των ακουστικών παραμέτρων σε μορφή αριθμητικών τιμών από τις προσομοιώσεις του CATT Acoustic δεν θεωρείται πλέον αρκετά έγκυρη. Για τον λόγο αυτό, κάθε φορά που οι συντελεστές του μοντέλου τροποποιούνται, επαναλαμβάνονται πέντε προσομοιώσεις και δημιουργούνται πέντε αντίστοιχα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων. Στην συνέχεια, για κάθε μία από αυτές τις

κρουστικές αποκρίσεις υπολογίζονται οι ακουστικές παράμετροι, μέσω του λογισμικού Aurora «acoustical parameters», όπως ακριβώς συνέβη και κατά τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων από τα ηχητικά αρχεία των ακουστικών μετρήσεων. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η χρήση των ίδιων αλγόριθμων κατά την διαδικασία υπολογισμού των ακουστικών παραμέτρων από όλες τις κρουστικές αποκρίσεις, καθιστώντας την σύγκριση μεταξύ των τιμών των προσομοιώσεων και των ηχογραφήσεων στατιστικά ακριβέστερη. Τέλος, από τις ακουστικές παραμέτρους των πέντε προσομοιώσεων υπολογίζονται οι μέσοι όροι και υπόκεινται σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των ακουστικών μετρήσεων.

Η βαθμονόμηση γίνεται ως προς την παράμετρο T30, στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, για το σύνολο των οκτώ μικροφώνων. Ως τιμές στόχου, θεωρούνται οι τιμές που υπολογίστηκαν από τις ακουστικές μετρήσεις, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

T30 (ms)	Ακουστικές μετρήσεις Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
M.O.	0,507	0,582	0,424	0,272	0,280	0,249
JND	0,025	0,029	0,021	0,014	0,014	0,012

Πίνακας 9 – Τιμές στόχου για την παράμετρο T30 και την αίδουσα στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

Οι αντίστοιχες τιμές για το αβαθμονόμητο ακόμα μοντέλο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, μαζί με την διαφορά τους από τις τιμές στόχου. Η διαφορά αυτή εκφράζεται ως κλάσμα της ελάχιστης παρατηρήσιμης διαφοράς (JND) για την κάθε συχνотική περιοχή, με το JND να έχει υπολογιστεί ως το 5% της τιμής στόχου. Η ποσότητα αυτή αποτυπώνει το κατά πόσο η διαφορά γίνεται αντιληπτή από τον ακροατή και παρατίθεται απλά ως ενδεικτική. Η επίτευξη της βαθμονόμησης, γίνεται με σύγκλιση των τιμών εντός του εύρους JND στον βαθμό που επιτρέπεται από την απόκλιση του μοντέλου κατά τις επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις, ακόμα και αν αυτές γίνονται τελικά αντιληπτές από τον ακροατή. Για παράδειγμα, εάν ένα ψηφιακό ακουστικό μοντέλο παρουσιάζει μεταξύ των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων τυπική απόκλιση 3 JND για κάποια συχνотική περιοχή, τότε η βαθμονόμηση θεωρείται επιτυχής εάν εξασφαλίζει σύγκλιση των τιμών εντός αυτού του εύρους. Αντίστοιχα, εάν η τυπική απόκλιση μεταξύ των επαναλήψεων του μοντέλου είναι 0,1 JND, τότε η σύγκλιση των τιμών με διαφορά 0,3 JND δεν θα ήταν αποδεκτή κατά την βαθμονόμηση, παρ' όλο που είναι μη παρατηρήσιμη, αφού το μοντέλο επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επομένως, για τον υπολογισμό του βαθμού επιτυχίας της βαθμονόμησης, η διαφορά του μέσου όρου από την τιμή στόχου εκφράζεται ως κλάσμα της τυπικής απόκλισης κατά την επαναληψιμότητα του μοντέλου, όπως αυτή υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαφορά αυτή θεωρείται αποδεκτή εφόσον βρίσκεται εντός του εύρους της τυπικής απόκλισης, δηλαδή όταν η τιμή του κλάσματος της διαφοράς προς την τυπική απόκλιση είναι μικρότερη της μονάδας. Οι τιμές της μέσης τυπικής απόκλισης κατά την επανάληψη των προσομοιώσεων φαίνονται στους πίνακες του παραρτήματος 5.

T30 (ms)	Προσομοίωση – αβαθμονόμητο μοντέλο Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
M.O.	0,612	0,425	0,329	0,307	0,300	0,291
Διαφορά από τιμή στόχου	0,105	0,156	0,095	0,035	0,020	0,042
Διαφορά σε JND	4,138	5,375	4,491	2,543	1,428	3,392
Διαφορά προς τυπική απόκλιση	10,437	4,447	3,110	1,148	0,648	1,403

Πίνακας 10 – Αποτελέσματα της προσομοίωσης από το αβαθμονόμητο ακόμα μοντέλο, για την παράμετρο T30 και την αίθουσα στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

Η παρατήρηση της διαφοράς των τιμών από τις τιμές στόχου, αλλά και της έκφρασης τους σε JND, αποτελούν ικανή ένδειξη των μεταβολών που πρέπει να επέλθουν στο μοντέλο, ώστε να επιτευχθεί η προσέγγιση της πραγματικής απόκρισης του χώρου. Πρόκειται για μία μακρά διαδικασία επαναλαμβανόμενων δοκιμών και ελέγχων, έως ότου τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προσεγγίσουν αυτά των ακουστικών μετρήσεων. Στο πρώτο στάδιο προσέγγισης των τιμών στόχου, τροποποιήθηκαν οι συντελεστές απορρόφησης της επιφάνειας της μοκέτας η οποία καλύπτει πλήρως το δάπεδο της αίθουσας. Η επιλογή της επιφάνειας αυτής για την έναρξη της διαδικασίας βαθμονόμησης, έγινε πρωτίστως διότι λόγω του μεγάλου της εμβαδού αναμένεται να επηρεάσει αρκετά σημαντικά τη συμπεριφορά του μοντέλου. Πέρα όμως από αυτό, το γεγονός ότι καλύπτει όλη την επιφάνεια του δαπέδου, εξασφαλίζει την επίδραση των μεταβολών σε κάθε πιθανή θέση των δεκτών, περισσότερο από κάθε άλλη επιφάνεια της υπό προσομοίωση αίθουσας. Ταυτόχρονα λόγω αυτού, η διακύμανση των τιμών μεταξύ διαφορετικών θέσεων του δέκτη, δεν αναμένεται να αυξηθεί πέρα από την τιμή η οποία υπολογίστηκε παραπάνω, κατά την εκτίμηση της επαναληψιμότητας του μοντέλου. Κάτι τέτοιο πιθανά να συνέβαινε αν μεταβαλλόντουσαν οι συντελεστές μιας μικρότερης επιφάνειας ενός συγκεκριμένου σημείου της αίθουσας.

Χρειάστηκαν έξι επαναλήψεις της διαδικασίας προσέγγισης, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, ώστε να επιτευχθούν οι τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι μεταβολές των συντελεστών απορρόφησης έγιναν λαμβάνοντας υπόψη το εύρος τιμών, σύμφωνα με τα Παραρτήματα 3 και 4.

T30 (ms)	1 ^ο στάδιο βαθμονόμησης Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
M.O.	0,575	0,530	0,412	0,282	0,269	0,239
Διαφορά από τιμή στόχου	0,068	0,051	0,013	0,010	0,011	0,011
Διαφορά σε JND	2,691	1,564	0,313	0,239	0,286	0,292

Διαφορά προς τυπική απόκλιση	6,786	1,459	0,409	0,318	0,361	0,350
---------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Πίνακας 11 – Υπολογισμός της παραμέτρου T30 κατά το πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

Για τις περιοχές των 500Hz, 1K, 2K και 4K οι διαφορές από τις τιμές στόχου εκτιμώνται στατιστικά στη τάξη μεγέθους μερικών μόλις ms και είναι εντός του εύρους της τυπικής απόκλισης, καθιστώντας την βαθμονόμηση για τις συχνотικές αυτές περιοχές επιτυχή. Αντίθετα, για τις περιοχές των 125 και 250Hz η μεταβολή των συντελεστών απορρόφησης της μοκέτας εντός των ορίων τιμών όπως καθορίζονται από τη σχετική βιβλιογραφία (Παράρτημα 4), δεν ήταν επαρκής για την επιτυχή βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι συχνотικές αυτές περιοχές θα χρειαστεί να βαθμονομηθούν μέσω μεταβολής των συντελεστών άλλων επιφανειών.

Κατά την ανάλυση της διακύμανσης των τιμών των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, είχε παρατηρηθεί μεγαλύτερη διακύμανση για τις περιοχές των 125, 250 και 500Hz, σε αντίθεση με αυτές των 1,2 και 4K για τις οποίες οι διακυμάνσεις υπολογίστηκαν κάτω του ενός JND. Ιδιαίτερα για τις περιοχές των 250 και 500Hz, η διακύμανση βρέθηκε στα 2,7 και 3 JND αντίστοιχα. Παρατηρώντας τις τιμές της παραμέτρου T30, όπως υπολογίστηκαν από τις ακουστικές μετρήσεις για τα 8 μικρόφωνα (πίνακας 5), διακρίνεται μια σημαντική αύξηση της για το μικρόφωνο 3, στις περιοχές των 250 και 500Hz, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μικρόφωνα. Η διαφορά αυτή προφανώς αποτυπώνει κάποια χαρακτηριστικά του πραγματικού χώρου τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Σε παρόμοια αίτια πρέπει να αποδοθούν και οι υπόλοιπες «ακραίες τιμές» μεταξύ των οκτώ μικροφώνων, όπως μεταξύ άλλων, η χαμηλή τιμή για το μικρόφωνο 5 στα 125Hz και η υψηλή για το μικρόφωνο 7 στα 250Hz. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις, μπορούν να αναζητηθούν τα ποιοτικά αίτια διαφοροποίησης των τιμών και τεθεί ο ισχυρισμός ότι αποδίδονται σε χαρακτηριστικά των μοναδικών πλησιέστερων υλικών τους. Για παράδειγμα, το μικρόφωνο 3 είναι αρκετά πιθανό να επηρεάζεται από την ύπαρξη του παραθύρου στο μέσον της πλευράς ΑΕ πολύ περισσότερο από τα υπόλοιπα μικρόφωνα. Η αυξημένη τιμή της T30 στα 250Hz αυτού του μικροφώνου, πιθανά να οφείλεται σε χαμηλό συντελεστή απορρόφησης των 250Hz της επιφάνειας αυτής. Η εισαγωγή στο μοντέλο αυτών των ιδιοτεροτήτων της αίθουσας, μέσω της κατάλληλης μεταβολής των συντελεστών απορρόφησης των αντίστοιχων επιφανειών, δεν είναι ικανή για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βαθμονόμησης, ή αν μη τι άλλο μπορεί να θεωρηθεί και ως περιττή. Δεδομένου όμως ότι οι μεταβολές αυτές έχουν την τάση να μεταβάλλουν τις τιμές της προσομοίωσης προς τις τιμές στόχου, εφαρμόστηκαν ως δεύτερο στάδιο προσέγγισης. Οι επιφάνειες των οποίων οι συντελεστές μεταβλήθηκαν είναι οι επιφάνειες της πόρτας, των παραθύρων και των μόνιμα απορροφητικών πλευρών. Οι μεταβολές στους χρόνους αντήχησης όλης της αίθουσας είναι αρκετά μικρές για να αναφερθούν αναλυτικά, όμως οι επί μέρους τιμές των οκτώ δεκτών του μοντέλου παρουσίασαν τάση πλησιέστερη με αυτή της πραγματικής αίθουσας.

Για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, υπήρξε απαραίτητη η περαιτέρω ελάττωση του χρόνου αντήχησης για την περιοχή των 125Hz και η αύξηση του για τα 250Hz. Η ιδανική προς μεταβολή επιφάνεια είναι αυτή του τσιμέντου, λόγω του μεγάλου της εμβαδού, όμως το εύρος τιμών των συντελεστών απορρόφησης του, όπως προβλέπεται από τη σχετική βιβλιογραφία, δεν επαρκεί για να

επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η μεταβολή των συντελεστών απορρόφησης των απορροφητικών πάνελ. Μετά από σειρά δοκιμών και ελέγχων, επιτεύχθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης. Οι τιμές της παραμέτρου T30 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι μικρές μεταβολές στις τιμές των 500Hz, 1K, 2K και 4K οφείλονται στην διακύμανση του μοντέλου κατά την επαναληψιμότητα και όχι σε μεταβολή των συντελεστών απορρόφησης. Η περιοχή των 125Hz δεν κατέστη δυνατό να βαθμονομηθεί με συντελεστές εντός του εύρους της βιβλιογραφίας, γεγονός που θα συζητηθεί αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου.

T30 (ms)	3 ^ο στάδιο βαθμονόμησης Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
M.O.	0,537	0,569	0,411	0,285	0,276	0,240
Διαφορά από τιμή στόχου	0,031	0,013	0,013	0,012	0,004	0,009
Διαφορά σε JND	1,209	0,433	0,600	0,905	0,295	0,707
Διαφορά προς τυπική απόκλιση	3,048	0,359	0,416	0,408	0,134	0,293

Πίνακας 12 - Υπολογισμός της παραμέτρου T30 κατά το τρίτο στάδιο της βαθμονόμησης για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

Για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης είναι απαραίτητη η σύγκλιση των τιμών και για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης. Στο ψηφιακό μοντέλο, όπως και στον πραγματικό χώρο, η κατάσταση αυτή προκύπτει με την εισαγωγή της ανακλαστικής επιφάνειας των πάνελ. Η επιφάνεια αυτή δεν έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα, επομένως η εισαγωγή της στο γεωμετρικό μοντέλο το καθιστά άμεσα αβαθμονόμητο. Το επόμενο (τέταρτο) στάδιο βαθμονόμησης, αφορά τον προσδιορισμό των συντελεστών απορρόφησης του ανακλαστικού πάνελ, ώστε οι τιμές της προσομοίωσης να προσεγγίσουν τις τιμές στόχου για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης. Δεδομένου ότι οι συντελεστές απορρόφησης των υπολοίπων επιφανειών επηρεάζουν την έως τώρα βαθμονόμηση, είναι απαραίτητο να παραμείνουν σταθεροί. Το τελικό στάδιο της βαθμονόμησης πρέπει να ολοκληρωθεί μέσω της μεταβολής των συντελεστών απορρόφησης των ανακλαστικών πάνελ και μόνο. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές στόχου και οι αντίστοιχες τιμές του αβαθμονόμητου ακόμα, ως προς την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης, μοντέλου.

T30 (ms)	Ακουστικές μετρήσεις Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
M.O.	0,515	0,600	0,575	0,507	0,493	0,424
JND	0,026	0,030	0,029	0,025	0,025	0,021

Πίνακας 13 - Τιμές στόχου για την παράμετρο T30 και την αίδουσα στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

T30 (ms)	Προσομοίωση – αβαθμονόμητο μοντέλο Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο.	0,636	0,656	0,801	0,803	0,778	0,720
Διαφορά από τιμή στόχου	0,121	0,056	0,226	0,296	0,285	0,297
Διαφορά σε JND	4,709	1,874	7,851	11,663	11,579	13,997
Διαφορά προς τυπική απόκλιση	13,252	7,055	21,161	30,607	27,889	41,069

Πίνακας 14 - Αποτελέσματα της προσομοίωσης για την παράμετρο T30, από το αβαθμονόμητο ακόμα μοντέλο για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

Μετά από μια ακόμη σειρά δοκιμών και ελέγχων, επετεύχθη η προσέγγιση των τιμών στόχου, εντός του εύρους της τυπικής απόκλισης, για την κάθε συχνотική περιοχή, εκτός από την περιοχή των 125Hz όπως παρατηρήθηκε και για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

T30 (ms)	4 ^ο στάδιο βαθμονόμησης Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο.	0,574	0,592	0,568	0,504	0,490	0,419
Διαφορά από τιμή στόχου	0,059	0,008	0,007	0,003	0,002	0,005
Διαφορά σε JND	2,292	0,264	0,253	0,119	0,092	0,242
Διαφορά προς τυπική απόκλιση	6,451	0,994	0,683	0,313	0,223	0,711

Πίνακας 15 - Υπολογισμός της παραμέτρου T30 κατά το τέταρτο στάδιο της βαθμονόμησης για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

Έχοντας πλέον βαθμολογήσει το μοντέλο τόσο για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης όσο και για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης, αναμένεται επίσης ακριβής προσομοίωση για τις ενδιάμεσες καταστάσεις, αυτές δηλαδή για τις οποίες κάποια από τα πάνελ ορίζονται ως απορροφητικά και κάποια άλλα ως ανακλαστικά. Συνεπώς το ψηφιακό μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει με ακρίβεια, εντός του εύρους της στατιστικής του διακύμανσης, οποιαδήποτε ακουστική κατάσταση της αίθουσας. Οι τιμές των συντελεστών απορρόφησης για κάθε επιφάνεια, μετά το πέρας της βαθμονόμησης, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Συντελεστές απορρόφησης βαθμονομημένου μοντέλου						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μοκέτα	0,10	0,03	0,05	0,20	0,19	0,29
Γυαλί	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
Κουρτίνα	0,30	0,35	0,50	0,89	0,88	0,86
Μέταλλο	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Τσιμέντο	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Απορροφητικός τοίχος	0,60	0,55	0,63	0,95	0,95	0,95
Απορροφητικά οροφής	0,54	0,80	0,98	0,98	0,85	0,60
Διαχυτές οροφής	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Απορροφητικά πάνελ	0,68	0,55	0,75	0,95	0,95	0,95
Ανακλαστικά πάνελ	0,62	0,56	0,48	0,35	0,36	0,36

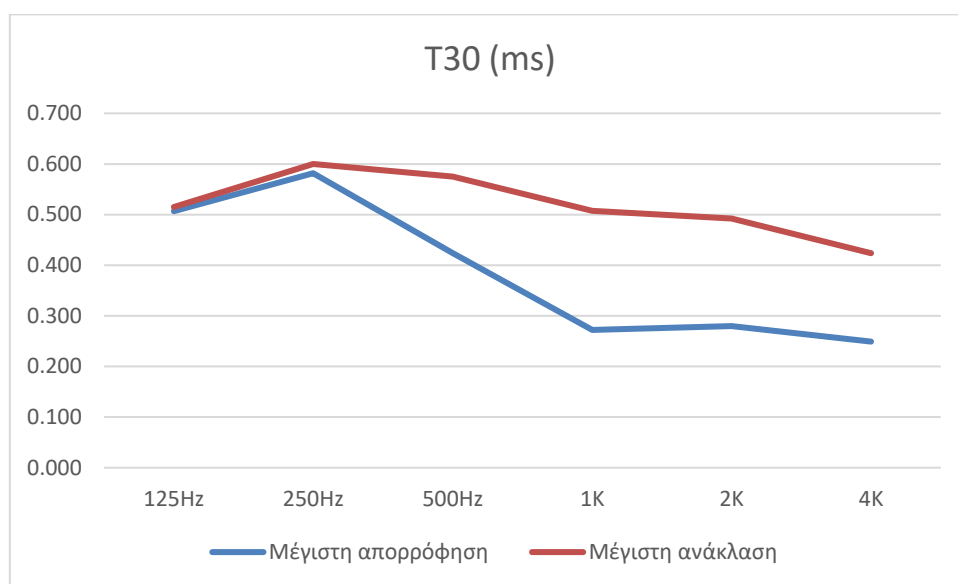
Πίνακας 16 – Οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών που ανατέθηκαν στις επιφάνειες του μοντέλου, όπως διαμορφώθηκαν κατά τη βαθμονόμηση

Τόσο για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης, όσο και για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης, η βαθμονόμηση στην περιοχή των 125Hz δεν κατέστη δυνατή. Και για τις δύο αυτές καταστάσεις, η σύγκλιση των τιμών απαιτούσε μείωση του χρόνου αντήχησης του μοντέλου. Αυτό προϋποθέτει αύξηση των συντελεστών απορρόφησης στα 125Hz, για την επιφάνεια του απορροφητικού και του ανακλαστικού πάνελ αντίστοιχα. Προφανώς κάτι τέτοιο είναι πρακτικά εφικτό εντός του μοντέλου και αντικαθιστώντας για παράδειγμα την τιμή 0,62 του ανακλαστικού πάνελ με μια αρκετά υψηλότερη, οι τιμές θα σύγκλιναν περισσότερο. Σύμφωνα όμως με τις βάσεις δεδομένων της βιβλιογραφίας ή των κατασκευαστών υλικών ακουστικού σχεδιασμού, δεν συναντάται επιφάνεια η οποία να απορροφά τις χαμηλές συχνότητες αποτελεσματικότερα από τις υψηλές. Η τυπική καμπύλη των απορροφητικών υλικών παρουσιάζει σταδιακή πτώση όσο η συχνότητα μικραίνει και σπάνια για την περιοχή των 125Hz ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος του 0,2. Επομένως τόσο οι τιμές των συντελεστών όπως παρουσιάζονται από την ETA Ακουστική, όσο και οι τιμές που διαμορφώθηκαν κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου, είναι ήδη πολύ υψηλές. Η περαιτέρω αύξηση τους ώστε να βαθμονομηθεί πλήρως το μοντέλο, ναι μεν θα έφερνε κοντύτερα τις τιμές του μοντέλου και των μετρήσεων, αλλά ταυτόχρονα θα το καθιστούσε μη ρεαλιστικό. Οι λόγοι για τους οποίους παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο θα χρειαστεί να μελετηθούν αναλυτικότερα. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα αναφερθούν μερικά πιθανά αίτια αυτού.

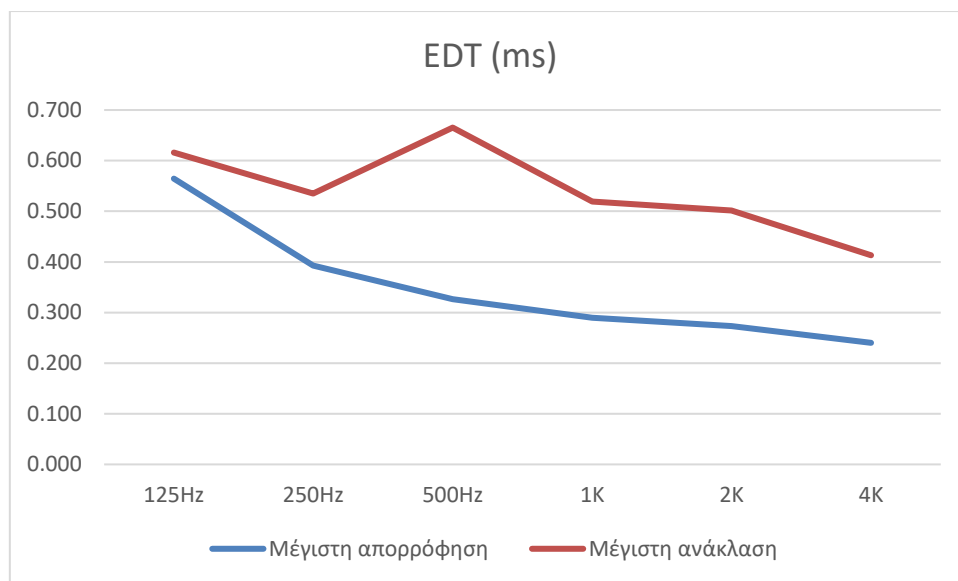
8 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Εφόσον για την περιοχή των 125Hz δεν κατέστη δυνατή η βαθμονόμηση, κρίνεται απαραίτητο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την συχνотική αυτή περιοχή να μην ληφθούν υπόψη ως αξιόπιστα. Μεταξύ των πιθανών αιτιών του παραπάνω ζητήματος, είναι και η αδυναμία του εξοπλισμού να ανταποκριθεί σε τόσο χαμηλές συχνότητες. Ιδιαίτερα για την πανκατευθυντική πηγή Brüel & Kjaer 4296, το συχνотικό εύρος λειτουργίας είναι μεταξύ των 100Hz και 5K [31]. Για την περιοχή αυτή, η οποία βρίσκεται στα όρια λειτουργίας του εξοπλισμού, είναι πιθανώς ασφαλέστερο να μην θεωρηθούν ως αξιόπιστα ούτε τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων. Επομένως, η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα επικεντρωθεί στα αποτελέσματα των υπολοίπων συχνотικών περιοχών.

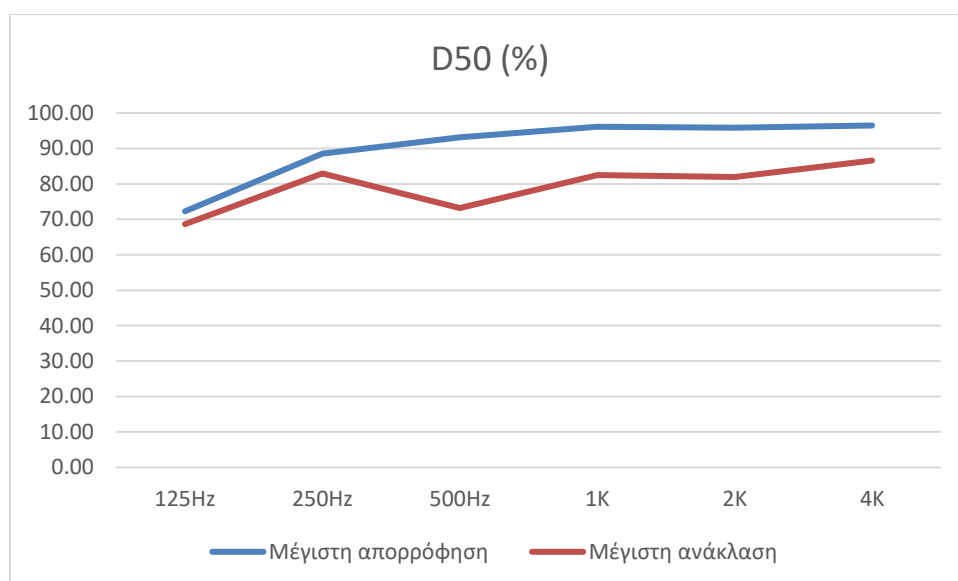
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων για ολόκληρη την αίθουσα, για τις ακουστικές παραμέτρους T30, EDT, D50 και C80, σε κοινό γράφημα για τις καταστάσεις μέγιστης απορρόφησης και μέγιστης ανάκλασης, ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.



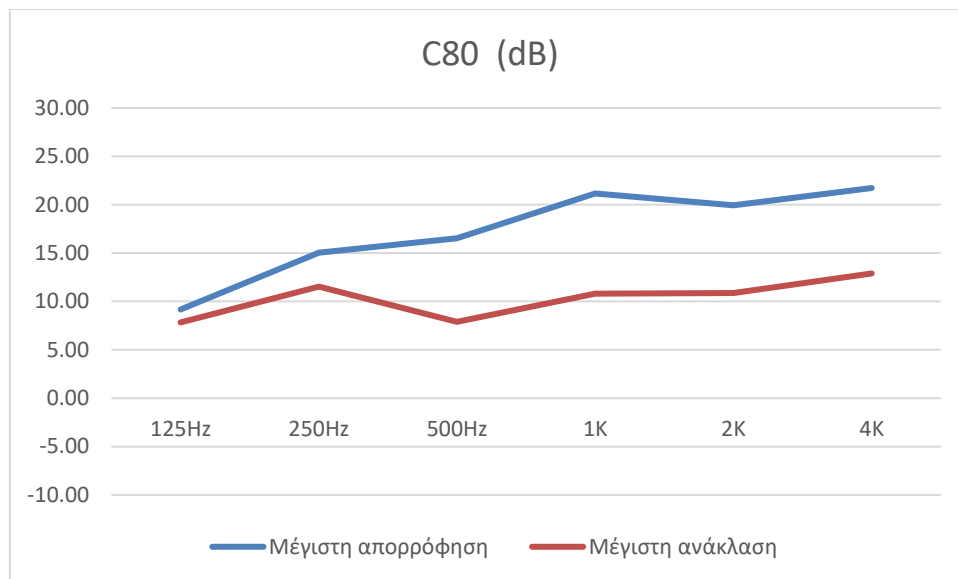
Γράφημα 1 – Αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων για την παράμετρο T30



Γράφημα 2 - Αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων για την παράμετρο EDT



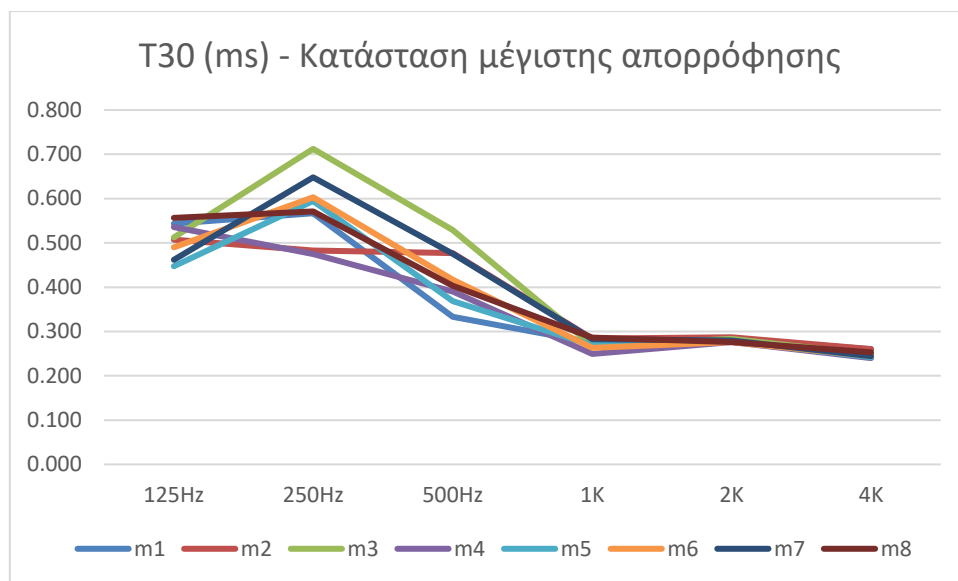
Γράφημα 3 - Αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων για την παράμετρο D50



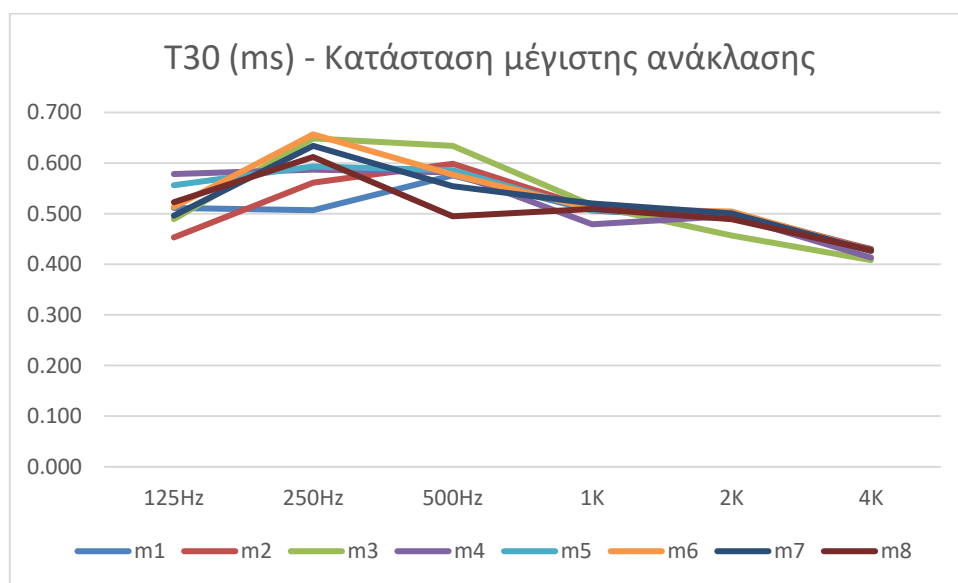
Γράφημα 4 - Αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων για την παράμετρο C80

Ο χρόνος αντήχησης, όπως προκύπτει από την ανάλυση των ακουστικών μετρήσεων, κυμαίνεται μεταξύ 0,424ms (στα 4K) και 0,600ms (στα 250Hz) για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης και μεταξύ 0,249ms (στα 4K) και 0,582ms (στα 250Hz) για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης. Μεταξύ των δύο καταστάσεων, οι χρόνοι αντήχησης παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφορά (από 150ms έως 235ms) για τις συχνοτικές περιοχές των 500Hz, 1K, 2K και 4K, ενώ για τις περιοχές των 125Hz και 250Hz οι διαφορές είναι αισθητά μικρότερες (8ms έως 18ms). Ο όγκος του μεγάλου τμήματος της διαχωρισμένης της αίθουσας είναι περίπου 378m² και βάσει της εξίσωσης $T_{60} = K(0,0118V^{1/3} + 0,1070)$ ο συνιστώμενος χρόνος αντήχησης είναι 0,77s για ομιλία και 0,96s για συμφωνική μουσική. Παρόμοιες μελέτες προτείνουν για αίθουσες διδασκαλίας ιδανικούς χρόνους από 0,7s έως 0,9s, για όγκους αιθουσών 50m² και 4000m² αντίστοιχα [30]. Επιπλέον οι τυπικοί χρόνοι αντήχησης για συμφωνική μουσική είναι αρκετά μεγαλύτεροι. Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, προκύπτει ότι η υπό μελέτη αίθουσα χαρακτηρίζεται από πολύ μικρούς χρόνους αντήχησης για κάθε περίπτωση. Αντίθετα οι τιμές των D50 και C80 βρέθηκαν ιδιαίτερα υψηλές και κατά πολύ άνω των προτεινόμενων.

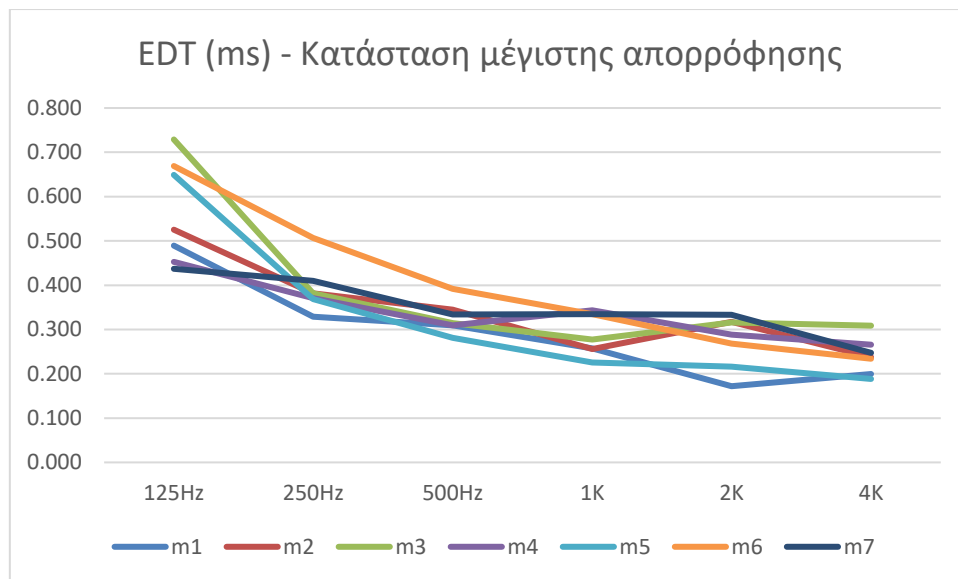
Σε μια διαφορετική θεώρηση των αποτελεσμάτων, συγκρίνοντας τις τιμές των οκτώ μικροφώνων μεταξύ τους (δηλαδή των οκτώ σημείων ακρόασης), μπορεί να διευκολυνθεί ο εντοπισμός της θέσης που παρουσιάζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για την κάθε περίπτωση ηχογράφησης. Παράλληλα μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά η διακύμανση των τιμών μεταξύ των διαφόρων σημείων της αίθουσας και να εντοπιστούν ευκολότερα τα σημεία και οι συχνοτικές περιοχές, για τις οποίες παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιογένεια του ακουστικού πεδίου. Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα γραφήματα για τις παραμέτρους T30, EDT, D50 και C80 για τις καταστάσεις μέγιστης απορρόφησης και μέγιστης ανάκλασης.



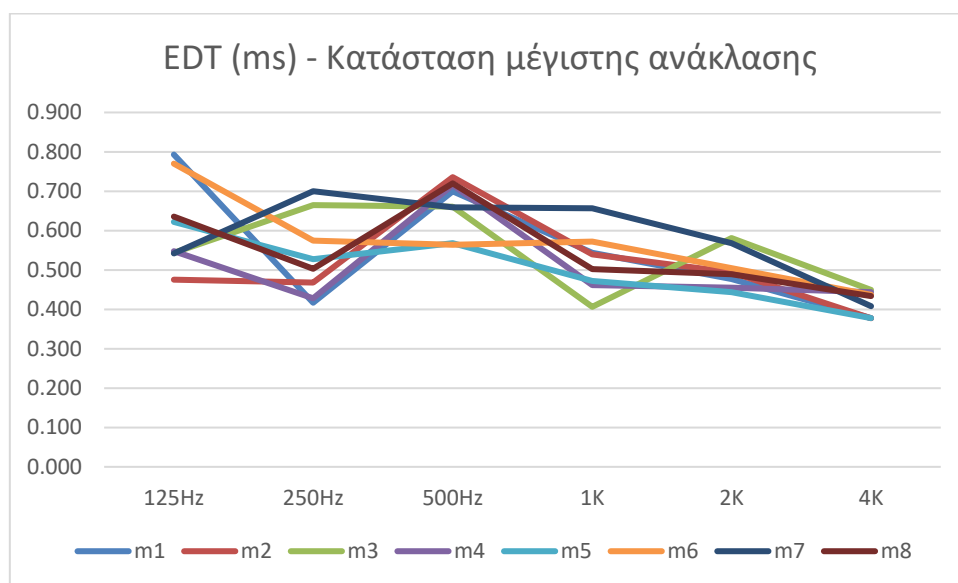
Γράφημα 5 – Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο T30 στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης



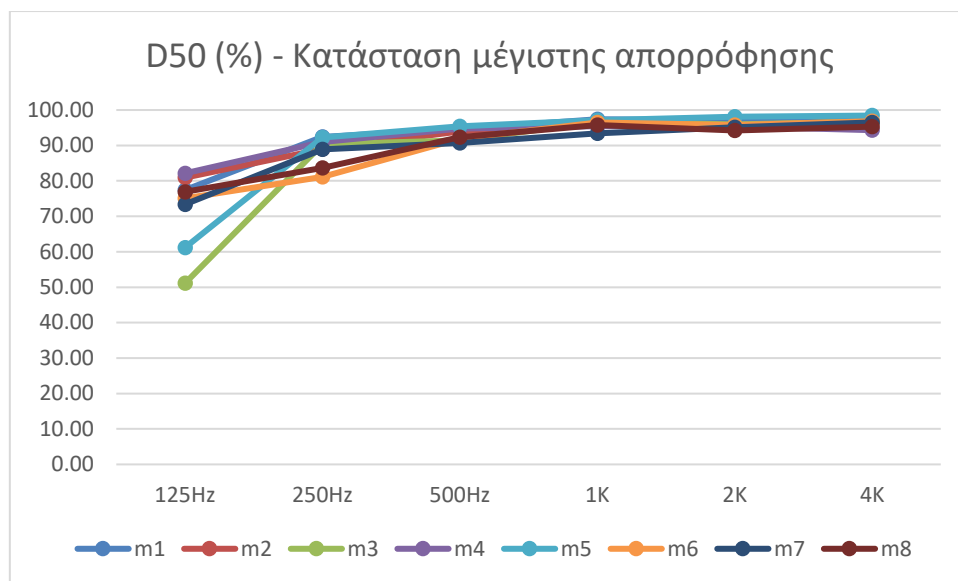
Γράφημα 6 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο T30 στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης



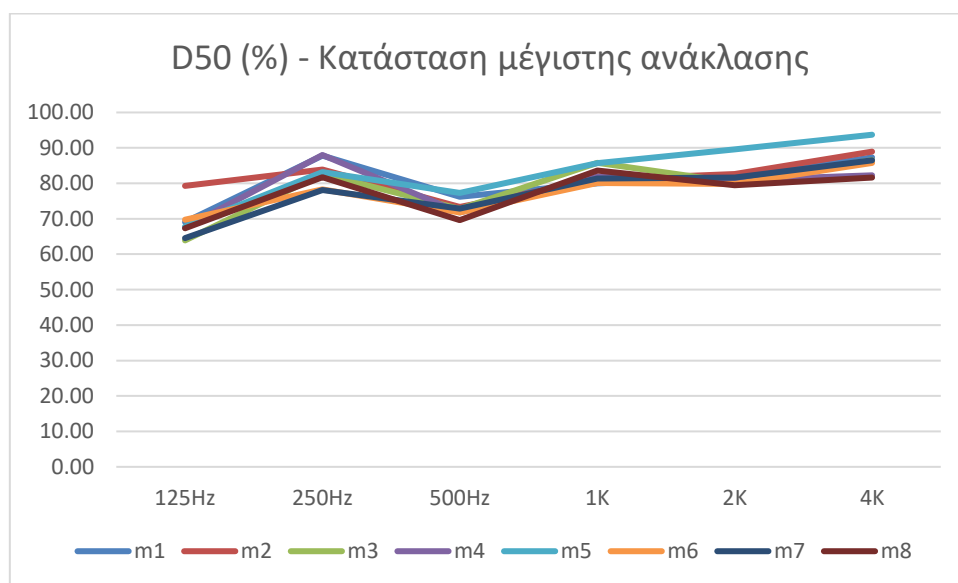
Γράφημα 7 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο EDT στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης



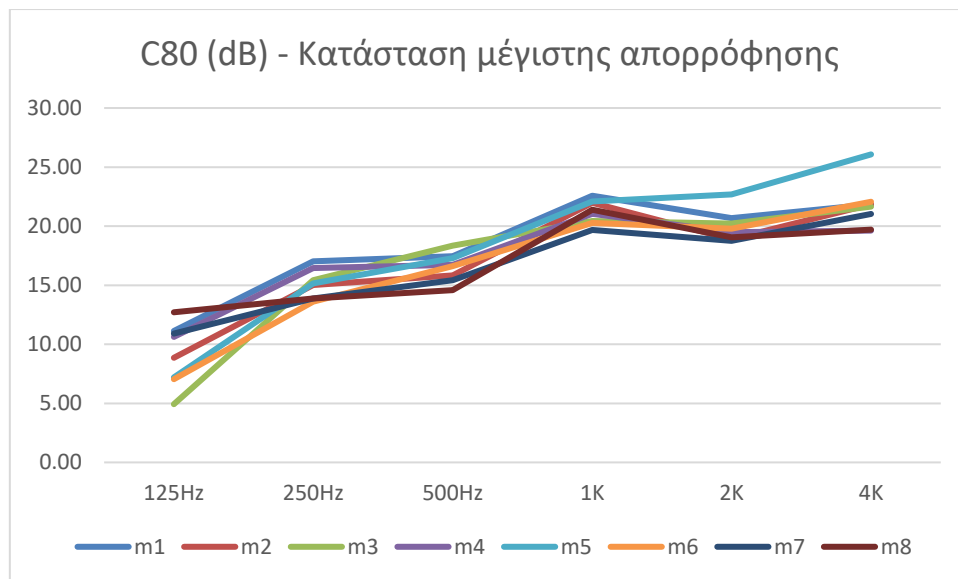
Γράφημα 8 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο EDT στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης



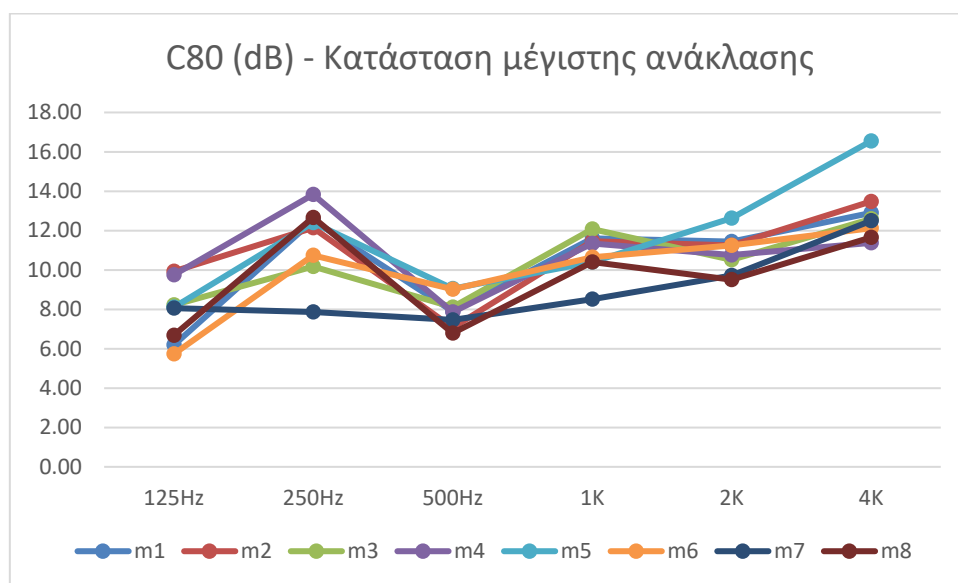
Γράφημα 9 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο D50 στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης



Γράφημα 10 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο D50 στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης



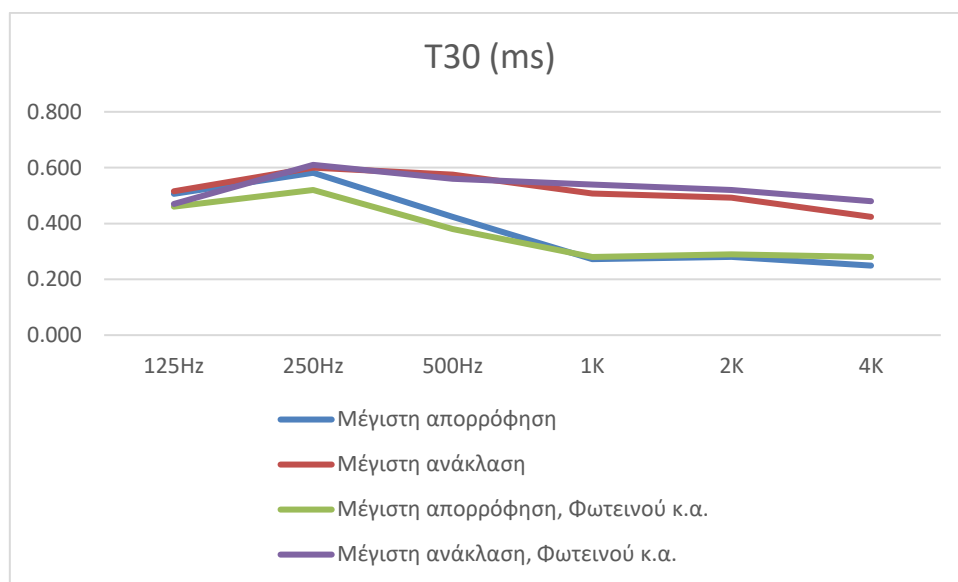
Γράφημα 11 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο C80 στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης



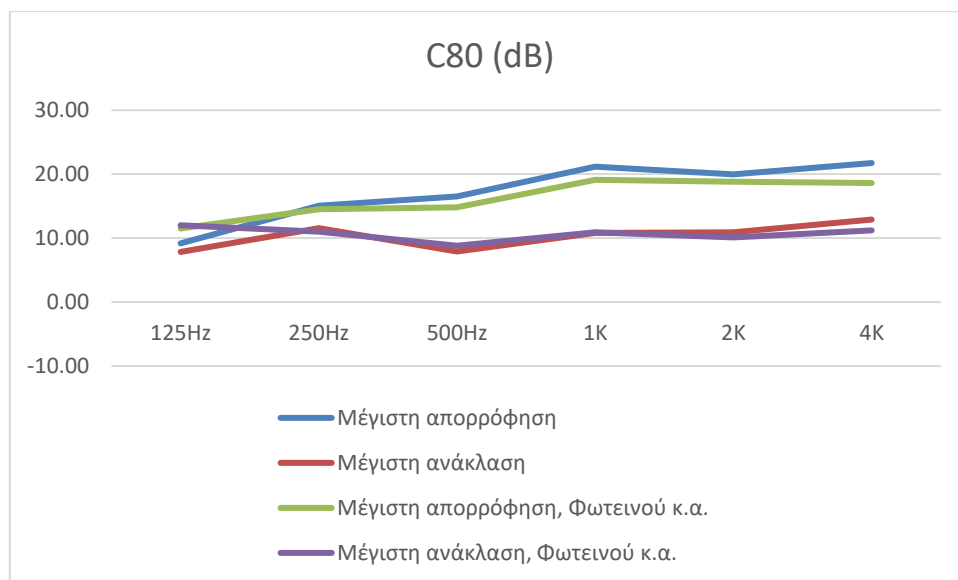
Γράφημα 12 - Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων των οκτώ μικροφώνων, για την παράμετρο C80 στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

Τέλος, αρκετά χρήσιμη μπορεί να αποδειχθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με αυτά των Φωτεινού, Σπυρίδη και Ταβελίδου [25], καθώς και στις δύο μελέτες πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις του μεγάλου τμήματος της αίθουσας, για περισσότερες από δύο ακουστικές καταστάσεις, με παρόμοιο εξοπλισμό, σε παρεμφερή διάταξη και ο υπολογισμός των ακουστικών παραμέτρων έγινε μέσω κρουστικών αποκρίσεων και του λογισμικού Aurora. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των παραμέτρων της μελέτης των Φωτεινού κ.α. υπολογίστηκαν προσεγγιστικά από τα γραφήματα, καθώς στα αποτελέσματα της δεν παρατίθενται αριθμητικές τιμές των παραμέτρων. Επομένως η

σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, προσφέρεται για ποιοτική μεταξύ τους εκτίμηση και όχι για ακριβή ποσοτικό υπολογισμό των διαφορών.



Γράφημα 13 – Σύγκριση των τιμών της παραμέτρου T30, μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και των Φωτεινού κ.α.(2016)



Γράφημα 14 - Σύγκριση των τιμών της παραμέτρου C80, μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και των Φωτεινού κ.α.(2016)

Παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μελετών, για τις παραμέτρους T30 και C80 και για τις δύο ακουστικές καταστάσεις.

9 Συζήτηση

9.1 Τεχνικά ζητήματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα των προηγούμενων ακουστικών μελετών, διαπιστώνεται σύγκλιση με τα αποτελέσματα των Ταβελίδου, Φωτεινού και Σπυρίδη (2016) [25], ενισχύοντας την εγκυρότητα τους. Τα αποτελέσματα αυτών, όπως και της παρούσας μελέτης, αποκλίνουν σημαντικά από τις προβλέψεις της ETA Ακουστικής. Ο υπολογισμός των χρόνων αντήχησης από την ETA Ακουστική, έγινε βάσει των εξισώσεων Sabine και Eyring, οι οποίες εξαρτώνται από το εμβαδό και τον συντελεστή απορρόφησης της κάθε επιφάνειας. Η σημαντική αυτή απόκλιση οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα σε ανακριβείς συντελεστές απορρόφησης. Επίσης, υπάρχει ασάφεια ως προς το ποιες επιφάνειες εννοούνται από τις ονομασίες που δίνονται από την εταιρία, ενώ οι μεταβολές εμβαδού μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων καταστάσεων δεν δείχνουν με σαφήνεια ποιες από αυτές αντιστοιχούν στο ανακλαστικό και στο απορροφητικό πάνελ. Εάν υποθεθεί ότι, κατά την ETA, η επιφάνεια που ονομάζεται «τοίχοι ανακλαστικοί» είναι οι ανακλαστικές πλευρές των πάνελ, ο ισχυρισμός των ανακριβών συντελεστών ενισχύεται περαιτέρω, καθώς οι συντελεστές που παρέχονται είναι (15 9 8 5 5 5) για τις συχνοτικές περιοχές 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1K, 2K, και 4K, ενώ οι αντίστοιχες για επιφάνεια σκληρού τσιμέντου είναι (2 3 3 4 7 7) [13]. Συγκρίνοντας τα δύο υλικά, δεν μπορεί να θεωρηθούν ως αποδεκτές οι σχεδόν ίσες τιμές για το σκληρό τσιμέντο και για μια επιφάνεια η οποία καλύπτεται με ύφασμα, είναι λιγότερο συμπαγής, περιέχει απορροφητικό υλικό και στηρίζεται στην μια της μόνο πλευρά, όπως το ανακλαστικό πάνελ. Πιθανά να αποδειχτεί χρήσιμη μια μελλοντική έρευνα με στόχο τον σαφέστερο προσδιορισμό των συντελεστών απορρόφησης των επιφανειών των διαφόρων υλικών εντός της αίθουσας. Υπάρχουν πλήθος σχετικών τεχνικών και μεθόδων οι οποίες φαίνεται να εξελίσσονται διαρκώς τα τελευταία χρόνια [26, 27, 28] κ.α.

Η αδυναμία βαθμονόμησης του μοντέλου στην περιοχή των 125Hz, με συντελεστές οι οποίοι να ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικές επιφάνειες, εγείρει ερωτήματα σχετικά με την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των ακουστικών μετρήσεων, για αυτή την συχνοτική περιοχή. Ως πιθανό αίτιο αυτού του φαινομένου αναφέρθηκε προηγουμένως το γεγονός ότι το κάτω όριο αναπαραγωγής του πανκατευθυντικού μεγαφώνου Bruel & Kzaer 4296 είναι τα 100Hz. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το Bruel & Kzaer 4292-L, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τις μετρήσεις των Ταβελίδου, Φωτεινού και Σπυρίδη, επομένως αν ο ισχυρισμός αυτός ευσταθεί, τίθεται εν αμφιβόλω η αξιοπιστία των μετρήσεων στην περιοχή των 125Hz και για αυτή την μελέτη. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τα επίσημα γραφήματα συχνοτικής απόκρισης και των δύο μεγαφώνων [31, 32], οι περιοχές έως και τα 100Hz αναπαράγονται ικανοποιητικά. Εναλλακτικά, τα αίτια πρέπει να αναζητηθούν σε άλλους παράγοντες. Στα έγγραφα της ETA Ακουστικής γίνεται αναφορά σε επιφάνεια «απορροφητή χαμηλών συχνοτήτων», εμβαδού 45m², σταθερού κατά τις εκτιμήσεις μέγιστου και ελάχιστου χρόνου αντήχησης, η εισαγωγή της οποίας πιθανά αρκεί για να επιτρέψει τη βαθμονόμηση του μοντέλου με ρεαλιστικούς συντελεστές και να εξηγήσει τον μικρό χρόνο αντήχησης στα 125Hz. Η οπτική όμως παρατήρηση της αίθουσας δεν ήταν αρκετή για να εντοπίσει τη θέση της, ή να επιβεβαιώσει την ύπαρξη της, γεγονός μη αναμενόμενο για μια

τόσο μεγάλη επιφάνεια. Διατάξεις ακουστικού σχεδιασμού οι οποίες να παρουσιάζουν υψηλότερους συντελεστές απορρόφησης για τις χαμηλές συχνότητες από ότι για τις υψηλές, υπάρχουν και είναι συνήθως επιτοίχιες διάτρητες ανακλαστικές επιφάνειες γύρω από παχιά στρώματα απορροφητικών υλικών, ή μαλακά πορώδη υλικά συνήθως τοποθετημένα στις γωνίες των δωματίων (μπασοπαγίδες). Τέτοιες διατάξεις επίσης δεν εντοπίστηκαν εντός της αίθουσας. Επομένως, παραμένει αβέβαιο το που οφείλεται το συγκεκριμένο φαινόμενο και η μελλοντική έρευνα γύρω από αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη περιγραφή και κατανόηση της ακουστικής της αίθουσας, όπως και σε ψηφιακό μοντέλο μεγαλύτερου συχνοτικού εύρους.

Κατά τον προσδιορισμό της διακύμανσης των τιμών των ακουστικών παραμέτρων μεταξύ των 8 μικροφώνων, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5 και τα γραφήματα 5 έως 12, διαπιστώθηκε σημαντική απόκλιση, της τάξης της ελάχιστης παρατηρήσιμης διαφοράς (JND) και σε κάποιες περιπτώσεις αρκετά μεγαλύτερη. Το χαρακτηριστικό αυτό της αίθουσας παρατηρήθηκε επίσης στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ψηφιακού μοντέλου. Το κατά πόσο η ακουστική αυτή συμπεριφορά της αίθουσας επηρεάζει το αποτέλεσμα της ηχογράφησης θα πρέπει να αξιολογηθεί αναλυτικότερα σε σχετική μελλοντική μελέτη. Αναμφισβήτητα όμως, η μη ομοιογενής ακουστική συμπεριφορά δεν ενδείκνυται κατά την στερεοφωνική ηχογράφηση [24], τουλάχιστον για διατάξεις απομακρυσμένων μεταξύ τους μικροφώνων. Επίσης, η επίδραση του χώρου στο ηχογραφούμενο σήμα εξαρτάται από την αναλογία του απευθείας σήματος προς το σήμα αντήχησης, η οποία με την σειρά της ελαττώνεται όσο η απόσταση πηγής και δέκτη αυξάνεται. Συνεπώς, κατά την στερεοφωνική ηχογράφηση, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των μικροφώνων και όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των μικροφώνων από την πηγή, τόσο εντονότερα αποτυπώνεται η ανομοιογένεια του ηχητικού πεδίου στο ηχογραφούμενο σήμα. Ταυτόχρονα όμως, η ανομοιογένεια αυτή μπορεί να μην είναι υποχρεωτικά ανεπιθύμητη. Πιθανά να αποτυπώνεται μέσω της ακουστικής παραμέτρου Interaural Cross Correlation Coefficient (ισοδύναμο διωτικής συσχέτισης) IACC, η οποία υπολογίζει την διαφορά μεταξύ του ήχου που φτάνει στο δεξί και αριστερό αυτί του ακροατή και θεωρείται ως μέτρο της «χωρικότητας» ή του εύρους της πηγής. Παίρνει τιμές από 0 έως 1, και για αίθουσες συναυλιών με θεωρούμενη καλή ακουστική, η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 0,72 [30]. Επομένως, η διαφοροποίηση της ακουστικής απόκρισης μεταξύ δύο κοντινών σημείων της αίθουσας, πιθανά να προσδίδει στο ηχογραφούμενο σήμα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ο μελλοντικός υπολογισμός της παραμέτρου IACC για διάφορα σημεία της αίθουσας, αναμένεται να αποδειχθεί αρκετά επικερδής, ιδιαίτερα αν συσχετιστεί με τις περιοχές του χώρου για τις οποίες διαπιστώθηκε απόκλιση μεταξύ των παραμέτρων τους. Η χρήση στερεοφωνικών τεχνικών ηχογράφησης είναι αρκετά συνήθης για μουσικά σύνολα και η δυνατότητα του τεχνικού ήχου να εξασφαλίσει μια ικανοποιητική τιμή της IACC, μπορεί να προσδώσει στο ηχητικό υλικό την αίσθηση της χωρικής διάστασης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να επιλεγούν μικρότερες αναλογίες σήματος τεχνητής αντήχησης, καταλήγοντας σε ένα καθαρότερο ηχητικό αποτέλεσμα, με την ίδια όμως χωρική ευρύτητα.

Ο χρόνος αντήχησης, όπως προκύπτει από την ανάλυση των ακουστικών μετρήσεων, βρέθηκε αρκετά χαμηλός για τις περισσότερες ακουστικές εφαρμογές. Ακόμα και στην κατάσταση μέγιστης ανάκλασης, η απόκριση του χώρου δεν μπορεί να εκληφθεί ως μακρά αντήχηση, αλλά ως πρώιμες ανακλάσεις. Η πρακτική ερμηνεία αυτού είναι ότι στις

περισσότερες των περιπτώσεων, στο υλικό που ηχογραφείται θα χρειαστεί να προστεθεί τεχνητή αντήχηση. Συνεπώς η όποια διαμόρφωση της διάταξης των πάνελ ή της θέσης της πηγής και δέκτη, θα πρέπει να γίνεται έχοντας υπόψη ότι θα επηρεάσει τις πρώιμες ανακλάσεις, οι οποίες όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως έχουν την ιδιότητα να εκλαμβάνονται ως μέρος του απ' ευθείας σήματος, αυξάνοντας την ακουστότητα του. Οι διαστάσεις τις αίθουσας είναι τέτοιες που σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να μιμηθούν την ακουστική συμπεριφορά μιας αίθουσας συναυλιών. Πιθανά όμως η χρήση ολόκληρης της αίθουσας και όχι ενός μόνο τμήματος της να μπορεί να βελτιώσει την απόκριση της για κάποια τουλάχιστον είδη μουσικής. Σε αυτό μπορεί επίσης να συνεισφέρει η προσθήκη πτυσσόμενων ανακλαστικών ή και διαχυτικών επιφανειών πάνω από κάποιες απορροφητικές επιφάνειες, αυξάνοντας επιπλέον τον χρόνο αντήχησης και την ομοιογένεια του ηχητικού πεδίου. Επιπλέον, οι μεγάλες αίθουσες είναι συνήθως περισσότερο ουδέτερες από τις μικρές. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τρόποι συντονισμού της αίθουσας κατανέμονται πιο ομοιόμορφα στο φάσμα, ενώ στις μικρότερες αίθουσες η ανομοιομορφία της κατανομής τους δημιουργεί συγκεντρώσεις ενέργειας οι οποίες είναι δυνατόν να ακουστούν. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι μια αίθουσα τόσο καθυστερεί η άφιξη των ανακλάσεων, με αποτέλεσμα ο απευθείας ήχος να παραμένει αυτούσιος για περισσότερο χρόνο, επιτρέποντας έτσι την καθαρότερη εντύπωση του στην αντίληψη του ακροατή [20].

Έχοντας πλέον διαθέσιμο το εικονικό μοντέλο του στούντιο, προκύπτει το ερώτημα του πώς μπορεί να αξιοποιηθεί. «Τα λογισμικά γεωμετρικής ακουστικής συνήθως εξυπηρετούν καλύτερα τον ακουστικό σχεδιασμό, κατά τα αρχικά του στάδια, όταν δηλαδή λαμβάνονται αποφάσεις για τη μαζική κατανομή των απορροφητικών και διαχυτικών επιφανειών. Η χρήση τους για πολύ λεπτομερείς υπολογισμούς μπορεί να οδηγήσει σε μυωπική εκτίμηση του ακουστικού αποτελέσματος και είναι επικίνδυνο όταν ο χρήστης υπερεκτιμά την ακρίβεια τους» [12]. Η παραπάνω φράση είναι ενδεικτική του πώς μπορεί να αξιοποιηθεί μελλοντικά το εικονικό μοντέλο της παρούσας μελέτης, ιδιαίτερα λόγω του ότι ανήκει στον δημιουργό του CATT Acoustic. Η χρήση του μοντέλου για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων, καλό θα ήταν να κατευθύνεται από ερευνητικές υποθέσεις, ή εμπειρικές παρατηρήσεις των χρηστών της αίθουσας. Αν κατά την εισαγωγή των αρχικών συνθηκών (κατάσταση των πάνελ, θέσεις πηγών, θέσεις δεκτών, κατευθυντικότητα όλων) δεν είναι σαφής ο ερευνητικός στόχος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν θα μπορούν να οδηγήσουν σε αξιοποιήσιμα συμπεράσματα. Εφόσον η αίθουσα χρησιμοποιείται τακτικά για ηχογραφήσεις, είναι αναμενόμενο οι χρήστες της να έχουν διαμορφώσει εμπειρική εικόνα για την ακουστική διάφορων σημείων του χώρου, σε συνδυασμό με συγκεκριμένες καταστάσεις των πάνελ, για συγκεκριμένες ηχητικές πηγές, τεχνικές ηχογράφησης κ.ο.κ. Η συγκέντρωση αυτών των εμπειρικών παρατηρήσεων, μπορεί να αποτελέσει την αρχή μιας σειράς μελετών, με στόχο την αποσαφήνισή τους. Η διαδικασία μπορεί να κατευθύνεται από τα αποτελέσματα του εικονικού μοντέλου και οι τελικές προσεγγίσεις να πραγματοποιούνται βάσει ακουστικών μετρήσεων. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών, μπορούν να συνδράμουν στην αποτελεσματικότερη χρήση των υποδομών του στούντιο, εξασφαλίζοντας υψηλότερα επίπεδα ηχογράφησης, αλλά και σε αξιολογικά ερευνητικά συμπεράσματα. Δεδομένου ότι η αίθουσα βρίσκεται εντός του Πανεπιστημιακού χώρου, όλες οι πιθανές μελλοντικές μελέτες μπορούν να συνδυαστούν με την εκπαιδευτική διαδικασία, για παράδειγμα αξιοποιώντας τις ως μελέτες περίπτωσης (case studies). Καθώς επίσης,

πρόκειται για μία αίθουσα μεταβλητής ακουστικής, μία πιθανή δυνατότητα αξιοποίησης του μοντέλου, της αίθουσας ή και του συνδυασμού τους, είναι η χρήση τους για έρευνες που άπτονται της ακουστικής, χωρίς το αντικείμενο μελέτης να είναι η ίδια η αίθουσα ή η χρήση της.

9.2 Καλλιτεχνικές προεκτάσεις

Η ερμηνεία και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του ψηφιακού μοντέλου δεν μπορεί να μην λαμβάνει υπόψη τις ανάγκες και τις συνθήκες υπό τις οποίες πρόκειται να πραγματοποιηθεί η κάθε ηχογράφηση. Οι απαιτήσεις από την ακουστική της αίθουσας ηχογραφήσεων διαφέρουν ανάλογα με το είδος μουσικής, το ηχογραφούμενο σχήμα, το πλήθος των εκτελεστών, το αν ο εκτελεστής ακούει απευθείας ή μέσω ακουστικών, ακόμα και από την ιδιοσυγκρασία του.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο χρόνος αντήχησης, όπως προκύπτει από την ανάλυση των ακουστικών μετρήσεων, κυμαίνεται μεταξύ 0,424ms και 0,600ms για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης και μεταξύ 0,249ms και 0,582ms για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης. Η ακουστική αυτή συνθήκη αποτελεί ανοικείο περιβάλλον για τους μουσικούς μιας συμφωνικής ορχήστρας, με αναμενόμενες επιπτώσεις στην καλλιτεχνική τους απόδοση. Στις περιπτώσεις αυτές, η χρήση ολόκληρης της αίθουσας με τα περισσότερα πάνελ στην ανακλαστική τους κατάσταση είναι μάλλον αναγκαία για την διευκόλυνση των μουσικών, ενώ στο ηχητικό υλικό της ηχογράφησης πιθανά θα εξακολουθεί να χρειάζεται προσθήκη τεχνητής αντήχησης. Η ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας παραπέμπει σε αυτή των πρώτων δωματίων ηχογράφησης, τα οποία ήταν όσο το δυνατόν πιο απορροφητικά, προσέγγιση η οποία σύντομα απορρίφθηκε ως ακατάλληλη [24]. Σε αντίθεση με αυτή την λανθασμένη αρχική αντίληψη περί ακεραιότητας του ηχογραφούμενου ήχου, ο «αληθινός» ήχος ενός μουσικού οργάνου δεν είναι απλά αυτός που το όργανο θα παρήγαγε εντός ενός ανηχώικου θαλάμου. Τα μουσικά όργανα αναπτύχθηκαν σε συνθήκες με αντήχηση περιβάλλοντος, και όπως όλες οι ηχητικές πηγές, είναι εντυπωμένα στον ανθρώπινο εγκέφαλο σε συνδυασμό με την αντήχηση των χώρων όπου συνήθως ακούγονται. Κατά συνέπεια όταν ακούγονται μαζί με την κατάλληλη αντήχηση, γίνονται ευκολότερα αντιληπτά [20]. Για τον λόγο αυτό, η ηχογράφηση στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης πιθανά να πρέπει να αποφεύγεται, τουλάχιστον για τα συνήθη μουσικά όργανα. Η αντήχηση του ηχογραφούμενου ήχου, είτε διαμορφώνεται από την ακουστική της αίθουσας, είτε προστίθεται τεχνητά κατά την μετέπειτα επεξεργασία, πρέπει αναπόφευκτα να εκτιμάται υποκειμενικά και πάντα σε συνδυασμό με το εκάστοτε μουσικό όργανο και στυλ.

Οι απαιτήσεις των μουσικών από την αίθουσα κατά την ηχογράφηση, εφόσον δεν γίνεται χρήση ακουστικών, είναι οι ίδιες με αυτές του περιβάλλοντος στο οποίο έχουν συνηθίσει να εκτελούν, δηλαδή της αίθουσας συναυλιών. «Οι ανακλάσεις του χώρου είναι αναγκαίες, καθώς συχνά δεν επαρκούν μόνο αυτές του οργάνου ώστε να δοθεί στον εκτελεστή η απαιτούμενη αίσθηση για την καλύτερη απόδοση του. Τα σύνολα εγχόρδων είναι απαραίτητο να ακούν το σύνολο τους και όχι ένα άθροισμα μεμονωμένων οργάνων. Ακούγοντας το σύνολο μπορούν να παίξουν ως σύνολο, ενώ ακούγοντας μεμονωμένα η εκτέλεση τους συχνά αδυνατεί να ενταχθεί σε ένα ομοιογενές αποτέλεσμα. Οι πνευστοί φαίνεται να βοηθούνται κατά την εκτέλεση από την ύπαρξη επαρκούς αντήχησης, ιδιαίτερα

οι φλαουτίστες» [20]. Παρόμοια επίδραση της ακουστικής στην καλλιτεχνική ερμηνεία αναμένεται για όλο το φάσμα των μουσικών οργάνων και ειδών, παρ' όλο που η πλειοψηφία της σχετικής βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στα όργανα της συμφωνικής ορχήστρας. Επομένως, κατά την διεξαγωγή της ηχογράφησης είναι εξαιρετικά σημαντικό να διαμορφώνεται η ακουστική που βοηθά περισσότερο τον εκτελεστή να αποδώσει στο μέγιστο των ερμηνευτικών του δυνατοτήτων.

10 Επίλογος

Η μελέτη του ακουστικού φαινομένου, σε περιπτώσεις όπως αυτή της αίθουσας ηχογράφησης του στούντιο LabMAT, είναι πρωτίστως αναγκαία κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του χώρου. Αν η αίθουσα κατασκευαζόταν σήμερα, τα σύγχρονα μέσα πρόβλεψης και αρχιτεκτονικής ακουστικής, όπως και τα πιο εξελιγμένα πλέον υλικά ακουστικής διαμόρφωσης, πιθανά να συντελούσαν στη δημιουργία ενός πιο ευέλικτου χώρου. Έπειτα από την ολοκλήρωση της κατασκευής ενός χώρου, ο ρόλος της ακουστικής μπορεί να είναι επικουρικός, προτείνοντας λύσεις και υποδεικνύοντας εναλλακτικές, οι οποίες όμως θα πρέπει κάθε φορά να αξιολογούνται από του χρήστες με υποκειμενικά κριτήρια. «Το γεγονός ότι παρ' όλη την εκτεταμένη έρευνα γύρω από την ακουστική, δεν έχουν διαμορφωθεί μέχρι σήμερα ακριβείς τιμές των ακουστικών παραμέτρων, για την βέλτιστη ακουστική απόκριση ενός χώρου συναυλιών ή μιας αίθουσας ηχογραφήσεων, σημαίνει πιθανά ότι αυτές απλά δεν υπάρχουν. Η όποια εκτίμηση της ακουστικής εξαρτάται έντονα από υποκειμενικά και αισθητικά κριτήρια» [20].

Κατά την διάρκεια δε, της ηχογράφησης, η ποιοτική έστω, αντίληψη της ακουστικής προφανώς καθιστά τον εκάστοτε τεχνικό ήχου αποτελεσματικότερο, εφόσον όμως διαθέτει ταυτόχρονα την απαραίτητη καλλιτεχνική ευαισθησία ώστε να αντιληφθεί τις απαιτήσεις των δημιουργών και να χρησιμοποιήσει την ακουστική ως μέσον για να τις εξυπηρετήσει. Η μουσική αποτυπώνεται κατά την ηχογράφηση μαζί με τον χώρο στον οποίο εκτελείται και η ακρόαση της γίνεται μέσω του ενός, κοινού πλέον ήχου. Για τον λόγο αυτό, η αίθουσα εκτέλεσης ή ηχογράφησης αντιμετωπίζεται, ή θα έπρεπε να αντιμετωπίζεται, ως ένα επιπλέον μεγάλο μουσικό όργανο. Αντίστοιχα, κατά την διαμόρφωση των ακουστικών συνθηκών της ηχογράφησης, ο τεχνικός ήχου επεμβαίνει στην τελική δημιουργία με τρόπο ο οποίος έχει σαφείς καλλιτεχνικές προεκτάσεις. Ακόμα και σε έναν θεωρητικό, εξιδανικευμένο χώρο, το καλλιτεχνικό αποτέλεσμα θα περιορίζεται πάντα από την αισθητική αυτού που τον χρησιμοποιεί, ακριβώς όπως η μουσική που μπορεί να παραχθεί από το καλύτερο μουσικό όργανο θα ακούγεται όπως επιτάσσει η αισθητική του εκτελεστή του. Συνεπώς, στο τέλος της ημέρας, το να γνωρίζει κανείς με ακρίβεια την τιμή κάποιας ακουστικής παραμέτρου και το πως μπορεί να την μεταβάλλει είναι πολύ μικρής αξίας, εάν δεν είναι σε θέση να διακρίνει εμπειρικά και να επιλέξει αισθητικά την προτιμότερη μεταξύ διαφόρων ακουστικών συνθηκών. Αυτή δηλαδή που θα προσδώσει στη μουσική δημιουργία κάτι που να υπερβαίνει την τεχνική και να ενισχύει το συναισθηματικό περιεχόμενο το οποίο επιχειρεί να μεταδώσει στον ακροατή.

Η αξία της ακουστικής, της κατανόησης και μελέτης της, ή η σημαντικότητα της εξέλιξης της προφανώς και δεν αμφισβητούνται. Ούτε η πολύτιμη συνδρομή της στον ακουστικό σχεδιασμό και την πρόβλεψη. Χωρίς όμως την καθοδήγηση τους από την καλλιτεχνική αισθητική και την εμπειρική γνώση των εμπλεκόμενων, οδηγεί αναμφισβήτητα σε στείρα αποτελέσματα. Οι κορυφαίοι συναυλιακοί χώροι που διασώζονται από παλαιότερες περιόδους, τα περιζήτητα μουσικά όργανα, ή οι σημαντικότερες ηχογραφήσεις της πιο πρόσφατης περιόδου, δημιουργήθηκαν από ανθρώπους οι οποίοι μπορεί να αγνοούσαν την επιστημονική θεμελίωση των εμπλεκόμενων φυσικών διαδικασιών, σίγουρα όμως διέθεταν

οξεία αισθητική και καλλιτεχνική αντίληψη. Το αντίθετο, δεν έχει συμβεί μέχρι σήμερα. Ο λόγος μπορεί ίσως να περιγραφεί αρκετά εύστοχα από την παρακάτω διάσημη φράση:

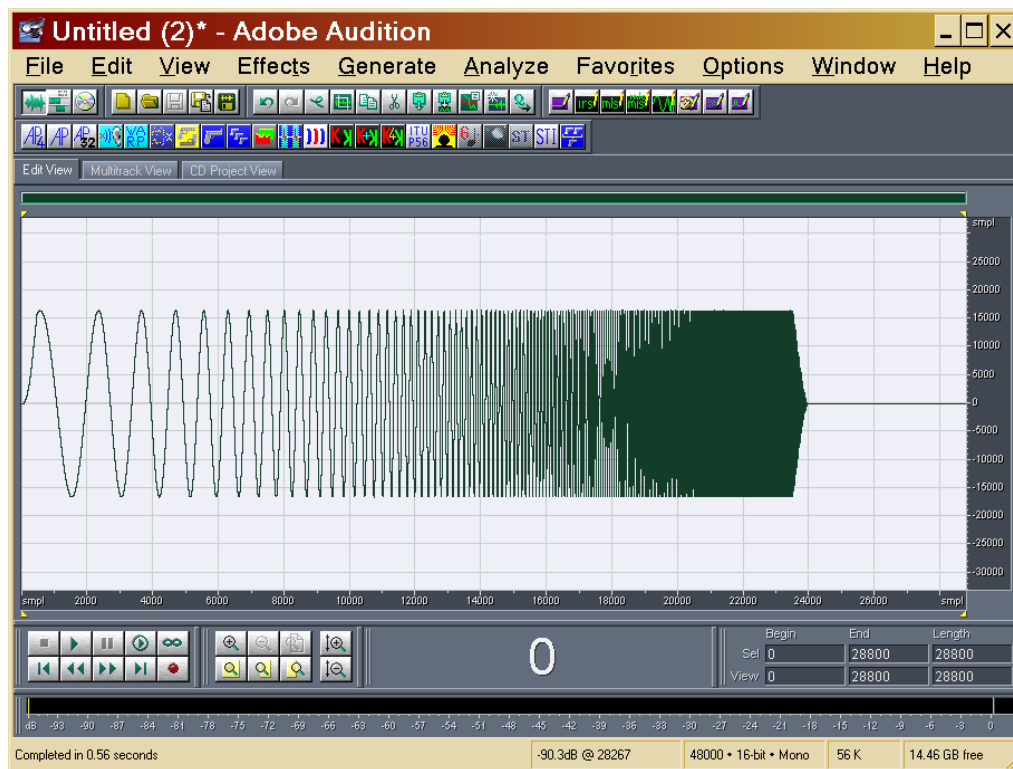
“δεν μετράει το κάθε τι που μπορεί να μετρηθεί,
ούτε το κάθε τι που μπορεί να μετρηθεί μετράει” - Albert Einstein

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Το πακέτο προγραμμάτων Aurora είναι ένα πρόσθετο λογισμικό (plug-in) για το ανοιχτού κώδικα λογισμικό Audacity και για το Audition της εταιρίας Adobe. Μέσω αυτού, η ακουστική απόκριση ενός χώρου μπορεί να μετρηθεί, να υποστεί επεξεργασία και να αναπαραχθεί [1,2]. Από το σύνολο των μονάδων του Aurora, παρακάτω παρουσιάζονται όσες χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των ηχητικών αρχείων κατά την ακουστική μελέτη του στούντιο LabMAT.

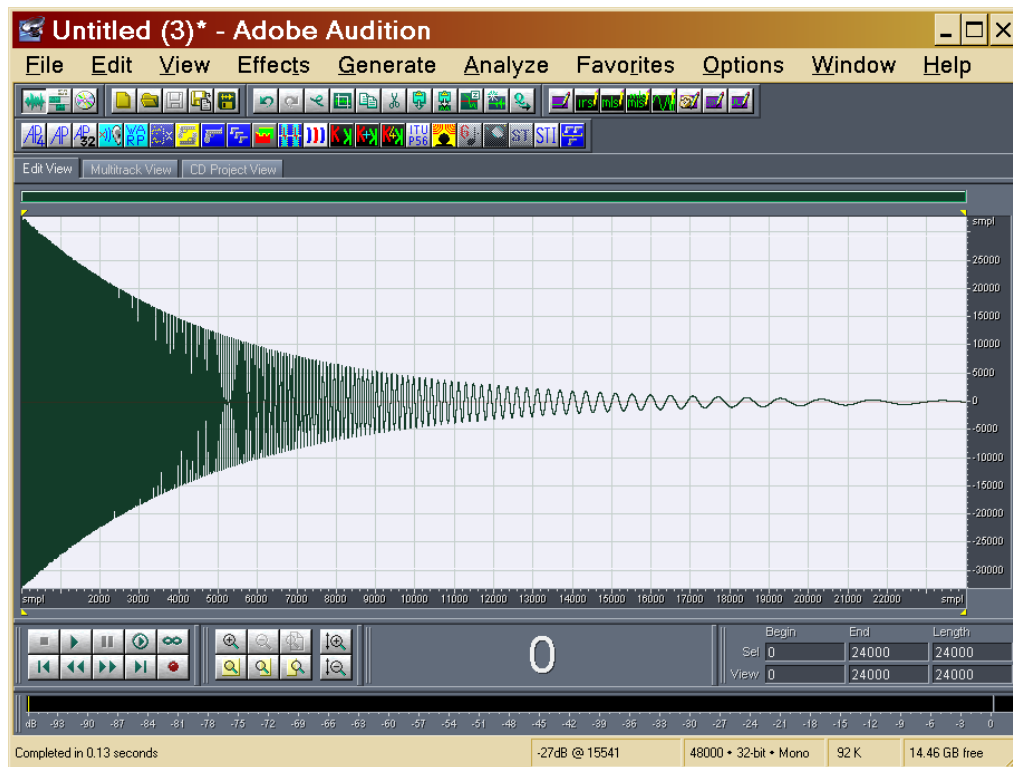
Generate SWEEP Signal (Δημιουργία σήματος σάρωσης)

Αυτή η μονάδα δημιουργεί σήματα ημιτονοειδούς σάρωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται στις ακουστικές δοκιμές και μετρήσεις. Η μονάδα παρέχει την δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών επαναλήψεων του δοκιμαστικού σήματος με προαιρετική εισαγωγή ενδιάμεσης παύσης ανάμεσά τους.



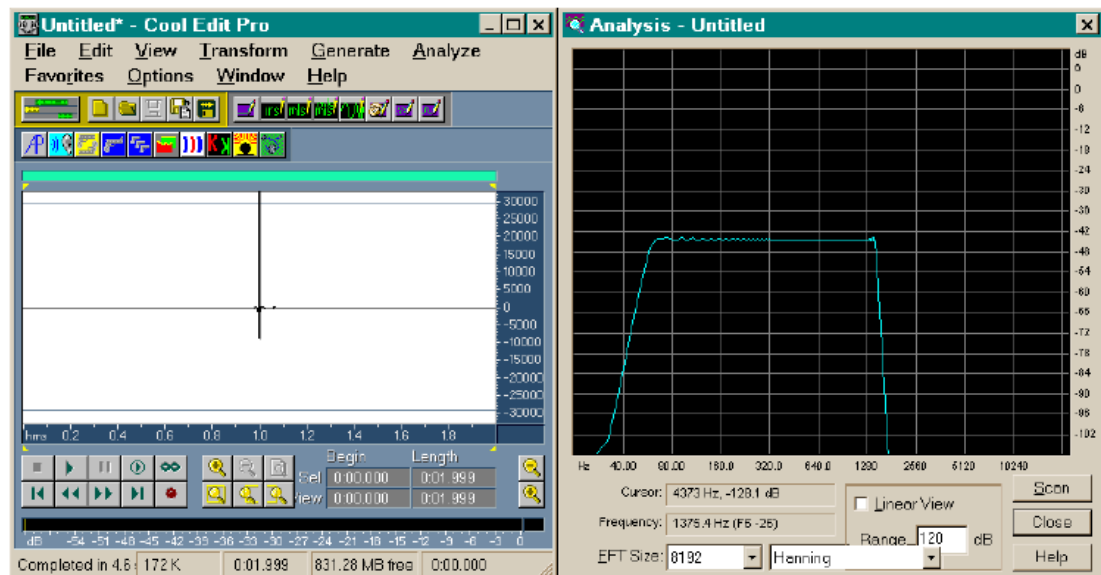
Εικόνα 23 – Κυματομορφή του δοκιμαστικού σήματος εκθετικής σάρωσης ημιτόνου [3]

Κατά την δημιουργία του δοκιμαστικού σήματος, δημιουργείται και το αντίστοιχο αντίστροφο αρχείο, το οποίο αποθηκεύεται στην μνήμη του υπολογιστή:



Εικόνα 24 – Κυματομορφή του αντίστροφου αρχείου του δοκιμαστικού σήματος [3]

Η συνέλιξη του δοκιμαστικού σήματος με το αντίστροφο, έχει ως αποτέλεσμα το σήμα μιας φασματικά περιορισμένης συνάρτησης Dirac:



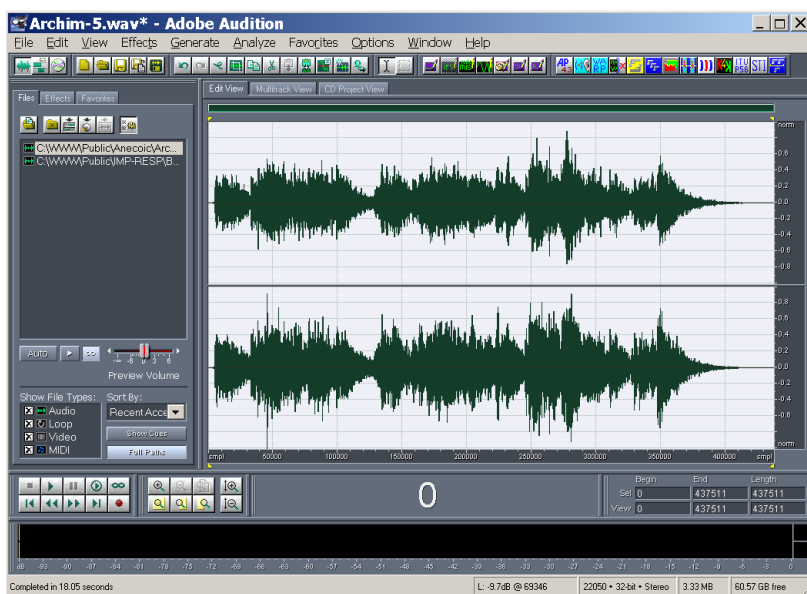
Εικόνα 25 -Κρουστική απόκριση [3]

Συνεπώς για να απομονώσουμε την απόκριση του χώρου από το σήμα της ηχογράφησης, αρκεί να εκτελέσουμε συνέλιξη του σήματος της ηχογράφησης με το αντίστροφο σήμα της ημιτονοειδούς σάρωσης [3].

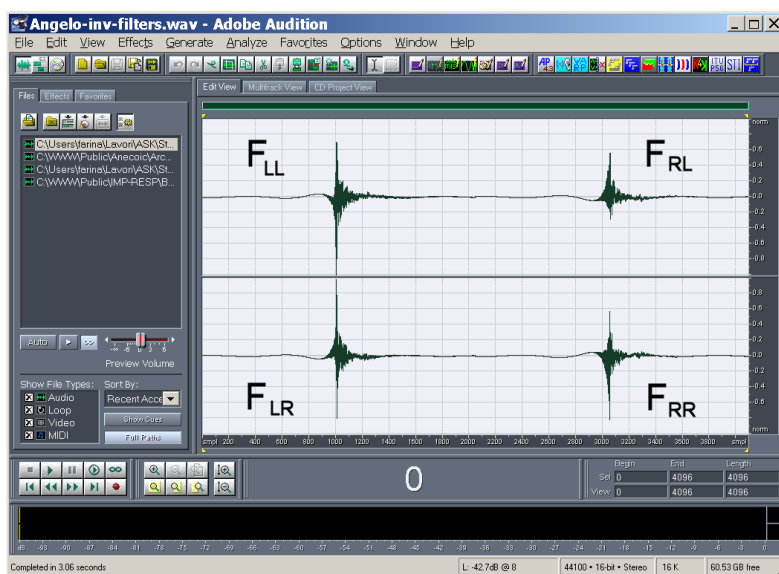
Συνέλιξη με την εσωτερική μνήμη (convolve with clipboard)

Αυτή η μονάδα εκτελεί γραμμική συνέλιξη μεταξύ του αρχείου που επιλέγουμε και του αρχείου το οποίο βρίσκεται στην εσωτερική μνήμη του υπολογιστή. Αυτό μας επιτρέπει να εκτελέσουμε συνέλιξη μεταξύ της ηχογραφημένης απόκρισης του χώρου και του αντίστροφου αρχείου που χρησιμοποιήθηκε κατά την διέγερση, ώστε να προκύψει ένα τελικό αρχείο που θα περιλαμβάνει μόνο την απόκριση του χώρου.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το αρχείο της ηχογράφησης της απόκρισης του χώρου (στο συγκεκριμένο παράδειγμα πρόκειται για στερεοφωνικό αρχείο) και το ηχητικό αρχείο που προκύπτει μετά από την συνέλιξη με το αντίστροφο αρχείο της διέγερσης. Το τελικό αρχείο που προκύπτει και φαίνεται στην δεύτερη εικόνα είναι το αρχείο απόκρισης του χώρου [3].



Εικόνα 26 – Κυματομορφή της ηχογραφημένης απόκρισης του χώρου [3]

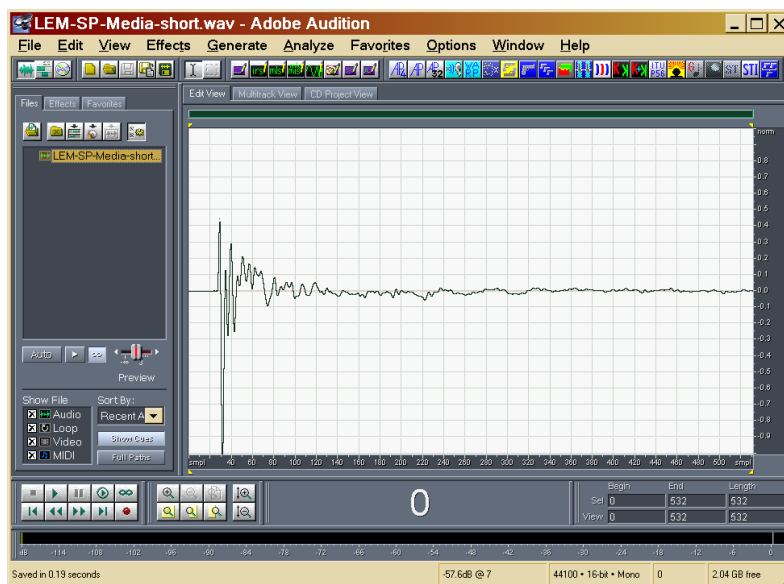


Εικόνα 27 – Η κρουστική απόκριση που προκύπτει από τη συνέλιξη με το αντίστροφο αρχείο [3]

Flatten Spectrum (Εξισορρόπηση φάσματος)

Αυτή η μονάδα δημιουργεί ένα αντίστροφο φίλτρο, βασισμένο σε κάποιο impulse response, αντιστρέφοντας μόνο τα συστατικά ελάχιστης φάσης. Αναλυτικότερα, η ένταση της συνάρτησης μεταφοράς αντιστρέφεται και αν το αντίστροφο φίλτρο εφαρμοστεί στο σήμα του αρχικού impulse response εξισορροπεί πλήρως το φάσμα του. Τα συστατικά που δεν είναι ελάχιστης φάσης παραμένουν μη ανεστραμμένα, καθώς σε αυτά καταγράφεται η αντήχηση. Έτσι το εξισορροπημένο σήμα παρουσιάζει κατάλληλη φασματική απόκριση, έχοντας διατηρήσει τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου.

Συνεπώς, αυτή η μονάδα είναι ιδανική για την δημιουργία ενός φίλτρου ικανού να λάβει υπόψιν και να εξισορροπήσει την μη γραμμική φασματική απόκριση ενός συστήματος. Έστω, για παράδειγμα, ότι ηχογραφείται η απόκριση ενός μεγαφώνου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 28 – Κυματομορφή κρουστικής απόκρισης σε μεγέθυνση [3]

Η φασματική απόκριση φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 29 – Καμπύλη φάσματος της κρουστικής απόκρισης [3]

Η μονάδα εξισορρόπησης φάσματος δημιουργεί το αντίστροφο φίλτρο του οποίου το φάσμα φαίνεται παρακάτω:

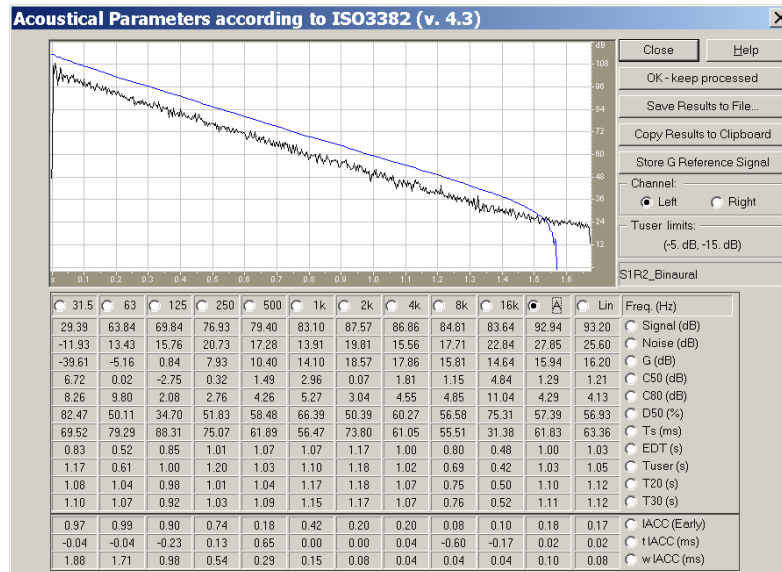


Εικόνα 30 – Καμπύλη φάσματος του φίλτρου εξισορρόπησης φάσματος [3]

Το σήμα του αντίστροφου αρχείου αποτελεί ουσιαστικά το εξισορροπητικό φίλτρο. Η συνέλιξη αυτού με την ηχογραφημένη απόκριση, θα έχει ως αποτέλεσμα την αναίρεση της φασματικής επίδρασης του μεγαφώνου [3].

Ακουστικές παράμετροι (acoustical parameters)

Βάσει της απόκρισης του χώρου (impulse response), αυτή η μονάδα εκτελεί τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων όπως αυτές προσδιορίζονται από το ISO 3382, σε δέκα συχνοτικές περιοχές από 31.5 Hz έως 16 kHz. Οι παράμετροι που υπολογίζονται είναι οι εξής: EDT, T20, T30, Tuser, Clarity C50 and C80, Definition και Center Time. Μετά το πέρας του υπολογισμού, τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε πίνακα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [3].



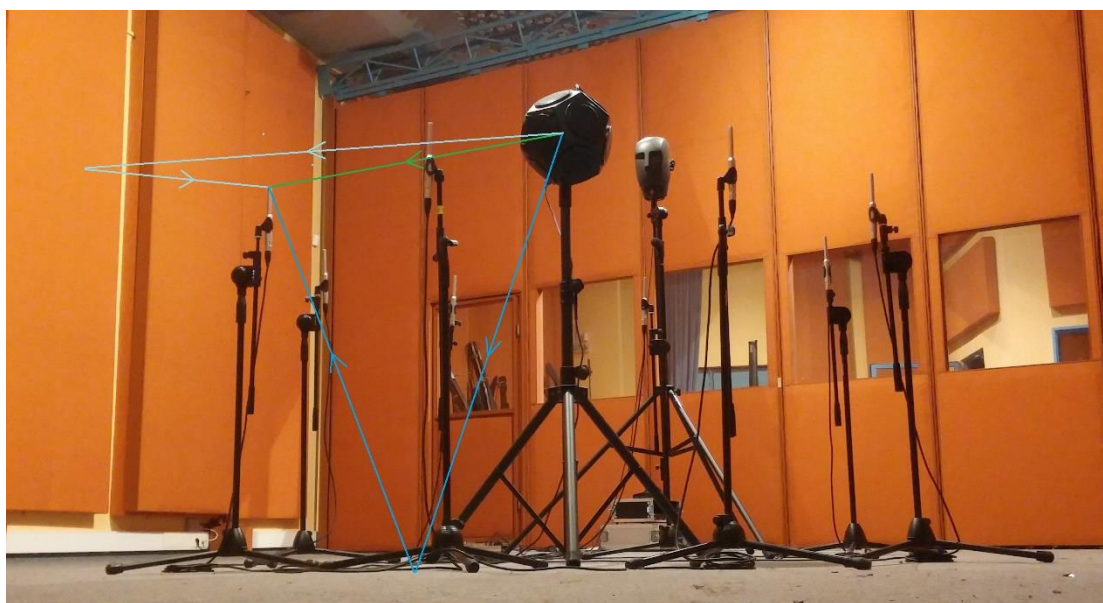
Εικόνα 31 – Πίνακας υπολογισμού ακουστικών παραμέτρων [3]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Επεξεργασία μετρήσεων ισοστάθμισης φάσματος

Κατά την μέτρηση που διεξήχθη με σκοπό την ισοστάθμιση του φάσματος του εξοπλισμού, δημιουργήθηκαν οκτώ αρχεία ήχου, ένα για το κάθε μικρόφωνο. Σε όλα αυτά τα αρχεία εφαρμόστηκε συνέλιξη μέσω του Aurora plugin “convolve with clipboard”, με το ανάστροφο αρχείο σάρωσης (inverse sweep signal), το οποίο είχε δημιουργηθεί μαζί με το αρχείο σάρωσης (sweep signal) μέσω του Aurora plugin “generate sweep signal”. Αποτέλεσμα της συνέλιξης ήταν ο υπολογισμός και η δημιουργία πέντε κρουστικών αποκρίσεων για το κάθε αρχείο, όσες και το πλήθος των σαρώσεων κατά την μέτρηση. Από αυτές, και σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του λογισμικού Aurora [1], απομονώθηκε μόνο η μία, με κριτήριο την υποκειμενική εκτίμηση της καθαρότητας της ηχογράφησης.

Έχοντας πλέον μία κρουστική απόκριση για την κάθε πηγή, μέσω του Audition απομονώθηκαν τα πρώτα 5ms της κάθε απόκρισης, επιδιώκοντας με τον τρόπο αυτό να απορριφθεί η ηχητική πληροφορία που αφορά τις ανακλάσεις από το πάτωμα ή τους τοίχους. Μια περιγραφική αναπαράσταση των ανακλάσεων αυτών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



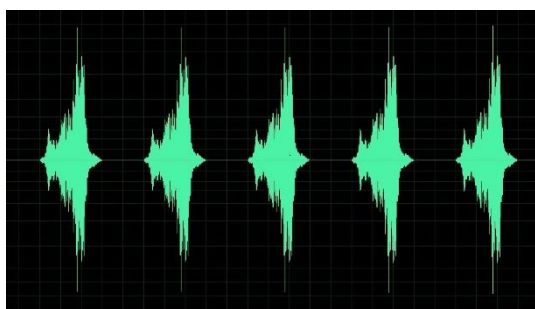
Εικόνα 32 – Υπολογισμός της διαδρομής των πρώτων ανακλάσεων

Με την ταχύτητα του ήχου στα 340m/s, χρειάζονται περίπου 2,9ms ώστε το ηχητικό σήμα να διανύσει διάστημα ενός μέτρου. Αν θεωρήσουμε την απόσταση μεταξύ πηγής και μικροφώνου περίπου ίση με ένα μέτρο (λόγω της πολύ μικρής γωνίας μεταξύ της ευθείας που διέρχεται από τα κέντρα τους και του οριζόντιου επιπέδου), αυτό συνεπάγεται ότι το απ' ευθείας σήμα φτάνει στο μικρόφωνο 2,9ms μετά από την στιγμή της διέγερσης της πηγής. Οι πρώτες ανακλάσεις που θα φτάσουν στο μικρόφωνο είναι αυτές που οφείλονται στο

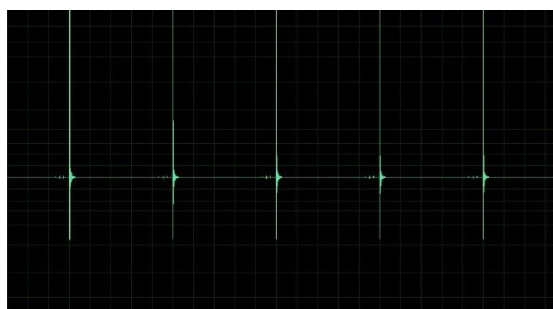
πάτωμα, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Η απόσταση που χρειάζεται να διανύσει το ηχητικό κύμα στην περίπτωση αυτή είναι περίπου 3,2m και ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει στο μικρόφωνο υπολογίζεται στα περίπου 9,3ms. Η επόμενη ανάκλαση θα οφείλεται στους πλαϊνούς τοίχους, για την οποία η κοντινότερη απόσταση υπολογίζεται στα 6,4m και ο απαιτούμενος χρόνος για να διανυθεί στα 18,56ms περίπου. Αυτής της τάξης μεγέθους είναι και ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσουν στο μικρόφωνο και οι ανακλάσεις από την οροφή.

Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, αν το αρχείο της κρουστικής απόκρισης ξεκινά την στιγμή που το ηχητικό κύμα φτάνει στο μικρόφωνο ($t=0$), τότε για $t=6,4\text{ms}$ θα καταγράφεται η ανάκλαση του πατώματος και για $t= 15,66\text{ms}$ η πρώτη ανάκλαση από τον κοντινότερο τοίχο και την οροφή. Λόγω της συμμετρίας στην διάταξη των μικροφώνων γύρω από την πηγή, αναμένουμε τον ίδιο χρόνο άφιξης για τις πρώτες ανακλάσεις από το πάτωμα για όλα τα μικρόφωνα, ενώ για αυτές από τους πλαϊνούς τοίχους ο χρόνος άφιξης θα διαφοροποιείται ανάλογα με την απόσταση του κάθε μικροφώνου από τον κοντινότερο τοίχο.

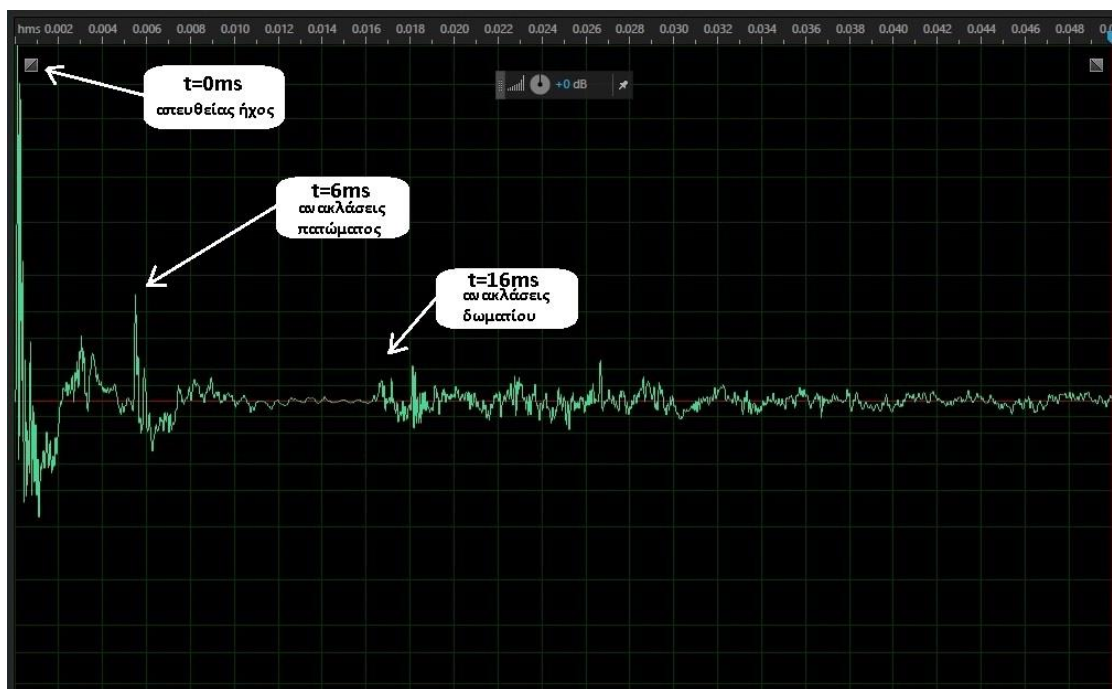
Ο εντοπισμός των χρόνων άφιξης είναι επίσης δυνατόν να πραγματοποιηθεί με παρατήρηση των κυματομορφών του κάθε ηχητικού αρχείου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ηχητικών αρχείων που αντιστοιχούν στο μικρόφωνο 2, κατά την διαδικασία υπολογισμού. Στις δύο πρώτες εικόνες φαίνεται το ηχητικό υλικό των πέντε σαρώσεων και δίπλα οι κρουστικές αποκρίσεις για την κάθε μία. Στην τρίτη εικόνα φαίνονται τα πρώτα 50ms της κρουστικής απόκρισης που επιλέχθηκε ανάμεσα στις πέντε. Σε αυτήν, στην αρχή του αρχείου παρατηρούμε το σχήμα της κυματομορφής του απ' ευθείας ηχητικού κύματος και περίπου 6ms αργότερα ένα όμοιο σε σχήμα αλλά εξασθενημένο σήμα, το οποίο οφείλεται στην ανάκλαση από το πάτωμα. Η άφιξη των ανακλάσεων της αίθουσας μπορεί να παρατηρηθεί για χρόνο από 16ms και μετά.



Εικόνα 33 – Κυματομορφή της απόκρισης του χώρου

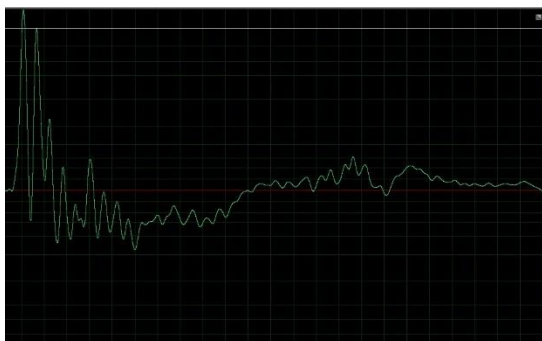


Εικόνα 34 – Οι κρουστικές αποκρίσεις της απόκρισης του χώρου



Εικόνα 35 – Εκτίμηση των χρόνων άφιξης των ανακλάσεων του δαπέδου και της υπόλοιπης αίθουσας με παρατήρηση της κυματομορφής της ακουστικής απόκρισης

Στην επόμενη εικόνα, φαίνεται το αρχείο της κρουστικής απόκρισης διάρκειας 5ms αφού έχουν αφαιρεθεί οι ανακλάσεις και στην τελευταία το φίλτρο εξισορρόπησης του φάσματος όπως προκύπτει από το Aurora plugin “flatten spectrum”.



Εικόνα 37 – Τα πρώτα 5ms της κρουστικής απόκρισης



Εικόνα 36 – Το φίλτρο εξισορρόπησης του φάσματος ως κρουστική απόκριση

Για το σύνολο των 8 μικροφώνων, η χρονική διάρκεια των πρώτων 5ms ήταν αρκετή για να καταγράψει τον απευθείας ήχο, απορρίπτοντας τις ανακλάσεις του δαπέδου, της οροφής και των πλαϊνών τοίχων.

Η χρήση των φίλτρων συχνοτικής εξισορρόπησης δεν είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό όλων των ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας. Αν για παράδειγμα, ο εξοπλισμός

παρουσιάζει μια βύθιση στην απόκριση μιας συγκεκριμένης συχνοτικής περιοχής, ο υπολογισμός των παραμέτρων που ορίζονται ως η διαφορά χρόνου μεταξύ διακριτών τιμών της έντασης του ηχητικού σήματος (RT60, T15, T30, EDT) δεν αναμένεται να επηρεαστεί σημαντικά. Η επίδραση της βύθισης είναι σταθερή συνάρτηση του χρόνου, επομένως τα άκρα του δυναμικού εύρους αλλοιώνονται ισόποσα και ο υπολογισμός του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ αυτών δεν επηρεάζεται. Αντίθετα, παράμετροι οι οποίες υπολογίζονται κατά απόλυτη τιμή (signal, noise, strength), θα αλλοιωθούν ανάλογα με τον βαθμό βύθισης της συγκεκριμένης περιοχής και η σύγκριση τους με τις τιμές των υπολοίπων συχνοτικών περιοχών δεν θα είναι ακριβής.

Η αξία των φίλτρων συχνοτικής εξισορρόπησης, γίνεται προφανής κατά την διαδικασία ακουστικοποίησης μιας αίθουσας, με την χρήση κρουστικών αποκρίσεων οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω ηχογράφησης της απόκρισης της αίθουσας. Κατά την δημιουργία αυτών των ηχητικών αρχείων, είναι σημαντική η αναίρεση τυχόν φασματικών αλλοιώσεων λόγω περιορισμών του εξοπλισμού, ώστε η εμπειρία της ακουστικοποίησης να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στον πραγματικό χώρο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της αίθουσας στο CATT Acoustic γίνεται μέσω κώδικα και περιέχεται στο αρχείο MASTER.GEO. Ο σχεδιασμός βασίζεται στην δήλωση των συντεταγμένων που ορίζουν τις γωνίες των άκρων της κάθε επιφάνειας και την αντιστοίχιση των γωνιών αυτών με τις άκρες των επιφανειών στις οποίες ανήκουν. Το τελικό μοντέλο αποτελείται από το άθροισμα των επιφανειών που έχουν οριστεί. Για την κάθε επιφάνεια, εκτός από τη θέση της στον χώρο, δίνεται όνομα και περιγραφή του υλικού που την αποτελεί. Για το κάθε υλικό, στην αρχή του κώδικα εισάγεται ως σταθερά ο συντελεστής απορρόφησης ανά συχνοτική περιοχή, όπως και το ισοδύναμο διάχυσης το οποίο όμως είναι προαιρετικό. Έτσι, αν θέλουμε να προσομοιώσουμε μια διαφορετική κατάσταση των πάνελ, αρκεί να δημιουργήσουμε μια εναλλακτική μορφή του ίδιου ψηφιακού αρχείου και να αλλάξουμε την περιγραφή του υλικού των επιφανειών που αντιστοιχούν στα πάνελ που επιθυμούμε.

Τα υλικά που δηλώθηκαν για την περιγραφή των επιφανειών του μοντέλου είναι η μοκέτα του δαπέδου, το μέταλλο της πόρτας εισόδου, το γυαλί των δύο παραθύρων, η κουρτίνα που καλύπτει το παράθυρο της πλευράς AE, το τσιμέντο για τις ακάλυπτες επιφάνειες, το απορροφητικό υλικό των τοίχων, το ανακλαστικό περιστρεφόμενο πάνελ, το απορροφητικό περιστρεφόμενο πάνελ, το απορροφητικό πάνελ της οροφής και ο διαχυτής της οροφής. Σε κάθε ένα από αυτά, ορίστηκαν οι συντελεστές απόσβεσης για έξι οκτάβες (125Hz, 250Hz, 500Hz, 1K, 2K, 4K), όπως αναφέρονται στην μελέτη της κατασκευάστριας εταιρίας, ενώ λήφθηκαν υπόψη και οι συντελεστές διαφόρων υλικών όπως παρουσιάζονται σε ευρέως χρησιμοποιούμενες βάσεις δεδομένων [13]. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στους αντίστοιχους παρακάτω πίνακες.

Συντελεστές Απορρόφησης (πηγή: ETA Ακουστική 2001)						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Δάπεδο	0,05	0,05	0,05	0,08	0,09	0,09
Μοκέτα	0,02	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5
Τοίχοι απορροφητικοί	0,54	0,8	0,95	0,95	0,95	0,95
Τοίχοι ανακλαστικοί	0,5	0,3	0,08	0,05	0,05	0,05
Οροφή απορροφητική	0,54	0,8	0,98	0,98	0,85	0,6
Οροφή ανακλαστική	0,15	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05
Κουρτίνα	0,3	0,69	0,77	0,89	0,88	0,86

Πίνακας 17 – Οι συντελεστές απορρόφησης όπως παρουσιάζονται στη μελέτη της ETA Ακουστικής

Διάφοροι Συντελεστές Απορρόφησης (πηγή: Vorlander, 2008 [13])						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Τσιμέντο	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Γυαλί	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
Ξύλο	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Μέταλλο	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05

Πίνακας 18 - Συντελεστές απορρόφησης διαφόρων υλικών [13]

Επίσης αναγκαίος είναι και ο προσδιορισμός των ισοδύναμων διάχυσης (scattering coefficient) των επιφανειών. Για τους διαχυτές της οροφής, χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο διάχυσης του διαχυτή RPG Skyline, όπως αυτός υπολογίστηκε βάσει σχετικής μελέτης [14],

λόγω της απόλυτης ομοιότητας του με τον τύπο διαχυτή που βρίσκεται τοποθετημένος σε διάφορα σημεία της οροφής της αίθουσας.

Ισοδύναμο Διάχυσης RPG Skyline (πηγή: Farina, 2018 [14])						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Διαχυτής RPG Skyline	0,15	0,18	0,36	0,24	0,28	0,22

Πίνακας 19 – Το ισοδύναμο διάχυσης που χρησιμοποιήθηκε κατά την δημιουργία του μοντέλου για τους διαχυτές της οροφής [14]

Για τις υπόλοιπες επιφάνειες, ακολουθήθηκε η οδηγία χρήσεως του CATT Acoustic, σύμφωνα με την οποία προτείνεται η χρήση ισοδύναμων διάχυσης για όλες τις επιφάνειες, ακόμα και για τις πολύ μεγάλες και επίπεδες. Σύμφωνα με αυτή, η ελάχιστη προτεινόμενη τιμή για όλες τις επιφάνειες είναι 0,10-0,20, εκτός από τις πολύ μεγάλες και επίπεδες, για τις οποίες προτείνεται 0,05-0,10. Για πιο τραχείς επιφάνειες, όπου η τραχύτητα είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος, προτείνεται η χρήση μεγαλύτερων τιμών (0,80), οι οποίες ελαττώνονται σταδιακά για τις χαμηλότερες συχνότητες. Η γενικότερη προσέγγιση που προτείνεται από τον δημιουργό του λογισμικού, είναι ότι «η υποτίμηση των ισοδύναμων διάχυσης είναι πιο επικίνδυνη από την υπερεκτίμηση τους» [18].

Προτεινόμενο Ισοδύναμο Διάχυσης (πηγή: Dalenback [18])						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Ελάχιστο	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Ελάχιστο μεγάλης επιφάνειας	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Τραχείς επιφάνειες	0,15	0,30	0,60	0,80	0,80	0,80

Πίνακας 20 – Προτεινόμενα ισοδύναμα διάχυσης για κάθε επιφάνεια [18]

Επίσης, το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει μια λειτουργία «αυτόματης διάχυσης ακμών» (auto edge diffusion), με την οποία υπολογίζεται αυτόματα η διάχυση λόγω των ακμών, βάσει του μεγέθους της ακμής και της συχνότητας [18], λειτουργία η οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκε κατά τις προσομοιώσεις καθώς δεν κρίθηκε απαραίτητο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Μετά την δημιουργία του μοντέλου στο CATT Acoustic, είναι πλέον δυνατή η προσομοίωση του χώρου και η εξαγωγή πλήθους αποτελεσμάτων. Η εγκυρότητα αυτών ως προς τον πραγματικό χώρο πρέπει να μελετηθεί και να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις του μοντέλου, ώστε να μειωθούν οι αποκλίσεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται βαθμονόμηση (calibration). Πραγματοποιείται μεταβάλλοντας τους συντελεστές απορρόφησης των διαφόρων υλικών και για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η γνώση των τιμών που μπορεί να πάρει το καθένα, βάσει δεδομένων της σχετικής βιβλιογραφίας ή των κατασκευαστριών εταιριών. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, η βαθμονόμηση θα γίνει μεταβάλλοντας τους συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών που παραμένουν κοινές μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων των πάνελ. Αυτές είναι η επιφάνεια της μοκέτας του δαπέδου, η οποία καθώς είναι η μεγαλύτερη από όλες σε εμβαδό αναμένεται να έχει και την μεγαλύτερη επίδραση, οι μη μεταβαλλόμενες απορροφητικές επιφάνειες των τοίχων και το τμήμα της οροφής που αποτελείται από τσιμέντο. Για τις μη μεταβαλλόμενες απορροφητικές επιφάνειες των τοίχων, καθώς αυτές αποτελούν μια σχεδιαστική παραδοχή και όχι επιφάνεια του πραγματικού χώρου (στον πραγματικό χώρο μεσολαβούν μικρές περιοχές βαμμένου τοίχου), οι τιμές των συντελεστών τους αναμένεται να βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές της πλήρως απορροφητικής επιφάνειας (όπως παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρία) και στις τιμές των συντελεστών του βαμμένου τσιμέντου. Για τις άλλες δύο (μοκέτα και τσιμέντο), το εύρος των πιθανών τιμών, βάσει της διαθέσιμης βιβλιογραφίας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΟΚΕΤΑΣ						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μοκέτα (ΕΤΑ Ακουστική)	0,02	0,03	0,05	0,10	0,30	0,50
Βαμβακερή μοκέτα [13]	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Λεπτή μοκέτα σε τσιμέντο [13]	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Μαλακή μοκέτα 10mm σε τσιμέντο [13]	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
Πλεκτή μοκέτα 6mm σε φελλό [21]	0,05	0,05	0,10	0,20	0,45	0,65
Λεπτή μοκέτα, σε φελλό, σε τσιμέντο [21]	0,10	0,15	0,25	0,30	0,30	0,30
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ						
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Σκληρό τσιμέντο [13]	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07
Σκληρό τσιμέντο [21]	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Μαλακό, μη βαμμένο τσιμέντο [13]	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,05
Μαλακό, μη βαμμένο τσιμέντο [21]	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Μαλακό, βαμμένο τσιμέντο [21]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

Πίνακας 21 - Συντελεστές απορρόφησης διαφόρων ειδών μοκέτας και τσιμέντου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

T15(ms)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	0,526	0,360	0,278	0,266	0,258	0,253
JND	0,026	0,018	0,014	0,013	0,013	0,013
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,014	0,028	0,031	0,032	0,029	0,024
Ελάχιστη απόκλιση	0,010	0,014	0,016	0,019	0,023	0,018
Μέγιστη απόκλιση	0,018	0,063	0,043	0,046	0,042	0,032
Απόκλιση σε JND	0,537	1,546	2,220	2,433	2,240	1,894

Πίνακας 22 – Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου T15 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

T30(ms)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	0,615	0,448	0,307	0,299	0,298	0,300
JND	0,031	0,022	0,015	0,015	0,015	0,015
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,010	0,035	0,031	0,030	0,031	0,030
Ελάχιστη απόκλιση	0,007	0,018	0,022	0,019	0,021	0,011
Μέγιστη απόκλιση	0,017	0,057	0,042	0,059	0,047	0,043
Απόκλιση σε JND	0,327	1,570	1,997	2,017	2,073	2,007

Πίνακας 23 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου T30 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

D50 (%)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K

Μ.Ο. μετρήσεων	72,869	83,120	86,456	86,466	86,641	87,078
JND	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,874	0,789	0,876	1,105	0,888	0,874
Ελάχιστη απόκλιση	0,468	0,306	0,593	0,734	0,426	0,546
Μέγιστη απόκλιση	1,340	1,458	1,035	1,403	1,284	1,392
Απόκλιση σε JND	0,175	0,158	0,175	0,221	0,178	0,169

Πίνακας 24 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου D50 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

C80 (dB)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης απορρόφησης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	9,003	13,840	17,151	17,551	17,950	18,433
JND	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,275	0,522	1,241	1,255	1,143	1,188
Ελάχιστη απόκλιση	0,151	0,325	0,761	0,944	0,689	0,494
Μέγιστη απόκλιση	0,467	0,837	1,546	1,765	1,818	2,204
Απόκλιση σε JND	0,275	0,522	1,241	1,255	1,143	1,188

Πίνακας 25 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου C80 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης απορρόφησης

T15 (ms)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	0,546	0,588	0,724	0,734	0,708	0,652
JND	0,027	0,029	0,036	0,037	0,035	0,033
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,012	0,011	0,013	0,013	0,014	0,013
Ελάχιστη απόκλιση	0,008	0,005	0,005	0,008	0,006	0,008

Μέγιστη απόκλιση	0,017	0,015	0,021	0,023	0,020	0,019
Απόκλιση σε JND	0,456	0,385	0,354	0,358	0,382	0,401

Πίνακας 26 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου T15 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

T30 (ms)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	0,636	0,656	0,801	0,803	0,778	0,720
JND	0,032	0,033	0,040	0,040	0,039	0,036
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,009	0,008	0,011	0,010	0,010	0,007
Ελάχιστη απόκλιση	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,005
Μέγιστη απόκλιση	0,015	0,016	0,020	0,013	0,014	0,010
Απόκλιση σε JND	0,288	0,243	0,266	0,241	0,263	0,200

Πίνακας 27 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου T30 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

D50 (%)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	70,936	67,325	59,641	59,065	60,035	62,918
JND	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,889	1,408	2,204	2,372	2,268	2,021
Ελάχιστη απόκλιση	0,456	0,893	1,727	1,183	1,212	1,348
Μέγιστη απόκλιση	1,266	1,935	3,011	2,962	3,332	2,925
Απόκλιση σε JND	0,178	0,282	0,441	0,474	0,454	0,404

Πίνακας 28 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου D505 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

C80 (dB)	Έλεγχος επαναληψιμότητας μοντέλου Κατάσταση μέγιστης ανάκλασης					
	125Hz	250Hz	500Hz	1K	2K	4K
Μ.Ο. μετρήσεων	8,431	7,381	5,417	5,332	5,570	6,255
JND	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Μ.Ο. τυπικών αποκλίσεων	0,263	0,341	0,454	0,470	0,505	0,477
Ελάχιστη απόκλιση	0,189	0,219	0,344	0,280	0,437	0,391
Μέγιστη απόκλιση	0,327	0,441	0,607	0,602	0,665	0,619
Απόκλιση σε JND	0,263	0,341	0,454	0,470	0,505	0,477

Πίνακας 29 - Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης της παραμέτρου C80 μεταξύ των αποτελεσμάτων των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την κατάσταση μέγιστης ανάκλασης

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] <http://www.aurora-plugins.com>
- [2] <http://pcfarina.eng.unipr.it/>
- [3] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Aurora/download/Manual-HelpFile/>
- [4] ISO3382, I.S.-. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces, ed. B. Standards (2009)
- [5] Bill Addis, 2009, A Brief History of Design Methods for Building Acoustics, Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009
- [6] Heinrich Kuttruff, 1973, Room Acoustics, Elsevier Science Publishers Ltd
- [7] <https://eclass.gunet.gr/modules/document/file.php/LABGU104/%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%201/M1.htm>
- [8] David Cindric, Antonio Petosic, 2014, Improvement of acoustic parameters in home recording studio and control room, 6th Congress of Alps-Adria Acoustics Association 16.-17. October 2014, Graz, Austria
- [9] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/omni-power-light-4292>
- [10] Barteld N. J. Postma, Brian F. G. Katz, 2015, Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations, Springer-Verlag London 2015
- [11] Mendel Kleiner, Bengt-Inge Dalenback, Peter Svensson, 1993, Auralization – An Overview, Audio Engineer Society Journal, Vol 41, No. 11, 1993 November
- [12] Bengt-Inge Dalenbäck, 2010, Engineering principles and techniques in room acoustics prediction, Baltic-Nordic. Acoustics Meeting 2010
- [13] Michael Vorländer, 2008, Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [14] Angelo Farina, 2018, Measurement of the surface scattering coefficient: comparison of the Mommertz/Vorlander approach with the new Wave Field Synthesis method, Industrial Engineering Dept. University of Parma
- [15] Hans Wallach E. B. Newman and M. R. Rosenzweig, 2005, A Precedence Effect in Sound Localization, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 21, Issue 4, 10.1121/1.1917119
- [16] Lacatis, Gimenez, Sevillano, Cerda, Romero, Cibrian, 2008, Historical and chronological evolution of the concert hall acoustic parameters, Acoustics 08 Paris
- [17] Miskiewicz, Rogala, Rosciszewaska, Rudki, Fidecki, 2012, Concert Hall Sound Clarity: A Comparison of Auditory Judgments and Objective Measures, Archives of Acoustics Vol. 37, No. 1, pp. 41–46 (2012)
- [18] <http://www.catt.se/diffseries/index.htm>
- [19] Michael Vorländer, 2010, Prediction tools in acoustics - Can we trust the PC?, Baltic-Nordic. Acoustics Meeting 2010
- [20] Philip Newell, 2003, Recording Studio Design, Elsevier
- [21] http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf
- [22] Cheol-Ho Jeong, 2016, Diffuse sound field: challenges and misconceptions, Inter-noise Hamburg 2016

- [23] H. Nelisse and J. Nicolas, 1996, Characterization of a diffuse field in a reverberant room, 1997 Acoustical Society of America
- [24] Harry F. Olson, 1967, Music, Physics and Engineering, Dover Publications inc, New York
- [25] Tavelidou, Foteinou, Spyridis, 2016, Acoustic Study of the Live Room of Laboratory of Music Acoustics Technology, Department of Music Studies, University of Athens, Acoustiki 2016
- [26] Olivier Robina, Alain Berrya, Olivier Doutres, Nouredine Atalla, 2014, Measurement of the absorption coefficient of sound absorbing materials under a synthesized diffuse acoustic field, The Journal of the Acoustical Society of America 136, EL13 (2014)
- [27] J. Han, D. W. Herrin, and A. F. Seybert, 2007, Accurate Measurement of Small Absorption Coefficients, SAE International
- [28] Massimo Garai, 1993, Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: The reflection method using periodic pseudo-random sequences of maximum length, Applied Acoustics Volume 39, Issues 1–2, 1993, Pages 119-139
- [29] Ronald N. Bracewell, 2000, The Fourier Transform and Its Applications, McGraw-Hill International Editions
- [30] David A. Bies and Colin H. Hansen, 1988, Engineering Noise Control - Theory and practice, Spon Press
- [31] https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/bruel-kjaer-4296_datasheet.pdf
- [32] <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1689.ashx>
- [33] Barry Blesser and Linda-Ruth Salter, 2007, Spaces Speak, Are You Listening? Experiencing Aural Architecture, the MIT Press
- [34] P. Guidorzia, L. Barbaresia, D. D'Orazioa, M. Garaia, 2015, Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015