

# ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής



*Πτυχιακή εργασία*

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ  
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΣΤΟ 6ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ ΧΑΝΙΩΝ**

**Ανδρέας Σωτηρόπουλος**

*Επιβλέπων: Νικόλαος Στεφανάκης*

*Επίκουρος καθηγητής*

*Ρέθυμνο, [μήνας] [έτος]*



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**

**Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής**

*Πτυχιακή Εργασία*

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ  
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΣΤΟ 6ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ ΧΑΝΙΩΝ**

*Του*

**Σωτηρόπουλου Ανδρέα**

*Επιβλέπων: Νικόλαος Στεφανάκης*

*Επίκουρος καθηγητής*

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την [Ημερομηνία ...η .... ....].

.....  
XXX XXX

Βαθμίδα

.....  
XXX XXX

Βαθμίδα

.....  
XXX XXX

Βαθμίδα

*Ρέθυμνο, [ημέρα] [μήνας] [έτος]*

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Ανδρέας – Μάριος Σωτηρόπουλος, [2023]

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Νικόλαο Στεφανάκη για την πολύτιμη βοήθεια, στήριξη και καθοδήγησή του στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την συμπαράστασή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στη μελέτη ακουστικής βελτίωσης μιας αίθουσας διδασκαλίας που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του 6ου Γυμνασίου Χανίων. Η μελέτη της αίθουσας έγινε με βάση το θεωρητικό πλαίσιο που ισχύει για τους μεγάλους κλειστούς χώρους και με χρήση εργαλείων από τη στατιστικής ακουστικής. Για την μελέτη πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις οι οποίες οδήγησαν στο ποσοτικό προσδιορισμό ακουστικών δεικτών και οι δείκτες αυτοί συγκρίθηκαν με τις ιδανικές τιμές που προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψιν τον όγκο και τη χρήση της αίθουσας. Συμπληρωματικά της όλης επεξεργασίας, έγινε εκτίμηση της απορρόφησης που προσφέρουν τα τυπικά καθίσματα και έδρανα (θρανία) που συναντώνται στους χώρους διδασκαλίας στην δευτεροβάθμια εκπαίδευση. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψιν τις αποκλίσεις μεταξύ πραγματικών και ιδανικών τιμών των ακουστικών δεικτών, προτείνονται μέτρα για τη ακουστική βελτίωση της αίθουσας με χρήση παθητικών μέσων.

## **ABSTRACT**

The present thesis focuses on the study of acoustic improvement in a classroom located in the facilities of 6th High School of Chania. The study of the classroom was based on the theoretical framework applicable to large, enclosed spaces and using tools from statistical acoustics. Acoustic measurements were carried out for the study, which led to the quantitative determination of acoustic indices, and these indices were compared to the ideal values obtained by considering the volume and use of the room. Additionally, an estimation was made of the absorption provided by the typical seating and desks encountered in secondary education classrooms. Finally, considering the deviations between the actual and ideal values of the acoustic indices, measures are proposed for the acoustic improvement of the room using passive means.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	6
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ.....	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
1.1 Αναφορά στη θεωρία.....	10
1.1.1 Ακουστικά φαινόμενα μέσα σε κλειστούς χώρους .....	10
1.1.2 Συντελεστής απορρόφησης .....	11
1.1.3 Απορρόφηση ανθρώπου .....	12
1.2 Θεωρητικός Υπολογισμός του Χρόνου Αντήχησης.....	12
1.2.1 Sabine .....	12
1.2.2 Norris – Eyring .....	13
1.2.3 Fitzroy.....	13
1.2.4 Ακουστικοί δείκτες.....	14
2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	16
2.1 Αίθουσα διαστάσεις – χαρακτηριστικά.....	16
2.1.1 Κάτοψη αίθουσας - Θέση ηχείου και μικροφώνου .....	17
2.2 Εξοπλισμός.....	18
2.3 Το πρόγραμμα Room Eq Wizard .....	21
2.4 Συνδεσμολογία .....	22
2.5 Μετρήσεις μέσα στην αίθουσα.....	23
2.6 Σύγκριση μετρήσεων ακουστικών δεικτών μεταξύ γεμάτης και αδειάς αίθουσας .	28
3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ.....	32
3.1 Υπολογισμός απορρόφησης αντικειμένων.....	32

3.2	Ιδανικός χρόνος αντήχησης (Εξίσωση Stephens- Bate).....	33
3.2.1	Χρόνος αντήχησης με την παρουσία ανθρώπων.....	35
3.3	Πρόταση ακουστικής βελτίωσης.....	37
3.3.1	Χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών.....	37
3.4	Βελτίωση ως προς τον χρόνο αντήχησης.....	43
3.5	Επιπλέον ακουστική βελτίωση.....	46
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	47
4.1	Συμπεράσματα.....	47
4.2	Μελλοντική εργασία.....	47
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48



## **ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ**

Ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων

Ακουστική μελέτη

Απορρόφηση

Βελτίωση Ακουστικής

Ηχοαπορροφητικά υλικά

Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης

Στατιστική ακουστική

Χρόνος αντήχησης

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακουστική βελτίωση σε μια αίθουσα διδασκαλίας αποτελεί ένα σημαντικό και πολυσυζητημένο θέμα που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της εκπαίδευσης και την επικοινωνία μεταξύ δασκάλων και μαθητών. Ενώ η ακρόαση μιας συναυλίας στην ύπαιθρο μπορεί να μας προσφέρει έναν φυσικό και απρόσκοπτο ήχο, η κατάσταση είναι διαφορετική όταν πρόκειται για κλειστούς χώρους όπως γραφεία, σπίτια, θέατρα ή αίθουσες διδασκαλίας.

Στους κλειστούς χώρους, ο ήχος αποτελείται από δύο στοιχεία: τον απευθείας ήχο, που φτάνει κατευθείαν από την πηγή στα αυτιά μας, και την αντήχηση, η οποία προκαλείται από τις ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους και επιστρέφει στα αυτιά μας με κάποια χρονική καθυστέρηση. Αυτή η αντήχηση δημιουργεί έναν ήχο με όγκο και ηχώ, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την κατανόηση της μουσικής ή των ομιλιών στον χώρο.

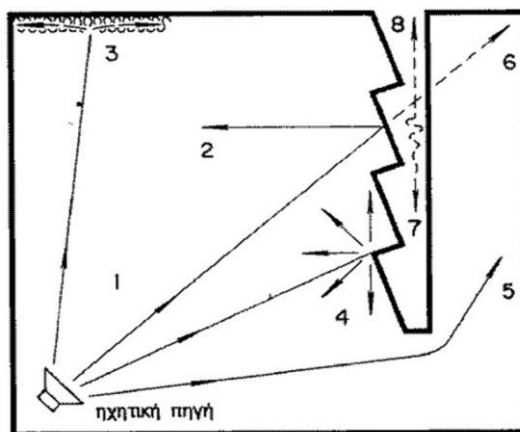
Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκαλεί η αντήχηση στους κλειστούς χώρους, απαιτείται η εφαρμογή μέτρων ακουστικής βελτίωσης. Από την μία πλευρά οι χώροι που προορίζονται για μουσική δωματίου, κλασσική μουσική χρειάζονται χώρους «ζωντανούς» όπου παρουσιάζουν αντήχηση είναι καλό για την μουσική. Από την άλλη πλευρά, οι χώροι που προορίζονται για ομιλία είναι σημαντικό να μην παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο αντήχησης διότι δημιουργείται πρόβλημα στην κατανόηση των ομιλιών. Σε αυτό το σημείο ο όρος της καταληπτότητας είναι άλλη μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την ομιλία στην αίθουσα. Η καταληπτότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός χώρου να διατηρεί τους ήχους και τις φωνές, ενώ παράλληλα μειώνει τον θόρυβο και τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις. Η χαμηλή καταληπτότητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο θόρυβο και μειωμένη κατανόηση του περιεχομένου που μεταδίδεται.

Κατά συνέπεια, η διάκριση των κλειστών χώρων σε μεγάλους και μικρούς, καθώς και η αξιολόγηση της αντήχησης και της απορρόφησης αποτελούν βασικά κριτήρια για την ακουστική μελέτη τους. Η κατανόηση και αντιμετώπιση αυτών των παραμέτρων αποτελούν τον πυρήνα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, με στόχο τη βελτίωση της ακουστικής εμπειρίας και την προσφορά ενός βελτιωμένου εκπαιδευτικού περιβάλλοντος στις αίθουσες διδασκαλίας.

## 1.1 Αναφορά στη θεωρία

### 1.1.1 Ακουστικά φαινόμενα μέσα σε κλειστούς χώρους

Η διάδοση και η συμπεριφορά του ήχου μέσα σε κλειστούς χώρους διαφέρει κατά πολύ από την ελεύθερη διάδοσή του και είναι περισσότερο πολύπλοκη. Στο σχήμα φαίνονται διάφορα ηχητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εντός κλειστών χώρων:



Εικόνα 1: Ηχητικά φαινόμενα εντός κλειστού χώρου

- 1. Απευθείας ήχος:** Ο ήχος που παράγεται από την πηγή και φθάνει απευθείας στο δέκτη.
- 2. Ανάκλαση:** Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων επιστρέφει από αυτή σε γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Το μήκος κύματος  $\lambda$  του ήχου που ανακλάται πρέπει να είναι μικρότερο από τις διαστάσεις της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει. Οπότε οι υψηλότερες συχνότητες ανακλώνονται από τις περατωτικές επιφάνειες του δωματίου με συνήθεις διαστάσεις, ενώ οι χαμηλές όχι.
- 3. Απορρόφηση:** Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ο ήχος προσπέσει σε ένα απορροφητικό υλικό «εξαφανίζεται», καθώς το υλικό απορροφά την ηχητική του ενέργεια. Κατά το φαινόμενο της απορρόφησης, η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως σε θερμότητα.
- 4. Διάχυση:** Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, ο ήχος που προσπίπτει σε ένα διαχυτή, ανακλάται ομοιόμορφα σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια ηχητική ένταση.
- 5. Περίθλαση:** Είναι το φαινόμενο της αλλαγής της διεύθυνσης διάδοσης που συμβαίνει κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (παράκαμψη ηχητικών κυμάτων ενός τοίχου, μιας γωνίας ενός κτιρίου, αλλοίωση του μετώπου κύματος από ανοιχτά παράθυρα, κλπ.).

**6. Διάδοση:** Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ο ήχος διαδίδεται μέσω των περατωτικών επιφανειών του χώρου.

## 7. Διασπορά του ήχου μέσα στην κατασκευή

## 8. Διάδοση μέσα στην κατασκευή

### 1.1.2 Συντελεστής απορρόφησης

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ενέργειας ή της έντασης που απορροφάται από μια επιφάνεια προς την προσπίπτουσα (Σκαρλάτος 2015):

$$a_a = \frac{W_a}{W_i} = \frac{I_a}{I_i} \quad (1)$$

Στη μελέτη της ακουστικής των μεγάλων χώρων σημαντικό ρόλο παίζουν οι διαστάσεις των χώρων καθώς και η απορρόφηση από τα υλικά που περιορίζουν το χώρο, ή που βρίσκονται μέσα σ' αυτόν. Ο ακριβής προσδιορισμός της απορρόφησης είναι δύσκολος, διότι σε ένα μεγάλο χώρο αφ' ενός μεν βρίσκεται πληθώρα υλικών με διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης, αφ' ετέρου δε κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική απορρόφηση ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής ακτίνας. Για το λόγο αυτό σε πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται προσεγγιστικοί τύποι που προκύπτουν συνήθως από τη στατιστική ανάλυση της συμπεριφοράς του ήχου σε κλειστούς χώρους .

#### α) Μέσος συντελεστής απορρόφησης

Για έναν κλειστό χώρο ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζεται από τη σχέση (Σκαρλάτος 2015):

$$\bar{a} = \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots + a_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n} \quad (2)$$

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots + a_n S_n \quad (3)$$

Η ποσότητα στη Σχέση (3) ονομάζεται απορρόφηση δωματίου. Αφορά την απορρόφηση που προκύπτει από τις επιφάνειες του χώρου και ουσιαστικά η Σχέση (3) είναι ο αριθμητής της Σχέσης (2). Η ποσότητα στον αριθμητή ονομάζεται απορρόφηση δωματίου. Τόσο η απορρόφηση όσο και ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζονται για την κεντρική συχνότητα της χρησιμοποιούμενης ζώνης.

### 1.1.3 Απορρόφηση ανθρώπου

Ο άνθρωπος, όπως και τα υπόλοιπα υλικά, παρουσιάζει απορρόφηση, η οποία όμως λόγω της ανθρώπινης φυσιολογίας δεν έχει σημασία εάν εκφράζεται μέσω του συντελεστή απορρόφησης. Κατά συνέπεια, έχει νόημα ο ορισμός της συνολικής απορρόφησης που προσφέρει ο άνθρωπος (Σκαρλάτος 2015).

Συχνότητα f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Συντελεστής Απορρόφησης Ανθρώπου	0,15	0,17	0,4	0,43	0,46	0,47	0,46	0,5

Πίνακας 1: Απορρόφηση του ανθρώπου σε οκταβική ανάλυση (Σκαρλάτος 2015)

## 1.2 Θεωρητικός Υπολογισμός του Χρόνου Αντήχησης

### 1.2.1 Sabine

Ως χρόνο αντήχησης  $RT_{60}$  ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_p$  σε κάποιο σημείο ενός κλειστού χώρου να ελαττωθεί κατά 60 dB μετά το μηδενισμό της ηχητικής ακτινοβολίας από την πηγή. Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από την συχνότητα του ήχου και γι' αυτό το λόγο ορίζεται για κεντρικές συχνότητες ζώνης. Ο τύπος του Sabine ισχύει για  $\alpha < 0.1$  και μονάδα μέτρησης είναι τα δευτερόλεπτα (sec). Ο εμπειρικός τύπος στον οποίο κατέληξε ο Sabine είναι (Λουτρίδης 2015) :

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A} \quad (4)$$

$RT_{60}$ : Χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

V: Ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα  $m^3$

A: Απορρόφηση του δωματίου σε Sabines

Μία από τις πολλές παραλλαγές της σχέσης του Sabine είναι αυτή του χρόνου αντήχησης για χώρο με διακριτά αντικείμενα.

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A_{\text{επιφ}} + A_{\text{αντικ}}} \quad (5)$$

V: Ο όγκος της αίθουσας σε  $m^3$

$A_{\text{επιφ}}$ : Η απορρόφηση επιφάνειας σε Sabines.

$A_{\text{αντικ}}$ : Η απορρόφηση αντικειμένου

### 1.2.2 Norris – Eyring

Όταν για το μέσο συντελεστή απορρόφησης ισχύει  $\alpha > 0.1$  τότε ο προσεγγιστικός τύπος του Sabine δεν παρέχει ορθά αποτελέσματα (Λουτρίδης 2015). Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ο ακόλουθος τύπος:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (6)$$

Όπου:

$RT_{60}$ : Χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

S: Η ολική επιφάνεια του δωματίου σε  $m^2$

V: Ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα  $m^3$

$\bar{\alpha}$ : Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

### 1.2.3 Fitzroy

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης απορρόφησης δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μια ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών όπως οι υαλοπίνακες τότε χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο (Λουτρίδης 2015) :

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S^2} \left[ \frac{S_{XY}}{a_{XY}} + \frac{S_{XZ}}{a_{XZ}} + \frac{S_{YZ}}{a_{YZ}} \right] \quad (7)$$

Όπου:

$RT_{60}$ : Χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

S: Η ολική επιφάνεια του δωματίου σε  $m^2$

V: Ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα  $m^3$

$S_{XY}, S_{XZ}, S_{YZ}$ : Η ολική επιφάνεια επί των αξόνων του δωματίου

$a_{XY}, a_{XZ}, a_{YZ}$ : Ο μέσος συντελεστής του δωματίου επί των αξόνων -XY, -XZ, -YZ.

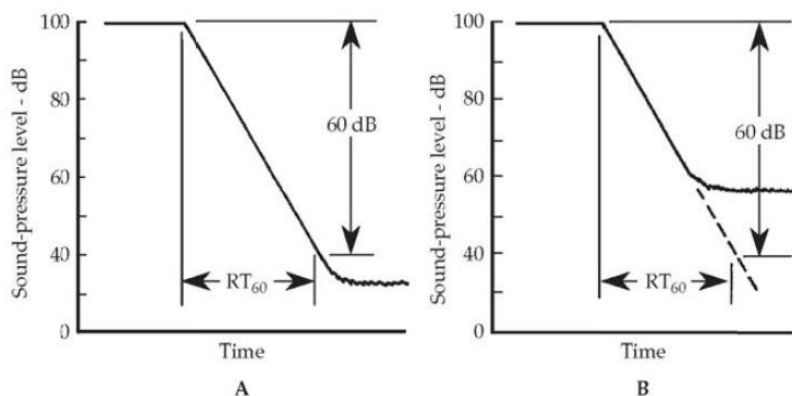
## 1.2.4 Ακουστικοί δείκτες

### Πρώιμος χρόνος αντήχησης EDT (Early Decay Time)

Η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που παίζει ουσιαστικό ρόλο στην διαμόρφωση της ακουστικής των κλειστών χώρων είναι αυτή που αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του ήχου. Οι καθυστερημένες ανακλάσεις έχουν χάσει αρκετή την ενέργεια που μεταφέρουν και δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην ακουστική του χώρου. Όταν η κλίση του ρυθμού πτώσης δεν είναι ομαλή (όπως συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις που το ηχητικό πεδίο δεν είναι 100% διάχυτο) χρησιμοποιούμε τον πρώιμο ρυθμό μείωσης EDT. Ο χρόνος αυτός που λαμβάνει υπόψη του τις πρώτες ανακλάσεις, ορίζεται ως έξι φορές η χρονική περίοδος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά 10 dB μετά τον μηδενισμό της πηγής. Ο EDT είναι συνήθως μικρότερος του RT και T60 (Σκαρλάτος 2015).

### Χρόνοι $T_{10}$ , $T_{20}$ , $T_{30}$ ,

Ο χρόνος  $T_{30}$ , ορίζεται ως δυο φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος ελαττωθεί από -5 έως -35 dB μετά τον μηδενισμό της πηγής, και συμβολίζεται με,  $T_{30}$ . Ανάλογα ορίζονται και οι χρόνοι  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  από τα τμήματα της καμπύλης μεταξύ -5 έως -15 και -5 έως -25 dB. Το αποτέλεσμα για να είναι συγκρίσιμο με τους άλλους χρόνους αντήχησης πολλαπλασιάζεται με 6 ή 3 αντίστοιχα (Σκαρλάτος 2015).



Εικόνα 2

### Διακριτότητα (Definition)

Η σημασία των ανακλάσεων (κυρίως των πρώιμων) στην ακουστική χώρων ήταν γνωστή από το 1850. Παρότι ακούμε μαζί με τον πρωτογενή ήχο χιλιάδες ανακλάσεις, για την ομιλία μόνο αυτές που φθάνουν με χρονική καθυστέρηση μέχρι 50 ms, είναι χρήσιμες, διότι συμβάλουν με τον πρωτογενή ήχο και τον ενισχύουν. Μελέτες έδειξαν ότι οι ανακλάσεις που καθυστερούν από 10 έως 20 ms μπορεί να είναι μέχρι και 10 dB ισχυρότερες από τον απευθείας ήχο. Η σημασία τους συνεπώς είναι μεγάλη. Η πρώτη προσπάθεια για τον ορισμό ενός αντικειμενικού μετρήσιμου κριτηρίου που λαμβάνει υπόψη τις ανακλάσεις έγινε από τον Thiele που χρησιμοποίησε τον όρο Διακριτότητα (Definition, Deutlichkeit). Ο όρος αυτός ορίζεται από τη σχέση (Σκαρλάτος 2015) :

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} \{h(t)^2\} dt}{\int_0^{\infty} \{h(t)^2\} dt} 100\% = \frac{E_{0-50}}{E_{0-\infty}} 100\% \quad (8)$$

Σχετίζεται επίσης με την αντιληπτότητα της ομιλίας δηλαδή όσο πιο μεγάλη τιμή τόσο πιο καλή κατανόηση της ομιλίας. Όπου  $g(t)$  η κρουστική απόκριση του χώρου σημείο λήψης. Το κάθε ολοκλήρωμα αντιστοιχεί στην πυκνότητα ενέργειας ( $E$ ), του ήχου που καταφθάνει στο μικρόφωνο.

### Ευκρίνεια (Clarity) $C_{50}$ , $C_{80}$

Η ευκρίνεια είναι ένας ακουστικός ενεργειακός δείκτης ο οποίος εκφράζει ποσοτικά την «διαφάνεια» της μουσικής ή του λόγου. Κατ' ουσίαν πρόκειται για έναν λογαριθμικό λόγο ενεργειών, που στον αριθμητή βρίσκεται η ενέργεια που φθάνει στα πρώτα 80 msec ενώ στον παρονομαστή βρίσκεται η ενέργεια που φθάνει μετά τα 80 msec. Στην σχετική βιβλιογραφία (Σκαρλάτος 2015) η ευκρίνεια εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} \{h(t)^2\} dt}{\int_{80ms}^{\infty} \{h(t)^2\} dt} = 10 \log \frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \quad (9)$$

Λέγεται επίσης early-to-late arriving sound energy ratio. Τιμές κοντά στο +9 dB θεωρούνται ιδανικές για έναν χώρο που η βασική χρήση σχετίζεται με την ομιλία. Επίσης, η ευκρίνεια συμβολίζεται με το γράμμα C και σαν δείκτη έχει είτε το 80 είτε το 50 ανάλογα με τον χρόνο ολοκλήρωσης.



### Κριτήριο ηχούς (echo criterion) – Κεντρικός χρόνος

Προτάθηκε από τους Dietsch και Kraak για τον αντικειμενικό προσδιορισμό της αντιληπτότητας της ομιλίας και ορίζεται από την σχέση (Σκαρλάτος 2015) :

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} |g(t)|^n dt}{\int_0^{\infty} |g(t)| dt} \quad (10)$$

Όπου  $n = 1$  για μουσική,  $n = 2/3$  για ομιλία.

Όταν  $n = 2$  ο χρόνος αυτός ονομάζεται κεντρικός χρόνος (Centre time, Centre of gravity time). Ο εκθέτης  $n$  δίδει αυξημένη βαρύτητα στην παρουσία υψηλών αλλά καθυστερημένων ανακλάσεων. Όσο μικρότερος ο TS τόσο καλύτερη η αντιληπτότητα της ομιλίας. Τυπικές τιμές του χρόνου αυτού είναι από 5 ms έως 1 s.

## 2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 2.1 Αίθουσα διαστάσεις – χαρακτηριστικά

#### ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Η αίθουσα στην οποία έγιναν οι μετρήσεις έχει διαστάσεις:

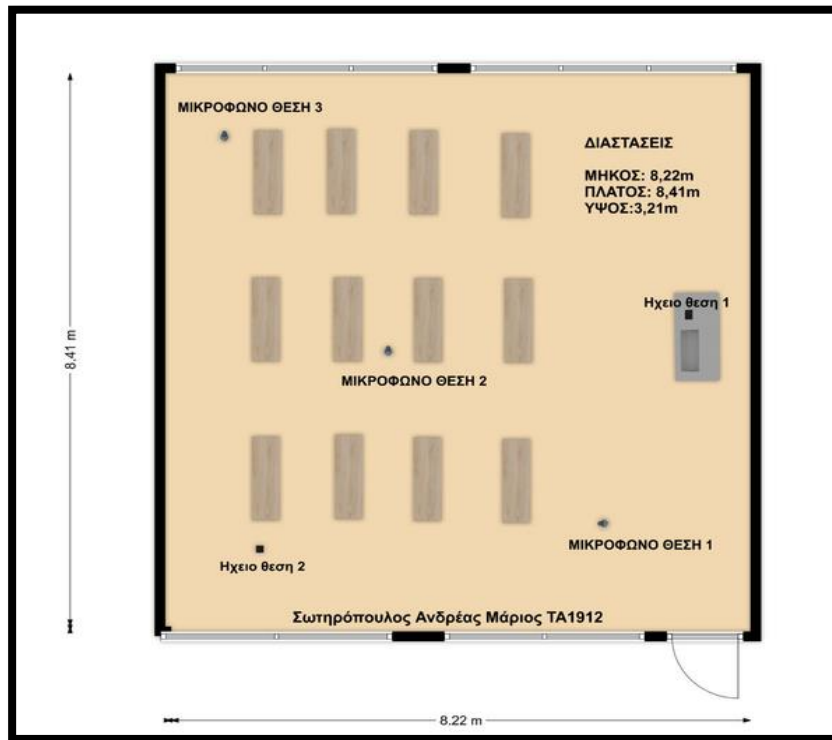
Μήκος: 8,22m, Πλάτος : 8,41m και Ύψος 3,21m. Ο Όγκος είναι  $V = 222$  κυβικά μέτρα ( $m^3$ ).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές διαστάσεις τις αίθουσας.

	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Εμβαδόν ( $m^2$ )
Πάτωμα - Ταβάνι	8,22	8,41	69,1
Πλευρικοί τοίχοι (Α-Δ)	8,41	3,21	27
Πλευρικοί τοίχοι (Β-Ν)	8,22	3,21	27,4
Πόρτα	2,10	1,08	2,27
Παράθυρα	3,71	1,19	4,41
Φεγγίτες	3,73	0,81	3

Πίνακας 2: Βασικές διαστάσεις αίθουσας

### 2.1.1 Κάτοψη αίθουσας - Θέση ηχείου και μικροφώνου



Εικόνα 3: Ενδεικτική κάτοψη αίθουσας

Για την διαδικασία των μετρήσεων αρχικά έχουμε τέσσερις καταστάσεις. Η αίθουσα γεμάτη, άδεια, μόνο θρανία και μόνο καρέκλες. Ορίζουμε τρεις θέσεις για το μικρόφωνο και δύο για το ηχείο (πηγή). Οι θέσεις του ηχείου και του μικροφώνου θα ισχύουν και για τις τέσσερις καταστάσεις. Για την κάθε κατάσταση γίνονται έξι μετρήσεις. Οι τρεις πρώτες γίνονται με το ηχείο να βρίσκεται στην θέση 1 και οι επόμενες τρεις γίνονται με το ηχείο να βρίσκεται στην δεύτερη θέση που έχουμε ορίσει. Οι τρεις θέσεις του μικροφώνου παραμένουν ως έχουν. Με την χρήση λογισμικού προγράμματος Room Eq Wizard, του μετρητικού μικροφώνου και της κάρτας ήχου θα δούμε παρακάτω τα αποτελέσματα και τις διαφορές που μπορεί να έχει ο χρόνος αντήχησης στις τέσσερις καταστάσεις και ανάλογα με την θέση του ηχείου και του μικροφώνου.

## 2.2 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι εξωτερική κάρτα ήχου, μικρόφωνο μετρήσεων, υπολογιστής για την χρήση λογισμικού ακουστικής ανάλυσης Room Eq Wizard.

### Steinberg UR22 mkii



Εικόνα 4 : Η κάρτα ήχου Steinberg UR22MKII και τα ρυθμιστικά της

### Χαρακτηριστικά

Η κάρτα ήχου της steinberg έχει σύνδεση USB 2.0 με ανάλυση 24-bit/192 kHz, 2 D-PRE προενισχυτές μικροφώνου, phantom power, midi I/O, 2 αναλογικές εισόδους XLR/TRS combo (Hi-Z switch στην είσοδο 2 για ηλεκτρική κιθάρα), 2 TRS line εξόδους, έξοδο ακουστικών, zero-latency και loorback streaming. Υποστηρίζει σύνδεση με iPad και διαθέτει εξωτερική τροφοδοσία.

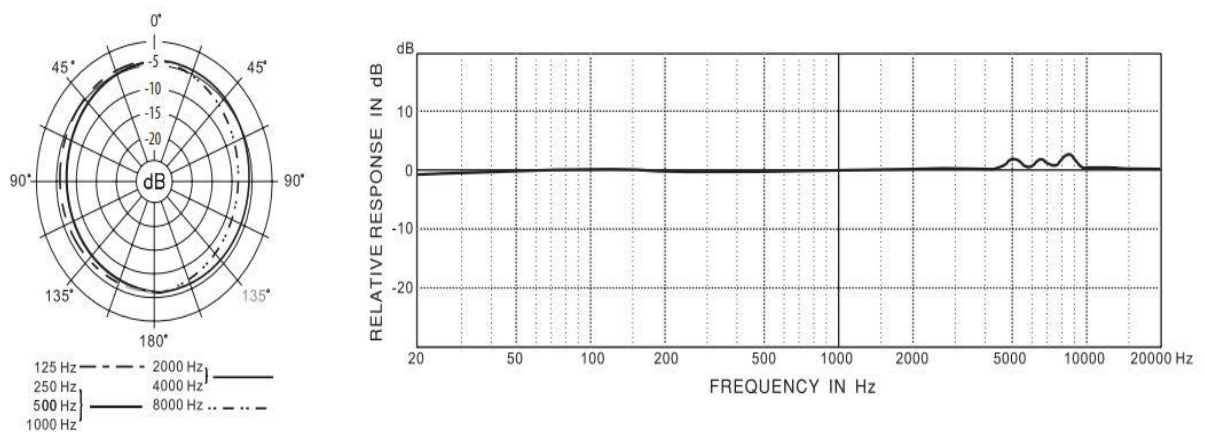
## Behringer ECM8000



Εικόνα 5 : Πυκνωτικό μετρητικό μικρόφωνο Behringer ECM 8000

### Χαρακτηριστικά

Είναι ένα πυκνωτικό πανκατευθυντικό (Omnidirectional) μικρόφωνο μετρήσεων. Είναι σχεδιασμένο για real-time analyzers ιδανικό για ακουστικές μετρήσεις ακόμα και για στούντιο ή live χρήση. Έχει flat συχνотική απόκριση και εξαιρετικά υψηλή ανάλυση ήχου (Εικόνα 6). Δουλεύει με phantom power από +15 μέχρι +48 V. Η ελάχιστη παραμόρφωση χαμηλής συχνότητας εξαλείφεται με την είσοδο FET χωρίς μετασχηματιστή. Συνδέεται με XLR με 3 ακίδες για υψηλότερη ακεραιότητα σήματος.



Εικόνα 6: Πολικό διάγραμμα και συχνотική απόκριση μικροφώνου με βάση το manual

## M audio BX5 studio monitor



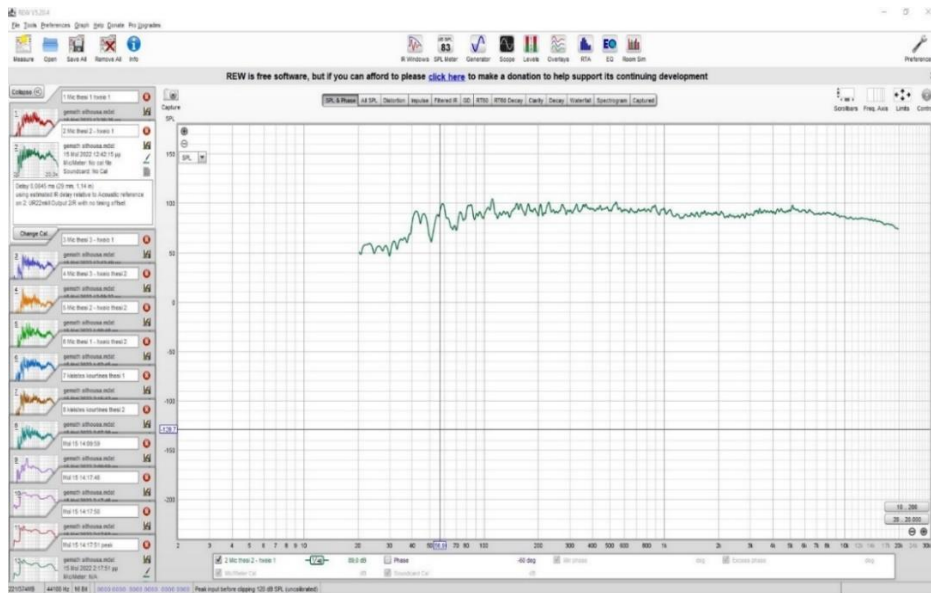
**Εικόνα 7: M audio BX5 studio monitor**

Τα M-Audio είναι active studio monitors το οποίο συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για ακουστικές μετρήσεις. Βέβαια η ισχύς και το συχνοτικό εύρος του ηχείου M audio καλύπτουν τις προδιαγραφές που θέλουμε για τις μετρήσεις. Το ηχείο έχει ισχύ 58watt, 5inches και η συχνοτική απόκριση του ηχείου είναι: 56Hz - 20kHz. Ιδανικά θα χρησιμοποιούσαμε ένα δωδεκαεδρικό ηχείο έτσι ώστε ο ήχος της πηγής να κατευθύνεται προς κάθε κατεύθυνση.



**Εικόνα 8: Δωδεκαεδρικό ηχείο**

## 2.3 Το πρόγραμμα Room Eq Wizard



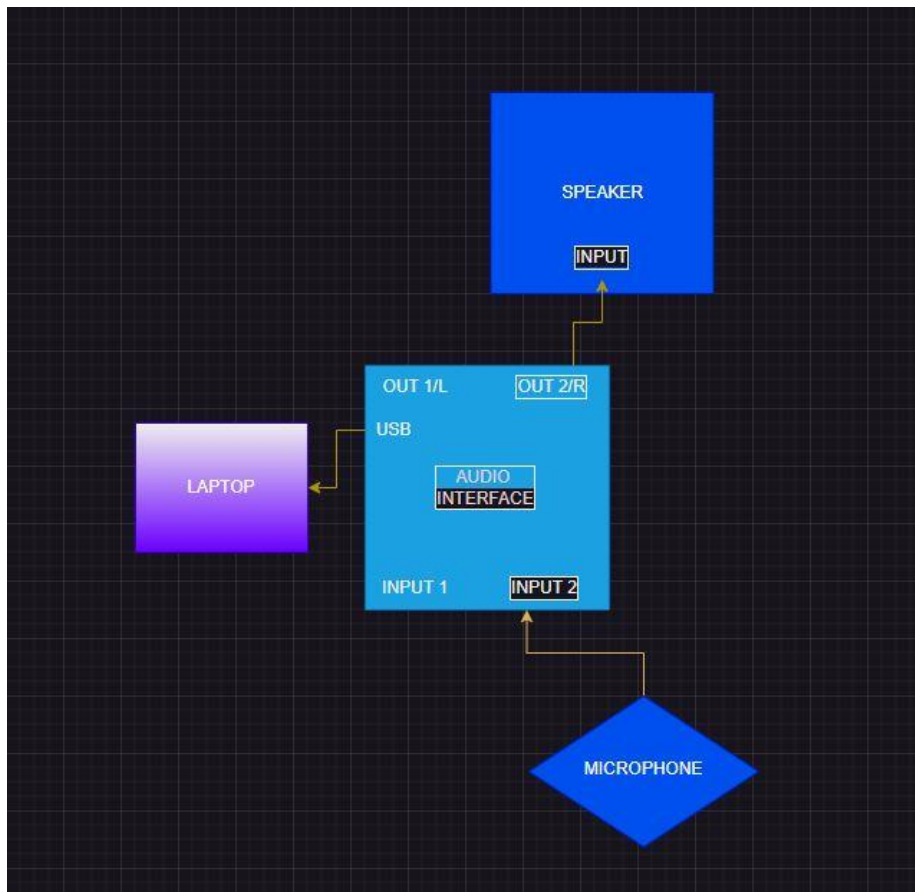
Εικόνα 9 : Περιβάλλον του προγράμματος Room Eq Wizard

Με βάση την Εικόνα 9: Στα αριστερά έχουμε τις διαφορετικές μετρήσεις για τις θέσεις του ηχείου και του μικροφώνου που έχουμε κάνει. Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει πληροφορίες και δεδομένα για την ακουστική συμπεριφορά του χώρου που μας ενδιαφέρει. Δηλαδή υπολογίζει ακουστικούς δείκτες, χρόνους αντήχησης, ηχητικές στάθμες, κρουστική απόκριση του χώρου που μας ενδιαφέρει συναρτήσει της συχνότητας και ανάλογα αν θέλουμε οκταβική ή τριτοοκταβική ανάλυση βλέπουμε με λεπτομέρεια που χρειάζεται να επέμβουμε. Επίσης μπορούμε να δούμε την κρουστική απόκριση από τις μετρήσεις που κάναμε, φασματική ανάλυση(Spectrogram), waterfall.

Εικόνα 10 : Ρυθμιστικά λογισμικού REW

## 2.4 Συνδεσμολογία

Η κάρτα ήχου συνδέεται με το laptop και έχει δύο εισόδους (Input 1 και Input 2) και δύο εξόδους (Output 1/L και Output 2/R). Το μετρητικό μικρόφωνο είναι συνδεδεμένο στην είσοδο Input 2 της κάρτας ήχου, ενώ το ηχείο είναι συνδεδεμένο στην έξοδο Output 2/R της κάρτας ήχου. Γυρίζουμε το ποτενσιόμετρο mix της κάρτας στο daw έτσι ώστε να αποφύγουμε τον μικροφωνισμό. Δηλαδή δεν θέλουμε να βγαίνει απευθείας στην έξοδο ούτε να περνάει θόρυβος του μικροφώνου στο ηχείο. Από το πρόγραμμα αναπαράγουμε έναν ήχο sweep με διάρκεια 11sec σε κάθε θέση του μικροφώνου.



Διάγραμμα 1: Block diagram συνδεσμολογίας

## 2.5 Μετρήσεις μέσα στην αίθουσα

Όπως είπαμε έχουμε τέσσερις καταστάσεις. Η αίθουσα γεμάτη, άδεια, μόνο καρέκλες και μόνο θρανία. Σε κάθε κατάσταση γίνονται έξι μετρήσεις. Οι πρώτες τρεις μετρήσεις γίνονται με το ηχείο να βρίσκεται στην θέση 1. Ενώ οι επόμενες τρεις μετρήσεις γίνονται με το ηχείο να βρίσκεται στην θέση 2. Οι τρεις θέσεις του μικροφώνου παραμένουν σταθερές.

- **Κατάσταση 1: Αίθουσα Γεμάτη**

Στην κατάσταση αυτή έχουμε όλα τα αντικείμενα της αίθουσας δηλαδή 24 καρέκλες, 24 θρανία, κουρτίνες, έδρα. Τα παράθυρα (μονό τζάμι) και η πόρτα είναι κλειστά.



Εικόνα 11: Αίθουσα γεμάτη Μέτρηση με το Μικρόφωνο στη θέση 2 και το ηχείο στη θέση 1



- **Κατάσταση 2: Μετρήσεις μόνο με καρέκλες**



**Εικόνα 12: Αίθουσα μόνο καρέκλες**

Ο όγκος και η επιφάνεια που προσφέρουν οι καρέκλες σε σύγκριση με τα θρανία είναι μικρότερος. Οπότε δεν θα έχουν τόσο καλή απόδοση στην μείωση του χρόνου αντήχησης. Με βάση τον **Πίνακα 3** των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης λοιπόν βλέπουμε ότι η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μόνο θρανία και στην κατάσταση μόνο καρέκλες είναι ελάχιστη.

- **Κατάσταση 3: Μετρήσεις μόνο με θρανία**



**Εικόνα 13: Αίθουσα μόνο θρανία**

Ο όγκος και η επιφάνεια που προσφέρουν τα θρανία σε σύγκριση με τις καρέκλες είναι μεγαλύτερος. Οπότε θα έχουν και καλύτερη απόδοση στην μείωση του χρόνου αντήχησης. Με βάση τον **Πίνακα 3** από τις μετρήσεις λοιπόν βλέπουμε ότι η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μόνο καρέκλες και στην κατάσταση μόνο θρανία είναι ελάχιστη. Βέβαια όταν κάποιος βρίσκεται στην αίθουσα μπορεί να αντιληφθεί με την ακοή του ότι υπάρχει διαφορά στον χρόνο αντήχησης.

- **Κατάσταση 4: Μετρήσεις με άδεια αίθουσα**



**Εικόνα 14: Αίθουσα άδεια**

Από τον **Πίνακα 3** παρατηρούμε ότι ο χρόνος αντήχησης έχει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις καταστάσεις. Κυρίως στις χαμηλές συχνότητες 63Hz-500Hz έχουμε αισθητή διαφορά στο χρόνο αντήχησης. Από την στιγμή που δεν έχουμε τις 24 καρέκλες και τα 24 θρανία ή κάποια άλλη επιφάνεια με μεγάλο όγκο για να μειώσουν ως έναν βαθμό την αντήχηση. Ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται σημαντικά σε όλες τις θέσεις όπου τοποθετήσαμε το μικρόφωνο.

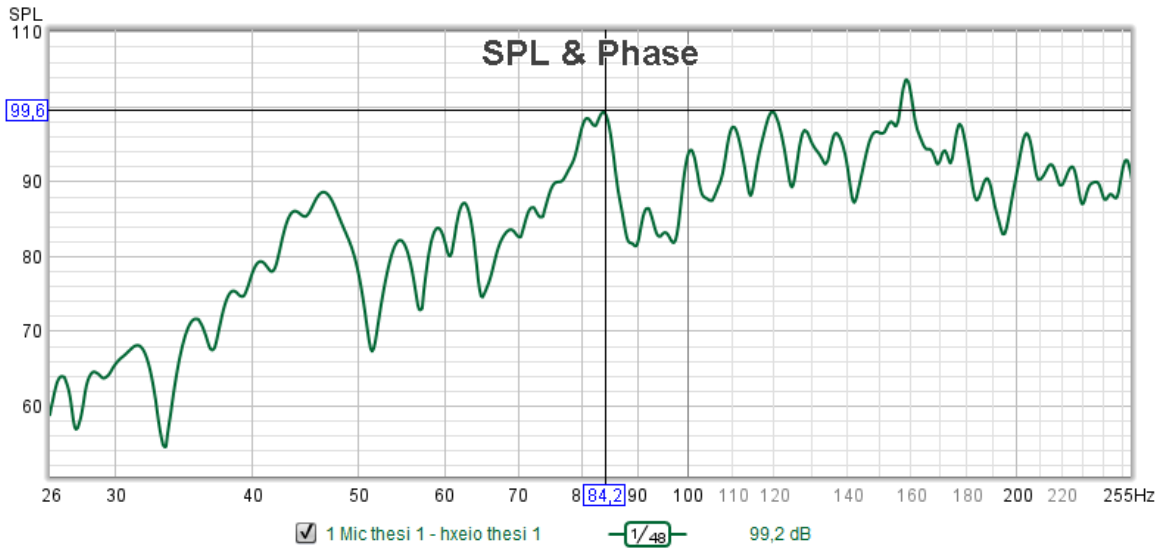
### Μέσοι όροι χρόνου αντήχησης για τις 4 καταστάσεις της αίθουσας

Υπολογίζουμε τον μέσο όρο του χρόνου αντήχησης για  $RT_{20}$ ,  $RT_{30}$  με βάση της 6 μετρήσεις που έγιναν σε κάθε κατάσταση. Από εκεί προκύπτουν οι μέσοι όροι  $RT_{30}$  που βλέπουμε στον επόμενο πίνακα.

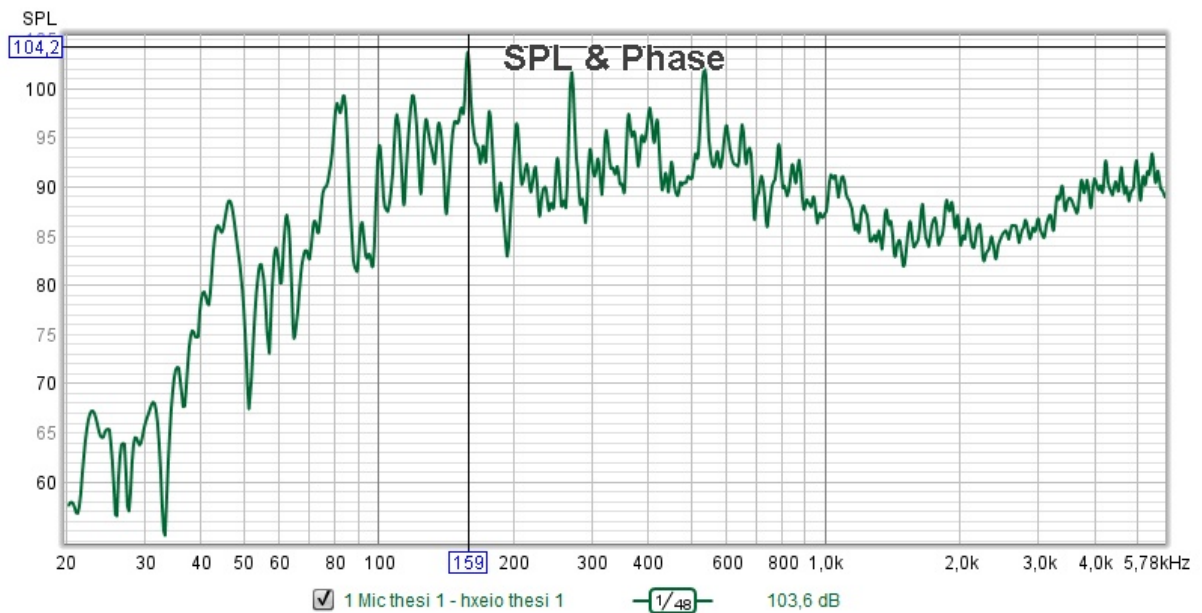
Συχνότητα	F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$RT_{30}$ ΑΔΕΙΑ (s)	M.O	3,91	3,08	2,66	2,12	1,83	1,55	1,27	0,95
$RT_{30}$ ΓΕΜΑΤΗ (s)	M.O	1,55	2,50	2,14	1,58	1,49	1,28	1,09	0,85
$RT_{30}$ ΜΟΝΟ ΚΑΡΕΚΛΕΣ (s)	M.O	1,62	2,79	2,22	1,83	1,60	1,39	1,16	0,89
$RT_{30}$ ΜΟΝΟ ΘΡΑΝΙΑ (s)	M.O	1,53	2,57	2,21	1,66	1,54	1,34	1,12	0,85

Πίνακας 3: Μέσος όρος T30 για τις 4 καταστάσεις της αίθουσας

Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε πως αλλάζει ο χρόνος αντήχησης στις τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις τις αίθουσας συναρτήσει της συχνότητας. Ο χρόνος αντήχησης όσο η αίθουσα αδειάζει μειώνονται οι απορροφητικές επιφάνειες άρα έχουμε αύξηση του χρόνου αντήχησης. Βλέπουμε κυρίως στο εύρος συχνοτήτων 63Hz -1000Hz ότι το ο χρόνος αντήχησης είναι μεγαλύτερος του 1 sec. Και στις τέσσερις καταστάσεις της αίθουσας. Επειδή υπάρχουν θρανία και καρέκλες στην αίθουσα βοηθάνε στην ηχοαπορρόφηση αλλά δεν είναι αρκετό για να πούμε ότι έχουμε ιδανικές συνθήκες ακουστικής.



**Διάγραμμα 2:** Εδώ βλέπουμε την συχνοτική απόκριση από την μέτρηση όπου το ηχείο βρίσκεται στην θέση 1 και το ηχείο στην θέση 1 με βάση την κάτοψη.



**Διάγραμμα 3:** Εδώ βλέπουμε την συχνοτική απόκριση από την μέτρηση όπου το ηχείο βρίσκεται στην θέση 1 και το ηχείο στην θέση 1 με βάση την κάτοψη.

## 2.6 Σύγκριση μετρήσεων ακουστικών δεικτών μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας

Σε αυτή την ενότητα γίνεται σύγκριση των ακουστικών δεικτών **C50,C80,D50,TS** στις δύο από τις τέσσερις καταστάσεις που εξετάζουμε. Όταν η αίθουσα είναι γεμάτη και όταν η αίθουσα είναι άδεια. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε κατά πόσο η αίθουσα είναι κατάλληλα διαμορφωμένη για τη διδασκαλία, εάν ο ήχος είναι καθαρός και ευανάγνωστος, αν επηρεάζεται από ηχώ, και αν παρέχεται καλή ακουστική υποστήριξη για όλους τους ακροατές. Επίσης, αυτοί οι δείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουμε την ακουστική απόδοση της αίθουσας, εάν απαιτείται, προσθέτοντας υλικά, όπως ακουστικά πάνελ, υφάσματα, ή απορροφητικά υλικά στον χώρο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις των ακουστικών δεικτών σε πίνακες και στην συνέχεια για κάθε ακουστικό δείκτη γίνεται σύγκριση με πίνακες και διαγράμματα μεταξύ των δύο καταστάσεων γεμάτης και άδειας αίθουσας.

	Μ.Ο ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ				ΑΙΘΟΥΣΑ ΓΕΜΑΤΗ			
f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50 (dB)	-5,26	-4,59	-3,35	-2,47	-1,82	-1,02	0,17	2,19
C80 (dB)	-0,88	-2,14	-0,44	0,58	0,71	1,63	2,99	5,61
D50 (%)	25,30	26,53	32,05	36,50	39,90	44,25	50,97	62,12
TS (S)	0,19	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05

Πίνακας 4: Σύγκριση βασικών ακουστικών δεικτών (Αίθουσα γεμάτη)

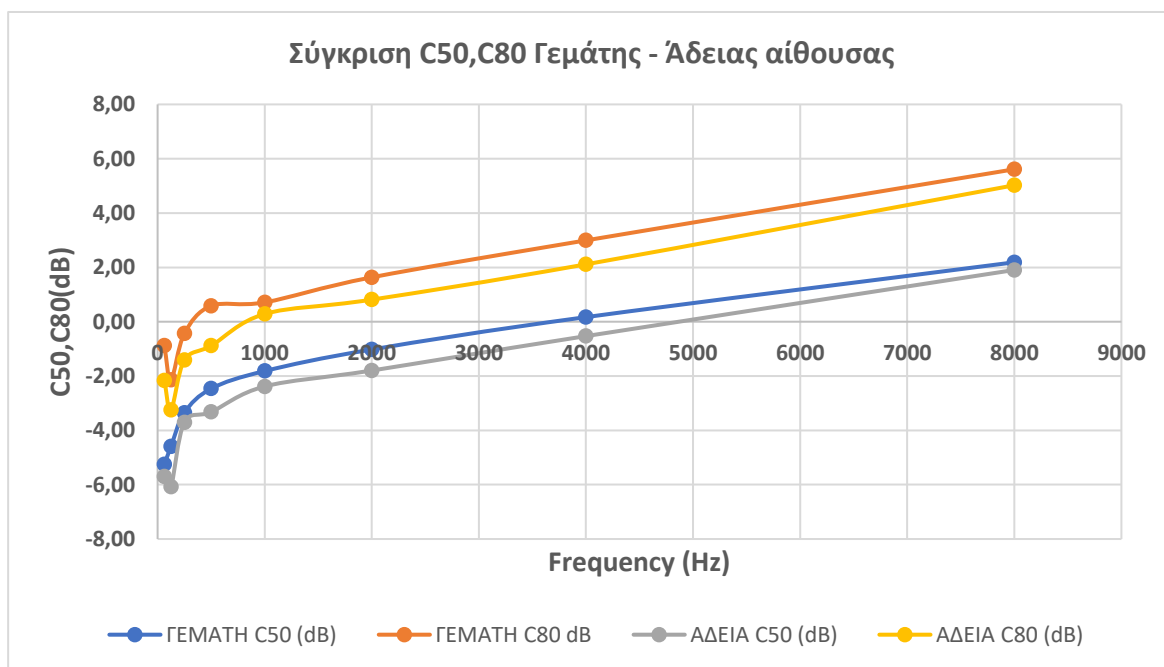
f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΑΔΕΙΑ C50 (dB)	-5,70	-6,08	-3,71	-3,33	-2,38	-1,80	-0,53	1,90
ΑΔΕΙΑ C80 (dB)	-2,17	-3,25	-1,42	-0,89	0,29	0,81	2,11	5,02
ΑΔΕΙΑ D50 (%)	22,25	20,38	30,10	32,08	36,78	40,07	47,07	60,40
ΑΔΕΙΑ TS(S)	0,24	0,20	0,17	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06

Πίνακας 5: Σύγκριση βασικών ακουστικών δεικτών (Αίθουσα Άδεια)

### Ευκρίνεια - Clarity C50,C80 (dB)

f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΓΕΜΑΤΗ C50 (dB)	-5,26	-4,59	-3,35	-2,47	-1,82	-1,02	0,17	2,19
ΑΔΕΙΑ C50 (dB)	-5,70	-6,08	-3,71	-3,33	-2,38	-1,80	-0,53	1,90
ΓΕΜΑΤΗ C80 (dB)	-0,88	-2,14	-0,44	0,58	0,71	1,63	2,99	5,61
ΑΔΕΙΑ C80 (dB)	-2,17	-3,25	-1,42	-0,89	0,29	0,81	2,11	5,02

Πίνακας 6: Σύγκριση C50,C80 μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας



Διάγραμμα 4: Σύγκριση C50,C80 μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας

Από την θεωρία ξέρουμε ότι τιμές κοντά στο +9 dB θεωρούνται ιδανικές για έναν χώρο που η βασική χρήση σχετίζεται με την ομιλία. Αντιθέτως οι τιμές που βρίσκονται κοντά στα -3dB για τους χώρους ομιλίας δεν είναι ιδανικοί. Άρα από τον Πίνακα 6 και Διάγραμμα 4 για το C50 μεταξύ άδειας και γεμάτης αίθουσας παρατηρούμε ότι το πρόσημο των τιμών για την γεμάτη αίθουσα γίνεται θετικό όταν φθάσουμε στα 4000Hz και 8000Hz. Στην γεμάτη αίθουσα για τις χαμηλές συχνότητες 63Hz - 250Hz περνάει το όριο το -3 dB που με βάση την θεωρία δεν είναι ιδανικό. Στην κατάσταση όπου η αίθουσα είναι άδεια στο εύρος συχνοτήτων 63Hz – 500Hz περνάει το όριο των -3 dB και έχει μέγιστη τιμή 1,90dB στα 8000Hz. Οι συγκεκριμένες τιμές για το δείκτη C50 δεν είναι ιδανικές.

### Για το δείκτη C80

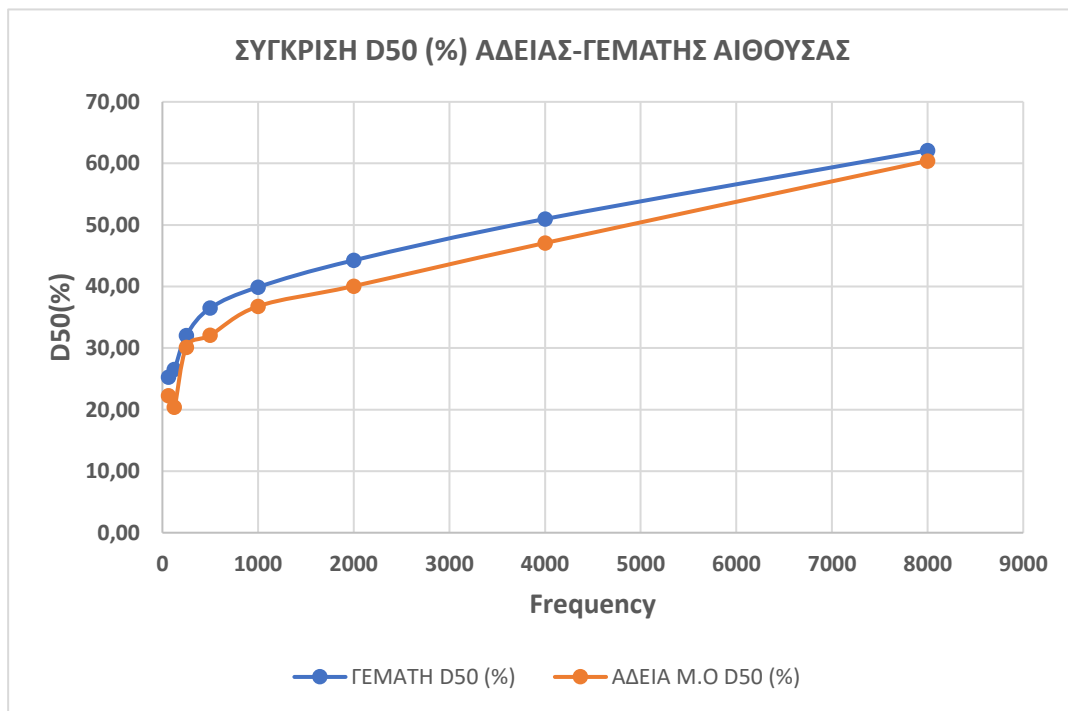
Από τον Πίνακα 6 και Διάγραμμα 4 για τον δείκτη C80 μεταξύ άδειας και γεμάτης αίθουσας παρατηρούμε ότι αρχικά έχουμε λίγο καλύτερες τιμές σε σύγκριση με τον δείκτη C50 δηλαδή πιο κοντά στα +9dB. Επίσης για την γεμάτη αίθουσα οι τιμές είναι μεγαλύτερες του μηδενός των όταν φθάσουμε στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 500Hz-8000Hz με μέγιστη τιμή 5,61 dB στα 8000Hz. Ενώ στην κατάσταση όπου η αίθουσα είναι άδεια παρατηρούμε ότι οι τιμές του C80 είναι μεγαλύτερες του μηδενός των όταν φθάσουμε στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 1000Hz-8000Hz με μέγιστη τιμή 5,02 dB στα 8000Hz.

### Διακριτότητα (Definition)

	ΣΥΓΚΡΙΣΗ D50 (%) ΑΔΕΙΑΣ-ΓΕΜΑΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ							
f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΓΕΜΑΤΗ D50 (%)	25,30	26,53	32,05	36,50	39,90	44,25	50,97	62,12
ΑΔΕΙΑ D50 (%)	22,25	20,38	30,10	32,08	36,78	40,07	47,07	60,40

Πίνακας 7: Σύγκριση D50 (%) μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας

Από την θεωρία ξέρουμε ότι όσο πιο μεγάλη τιμή της Διακριτότητας τόσο πιο καλή κατανόηση της ομιλίας. Με βάση τον Πίνακα 7 και το Διάγραμμα 5 βλέπουμε ότι στις χαμηλές – μεσαίες συχνότητες 63-1000Hz είμαστε σε ποσοστό μικρότερο του 40%. Ενώ από τα 2000Hz και πάνω και στις δύο καταστάσεις το ποσοστό αυξάνεται. Αλλά έχουμε καλύτερες ακουστικές συνθήκες στην κατάσταση που η αίθουσα είναι γεμάτη.



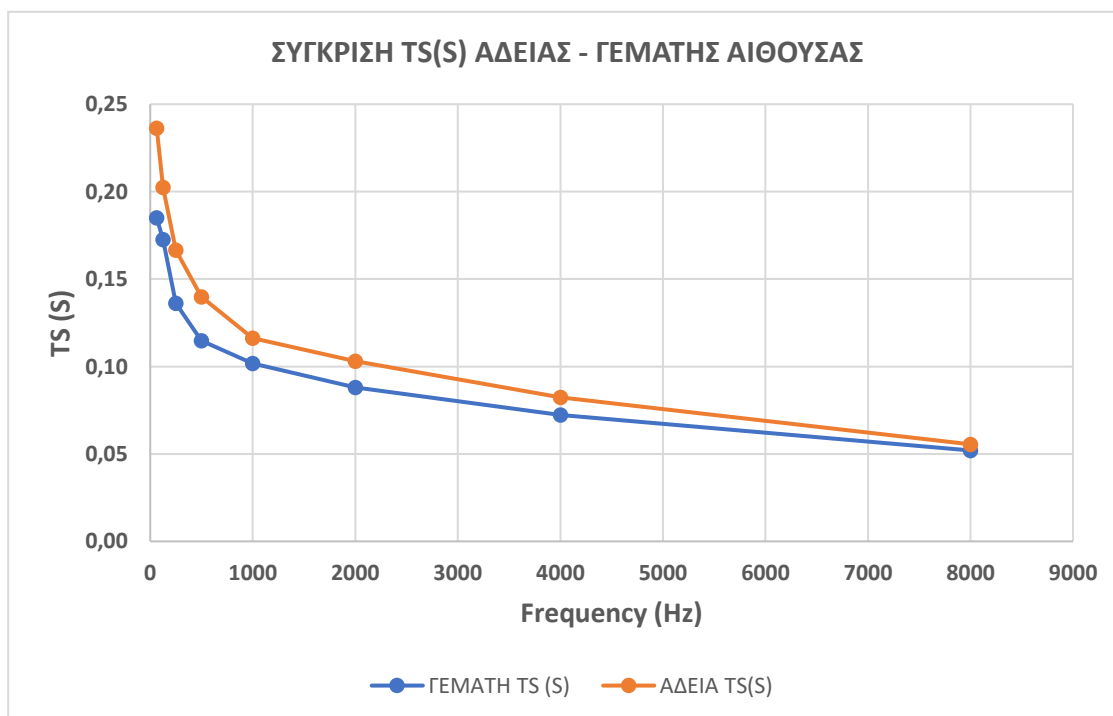
Διάγραμμα 5: Σύγκριση D50 (%) μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας

## Κεντρικός Χρόνος TS (S)

	ΣΥΓΚΡΙΣΗ TS (s) ΑΔΕΙΑΣ-ΓΕΜΑΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ							
f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΓΕΜΑΤΗ TS (S)	0,19	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05
ΑΔΕΙΑ TS(S)	0,24	0,20	0,17	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06

Πίνακας 8: Σύγκριση TS (S) μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας

Με βάση τον Πίνακα 8 και το Διάγραμμα 6 για τον Κεντρικό Χρόνο TS (S) παρατηρούμε ότι στην Κατάσταση 1 Αίθουσα γεμάτη έχουμε πιο μικρά νούμερα που με βάση την θεωρία είναι και το ιδανικό. Παρατηρούμε ότι η διαφορά σε όλο το συχνοτικό εύρος μειώνεται μεταξύ της κατάσταση γεμάτη και άδειας αίθουσας. Όσο πάμε σε πιο ψηλές συχνότητες τόσο μικρότερη είναι και η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων. Ξεκινάει με μέγιστη διαφορά 0,05s στα 63Hz ενώ στα 2000Hz η διαφορά μειώνεται στο 0,01sec.



Διάγραμμα 6: Σύγκριση TS (S) μεταξύ γεμάτης και άδειας αίθουσας



### 3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

#### 3.1 Υπολογισμός απορρόφησης αντικειμένων

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την απορρόφηση για τις τέσσερις καταστάσεις της αίθουσας και υπολογίζουμε την απορρόφηση των αντικειμένων. Στον Πίνακα 9 βλέπουμε τον μέσο όρο απορρόφησης της αίθουσας από 6 μετρήσεις στις 4 καταστάσεις της αίθουσας. Παρατηρούμε ότι όσο αφαιρούμε αντικείμενα από την αίθουσα η απορρόφηση μειώνεται. Άρα ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται και η απορρόφηση στην άδεια αίθουσα είναι σαφώς μικρότερη από τις υπόλοιπες τρεις καταστάσεις που έχουν αντικείμενα.

		Απορρόφηση για τις 4 καταστάσεις σε Sabines						
Συχνότητα F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΑΔΕΙΑ (Sabines)	9,14	11,60	13,46	16,89	19,56	23,01	28,10	37,60
ΜΟΝΟ ΚΑΡΕΚΛΕΣ (Sabines)	22,03	12,83	16,07	19,49	22,40	25,72	30,78	40,04
ΜΟΝΟ ΘΡΑΝΙΑ (Sabines)	23,35	13,92	16,17	21,57	23,20	26,59	32,03	42,03
ΓΕΜΑΤΗ (Sabines)	23,05	14,30	16,73	22,60	23,95	27,87	32,68	42,22

Πίνακας 9: Απορρόφηση για τις τέσσερις καταστάσεις της αίθουσας

Αφού ξέρουμε την απορρόφηση που προσφέρει η αίθουσα και στις 4 καταστάσεις τότε μπορούμε να υπολογίσουμε και την απορρόφηση των αντικειμένων όπως φαίνεται στον Πίνακα 10 (καρέκλες, θρανία). Από την σχέση 11 μπορούμε να βρούμε την απορρόφηση των αντικειμένων.

$$A_{\text{αντικ}} = \frac{A_{\text{με τα αντικείμενα}} - A_{\text{χωρίς τα αντικείμενα}}}{\text{Πλήθος Αντικειμένων}} \quad (11)$$

Όπου:

**$A_{\text{με τα αντικείμενα}}$ :** Είναι η απορρόφηση στην κατάσταση μόνο καρέκλες και στην κατάσταση μόνο θρανία

**$A_{\text{χωρίς τα αντικείμενα}}$ :** Είναι η κατάσταση όπου η αίθουσα είναι άδεια

**Πλήθος Αντικειμένων:** Αριθμός καρεκλών και θρανίων 24 και για τα δύο αντικείμενα αντίστοιχα

Αφού κάνουμε την αφαίρεση δια το πλήθος των 24 αντικειμένων στην κάθε κατάσταση θα έχουμε την απορρόφηση που προσφέρουν τα αντικείμενα.

		Απορρόφηση Αντικειμένων							
Συχνότητα F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Καρέκλα	0,54	0,05	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10	
Θρανίο	0,59	0,10	0,11	0,20	0,15	0,15	0,16	0,18	
Άνθρωπος	0,15	0,17	0,4	0,43	0,46	0,47	0,46	0,5	

Πίνακας 10: Απορρόφηση αντικειμένων και του ανθρώπου

### 3.2 Ιδανικός χρόνος αντήχησης (Εξίσωση Stephens- Bate)

Με βάση τη Σχέση (12) βρίσκουμε τον ιδανικό χρόνο αντήχησης και με βάση το αποτέλεσμα αυτό θα γίνει σύγκριση του πειραματικού με τον θεωρητικό χρόνο αντήχησης που μόλις υπολογίσαμε

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (12)$$

$RT_{60}$ : Χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

V: Ο όγκος δωματίου σε κυβικά μέτρα

r=4 Για λόγο

r=5 Για ορχήστρα

r=6 Για χορωδία

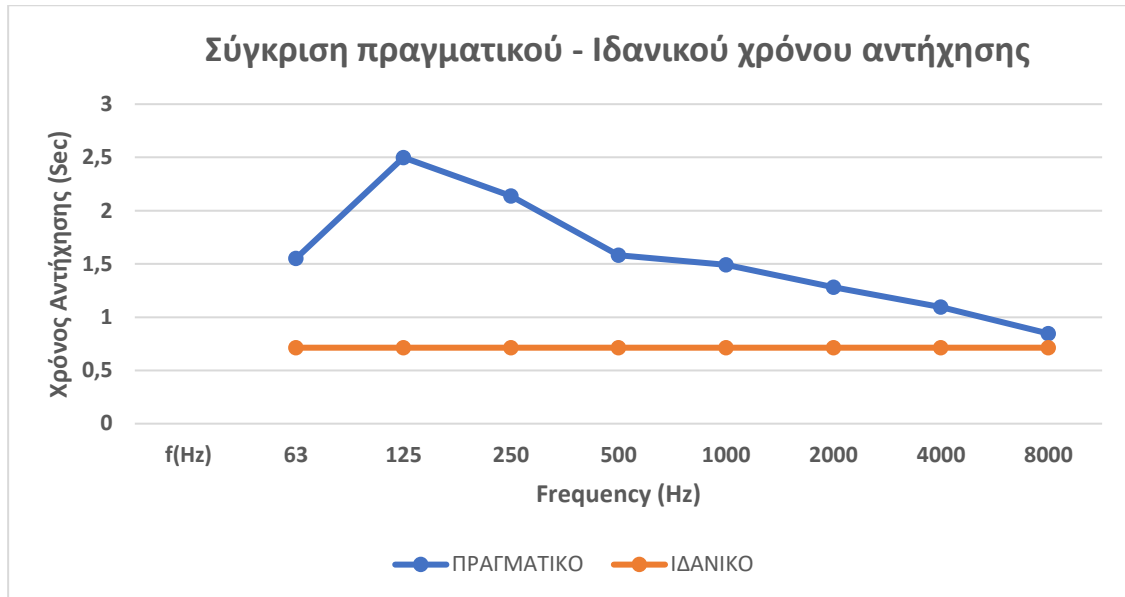
Με βάση τον παραπάνω τύπο υπολογίζουμε τον ιδανικό χρόνο αντήχησης για r=4. Διότι έχουμε να κάνουμε αίθουσα διδασκαλίας σε σχολείο

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \Leftrightarrow RT_{60} = 4(0.012\sqrt[3]{222} + 0.107) \Leftrightarrow RT_{60} = 0,71sec$$

Παρακάτω παρουσιάζεται σύγκριση του χρόνου αντήχησης με γεμάτη αίθουσα χωρίς ανθρώπους

Συχνότητα f(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>RT<sub>60</sub> ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ</b> αίθουσα γεμάτη χωρίς ανθρώπους (seconds)	1,55	2,50	2,14	1,58	1,49	1,28	1,09	0,85
<b>RT<sub>60</sub> ΙΔΑΝΙΚΟ</b> (seconds)	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71

Πίνακας 11: Σύγκριση πραγματικού και πειραματικού (αίθουσα γεμάτη χωρίς ανθρώπους) χρόνου αντήχησης



Διάγραμμα 7: Σύγκριση πραγματικού και ιδανικού χρόνου αντήχησης

Με βάση τον Πίνακα 11 και το Διάγραμμα 7 παρατηρούμε ότι ο πειραματικός χρόνος αντήχησης στις συχνότητες 63Hz-500Hz κυμαίνεται από 1,5-2,5 sec. Είναι το εύρος των χαμηλών προς μεσαίων συχνοτήτων το οποίο συνήθως είναι και το πιο δύσκολο να γίνει μεγάλη ηχοαπορρόφηση. Δηλαδή να φτάσουμε κοντά στο 1sec που είναι ένας ιδανικός αριθμός. Στην συνέχεια από τα 500Hz-8000Hz παρατηρούμε σταδιακή μείωση του χρόνου αντήχησης και μάλιστα στα 8000Hz ο πραγματικός χρόνος αντήχησης έρχεται πολύ κοντά στον ιδανικό. Στο εύρος 63Hz-1000Hz οι αποκλίσεις είναι μεγάλες με τον πραγματικό χρόνο αντήχησης να είναι τουλάχιστον δύο φορές πάνω του ιδανικού.

### 3.2.1 Χρόνος αντήχησης με την παρουσία ανθρώπων

Στην συνέχεια ακολουθεί πίνακας και διάγραμμα της σύγκρισης του χρόνου αντήχησης μεταξύ τον αριθμό ανθρώπων συναρτήσει της συχνότητας. Όταν μπαίνει μαθητής η καρέκλα του δεν συμμετέχει στη συνολική απορρόφηση για τους 8 μαθητές, 12 μαθητές και 24 μαθητές αντίστοιχα. Με βάση την σχέση (13) καταλήγουμε στα εξής αποτελέσματα:

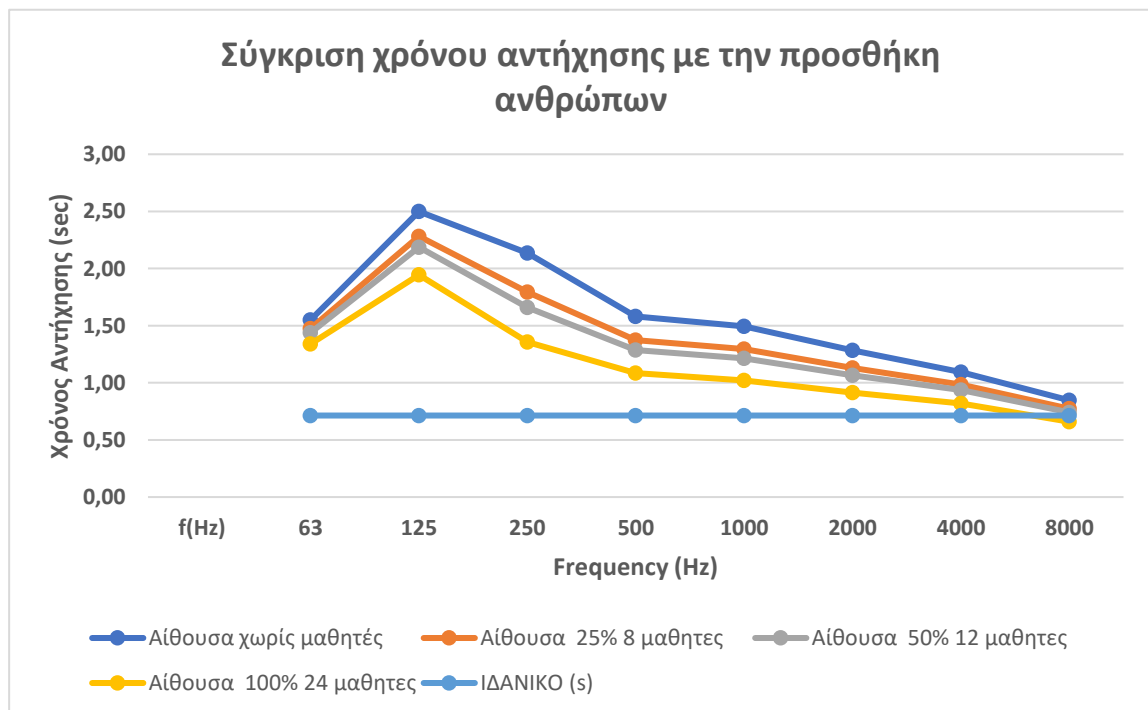
$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A+N \cdot A_{\text{ατόμου}}} \quad (13)$$

Όπου N ο αριθμός των ατόμων και  $A_{\text{ατόμου}}$  η απορρόφηση ανά άτομο

(Αίθουσα με μαθητές: υπολογισμός της απορρόφησης με θρανία, χωρίς καρέκλες και 24 ανθρώπους!)

Συχνότητα F(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT <sub>60</sub> Αίθουσα χωρίς μαθητές (seconds)	1,55	2,50	2,14	1,58	1,49	1,28	1,09	0,85
RT <sub>60</sub> Αίθουσα 25% 8 μαθητές (seconds)	1,47	2,28	1,79	1,37	1,29	1,13	0,98	0,77
RT <sub>60</sub> Αίθουσα 50% 12 μαθητές (seconds)	1,44	2,19	1,66	1,29	1,21	1,07	0,94	0,74
RT <sub>60</sub> Αίθουσα 100% 24 μαθητές (seconds)	1,34	1,94	1,36	1,09	1,02	0,91	0,82	0,66
RT <sub>60</sub> ΙΔΑΝΙΚΟ (s)	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71

Πίνακας 12: Σύγκριση χρόνου αντήχησης με τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται στην αίθουσα



Διάγραμμα 8: Σύγκριση χρόνου αντήχησης με τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται στην αίθουσα

Με βάση τον **Πίνακα 12** και το **Διάγραμμα 8** παρατηρούμε ότι όσο γεμίζει η αίθουσα με μαθητές τόσο περισσότερο πλησιάζουμε στον ιδανικό χρόνο αντήχησης. Αυτό βέβαια γίνεται αντιληπτό κυρίως στο συχνοτικό εύρος μεταξύ 2000Hz-8000Hz. Στο χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων 63Hz - 500Hz υπάρχει μια μικρή μείωση στον χρόνο αντήχησης αλλά εξακολουθεί να ξεχωρίζει σε σύγκριση με τις μεσαίες-υψηλές συχνότητες. Στα 125Hz φαίνεται πως υπάρχει το μεγαλύτερο πρόβλημα. Στην κατάσταση με τους 24 μαθητές βλέπουμε ότι μόνο στα 8000Hz ο χρόνος αντήχησης μειώνεται στα 0,66sec που είναι πιο χαμηλά από τον ιδανικό χρόνο αντήχησης 0,71sec

### 3.3 Πρόταση ακουστικής βελτίωσης

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουμε από το Κεφάλαιο 2 παρατηρούμε ότι ο χρόνος αντήχησης είναι αρκετά αυξημένος. Οι τιμές σε decibel των ακουστικών δεικτών C50,C80 είναι μικρότερες από το ιδανικό. Τα ποσοστά του δείκτη D50 είναι επίσης αρκετά χαμηλά και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη αύξηση. Επίσης οι τιμές του Κεντρικού χρόνου TS σε sec δεν είναι αρκετά μειωμένες. Άρα πρέπει να αυξήσουμε την απορρόφηση. Αν αυξηθεί η απορρόφηση θα έχουμε μείωση του ανακλώμενου ήχου. Για να γίνει αυτό τοποθετούνται ηχοαπορροφητικά υλικά στους τοίχους, στο ταβάνι και στο πάτωμα. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποια ηχοαπορροφητικά υλικά τι συντελεστή απορρόφησης προσφέρουν συναρτήσει της συχνότητας. Ενδεικτικά εμείς θα χρησιμοποιήσουμε στο Κεφάλαιο 3.4 το ξυλόμαλλο και θα δούμε πως επηρεάζει και τι βελτίωση προσφέρει στον χρόνο αντήχησης αλλά και στην απορρόφηση της αίθουσας.

#### 3.3.1 Χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών

##### Ξυλόμαλλο σε συνδυασμό με γυψοσανίδα

Το ξυλόμαλλο<sup>1</sup> είναι μια σύνθετη θερμομονωτική πλάκα όπου οι ακουστικές του ιδιότητες, συνδυάζουν την ανοικτή δομή της επιφάνειας του ξυλόμαλλου με τις ηχοαπορροφητικές ιδιότητες του πετροβάμβακα. Έχει μεγάλη αντοχή στο χρόνο και υπό δύσκολες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας.



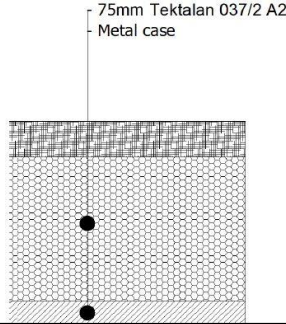
Εικόνα 15: Ξυλόμαλλο

Διαστάσεις 2m x 0,60m x 0,075m

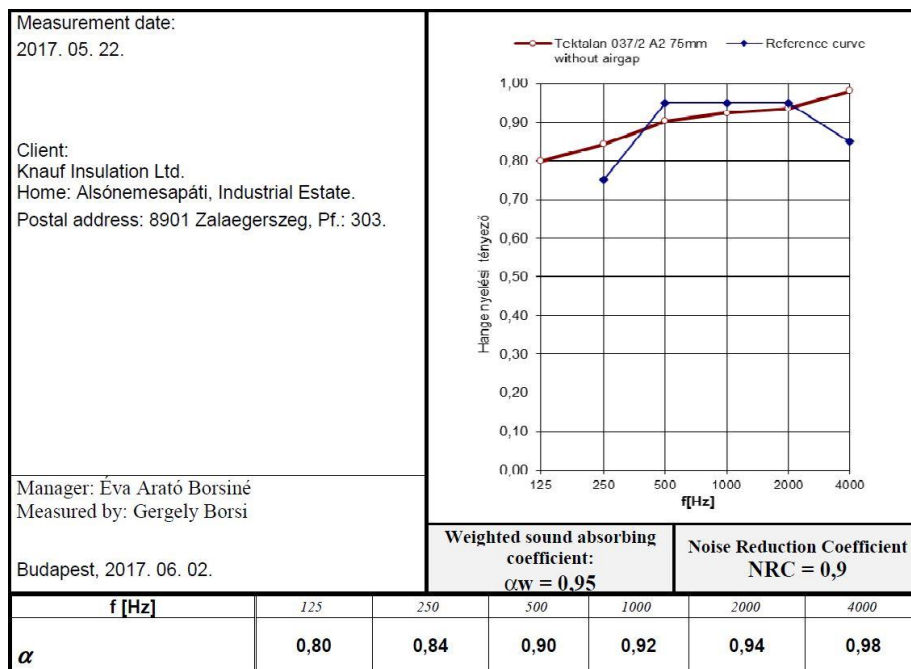
Πάχος 75mm(0,075m)

---

<sup>1</sup> Knauf insulation: <https://www.knaufinsulation.gr/>

Nature of tests: <b>Laboratory sound absorption tests in Kund tube</b>	Number: <b>AR-1747-4</b>
Measured structure:	
Tektalan 037/2 A2 75mm without airgap	 <p>- 75mm Tektalan 037/2 A2 - Metal case</p>

**Εικόνα 16: Πάχος και πυκνότητα υλικού με βάση τα στοιχεία της Knauf**

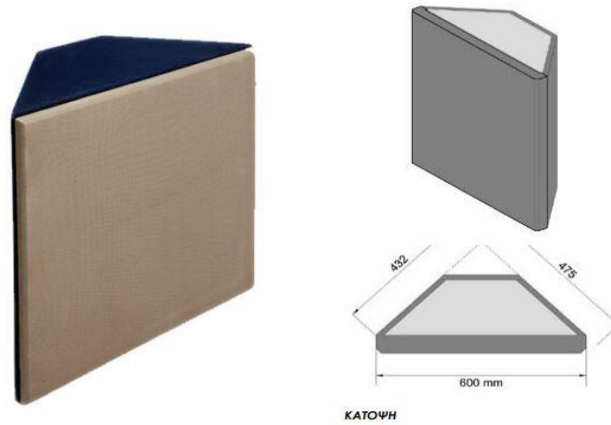


**Εικόνα 17 : Συντελεστής απορρόφησης ξυλόμαλλου από την Knauf**

Από την Εικόνα 17 παρατηρούμε ότι ο συντελεστής απορρόφησης έχει πολύ καλή απόδοση σε όλο σχεδόν το συχνοτικό εύρος. Ξεκινάει από το 0,8 στα 125Hz και έχει σταθερή αύξηση μέχρι τα 4000Hz. Με βάση λοιπόν τα δεδομένα που υπολογίζουμε στο Κεφάλαιο 3.4 καταλαβαίνουμε ότι το ηχοαπορροφητικό υλικό αυτό σε συνδυασμό με έναν σκελετό γυψοσανίδας με αντικραδασμικές βάσεις για να αποφεύγουμε τις ηχογέφυρες θα έχουμε μια πολύ μεγάλη βελτίωση στην ακουστική του χώρου. Και θα έχουμε εστίασει στις χαμηλές συχνότητες που είναι και το βασικό μας πρόβλημα.

## Μπασοπαγίδες

Οι χαμηλές συχνότητες έχουν τα ελάχιστα και τα μέγιστα σημεία ηχητικής πίεσης στις γωνίες του δωματίου η τοποθέτηση μπασοπαγίδων στα σημεία αυτά αποτελεί μια αποδοτική λύση. Τοποθετούνται συνήθως στις γωνίες του χώρου



Εικόνα 18: Μπασοπαγίδα

#	Order Code	Description	Sound Absorption Co-efficient $\alpha_n$ Graph (ISO 354)	Sound Absorption Co-efficient $\alpha_n$ Frequency Spectrum (Hz)						
				F (Hz)	63	80	100	125	160	200
9	<b>B120B+R</b>	TRAP 120x60x25cm Box Type with membrane, with additional fiber sound absorption slab		F (Hz)	63	80	100	125	160	200
				$\alpha_n$	0.26	0.67	0.72	0.47	0.61	0.48
				F (Hz)	250	315	400	500	630	800
				$\alpha_n$	0.55	0.75	0.92	0.88	0.95	0.90
			F (Hz)	1000	1600	2000	3150	4000	5000	
			$\alpha_n$	0.86	0.76	0.78	0.71	0.72	0.78	
10	<b>B120M8+R</b>	TRAP 120x60x25cm Box Type with membrane, with additional fiber sound absorption slab		F (Hz)	63	80	100	125	160	200
				$\alpha_n$	0.27	0.50	0.63	0.42	0.67	0.49
				F (Hz)	250	315	400	500	630	800
				$\alpha_n$	0.57	0.72	0.86	0.99	0.97	0.87
			F (Hz)	1000	1600	2000	3150	4000	5000	
			$\alpha_n$	0.85	0.75	0.81	0.74	0.78	0.76	

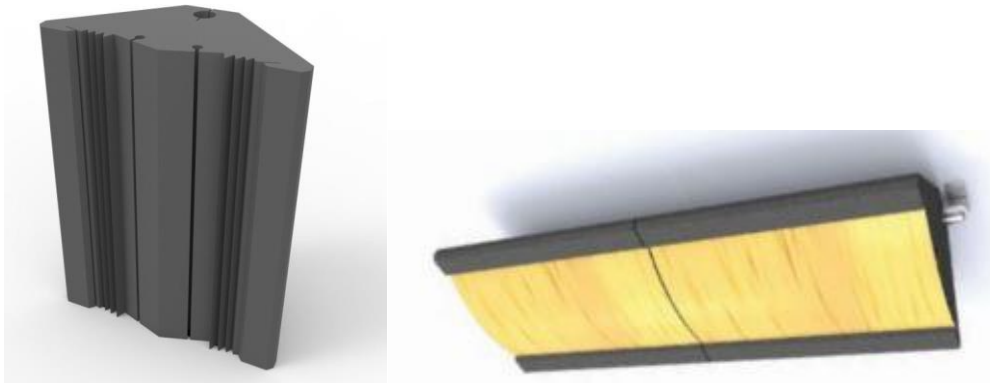
Εικόνα 19: Χαρακτηριστικά συντελεστή απορρόφησης μπασοπαγίδων



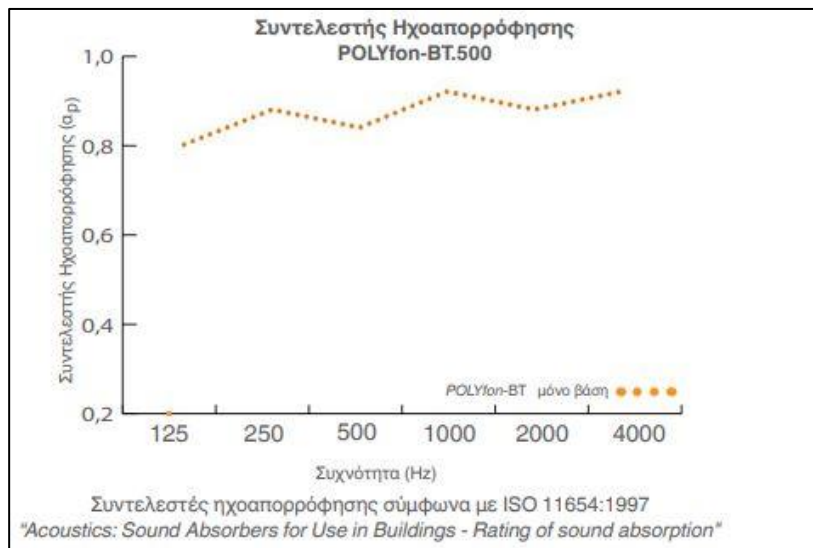
Εικόνα 20: Εφαρμογή μπασοπαγίδας σε δωμάτιο



Η μασοπαγίδα<sup>2</sup> POLYfon-BT είναι ένα καινοτόμο υβριδικό πλαίσιο απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων που συνδυάζει ταυτόχρονα χαρακτηριστικά Ηχοαπορρόφησης & Διάχυσης του ήχου. Μπορεί να τοποθετηθεί στις γωνίες ενός δωματίου, προκειμένου να βελτιώσει την ακουστική ποιότητα και τον χρόνο αντήχησης, βοηθώντας έτσι στη μείωση των ανεπιθύμητων ανακλάσεων, φαινόμενα ηχούς και στάσιμα κύματα. Αποτελείται από το κυρίως μέρος, POLYfon-BT Base και την πρόσθετη. Διαστάσεις: 600 x 210 x 460 mm



**Εικόνα 21: Μασοπαγίδα Polyphon BT.500**



**Διάγραμμα 9: Συντελεστής ηχοαπορρόφησης Polyphon BT.500**

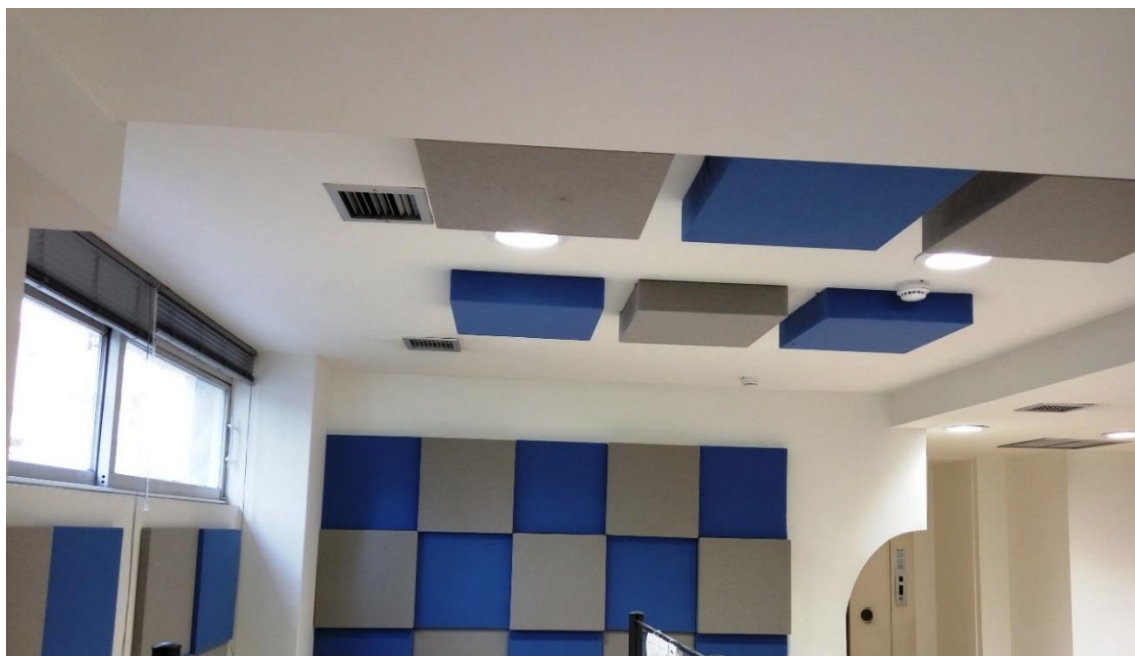
Συχνότητα f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Polyphon BT 500	0,8	0,9	0,85	0,95	0,9	0,95

**Πίνακας 13: Συντελεστής ηχοαπορρόφησης Polyphon BT.500**

<sup>2</sup> Alpha Acoustics: <https://alphacoustic.com/>

## Ηχοαπορροφητικά πάνελ

Τα ηχοαπορροφητικά πάνελ οροφής και τοίχου<sup>3</sup> αποτελούν μια εύκολη και αποδοτική λύση για την μείωση του χρόνου αντήχησης σε γραφεία αίθουσες, θέατρα, στούντιο κ.α. Είναι πλήρως τυλιγμένα με ακουστικά – ηχοδιαπερατά υφάσματα. Προσφέρουν μείωση των ενοχλητικών ανακλάσεων του θορύβου και ένα καλύτερο ακουστικό περιβάλλον, καθώς επίσης βελτιώνουν σημαντικά την ακουστική απόδοση του χώρου. Επίσης έχουν και διαφορετικά σχήματα, χρώματα που βοηθάει και στη διακόσμηση και αισθητική του χώρου που μας ενδιαφέρει. Τυπικές Διαστάσεις: 60 x 60 x 5 cm.



Εικόνα 22: Εφαρμογή πάνελ σε ένα γραφείο

ALPHAcoustic-AP,Ortho Type:	Practical Sound Absorption Coefficient $\alpha_p$						Weighted Sound Absorption Coefficient ( $\alpha_w$ )	Sound Absorption Class
	Frequency (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000		
Thickness 30 mm	0.05	0.3	0.75	0.8	0.9	0.85	0.8	B
Thickness 50 mm	0.20	0.75	0.9	1	1	1	1	A
Thickness 80 mm	0.45	0.95	1	1	1	1	1	A

Πίνακας 14: Συντελεστής απορρόφησης πάνελ ανάλογα με το πάχος τους

Με βάση τον Πίνακα 14 από την Alpha acoustics παρατηρούμε ότι το πάχος των πάνελ είναι βασικός στην απόδοση του συντελεστή απορρόφησης του υλικού και στην ακουστική βελτίωση που προσφέρει στον χώρο.

<sup>3</sup> Alpha Acoustics: <https://alphacoustic.com/>

### Ενδεικτικά παραδείγματα τοποθέτησης ηχοαπορροφητικών υλικών

Για να μειωθεί ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας πρέπει να αυξήσουμε την απορρόφηση. Οπότε θα χρειαστεί να γίνει ένας συνδυασμός υλικών.

- Αρχικά μασοπαγίδες στις τέσσερις βασικές γωνίες της αίθουσας για να εστιάσουμε στην μείωση των χαμηλομεσαίων συχνοτήτων που είναι και το κύριο πρόβλημα αντήχησης της αίθουσας.
- Ειδικές κουρτίνες με ειδικό ηχομονωτικό λάστιχο ενδιάμεσα του ηχοαπορροφητικού υφάσματος.
- Πάνελ ηχοαπορρόφησης στην οροφή και στους τοίχους και να καλυφθούν όσες το δυνατόν περισσότερες επιφάνειες για να μειωθούν οι ανακλάσεις.
- Τοποθέτηση ειδικών φωτιστικών ηχοαπορρόφησης ώστε να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη απόδοση στην επένδυση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε.
- Για το πάτωμα: Τοποθέτηση ηχομονωτικού αντικραδασμικού ρολού από ανακυκλωμένο ελαστικό και φελλό με εξαιρετική ελαστικότητα με σκοπό την δημιουργία πλωτού δαπέδου (laminare). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατευθείαν πάνω σε επίπεδη επιφάνεια δαπέδου ή πάνω από παλιά επικάλυψη.

Με αυτό τον τρόπο καλύπτουμε μεγάλο συχνοτικό εύρος αλλά και τις χαμηλές-μεσαίες συχνότητες που μας ενδιαφέρουν περισσότερο.



Εικόνα 23: Εφαρμογή πλωτού δαπέδου με ηχομονωτικό αντικραδασμικό ρολό

### 3.4 Βελτίωση ως προς τον χρόνο αντήχησης

Σε μια αίθουσα διδασκαλίας είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει καλή ακουστική. Για να βελτιωθεί ο χρόνος αντήχησης χρειάζεται να αυξήσουμε την απορρόφηση, γεγονός που θα συντελέσει και στην βελτίωση των ακουστικών δεικτών  $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  και TS. Στον Πίνακα 15 ενδεικτικά επιλέγουμε τις ηχοαπορροφητικές πλάκες ξυλόμαλλου για να επενδύσουμε ένα μέρος της αίθουσας. Γίνεται σύγκριση του χρόνου αντήχησης και της απορρόφησης όταν βάζουμε τις ηχοαπορροφητικές πλάκες με την αίθουσα να είναι γεμάτη με 24 ανθρώπους και τα αντικείμενα (καρέκλες, θρανία). Θα μελετήσουμε για το συχνοτικό εύρος 125Hz - 4000Hz διότι οι περισσότερες εταιρείες με ηχοαπορροφητικά υλικά εστιάζουν στο συγκεκριμένο εύρος και όχι από τα 63Hz - 8000Hz. Αρχικά βρίσκουμε την απορρόφηση που έχει η αίθουσα μαζί με τους 24 ανθρώπους από την Σχέση 4 του Sabine. Δηλαδή την απορρόφηση που έχει η αίθουσα χωρίς προσθήκη υλικού. Στην συνέχεια γνωρίζοντας τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού και του τείχους μπορούμε να βρούμε την συνολική απορρόφηση που θα έχει η αίθουσα με την τοποθέτηση του ηχοαπορροφητικού υλικού και τον χρόνο αντήχησης. Αν αυξήσουμε τον αριθμό τετραγωνικών μέτρων του υλικού στην αίθουσα τότε θα έχουμε αύξηση της απορρόφησης και μείωση του χρόνου αντήχησης.

Εμβαδόν υλικού στην αίθουσα ( $m^2$ ) = 20	Συχνότητα f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$a_{υλικού}$	Συντελεστής απορρόφησης υλικού	0,8	0,84	0,9	0,92	0,94	0,98
$a_{τείχου}$	Συντελεστής απορρόφησης τείχους	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
$A_{χωρίς\ παρέμβαση}$	Απορρόφηση χωρίς παρέμβαση (Sabines)	18,4	26,3	33	35	39,1	43,7
$A_{αφαιρείται}$	Απορρόφηση που αφαιρείται	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8
$A_{προστίθεται}$	Απορρόφηση που προστίθεται	16	16,8	18	18,4	18,8	19,6
$A_{ολ}$	Συνολική απορρόφηση	34,2	42,7	50,6	53	57,3	62,5
$RT_{60}$	Τελικός Χρόνος αντήχησης	1,0	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6

Πίνακας 15: Προσθήκη ηχοαπορροφητικού υλικού

Για τα **500 Hz**

Από τον Πίνακα 15 γνωρίζουμε τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού και του τείχου όπως και την απορρόφηση χωρίς παρέμβαση. Άρα μπορούμε να βρούμε την απορρόφηση που αφαιρείται, που προστίθεται, την συνολική απορρόφηση και τον τελικό χρόνο αντήχησης.

Για τον υπολογισμό **απορρόφησης που αφαιρείται:**

$$A_{\text{αφαιρείται}} = E_{\text{υλικού}} \times a_{\text{τείχου}} = 20 \times 0,02 = 0,4 \text{ Sabines}$$

Υπολογισμός **Απορρόφησης που προστίθεται:**

$$A_{\text{προστίθεται}} = E_{\text{υλικού}} \times a_{\text{υλικού}} = 20 \times 0,9 = 18 \text{ Sabines}$$

Υπολογισμός **Συνολικής Απορρόφησης**

$$A_{\text{χωρίς παρέμβαση}} = 18,4 \text{ Sabines}$$

$$\text{Άρα το } A_{\text{ολ}} = A_{\text{προστίθεται}} + A_{\text{χωρίς παρέμβαση}} - A_{\text{αφαιρείται}} = 18 + 18,4 - 0,4 = 50,6 \text{ Sabines}$$

Υπολογισμός **τελικού χρόνου αντήχησης**

$$V_{\text{αίθουσας}} = 222 \text{ m}^3$$

$$RT_{60} = \frac{0,161 \times V_{\text{αίθουσας}}}{A_{\text{ολ}}} = \frac{0,161 \times 222}{50,6} = 0,7 \text{ sec}$$

Ομοίως γίνεται η ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες συχνότητες.

Πλάκα ξυλόμαλλου (Διαστάσεις)	Συσκευασία (τεμάχια)	Παλέτα ( $\text{m}^2$ )
<b>2m x 0,6m</b>	<b>14</b>	<b>16,8</b>

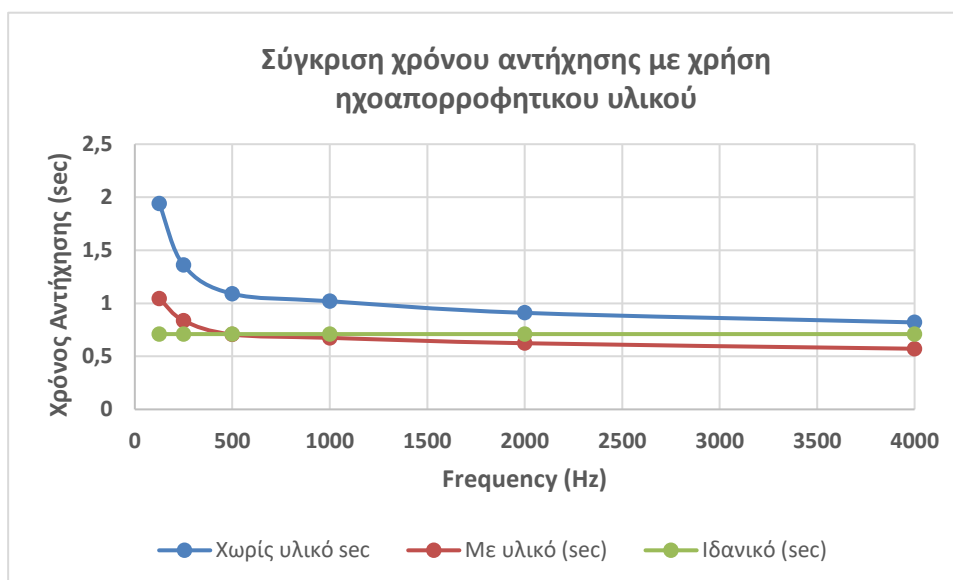
**Πίνακας 16: Ποσότητες υλικού ανά συσκευασία από την Knauf**

Από τον Πίνακα 16 παρατηρούμε ότι οι διαστάσεις της ηχοαπορροφητικής πλάκας είναι 2m x 0,6m και πάχος 75mm(0,075m). Η μια πλάκα καλύπτει  $1,2\text{m}^2$ . Η συσκευασία ανά παλέτα περιέχει 14 πλάκες. Με βάση τον Πίνακα 16 θα χρειαστούμε 1 παλέτα ξυλόμαλλου συν 3 τεμάχια ακόμα δηλαδή  $20\text{m}^2$ . Άρα 17 τεμάχια συνολικά (πλάκες).

Συχνότητα f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
RT <sub>60</sub> Χωρίς υλικό (sec)	1,94	1,36	1,09	1,02	0,91	0,82
RT <sub>60</sub> Με υλικό (sec)	1	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
RT <sub>60</sub> Ιδανικό (sec)	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71

**Πίνακας 17: Σύγκριση χρόνου αντήχησης με τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού**

Με βάση τον Πίνακα 17 και το Διάγραμμα 10 παρατηρούμε ότι ο χρόνος αντήχησης με την προσθήκη ηχοαπορροφητικού υλικού 20m<sup>2</sup> στην αίθουσα ο χρόνος αντήχησης μειώνεται σε μεγάλο βαθμό κάτω από 1 sec σχεδόν σε όλο το συχνοτικό εύρος που μας ενδιαφέρει. Στο συχνοτικό εύρος 2000Hz - 4000Hz βλέπουμε ότι ο χρόνος αντήχησης με την προσθήκη του υλικού είναι μικρότερος από τον ιδανικό. Επίσης σημαντική βελτίωση έχουμε στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες δηλαδή το συχνοτικό εύρος 125Hz - 500Hz που ήταν και το κύριο πρόβλημα στον χρόνο αντήχησης της αίθουσας. Τα 20m<sup>2</sup> ηχοαπορροφητικού υλικού θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στο πίσω μέρος του ταβανιού.



**Διάγραμμα 10: Σύγκριση χρόνου αντήχησης με τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού**

### 3.5 Επιπλέον ακουστική βελτίωση

#### Βελτίωση ως προς τον θόρυβο

Μια αίθουσα διδασκαλίας εκτός από την μείωση του χρόνου αντήχησης εντός της αίθουσας χρειάζεται να είναι προστατευμένη και από τους εξωτερικούς θορύβους (διάδρομος μεταξύ της αίθουσας, παράθυρα). Διότι ο θόρυβος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την συγκέντρωση και την προσήλωση των μαθητών στο μάθημα.

- **Κουφώματα**

Αρχικά σημαντική παρέμβαση είναι η αλλαγή κουφωμάτων. Τα παράθυρα πρέπει να έχουν διπλό τζαμί και να κλείνουν αεροστεγώς. Με αυτό τον τρόπο δεν θα έχουμε απώλειες αέρα και έτσι γίνεται και μια πολύ σημαντική βελτίωση στο κομμάτι της ηχομόνωσης και της μείωση εξωτερικών θορύβων της αίθουσας.

- **Επένδυση Πόρτας**

Η πόρτα να έχει εσωτερική επένδυση πετροβάμβακα και αεροστόπ γύρω της για να κλείνει αεροστεγώς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αίθουσα να γίνεται περισσότερο ανεξάρτητη όσο αναφορά την ηχομόνωση και ηχοαπορρόφηση της αίθουσας. Επίσης δεν θέλουμε να διέρχεται ήχος από τον διάδρομο που ενώνει τις υπόλοιπες αίθουσες γιατί κι αυτό επηρεάζει την απόδοση της ακουστικής βελτίωσης που θέλουμε να πετύχουμε.

- **Επένδυση θρανίων και καρεκλών**

Η επένδυση των δύο αυτών αντικειμένων με ηχοαπορροφητικά υλικά είναι αρκετά σημαντική ως προς την μείωση θορύβου. Διότι αν παρέμβουμε σε κάθε θρανίο και της έδρας με ηχομονωτικό υλικό και κόντρα πλακέ κάτω από το θρανίο θα απορροφάει τους κτυπογενείς ήχους και κραδασμούς που παράγονται όταν ένας μαθητής γράφει, τοποθετεί αντικείμενα. Ακόμα ειδικά τσοχάκια στα πόδια των καρεκλών της έδρας και των θρανίων. Με αυτό τον τρόπο όταν κάποιο από αυτά τα αντικείμενα σέρνεται στο δάπεδο θα μειώνεται ως έναν βαθμό ο θόρυβος που δημιουργείται. Εσωτερική επένδυση του σκελετού των θρανίων και των καρεκλών με ηχοαπορροφητικό υλικό και σφράγιση των οπών των καρεκλών – θρανίων.

- **Πίνακας**

Τοποθέτηση ηχομονωτικού υλικού πίσω από τον πίνακα που είναι ιδανικό για τον κτυπογενή θόρυβο. Το λάστιχο αυτό χρησιμοποιείται σε επένδυση ηχομόνωσης πατώματος είτε ξύλινου είτε με πλακάκι. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μειωθούν οι κραδασμοί και ο κτυπογενής θόρυβος

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### 4.1 Συμπεράσματα

Αφού κάναμε τις μετρήσεις για τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις της αίθουσας δηλαδή γεμάτη, άδεια, μόνο θρανία, μόνο καρέκλες διαπιστώσαμε ότι η αίθουσα παρουσιάζει πρόβλημα στον χρόνο αντήχησης και την απορρόφηση που προσφέρει. Αναλύσαμε τους ακουστικούς δείκτες C50,C80,D50,TS. Έτσι είχαμε μια πιο λεπτομερή ανάλυση ως προς την συμπεριφορά της αίθουσας όπου η βασική της χρήση είναι για ομιλία. Βρήκαμε την απορρόφηση των αντικειμένων και πόσο συμβάλουν στην συνολική απορρόφηση της αίθουσας και αυτό έχει ιδιαίτερη αξία διότι τα αντικείμενα είναι όλα ίδια στην δευτεροβάθμια εκπαίδευση. Στη συνέχεια γνωρίζοντας θεωρητικά τι απορρόφηση προσφέρει ο ένας άνθρωπος τοποθετήσαμε τρεις διαφορετικές καταστάσεις ως προς τον αριθμό μαθητών δηλαδή 8,12,24 μαθητές αντίστοιχα. Είδαμε πως διαμορφώνεται ο χρόνος αντήχησης όταν η αίθουσα είναι γεμάτη και με ανθρώπους και τι διαφορές παρουσιάζονται στο συχνοτικό εύρος 63Hz-8000Hz συγκρίνοντας και με τον ιδανικό χρόνο αντήχησης που βρίσκουμε θεωρητικά. Τέλος προτείνουμε μια ενδεικτική λύση ακουστικής βελτίωσης της αίθουσας και παρατηρούμε πως μια ποσότητα τετραγωνικών μέτρων ηχοαπορροφητικού υλικού επηρεάζει την συμπεριφορά της αίθουσας ως προς την απορρόφηση και τον χρόνο αντήχησης.

### 4.2 Μελλοντική εργασία

Η μελλοντική εργασία έχει άμεση σχέση με τα τελευταία κεφάλαια τις εργασίας που είναι η εφαρμογή της ακουστικής βελτίωσης που μελετήσαμε για να δούμε και στην πράξη ποσό θα βοηθήσει αυτή η παρέμβαση στα σχολεία και πάνω από όλα τους μαθητές και τους καθηγητές. Ιδανικά οι μετρήσεις για να ήταν πιο ολοκληρωμένες αρχικά θα χρησιμοποιούσαμε ένα ηχόμετρο Class 1 όπου έχει συγκεκριμένη μέτρηση για δείκτες STI-RASTI. Ο δείκτης STI είναι ένας αντικειμενικός δείκτης όπου μετρά το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής λαμβάνοντας υπόψιν του ταυτόχρονα τον θόρυβο βάθους του χρόνου αντήχησης. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1. Για την διέγερση της αίθουσας θα χρησιμοποιούσαμε ένα ηχείο μαζί με λογισμικό πιο εξειδικευμένο στο αντικείμενο των ακουστικών μετρήσεων με περισσότερες λεπτομέρειες και δεδομένα αλλά δεν το είχαμε στην διάθεση μας. Ορισμένες από τις εταιρείες που έχουν τέτοια ηχόμετρα και εξοπλισμό (NTi Audio, Svantek).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Everest, F.A., Pohlmann, K.C. (2009). Master Handbook of acoustics (5th Edition). USA: McGraw Hill
2. Σηφάκης, Μ., & Κουτσοδημάκης, Χ. (2012). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι*. Ρέθυμνο: Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τμήμα Μουσική Τεχνολογίας και Ακουστικής.
3. Σκαρλάτος, Δ. (2015). *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ*. Πάτρα: Gotsis Εκδόσεις.
4. Λουτρίδης Σ.Ι (2015) ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ: Αρχές & Εφαρμογές Εκδόσεις Τζιόλα.
5. Alpha Acoustics, <https://alphacoustic.com/>
6. Knauf insulation, <https://www.knaufinsulation.gr/>
7. Fibran, <https://fibran.gr/>
8. Room Eq Wizard, <https://www.roomeqwizard.com/>
9. Steinberg, <https://www.steinberg.net/audio-interfaces/ur22mkii/>
10. M-Audio, <https://m-audio.com/>
11. Behringer, <https://www.behringer.com/product.html?modelCode=P0118>
12. Nti Audio <https://www.nti-audio.com/en/>
13. Svantek, <https://svantek.com/uk/academy/speech-intelligibility/>