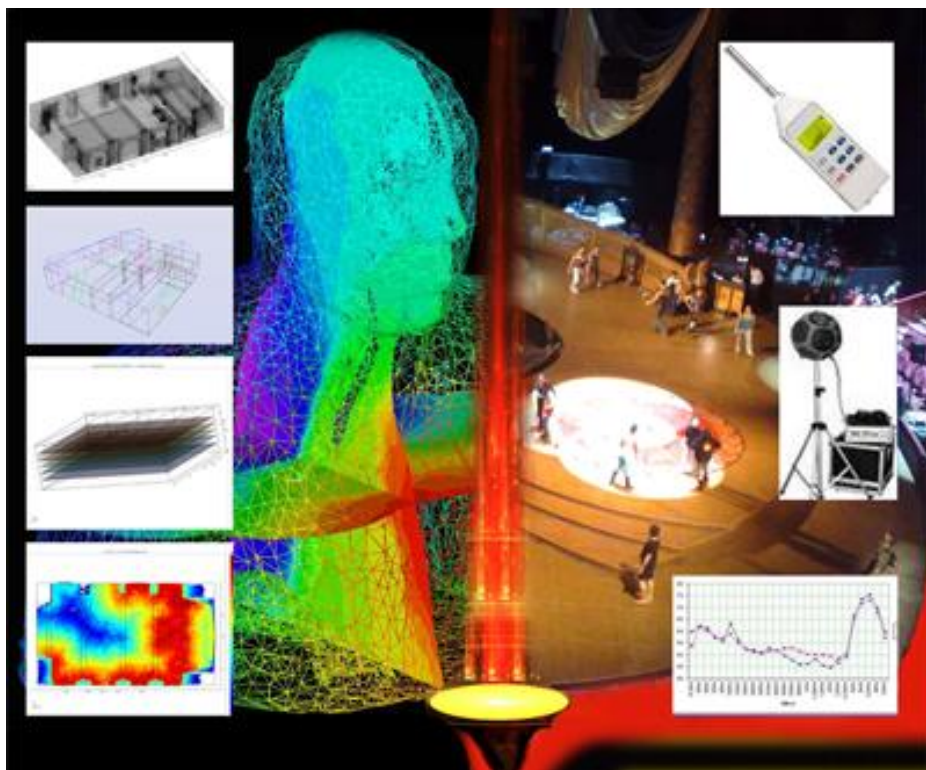


Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ - Παράρτημα Ρεθύμνου
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής

Πτυχιακή Εργασία

«Εφαρμογή Υπολογιστικής Ακουστικής σε Κλειστούς Χώρους»



Σπουδαστής : Μπακατσάκης Ιωάννης (Α.Μ. 309)

Γεώργιος Σταυρουλάκης, Διδάκτωρ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων)

Σπύρος Κουζούπης, Διδάκτωρ (Συνεπιβλέπων)

Σπύρος Μπρέζας, Καθηγητής

Ρεθύμνο
Μάρτιος, 2012

Ευχαριστίες

Τον Καθηγητή κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο από το Πολυτεχνείο Κρήτης για την ανάθεση της πτυχιακής και την αμέριστη, ανιδιοτελής συμπαράσταση και καθοδήγηση.

Τους Καθηγητές του Τ.Ε.Ι Κρήτης κ.κ. Σπύρο Κουζούπη και Σπύρο Μπρέζα καθώς και όλους τους ανθρώπους που συνεργαστήκαμε και διέθεσαν προσωπικό χρόνο για να επιτευχθεί ο σκοπός της πτυχιακής.

Ιδιαίτερος την αδελφή μου, η οποία ήταν δίπλα μου και με στήριζε καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής και όχι μόνο...

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής πραγματεύεται την ακουστική συμπεριφορά των κλειστών χώρων. Συγκεκριμένα, έχει επιλεγθεί η μελέτη i) ενός μεσαίου μεγέθους χώρου, που χρησιμοποιείται κυρίως για θεατρικές παραστάσεις και εκδηλώσεις ομιλίας (Πνευματικό Κέντρο Χανίων) και ii) ενός μεγάλου χώρου για εκδηλώσεις μουσικής (Οκτάβα).

Ο κύριος σκοπός της διατριβής είναι να μελετήσει την ακουστική συμπεριφορά των δύο επιλεγμένων χώρων, με 2 διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης:

- Μία Πειραματική Μέθοδο, όπου χρησιμοποιούνται ακουστικά εργαλεία (Ηχώμετρα, πηγές προσομοίωσης σφαιρικού κύματος κ.α.) για τη μέτρηση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου.
- Μία Θεωρητική προσέγγιση της Υπολογιστικής Ακουστικής, όπου χρησιμοποιείται i) η μέθοδος Ανίχνευσης Ακτινών (*Ray-tracing*) και ii) η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (*FEM*). Η προσομοίωση γίνεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος *Comsol 3.4a*.

Η παρούσα μελέτη θα μας βοηθήσει να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, αλλά και σε ποιο βαθμό η συγκεκριμένη θεωρητική μέθοδος μπορεί να προσεγγίσει την ακουστική συμπεριφορά των χώρων σε σχέση με την πειραματική. Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε αξιολόγηση των υπό μελέτη χώρων σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουμε.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

*Εφαρμογή Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων
και Σύγκριση με Πειράματα, για δύο επιλεγμένους χώρους*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ήχος και Χώροι

1.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ	5
1.2	ΒΑΣΙΚΑ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	7
1.3	ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΧΩΡΩΝ – ΕΙΔΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	9
1.4	ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ	14
1.4.1	ΜΙΚΡΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ	14
1.4.2	ΜΕΓΑΛΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ακουστική και Παραμετροί

2.1	ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΛΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ	24
2.2	ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ	24
2.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	25
2.3.1	ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	25
2.3.2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Υπολογιστική Ακουστική

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ	40
3.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ (RAY - TRACING)	44
3.2.1	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	45
3.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD).....	47
3.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	47
3.3.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	49
3.3.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΕΝΙΚΟΥ ΣΚΟΠΟΥ	49
3.3.4	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	51
3.3.5	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	54
3.3.6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM)	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πειραματικό Μέρος – Επεξεργασία Μετρήσεων

4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΩΡΩΝ	57
4.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ	61
4.2.1	ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	61
4.2.2	ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	64

4.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	67
	α) ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΒΑΘΟΥΣ	67
	β) ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ COMSOL

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	72
5.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΩΡΩΝ	73
	5.2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ	73
	5.2.2 ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΗΧΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ (ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ).....	76
	Α. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	76
5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL 3.4 ^Α	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΙΘΟΥΣΩΝ

6.1	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	80
6.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ	83
6.3	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΧΩΡΩΝ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	84

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

I.	ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΙΜΕΝΟΥ.....	85
II.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ <i>COMSOL</i>	88
III.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	94
IV.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΔΩΜΑΤΙΟ	110

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

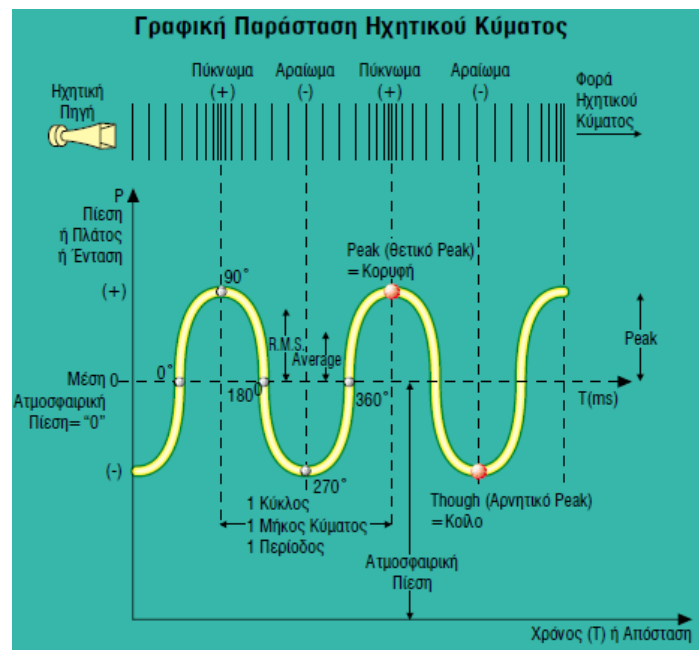
ΗΧΟΣ ΚΑΙ ΧΩΡΟΙ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Ήχος μπορεί να οριστεί ως μια κυματοειδής κίνηση στον αέρα ή σε κάποιο ελαστικό μέσο, που έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση του ακουστικού μηχανισμού και κατά συνέπεια την αντίληψη του ήχου. Τα μόρια κινούνται περιοδικά γύρω από τη θέση ισορροπίας, μεταδίδοντας την κίνηση τους στα διπλανά μόρια. Η μέγιστη απόκλιση από τη θέση ισορροπίας ονομάζεται **πλάτος ταλάντωσης**.

Τα χαρακτηριστικά του ήχου είναι i) η **συχνότητα** $f(\text{Hz})$, η οποία είναι ο αριθμός των περιοδικών μεταβολών ανά μονάδα χρόνου, ii) η **περίοδος** $T(\text{sec})$, που δείχνει πόσος χρόνος χρειάζεται για να γίνει ένας πλήρης κύκλος του ακουστικού κύματος και iii) το **μήκος κύματος** $L(\text{m})$, που είναι η φυσική απόσταση που καλύπτεται από ένα πλήρη κύκλο.

Στο σχ. 1.1 φαίνονται οι τιμές από κορυφή σε κορυφή (*peak - to - peak*) και η τιμή RMS, σε αρμονικά κύματα η ενεργός τιμή ($P_{\text{rms}} = P_{\text{max}} / \sqrt{2}$), όπου P_{max} είναι το μέγιστο πλάτος πίεσης.



Σχήμα 1.1 Γραφική παράσταση ημιτονοειδούς ακουστικού σήματος [22]

Τα **βασικά μεγέθη** που ορίζουν τον ήχο σαν φυσικό μέγεθος είναι :

-Η **Ηχητική Πίεση (P)** (*sound pressure, Pa*), η οποία είναι η μεταβολή πίεσης του μέσου διάδοσης γύρω από τη θέση ισορροπίας και περιγράφεται από την κυματική εξίσωση :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

Όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα [m/sec].
 t ο χρόνος [sec].

-Η Ακουστική Ισχύς Πηγής (W) (*Sound Power, Watt*), είναι ο ρυθμός μετάδοσης της ηχητικής ενέργειας προς όλες τις διευθύνσεις και δίνεται από την εξίσωση :

$$W = \int_S I * ds \quad (1.2)$$

Όπου I η ηχητική ένταση [*Amp*].
 ds είναι το εμβαδόν επιμέρους τμήματος [m^2].

-Η Σωματιδιακή Ταχύτητα (u), η μεταβολή της μέσης ταχύτητας με την οποία κινούνται τα σωματίδια του μέσου διάδοσης γύρω από την θέση ισορροπίας σε επίπεδα κύματα :

$$u_o = \frac{P}{\rho_o c} \quad (1.3)$$

Όπου P η ηχητική πίεση [*dB*].
 ρ_o η πυκνότητα του μέσου [kg/m^3].

-Πυκνότητα Ηχητικής Ενέργειας (W), (*energy density, Pa * m/sec*), είναι η συνολική ηχητική ενέργεια σε ένα σημείο ανεξάρτητα από την διεύθυνση μετάδοσης.

Για επίπεδα κύματα

$$W = \frac{P_{rms}^2}{\rho_o C} \quad (1.4)$$

Όπου p_{rms} η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης [*Pa*].
 ρ_o η πυκνότητα του μέσου [kg/m^3].

-Στάθμη Ηχητικής Πίεσης LP (*Sound Pressure Level ή SPL*), (**dB_{SPL}**)

$$L_p = 10 \log \frac{P_{rms}^2}{P_{o.rms}} \quad (1.5)$$

Όπου P_{rms} η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης [*Pa*].
 $P_{o.rms}$ η τιμή αναφοράς πίεσης [20 μPa σε αέρα].

-**Στάθμη Ηχητικής Ισχύος (L_w) (Sound Power Level), (dB_{swL})**

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_o} \quad (1.6)$$

Όπου W η μέση ηχητική ισχύς [Watt] .
 W_o η τιμή αναφοράς [10^{-12} Watt]

-**Στάθμη Ηχητικής Έντασης (L_I) (Sound Intensity Level), (dB_{sIL}) :**

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_o} \quad (1.7)$$

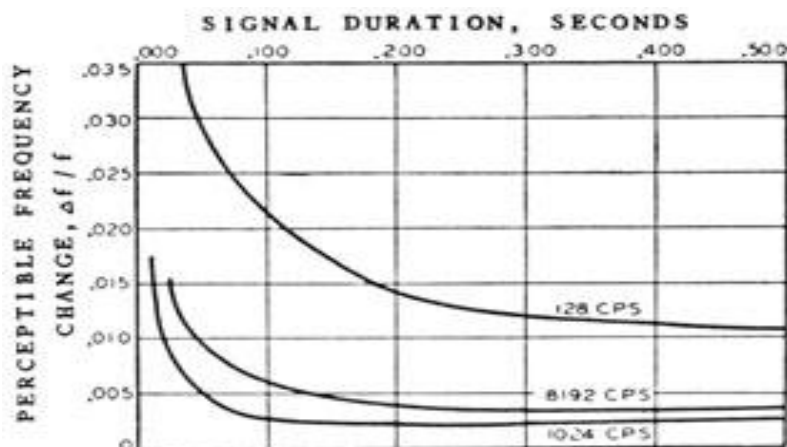
Όπου I η ηχητική ένταση [W/m^2] .
 I_o η τιμή αναφοράς [10^{-12} W/m^2]

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

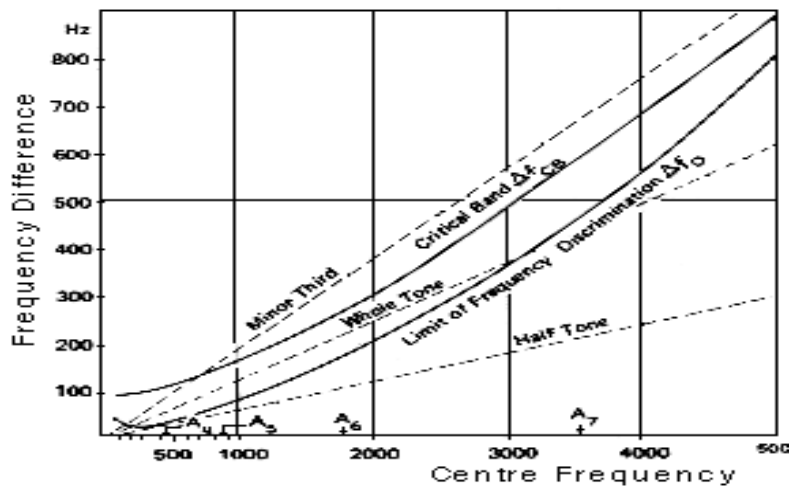
1.2.1 Αντίληψη Συχνότητας

Είναι γνωστό ότι το ακουστικό φάσμα του ανθρώπου είναι από 20 Hz – 20 KHz. Τα συχνотικά διαστήματα τα αντιλαμβανόμαστε καλύτερα με λογαριθμικό τρόπο, έτσι διαχωρίζουμε το ακουστικό φάσμα σε διαστήματα ίσου υποκειμενικού εύρους της λεγόμενες **Οκτάβες**. Μια δεύτερη ιδιότητα είναι η διακριτική ικανότητα του αυτιού, δηλαδή πόσα Hz διαφορά πρέπει να έχουν τουλάχιστον δύο συχνότητες για να τις διαχωρίζει το αυτί μας.

- Λειτουργία μιας πηγής που παίζει μια συχνότητα και αλλάζει **JnD** (Just Noticeable Difference).
- Λειτουργία δυο πηγών που παίζουν ταυτόχρονα την ίδια αρχικά συχνότητα και στη συνέχεια διαχωρίζονται **Dfd** (Limit Frequency of Discrimination).



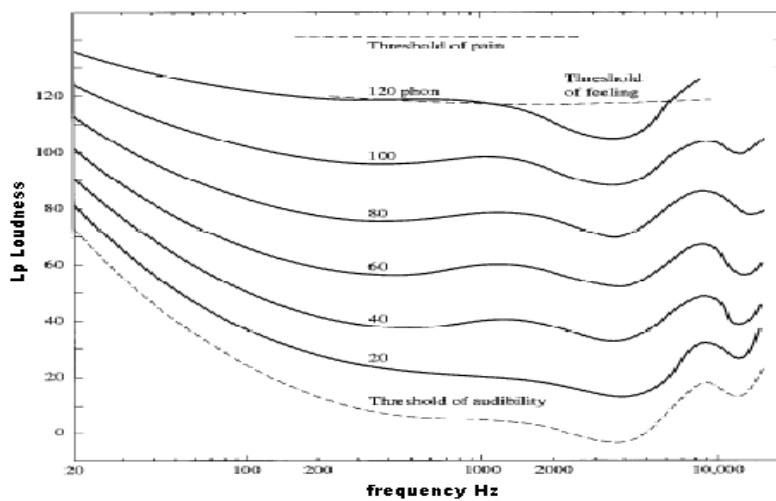
Σχήμα 1.2. Η Μεταβολή $\Delta f / f$ συναρτήσει συχνότητας [14]



Σχήμα 1.3 Η JND συναρτήσει συχνότητας [14]

1.2.2 Αντίληψη της Έντασης

Η αναγνώριση της έντασης του ήχου εξαρτάται από την ένταση του ήχου και την συχνότητα. Το ανθρώπινο αυτί δεν έχει ομοιόμορφη (*flat*) απόκριση συχνότητας, αλλά συγκεκριμένες καμπύλες συχνότητας για διαφορετικές τιμές έντασης, οι οποίες περιγράφονται με καμπύλες ίσης ακουστότητας.



Σχήμα. 1.4 Καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher – Munchon [15] [14]

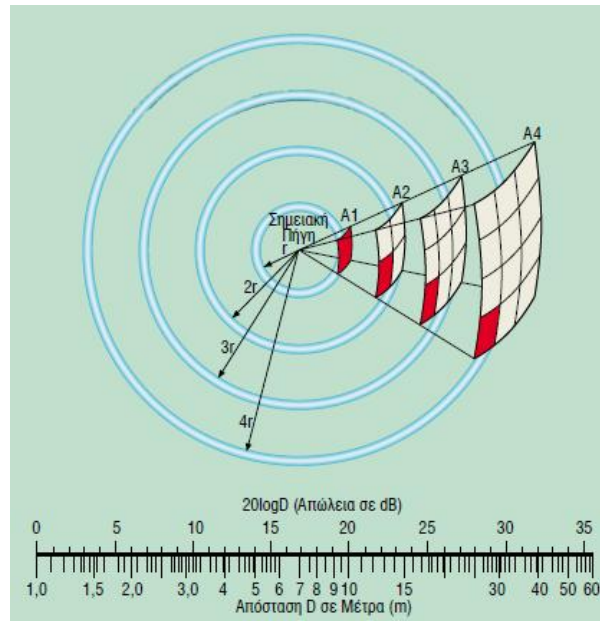
1.2.3 Αντίληψη του Φάσματος

Η χροιά είναι όλα εκείνα τα ειδικά στοιχεία, τα οποία κάνουν έναν ήχο αναγνωρίσιμο και διακριτό από άλλους που έχουν ίδια ένταση και συχνότητα. Η φυσική εξήγηση είναι ότι κάθε σύνθετος ήχος έχει το δικό του εντελώς φάσμα, το οποίο χρησιμοποιεί το αυτί για να τον ξεχωρίσει και να τον ταξινομήσει, δίνοντας του την δυνατότητα να ξεχωρίζει διαφορετικές χροίες που αντιστοιχούν σε διαφορετικά φάσματα. Το φάσμα του ήχου δεν είναι μόνο το συχνοτικό περιεχόμενο, αλλά και οι σχέσεις πλάτους των διαφόρων συχνοτήτων και η φασική σχέση που έχουν μεταξύ τους.

1.3 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΧΩΡΩΝ

Συμπεριφορά του ήχου σε ανοικτό χώρο

Στη μελέτη των ανοικτών χώρων, όπου δεν παρεμβάλλονται αντικείμενα ή ανακλαστικές επιφάνειες θεωρούμε προσεγγιστικά ότι το πεδίο είναι ελεύθερο. Θεωρώντας την πηγή σημειακή, η πίεση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα από την απόσταση από την πηγή. Ισχύει ο νομός του αντίστροφου τετραγώνου (*inverse square law*), όπου έχουμε μείωση της στάθμης 6 dB ανά διπλασιασμό απόστασης.



Σχήμα 1.5 Κύμα σε ανοικτό χώρο [22] [1]

Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστό χώρο

Ο ήχος όταν διαδίδεται σε ανοικτούς χώρους συμπεριφέρεται διαφορετικά από τους κλειστούς χώρους. Στους ανοικτούς χώρους ο ήχος φθίνει απευθείας από την πηγή στο δεκτή, ενώ στους κλειστούς χώρους ο ήχος δημιουργεί εκτός από τον απευθείας (*direct sound*) και διαδοχικές ανακλάσεις από τα τοιχώματα των αντικειμένων του χώρου, αλλοιώνοντας την αρχική κυματομορφή του εκπεμπόμενου ήχου. Επιπλέον, επιδρά στην ακουστική συμπεριφορά η απορρόφηση του ήχου και οι διαστάσεις του χώρου.

Οι τρόποι μελέτης της ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων είναι :

- **Η Κυματική Ακουστική** : Με αυτή την μέθοδο μελετάμε τους μικρούς χώρους, όπου τα κυματικά φαινόμενα και κυρίως αυτά της συμβολής είναι πολύ έντονα.
- **Η Στατιστική Ακουστική** : Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλους και πολύ μεγάλους χώρους. Η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης, καθώς τα κυματικά φαινόμενα είναι πολυσύνθετα.
- **Η Γεωμετρική Ακουστική** : Επίσης, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλους χώρους και οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια της γεωμετρικής οπτικής.

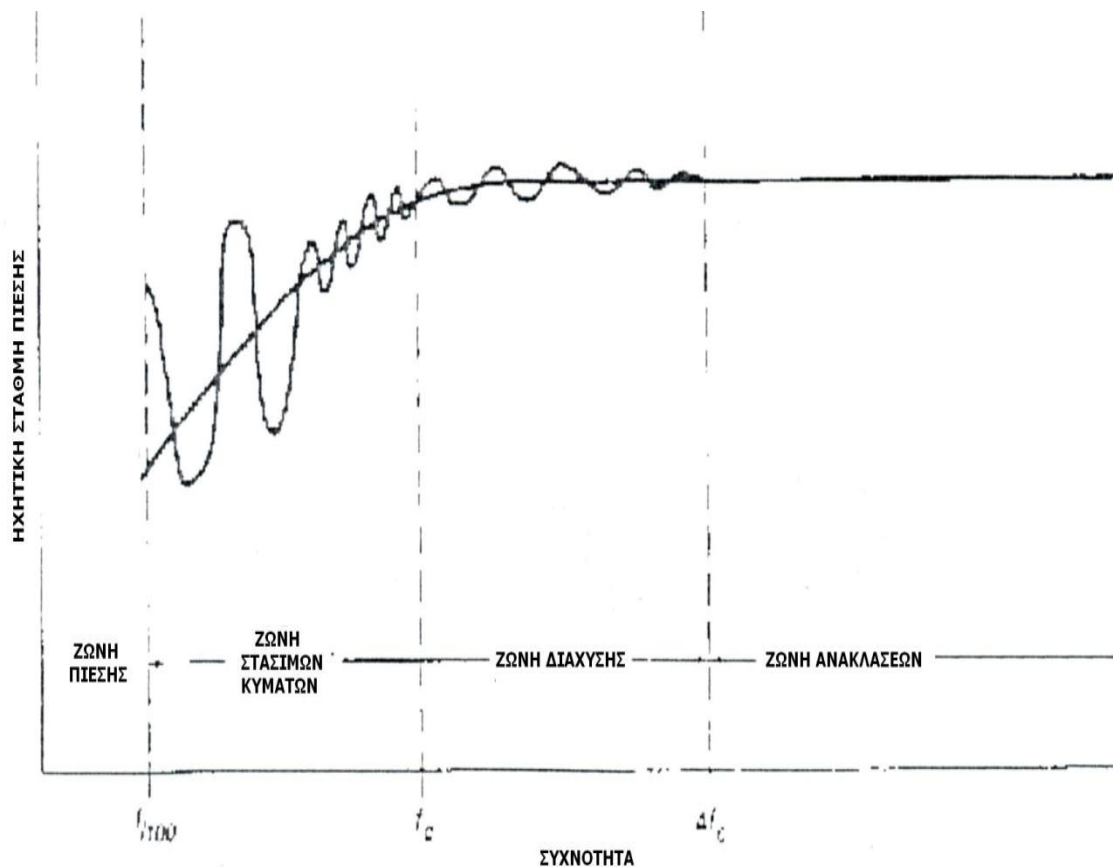
Αναλυτικότερη περιγραφή των τρόπων αυτών θα γίνει παρακάτω.

Διάκριση Χώρων

Η διάκριση των κλειστών χώρων σε μεγάλους ή μικρούς γίνεται με κριτήριο τη συχνότητα αποκοπής f_c (cut-off frequency), η οποία ορίστηκε από τον Schroeder, 1974. Πρόκειται για τη συχνότητα πάνω από την οποία δημιουργείται τόσο μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων, ώστε το δωμάτιο συμπεριφέρεται πρακτικά ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες. Υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (1.8)$$

Όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης [sec].
 V ο όγκος του δωματίου [m^3].



Σχήμα 1.6 Διάγραμμα Bolt, Beranek και Neumann, ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου [27]

Οι Bolt, Beranek, Newman δημιούργησαν ένα διάγραμμα που ονομάζεται «ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», και παρουσιάζει το διαχωρισμό της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή με το διαφορετικό μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου.

Σύμφωνα με το πιο πάνω διάγραμμα έχουμε διαχωρισμό του ακουστικού φάσματος σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές :

- **Ζώνη πίεσης** (*pressure zone/ cut off region*): για $f \leq f_{\min}$ όπου $f_{\min} = \frac{c}{L_{\max}}$

Είναι η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού και οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου.

- **Ζώνη των στάσιμων** (*modal zone*): για $f_{\min} \leq f \leq f_c$ όπου f_c η συχνότητα αποκοπής.

Είναι η περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου. Εφαρμόζονται οι αρχές της κυματικής ακουστικής και το πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο για το λόγο ότι στο χώρο εμφανίζονται έντονοι συντονισμοί.

- **Ζώνη διάχυσης** (*diffusion zone*): για $f_c \leq f \leq 4f_c$

Πρόκειται για μια δύσκολη συχνοτική περιοχή, γιατί όταν εμφανίζονται έντονοι συντονισμοί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της γεωμετρικής και της στατιστικής ακουστικής και είναι όμως αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή των αρχών της κυματικής ακουστικής σε σχέση με το μήκος κύματος.

- **Ζώνη ανακλάσεων** (*specular reflection zone*): για $f \geq 4f_c$

Σε αυτή τη ζώνη επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις. Ο ήχος είναι προτιμότερο να προσεγγίζεται ότι διαδίδεται σε ευθείες – ακτίνες και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

Είδη ηχητικών πεδίων

Ο χώρος γύρω από την πηγή μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές :

α. Κοντινό πεδίο

Κοντινό πεδίο μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου είναι η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου της πηγής, στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση. Για τον καθορισμό της ηχητικής πίεσης λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες, όπως οι διαστάσεις, το είδος του υλικού, η γεωμετρία της πηγής κ.ά.

Αν πρόκειται για σφαιρική πηγή και ισότροπη, η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι δύο μήκη κύματος του εκπεμπόμενου ήχου.

β. Μακρινό πεδίο

Ως μακρινό ηχητικό πεδίο μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου ορίζεται η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι ουσιαστικά σε φάση και στην οποία η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από την πηγή.

Το μακρινό ηχητικό πεδίο αρχίζει μετά το κοντινό πεδίο. Στην περιοχή αυτή η στάθμη ηχητικής πίεσης ελαττώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης και η ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακουστικής πίεσης.

Ένα σημείο βρίσκεται στο χώρο του μακρινού πεδίου, αν η απόσταση του από την πηγή ικανοποιεί τις σχέσεις :

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg l, \quad r \gg \frac{\pi d^2}{2\lambda}$$

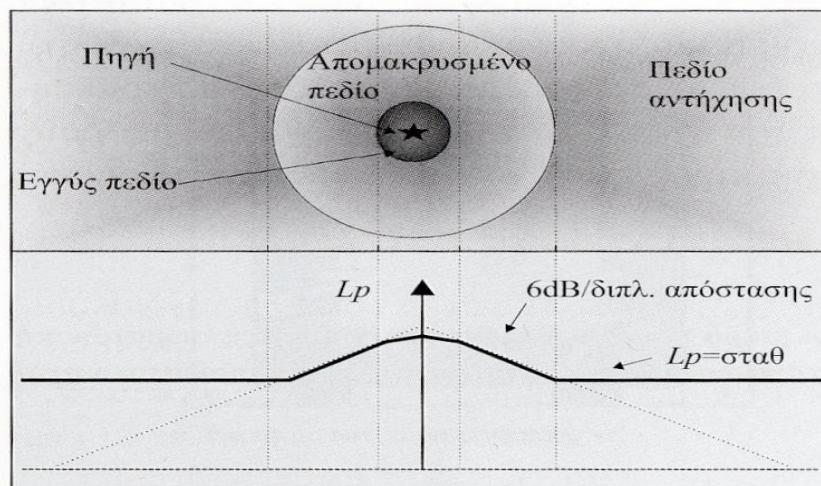
όπου λ το μήκος κύματος του ήχου

l η μεγαλύτερη διάσταση της πηγής

γ. Αντηχητικό πεδίο

Αντηχητικό πεδίο σε ένα ολικά ή μερικά κλειστό χώρο, όπου λειτουργεί ηχητική πηγή, είναι η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου. Το πεδίο αυτό προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στις οριακές επιφάνειες του χώρου. Η επίδραση του ήχου που φτάνει κατευθείαν από την πηγή είναι αμελητέα.

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται τα τρία είδη των πεδίων και η μεταβολή της ηχητικής στάθμης (L_p) συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.



Σχήμα 1.7 Είδη πεδίων [16]

Στην περίπτωση του μακρινού πεδίου η στάθμη μειώνεται λόγω της απόστασης, αλλά και εξαιτίας της απορρόφησης του χώρου.

Το είδος του δημιουργούμενου πεδίου από μια πηγή εξαρτάται από την απόσταση από αυτήν, καθώς κι από τον χώρο στον οποίο γίνεται η διάδοση. Τα ηχητικά πεδία διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

- **Ελεύθερο Πεδίο** (*free field*) :

Αφορά την διάδοση σε χώρο ομοιόμορφο, χωρίς οριακές επιφάνειες που δε διαταράσσεται από άλλες ηχητικές πηγές, στον οποίο η ροή της ενέργειας γίνεται προς μια κατεύθυνση. Ελεύθερο πεδίο μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ένας ανοιχτός εξωτερικός χώρος χωρίς τοίχους και έδαφος ή άλλα ανάλογα εμπόδια.

- **Αντηχητικό Πεδίο** (*reverberant field*) :

Δημιουργείται από τη συμβολή των απευθείας και των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. Σε ένα διάχυτο αντηχητικό πεδίο η πυκνότητα της ηχητικής ενέργειας παραμένει ίδια σε όλα τα σημεία του και η πιθανότητα ροής της ηχητικής ενέργειας είναι ίση προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντηχητικό πεδίο δημιουργείται σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους, με επιφάνειες μικρής ηχοαπορρόφησης, όπου ο ήχος ανακλάται στους τοίχους.

- **Ημιαντηχητικό Πεδίο** (*semi-reverberant field*) :

Σε ένα τέτοιο πεδίο η ηχητική ενέργεια επιδέχεται τόσο ανάκλαση, όσο και απορρόφηση, από ημιανακλαστικά τοιχώματα. Η ροή της ενέργειας γίνεται σε περισσότερες κατευθύνσεις, αλλά σε ορισμένα σημεία του χώρου, κυρίως κοντά στην πηγή παρουσιάζεται έντονη κατευθυντικότητα. Ημιαντηχητικό πεδίο θεωρούμε ότι έχουμε σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με επιφάνειες με μέτρια ηχοανακλαστικότητα.

1.4 ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ

1.4.1 ΜΙΚΡΟΙ ΧΩΡΟΙ

Σε χώρους όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις του χώρου, κυριαρχούν τα κυματικά φαινόμενα. Υπάρχει έντονα το φαινόμενο της δημιουργίας των στάσιμων κυμάτων (κ) έτσι η ηχητική ένταση διαφέρει κατά πολύ από σημείο σε σημείο. Το ηχητικό πεδίο περιγράφεται από την εξής εξίσωση :

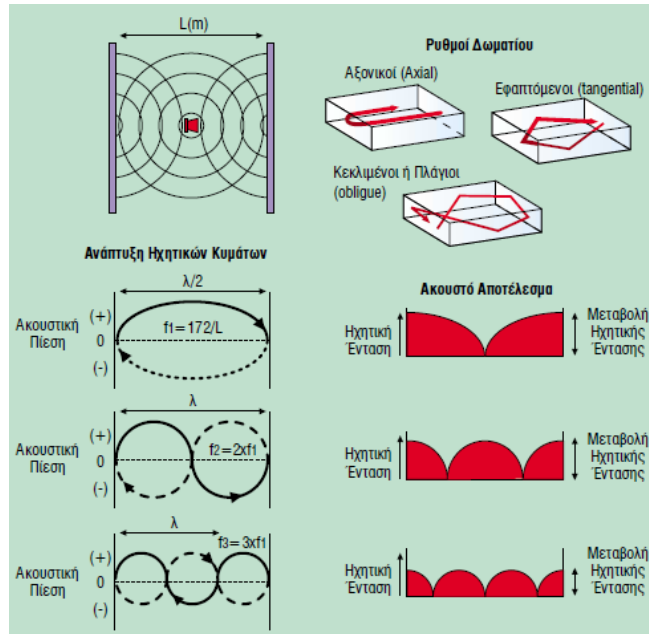
$$p_{\omega t} = \frac{j\omega\rho q}{4\pi|r-r_o|} e^{j\omega(t-\frac{r-r_o}{c})} + pc^2 \sum_o^{\infty} v \frac{q\omega\psi_n(r)\psi_n(r_o)}{\Lambda_n 2\omega_n \zeta_n + j(\omega_n - \omega_\pi^2)} e^{j\omega t} \quad (1.9)$$

Όπου	ω	η συχνότητα της πηγής [Hz]
	ρ	η πυκνότητα του αέρα [kg/m ³].
	q	η ηχητική δύναμη της πηγής. [W/m ² ή Pa]
	c	η ταχύτητα του ήχου στον αέρα [m/sec].
	r	το διάνυσμα του σημείου του χώρου που μελετάται.
	r_o	η θέση της ηχητικής πηγής στο χώρο [m].
	Λ_n	ο παράγοντας κλίμακας που ορίζεται από κάθε στάσιμο κύμα.
	ζ_n	η «αντίσταση» του ν-οστού (n) στάσιμου κύματος.
	Ψ_n	η συχνότητα συντονισμού του στάσιμου κύματος [Hz]

Με (Ψ_n) η κανονική συνάρτηση, όπου $\Psi_n(r) = A_n \cos(\frac{n_x \pi x}{L_x}) \cos(\frac{n_y \pi y}{L_y}) \cos(\frac{n_z \pi z}{L_z})$

Όπου	A_n	το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης.
	L_i	μήκος της αίθουσας στον αντίστοιχο άξονα (i = x,y,z).
	n_u	αριθμός ταλάντωσης στον αντίστοιχο άξονα (i = x,y,z).

Στάσιμο ηχητικό κύμα είναι ένα περιοδικό ηχητικό κύμα που έχει σταθερή κατανομή στο χώρο. Προκαλείται όταν υπάρχουν σε ένα κλειστό χώρο δυο ομοειδή ελευθέρως διαδιδόμενα κύματα, με την ίδια συχνότητα, διεύθυνση ηχομετάδοσης και αντίθετη φορά. Χαρακτηρίζεται από σημεία ελάχιστου μήκους (**κόμβους**) και μεγίστου πλάτους (**κοιλίες**). Δημιουργείται μεταξύ δύο κυμάτων χαμηλής συχνότητας όταν εγκλωβίζονται σε παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες. Το αποτέλεσμα είναι ότι δημιουργείται η αίσθηση ότι ο ήχος δεν κινείται μέσα στο χώρο και υπάρχουν σημεία έντονης αύξησης και μείωσης της έντασης του ήχου.



Σχήμα 1.8 Τρόπος δημιουργίας στάσιμων κυμάτων [22]

Τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται σε έναν κλειστό χώρο διακρίνονται σε τρία είδη:

- **Αξονικά** (*axial*) τα οποία δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ δύο απέναντι επιφανειών. Περιέχουν τη μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια του αντηχητικού πεδίου και είναι αυτά που συνήθως σε μια πρώτη προσέγγιση ενδιαφέρουν τους μηχανικούς ήχου.
- **Εφαπτομενικά** (*tangential*) που δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ τεσσάρων επιφανειών (τοίχοι στο ίδιο επίπεδο). Ενεργειακά έχουν τη μισή ενέργεια σε σχέση με τα αξονικά επομένως είναι κατά 3 dB ασθενέστερα.
- **Πλάγια** (*oblique*) που δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ οκτώ επιφανειών, δηλαδή από όλους τους τοίχους του δωματίου. Η ηχητική τους ενέργεια είναι το 1/4 της αντίστοιχης των αξονικών στάσιμων κυμάτων επομένως 6 dB μικρότερη.

Αριθμός στάσιμων κυμάτων (N) ανά συχνότητα

$$N \cong \left[\frac{4\pi V f^3}{c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \right] \frac{\Delta f}{f} \quad (1.10)$$

Όπου S η συνολική επιφάνεια του δωματίου [m^2].

f η συχνότητα του ήχου [Hz].

V ο όγκος δωματίου [m^3].

Αριθμός στάσιμων κυμάτων εύρους συχνοτήτων (Δf) κεντραρισμένο στη συχνότητα f

$$\Delta N \cong \left[\frac{4\pi V f^3}{c^3} + \frac{\pi S f^2}{2c^2} + \frac{L f}{8c} \right] \frac{\Delta f}{f} \quad (1.11)$$

Τέλος, στους μικρούς χώρους και στην περιοχή των στάσιμων κυμάτων (στις χαμηλές συχνότητες) συνήθως μετριέται η συχνотική απόκριση του δωματίου και υπολογίζεται ο **ρυθμός πτώσης** (*mode decay rate*) κάθε στάσιμου κύματος, δηλαδή ο ρυθμός μείωσης σε dB/sec.

Η σχέση του με το χρόνο αντήχησης (RT) είναι :

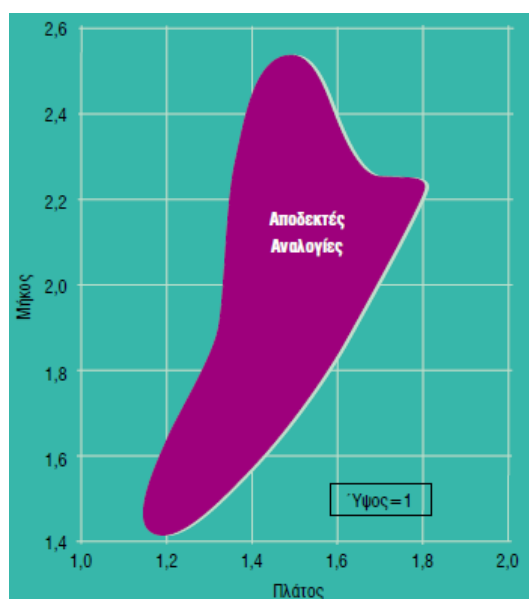
$$d = \frac{60}{RT_{60}} \quad (1.12)$$

Διαστάσεις - Διαμόρφωση Χώρου

Είναι από τις πιο σημαντικές παράγοντες στην ακουστική, ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα και την εσωτερική διαμόρφωση του χώρου. Επηρεάζονται και περιπλέκονται όλα τα φαινόμενα τα όποια χαρακτηρίζουν έναν κλειστό χώρο. Αποτελεί βασικό πρόβλημα για την υπολογιστική ακουστική, διότι δυσκολεύει την πρόβλεψη και ικανοποιητική προσέγγιση των υπολογιστικών μοντέλων.

Για να βελτιωθεί η ακουστική συμπεριφορά ενός μικρού κλειστού χώρου πρέπει i) να ελαχιστοποιηθεί η ισχύς των στάσιμων κυμάτων (Σχήμα 1.8), ii) να μην υπάρχουν επικαλύψεις των ιδιοσυχνοτήτων και iii) να γίνεται ομαλά η προοδευτική τους πύκνωση με την αύξηση της συχνότητας.

Κάθε ιδιοσυχνότητα είναι ενεργή για ένα πλάτος 5 Hz (+/- 2.5Hz) και οι αποστάσεις πάνω από 25 Hz θεωρούνται προβληματικές. Καλό είναι οι διαστάσεις να διαφέρουν από τις υπόλοιπες (2 – 5 %). Όσο πιο χαμηλά βρίσκεται ο πρώτος ρυθμός τόσο το καλύτερο, καθώς το δωμάτιο μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα σε συχνότητες χαμηλότερες του πρώτου ρυθμού, κι έτσι δεν θα δρουν ανεξέλεγκτα χωρίς καμία δυνατότητα έλεγχου από μέρος μας. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι όσο πιο μεγάλο είναι το δωμάτιο, τόσο πιο θετικά είναι τα ακουστικά του δεδομένα και πιο εύκολη η ακουστική του διαμόρφωση σε αντίθεση με τους μικρούς χώρους που είναι ιδιαίτερα προβληματικοί.



Σχήμα 1.9 Στην σκούρα περιοχή περιέχονται όλες οι αναλογίες διαστάσεων που βοηθούν στην αποφυγή δημιουργίας στάσιμων κυμάτων(Bolt) . Ενδεικτικές ιδανικές διαστάσεις είναι 1:1.14:1.39 , 1:1.28:1.54 , 1:1.6:2.33 , 1:1.4:1.9 [22]

1.4.2 ΜΕΓΑΛΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ

Στους μεγάλους χώρους τα κυματικά φαινόμενα είναι εκφυλισμένα και η μελέτη γίνεται συνήθως με τη βοήθεια της γεωμετρικής ακουστικής.

Γεωμετρική Ακουστική

Για να μελετηθεί η ακουστική συμπεριφορά του ήχου μέσα σε κλειστούς χώρους, θεωρείται ότι τα ηχητικά κύματα συμπεριφέρονται σαν «φανταστικές» ακτίνες κάθετες προς το μέτωπο κύματος. Οι ακτίνες αυτές μεταδίδονται στο χώρο σε ευθείες ισότροπα με εκείνες της δέσμης φωτός. Γενική παραδοχή της γεωμετρικής ακουστικής, είναι ότι οι «ακτίνες» μεταδίδονται με την ταχύτητα του ήχου και οι ηχητικές ακτίνες ανακλώνται από «λείες» επιφάνειες σύμφωνα με τους (υποθετικούς) νόμους ανάκλασης της οπτικής. Οι χαράξεις ανακλαστικών επιφανειών σε αίθουσες ακροατηρίου βασίζονται στις αρχές τους στην γεωμετρική ακουστική. Τα σύγχρονα προγράμματα ακουστικής χώρου χρησιμοποιούν την τεχνική διεύρυνσης μέσω ακτινών (*ray tracing technique*) για τους υπολογισμούς ισοσταθμικών καμπύλων.

Η Φάση και η Παρεμβολή (*interference*) των ηχητικών κυμάτων δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Κατά την ανάκλαση του ήχου από μια επιφάνεια των ηχητικών κυμάτων, παρατηρείται η αλλαγή φάσης του ήχου που προσπίπτει από τον ήχο που ανακλάται, λόγω της παρεμβολής ηχητικών κυμάτων. Ο προσδιορισμός της κατανομής των ειδώλων της ηχητικής πηγής (*ανακλάσεων*) εξαρτάται από την θέση της ηχητικής πηγής και από το σχήμα των ορίων χώρου. Η απόκριση των πρώτων ανακλάσεων παλμικού ήχου υπολογίζεται από τις θέσεις και την ισχύ των ειδώλων (χρήση H/Y).

Τα πλεονεκτήματα της γεωμετρικής ακουστικής είναι i) οι απλές γεωμετρικές μέθοδοι στον σχεδιασμό, ii) οι απλοί συσχετισμοί παραμέτρων ήχου σε κλειστούς χώρους και στην ύπαιθρο και iii) οι απλές διατυπώσεις των ποσοτικών και εμπειρικών εκτιμήσεων.

Τα προβλήματα της γεωμετρικής ακουστικής χώρων συσσωρεύονται :

- Α. στο υπεραπλουστευμένο μοντέλο συμπεριφοράς του ηχητικού πεδίου και τις αλληλεπιδράσεις του με τις επιφάνειες του χώρου (διαχυτικά στοιχεία).
- Β. στην εξάλειψη κυματικής φύσης ήχου.
- Γ. στα λάθη των υπολογισμών χρόνου αντήχησης ιδιαίτερα σε ημιανοχοικούς θαλάμους.

Η γεωμετρική ακουστική δεν μπορεί να εξηγήσει :

- Α. τις διακυμάνσεις του χρόνου αντήχησης αναλογικά με την θέση σε ένα χώρο.
- Β. τον τρόπο προσδιορισμού της θέσης της ηχοαπορροφητικής επιφάνειας.
- Γ. την μη εκθετική πτώση της ηχητικής ενέργειας.
- Δ. την ανομοιομορφία της σταθερής κατάστασης του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης (κρουστική απόκριση).
- Ε. τις διακυμάνσεις εξόδου ηχητικής ισχύος της ηχητικής πηγής σε συνάρτηση με τη θέση και τη συχνότητα.
- Ζ. τον «χρωματισμό» του ήχου.
- Η. τις συνηχήσεις του χώρου.
- Θ. τις παλμικές πτώσεις.

Οι εφαρμογές της γεωμετρικής ανάλυσης αφορούν:

- τις διατυπώσεις για το χρόνο αντήχησης (*sabine, eyring, knudsen*).
- τις διατυπώσεις για το τετράγωνο της πίεσης (p) σε άμεσα και αντηχητικά πεδία.
- τους υπολογισμούς για τις «ακτίνες αντήχησης».
- τα δεδομένα μελέτης στερεοφωνικής ακοής (*binaural*) σε χώρους.
- τη βάση των τυποποιημένων μεθόδων ακουστικών μετρήσεων. [Συντελεστή απορρόφησης (α), δείκτη ηχομόνωσης (R), έξοδο ηχητικής ισχύος πηγής (L_w)].

Τα προαναφερόμενα αναλύονται στη συνέχεια :

Η **Ηχητική Ένταση (I)** σε διάχυτο ηχητικό πεδίου είναι :

$$I = \frac{p^2}{4\rho_o c} \quad (1.13)$$

Όπου p η τιμή της ηχητικής πίεσης [Pa].
 ρ_o η πυκνότητα ηχητικής ενέργειας [kg/m^3].

Η **Πυκνότητα ηχητικής ενέργειας (W)** είναι :

$$W = \frac{p^2}{4\rho_o c^2} \quad (1.14)$$

Όπου p η τιμή της ηχητικής πίεσης [Pa].
 ρ_o η πυκνότητα μέσου [kg/m^3].

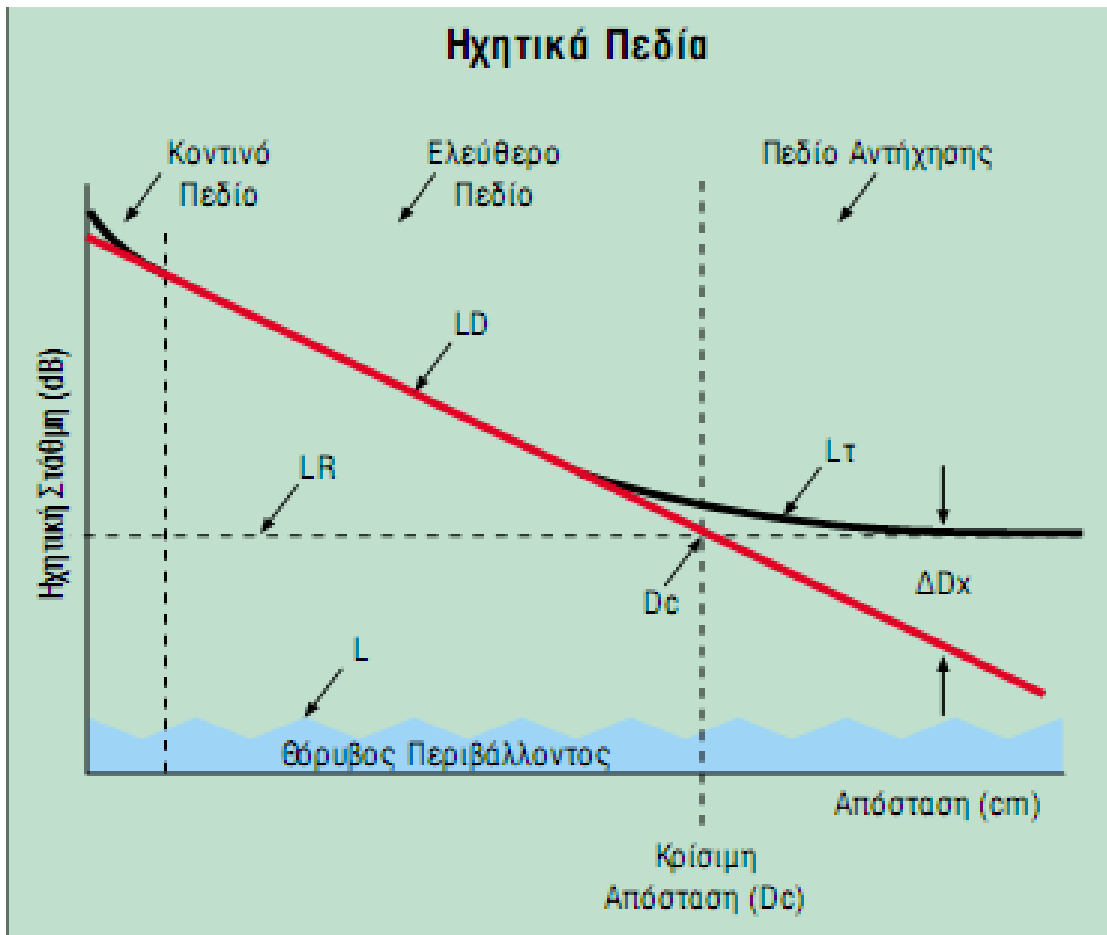
Η **Ηχητική Ενέργεια χώρου (E)** είναι :

$$E = V * W \quad (1.15)$$

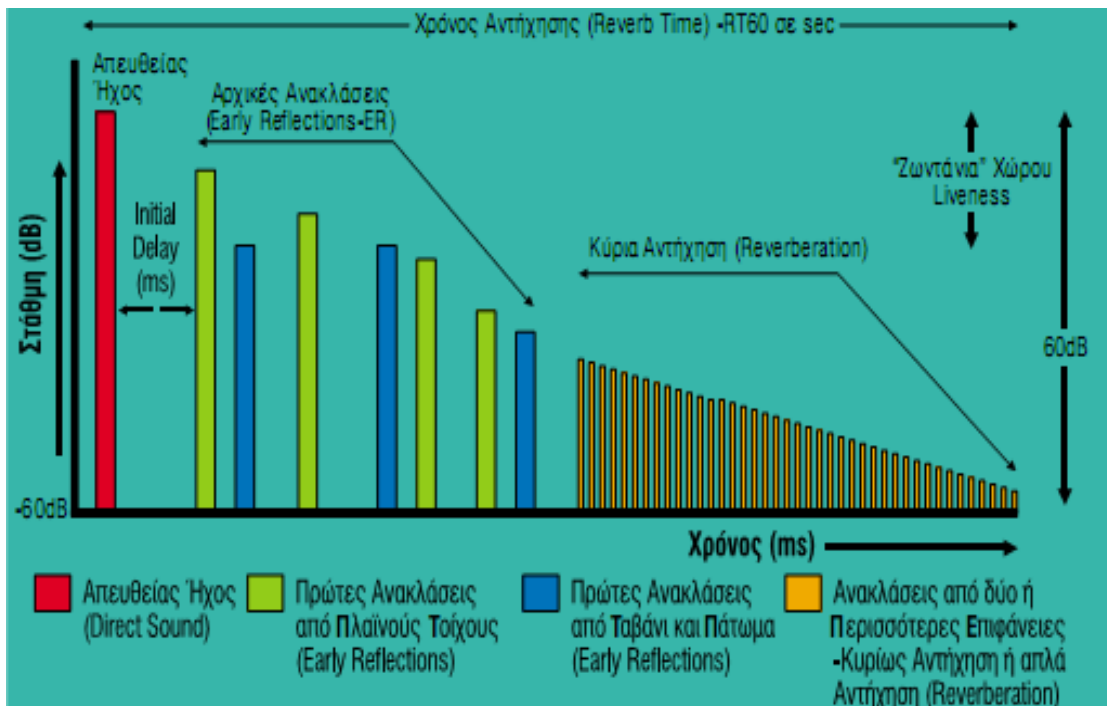
Όπου V ο όγκος του χώρου [m^3].
 W η πυκνότητα ηχητικής ενέργειας [$Watt$].

Η πτώση ηχητικής ενέργειας στον χώρο (παροδική κατάσταση) προσδιορίζεται στατιστικά από τη διαδικασία των ανακλώμενων ακτίνων και από τις επιφάνειες του χώρου : Εξαρτάται από i) την μέση ελεύθερη διαδρομή ii) τον αριθμό ανακλάσεων από κάθε επιφάνεια και iii) την κατανομή των γωνιών πρόσπτωσης.

Κρίσιμη Απόσταση (d_c) (*critical distance*) : Το ηχητικό πεδίο, σχηματίζεται από το συνδυασμό του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου. Κοντά στη πηγή υπερισχύει το πρώτο, ενώ πιο μακριά το δεύτερο. *Κρίσιμη απόσταση* ονομάζεται το σημείο στο οποίο η πυκνότητα ενέργειας μεταξύ του απευθείας ήχου και αντηχητικού πεδίου είναι ίση.



Σχήμα 1.10. Ελεύθερο, αντηχητικό πεδίο και κρίσιμη απόσταση [22] [14]

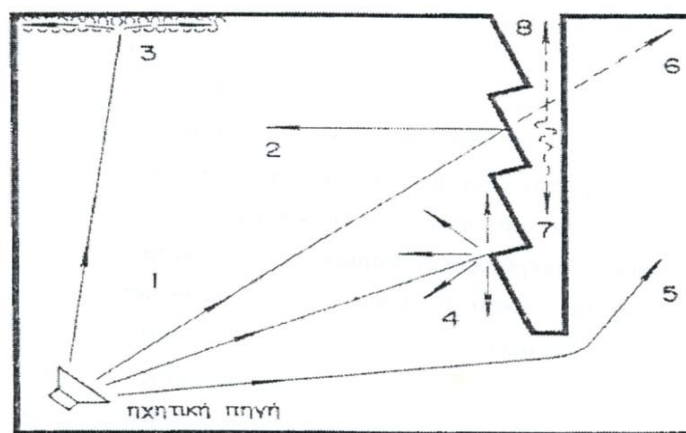


Σχήμα 1.11 Ακουστική απόκριση χώρου ή στάθμη ηχητικής πίεσης σε συνάρτηση με το χρόνο [22] [14]

Η συμπεριφορά και η μελέτη του ήχου είναι καλύτερο να γίνεται ανάλογα με το μέγεθος του κλειστού χώρου. Όσο μεγαλώνει ο χώρος αρχίζουν να επικρατούν άλλα φαινόμενα, επομένως είναι πιο ακριβές να χρησιμοποιούμε την ανάλογη προσέγγιση.

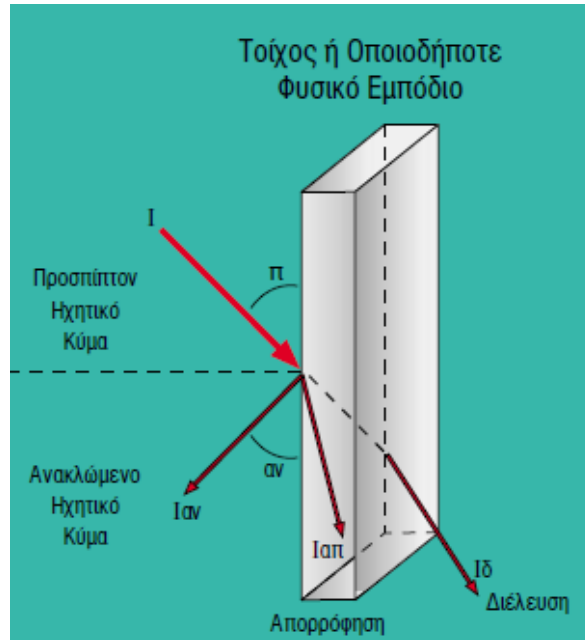
Όταν ο ήχος διαδίδεται σε κλειστό χώρο λαμβάνουν χώρα **διάφορα φαινόμενα** (Σχήμα 1.12), όπως :

1. **Απευθείας ήχος** : Ο ήχος που παράγεται από την ηχητική πηγή.
2. **Ανάκλαση** : όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων επιστρέφει από αυτή με γωνία, ίση και αντίθετη με την γωνία την οποία προσπίπτει. Ανακλώνται μόνο τα μήκη κύματος (λ) του ήχου που είναι μικρότερα από την επιφάνεια που προσπίπτει. Επομένως ανακλώνται μόνο οι υψηλότερες συχνότητες.
3. **Απορρόφηση** : Όταν ο ήχος προσπίπτει σε μια επιφάνεια ένα ποσοστό του ήχου διαδίδεται μέσα στο μέσο, καθώς το υλικό «απορροφά» ένα ποσοστό της ενέργειας μετατρέποντας την σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμότητα.
4. **Διάχυση** : ο ήχος όταν πέφτει πάνω σε ένα «διαχυτή», διασπάζεται ομοιόμορφα και διαχέεται προς κάθε διεύθυνση με την ίδια ηχητική ένταση.
5. **Περίθλαση** : είναι η αλλαγή διεύθυνση διάδοσης που συμβαίνει κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (αλλοίωση μετωπικού κύματος από ανοικτό παράθυρο, γωνία κτιρίου).
6. **Διάδοση** : είναι η διάδοση του ήχου από τοίχο σε τοίχο.
7. **Διασπορά μέσα στην κατασκευή** : είναι η διάδοση του ήχου σε όλο το εύρος της κατασκευής εσωτερικά.
8. **Διάδοση μέσα στην κατασκευή** : είναι η διάδοση του ήχου διαμέσου της κατασκευής σε άλλο χώρο.



Σχήμα 1.12 Σχηματική απεικόνιση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε κλειστούς χώρους. [14]

Απορρόφηση είναι η ιδιότητα των υλικών και αντικειμένων να απορροφούν την ηχητική ενέργεια, μετατρέποντας την σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμότητα. Όταν ένα κύμα προσπίπτει σε ένα χώρισμα, ένα ποσοστό ανακλάται (**ηχοανάκλαση**), ένα ποσοστό απορροφιάται (**ηχοαπορρόφηση**) και ένα ποσοστό μεταδίδεται (**ηχομετάδοση**).



Σχήμα 1.13 Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του ήχου κατά την πρόσπτωση σε επιφάνεια [22]

Συντελεστής Ηχοαπορρόφησης (a), μιας επιφάνειας ή υλικού, σε ορισμένη συχνότητα και συνθήκες, είναι ο λόγος ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας (W_a) που απορροφάται από την επιφάνεια προς την προσπίπτουσα ενέργεια στην επιφάνεια (W_i).

$$a = I - r \qquad a = \delta + \tau \qquad (1.16)$$

Όπου R ο συντελεστής ανάκλασης
 δ ο συντελεστής απώλειας
 τ ο συντελεστής μετάδοσης

Συντελεστής μέσης ηχοαπορρόφησης (\bar{a}) : Πρόκειται για το λόγο του αθροίσματος των γινομένων της κάθε επιφάνειας επί τον συντελεστή απορρόφησης αυτής, ως προς το άθροισμα των αντίστοιχων επιφανειών

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 + \dots + a_n s_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n} \qquad (1.17)$$

Όπου s_1, s_2, \dots, s_n το εμβαδόν κάθε επιφάνειας [m^2]
 a_1, a_2, \dots, a_n οι αντίστοιχοι συντελεστές ηχοαπορρόφησης κάθε υλικού

Συντελεστής Ανάκλασης (a_r), μιας επιφάνειας ή υλικού, σε ορισμένη συχνότητα και συνθήκες, είναι ο λόγος ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα ενέργεια (W_i). Όταν θέλουμε να το εκφράσουμε σε λόγο ισχύων έχουμε :

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} \quad (1.18)$$

Συντελεστής Ανάκλασης Ηχητικής πίεσης (C_r), είναι ένα αδιάστατο μέγεθος μιας επιφάνειας ή ενός υλικού, σε ορισμένη συχνότητα και συνθήκες. Είναι το μιγαδικό πηλίκο της ηχητικής πίεσης (P_r), του ανακλώμενου ηχητικού κύματος προς την ηχητική πίεση (P_i) του προσπίπτοντος ήχου.

$$C_r = \frac{P_r}{P_i} \quad (1.19)$$

Συντελεστής Μετάδοσης (r), χρησιμοποιείτε όταν μια επιφάνεια χωρίζει δύο μέσα. Είναι ο λόγος της ενέργειας (W_t) που διαδίδεται από την επιφάνεια διαχωρισμού δυο μέσων προς την προσπίπτουσα ενέργεια (W_i).

$$r = \frac{W_t}{W_i} \quad (1.20)$$

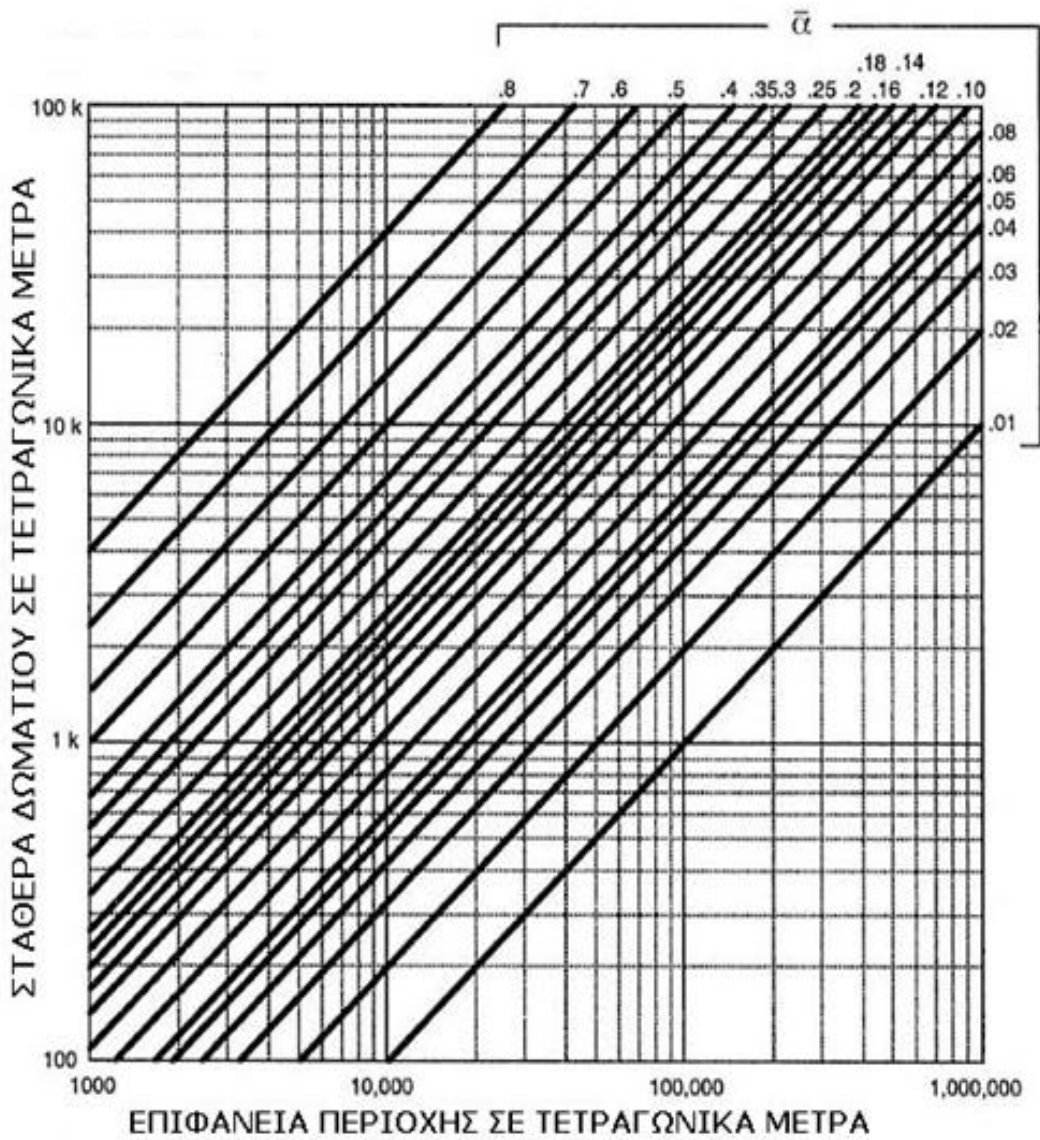
Σταθερά δωματίου (R), προκύπτει από το μέσο συντελεστή ηχοαπορρόφησης και υπολογίζεται από τον τύπο :

$$R = \frac{S\bar{a}}{1-\bar{a}} \quad (1.21)$$

όπου S η ολική επιφάνεια του χώρου (m^2).

Τέλος, το γινόμενο $S\bar{a}$ ονομάζεται **απορρόφηση (A)** (absorption) του χώρου και ισχύει :

$$A = S\bar{a} = S_1\bar{a}_1 + S_2\bar{a}_2 + \dots + S_n\bar{a}_n$$



Σχήμα 1.14 Σταθερά δωματίου σε σχέση με την επιφάνεια του δωματίου και το συντελεστή μέσης ηχητικής απορρόφησης [11]

Στην περίπτωση πολύ μεγάλων χώρων, όπου η απορρόφηση του αέρα είναι σημαντική, η σταθερά δωματίων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_c = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}_r} \quad , \quad \bar{\alpha}_r = \bar{\alpha} + m \frac{4\nu}{s} \quad (1.22)$$

$\bar{\alpha}$ ο μέσος συντελεστής απορρόφησης
 S το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας [m^2]
 V_o ο όγκος της αίθουσας [m^3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η συμπεριφορά ενός χώρου μεσαίου μεγέθους, για κάθε είδους χρήση (ομιλία – μουσική – θεατρικές παραστάσεις). Επίσης, γίνεται προσπάθεια για τον προσδιορισμό των παραμέτρων (Υποκειμενικές - Αντικειμενικές) που συντελούν στην καλή ακουστική συμπεριφορά.

2.1 Προϋποθέσεις καλής ακουστικής

Ένας κλειστός χώρος έχει καλή ακουστική όταν πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις :

1. Ο ήχος να φθίνει σε όλα τα σημεία του χώρου χωρίς αισθητή μείωση (περίπου διάφορα έντασης 3dB) και έχει την ίδια κατανομή έντασης παντού.
2. Να μην εμφανίζεται το φαινόμενο επικάλυψης (*Masking*) ή τουλάχιστον να είναι περιορισμένο.
3. Ο ρυθμός μείωσης του ήχου να είναι ο βέλτιστος. Αυτό βοηθάει στην καθαρότητα της ομιλίας και την βελτίωση της μουσικής.
4. Να μην υπάρχουν δυσάρεστες καταστάσεις όπως :
Ηχώ, Ηχητικές Σκιές, Ηχητικές Παραμορφώσεις, Ηχητικές συγκεντρώσεις.
5. Ο χώρος να έχει αρκετή ηχομόνωση, ώστε η λειτουργία του να γίνεται χωρίς την επίδραση από εξωτερικούς ήχους περιβάλλοντος ή εσωτερικούς θορύβους (εξαερισμό , θόρυβος μηχανημάτων κ.α.).

2.2 Διάκριση Παραμέτρων Ακουστικής

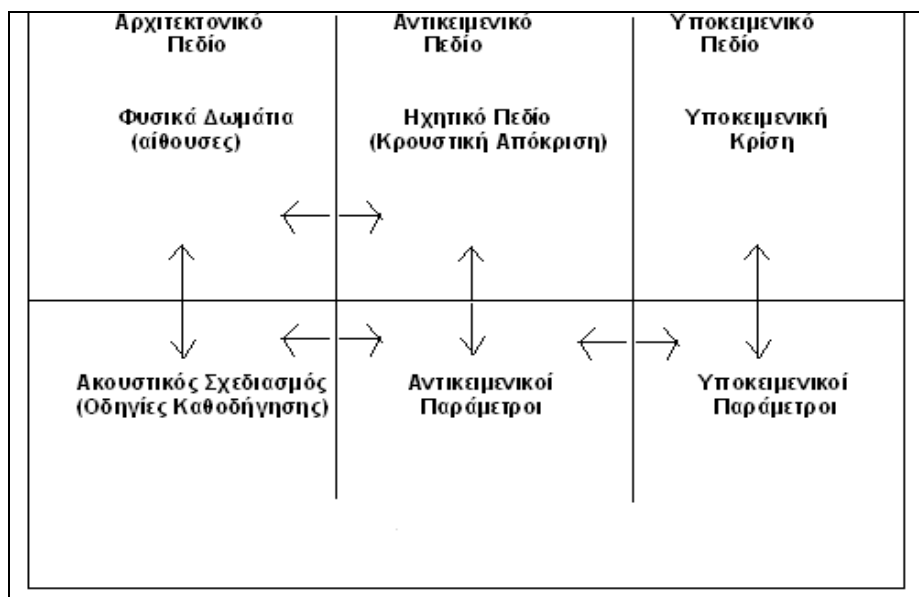
Για πολλά χρόνια οι μηχανικοί αρχιτέκτονες είχαν αντικρουόμενες απόψεις με τους αντίστοιχους της ακουστικής, για τον τρόπο κατασκευής των αιθουσών, ώστε να επιτύχουν την βέλτιστη ακουστική τους συμπεριφορά. Οι υπάρχουσες γνώσεις για την ακουστική σχεδίαση αιθουσών θεαμάτων βασίζονται για πολλούς αιώνες στην πρακτική εμπειρία (*trial and error*). Η επιστημονική έρευνα και η χρήση αυστηρών εργαλείων προσομοίωσης και υπολογισμών υφίσταται μόλις από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός, ότι η ακουστική συμπεριφορά των αρχαίων κατασκευών και θεάτρων, παρ' όλα αυτά, είναι σχετικά πολύ καλή.

Κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι επιστημονικές γνώσεις έχουν ωριμάσει σε ένα επίπεδο, όπου μπορεί να εξηγήσουν ένα μεγάλο πλήθος θεμάτων σε χρησιμοποιήσιμο βαθμό :

1. τις υποκειμενικές παραμέτρους που σχετίζονται με το πώς αντιλαμβανόμαστε την ακουστική των δωματίων.
2. πώς αυτές οι αντικειμενικές ιδιότητες του ηχητικού πεδίου, διέπονται από τις φυσικές μεταβλητές στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Θα κάνουμε μια παρουσίαση στις υποκειμενικές και αντικειμενικές πτυχές της αίθουσας, ώστε να βοηθήσουμε τον αναγνώστη να έχει μια σαφή εικόνα για τις παραμέτρους.

Στο πάνω μισό [Εικόνα 2.1] έχουμε τα εμπειρικά φαινόμενα στον πραγματικό κόσμο. Πηγαίνοντας από αριστερά προς τα δεξιά, έχουμε τις αίθουσες θεαμάτων, στις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εμπειρία από τα αντικειμενικά ηχητικά πεδία που προκαλούν υποκειμενικές εντυπώσεις σε συνθήκες ακουστικής.



Εικόνα 2.1 Το σύμπαν της αρχιτεκτονικής ακουστικής [3]

Παραπάνω φαίνεται η αλληλεξάρτηση της αρχιτεκτονικής με το αντικειμενικό πεδίο. Οι αντικειμενικές παράμετροι δίνουν τις βασικές κατευθυντήριες για την ακουστικό σχεδιασμό των αιθουσών. Η υποκειμενική κρίση δεν είναι τόσο αποδεκτή από τα άλλα πεδία, εξαιτίας της ασάφειας των αποτελεσμάτων της. Υπάρχουν, όμως, κάποιες παράμετροι ακουστικής που έχουν να κάνουν με την υποκειμενική αντίληψη του ήχου, οπότε είναι προτιμότερο να τις προσεγγίζουμε με την υποκειμενική τους πλευρά.

2.3 Παράμετροι Ακουστικής Δωματίου

Από τη σύγκριση των πολλών υποκειμενικών πειραμάτων σε πραγματικά δωμάτια και σε εργαστήρια ήχου, προκύπτουν μια σειρά από υποκειμενικές παράμετροι και αντίστοιχα μέτρα που διατίθενται για την επίτευξη του εκάστοτε στόχου. Οι περισσότερες από αυτές είναι γενικά αναγνωρισμένες, ως σχετικές περιγραφές από τις σημαντικές πτυχές της εμπειρίας μας από την ακουστική των χώρων. Προκειμένου να διατηρηθεί μια σαφής διάκριση μεταξύ των υποκειμενικών και αντικειμενικών παραμέτρων ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) έκδωσε πρότυπα για την τυποποίηση των μεθόδων μέτρησης και πολλών αντικειμενικών στοιχείων.

2.3.1 Υποκειμενικές παράμετροι

Τα παλαιότερα χρόνια, όπου δεν υπήρχαν όργανα μέτρησης ή αντικείμενα που να βοηθούσαν στην πειραματική διαδικασία, είχαν καθοριστεί μερικές παράμετροι οι οποίες βασίζονταν σε υποκειμενικά κριτήρια.

Οι κυριότερες είναι οι εξής :

1. Σύνολο (*Ensemble*)
2. Οικειότητα (*Intimacy*)
3. Αντιληπτικότητα Συλλαβών (*Syllable Intelligibility*)
4. Σαφήνεια (*Clarity*)
5. Ακουστότητα (*Loudness*)

1. Σύνολο (*Ensemble*)

Περιγράφει την δυνατότητα των μουσικών να ακούν τους ίδιους, αλλά και τους άλλους μουσικούς για να παίζουν ως σύνολο. Καθορίζεται από το σχήμα του χώρου που βρίσκεται η ορχήστρα, τους ανακλαστές που βρίσκονται στην οροφή ή τις πλευρικές επιφάνειες της σκηνής.

2. Οικειότητα (*Intimacy*)

Είναι σημαντική παράμετρος για χώρους που προορίζονται για ομιλία και μουσική. Η τιμή της εξαρτάται από την λήψη των ανακλώμενων ηχητικών ακτινών, αμέσως μετά την λήψη του εκπεμπόμενου απευθείας ήχου (δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20 ms, σε μεσαίου μεγέθους χώρους). Η τιμή της οικειότητας σε χώρους μουσικής πρέπει να είναι μικρότερη από 25 ms. Η ποσότητα αυτή έχει να κάνει με την απόσταση των ανακλαστικών επιφανειών.

3. Αντιληπτικότητα Συλλαβών (*Syllable Intelligibility*)

Σύμφωνα με τους κανονισμούς *ISO/TR 3352 – 1974(E)*, η Αντιληπτικότητα Συλλαβών της ομιλίας ορίζεται ως το ποσοστό (%) του αριθμού των συλλαβών που γίνονται αντιληπτές από ένα μέσο ακροατή, ως προς το σύνολο των συλλαβών που εκφωνούνται κατά την διάρκεια μιας συνήθους ομιλίας. Η πληροφορία είναι ικανοποιητική σε επίπεδο 95%.

Η μέτρηση αντιληπτικότητας γίνεται ως εξής : τοποθετούμε σε διαφορές θέσεις ακροατές στο χώρο και τους ζητείται να γράψουν ότι έχουν ακούσει από την ομιλία (ως συλλαβές χωρίς νόημα). Το ποσοστό που βρίσκουν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντιληπτικότητας συλλαβών.

Εξαρτάται από δυο παράγοντες :

i) Το λόγο Σήματος / Θορύβου (S/N) και ii) τον Χρόνο Αντήρησης (RT_{60}) του χώρου.

4. Ευκρίνεια (*Clarity*)

Η Σαφήνεια περιγράφει το βαθμό στον οποίο κάθε λεπτομέρεια της παράστασης μπορεί να γίνει αντιληπτή, όπως έχει, σε αντίθεση με ότι είναι θολή μαζί με τις καθυστερημένες ανακλάσεις του ήχου (late reflections).

Η μέτρηση πραγματοποιείται τοποθετώντας σε διάφορα σημεία του χώρου ακροατές, από τους οποίους ζητείται να καταγράψουν τις διαφορές αλλαγές που αντιλαμβάνονται στον ήχο.

5. Ακουστότητα (*Loudness*)

Η Ακουστότητα ελέγχει την ακουστική επάρκεια του χώρου. Η μέτρηση γίνεται από το ακροατήριο, το οποίο είναι τοποθετημένο σε διάφορα σημεία του χώρου και περιγράφει την ένταση του ήχου σε σχέση με την αντίστοιχη ένταση της πηγής.

2.3.2 Αντικειμενικοί Παράμετροι

1. Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time)

Ο χρόνος αντήχησης (RT) είναι το πιο παραδοσιακό αντικειμενικό μέτρο αυτής της ποιότητας, που επινοήθηκε πριν από 100 χρόνια από τον *W.C. Sabine*.

Ο (RT_{60}) ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η ένταση του ήχου μέσα στο χώρο κατά 60 dB, αφού μια συνεχής πηγή ήχου έχει παύσει [Εικόνα 2.2].

Όταν ο χώρος περιέχει επιφάνειες με συντελεστή απορρόφησης $\alpha \ll 1$, ο χρόνος αντήχησης περιγράφεται από την εξίσωση :

$$RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{A} \quad \text{σε μεγάλο χώρο} \quad RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{A + 4mV} \quad (2.1)$$

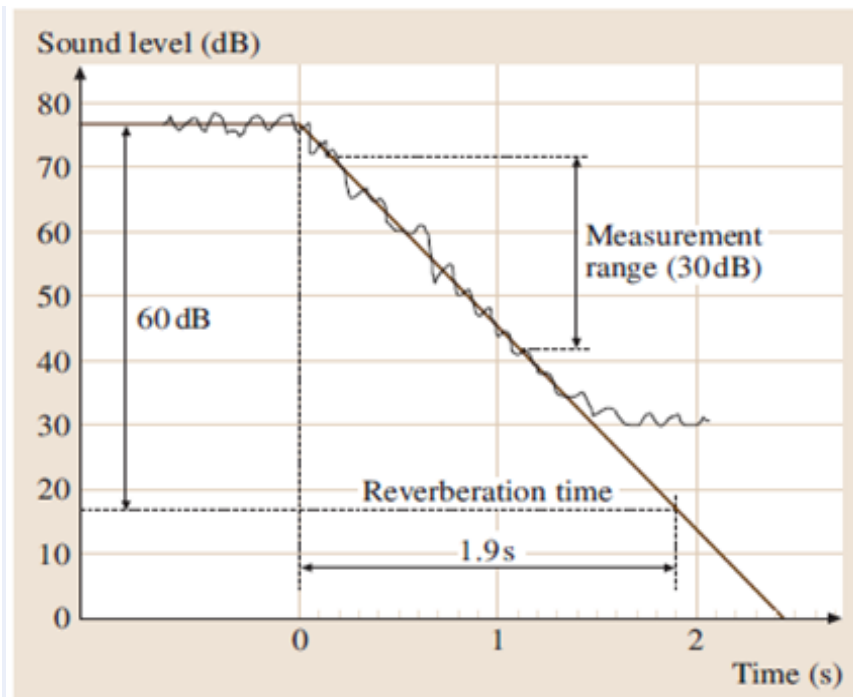
Όπου V είναι ο όγκος δωματίου (m^3)

με $A = \overline{S\bar{a}}$ απορρόφηση επιφανείας

με S εμβαδόν επιφανείας (m^2) και \bar{a} μέσος συντελεστής απορρόφησης εκάστοτε επιφανείας (σε *Sabine*).

Σε μεγάλους χώρους για περισσότερη ακρίβεια υπολογίζουμε και την απορρόφηση του αέρα (m) ανάλογα με την υγρασία που επικρατεί στο χώρο (βλέπε Παράρτημα I).

Επίσης, εξαρτάται από τη συχνότητα και οι τιμές του δίνονται για κεντρικές συχνότητες οκτάβας ή τριτοκτάβας. Σε περίπτωση που δεν αναφέρεται, θεωρείται ότι η συχνότητα είναι 500 Hz.



Εικόνα 2.2 Ορισμός του Χρόνου Αντήχησης [3]

Όταν ένα δωμάτιο δημιουργεί πάρα πολύ αντήχηση, η ομιλία χάνει την ευκρίνεια της, επειδή οι σημαντικές λεπτομέρειες από τα σύμφωνα επικαλύπτονται από δυνατότερα χαρακτηριστικά του ήχου (ακούγεται σαν παρατεταμένη ηχώ ομιλίας). Για πολλές μορφές της μουσικής, η επίδραση της αντήχησης και η ανάμειξη των ήχων από διάφορα όργανα / φωνές προσθέτουν στον ήχο μια ελκυστική πληρότητα σε μια ορχήστρα.

2. Πρώιμος Χρόνος Απόσβεσης EDT (Early Decay Time)

Πρώιμος Χρόνος Απόσβεσης (EDT) είναι ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση των πρώτων 10 dB στη στάθμη του ήχου.

Σχετίζεται με την αντήχηση που γίνεται αντιληπτή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του λόγου και της μουσικής. Συνδέεται περισσότερο με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης ενός χώρου. Λόγω του φαινομένου της επικάλυψης (*masking*), το σύνολο της διαδικασίας απόσβεσης γίνεται αντιληπτό μόνο στις παύσεις της ομιλίας ή της μουσικής. Επιπλέον, το ποσοστό απόσβεσης είναι συχνά διαφορετικό στην αρχή, και μειώνεται όσο κατεβαίνει η καμπύλη. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της μουσικής ή του λόγου το επακόλουθο ασθενέστερο μέρος της αντήχησης (*Late Reverberation*) θα φιλτράρεται από την επόμενη συλλαβή ή μουσική νότα.

Συνεπώς, ένα εναλλακτικό μέτρο είναι ο *πρώιμος χρόνος απόσβεσης EDT*. Σχετίζεται με την αντήχηση που γίνεται αντιληπτή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του λόγου και της μουσικής. Τα μέτρα και το ποσοστό της απόσβεσης είναι τα ίδια με το χρόνο αντήχησης. Αλλά τώρα αξιολογούνται από το αρχικό τμήμα, σε διάστημα μεταξύ των 0 και -10 dB :

$$EDT = 6(t_{-10}) \quad \text{H} \quad EDT = \frac{60}{A(0dB \rightarrow -10dB)} s \quad (2.2)$$

Όταν ο θόρυβος βάθους είναι υψηλός, η αξιολόγηση περιορίζεται σε ένα μικρότερο διάστημα της καμπύλης απόσβεσης, από τα -5dB σε -35 dB (ή από τα -5dB στα -25 dB) κάτω από την τιμή εκκίνησης.

$$ERT = 60 \frac{(t_{-35}) - (t_5)}{(-5dB) - (-35dB)} \quad (2.3) \quad RT_{20} = 60 \frac{(t_{-25}) - (t_5)}{(-5dB) - (-25dB)} \quad (2.4)$$

Ο EDT αναφέρεται στις μεμονωμένες πρώτες ανακλάσεις και αποκαλύπτει στοιχεία για την γεωμετρία του χώρου (ανακλάσεις από συγκεκριμένες επιφάνειες του χώρου), σε αντίθεση με τον RT_{60} που αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος τυχαίων ανακλάσεων που προέρχονται από όλες τις επιφάνειες. Παρά το γεγονός ότι *EDT* περιγράφει καλύτερα την αντήχηση από τον (*RT*), εξακολουθεί να θεωρείται η πιο βασική και σημαντική παράμετρος. Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω της γενικής σχέσης του *RT* με τις πιο πολλές και σημαντικότερες παραμέτρους της ακουστικής δωματίου, διότι πολλά περιθώρια της ακουστικής θεωρίας σχετίζονται με αυτήν την έννοια. Επιπλέον, η *διάχυτη θεωρία πεδίου* αποτελεί τη βάση για τη μέτρηση i) της ηχητικής ισχύος, ii) της ηχοαπορρόφησης και iii) της ηχομόνωσης. Η *EDT* είναι επίσης σημαντική παράμετρος, διότι αναφέρεται στα πρότυπα πιστοποίησης αιθουσών (ISO) σχετικά με τις ακουστικές συνθήκες σε κτίρια.

Η θεωρία διάχυτου πεδίου προβλέπει ότι η καθυστέρηση είναι καθαρά εκθετική και η κατανομή στο χρόνο της κρουστικής απόκρισης στο τετράγωνο ($h^2(t)$) δίνεται από την εξίσωση :

$$h^2(t) = A \exp\left(\frac{-13.8}{T} t\right) \quad (2.5)$$

κατά την οποία η συνεχής -13,8 καθορίζεται από την απαίτηση ότι για $t = T$:

$$10 \log\left(\exp\left(\frac{-13.8}{T} t\right)\right) = 60 \text{dB} \quad (2.6)$$

Με μια εκθετική καθυστέρηση, η καμπύλη απόσβεσης σε dB που γίνεται σε ευθεία γραμμή. Κατά συνέπεια, η αναμενόμενη τιμή των EDT, EDT_{exp}, ισούται με τον RT. Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, είναι επίσης σημαντικό να γίνει σύγκριση των συγκεκριμένων τιμών των παραμέτρων, με τη μικρότερη αλλαγή που μπορεί να ανιχνευθεί υποκειμενικά.

Για EDT, η λεγόμενη υποκειμενική *limen* διαφορά είναι περίπου 5%.

Επίδραση του Χρόνου Αντήρησης στην Ομιλία

Όταν ένας εκφωνητής εκφωνεί μια λέξη σε χώρο αντήρησης π.χ. το μονοσύλλαβο «την» εκφωνείται πρώτα η τονισμένη συλλαβή «τη» που διαρκεί περίπου για 320 ms και φθίνει γραμμικά, και μετά το άτονο «ν» που έχει στάθμη μικρότερη κατά 25 dB (όπως βρέθηκε από μελέτες). Αν χώρος έχει μεγάλη αντήρηση τότε το «τη» καλύπτει το «ν» με αποτέλεσμα να έχουμε μη κατανοητή ομιλία. Επομένως όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος αντήρησης τόσο πιο κατανοητή γίνεται η ομιλία.

Οι παράμετροι που το καθορίζουν είναι η Αντιληπτικότητα Συλλαβών [παρ. 2.8], η Διακριτότητα και η Απώλεια Συμφώνων.

Διακριτότητα D (Definition)

Η σημασία των ανακλάσεων (κυρίως των πρώτων) είναι γνωστή. Όταν ακούμε ένα πρωτογενή ήχο, ακούμε επίσης και χιλιάδες ανακλάσεις. Για την ομιλία χρήσιμες είναι αυτές που φτάνουν τα πρώτα 50 ms, οι οποίες συμβάλουν στον πρωτογενή και τον ενισχύουν. Από μελέτες είναι γνωστό ότι οι ανακλάσεις από 10 ms έως 20 ms είναι ισχυρότερες μέχρι και 10 dB από τον απευθείας ήχο, επομένως η επίδραση στον ήχο είναι μεγάλη.

Ένα αντικειμενικό κριτήριο χρησιμοποιήθηκε από τον *Thiele*, και χαρακτηρίστηκε με όρο Διακριτότητα :

$$D = \frac{\int_0^{50ms} [g(t)^2] dt}{\int_0^{\infty} [g(t)^2] dt} 100\% \quad (2.7)$$

Όπου, $g(t)$ η κρουστική απόκριση του χώρου στο σημείο λήψης. Η σχέση Διαιρετότητας και Ομιλίας μελετήθηκε από τον *Bore*.

Για τη μελέτη του πήρε σήματα παλμικού χαρακτήρα των 20 ms και εύρος συχνοτήτων (340 – 3.5 kHz). Ο *Beranek* χρησιμοποίησε τη Διακριτότητα (D) για τον καθορισμό του Δείκτη Αντήχησης (R_D), στον οποίο γίνεται ο διαχωρισμός της απευθείας διαδομένης ενέργειας με τη διάχυτη και καθορίζεται από την εξής εξίσωση :

$$R_D = 10 \log \frac{1-D}{D} \quad (2.8)$$

Απώλεια Συμφώνων (AL)

Η ποσότητα αυτή μετρά το ποσοστό των συμφώνων που δεν αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής. Ο *Peutz* μετέβαλε i) τον χρόνο αντήχησης, ii) την απόσταση από την πηγή και iii) το θόρυβο βόθους και μέτρησε την απώλεια των συμφώνων.

Με βάση τα πειράματα του πρότεινε την εμπειρική σχέση :

$$\%AL_{cons} = \frac{200(rRT_{60})^2}{V} \quad (2.9)$$

Όπου r η απόσταση από την πηγή [m]
 V ο όγκος χώρου [m^3]
 RT_{60} ο χρόνος αντήχησης [sec]

Η παραπάνω σχέση ισχύει για αποστάσεις μέχρι την κρίσιμη απόσταση R_c

$$R_c = 0.21 \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}} \quad (2.10)$$

Μετά την απόσταση αυτή, η απώλεια συμφώνων είναι σταθερή ίση με $9 RT_{60}$

Λόγος Σήματος ως προς το Θόρυβο (SNR)

Όταν πρόκειται για θόρυβο (*Signal to noise Ratio*,) η Ομιλία (*Speech to noise Ratio*) ορίζεται από το λογάριθμο της ηχητικής πίεσης του σήματος ως προς την ηχητική πίεση θορύβου :

$$SNR = 10 \log \frac{p^2_{sig}}{p^2_{noise}} = 10 \log \frac{p^2_{sig}}{p^2_{ref}} - 10 \log \frac{p^2_{noise}}{p^2_{ref}} = L_{sig} - L_{noise} \quad (2.11)$$

Όπου p_{sig} , p_{noise} οι ηχητικές πιέσεις σήματος και θορύβου αντίστοιχα .

Ο λόγος SNR είναι σημαντικός για την Αντιληπτικότητα Ομιλίας.

Επίδραση του Χρόνου Αντήχησης στην Μουσική

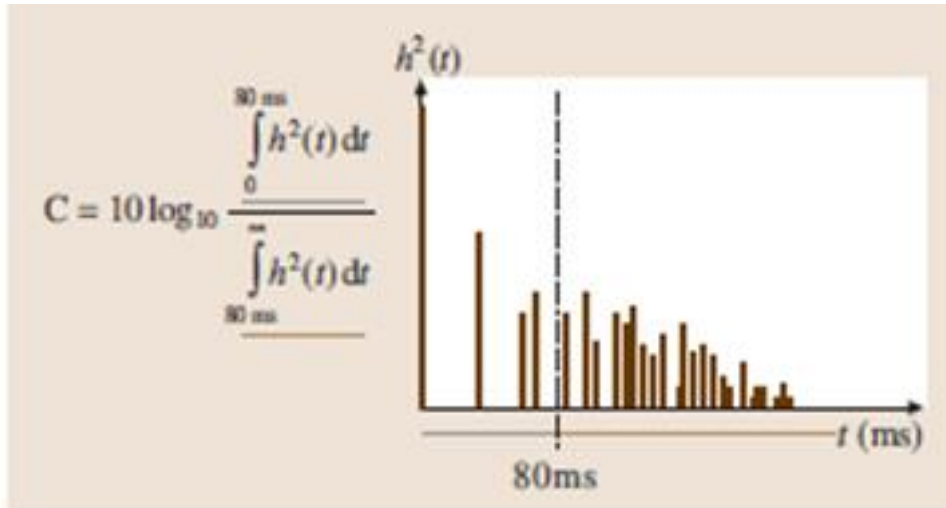
Είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο θα αναλύσουμε εκτενέστερα παρακάτω. Έχει επίδραση στην ποιότητα της μουσικής. Οι χώροι που προορίζονται για μουσική πρέπει να έχουν μεγάλο χρόνο αντήχησης.

3. Ευκρίνεια (Clarity)

Η Σαφήνεια περιγράφει το βαθμό στον οποίο κάθε λεπτομέρεια της παράστασης μπορεί να γίνει αντιληπτή, όπως έχει, σε αντίθεση με ότι είναι θολή μαζί με τις καθυστερημένες ανακλάσεις του ήχου (*late reflections*). Ως εκ τούτου, η σαφήνεια είναι σε μεγάλο βαθμό μια ιδιότητα συμπληρωματική προς την αντήχηση. Όταν οι καθυστερημένες ανακλάσεις (*late*) δεν υπερβαίνουν τα 50 ms έως 80 ms σε σχέση με τον άμεσο ήχο, το αυτί θα ενσωματώσει αυτές τις ανακλάσεις και τον άμεσο ήχο μαζί. Αυτό σημαίνει ότι αντιλαμβανόμαστε το αποτέλεσμα ενισχυμένο (ο πρωτότυπος ήχος έχει ενισχυθεί σε σχέση με την καθυστερημένη αντηχητική ενέργεια). Κατά συνέπεια, μία αντικειμενική παράμετρος που συγκρίνει την αναλογία μεταξύ της ενέργειας της κρουστικής απόκρισης, πριν και μετά τα 80 ms έχει βρεθεί ότι περιγράφει σχετικά πολύ καλά τη σαφήνεια, η οποία διατυπώνεται ως εξής :

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (2.12)$$

Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της C_{80} , τόσο περισσότερο ο αρχικός ήχος κυριαρχεί, και τόσο υψηλότερη είναι η αντίληψη της σαφήνειας.



Εικόνα 2.3 Ορισμός του C: η σχέση μεταξύ της πρόωρης και της καθυστερημένης ενέργειας στην κρουστική απόκριση [3]

Η αναμενόμενη τιμή του (C_{exp}), όταν έχει εκθετική μορφή, είναι συνάρτηση μόνο του χρόνου αντήχησης (RT) και καθορίζεται ως εξής :

$$C_{\text{exp}} = 10 \log \left[\exp\left(\frac{1.104}{RT}\right) - 1 \right] \text{dB} \quad (2.13)$$

Η υποκειμενική διαφορά limen για τη Σαφήνεια (C) είναι περίπου 0.5dB. Ο ορισμός απεικονίζεται στην εικόνα 2.3

Κριτήριο ηχούς (Echo)

Μια άλλη παράμετρος, η οποία χρησιμοποιείται επίσης για να περιγράψει την ισορροπία ανάμεσα στις πρώτες και καθυστερημένες ανακλάσεις ήχου ή το υπόλοιπο μεταξύ σαφήνειας και αντήχησης, είναι ο κεντρικός χρόνος (T_s), που περιγράφει το κέντρο βάρους του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης και ορίζεται ως εξής :

$$t_s = \left[\frac{\int_0^{\infty} t \times h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (2.14)$$

Η χαμηλή τιμή του (T_s) αντιστοιχεί σε ένα καθαρό ήχο, ενώ υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν την κυριαρχία της καθυστερημένης αντηχητικής ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι δεν περιέχει ακριβές χρονικό όριο μεταξύ της πρόωρης και της καθυστερημένης ενέργειας.

Η υποκειμενική limen διαφορά για T_s είναι περίπου 10 ms.

Η αναμενόμενη διάχυτη τιμή πεδίου δίνεται ως εξής :

$$t_{s,exp} = \frac{RT}{13.8} \quad (2.15)$$

4. Αντοχή Ήχου (Sound Strength)

Η επιρροή του δωματίου στην αντίληψη της ακουστότητας είναι μια άλλη σημαντική εκδοχή της ακουστικής δωματίου. Μια σχετική μέτρηση αυτής της ιδιότητας είναι η διαφορά σε dB μεταξύ της ηχητικής έντασης της συνεχούς βαθμονομημένης πηγής ήχου που μετράται στο δωμάτιο, με το επίπεδο έντασης της ίδιας ηχητικής πηγής, που δημιουργείται σε απόσταση 10m αντηχητικού περιβάλλοντος. Το μέτρο αυτό ονομάζεται *σχετική δύναμη (G)*.

Μια δεύτερη προσέγγιση της G, μπορεί επίσης να ληφθεί από την ηχογραφημένη κρουστική απόκριση ανακλάσεων, που είναι ο λόγος μεταξύ της συνολικής ενέργειας της κρουστικής απόκρισης και την ενέργειας του άμεσου ήχου, ο οποίος καταγράφεται σε σταθερή απόσταση 10m από την παλμική πηγή ήχου, και ορίζεται ως εξής :

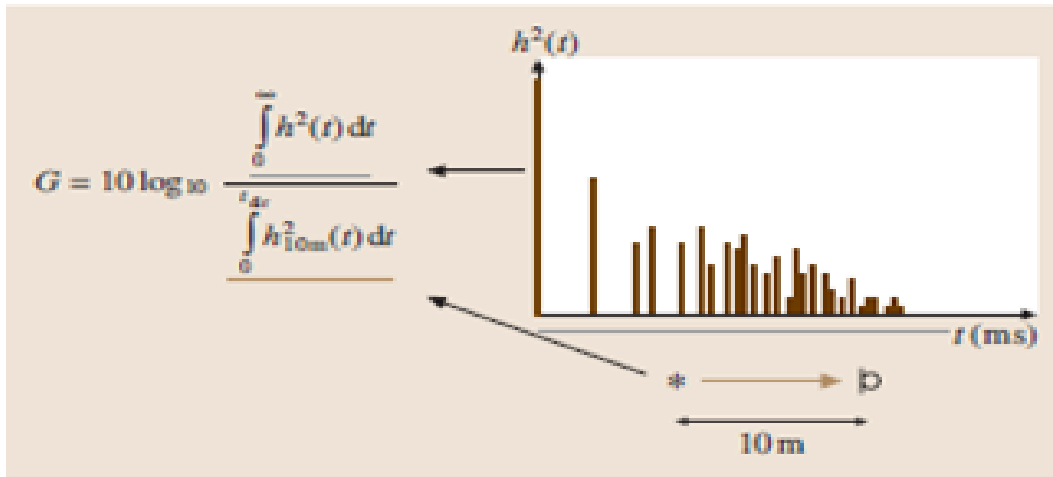
$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} h^2_{10m}(t) dt} \right] \quad (2.16)$$

Εδώ το ανώτατο όριο ολοκλήρωσης του t_{dir} στον παρονομαστή θα πρέπει να περιορίζεται μέσα στην χρονική διάρκεια του παλμού του άμεσου ήχου (που στην πράξη θα εξαρτηθεί από το επιλεγμένο εύρος ζώνης).

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια απόσταση διαφορετική των 10 m, εάν εφαρμοστεί μια διόρθωση για τη μείωση της απόστασης. Η αναμενόμενη τιμή του G (σύμφωνα με την θεωρία διάχυτου πεδίου) γίνεται σε συνάρτηση του χρόνου αντήχησης (RT) και του όγκου του δωματίου και εκφράζεται με την εξής εξίσωση :

$$G_{exp} = 10 \log \left(\frac{RT}{V} \right) + 45dB \quad (2.17)$$

Η υποκειμενική limen διαφορά για το G είναι περίπου 1.0 dB.
Ο ορισμός της G απεικονίζεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 Ορισμός Αντοχής G : Η συνολική ενέργεια της κρουστικής απόκρισης που μετριέται σε σχέση με το επίπεδο έντασης του απευθείας ήχου σε απόσταση 10m από την πηγή [3].

5. Μέτρηση Ευρυχωρίας (Measures of Spaciousness)

Η Ευρυχωρία είναι η αίσθηση ότι ο ήχος που φθάνει από πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις, σε αντίθεση με μια μονοφωνική εντύπωση όλων των ήχων που φθάνουν στον ακροατή μέσω ενός στενού ανοίγματος.

Υπάρχουν δύο πτυχές της ευρυχωρίας, οι οποίες είναι ελκυστικές, ιδιαίτερα στο άκουσμα της μουσικής :

- Το αντιληπτό πλάτος πηγής (ASW, *Apparent Source Width*) : η εντύπωση ότι η ηχητική εικόνα είναι ευρύτερη από την οπτική φυσική έκταση της πηγής πάνω στη σκηνή. Αυτή δεν θα πρέπει να συγχέεται με λανθασμένες τοποθετήσεις χώρου, οι οποίες θα πρέπει να αποφεύγονται.
- Η Κυματομορφή ακροατή (LEV, *Listener Envelopment*) : την εντύπωση ότι ο ακροατής βρίσκεται εσωτερικά και περιβάλλεται από αντηχητικά πεδία ήχου στην αίθουσα.

Και οι δύο πλευρές έχει βρεθεί ότι εξαρτώνται από την κατεύθυνση των δημιουργούμενων τυχαίων ανακλάσεων της κρουστικής απόκρισης. Όταν ένα μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των πρώτων ανακλάσεων (έως περίπου 80 ms) φθάνουν από λανθάνουσες κατευθύνσεις (από τις πλευρές) τότε το ASW αυξάνει. Όταν το επίπεδο των καθυστερημένων πλευρικών ανακλάσεων είναι υψηλό, τότε έχουμε ισχυρά αποτελέσματα LEV.

Για τη μέτρηση του πλευρικού κλάσματος της ενέργειας (LEF), χρησιμοποιούμε τα πρώτα μέρη (μέχρι 80 ms) της εν λόγω πλευρικής ενέργειας, σε σύγκριση με την ενέργεια του άμεσου ήχου μαζί με όλες τις πρώτες ανακλάσεις που καταγράφεται από ένα συνήθες παντοκατευθυντικό (*Omn*) μικρόφωνο :

$$LEF = \left[\frac{\int_0^{80} h_1^2(t) dt}{\int_0^{80} h^2(t) dt} \right] \quad (2.18)$$

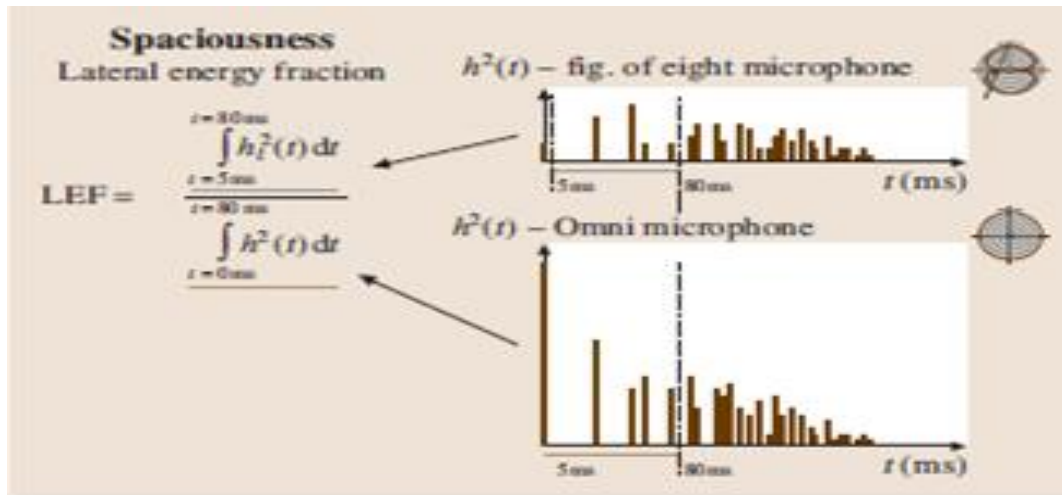
Όπου h_1 η πίεση της κρουστικής απόκρισης που καταγράφονται με (*figure of eight*) μικρόφωνο.
 h η πίεση της κρουστικής απόκρισης που καταγράφεται (συνήθως) με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο.

Για την ενέργεια της ευρυχωρίας είναι σημαντικές οι χαμηλές και οι μεσαίες συχνότητες. Κατά συνέπεια του LEF, προκύπτει από το μέσο όρο των τεσσάρων οκτάβων από 125Hz ως 1000 Hz. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του LEF, τόσο ευρύτερη η ASW. Η LEF δεν έχει μια αναμενόμενη τιμή που σχετίζονται με τον RT.

Σε εντελώς διάχυτο πεδίο, η LEF θα έχει σταθερή τιμή 0,33, το οποίο είναι υψηλότερο από αυτό που καταγράφεται συνήθως στις πραγματικές αίθουσες.

Η υποκειμενική *limen* διαφορά για LEF είναι περίπου 5%.

Η παράμετρος ASW, δεν εξαρτάται μόνο από το λόγο μεταξύ των πρώτων πλευρικών και του συνολικού πρώτου ήχου, αλλά και από το συνολικό επίπεδο του ήχου.



Εικόνα 2.5 Ορισμός της καθυστερημένης ενέργειας LEF : η κλίση μεταξύ ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων που φτάνουν από τα πλάγια, σε σχέση με την συνολική πρώιμη ενέργεια. [3][1]

Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της G (και δυνατότερη η πηγή ήχου), τόσο ευρύτερη είναι η ακουστική εικόνα της πηγής. Ωστόσο, κατά την διάρκεια του χρόνου εγγραφής, δεν υπάρχει συγκεκριμένος τρόπος να συμπεριληφθεί η επίδραση της έντασης του ήχου σε ένα αντικειμενικό μέτρο.

Η κυματομορφή ακροατή (LEV, *Listener envelopment*) είναι η χωρική κατανομή και το επίπεδο των καθυστερημένων ανακλάσεων (που φθάνουν μετά 80 ms).

Μια παράμετρος που ονομάζεται αργή πλευρική δύναμη (LG, *late lateral strength*), που συσχετίζει την καθυστερημένη πλευρική ενέργεια με τον άμεσο ήχο που μετριέται στα 10m απόσταση από την πηγή. Για την μέτρηση αυτής της ποιότητας έχει προταθεί η εξής εξίσωση (2.5) :

$$LG = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} h_1^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} h_{10m}^2(t) dt} \right] \quad (2.19)$$

Σε αντίθεση με τις ανακλάσεις που φθάνουν στην ενδιάμεση επιφάνεια, οι πλευρικές ανακλάσεις θα προκαλέσουν διαφορετική στιγμιαία πίεση στα δύο αυτιά του ακροατή. Μια τέτοια διαφοροποίηση των σημάτων στα δύο αυτιά μπορεί επίσης να μετρηθούν με τη βοήθεια του συντελεστή αυτοσυσχέτισης ακουστικής IACC (*interaural cross-correlation coefficient*), ο οποίος ορίζεται ως εξής :

$$IACC_{t_1, t_2} = \max \left| \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t)h_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t)dt}} \right| \quad (2.20)$$

Όπου t_1, t_2 καθορίζουν το χρονικό διάστημα της κρουστικής απόκρισης όπου υπολογίζεται η συσχέτιση [sec].
 h_L, h_R εκπροσωπεί την κρουστική απόκριση που μετράται στην είσοδο του αριστερού και του δεξιού αυτιού, αντίστοιχα.
 t είναι το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο κάνουμε την αναζήτηση για το μέγιστο της συσχέτισης [sec].

Κανονικά, το εύρος του χρόνου (t) επιλέγεται μεταξύ -1 και 1 ms, το οποίο καλύπτει μετά δυσκολίας το χρόνο διάστημα που χρειάζεται ο ήχος για να ταξιδέψει από το ένα αυτί στο άλλο. Καθώς η συσχέτιση κανονικοποιείται από το προϊόν της ενέργειας του HL και HR, το IACC θα έχει εύρος τιμών μεταξύ 0 και 1.

Η βιβλιογραφία για μετρούμενες τιμές σε αίθουσες περιλαμβάνουν κυρίως στοιχεία για IACC που σχετίζονται με το χρονικό διάστημα από 0 - 100 ms.

Αν και η LEF και IACC παράμετροι σχετίζονται με την ίδια υποκειμενική ποιότητα, στην πράξη δεν συσχετίζονται πολύ. Ένα άλλο γεγονός είναι ότι η LEF μετριέται, κατά κύριο λόγο, στις τέσσερις χαμηλότερες οκτάβες από 125 Hz έως 1000 Hz, ενώ η IACC συνήθως μετράται σε διάστημα οκτάβας πάνω από τα 500 Hz. Οι τιμές της IACC είναι πάντα υψηλότερες στις χαμηλότερες οκτάβες, επειδή η απόσταση μεταξύ των αυτιών (η οποία είναι μικρότερη από 30 cm) είναι μικρότερη συγκρινόμενη με το 1/4 του μήκους κύματος (περίπου 70 cm στα 125 Hz).

6. Παράμετροι που συνδέονται με το Ηχόχρωμα (Timbre or Tonal Color)

Το *Ηχόχρωμα* περιγράφει το βαθμό στον οποίο το δωμάτιο επηρεάζει τη συχνότητα ισορροπίας μεταξύ των υψηλών, μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων, π.χ. αν ο ήχος είναι σκληρός, μαλακός, ψυχρός, θερμός, ή οποιαδήποτε άλλο επίθετο που μπορεί να περιγράψει το τονικό του χρώμα.

Παραδοσιακά, ένα διάγραμμα της διακύμανσης της συχνότητας του RT (σε ανάλυση ανά οκτάβα ή 1/3 της οκτάβας), έχει χρησιμοποιηθεί για την ένδειξη αυτής της ποιότητας. Αλλά έχει προταθεί μία βολική (*single-number*) μονού αριθμού παράμετρος, που προορίζεται για τη μέτρηση της ζεστασιάς της αίθουσας [Εικόνα 2.6] : ο λόγος μπάσου (*Bass Ratio*) ο οποίος εκφράζεται ως :

$$BR = \frac{RT_{125Hz} + RT_{250Hz}}{RT_{500Hz} + RT_{1000Hz}} \quad (2.21)$$

Ή αλλιώς το *tremple ratio* (TR) μπορεί να γραφεί :

$$TR = \frac{RT_{2kHz} + RT_{4kHz}}{RT_{500Hz} + RT_{1000Hz}} \quad (2.22)$$

Όμως, σε μερικές αίθουσες, η έλλειψη του ήχου μπάσου γίνεται αντιληπτή (Bass Ratio) παρ' όλο που υπάρχουν υψηλές τιμές του χρόνου αντήχησης (RT) στις χαμηλές συχνότητες. Επομένως, η EDT ή ίσως η G έναντι της συχνότητας θα είναι μία καλύτερη και διαισθητικά πιο λογική παράμετρος για την μέτρηση του ηχοχρώματος. Ομοίως, οι BR ή TR θα μπορούσαν να βασίζονται περισσότερο σε τιμές του G παρά στις αξίες του RT.

Εκτός από τις υποκειμενικές παραμέτρους που αναφέρονται ανωτέρω, μία ποιότητα που ονομάζεται *οικειότητα* (*intimacy*), θεωρείται επίσης σημαντική στις αίθουσες θεαμάτων. Κατά τον Beranek όταν η ITDG υπερβαίνει τα 45 ms, η αίθουσα δεν έχει *οικειότητα* (*intimacy*, απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6).

Είναι πιθανό η οικειότητα να σχετίζεται με έναν συνδυασμό από τις άλλες παραμέτρους που έχουν ήδη αναφερθεί, όπως για παράδειγμα, ένα υψηλό επίπεδο ήχου σε συνδυασμό με μια καθαρή κυματομορφή ήχου που βιώνεται πολύ κοντά στην πηγή, σε δωμάτια με μικρό μέγεθος.

7. Μετρήσεις Προϋποθέσεων για Ερμηνευτές

Σε χώρους που χρησιμοποιούνται για εκτέλεση μουσικής είναι επίσης σχετικό να λάβουμε υπόψη τις ακουστικές συνθήκες των μουσικών, κατά ένα μέρος επειδή είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι μουσικοί θα έχουν τις καλύτερες δυνατές εργασιακές συνθήκες και κατά ένα άλλο μέρος, επειδή η ακουστική απόδοση, όπως ακούγεται από το ακροατήριο, θα είναι καλύτερο εάν οι συνθήκες είναι βέλτιστες για τους ερμηνευτές.

Οι μουσικοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τους την αντήχηση και το ηχόχρωμα, όπως προαναφέρθηκε, καθώς επίσης και την *ευκολία συνόλου* και της *στήριξης*, ζητήματα τα οποία είναι μοναδικά για την περίπτωση τους :

Ευκολία συνόλου (*Ease of ensemble*) : σχετίζονται με το πόσο καλά οι μουσικοί μπορούν να ακούσουν και να παίξουν μαζί με τους συναδέλφους τους. Αν η *ευκολία συνόλου* είναι δύσκολο να επιτευχθεί, το αποτέλεσμα όπως γίνεται αντιληπτό από τους μουσικούς και τους ακροατές ενδέχεται να είναι λιγότερο ακριβές, όσον αφορά i) τον ρυθμό, ii) τον τόνο και να υπάρχει έλλειψη ισορροπίας μεταξύ των διαφόρων οργάνων. Η Ευκολία Συνόλου έχει βρεθεί να σχετίζεται με το ποσό της πρώτης ενέργειας ανάκλασης που διανέμεται στη σκηνή. Μέχρι στιγμής, η μόνη ευρέως αναγνωρισμένη αντικειμενική παράμετρος που προτείνεται για την αντικειμενική μέτρηση της ποιότητας αυτής, είναι η έγκαιρη ST_{early} .

Η ST_{early} υπολογίζεται από το λόγο μεταξύ της πρώτης ενέργειας ανάκλασης και του άμεσου ήχου σε μια κρουστική απόκριση που καταγράφεται στη σκηνή σε απόσταση μόλις ενός μέτρου μεταξύ πηγής και δέκτη :

$$ST_{early} = 10 \log \frac{\int_{20ms}^{100ms} h_{1m}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{t_{df}} h_{1m}^2(t) dt} \quad (2.23)$$

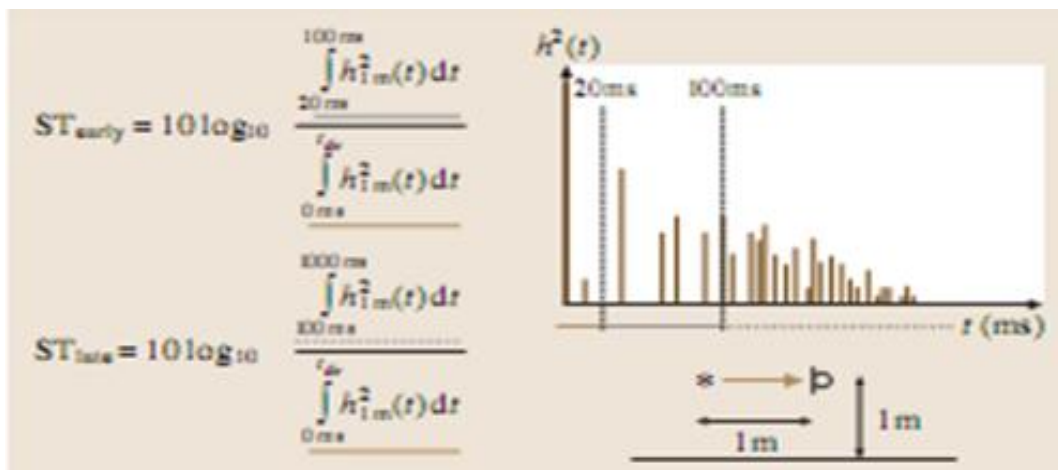
Η Υποστήριξη σχετίζεται με το βαθμό στον οποίο το δωμάτιο υποστηρίζει τις προσπάθειες των μουσικών να δημιουργήσουν τον τόνο των δικών τους μουσικών οργάνων, είτε το θεωρούν ότι είναι εύκολο να χρησιμοποιήσουν το όργανό τους είτε θα πρέπει να πιέσουν το όργανό τους να καλύψουν το δωμάτιο. Η πίεση του οργάνου προκαλεί κόπωση κατά το παίξιμο και κατώτερη ποιότητας του ήχου.

Η Υποστήριξη σχετίζεται επίσης, με το ποσό της ενέργειας που ανακλάται στη σκηνή, που μετράται χρησιμοποιώντας μόνο ένα μέτρο απόσταση της πηγής από το μικρόφωνο. Για τη μέτρηση της Στήριξης, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε και της μεταγενέστερες ανακλάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για πολλούς τύπους ηχητικών οργάνων, (κυρίως έγχορδα), οι πρώτες ανακλάσεις επικαλύπτονται από ισχυρούς απευθείας ήχους από τα ίδια τα όργανα.

Κατά συνέπεια, φαίνεται σχετικό να καθοριστεί ένα μέτρο όπως η Καθυστερημένη Υποστήριξη, που σχετίζεται με την καθυστερημένη απόκριση (μετά τα 100ms) από το δωμάτιο μέχρι τον εκπεμπόμενο ήχο.

Οι ST_{early} και ST_{late} συνήθως μετριέται στις τέσσερις οκτάβες των 150 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz. Η χαμηλότερη οκτάβα παραλείπεται, κυρίως διότι δεν είναι δυνατόν να απομονωθεί ο άμεσος ήχος από τις πρώτες ανακλάσεις σε ένα στενό εύρος μέτρησης. Οι ορισμοί της άμεσης και έμμεσης υποστήριξης απεικονίζονται στην εικόνα 2.6.

Το ποσό της αντήχησης πάνω στη σκηνή μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια της EDT (Κεφάλαιο 2.3.2, Εικόνα 2) με μια απόσταση πηγής - δέκτη, π.χ. 5 m ή περισσότερο.



Εικόνα 2.6 Ο Ορισμός τις πρώιμης υποστήριξης ST_{early} και της καθυστερημένης υποστήριξης ST_{late} . [3]

Η κλίση της ενέργειας μεταξύ πρώιμων και καθυστερημένων ανακλάσεων είναι η αναμενόμενη και ο απευθείας ήχος στην κρουστική απόκριση, και οι δυο μετρούνται σε 1m απόσταση από την πηγή.

8. Αντιληπτότητα Ομιλίας (Speech Intelligibility)

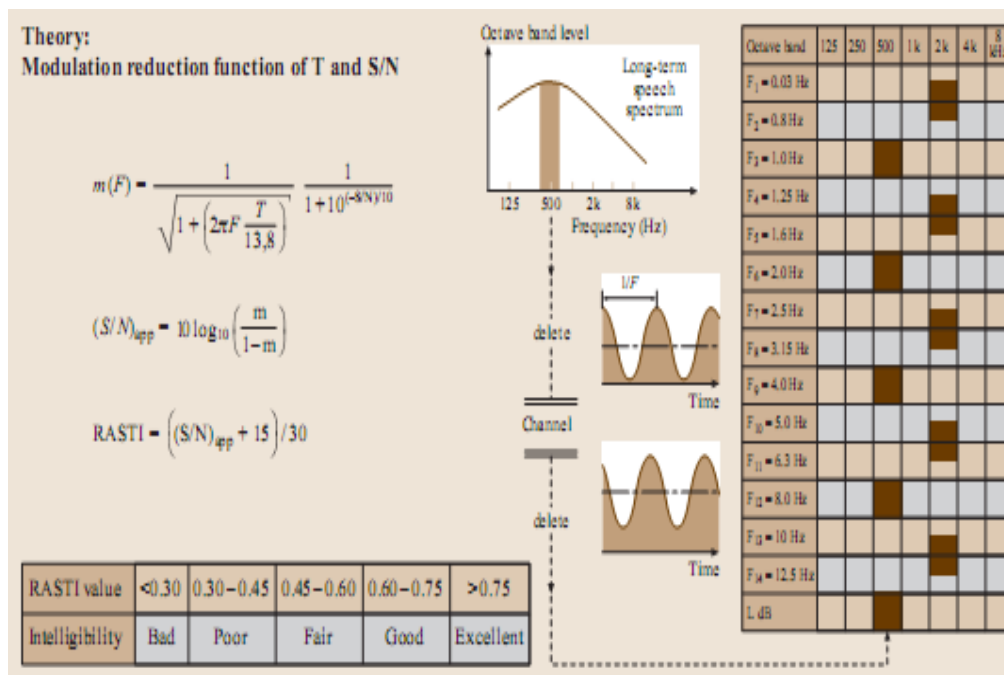
Σε αίθουσες που χρησιμοποιούνται για ομιλία (αίθουσες διδασκαλίας, θέατρα) η επίδραση της ακουστικής για την ευκρίνεια του λόγου είναι ένα μείζον ζήτημα.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να εξετάσουμε αντικειμενικά την *ευκρίνεια λόγου* σε δωμάτια είναι η μέτρηση του δείκτη μετάδοσης STI και RASTI.

Δείκτες Καταληπτότητας (STI / RASTI)

Θεωρούμε την ομιλία σαν ένα πλήρως διαμορφωμένο σήμα και μετράμε την μεταβολή του πλάτους διαμόρφωσης από αργά μεταβαλλόμενα σήματα (*modulation*) κατά μήκος αυτής της ακολουθίας. Μετράμε αν η διαδρομή μετάδοσης προσθέτει θόρυβο ή αντήχηση στο σήμα και αν ο βαθμός διαφοροποίησης των σημάτων θα μειωθεί, με αποτέλεσμα την μειωμένη ευκρίνεια.

Η μεταφορά της διαφοροποίησης εκπέμπει σε επτά οκτάβες και κάθε διαμόρφωση αναλύεται σε 14 διαφορετικές συχνότητες διαφοροποίησης (παρατίθενται δεξιά στον πίνακα της Εικόνας 2.7).



Εικόνα.2.7 Παρουσίαση της θεωρίας και οι εξισώσεις των μετρήσεων STI η RASTI. [3]
 δεξιά : Η κλίμακα για την αξιολόγηση των τιμών RASTI
 κάτω μέρος : η αξιολόγηση των τιμών RASTI από 0 έως 1

Ο σταθμισμένος μέσος όρος του συντελεστή μείωσης της διαφοροποίησης στη συνέχεια, οδηγεί σε έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1, που αντιστοιχεί σε πολύ φτωχές και εξαιρετικές συνθήκες, αντίστοιχα.

Παρ' όλο που η αρχική μέθοδος μέτρησης της STI ή RASTI χρησιμοποιεί διαμορφωμένα σήματα θορύβου, είναι πιθανόν ο παράγοντας μείωσης διαμόρφωσης να υπολογιστεί από την κρουστική. Οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετική συχνотική περιοχή : STI (125 Hz – 8 KHz) και η RASTI (από 500 Hz έως 2 KHz). Επίσης κατά την διάρκεια της μέτρησης των δύο δεικτών χρησιμοποιείται διαφορετικό είδος σήματος. Η μέθοδος STI / RASTI περιγράφεται στο πρότυπο IEC 286-16 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC).

Σύμφωνα με τον *Bradley* μια απλούστερη παράμετρος, που ονομάζεται U80 (*useful – to-detrimental sound ratio*) είναι εξίσου κατάλληλη για τη μέτρηση της κατανόησης του λόγου. Η U80 είναι απλώς μια τροποποιημένη εκδοχή της παραμέτρου της Σαφήνειας, στην οποία έχει γίνει μία διόρθωση σύμφωνα με το λόγο μεταξύ του επιπέδου ομιλίας και του θορύβου βάθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, η ακουστική συμπεριφορά στους μικρούς χώρους μελετάται σύμφωνα με τις αρχές της κυματικής ακουστικής, ενώ στους μεγάλους χώρους σύμφωνα με τις αρχές της γεωμετρικής ή στατικής ακουστικής.

Η επιστήμη της υπολογιστικής ακουστικής παρουσίαζε δυσκολίες στην προσομοίωση της κίνησης του ήχου (με τη βοήθεια των υπολογιστικών προγραμμάτων) στους υπό μελέτη χώρους. Έπρεπε να ληφθούν υπόψη όλα τα δεδομένα που επηρεάζουν τον ήχο κατά τη διαδικασία αναπαραγωγής τους στο «φυσικό» τους χώρο, αλλά και να βρεθούν τρόποι που να συμβιβάζονται με τις υπολογιστικές αρχές, και να μας δίνουν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα με τη βέλτιστη προσέγγιση για το κάθε ακουστικό πρόβλημα.

Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι της προσομοίωσης του ήχου σε κλειστούς χώρους και θα αναλύσουμε ειδικότερα τις δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως στο υπολογιστικό προγράμματα.

- Η μέθοδος Ανίχνευσης Ακτινών (*Ray Tracing Method*).
- Η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Method*).

3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΧΩΡΩΝ

Η ανάγκη πρόβλεψης των κλειστών χωρών για ομιλία ή μουσική, με σκοπό την ακουστική βελτίωση οδήγησαν στην δημιουργία μοντέλων ακουστικής προσομοίωσης, τα όποια χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

3.1.1 Κατασκευή μοντέλων υπό κλίμακα

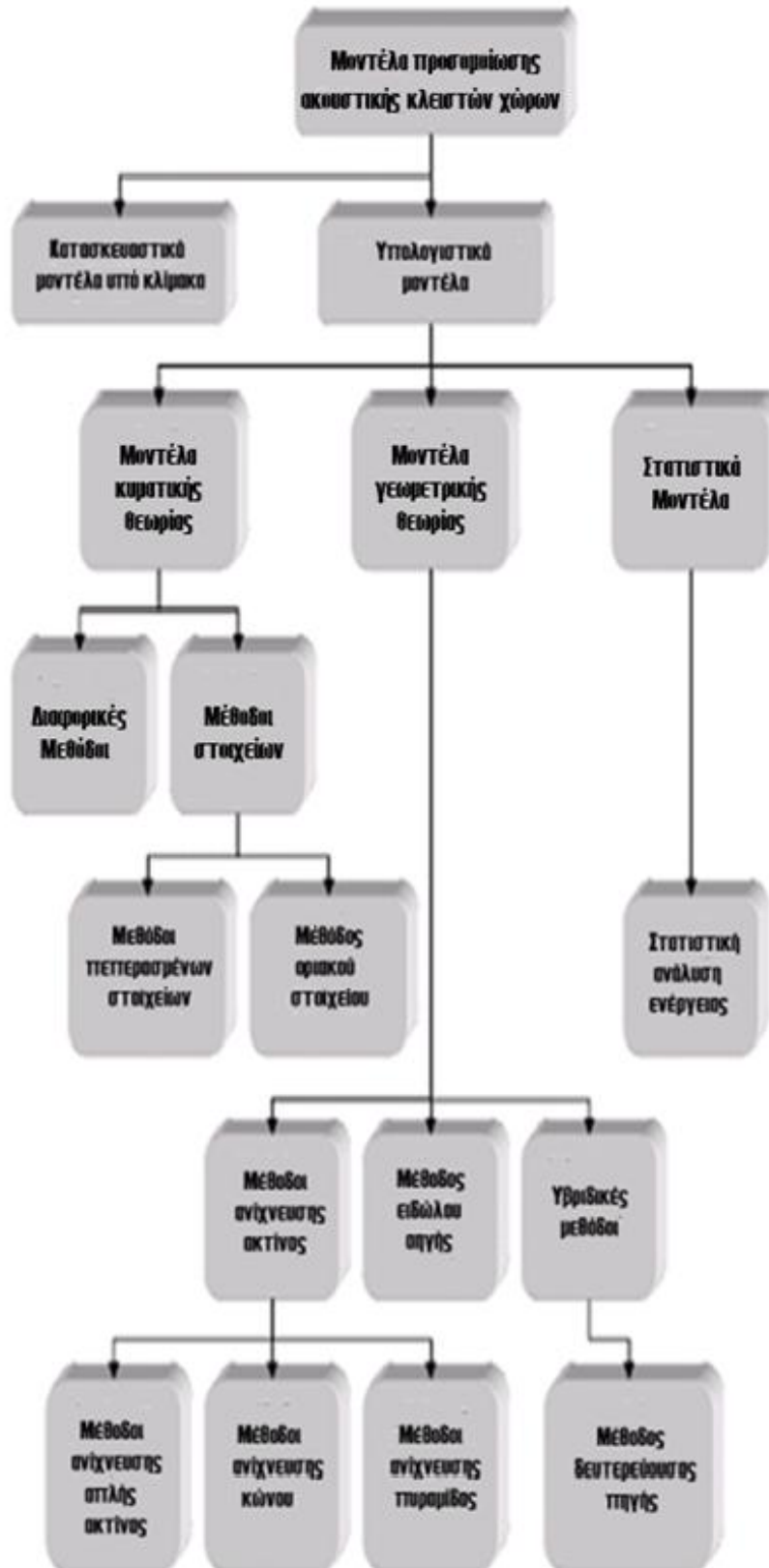
Η φυσική μοντελοποίηση υπό κλίμακα έχει εφαρμοστεί ως εργαλείο πρόβλεψης για περισσότερα από 75 χρόνια. Η εφαρμογή μοντέλων υπό κλίμακα είναι σε θέση να προβλέψει και να αξιολογεί την ακουστική συμπεριφορά του δωματίου.

Σε ιδανικές συνθήκες η τεχνική προσπαθεί να χειριστεί όλα τα φυσικά φαινόμενα που έχουν σημασία για το αποτέλεσμα, όπως i) το σχήμα και τον όγκο του δωματίου ,ii) τα χαρακτηριστικά της πηγής – δεκτή και iii) τη θέση και τις ιδιότητες επιφάνειας : απορρόφηση, διάθλαση.

Αυτή η μέθοδος είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία, με περιορισμένες δυνατότητες επέμβασης στη γεωμετρία του μοντέλου και μη εφικτή την αλλαγή των υλικών του.

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, η προσομοίωση σε υπολογιστή με εικονικά μοντέλα έχει προσφέρει μια ακόμα πιο πειστική εναλλακτική λύση σε φυσικές μετρήσεις μοντέλων κλίμακας. Η πιο σύγχρονη μέθοδος προσπαθεί να περιγράψει τη φύση μέσα από μαθηματικά μοντέλα, ενώ η παλαιότερη να ελέγξει την πραγματική φύση των φαινομένων.

Τεχνικές προσομοίωσης ακουστικής χώρων



Εικόνα 3.1 Τεχνικές προσομοίωσης Ακουστικής Χωρών [15]

• Μοντέλα προσομοίωσης σε υπολογιστή

Αποτελεί την πιο βασική και εξελισσόμενη διαδικασία πρόβλεψης στην ακουστική χώρων. Τοποθετούνται τα δεδομένα του χώρου σε υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης ακουστικής και ακουστικοί αλγόριθμοι καλούνται να επιλύσουν το εκάστοτε ακουστικό πρόβλημα. Οι κατηγορίες υπολογιστικών μοντέλων είναι οι εξής (Εικόνα 3.1) :

i. Μοντέλα κυματικής θεωρίας

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ακουστικά μικρούς χώρους με απλό σχήμα (π.χ. ορθογώνιο). Οι αρχές τους αναπτύσσονται με την παραδοχή ότι ο ήχος διαδίδεται σαν κύμα. Τότε στο χώρο θα επικρατούν κυματικά φαινόμενα.

Έχουν εξαιρετικά καλά αποτελέσματα σε σχεδιαστικά απλούς χώρους. Σε πιο πολύπλοκους χώρους, το υπολογιστικό φορτίο (ιδίως στις υψηλές συχνότητες) είναι πολύ μεγάλο για να το επεξεργαστούν ακόμα και υπολογιστές τελευταίας γενιάς.

A) Διαφορικές μέθοδοι

Είναι ολοκληρωτικές μέθοδοι για τη διάδοση και τη διασπορά κυμάτων που εφαρμόζονται για περισσότερο από έναν αιώνα, για την εξαγωγή αναλυτικών λύσεων σε ένα περιορισμένο αριθμό απλοποιημένων προβλημάτων.

B) Μέθοδοι διακριτοποίησης στοιχείων

Αριθμητικές υπολογιστικές τεχνικές για την εύρεση λύσεων με προσέγγιση από *μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE)*, καθώς και ολοκληρωτικές εξισώσεις.

Στην επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, η κύρια πρόκληση είναι να δημιουργηθεί μια εξίσωση, που να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα αυτό που πρέπει να μελετηθεί. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη φύση και τη γεωμετρία του προβλήματος.

B1) Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων - *Finite Element Method (FEM)*

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος υπολογισμού (με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή) για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε μερικές διαφορικές εξισώσεις.

B2) Μέθοδος οριακού ή συνοριακών στοιχείων – *Boundary Element Method (BEM)*

Χρησιμοποιείται για την επίλυση γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η ολοκληρωτική εξίσωση μπορεί να θεωρηθεί ως ακριβής λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης. Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων προσπαθεί να κάνει χρήση των δεδομένων συνοριακών συνθηκών και να συνδέσει τις συνοριακές τιμές με τη διαφορική εξίσωση. Όταν γίνει αυτό, η διαφορική εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιήσει επανειλημμένα τη συγκεκριμένη διαδικασία απευθείας, σε κάθε σημείο στο εσωτερικό του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Η μέθοδος αυτή έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε χωρία που εκτείνονται στο άπειρο (ακουστική σε εξωτερικούς χώρους).

ii. Μοντέλα γεωμετρικής θεωρίας

Θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται όπως η ακτίνα του φωτός. Τα μοντέλα είναι κατάλληλα για την περιγραφή διάδοσης για συχνότητα ($f > 2000$ Hz – και το μήκος κύματος είναι μικρό σε σχέση με τις επιφάνειες του χώρου). Έχουν τη δυνατότητα να περιγράψουν με περισσότερη ακρίβεια τις ανακλάσεις, από ότι με τη διάδοση σαν πραγματικό κύμα. Τα φαινόμενα διάχυσης και η εξάρτηση από τη συχνότητα δεν λαμβάνονται υπόψιν.

α. Μέθοδοι ανίχνευσης ακτίνας – Ray Tracing

Η μέθοδος κάνει προσομοίωση ηχητικής πηγής που εκπέμπει έναν μεγάλο αριθμό ακτινών οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο, για χρονικό διάστημα μέχρι να αποσβεστεί από μια συνοριακή επιφάνεια που έχει οριστεί ως πλήρως απορροφητική.

Για καλύτερη προσέγγιση χρησιμοποιείται ο συντελεστής διασποράς (*scattering efficient*) επιφάνειας, ο οποίος μαζί με το συντελεστή ανάκλασης περιγράφουν πλήρως μια επιφάνεια.

Η μέθοδος ανίχνευσης των ακτινών μπορεί να εφαρμοστεί υπό την μορφή :

α) απλής ακτίνας, β) κώνου, γ) πυραμίδας

β. Μέθοδος των ειδώλων – Image model

Βασίζεται στη θεώρηση ότι όλες οι ανακλάσεις από συνοριακές επιφάνειες συνεισφέρουν στην ηχητική ενέργεια σαν είδωλα πηγής (*image source*).

Σε απλούς χώρους έχει μεγάλη ακρίβεια, διότι καλύπτει όλη την πιθανή διάδοση μεταξύ πηγής – δεκτή. Σε πιο σύνθετους χώρους, ο αριθμός εικονικών πηγών είναι πολύ μεγάλος και τον όγκο της πληροφορίας είναι αδύνατο να τον επεξεργαστούν τα υπολογιστικά λογισμικά.

γ. Υβριδικές μέθοδοι – Secondary Source Model

Είναι ένας συνδυασμός των δυο προηγούμενων μεθόδων. Περιορίζουν την υπολογιστική ισχύ εντοπίζοντας τις πιο σημαντικές ενεργειακά εικονικές πηγές ακολουθώντας την τροχιά ακτινών. Σημαντικό ρόλο έχει ο άξονας ακτίνας, ο οποίος ορίζει την ακτίνα και την ανάκλαση της. Επίσης καθορίζει αν η ακτίνα θα διασχίσει μια ή περισσότερες επιφάνειες.

iii. Στατιστικά μοντέλα

Είναι μοντέλα που δημιουργούνται με την βοήθεια της στατιστικής επιστήμης. Τα δεδομένα τοποθετούνται σε υπολογιστικά προγράμματα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Μέθοδος στατιστικής ανάλυσης ενέργειας – Statistical Energy Analysis (SEA)

Ειδικεύεται στην ανάλυση ενέργειας με την βοήθεια της στατιστικής επιστήμης.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ (RAY TRACING METHOD)

Η μέθοδος κάνει προσομοίωση ηχητικής πηγής που εκπέμπει έναν μεγάλο αριθμό ακτινών, οι οποίες κατανομούνται ομοιόμορφα στο χώρο, για χρονικό διάστημα μέχρι να αποσβεστεί από μια συντομική επιφάνεια που έχει οριστεί ως πλήρως απορροφητική. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε ακουστικές εφαρμογές.

Μπορεί να εφαρμοστεί υπό την συνθήκη ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη του δωματίου (L) είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος του ήχου (λ): ($L / \lambda \gg 1$). Αυτή η συνθήκη ικανοποιείται στην ακουστική δωματίου, διότι το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης των εκατοστών, ενώ το μέγεθος ενός δωματίου είναι της τάξης των μέτρων, με τις ζώνες συχνοτήτων των χαμηλών οκτάβων να αποτελούν εξαίρεση. Η θεωρία της μεθόδου βασίζεται στην αναλογία μεταξύ της διάδοσης της δέσμης της ηχητικής ενέργειας και της διάδοσης της δέσμης των ακτινών της ενέργειας του φωτός.

Η χρήση των αριθμητικών αλγορίθμων (FEM ή BEM) για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων (πάνω από 10^3 κόμβους, όπου καταλήγει σε συνολικό αριθμό κόμβων $M = 10^{10}$) ξεπερνάει τις δυνατότητες και των πιο εξελιγμένων υπερ-υπολογιστών. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός μέσω μηχανικών μεθόδων έχει ευρέως εφαρμοστεί στην ακουστική του δωματίου. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό των σημαντικότερων ακουστικών παραμέτρων: όπως π.χ. ο χρόνος αντήχησης (RT).

Κλασικές μονογραφίες [19,20] περιγράφουν τη θεωρία Sabine, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό αυτής της παραμέτρου, για την περίπτωση των τέλεια διαχεόμενων ανακλώμενων επιφανειών. Η τελευταία ιδιότητα σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της πρόσπτωσης ενός ηχητικού κύματος, η ανάκλαση του από την συντομική επιφάνεια οδηγεί σε μια ομοιόμορφη διασπορά της κυματικής ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στην αντίστοιχη γωνία του στερεού.

Η φόρμουλα η οποία βασίστηκε σε στατιστικά πρότυπα για την διάδοση των ακουστικών ακτινών (διευκρινίστηκε από τον Eyring) και τελικά δόθηκε με τη μορφή:

$$RT = \frac{0.161 * V}{4\mu V + S \ln(1 - \alpha^*)} \quad \mu\epsilon \quad \alpha^* = \frac{1}{S} \sum_i a_i S_i \quad (3.2)$$

Όπου V ο όγκος δωματίου [m^3].

S η περιοχή συντομικής επιφάνειας [m^2].

μ η ιξώδης απόσβεση μέσου στον αέρα

α^* η μέση τιμή του συντελεστή ηχοαπορρόφησης σε κατοπτρικές επιφάνειες

a_i η μέση τιμή του συντελεστή ηχοαπορρόφησης σε απορρόφηση επιφάνειας

Ο τελευταίος συντελεστής (a_i) δείχνει το μερίδιο της ενέργειας από τα ενδεχόμενα κύματα που χάνονται σε κάθε μονή ανάκλαση που δίνεται από συγκεκριμένη επιφάνεια

Είναι ευρέως γνωστό ότι η θεωρία Sabine-Eyring μειονεκτεί στον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης, διότι η πραγματική ανάκλαση των κυμάτων δεν διαχέεται τέλεια, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ανακλάται με βάση τη γεωμετρική θεωρία της περιθλασης (σύμφωνα με τους νόμους της γεωμετρικής οπτικής). Υπάρχει μέγιστη απόκλιση από τα δεδομένα πλήρους κλίμακας των μετρήσεων, σε χώρους με υψηλή ανομοιομορφή απορρόφηση.

Ωστόσο, θεωρώντας μόνο την κατοπτρική ανάκλαση, δεν λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες σκέδασης (διάχυσης) των ανακλώμενων επιφανειών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ η θεωρία Sabine - Eyring βγάζουν υποεκτιμημένες τιμές του RT (χρόνου αντήχησης), λόγω της υπόθεσης ότι, είναι εντελώς διάχυτο το πεδίο κύματος, η μέθοδος ανίχνευσης ακτινών (RTM) που χρησιμοποιείται με την δυνατότητα που έχει για τις κατοπτρικές ανακλάσεις και μόνο, π.χ. χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες διάχυσης στις ανακλώμενες επιφάνειες από τον RT. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, είναι απαραίτητο να εισαχθεί ο συντελεστής διάχυσης (δ_m) που χαρακτηρίζει κάθε μια από τις ανακλώμενες επιφάνειες (S_m). Ο συντελεστής αυτός, μαζί με το συντελεστή απορρόφησης (α_m) δίνει τα πλήρη χαρακτηριστικά των φυσικών ιδιοτήτων των ανακλώμενων επιφανειών [7, 8, 18].

3.2.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ

Σε μια υλοποίηση σε υπολογιστή, με βάση τη μέθοδο ανίχνευσης ακτινών RTM (*Ray Tracing Method*), χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός ακουστικών ακτινών (για παράδειγμα 500.000 ακτίνες) που διαχέεται από την πηγή του ήχου ομοιόμορφα σε όλες κατευθύνσεις, όταν το διάγραμμα ακτινοβολίας της πηγής είναι σφαιρικό. Αυτές οι ακτίνες κινούνται πάνω από το κλειστό δωμάτιο, χάνοντας ένα μέρος της ενέργειάς τους σε κάθε ανάκλαση σύμφωνα με τον συντελεστή απορρόφησης (α_m) όπου είναι καθορισμένος για κάθε ένα από τα ανακλώμενα επίπεδα. Σε γενικές γραμμές, οι συντελεστές αυτοί είναι διαφορετικοί, για διαφορετικές ανακλαστικές επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία από μόνη της προκαλεί μεγάλη απόκλιση των ακριβών υπολογισμών από τους προσεγγιστικούς τύπους που βασίζονται στο μέσο συντελεστή απορρόφησης.

Η υλοποίηση αυτής της μεθόδου σε ένα υπολογιστικό αλγόριθμο έχει ως εξής :

Ο αλγόριθμος ανιχνεύει κάθε μία από τις ακτίνες καθώς απομακρύνονται από την πηγή και περιπλανούνται στο κλειστό δωμάτιο, καταγράφονται ως σήματα σημείων όλα τα συμβάντα της πορείας της ακτίνας διαμέσου ενός μικρού δείκτη εγγύτητας (ϵ) του αποδέκτη (στην πράξη, στην περίπτωση μιας μεγάλης αίθουσας, λαμβάνεται, $\epsilon = 0,1 m$). Σε όλο το μήκος της διαδρομής κάθε μίας από τις ακτίνες, υπολογίζει κυρίως την μείωση της έντασης που καταγράφεται, λόγω της εξασθένησης των ακτινών στον αέρα (m) κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής της (η εξασθένηση του αέρα (m) θεωρείται ότι είναι γνωστή για μια δεδομένη θερμοκρασία, υγρασία και συχνότητα, όπου αντίστοιχος πίνακας υπάρχει στο παράρτημα 7.1). Δεδομένου ότι σε κάθε σύγκρουση με ένα ανακλαστικό επίπεδο, η ενέργεια της ακτίνας μειώνεται σύμφωνα με το συντελεστή απορρόφησης για τη δεδομένη επιφάνεια, κάθε τρέχουσα ακτίνα ανιχνεύεται μέχρι την στιγμή που φθάνει σε ένα ορισμένο ελάχιστο επίπεδο (στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, το ελάχιστο επίπεδο του ήχου θεωρείται ότι είναι -60 dB σε σχέση με το ηχητικό επίπεδο της πηγής). Για να καθοριστεί η κατεύθυνση διάδοσης της ανακλώμενης ακτίνας, μετά από κάθε σύγκρουση με ένα ανακλώμενο επίπεδο, δημιουργείται ένας τυχαίος αριθμός (ζ) με μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα (0,1). Ο αριθμός αυτός χρησιμεύει για να προσδιορίσει εάν η ανάκλαση της ακτινοβολίας είναι κατοπτρικού ή διάχυτου χαρακτήρα. Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης διαφορετικών υλικών δεν παρουσιάζονται σε πίνακες και είναι δύσκολο να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Πρακτικά σε μεγάλους ανακλαστήρες με πολύ λείες επιφάνειες, ο συντελεστής διάχυσης θα πρέπει στην πράξη να ληφθεί $\delta \approx 0,1$, ενώ για μια καλυμμένη επιφάνεια με πολλούς λεπτούς ανακλαστήρες, κάποιος μπορεί να λάβει $\delta \approx 0,8 - 0,9$. Για άλλες ενδιάμεσες ανακλώμενες επιφάνειες, η τιμή του συντελεστή σκέδασης βρίσκεται μεταξύ αυτών των δύο τιμών.

Στην βιβλιογραφία [1] παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου κατά την ανάπτυξη των εικονικών μοντέλων της ακουστικής του ήχου ενός δωματίου. Στην ουσία πραγματοποιούμε "*Auralization*", μια διαδικασία όπου αναλύεται η τεχνική της ρύθμισης ενός αναλυτικού μοντέλου της απόκρισης ενός χώρου με τη χρήση ηχητικών σημάτων από τη πηγή και των αντιστοιχών μετρήσεων αποκρίσεων του χώρου. Η αριθμητική υλοποίηση των προτεινόμενων μοντέλων συμβαίνει σε πραγματική χρονική κλίμακα.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια υπολογιστική αριθμητική μέθοδος, με σκοπό τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων σε φυσικά φαινόμενα που περιγράφονται μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE, *Partial Differential Equations*).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) βασίζεται στην ιδέα ότι οι κατασκευές είναι πολύπλοκα αντικείμενα τα οποία διαχωρίζονται και αναλύονται σε μικρότερα κομμάτια. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα, είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων πρέπει να χρησιμοποιήσουμε προσεγγιστικές μεθόδους και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια από αυτές.

Τα μαθηματικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι σύνθετα. Αυτό το κεφάλαιο δίνει μια γενική επισκόπηση των βασικών στοιχείων της μεθόδου, αλλά δεν επιχειρεί να το αποδώσει σε αυστηρά μαθηματικά. Υπάρχουν πολλά εξαιρετικά κείμενα για τις θεμελιώδεις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην βιβλιογραφία.

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να συνδέσει το χάσμα μεταξύ, i) εξαιρετικών κείμενων που έχουν γραφτεί για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ii) τα δεδομένα του χρήστη, iii) τις οδηγίες εισόδου για τους διάφορες κώδικες πεπερασμένων στοιχείων

3.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στις επιστήμες για τους μηχανικούς κατά το δεύτερο ήμισυ του 20ού αιώνα. Η σύλληψη της μεθόδου αποδίδεται στο μεγάλο Έλληνα μηχανικό-ερευνητή Τζον Αργύρη, στην προσπάθειά του να επιλύσει το πρόβλημα του σχεδιασμού των πρώτων αεριωθούμενων μαχητικών αεροσκαφών στο *Royal Aeronautical Society* της Βρετανίας στα τέλη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

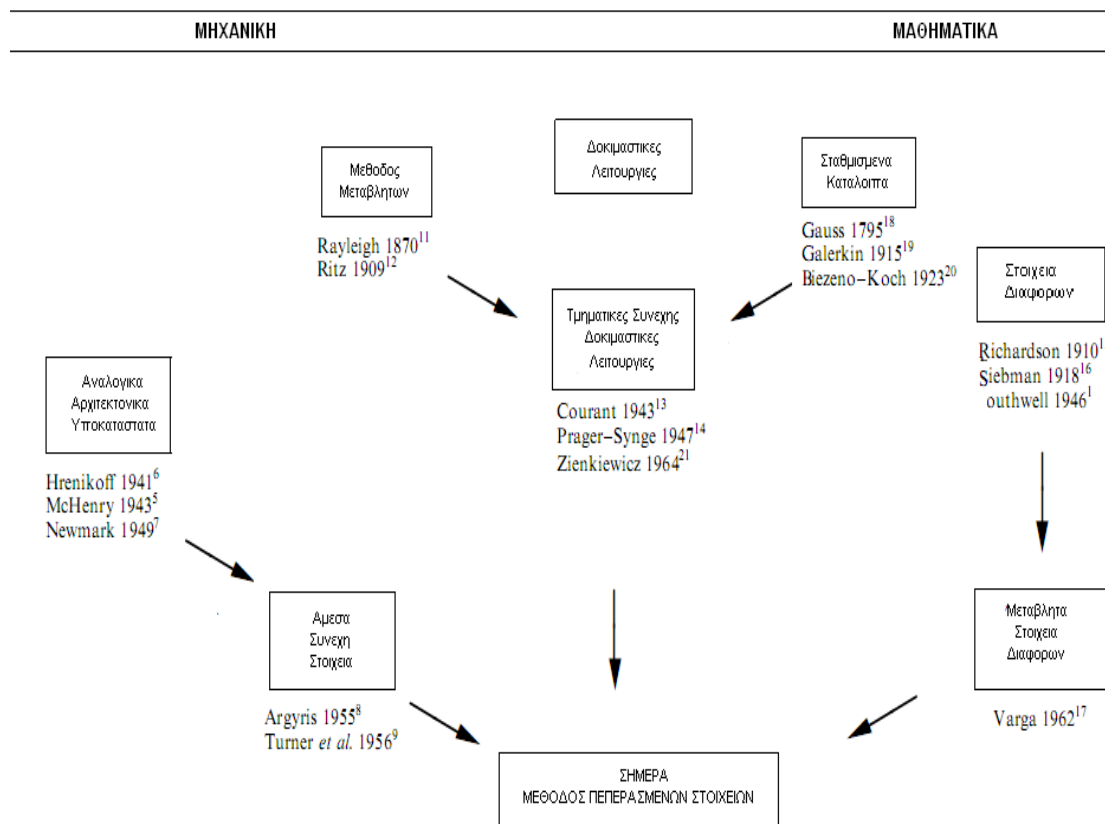
Οι πρωτεργάτες της επιστήμης είναι ο *Hrennikoff* [1941] με τις θεωρίες για την προσέγγιση του συνεχούς με *δικτύωμα ράβδων*. Αργότερα ο *McHenry* [1943] επέκτεινε την θεωρία σε *Μοντέλα στερεών τριών διαστάσεων*. Επίσης ο *Courant* [1943] – *Μεταβλητή Μορφή* και ο *Levy* [1947,1953] – *Ελαστικότητα-Δυσκαμψία*. Η τυπική διατύπωση της μεθόδου παρουσιάστηκε με πληρότητα το 1954 σε μία εκτεταμένη μονογραφία του *T. Αργύρη* και *S. Kelsey - Αρχές Ενέργειας*. Το 1960 σε άρθρο του ο *R. Clough* από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού με το βιβλίο «ο Όρος των Πεπερασμένων Στοιχείων».

Τα επόμενα χρονιά στην εξέλιξη συντέλεσαν :

- Τη δεκαετία του 70, οι εφαρμογές που πραγματοποιούνταν σε ένα μεγάλο σύστημα υπολογιστών.
- Τη δεκαετία του 1980, η ανάπτυξη των μικροϋπολογιστών (προεπεργαστές, μεταεπεξεργαστές).
- Τη δεκαετία του 1990, η ανάλυση μεγάλων κατασκευών.

Από την εποχή εκείνη και μετά, η ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και η χρήση της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων των μηχανικών, συμβαδίζουν με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των Η/Υ. Κι αυτό, γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE's) και μετά από τη διακριτοποίηση τους, σε ένα σύστημα εξισώσεων, που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος βαθμών ελευθερίας (*degrees of freedom*) του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια του Η/Υ.

Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών πράξεων σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν μερικά χρόνια.



Εικόνα 3.2 Η ανάπτυξη της επιστήμης Μηχανικής και Μαθηματικών. Τρόπος δημιουργίας FEM. [7]

Αν και υπάρχουν πολλοί κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, το καθένα με διαφορετικά δεδομένα και καθεστώς εισόδου, υπάρχει ένα κοινό σύνολο απαιτούμενων βασικών στοιχείων εισόδου για το καθένα.

Ο στόχος ενός μηχανικού, χρησιμοποιώντας την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, είναι να εργαστεί πάνω στο μηχανικό πρόβλημα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα του δώσει κατάλληλη ακρίβεια σε λογικό μέγεθος από την άποψη της ανάλυσης και του υπολογιστικού χρόνου.

3.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Βασική Ορολογία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε συνεχής συνάρτηση μέσα στο πεδίο ορισμού της μπορεί να προσεγγιστεί από μια σειρά από συναρτήσεις που λειτουργούν πάνω σε ένα πεπερασμένο αριθμό μικρών κομματιών που καλύπτουν το πεδίο ορισμού (*Subdomains*). Μέσα σε κάθε ένα από τα κομμάτια αυτά η άγνωστη συνάρτηση προσεγγίζεται με ένα συστηματικό τρόπο με τη βοήθεια προαποφασισμένων συναρτήσεων προσέγγισης.

Οι σειρές αυτές των συναρτήσεων είναι κατά τμήματα συνεχείς και θα πρέπει να προσεγγίζουν την ακριβή λύση, καθώς ο αριθμός των υποτομέων πλησιάζει το άπειρο. Αυτές είναι οι εξής :

1. Το γενικότερο χωρίζεται σε υποτομείς που ονομάζονται στοιχεία (*elements*).
2. Τα σημεία καθορισμού και οι σύνδεσης των στοιχείων ονομάζονται κόμβοι (*Nodes*) ή κομβικά σημεία (*Nodal Points*).
3. Η συνάρτηση που υπάρχει πάνω στο πεδίο ορισμού της είναι ρητά επιλυμένη για τα κομβικά σημεία, δηλαδή, τις κομβικές μεταβλητές.
Υποτίθεται ότι η τιμή της συνάρτησης σε οποιοδήποτε σημείο εσωτερικά σε ένα στοιχείο μπορεί να οριστεί από την άποψη των κομβικών μεταβλητών των στοιχείων του. Οι κομβικές μεταβλητές αναφέρονται ως βαθμοί ελευθερίας (*degrees of freedom*).

Παρόλο που τα στοιχεία προσδιορίζονται ως ενωμένα στους κοινούς κόμβους, θεωρούνται ότι είναι συζευγμένοι (κατά μήκος των κοινών ορίων) και η συνάρτηση θεωρείται ότι είναι συνεχής στα όρια, αν και η συνέχεια στην κλίση δε διατηρείται απαραίτητα. Η πλήρης συλλογή των στοιχείων αποτελεί μια προσέγγιση της γεωμετρίας του πεδίου ορισμού ως ένα σύνολο συνεχές. Τα κομβικά σημεία είναι μόνο τα σημεία αναφοράς για τον υπολογισμό της συνάρτησης και δεν αντιπροσωπεύουν φυσικά σημεία της σύνδεσης εντός του πεδίου ορισμού τους.

3.3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΕΝΙΚΟΥ ΣΚΟΠΟΥ

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα, επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται προ-επεξεργαστές (*pre processor*).
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται επιλύτες - *solver* - και τα χρησιμοποιούν για την επίλυση των αριθμητικών μεθόδων.

4. Όταν τελειώσει η επίλυση, τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιήσουν ένα πρόγραμμα που αποκαλείται *μετά-επεξεργαστής (post processor)*, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

Βασικά Ειδή Στοιχείων

Τα είδη στοιχείων μπορεί να χωριστούν στις εξής βασικές ομάδες :

α) Δυο διαστάσεων ,β) Τρισδιάστατα στερεά ,γ) Πλάκες. Αλλά και σε άλλα ειδικά στοιχεία π.χ. ελατήρια, συμπυκνωμένη μάζα, κενό.

Η κοινή διαδικασία για τη διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας για στατική και δυναμική ανάλυση, ανεξάρτητα από το είδος των στοιχείων, επιτρέπει το συνδυασμό διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων κατά την διακριτοποίηση και ανάλυση μιας κατασκευής.

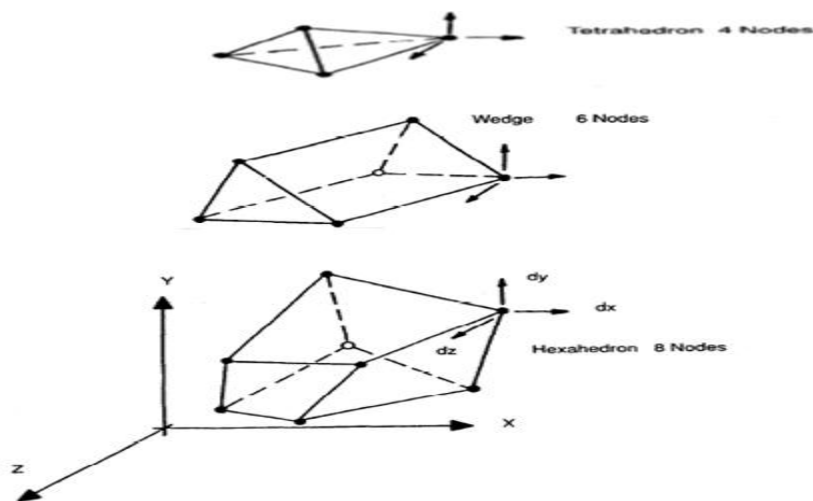
A. Δισδιάστατα Στοιχεία

Δύο διαστάσεων στοιχεία χρησιμοποιούνται, i) στις επίπεδες εντάσεις, ii) στις επίπεδες χορδές, iii) στις αξονοσυμμετρικές καταστάσεις. Τα στοιχεία δύο διαστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν όλες οι δυνάμεις και οι μετατοπίσεις ενεργούν επίπεδα. Τα στοιχεία αυτά έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Τα σχήματα περιλαμβάνουν τετράπλευρα και τρίγωνα. Τα στοιχεία μπορούν να έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους ή μπορεί να έχουν επιπλέον κόμβους στην μέση των τμημάτων.

Τα αξονοσυμμετρικά στοιχεία είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για στερεά μοντέλα περιστροφής π.χ. δοχεία πίεσης.

B. Τρισδιάστατα στερεά στοιχεία

Είναι τρισδιάστατα στερεά στοιχεία που διατυπώνονται ως άμεση προέκταση των στοιχείων δύο διαστάσεων. Τα τρισδιάστατα στερεά στοιχεία για το πρόβλημα ελαστικότητας έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο : οι μετακινήσεις στις x, y, και z κατευθύνσεις. Οι παραμορφώσεις και οι τάσεις υπολογίζονται από τα στοιχεία που περιλαμβάνουν τετράεδρα, σχήματα σφήνας ή ορθογώνια πρίσματα όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.3*.

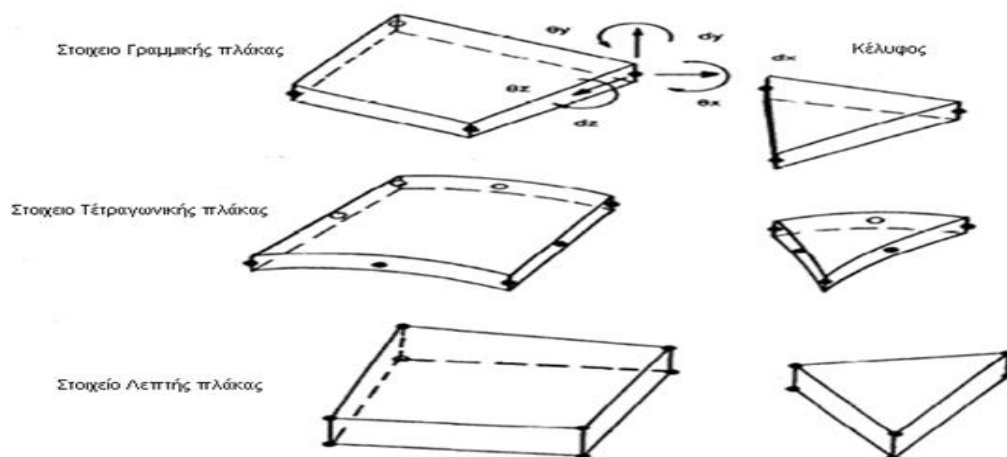


Εικόνα 3.3 Τυπικά Είδη Τρισδιάστατων υγρών στοιχείων [8]

Γ. Στοιχεία Πλάκας

Οι πλάκες και τα στοιχεία κελύφους (*Shell*) έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο και είναι αντίστοιχα με τα στοιχεία της δοκού (Σχήμα 3.7). Επιπλέον τα στοιχεία πλάκας έχουν μόνο ένα κόμβο στις κορυφές τους, έτσι ώστε το πάχος της πλάκας να μπορεί να προσδιορισθεί είτε ως μια σταθερή ή γραμμική παραλλαγή.

Η μορφή των στοιχείων πλάκας και κελύφους έχουν μορφή όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα Εικόνα 3.4



Εικόνα 3.4 Στοιχεία Πλάκας και Κελύφους [8]

3.3.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

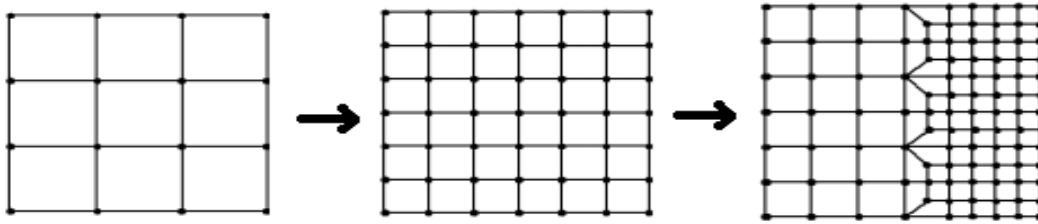
Ανάλογα με, i) το είδος της κατασκευής, ii) φόρτισης, iii) συμπεριφοράς, καθώς και iv) της απαιτούμενης ακρίβειας της ανάλυσης, χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη στοιχείων και διαφορετικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων.

Η επίλυση πρέπει να ελέγχεται για την ορθότητα της πυκνότητας ενός τομέα από *στοιχεία* που ονομάζεται *κάναβος* ελέγχοντας εάν τα αποτελέσματα συγκλίνουν σε κάποια λύση.

Η ακρίβεια της επίλυσης εκφράζεται από το είδος των πεπερασμένων στοιχείων, την πυκνότητα της *κάναβου* αλλά και τα είδη στοιχείων όπως αναφέραμε πριν. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως σε σημεία εφαρμογής συγκεντρωμένων φορτίων ή ασυνεχειών, απαιτείται η πύκνωση των στοιχείων..

Οι περιοχές όπου απαιτείται ενδεχομένως η πύκνωση της *κάναβου*, είναι εκεί όπου από την ανάλυση προκύπτουν μεγάλες ασυνέχειες στις τάσεις στις διεπιφάνειες μεταξύ γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων.

Στο παρακάτω σχήμα, ο λόγος των διαστάσεων των πλευρών και εδρών ενός στοιχείου πρέπει να είναι κοντά στο 1.0 και οι γωνίες κοντά στις 90.



Εικόνα 3.5 Διακριτοποίηση και διαδοχική πύκνωση στοιχείων [8]

Για να έχουμε την δυνατότητα να κατανοήσουμε τη γενικότερη λειτουργία της διακριτοποίησης, δίνουμε ένα παράδειγμα μιας δισδιάστατης δοκού.

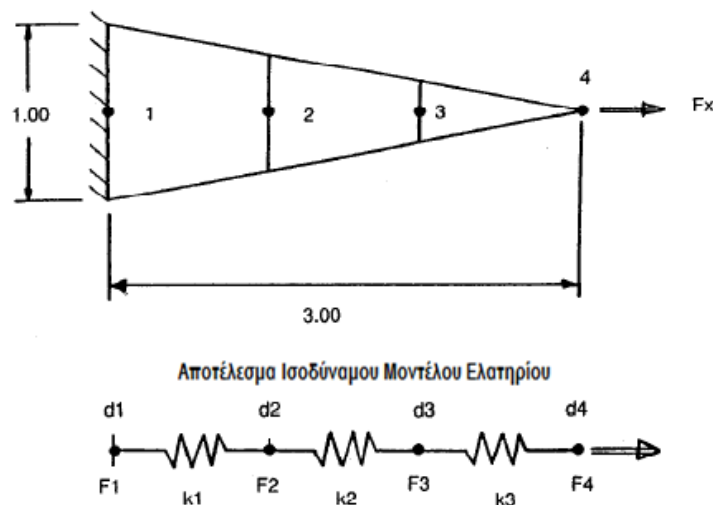
Παράδειγμα Διακριτοποίησης Στοιχείου

Η έννοια της διακριτοποίησης σε στοιχεία μπορεί να αποδεικνύεται από ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μιας κωνικής δοκού σε εφελκυσμό όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 Το πεδίο ορισμού είναι το δισδιάστατο επίπεδο μιας δοκού, η συνάρτηση που υπολογίζεται είναι το πεδίο μετατόπισης κατά την αξονική κατεύθυνση. Υπάρχει μια δύναμη προς αυτή την κατεύθυνση, και ένας βαθμός ελευθερίας ανά κόμβο. Η δοκός διαιρείται σε τρία στοιχεία και σε τέσσερις κόμβους. Μια δύναμη που εφαρμόζεται στον κόμβο 4, και ο κόμβος 1 περιορίζεται να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε μετατόπιση. Η συνάρτηση ακαμψίας για καθένα από τα τρία στοιχεία μπορεί να σχηματίζεται από τη σχέση :

$$k = \frac{EA}{L} \quad (3.30)$$

- Όπου k η ακαμψία του υλικού (lb/in)
- E το μέτρο ελαστικότητας του *Young*
- A είναι η μέση περιοχή διατομής του στοιχείου
- L το μήκος του στοιχείου [m]

Το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζει την ακαμψία σε τρία στοιχεία είναι $E = 30.000.000 \text{ psi}$



Εικόνα. 3.6 Μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου σε κωνική δέσμη : ακτίνα έντασης χωρισμένη σε τρία διαφορετικά στοιχεία [8]

Στοιχείο 1	$A_{ave} = 0.167 \text{ in}^2$	$k_1 = 5.000.000 \text{ lb/in}$
Στοιχείο 2	$A_{ave} = 0.500 \text{ in}^2$	$k_1 = 15.000.000 \text{ lb/in}$
Στοιχείο 3	$A_{ave} = 0.833 \text{ in}^2$	$k_1 = 25.000.000 \text{ lb/in}$

Οι κομβικές μεταβλητές προς επίλυση για π.χ. τους βαθμούς ελευθερίας, είναι οι αξονικές μετατοπίσεις για κάθε κόμβο (d_i). Συνδέοντας το σύνολο των εξισώσεων για να παρουσιάσουμε την δοκό έχουμε :

$$\text{Εξίσωση 1} \quad k_1(d_1 - d_2) = F_1 - F_2$$

$$\text{Εξίσωση 2} \quad k_2(d_2 - d_3) = F_2 - F_3$$

$$\text{Εξίσωση 3} \quad k_1(d_1 - d_2) = F_1 - F_2$$

Όπου d_i είναι η αξονική μετατόπιση του κόμβου (i)
 F_i είναι η αξονική δύναμη στον κόμβο (i)

Γράφοντας τις εξισώσεις υπό μορφή μήτρας για το στοιχείο 1 έχουμε :

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

Το σύνολο από πίνακες $d_1 - d_2$ της εξίσωσης ακαμψίας για τα άλλα στοιχεία είναι της ίδιας μορφής. Η συναρμολόγηση από το σύνολο των εξισώσεων των πινάκων που περιγράφει ολόκληρη την δοκό είναι :

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & & & \\ -k_1 & k_2 + k_3 & -k_2 & & \\ & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \\ & & -k_3 & k_3 & \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix}$$

Αυτό το σύνολο των εξισώσεων κάθε πίνακα αναπαριστά τις τέσσερις εξισώσεις με τέσσερις αγνώστους (d_i), το οποίο μπορεί να λυθεί για να χαρακτηρίσει την αντίδραση της δοκού κατά την εφαρμογή μιας αξονικής δύναμης, αφού προηγουμένως ληφθούν υπόψη οι συνοριακές συνθήκες στηρίζεως (στην περίπτωση μας δηλαδή ότι $d_1=0$).

Παρόλο που αυτό το παράδειγμα, δείχνει την αρχή συναρμολόγησης των εξισώσεων ακαμψίας στοιχείου σε ένα γενικότερο σύνολο εξισώσεων η πραγματική έκφραση σε τύπο των επί μέρους πινάκων της ακαμψίας στοιχείου για δισδιάστατα και για τρισδιάστατα στερεά στοιχεία, είναι πολύ πιο περίπλοκη.

Κάποια προηγμένα τρισδιάστατα στερεά στοιχεία έχουν 20 κόμβους και 60 βαθμούς ελευθερίας ανά στοιχείο που αναπαριστάται από 60x60 σύνολο εξισώσεων για κάθε στοιχείο. Όπως είναι κατανοητό, η χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος είναι επιβεβλημένη.

3.3.5 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι δυναμικοί υπολογισμοί των πεπερασμένων στοιχείων βασίζονται σε μητρώα μάζας και ακαμψίας τα οποία δημιουργούνται με τη γενική μέθοδο και στις εξισώσεις της κίνησης, οι οποίες έχουν τη γενική μορφή (για γραμμικό σύστημα) :

$$M\{\ddot{U}\} + C\{\dot{U}\} + K\{U\} = \{F\} \quad (3.31)$$

Όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας, $[\ddot{U}]$ η επιτάχυνση (2η παράγωγο της μετατόπισης U)

$[C]$ είναι η μήτρα απόσβεσης, $[\dot{U}]$ η ένταση μεγέθους

$[K]$ είναι η ακαμψία ελαστικού μέσου, $[U]$ η μετατόπιση

$[F]$ είναι το διάνυσμα δύναμης (αυθαίρετη λειτουργία χρόνου)

Συνήθως, δεν χρησιμοποιείται ξεχωριστή μήτρα απόσβεσης για τους υπολογισμούς αλλά πολλαπλασιαστές απόσβεσης που προστίθενται στη μάζα και στους πίνακες ακαμψίας. Οι ελεύθερες δονήσεις γίνονται χωρίς απόσβεση, δηλαδή το πρόβλημα ιδιοτιμών και το σύνολο των εξισώσεων εκφράζεται ως εξής :

$$M\{\ddot{U}\} + K\{U\} = 0 \quad (3.32)$$

Υποθέτοντας ότι έχουμε ημιτονοειδής κίνηση, παίρνουμε :

$$\{U(t)\} = \{U_o\} \sin \omega_n t$$

Και αν παραγωγίσουμε δυο φορές έχουμε :

$$\{\ddot{U}(t)\} = -\omega_n^2 \{U_o\} \sin \omega_n t \quad (3.33)$$

Άρα καταλήγουμε στην εξίσωση :

$$\{-\omega_n^2 M + K\} U_o \sin \omega_n t = 0 \quad (3.34)$$

όπου U_o είναι το ιδιοδιάνυσμα (eigenvector) – (σχήμα λειτουργίας) που συνδέονται με μια συγκεκριμένη ιδιοτιμή (φυσική συχνότητα) ω_n .

Στην περίπτωση της αρμονικής ή περιοδικής υποβαλλόμενης απόκρισης, η δύναμη σε σχέση με το χρόνο και οι τιμές απόσβεσης πρέπει επίσης να διευκρινιστούν. Η απόσβεση μπορεί να συμπεριληφθεί με ξεχωριστό πίνακα ή ως πολλαπλασιαστές που χρησιμοποιείται μαζί με τους πίνακες ακαμψίας και τούς πίνακες μάζας. Όταν ένας ξεχωριστός πίνακας απόσβεσης χρησιμοποιείται, είναι εκτός φάσης με τους πίνακες ακαμψίας και μάζας. Τότε, οι όροι απόσβεσης πρέπει να αντιμετωπίζονται με σύνθετη αριθμητική, δηλαδή :

$$\{-\omega^2 M + K\} \cos \omega t + \{-\omega[C]\} \sin \omega t = F(t) \quad (3.35)$$

Για αρμονική κίνηση

$$F(t) = F_o (\cos \omega t + \phi)$$

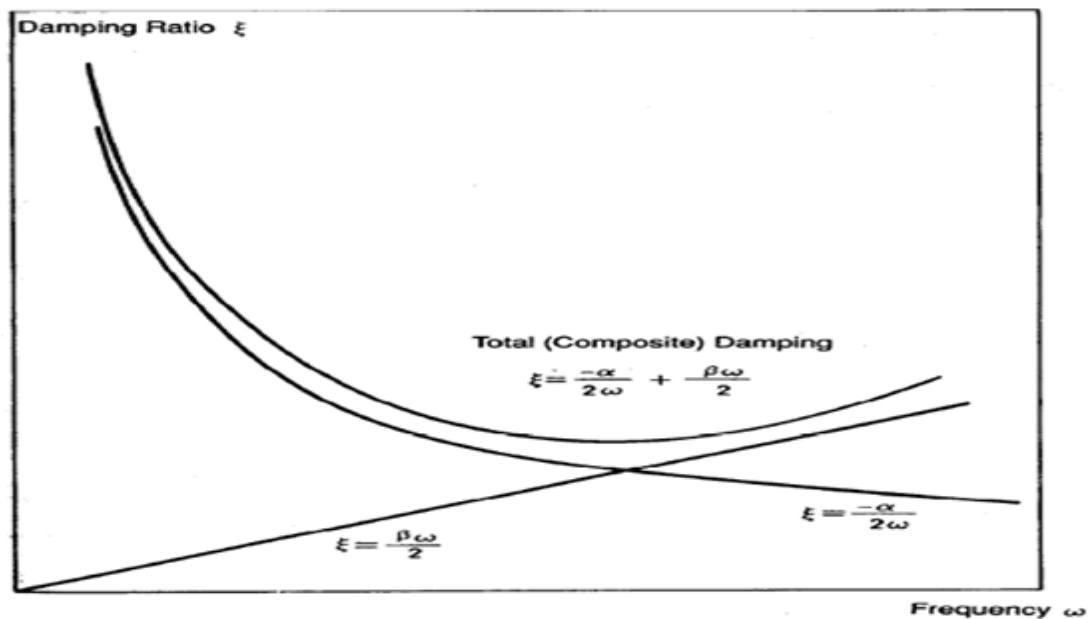
Για περιοδική κίνηση

$$F(t) = F_o (t + t_o)$$

Οι πολλαπλασιαστές απόσβεσης (α) και (β) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μάζα και τους πίνακες δυσκαμψίας ως εξής :

$$\{-\omega^2 aM + \beta K\} \sin \omega t = F(t) \quad (3.36)$$

Οι (α) και (β) πολλαπλασιαστές δίνουν το λόγο απόσβεσης C/C_c ως συνάρτηση της συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7



Εικόνα 3.7 (α) και (β) είναι οι παράμετροι απόσβεσης [8]

3.3.6 Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για τη στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μία ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων :

- α. Στρέψη και θερμικές αναλύσεις των βιομηχανικών εξαρτημάτων, όπως ηλεκτρονικά τσιπ, ηλεκτρικές συσκευές, βαλβίδες, σωλήνες, δοχεία πίεσης των αυτοκινήτων και των κινητήρων αεροσκαφών.
- β. Σεισμική ανάλυση των φραγμάτων, σταθμών ηλεκτροπαραγωγής των πόλεων και των πολυόροφων κτιρίων.
- γ. Ανάλυση πρόσκρουσης αυτοκινήτων, τρένων και αεροπλάνων.
- δ. Ανάλυση ροής του ψυκτικού υγρού, για τον υπολογισμό των ρύπων και τον αέρα στα συστήματα εξαερισμού.
- ε. Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των κεραιών, τρανζίστορ και τα ίχνη αεροσκαφών.
- στ. Ανάλυση χειρουργικών διαδικασιών, όπως η πλαστική χειρουργική, η ανασυγκρότηση σαγονιού, η διόρθωση της σκολίωσης και πολλά άλλα.
- ι. Στην ακουστική επιστήμη, πρόβλεψη και επίλυση σύνθετων ακουστικών προβλημάτων.

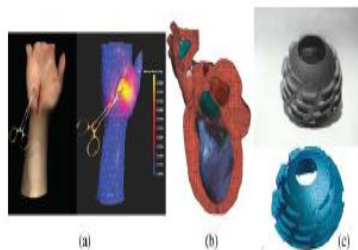


Figure 1.3

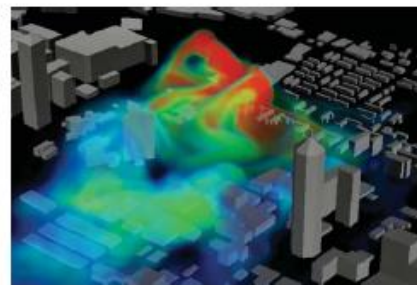
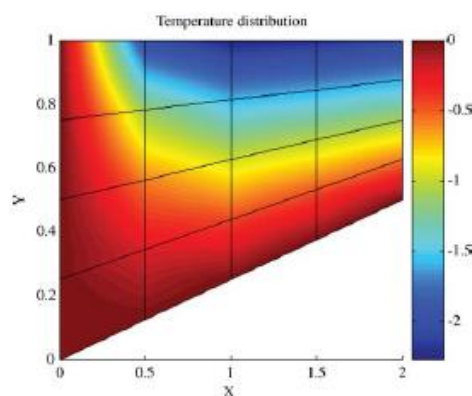
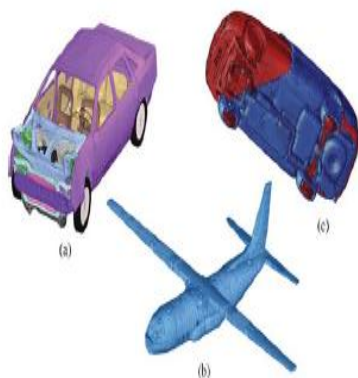


Figure 1.5



Εικόνα 3.8 Πεδία χρήσης επιστήμης Πεπερασμένων Στοιχείων [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΩΡΩΝ

Πληροφορίες για τους χώρους διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας.

Δεσποτικό – ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ Ι.Μ. ΚΥΔΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ

Είναι χώρος για πολλές χρήσεις και βρίσκεται στα Χανιά, στην οδό Αντρέα Παπανδρέου στον 2^ο Όροφο. Ανήκει στην Ιερά Μητρόπολη Χανίων και χρησιμοποιείται κυρίως για εκδηλώσεις ομιλίας αλλά και για άλλες δραστηριότητες (χώρος διασκέδασης, θεατρικών παραστάσεων κ.α.).

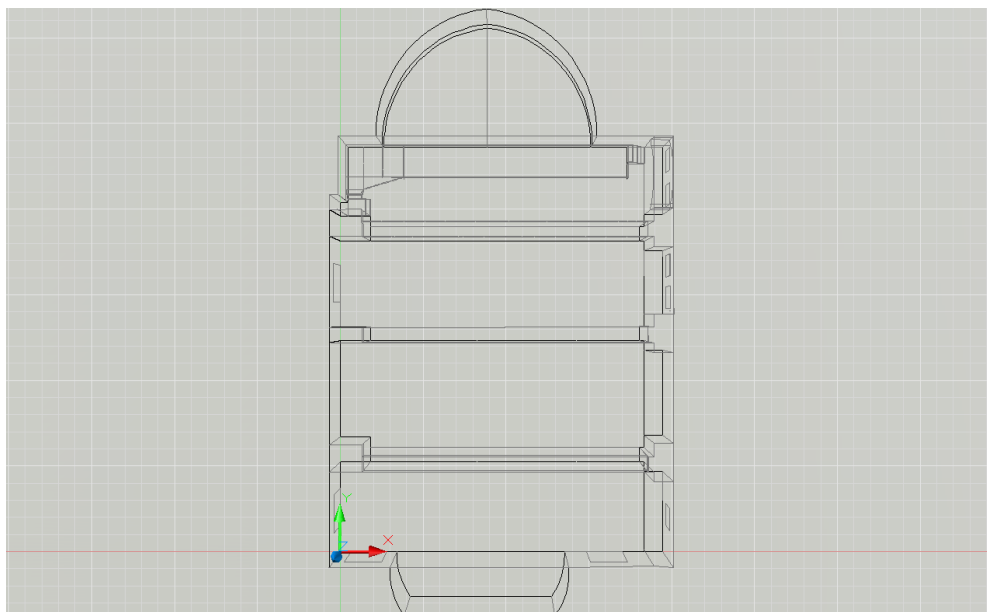
Διαθέτει 100 θέσεις και σκηνή με χώρο παρασκηνίων από πίσω. Ο χώρος έχει σχήμα παραλληλόγραμμο, διαστάσεων 14.7 μέτρα μήκος (με την σκηνή 18.3 μέτρα), 11.4 μέτρα πλάτος και ύψος 3.27 μέτρα, έχει όγκο $V = 610$ κυβικά μέτρα. Παρακάτω υπάρχει κάτοψη, πλάγια όψη, αλλά και μια τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου, σχεδιασμένο στο πρόγραμμα AutoCAD Release 7.

Οκτάβα

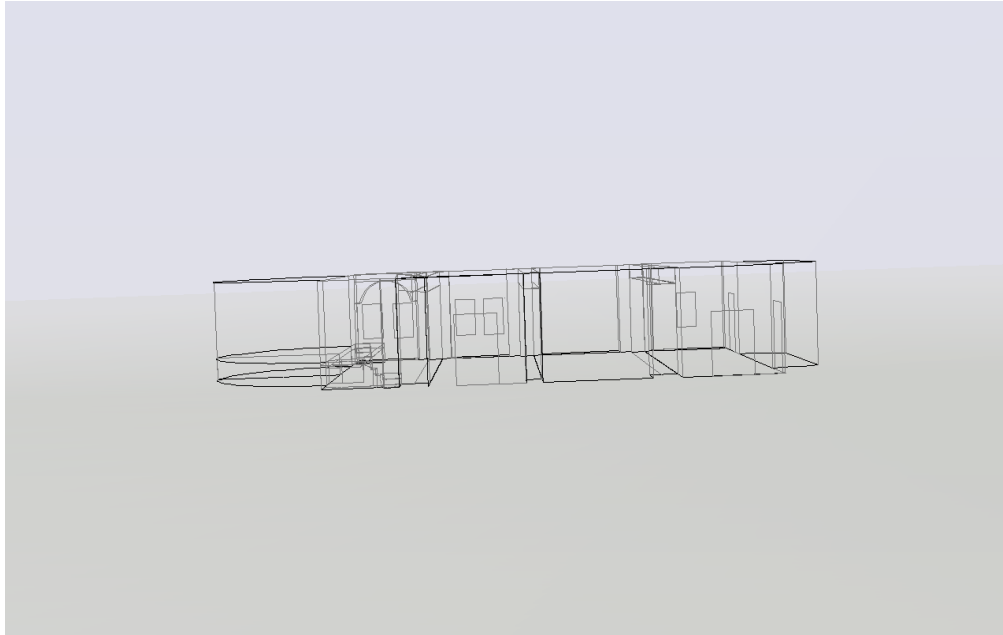
Ο δεύτερος χώρος είναι χώρος εκδηλώσεων μουσικής στην οδό Χατζημιχάλη Γιάνναρη, στον 2^ο Όροφο. Ανήκει στο Δημόσιο και χρησιμοποιείται κυρίως για εκδηλώσεις Μουσικής τις νυχτερινές ώρες.

Διαθέτει 240 καθίσματα και η σκηνή έχει κυκλική μορφή. Ο χώρος έχει πολυσύνθετο σχήμα με περίπου παραλληλόγραμμη μορφή διαστάσεων 20.7 μέτρα μήκος, 17.3 μέτρα πλάτος και ύψος 6.3 μέτρα, έχει όγκο $V = 1630$ κυβικά μέτρα. Παρακάτω υπάρχει επίσης κάτοψη, πλάγια όψη αλλά και τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου.

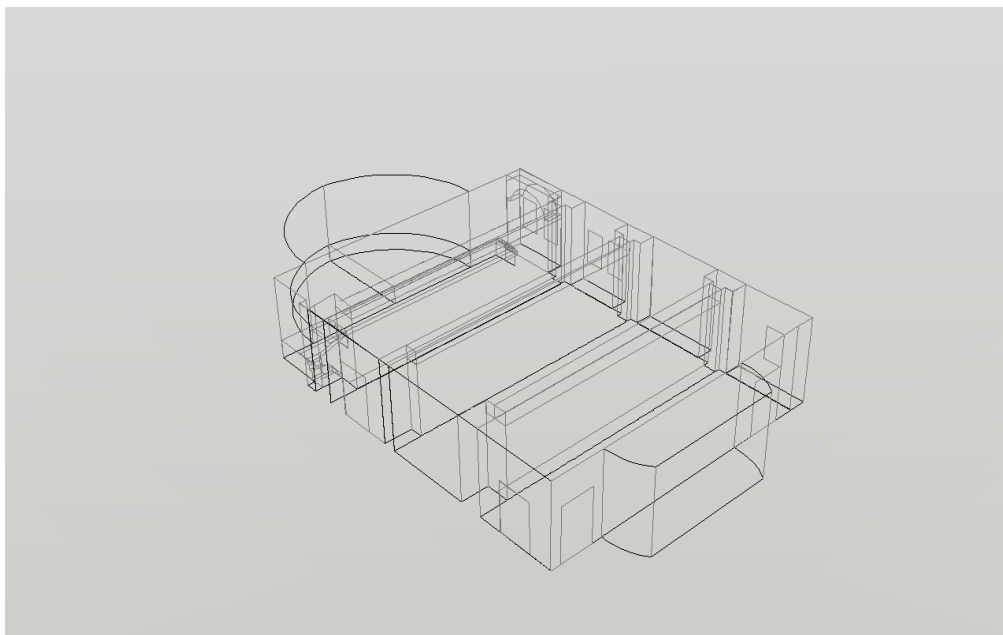
Σχεδιά Δεσποτικού



Σχήμα 4.1.1 Κάτοψη

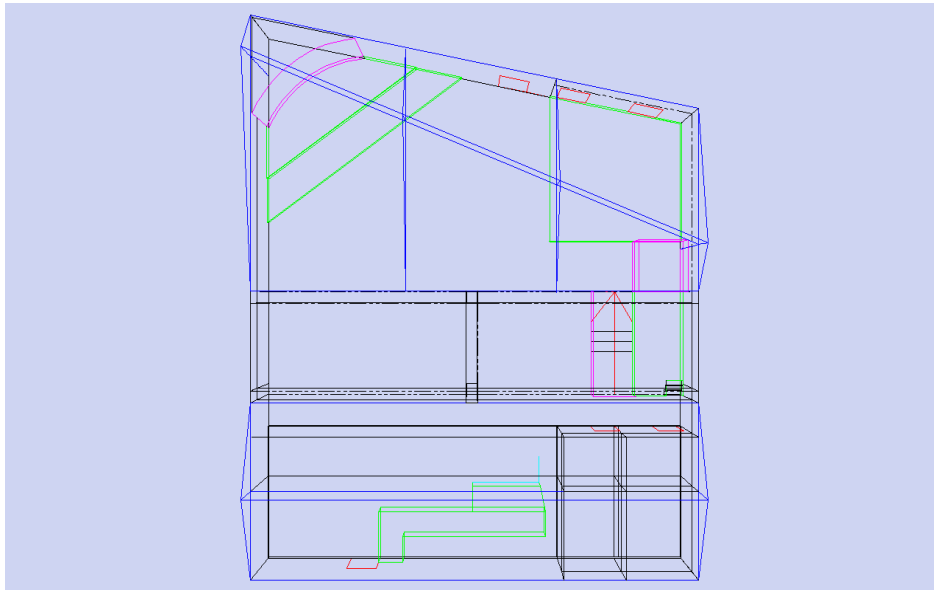


Σχήμα 4.1.2 Αριστερή Πλάγια Όψη

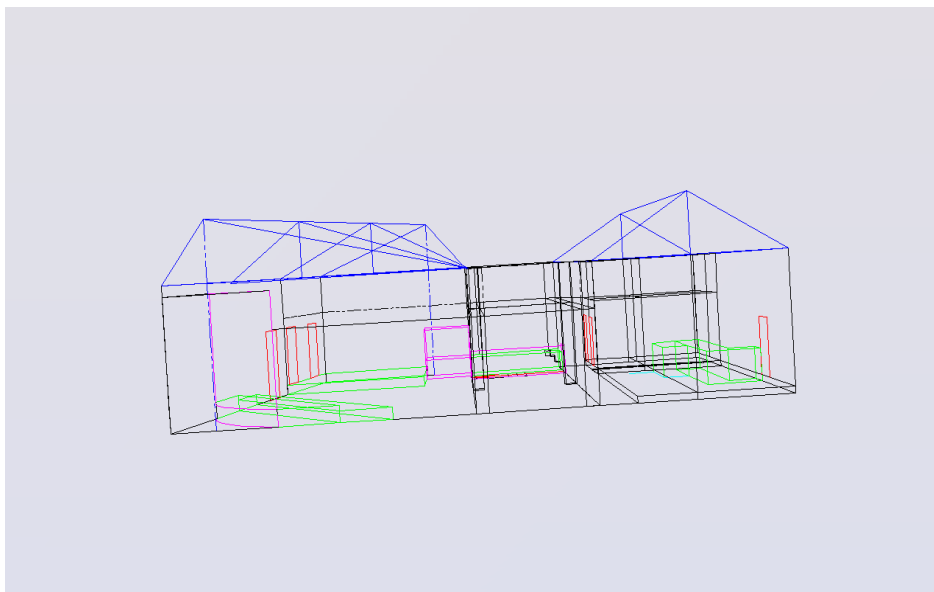


Σχήμα 4.1.3 Τρισδιάστατη Όψη

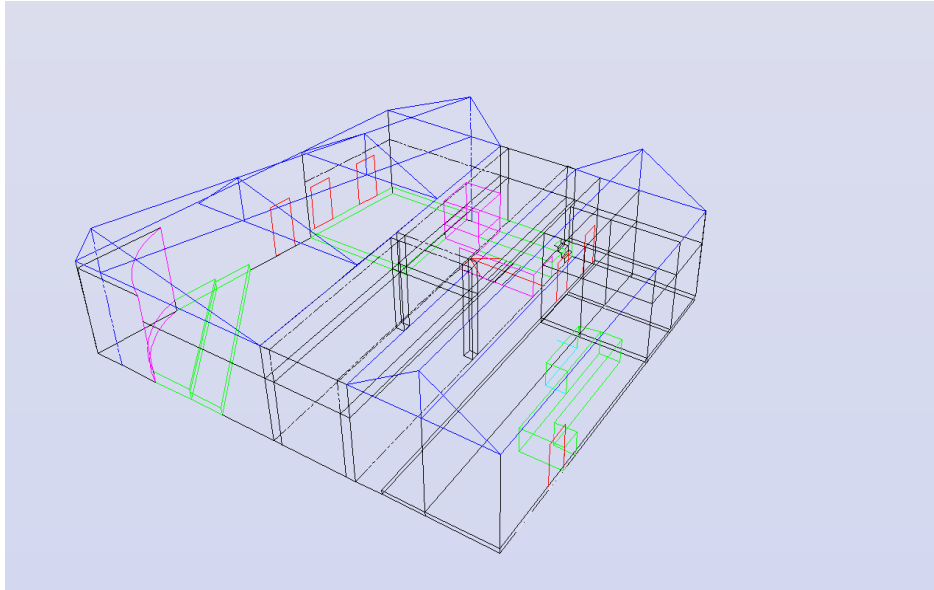
Σχεδία Οκτάβας



Σχήμα 4.1.4 Κάτοψη



Σχήμα 4.1.5 Αριστερή Πλάγια Όψη



Σχήμα 4.1.6 Τρισδιάστατη Μορφή

ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ

Υπολογίσαμε ότι η αίθουσα έχει συνολικό Όγκο $V_1 = 610.5 \text{ m}^3$ και αποτελείται από :

Τοίχο Συνολικού Εμβαδού $St = 432.81 \text{ m}^2$

Πόρτες από Ξύλο Συνολικού Εμβαδού $S_{\xi\pi} = 11.07 \text{ m}^2$

Τζάμια Συνολικού Εμβαδού $S\pi = 5.265 \text{ m}^2$

ΟΚΤΑΒΑ

Υπολογίσαμε ότι η αίθουσα έχει συνολικό Όγκο $V_2 = 1631 \text{ m}^3$ και αποτελείται :

Από Τοίχο Συνολικού Εμβαδού $St = 795.7 \text{ m}^2$

Από Δάπεδο Συνολικού Εμβαδού $S_{\xi\pi} = 292.125 \text{ m}^2$

Από Πόρτες από Ξύλο Συνολικού Εμβαδού $S_{\xi\pi} = 15.54 \text{ m}^2$

Από Παράθυρα Συνολικού Εμβαδού $S\pi = 42.51 \text{ m}^2$

Οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση στο υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol 3.4a φαίνονται στο πινάκα στην Εικόνα 4.2.5

4.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

4.2.1 ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Για τον υπολογισμό των στάσιμων κυμάτων χρησιμοποιούμε τον τύπο του Sabine που χρησιμοποιείται σε κλειστούς χώρους :

$$f_{x,\psi,z} = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_\psi}{L_\psi}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (4.1)$$

Όπου n_x, n_ψ, n_z το πλήθος κύματος στην ανάλογη διάσταση

L_x, L_ψ, L_z το μήκος πλευράς

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεωρητικές ιδιοσυχνότητες των χώρων :

Ιδιοσυχνότητες Δεσποτικού

nX	nΨ	nZ	(Hz)	nX	nΨ	nZ	(Hz)	nX	nΨ	nZ	(Hz)
1	0	0	9,38	0	4	0	58,72	4	0	2	111,49
0	1	0	15,06	2	2	1	59,56	3	2	2	112,79
1	1	0	17,74	3	2	1	61,43	4	2	2	115,48
2	0	0	18,76	4	0	1	60,23	3	3	2	117,70
2	1	0	24,05	5	3	0	63,36	4	3	2	120,29
3	0	0	28,14	4	1	1	66,74	4	4	2	126,72
0	2	0	30,11	4	2	1	64,52	5	5	2	137,44
3	1	0	31,91	3	3	1	65,11	0	0	3	157,47
2	2	0	35,48	0	5	0	66,26	3	0	3	159,97
4	0	0	37,52	5	4	0	71,20	3	1	3	160,68
4	1	0	40,43	4	3	1	74,75	4	0	3	161,88
3	2	0	41,22	4	4	1	75,29	3	3	3	166,23
5	0	0	46,90	5	5	0	76,33	3	2	3	162,78
4	2	0	48,11	5	5	1	78,76	4	3	3	168,07
5	1	0	49,26	0	0	2	88,26	4	4	3	172,73
0	0	1	52,49	2	0	2	88,70	5	5	3	180,74
3	3	0	53,22	5	5	1	103,07	0	0	4	209,97
1	0	1	53,32	1	0	2	104,98	4	0	4	213,30
1	1	1	55,41	2	0	2	106,65	4	3	4	218,03
5	2	0	55,73	3	0	2	108,69	4	4	4	221,64
3	0	1	55,74	3	1	2	109,73	5	5	4	227,94
3	1	1	57,74	2	2	2	110,82	0	0	5	262,46

Πίνακας 4.2.1 Ο πίνακας περιλαμβάνει τις συχνότητες στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται στο χώρο του δεσποτικού για $n < 6$

- i) Ασπρο χρώμα - Αξονικοί τρόποι ταλάντωσης ii) ανοιχτό χρώμα - Πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης
iii) Με Σκούρο χρώμα - Εφαπτομενικοί τρόποι ταλάντωσης

Ιδιοσυχνότητες Οκτάβας

nX	nΨ	nZ	(Hz)	nX	nΨ	nZ	(Hz)	nX	nΨ	nZ	(Hz)
1	0	0	8,29	4	0	1	39,69	2	0	2	64,65
0	1	0	9,92	5	0	0	41,46	4	2	2	66,81
1	1	0	12,93	4	1	1	41,89	3	3	2	66,89
2	0	0	16,58	5	1	0	42,63	5	5	1	70,16
2	1	0	19,33	4	2	1	42,92	4	3	2	70,40
0	2	0	19,84	0	5	0	44,06	4	4	2	75,13
3	0	0	24,88	0	4	0	44,57	0	0	3	81,73
2	2	0	25,86	5	2	0	45,97	5	5	2	84,56
3	1	0	26,78	5	4	0	47,29	3	0	3	85,44
0	0	1	27,25	4	3	1	47,40	3	1	3	86,01
1	0	1	28,48	4	4	1	49,61	4	0	3	88,21
1	1	1	30,16	3	3	1	51,04	3	2	3	87,71
3	2	0	31,82	5	5	1	52,24	3	3	3	90,48
3	0	1	31,90	0	0	2	54,49	4	3	3	93,10
4	0	0	33,17	2	0	2	56,96	4	4	3	96,73
3	1	1	33,40	5	5	0	57,39	5	5	3	104,22
4	1	0	34,62	1	0	2	58,46	0	0	4	108,98
2	2	1	36,89	3	0	2	59,90	4	0	4	113,92
5	3	0	37,57	2	2	2	60,32	4	3	4	117,74
3	2	1	38,21	3	1	2	60,72	4	4	4	120,64
4	2	0	38,65	3	2	2	63,10	5	5	4	126,72
3	3	0	38,79	4	0	2	63,79	0	0	5	136,23

Πίνακας 4.2.2 Ο πίνακας περιλαμβάνει τις συχνότητες στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται στο χώρο της οκτάβας για $n < 6$.

Αξιολόγηση

Η συχνοτική περιοχή των στάσιμων κυμάτων σύμφωνα με τον ελεγκτή σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου από το διάγραμμα *Bolt, Beranek, Newman* (σχήμα 1.6) είναι από (f_{\min}) μέχρι (f_c) η οποίες είναι ως εξής :

$$f_{\min} = \frac{c}{2L_{\max}} \quad f_c = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$$

Επομένως στο χώρο του δεσποτικού είναι $f_{\min} = 9.38 \text{ Hz}$ και $f_c = 89.4 \text{ Hz}$ ¹

Επομένως στο χώρο της οκτάβας είναι $f_{\min} = 8.29 \text{ Hz}$ και $f_c = 62.9 \text{ Hz}$.

¹ Ο RT_{60} έχει υπολογιστεί για την συχνότητα των 500 Hz

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης έχουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, και κατά δεύτερο λόγο στους πλάγιους τρόπους ταλάντωσης. Επομένως παρακάτω θα καθορίσουμε σε ποια σημεία στους χώρους θα έχουμε την παρουσία των στάσιμων κυμάτων.

Δεσποτικό

Από την απεικόνιση στο σχήμα 4.2.3, παρατηρούμε ότι οι τρόποι ταλάντωσης έχουν μεγαλύτερη ενέργεια στα εξής σημεία :

Στην δεξιά πίσω πλευρά του χώρου, στις θέσεις παρατήρησης (D34,D35) από τους τρόπους ταλάντωσης [1.0.0, 1.1.0, 2.1.0]. Επομένως, αναμένεται στα συγκεκριμένα σημεία του χώρου να έχουμε αυξημένη ένταση του ήχου. Ομοίως και στην αριστερή πλευρά, κοντά στην σκηνή (D11,D12) από τους τρόπους ταλάντωσης [0.1.0, 1.1.0, 2.1.0].

Οκτάβα

Από την απεικόνιση στο σχήμα 4.2.4, παρατηρούμε ότι οι τρόποι ταλάντωσης έχουν μεγαλύτερη ενέργεια στα εξής σημεία :

Στην μπροστινή πλευρά κοντά στην σκηνή θέση (O41, O42,O43), από τρόπους ταλάντωσης [1.0,0, 2.0.0], ιδίως στην θέση [O43] από την συμβολή των πλάγιων τρόπων ταλάντωσης [1-1-0, 2-1-0]. Επίσης αναμένετε στα συγκεκριμένα σημεία του χώρου να έχουμε αυξημένη ένταση του ήχου. Ομοίως στην πίσω πλευρά κοντά στο μπαρ (O33,O23,O13) από [2.0.0] και από την συμβολή των πλάγιων τρόπων ταλάντωσης [1-1-0,2-1-0].

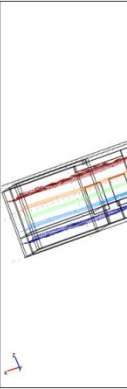
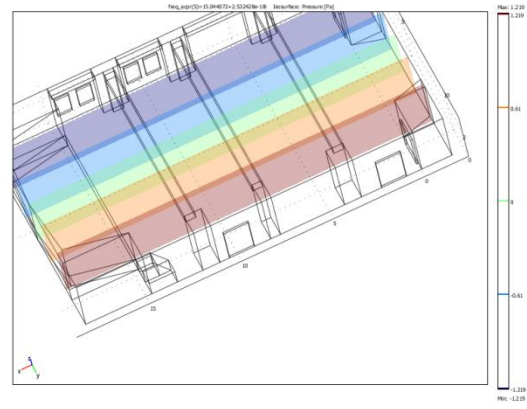
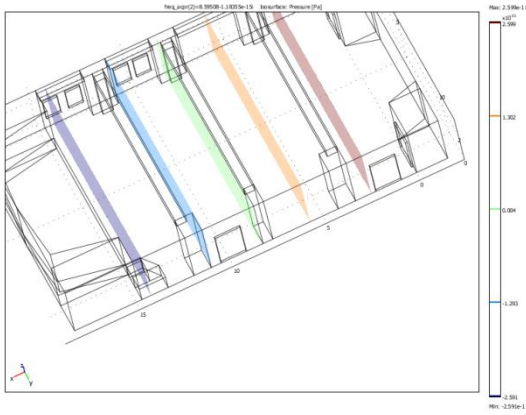
Παρακάτω παραθέτουμε ενδεικτικά, τους πρώτους τρόπους ταλάντωσης στους υπό μελέτη χώρους :

Α. ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ

1-0-0

0-1-0

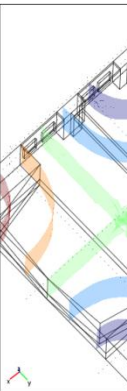
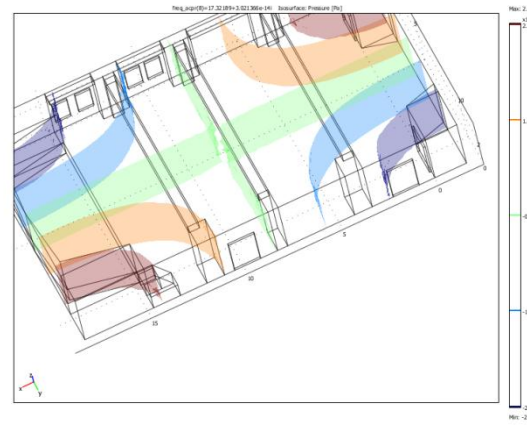
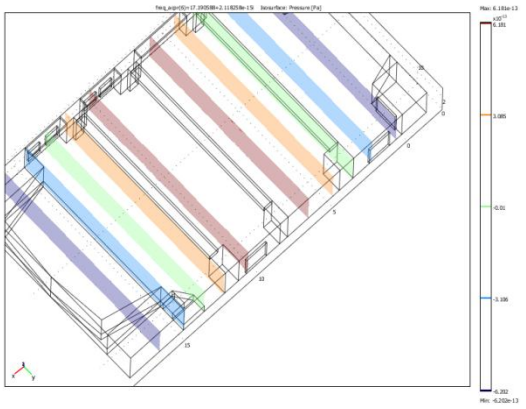
0-0-1



2-0-0

1-1-0

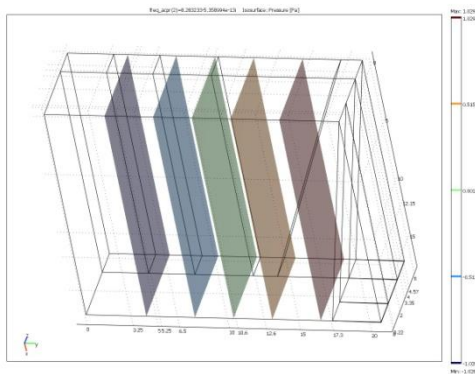
2-1-0



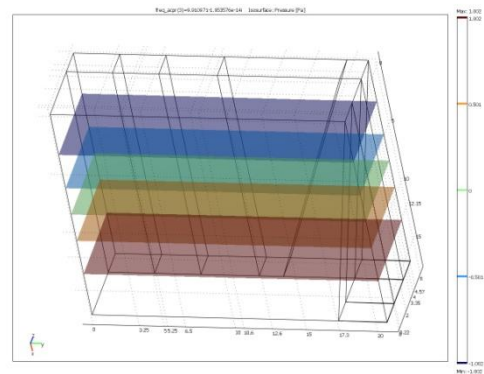
Σχήμα 4.2.3 Εικόνες από το υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol

Β. Οκτάβα

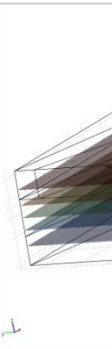
1-0-0



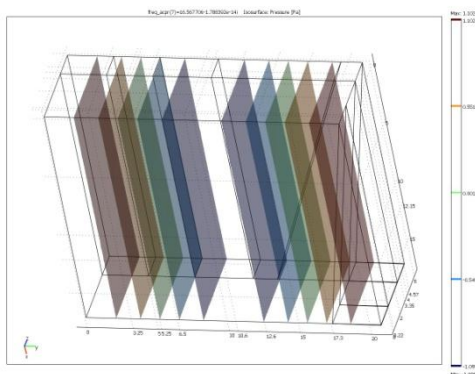
0-1-0



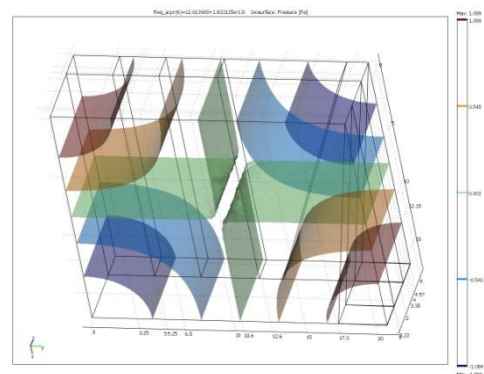
0-0-1



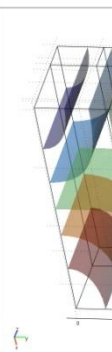
2-0-0



1-1-0



2-1-0



Σχήμα 4.2.4 Εικόνες από το υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol

4.2.2 ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιούμε τον τύπο του *Sabine* που χρησιμοποιείτε σε χώρους με μεγάλη απορρόφηση :

$$RT60 = \frac{0.161 * V}{A + 4mV} \quad (4.2)$$

Όπου A η συνολική απορρόφηση
 V ο όγκος της αίθουσας [m^3]
 m συντελεστής χώρου τοποθετήθηκε ($m = 0.009$ για 50% υγρασία και 20° C)

Αρχικά θα υπολογίσουμε το εμβαδόν της επιφάνειας στο χώρο κάθε αίθουσας και θα τις διαφοροποιήσουμε ανάλογα που το υλικό που έχει κάθε μια επιφάνεια, δηλαδή τον εκάστοτε συντελεστή απορρόφησης. Έπειτα υπολογίσαμε τον όγκο των χώρων και μέσω του προγράμματος *Comsol*, αλλά και με θεωρητικό τρόπο από τη σχεδίαση των χώρων. Στην συνέχεια κάνουμε επιλογή των συντελεστών απορρόφησης των διαφορών υλικών που απαρτίζουν τις αίθουσες.

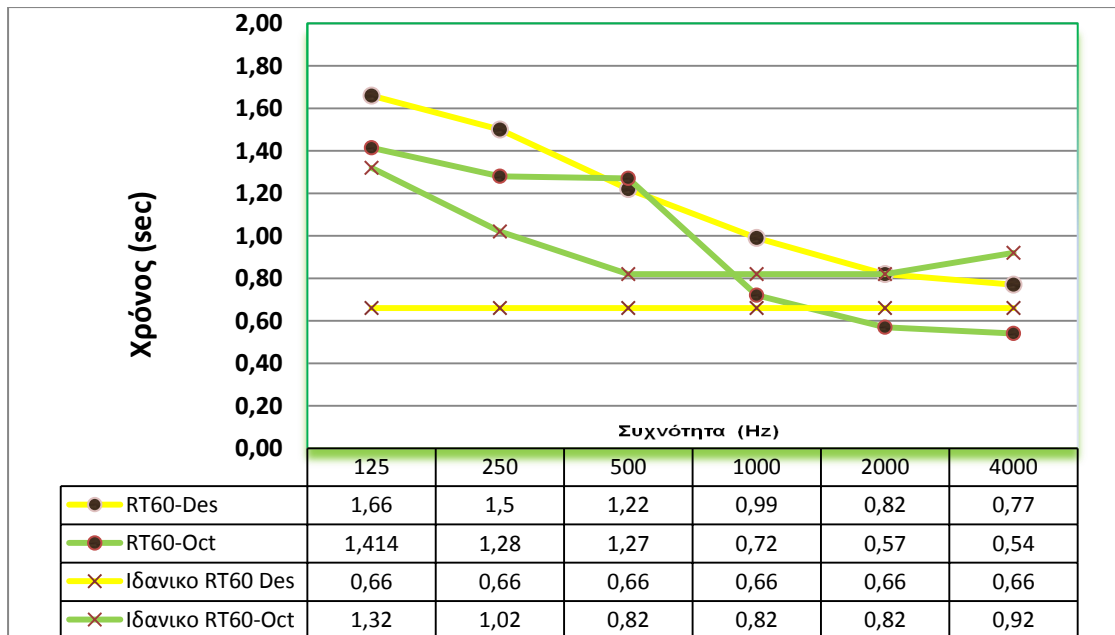
Από αναφορές βιβλίων βρήκαμε τους εξής συντελεστές απορρόφησης για κάθε υλικό :

Συχνότητα	125	250	500	1000	2000	4000
Υλικό						
Μπετόν Βαμμένο	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
Τζαμί μονό	0,14	0,26	0,15	0,21	0,26	0,26
Ξύλο παράθυρο	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,07
Δάπεδο πλακάκια	0,20	0,15	0,10	0,60	0,75	0,80
Μοκέτα 5mm	0,04	0,04	0,06	0,17	0,10	0,15
Πόρτα Ξύλινη	0,15	0,10	0,06	0,08	0,10	0,05
Ξύλινο Κάθισμα ανά θέση	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
ακροατήριο καθιστό ανά άτομο	0,25	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40
Υαλοπίνακας	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Πετρά	0,19	0,23	0,43	0,37	0,58	0,62

Πίνακας 4.2.5 Συντελεστές απορρόφησης υλικών ανά συχνότητα [14]

Υπολογίσαμε θεωρητικά τους χρόνους αντήχησης ανά συχνότητα και τους παραθέτουμε παρακάτω :

Χρόνος Αντήχησης, RT60 (s)					
ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ					
125	250	500	1000	2000	4000 Hz
1.66	1.5	1.22	0.99	0.82	0,77
Οκτάβα					
1.414	1.28	1.27	0.72	0.57	0.54



Πίνακας 4.2.6 Καμπύλες απόκρισης χρόνου αντήχησης στους πειραματικούς χώρους

Από την καμπύλη απόκρισης του χρόνου αντήχησης παρατηρούμε ότι στο χώρο του Δεσποτικού (Πράσινη καμπύλη στο σχήμα 4.2.6) έχει μια ομαλή πτώση στο πεδίο της συχνότητας όπως αναμενόταν.

Αντίθετα στο χώρο της οκτάβας, υπάρχει ανομοιογένεια στη διάρκεια των χαμηλών συχνοτήτων (η διάρκεια του χρόνου αντήχησης είναι κοντά 1.30 sec) σε σχέση με τις υψηλές συχνότητες (η διάρκεια του χρόνου αντήχησης είναι κοντά 0.60 sec). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ήχος να ακούγεται πιο «μπάσος» από ότι θα έπρεπε, έχουμε αυξημένη διάδοση μέσα στην κατασκευή, καθώς οι χαμηλές συχνότητες είναι αυτές που διαπερνούν πιο εύκολα τους τοίχους και δημιουργούν ηχορύπανση στον περιβάλλον χώρο της οκτάβας. (Ιδίως για ένα χώρο που έχει νυχτερινό ωράριο λειτουργίας αποτελεί μείζον πρόβλημα).

ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης ενός κλειστού χώρου εξαρτάται από τον όγκο του και από την χρήση του σε σχέση με τους συντελεστές (A),(B) που ορίζει ο παρακάτω πίνακας και αφού έχουμε λάβει υπόψη τους πίνακες 7.2 , 7.3 του Beranek :

Είδος Χώρου	A	B
Καθολικοί Ναοί – Αίθουσες συναυλιών	0,40	0,22
Ορθόδοξες Εκκλησίες - Όπερες	0,33	0,16
Κινηματογράφοι – Αίθουσες μουσικής	0,22	0,11
Χώροι Διαλέξεων – Ομιλίας	0,20	0,11

Πίνακας 4.2.7 Σταθερές για τον υπολογισμό του ιδανικού χρόνου αντήχησης

Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης υπολογίζεται για την συχνότητα $f = 500$ Hz από την σχέση :

$$RT_{60} = A \log(V) + B \quad (3.36)$$

Επομένως, στο χώρο του δεσποτικού (με $A = 0,20$ και $B = 0,11$) ο ιδανικός RT_{60} για τον χώρο του Δεσποτικού είναι :

$$RT_{60} = 0,20 * \log (610,5) + 0,11 = 0,667 \text{ sec}$$

Ομοίως για τον χώρο της Οκτάβας (με $A = 0,22$ και $B = 0,11$) έχουμε :

$$RT_{60} = 0,22 * \log (1631) + 0,11 = 0,817 \text{ sec}$$

Συγκρίνοντας τις δύο τιμές του χρόνου αντήχησης η διαφορά της θεωρητικής με την ιδανική τιμή χρόνου αντήχησης στο Δεσποτικό είναι $\Delta RT_{60} = 1,22 - 0,667 = 0,553 \text{ sec}$ και αντίστοιχα για τον χώρο της Οκτάβας είναι $\Delta RT_{60} = 1,27 - 0,817 = 0,453 \text{ sec}$. Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι και οι δυο αίθουσες έχουν μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης (της τάξης 45 % για το Δεσποτικό και 35%) από ότι θα έπρεπε να έχουν για το σκοπό που τους αναλογεί. Ο υπερβολικός χρόνος αντηχητικότητας σε μια αίθουσα ομιλίας ή διαλέξεων θα προκαλέσει προβλήματα στην Αντιληπτότητα Συλλαβών, Απώλεια Συμφώνων και στην Διακριτότητα του ήχου (κεφάλαιο 2.2). Για να επιτύχουμε να γίνει η ομιλία πιο καταληπτή, θα πρέπει να προσθέσουμε στο χώρο τα κατάλληλα απορροφητικά ώστε να μειώσουμε την αντηχητικότητα του χώρου.

Σε μία αίθουσα μουσικής όπως ο πολύπλοκος χώρος της οκτάβας η αυξημένη αντηχητικότητα εκτός από μια ελκυστική πληρότητα που είναι απαραίτητη για την μουσική, θα προκαλέσει προβλήματα στην Ευκρίνεια και στο Σύνολο του ήχου με αποτέλεσμα οι μουσικοί να δυσκολεύονται να αποδώσουν το έργο τους, αλλά και οι ακροατές να ακούν φαινόμενα παρατεταμένης Ηχούς, χρωματισμού του ήχου και μέτριας ποιότητας ήχο. Η ακουστική βελτίωση επιτυγχάνεται επίσης με τα κατάλληλα απορροφητικά και με την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών (κυρίως στις χαμηλό-μεσαίες συχνότητες 250 Hz - 500Hz) όπου έχουν μεγάλη απόκλιση από τον συνιστώμενο χρόνο αντήχησης.

Οι ιδανικοί χρόνοι αντήχησης για κάθε αίθουσα σε όλο το πειραματικό εύρος υπολογίστηκε σύμφωνα με τους πίνακες 7.2 και 7.3 του Beranek στο παράρτημα Ι. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 4.2.6.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στις 5 Απριλίου 2011 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στους χώρους κατά την οποία μετρήθηκαν με ηχόμετρο :

α) Ο Θόρυβος Βάθου, β) Στάθμη Ηχητικής Πίεσης ανά συχνότητα
Στο παράρτημα ΙΙΙ, αναφέρεται η πειραματική διαδικασία με το σύστημα μέτρησης MaxMLS

Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις

Ηχόμετρο	Cesva SC310 (type 1)
Βαθμονομητή	Cirrus CR511E
Η/Υ με λογισμικό	WinMLSSA Version 10WI
Ενισχυτής	Behringer A500
Δωδεκάεδρο Ηχείο	01 dB Stell D012

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

α) Μέτρηση Θόρυβου Βάθους

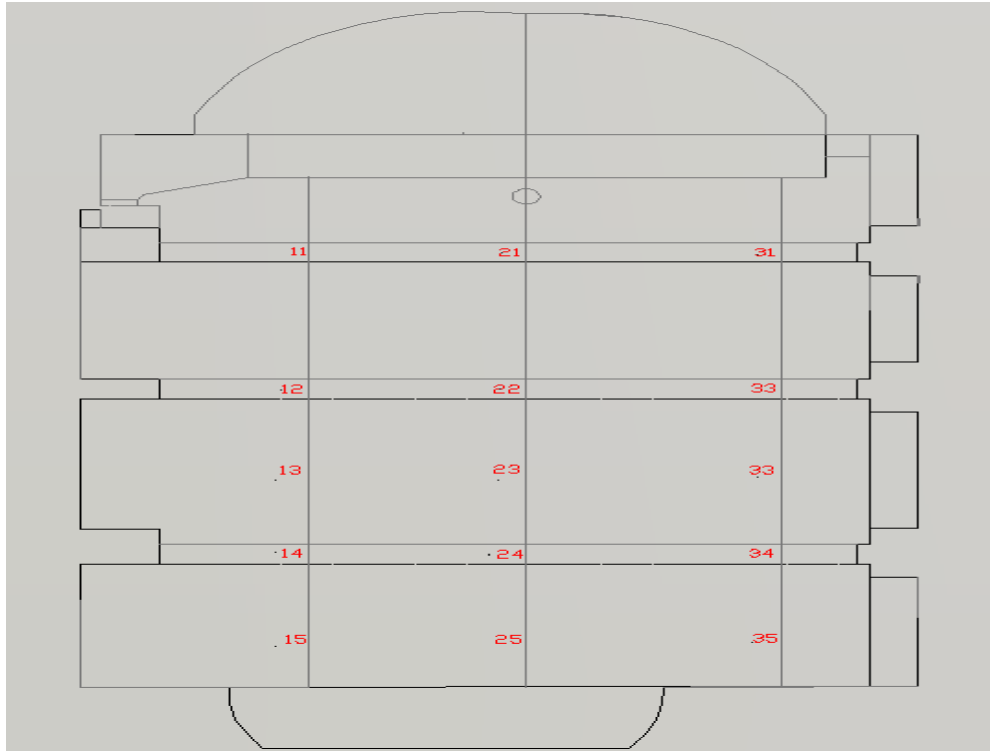
Θόρυβος Βάθους (*Background Noise*), ορίζεται ως ο συνολικός θόρυβος που υπάρχει στο χώρο, όταν η ηχητική πηγή βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Για να είναι άρτιες οι μετρήσεις θα πρέπει η στάθμη του Θορύβου Βάθους να είναι μεγαλύτερη από 10 dB από την Στάθμη Ηχητικής Πηγής σε όλο το συχνοτικό εύρος. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.5 και πίνακα 4.6 παρακάτω, ο θόρυβος βάθους είναι σε καλά επίπεδα κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η μέτρηση του Θορύβου Βάθους στο χώρο του Δεσποτικού έγινε στο σημείο 31 (Σχήμα 4.3.1) αρχικά με τριτοκταβική ανάλυση, με διάρκεια μέτρησης $t = 30 \text{ sec}$. Ομοίως στο χώρο της Οκτάβας η μέτρηση έγινε στο σημείο 41 (Σχήμα 4.3.2).

β) Μέτρηση Στάθμης Ηχητικής Πίεσης

Η μέτρηση της Στάθμης Ηχητικής Πίεσης στο χώρο του Δεσποτικού έγινε σε 15 σημεία (11,12,13,14,15,21,22,23,24,25,31,32,33,34,35) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1^α. Στο χώρο της Οκτάβας η μέτρηση έγινε σε 12 Σημεία ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3$) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1^β. Για την μέτρηση χρησιμοποιήσαμε το ηχόμετρο, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε τρίποδο σε ύψος 1.37 m. Συνδέσαμε την έξοδο της γεννήτριας λευκού θορύβου με την είσοδο ενός καναλιού μιας κονσόλας ήχου. Στη συνέχεια το σήμα οδηγείτε σε ένα ενισχυτή και από εκεί στο ηχείο. τοποθετήσαμε στο χώρο στον κύκλο όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3.1 και 4.3.2.

Πίνακας 4-5 . Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης σε ανάλυση οκτάβας
ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ

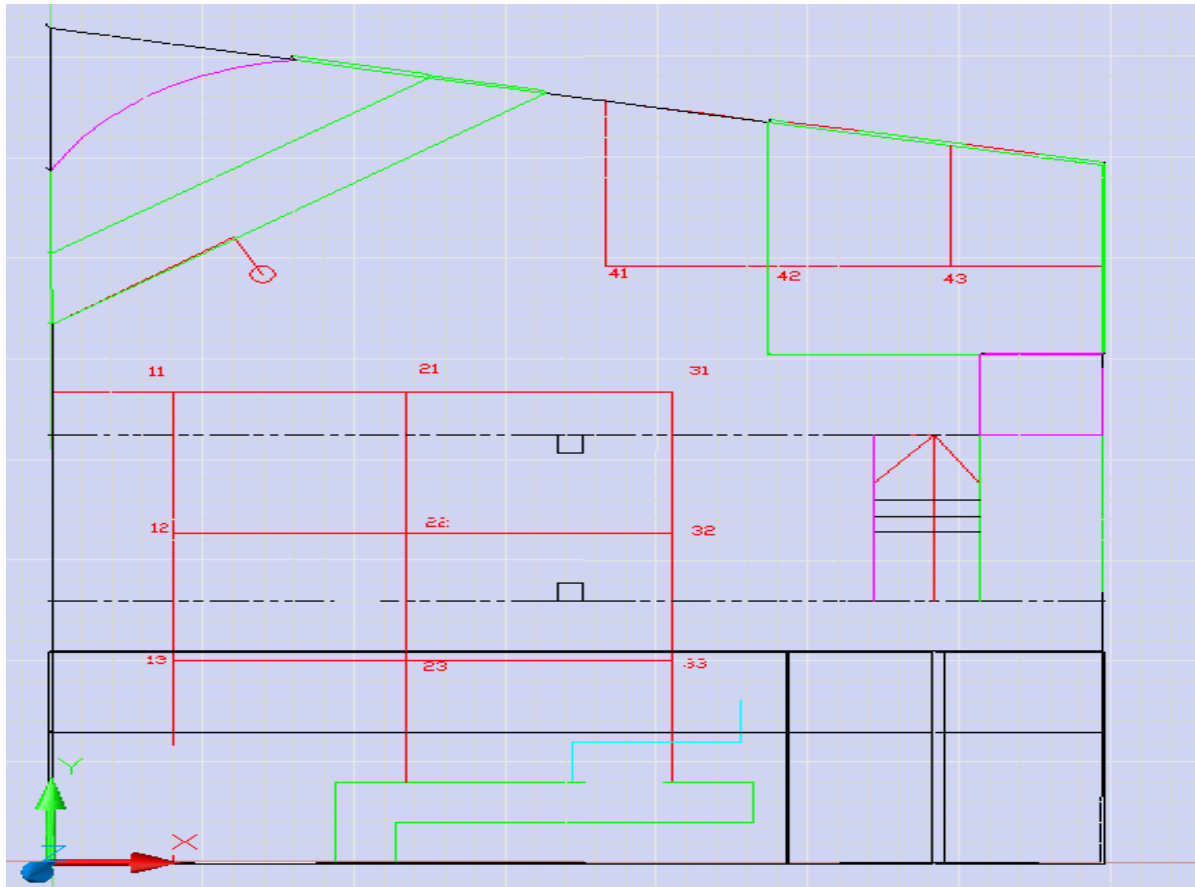
Θέση Χώρου	Θέση Μνήμης	Sound Pressure Level (SPL)							Lp(Z)
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623	
ΘΒ	227	42,57	33,55	35,25	31,55	28,61	26,99	19,87	47.8
11	232	61,04	80,09	86,13	83,88	80,87	82,31	80,27	88.2
12	231	55,43	76,44	79,89	79,05	75,78	76,37	75,07	87.7
13	230	56,74	75,97	80,62	79,65	75,38	76,95	75,68	85.6
14	229	57,43	78,39	83,87	80,00	77,90	78,60	77,04	85.2
15	228	58,14	75,38	83,35	81,18	78,74	80,42	79,05	85.1
21	233	59,25	79,27	84,52	80,91	78,55	81,38	80,17	89.1
22	234	59,61	78,25	83,29	79,77	77,22	78,21	77,50	87.3
23	235	56,86	76,68	80,77	79,89	75,54	77,54	76,15	86.0
24	236	58,66	76,20	80,99	78,71	75,76	76,73	75,58	85.6
25	237	57,57	75,71	80,53	77,87	74,92	76,12	74,05	84.9
31	242	54,59	76,39	82,35	80,04	77,35	77,88	75,48	86.6
32	241	59,28	76,78	82,26	80,99	78,32	79,12	76,37	87.2
33	240	57,99	77,97	82,66	81,49	78,77	80,27	77,55	88.0
34	239	59,38	77,22	84,38	83,06	79,28	81,31	78,72	89.1
35	238	61,04	80,09	86,13	83,88	80,87	82,31	80,27	90.6



Σχήμα 4.3.1 Απεικόνιση των μετρήσεων στην Κάτοψη Δεσποτικού

Πίνακας 4-6 . Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης σε ανάλυση οκτάβας
ΟΚΤΑΒΑ

Mic Position	Θέση Μνήμης	Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq							Lp(Z)
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623	
243	ΘΒ2	50,91	47,86	42,57	39,38	32,81	30,02	24,32	56.8
244	Ο11	59,03	59,30	61,04	76,88	76,33	76,42	76,39	84.0
245	Ο12	59,44	54,72	55,43	74,26	72,43	73,96	73,08	80.9
246	Ο13	56,57	56,65	56,74	72,84	71,78	72,86	71,69	79.5
247	Ο21	47,18	52,87	57,43	76,42	74,67	77,22	75,99	83.2
248	Ο22	53,80	57,58	58,14	74,21	73,59	74,08	73,08	81.0
249	Ο23	53,64	56,97	59,25	72,12	71,71	72,67	70,97	79.3
250	Ο31	57,62	51,26	59,61	73,58	73,39	74,64	73,22	81.2
251	Ο32	61,55	55,49	56,86	71,86	71,62	72,69	70,83	79.2
252	Ο33	58,00	50,17	58,66	71,26	70,31	71,71	70,11	78.2
253	Ο41	51,58	60,55	57,57	75,21	73,84	75,27	73,81	82.2
254	Ο42	54,58	61,04	54,59	74,53	73,38	75,31	73,12	81.7
255	Ο43	61,77	62,53	59,28	74,26	73,43	74,06	72,15	81.0



Σχήμα 4.3.2 Απεικόνιση των μετρήσεων στην Κάτοψη Οκτάβας

Αξιολόγηση Στάθμης ηχητικής πίεσης

Ένας κλειστός χώρος σε ιδανικές συνθήκες θα πρέπει να έχει λογική πτώση στάθμης πίεσης (ανάλογα με την χρήση του χώρου) σε σχέση με την απόσταση από την πηγή. Η απόκλιση του από την ιδανική ακουστική συμπεριφορά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώρου και από τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στους χώρους που επηρεάζουν την διάδοση του ήχου.

Δεσποτικό

Από τον πίνακα 4.5, παρατηρούμε ότι ο χώρος έχει λογική πτώση στάθμης του ήχου στην αριστερή και κεντρική πλευρά του χώρου σε όλο το συχνοτικό φάσμα μέτρησης (44.7 Hz - 5623 Hz). Στην δεξιά πλευρά του χώρου παρατηρείται ότι ο χώρος έχει μεγαλύτερη στάθμη στις πίσω θέσεις μέτρησης του χώρου πάρα κοντά στην πηγή (σε όλο το συχνοτικό φάσμα μέτρησης). Η μη λογική συμπεριφορά του χώρου οφείλεται σε στάσιμα κύματα (σχήμα 4.2.3) και στην ύπαρξη ανακλαστικών επιφανειών (τζάμια) στην δεξιά πλευρά του χώρου.

Οκτάβα

Από τον πίνακα 4.6, παρατηρούμε ότι ο χώρος έχει πρόβλημα στις θέσεις παρατήρησης [O41,O42,O43] σε όλο το ακουστικό φάσμα μέτρησης (44.7 Hz - 5623 Hz) λόγω της ύπαρξης στάσιμων κυμάτων (κεφάλαιο 4.2.1) και της ύπαρξης παραθύρων στον τοίχο. Επίσης μη λογικές στάθμες παρατηρούνται στις χαμηλές συχνότητες (έως 250 Hz) με εξαίρεση της αριστερές θέσεις παρατήρησης [O11,O12,O13], λόγω της ύπαρξης στάσιμων κυμάτων

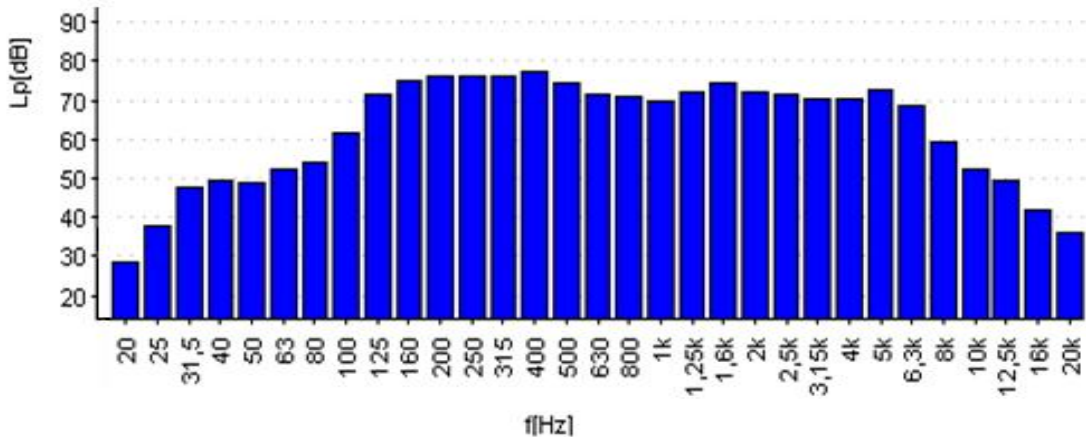
(σχήμα 4.2.4) αλλά και τον μεγάλο χρόνο αντήχησης στις χαμηλές (κεφάλαιο 4.2.2).

Στο παράρτημα III, υπάρχουν οι καμπύλες απόκρισης των χώρων (σε σχέση με την απόσταση από την πηγή) για την διεξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων.

Στάθμες Απόκρισης σε χαρακτηριστική θέση στους χώρους

Παραθέτουμε τις ισοσταθμικές καμπύλες απόκρισης από το ηχώμετρο, με γραμμικό φίλτρο και τριτοκταβική ανάλυση για τους υπό μελέτη χώρους. Η θέση παρατήρησης είναι στο κέντρο των θεατών (θέση παρατήρησης[D22] για το Δεσποτικό και [O22] για τον χώρο της Οκτάβας.

Στάθμη Απόκρισης στο χώρο του Δεσποτικού



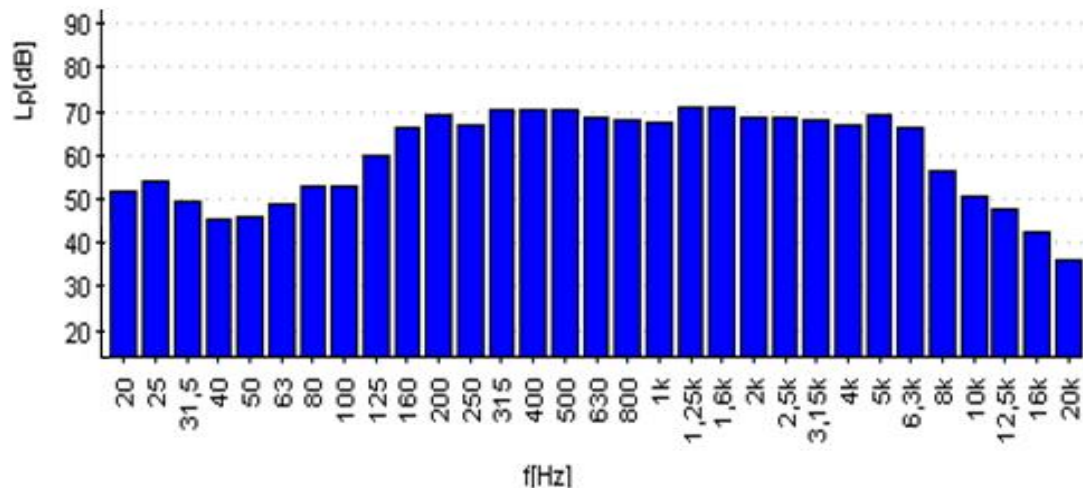
Σχήμα 4.3.3 Απεικόνιση Στάθμεων απόκρισης (σε τριτοκταβική ανάλυση), με θέση παρατήρησης στο κέντρο των θεατών στο χώρο του Δεσποτικού

Ένας χώρος που προορίζεται για εκδηλώσεις ομιλίας ή θεάτρου θα πρέπει να έχει καλή απόκριση στο φάσμα απόκρισης ομιλίας του ανθρώπου (από 100 έως 4000 Hz). Από ότι φαίνεται ο χώρος έχει σταθερή απόκριση από 125 – 6.300 Hz κοντά στα 70dB, με λίγο αυξημένες τις χαμηλο-μεσαίες συχνότητες (ιδίως στα 400 Hz) και μια μικρή αύξηση κοντά στα 1.6 KHz.

Στις υψηλές συχνότητες (πάνω από 8 KHz) και στις χαμηλές συχνότητες (κάτω από τα 100Hz), είναι αναμενόμενη η πτώση της απόκρισης γύρω στα 20dB (σε σχέση με τις μεσαίες συχνότητες). Εφόσον ο χώρος χρησιμοποιείται για εκδηλώσεις ομιλίας δεν θα έχουμε ιδιαίτερο πρόβλημα από αυτές τις συχνότητες.

Εάν επιθυμούμε να βελτιώσουμε την ακουστική του χώρου θα πρέπει να τοποθετήσουμε απορροφητικά υλικά και ηχοδιαχυτές για να βελτιώσουμε την απόκριση στις προβληματικές μεσαίες συχνότητες (400 και 1600 Hz).

Στάθμη Απόκρισης στο χώρο της Οκτάβας



Σχήμα 4.3.4 Απεικόνιση Στάθμεων απόκρισης (σε τριτοκταθική ανάλυση), με θέση παρατήρησης στο κέντρο των θεατών στο χώρο του Δεσποτικού

Ένας χώρος που προορίζεται για εκδηλώσεις μουσικής θα πρέπει να έχει καλή απόκριση στο φάσμα απόκρισης των μουσικών οργάνων (χρησιμοποιείτε συνήθως από 63 έως 8000 Hz). Από ότι φαίνεται ο χώρος έχει σταθερή απόκριση από 160 – 6.300 Hz κοντά στα 65dB. Η απόκλιση των στάθμεων στις συχνότητες αυτές είναι καλή (της τάξης των 3dB). Στις χαμηλές συχνότητες (από 125 και κάτω) είναι το ακουστικό πεδίο που θα πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή για το λόγο ότι θα πρέπει να επιτύχουμε ενίσχυση των χαμηλών (κοντά στα 40 – 50 Hz) για να βελτιώσουμε την ακουστική απόδοση των οργάνων σε αυτές τις συχνότητες αλλά και να επιτύχουμε την απαραίτητη ηχομόνωση για την λειτουργία του χώρου. Προφανώς, η πρακτικότητα υπερισχύει της πολυτέλειας, οπότε είναι λογικό να προτιμηθεί η τοποθέτηση ηχομονωτικών υλικών (κοντά στα 25Hz).

Κεφάλαιο 5°

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL 3.4A.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

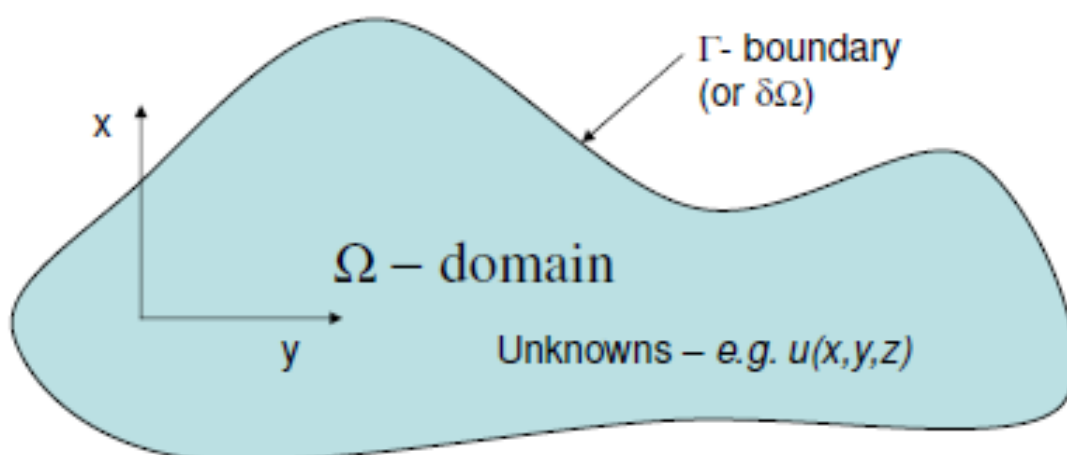
Το *Comsol Multiphysics* είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης μοντέλων με σχεδιασμό στις εφαρμογές, παρατηρώντας την πραγματικότητα. Με αυτή την λογική είναι σχεδιασμένο και το περιβάλλον εργασίας. Χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με τις προτιμήσεις μας, με σκοπό να μας κάνει πιο παραγωγικούς στην καθημερινότητα μας.

Βασικό πλαίσιο λειτουργίας

Το πρόγραμμα βασίζεται στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων η ανάλυσης (FEM / FEA) και στην αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE).

Βασικά μέρη λειτουργίας

1. οι Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις (PDE, Partial Differential Equation) αντιπροσωπεύουν τη φυσική.
2. Την Γεωμετρία την οποία θα λύσει το πρόβλημα.
3. Οι Οριακές Συνθήκες (για στατική ή σταθερή κατάσταση προβλημάτων) και τις αρχικές συνθήκες (για παροδικά προβλήματα).



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση λειτουργίας Comsol

(x,y,z,t) – Εξαρτημένες μεταβλητές χώρου και χρόνου [13]

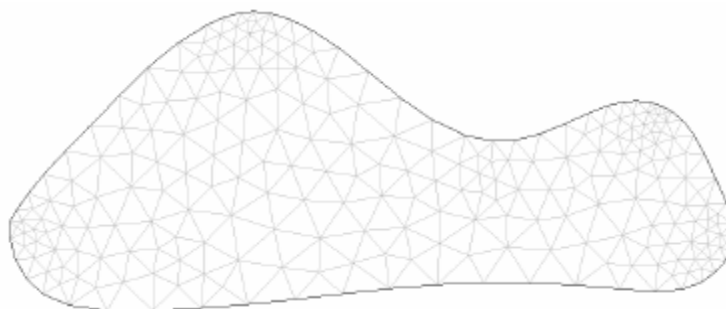
(u) – Ανεξάρτητες μεταβλητές αγνώστου πεδίου

Συνοριακές Συνθήκες. Σε κάθε όριο θα πρέπει να καθορίσουμε :

- 1) Την εξαρτημένη μεταβλητή η ίδια - "Βασική Συνοριακή Κατάσταση" ή "οριακή συνθήκη Dirichlet".
- 2) Την παράγωγο της μεταβλητής (π.χ. du / Dn) - "φυσική οριακή κατάσταση" ή "οριακή συνθήκη Neumann".
- 3) Την σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και η κανονική της παράγωγο (π.χ. $du / dn = (1 / z) \cdot u$).

Στοιχεία Πεπερασμένων Στοιχείων

- 1) Διακριτοποίηση του χώρου σε κομμάτια (τα στοιχεία) - αυτό ονομάζεται « πλέγμα ».
- 2) Η επιλογή του στοιχείου - σχήμα (τρίγωνο, τετράγωνο, οκταγωνικό), αριθμό των κόμβων (3, 4, 5, 8. κλπ.) και σχήμα λειτουργίας (γραμμική, τετραγωνική, κλπ.).
- 3) Η επιλογή του λύτη (άμεση, επαναληπτική, προετοιμασία).
- 4) Μετα-επεξεργασία- κοιτάζοντας τη λύση με διάφορους τρόπους.



Εικόνα 5.2 Διακριτοποίηση (Meshed) σχήματος με τριγωνικά στοιχεία [13]

Ακολουθία επίλυσης για κάθε FEM πρόβλημα :

1. Αποφασίζουμε σχετικά με τον εκπρόσωπο της φυσικής (επιλογή PDE).
2. Ορίζουμε τη γεωμετρία την οποία θα λύσει το πρόβλημα.
3. Ρυθμίζουμε τις "ιδιότητες των υλικών», όλες οι σταθερές που εμφανίζονται στο PDE.
4. Ρυθμίζουμε τις συνοριακές συνθήκες (κατάσταση για στατικά ή σταθερά προβλήματα) και αρχικές συνθήκες (για παροδικά προβλήματα).
5. Επιλογή τύπου στοιχείων και διακριτοποίησης γεωμετρίας.
6. Επιλογή λύτη και να επιλύσει τους αγνώστους.
7. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Post-processor) για να βρούμε τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε.

5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΩΡΩΝ

Παρακάτω θα περιγράψουμε τα φαινόμενα που μελετάμε στο χώρο με το υπολογιστικό πρόγραμμα *Comsol*, καθώς και ορισμένες παραμέτρους και μεταβλητές που τις χαρακτηρίζουν.

5.2.1 ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΕΝΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ

Για να περιγράψουμε τις ακουστικές δονήσεις σε έναν κλειστό χώρο είναι απαραίτητος ο Κανονικός Ρυθμός (*Normal mode*). Είναι ένα στάσιμο κύμα τριών διαστάσεων που περιγράφεται από την Ιδιοσυνάρτηση (*Eigenfunction*) και οι συχνότητες δόνησης των κανονικών ρυθμών ονομάζονται Ιδιοσυχνότητες (*Eigenfrequency*) ή Φυσικές (Naturals). Η κυματική εξίσωση $P_n(r)$ [Εικόνα 5.1] καθορίζεται από τις ιδιοτιμές (*EigenValues*) και τις διακριτές τιμές του Δείκτη (n). Οι λύσεις της κυματικής εξίσωσης τοποθετούνται σαν λύσεις στην Ιδιοσυνάρτηση.

Οι ιδιομορφίες (*eigenmodes*) δείχνουν το άκουσμα της έντασης για τις συνδεδεμένες ιδιοσυχνότητες της. Από τα χαρακτηριστικά των ιδιομορφιών, μπορούμε να βγάλουμε μερικά συμπεράσματα ως προς το που οι ομιλητές θα πρέπει να τοποθετηθούν στο χώρο.

Μαθηματικά Μοντέλα

Ήχος που πολλαπλασιάζεται στον ελεύθερο αέρα περιγράφεται από την κυματική εξίσωση :

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5.1)$$

Η εξίσωση περιγράφεται από την εξίσωση 3.1

Αν ο αέρας φέρει σε κίνηση μια αρμονικά ταλαντώμενη πηγή, π.χ. ένα μεγάφωνο με μόνο μία συχνότητα να υπάρχει στο δωμάτιο. Είναι λογικό να αναζητήσει μια αρμονική λύση που έχει την μορφή $p = p e^{i\omega t}$. Η κυματική εξίσωση απλοποιείται με την βοήθεια της εξίσωσης Helmholtz. Στη συνέχεια η πίεση (p) και το εύρος των ακουστικών διαταραχών είναι :

$$\Delta p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (5.2)$$

Οι εξισώσεις περιγράφονται και στο πρώτο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα διατηρεί την ίδια σημασιολογία.

Συνοριακές Συνθήκες για Ιδιοσυχνότητες

Το μοντέλο αυτό προϋποθέτει ότι όλα τα όρια, τους τοίχους, το δάπεδο, οροφή, και τα αντικείμενα μέσα στο χώρο είναι απολύτως άκαμπτα (σκληρά όρια).

Αναλυτική Σύγκριση

Είναι δυνατόν να λυθεί η απλούστερη περίπτωση σε ένα άδειο δωμάτιο αναλυτικά. Κάθε ιδιοσυχνότητα αντιστοιχεί σε τριπλό ακέραιο (X, Ψ, Z):

$$f_{X,\Psi,Z} = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{n_X}{L_X}\right)^2 + \left(\frac{n_\Psi}{L_\Psi}\right)^2 + \left(\frac{n_Z}{L_Z}\right)^2} \quad (5.3)$$

Η ιδιομορφίες μπορεί να διαιρεθούν σε τρεις διακριτές κατηγορίες:

- Ιδιοσυχνότητες (*Eigenfrequencies*) με ένα μόνο δείκτη που είναι διαφορετική από το μηδέν, οδηγεί σε αξονικούς τρόπους ταλάντωσης.
- Εάν ένας δείκτης είναι μηδέν, η κατάσταση είναι εφαπτόμενη.
- Αν όλες οι δείκτες είναι διαφορετικοί από το μηδέν, η λειτουργία είναι πλάγια.

Διαδικασία και Παράμετροι Προσομοίωσης Ιδιοσυχνοτήτων στο *Comsol*

Στο πρόγραμμα τοποθετήσαμε το κατάλληλο αλγόριθμο και περιβάλλον εργασίας για τις Ιδιοσυχνότητες (*Eigenmodes*). Δημιουργήσαμε 2-D και 3-D επιφάνεια εργασίας (*layer*) με τις κατάλληλες παραμέτρους (Μονάδες σε S.I, έγινε ρύθμιση για τα είδη στοιχείων διακριτοποίησης σε τετραγωνικό στοιχείο).

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε μόνο τις οριακές επιφάνειες στους δυο χώρους. Όλες οι επιφάνειες θεωρούνται αυτόματα από το πρόγραμμα ότι έχουν συμπεριφορά σαν άκαμπτα σύνορα (*Hard boundaries*).

Στη συνέχεια στις Ρυθμίσεις Διακριτοποίησης (*Meshed Mode*) δηλώσαμε επίπεδο διακριτοποίησης σε επίπεδο *Extremely Fine* και για τους δυο χώρους (την μέγιστη δυνατή διακριτοποίηση με 1.800.000 στοιχεία για το Δεσποτικό και 3.600.000 στοιχεία για το χώρο της οκτάβας). Το πρόγραμμα αφού ελέγξει το χώρο για πιθανά σφάλματα (ασυνέχειες, συμπίπτουσες γραμμές, σφάλματα προγράμματος) μας παρουσιάζει την διακριτοποίηση του μοντέλου.

Τέλος στις Παραμέτρους Επιλύτη (*Parameter Solver*) ορίζουμε τον τρόπο προσομοίωσης (*Eigen Frequency*), και το εύρος συχνοτήτων με το αντίστοιχο βήμα που θέλουμε να λειτουργήσει η προσομοίωση. Για εκκίνηση διαδικασίας κάνουμε Επίλυση (*Solve*).

Τα αποτελέσματα του προγράμματος *Comsol 3.4a* φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Δεσποτικό				Οκτάβα			
nX	nΨ	nZ	Ιδιοσυχνότητες Comsol	nX	nΨ	nZ	Ιδιοσυχνότητες Comsol
1	0	0	08,60	1	0	0	08,60
0	1	0	15,04	0	1	0	09,91
1	1	0	17,32	1	1	0	12,91
2	0	0	17,20	2	0	0	16,56
2	1	0	22,84	2	1	0	19,30
3	0	0	25,79	3	0	0	24,85
0	2	0	30,21	3	1	0	26,75
3	1	0	29,86	0	0	1	26,10
0	0	1	52,50	4	0	0	33,15

Εικόνα 5.3 Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης στις Ιδιοσυχνότητες

5.2.2 ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Μαθηματικά Μοντέλα Ακουστικής Ανάλυσης

Όταν η πίεση είναι χρονικά εξαρτώμενη και η πηγή διέπεται από της ίδιους όρους, η κυματική εξίσωση για τα ακουστικά κύματα μετατρέπεται σε μια ανομοιογενή εξίσωση *Helmholtz* :

$$\frac{1}{\rho_o c_o^2} \frac{d^2 p}{dt^2} - d_a \frac{d p}{dt^2} + V(-\frac{1}{\rho_o} (V_p - q)) = Q \quad (5.4)$$

όπου	ρ_o	αναφέρεται στην πυκνότητα μέσου σε $[kg/m^3]$
	c	είναι η ταχύτητα του ήχου σε $[m/sec]$
	q	Το δίπολο πηγής σε $[N/m^3]$
	Q	Το μονόπολο πηγής $[1/sec^2]$

Με την παραλαβή των όρων των πηγών, μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει αυτή την εξίσωση ως ιδιοτιμή των μερικών διαφορικών εξισώσεων (*PDE*) για την επίλυση των Ιδιομορφιών και Ιδιοσυχνότητων. Η προϋπόθεση πίεση-πηγής είναι διαθέσιμη μόνο για το χρόνο - αρμονικής ανάλυσης.

A. Συνοριακές Συνθήκες Ηχητικής Πίεσης

Η απόσβεση ως όρος απουσιάζει από την συνήθη διαδικασία του προβλήματος ακουστικής ως σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων *PDE*. Ωστόσο, σύμφωνα με τη γενική φιλοσοφία της μοντελοποίησης *Comsol Multiphysics*, υπάρχει η δυνατότητα να δηλώσουμε συντελεστή επιφάνειας (d_a), που είναι προσβάσιμος από το περιβάλλον εργασίας χρήστη, μέσω των *Subdomain Ρυθμίσεων*.

Ισχύει επίσης ότι, ακόμη και όταν τα κύματα ήχου διαδίδονται σε ένα μέσο χωρίς απώλειες, η εξασθένηση γίνεται συχνά από την αλληλεπίδραση με τον περιβάλλοντα χώρο στα όρια του συστήματος.

Οι τυπικές οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο πρόγραμμα είναι οι εξής :

1. Ήχος – σκληρά όρια (*Hard*)

$$-n(-\frac{1}{\rho_o} (V_p - q)) = 0 \quad (5.5)$$

Είναι ένα όριο στο οποίο η κανονική συνιστώσα της επιτάχυνσης είναι μηδενική :
Για το μηδενικό δίπολο και σταθερή πυκνότητα ρευστού, η κανονική παράγωγος της πίεσης είναι μηδενική στα όρια.

2. Ήχος - Μαλακά Όρια $\frac{dp}{dn} = 0$

Σε ένα υγιές - μαλακό όριο της διαφοράς πίεσης εξαφανίζεται :

$$P = 0 \quad (5.6)$$

3. Πηγή πίεσης

Ο όρος αυτός σημαίνει ότι το όριο που έχετε καθορίσει μια σταθερή ακουστική πίεση και πρέπει να διατηρηθεί στα όρια :

$$P = P_0 \quad (5.7)$$

4. Οριακές συνθήκες αντίστασης

Ο όρος όριο αντίστασης είναι μια γενίκευση του ήχου - σκληρό και μαλακού σε ήχο-οριακές συνθήκες :

$$-n\left(-\frac{1}{p_0}(V_p - q)\right) - \frac{i\omega p}{Z} = 0 \quad (5.8)$$

Όπου Z η ακουστική αντίσταση εισόδου του εξωτερικού τομέα [m/sec].
 ω η γωνιακή συχνότητα σε [rad/s]

Από φυσική άποψη, η ακουστική αντίσταση εισόδου είναι μια σχέση μεταξύ πιέσεων και κανονικής ταχύτητας σωματιδίων. Ο όρος «όριο – αντίστασης» είναι μια καλή προσέγγιση για μια τοπική αντίδραση σε μια επιφάνεια για το οποίο η κανονική ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο εξαρτάται μόνο από την πίεση σε εκείνο ακριβώς το σημείο.

5. Οριακές συνθήκες ακτινοβολίας

Οι οριακές συνθήκες ακτινοβολίας επιτρέπουν σε ένα εξερχόμενο κύμα να εγκαταλείψει τον τομέα μοντελοποίησης με ελάχιστη ανάκλαση. Κατά τον καθορισμό της προϋπόθεσης του ορίου αυτού του είδους ο χρήστης έχει την επιλογή μεταξύ τριών τύπων κυμάτων :

i) επίπεδο, ii) κυλινδρικό, iii) σφαιρικό.

Μπορείτε να προσαρμόσετε τον τρόπο αυτό, με την προεπιλογή της γεωμετρίας του χώρου μοντελοποίησης. Οι οριακές συνθήκες ακτινοβολίας είναι :

$$-n\left(-\frac{1}{p_0}(V_p - q)\right) + (ik + k(r))\frac{P}{p_0} = (ik + k(r)) - i(kn)\frac{P_0}{p_0} e^{-i(kr)} \quad (5.9)$$

όπου (k) είναι ο αριθμός κύματος (μια προκαθορισμένης μεταβλητής και $k(r)$ είναι μια λειτουργία του οποίου το σχήμα εξαρτάται από τον τύπο κύματος :

- Επίπεδα κύματα $k(r) = 0$
- Κυλινδρικά κύματα $k(r) = 1 / (2r)$
- Σφαιρικά κύματα $k(r) = 1 / r$

5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL 3.4^A

Στο πρόγραμμα τοποθετήσαμε το κατάλληλο αλγόριθμο και περιβάλλον εργασίας για χρονικά εξαρτώμενο περιβάλλον (στο acoustic mode, time-dependent). Δημιουργήσαμε 2-D και 3-D επιφάνεια εργασίας (layer) με τις κατάλληλες παραμέτρους (Μονάδες σε S.I, είδη στοιχείων διακριτοποίησης σε τετραγωνικό στοιχείο κ.α.).

Σχεδιάσαμε τους χώρους [Εικόνα 5.1,5.2]. Συμπεριλάβαμε τα πιο σημαντικά ακουστικά στοιχεία δηλαδή αυτά που έχουν πιο σημαντικό ρόλο για την προσομοίωση. Παραλείψαμε την ύπαρξη κουρτινών, κλιματιστικών κλπ. Επίσης αντί για καρέκλες βάλαμε ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης στην αντίστοιχη θέση στο χώρο έξω από το πίσω μέρος της αίθουσας.

Στις Συνοριακές Ρυθμίσεις (*Boundary Settings*) δηλώσαμε τα αντικείμενα τα οποία θέλουμε να συμπεριλάβουμε στην προσομοίωση με συμπεριφορά σαν σκληρές επιφάνειες (*Hard boundaries*), αντίθετα όλες τις υπόλοιπες σαν μαλακές επιφάνειες (*Soft Boundaries*). Τις υπόλοιπες παραμέτρους τις αφήσαμε ως έχουν (μηδενικές).

Στις Ρυθμίσεις Υποτομέα (*Subdomain Settings*) δηλώσαμε τις επιφάνειες τις οποίες θέλουμε να συμπεριλάβουμε στην προσομοίωση δηλώνοντας τον αντίστοιχο συντελεστή απορρόφησης για κάθε επιφάνεια συμφώνα με τον πίνακα απορρόφησης στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τις υπόλοιπες παραμέτρους της αφήσαμε ως έχουν (μηδενικές).

Μετά πήγαμε στις Ρυθμίσεις Διακριτοποίησης (*Meshed Mode*) και δηλώσαμε επίπεδο διακριτοποίησης Extremely Fine, την μέγιστη δυνατή διακριτοποίηση για το χώρο του Δεσποτικού με 1.800.000 στοιχεία. (3.300.000 κόμβοι και 6cm μήκος πλευράς στοιχείου). Στο χώρο της οκτάβας δηλώσαμε επίπεδο διακριτοποίησης (Fine) για συχνότητες από 63Hz έως 1000 Hz και (Extra fine) για 2 και 4 KHz (λόγω της αδυναμίας επίλυσης του προγράμματος), με 1.800.000 στοιχεία (3.300.000 κόμβοι και 7.6cm μήκος πλευράς στοιχείου) και με 3.300.000 στοιχεία αντίστοιχα.

Το πρόγραμμα αφού ελέγξει το χώρο για πιθανά σφάλματα, μας παρουσιάζει την απεικόνιση διακριτοποίησης του μοντέλου. Τέλος στις Παραμέτρους Επιλύτη (*Parameter Solver*) ορίζουμε τον τρόπο προσομοίωσης (*Stationary*), και το εύρος συχνοτήτων με το αντίστοιχο βήμα που θέλουμε να λειτουργήσει η προσομοίωση. Για εκκίνηση διαδικασίας κάνουμε Επίλυση (*Solve*). Είναι ιδιαίτερος σημαντικό να βάλουμε την κατάλληλη μορφή παρουσίασης της επίλυσης και της κατάλληλες μονάδες στις παραμέτρους εκτύπωσης (*Plot Parameters*).

Αποτελέσματα για την Στάθμη ηχητικής πίεσης ανά συχνότητα με το υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol 3.4a.

Θέση Μνήμης	Θέση Χώρου	Στάθμη Ηχητικής Πίεσης στο χώρο του Δεσποτικού (σε dB)						
		63	125	250	500	1000	2000	4000
232	11	62,1	76,7	82,0	79,4	81,1	81,1	81,1
231	12	54,0	73,5	79,6	79,6	82,1	77,4	77,4
230	13	60,7	74,4	81,7	81,9	73,4	81,1	81,0
229	14	54,7	74,4	80,8	80	77,1	77,2	79,9
228	15	57,5	75,3	81,3	79,5	79,1	80,8	74,5
233	21	73,8	78,9	83,8	83,8	79,6	81,1	79,6
234	22	60,6	80,6	81,5	81,4	75,0	75,0	81,1
235	23	61,6	78,3	80,4	77,5	81,6	82,3	82,9
236	24	60,2	74,2	81,3	80,9	85,9	83	83,4
237	25	45,0	75,0	80,2	80,0	77,9	79,2	78,1
242	31	57,5	73,0	82,0	82,7	75,9	75,4	75,3
241	32	61,9	78,3	80,6	80,6	83,2	78,9	88,6
240	33	60,3	79,5	81,3	81,4	81,8	81,9	81,9
239	34	54,3	82,3	82,1	80,0	80,4	77,2	77,2
238	35	42,8	68,9	84,8	84,6	81,7	81,9	81,7
		Στάθμη Ηχητικής Πίεσης στο χώρο της Οκτάβας (σε dB)						
		63	125	250	500	1000	2000	4000
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623
244	O11	61,1	66,7	61,5	81,3	75,0	73,8	
245	O12	62,5	58,6	63,7	74,5	78,8	70,0	
246	O13	66,0	56,8	61,8	77,4	75,7	43,3	
247	O21	69,1	61,4	77,7	84,8	81,2	75,6	
248	O22	70,3	53,9	63,7	77,8	74,4	69,3	
249	O23	59,8	66,1	58,5	71,5	73,7	41,5	
250	O31	61,5	54,1	63,7	73,3	82,8	45,5	
251	O32	76,4	58,9	66,5	71,6	83,7	61,7	
252	O33	73,3	49,5	67,4	78,0	84,4	40,5	
253	O41	63,5	70,5	72,2	79,2	78,5	40,0	
254	O42	57,3	57,6	75,3	82,0	77,8	74,0	
255	O43	64,5	65,5	69,8	73,8	74,0	68,0	

Εικόνα 5.4 Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης, για την στάθμη ηχητικής πίεσης²

² Στα 4KHz δεν ήταν δυνατό να έχουμε αποτελέσματα λόγω αδυναμίας του υπολογιστή να διαχειριστεί το τεράστιο όγκο πληροφοριών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την ενότητα θα κάνουμε σύγκριση αποτελεσμάτων από τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για να δούμε κατά πόσο η θεωρητική μέθοδος προσεγγίζει την πειραματική. Οι παρακάτω ο πίνακες περιέχουν τα αποτελέσματα (από το 4^ο και 5^ο κεφάλαιο) και τα ποσοστά απόκλισης των δύο μεθόδων.

α. Ιδιοσυχνότητες

Δεσποτικό						
nX	nΨ	nZ	Θεωρητικές Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοσυχνότητες Comsol	Απόλυτη Διαφορά	% απόκλιση
1	0	0	9,38	8,60	0,78	8,32
0	1	0	15,06	15,04	0,02	0,13
1	1	0	17,74	17,32	0,42	2,37
2	0	0	18,76	17,2	1,56	8,32
2	1	0	24,05	22,84	1,21	5,03
3	0	0	28,14	25,79	2,35	8,35
0	2	0	30,11	30,21	0,10	0,33
3	1	0	31,91	29,86	2,05	6,42
0	0	1	52,49	52,50	0,02	0,03
Οκτάβα						
1	0	0	8,29	8,60	0,31	3,71
0	1	0	9,92	9,91	0,01	0,12
1	1	0	12,93	12,91	0,02	0,14
2	0	0	16,58	16,57	0,02	0,11
2	1	0	19,33	19,30	0,02	0,12
3	0	0	24,88	24,85	0,02	0,09
3	1	0	26,78	26,75	0,03	0,12
0	0	1	27,25	26,10	1,15	4,21
4	0	0	33,17	33,15	0,02	0,06

Εικόνα 6.1 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις δυο μεθόδους μελέτης

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο χώρο του Δεσποτικού, τα αποτελέσματα από τον πίνακα 6.1 δείχνουν να έχουν απόκλιση κυρίως για τους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης (1.0.0 - 2.0.0 - 3.0.0) που προκαλούνται κατά μήκος της αίθουσας. Είναι λογική η απόκλιση αυτή, επειδή κατά την προσομοίωση συμπεριλάβαμε την υπερυψωμένη σκηνή στην μπροστινή πλευρά της αίθουσας.

Στο χώρο της Οκτάβας, από τα αποτελέσματα στον πίνακα 6.1 παρατηρείται διαφορά στον αξονικό τρόπο ταλάντωσης (0.0.1) κατά τον z άξονα (ύψος). Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο πολύπλοκο σχήμα της οροφής και τα σχεδιαστικά λάθη στο πρόγραμμα υπολογιστικής προσομοίωσης (σχεδιασμός οροφής κατά προσέγγιση).

β. Στάθμη ηχητικής πίεσης

		ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ													
		63		125		250		500		1000		2000		4000	
		Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%
		Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ
11	232	1,06	1,71	3,39	4,42	2,33	5,04	4,48	5,64	2,15	0,28	2,33	1,50	0,83	1,03
12	231	1,43	2,65	2,94	4,00	1,51	0,36	0,55	0,70	0,95	7,70	0,40	1,33	2,33	3,02
13	230	3,96	6,52	1,57	2,12	2,38	1,32	2,25	2,75	0,13	2,69	2,12	5,12	5,32	6,57
14	229	2,73	4,98	3,99	5,37	1,27	3,80	0,00	0,00	1,26	1,04	1,26	1,82	2,86	3,58
15	228	0,64	1,11	0,08	0,10	0,56	2,53	1,68	2,12	1,12	0,46	0,56	0,47	4,55	6,11
21	233	14,55	19,71	0,37	0,46	14,18	0,86	2,89	3,45	11,29	1,31	8,40	0,35	0,57	0,72
22	234	0,99	1,63	2,35	2,92	1,36	2,19	1,63	2,01	0,27	2,96	1,36	4,27	3,60	4,44
23	235	4,74	7,69	1,62	2,07	3,12	0,46	2,39	3,09	0,72	7,43	1,67	5,78	6,75	8,14
24	236	1,54	2,56	2,00	2,69	0,45	0,38	2,19	2,70	1,73	11,81	0,45	7,56	7,82	9,37
25	237	12,57	27,94	0,71	0,95	11,86	0,41	2,13	2,67	9,73	3,82	7,59	3,89	4,05	5,18
31	242	2,91	5,06	3,39	4,65	0,48	0,42	2,66	3,22	2,18	1,92	0,48	3,29	0,18	0,24
32	241	2,62	4,24	1,52	1,95	1,10	2,05	0,39	0,48	0,71	5,87	0,33	0,28	12,23	13,81
33	240	2,31	3,83	1,53	1,93	0,78	1,68	0,09	0,11	0,69	3,70	0,59	1,99	4,35	5,31
34	239	5,08	9,35	5,08	6,18	0,01	2,78	3,06	3,83	3,05	1,40	0,01	5,33	1,52	1,97
35	238	18,24	42,62	11,19	16,24	7,05	1,57	0,72	0,85	6,33	1,01	5,61	0,51	1,43	1,76

Εικόνα 6.2 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων στάθμης ηχητικής πίεσης για το χώρο του δεσποτικού

Οκτάβα

		Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq													
		63		125		250		500		1000		2000		4000	
		Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%	Απολ	%
		Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ	Διαφ
011	244	2,07	3,39	7,4	11,21	0,46	0,75	4,42	5,44	1,33	1,74	2,62	3,43	-	-
012	245	3,06	4,90	3,88	5,57	8,27	12,98	0,24	0,32	6,37	8,79	3,96	5,35	-	-
013	246	9,43	14,29	0,15	0,21	5,06	8,19	4,56	5,89	3,92	5,46	29,56	40,57	-	-
021	247	21,92	31,72	8,53	12,12	20,27	26,09	8,38	9,88	6,53	8,75	1,62	2,10	-	-
022	248	16,5	23,47	3,68	5,29	5,56	8,73	3,59	4,61	0,81	1,10	4,78	6,45	-	-
023	249	6,16	10,30	9,13	17,19	0,75	1,28	0,62	0,87	1,99	2,78	31,17	42,89	-	-
031	250	3,88	6,31	2,84	3,87	4,09	6,42	0,28	0,38	9,41	12,82	29,14	39,04	-	-
032	251	14,85	19,44	3,41	4,76	9,64	14,50	0,26	0,36	12,08	16,87	10,99	15,12	-	-
033	252	15,3	20,87	0,67	0,86	8,74	12,97	6,74	8,64	14,09	20,04	31,21	43,52	-	-
041	253	11,92	18,77	9,95	13,45	14,63	20,26	3,99	5,04	4,66	6,31	35,27	46,86	-	-
042	254	2,72	4,75	3,44	4,89	20,71	27,50	7,47	9,11	4,42	6,02	1,31	1,74	-	-
043	255	2,73	4,23	2,97	3,87	10,52	15,07	0,46	0,62	0,57	0,78	6,06	8,18	-	-

Εικόνα 6.3 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων στάθμης ηχητικής πίεσης για το χώρο της οκτάβας

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Δεσποτικό

Σε πολύ χαμηλές συχνότητες (63Hz) μπροστά από την πηγή στην θέση [D21], η πηγή βρίσκεται σε μια ιδιαίτερη θέση μπροστά από καμπυλωτή σκηνή (το οποίο είχε σχεδιαστικά λάθη κατά την προσομοίωση) και ήταν τοποθετημένη πίσω από μια ψηλή έδρα (1.2m), γεγονός που επηρέασε πιθανώς τις ανακλάσεις στο χώρο ή έχουμε την δημιουργία στάσιμου κύματος στη συγκεκριμένη θέση παρατήρησης.

Η απόκλιση στις μετρήσεις στο πίσω μέρος του Δεσποτικού θέση [D24,D25,D35] οφείλεται στην ύπαρξη ξύλινων καρεκλών κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων στο πίσω μέρος οι οποίες δεν λήφθηκαν υπόψη στην θεωρητική διαδικασία.

Στην θέση **[D32]** στις πολύ υψηλές συχνότητες στα 4 KHz (+10dB) το μήκος κύματος είναι σε ανάλογο μέγεθος με την αίθουσα και οι ηχητικές ακτίνες αλληλεπιδρούν στις οριακές επιφάνειες ή έχουμε την δημιουργία στάσιμου κύματος στη συγκεκριμένη θέση παρατήρησης.

Οκτάβα

Κατά την σχεδίαση του χώρου στο υπολογιστικό πρόγραμμα η οροφή πάνω από την μουσική σκηνή σχεδιάστηκε κατά προσέγγιση λόγω πολυσύνθετου σχήματος και στην προσομοίωση δεν λάβαμε υπόψη την υπόγεια σκάλα στην είσοδο.

Στις χαμηλές Συχνότητες η θεωρητική μέθοδος είχε αυξημένα αποτελέσματα (κατά 10 dB) στα σημεία παρατήρησης κοντά στην είσοδο και κάτω από την πολυσύνθετη οροφή **[O32,O33,O21,O41]**. Εφόσον οι ανακλάσεις εκτελούν μικρότερη διαδρομή υπάρχει και μικρότερη απόσβεση άρα είναι λογικά αυξημένα τα αποτελέσματα.

Στις μεσαίες συχνότητες υπάρχει παρόμοιο πρόβλημα **[O32.O33]** με τις Χαμηλές συχνότητες. Στα 250 Hz έχουμε αυξημένα αποτελέσματα στα σημεία παρατήρησης κάτω από τον ανοξείδωτο σωλήνα **[O12,O22,O32]**.

Στις υψηλές συχνότητες το πρόγραμμα έχει αυξημένο υπολογιστικό φορτίο .
Στα 4 KHz και δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.

Στα 2 KHz έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλο το χώρο, εκτός στο πίσω μέρος του χώρου **[O13,O23,O33]** και στα σημεία παρατήρησης κάτω από την πολυσύνθετη οροφή και δίπλα στην υπόγεια σκάλα **[O31,O32]**.

6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σε συνεργασία με το υπολογιστικό πρόγραμμα Comsol 3.4a σε σχέση :

A. Με την θεωρητική μέθοδο υπολογισμού Ιδιοσυχνότητων του Shroerder έχει αποδεκτά αποτελέσματα ακόμα και σε μεγάλους σύνθετους χώρους όπως είναι η Οκτάβα.

B, Με την πειραματική μέθοδο υπολογισμού στάθμης ηχητικής πίεσης με ηχόμετρο

1.Στον χώρο του Δεσποτικού έχει αποδεκτά αποτελέσματα σε όλο το συχνολογικό εύρος μέτρησης εκτός από ελάχιστες θέσεις παρατήρησης **[D21, D32]** που είναι πιθανό να έχουμε την δημιουργία στάσιμων κυμάτων λόγω παράλληλων τοίχων.

2. Στον χώρο της Οκτάβας το πρόγραμμα Comsol αντιμετωπίζει υπολογιστικά προβλήματα στις χαμηλές συχνότητες (μέχρι 250 Hz) και η υπολογιστική εκτίμηση είναι αυξημένη κατά 10 dB, λόγω των σχεδιαστικών λαθών, μη επαρκούς διακριτοποίησης κατά την διαδικασία της θεωρητικής μέτρησης και της πολυπλοκότητας του χώρου.

Στις μεγαλύτερες συχνότητες (από 500 – 2000 Hz) τα αποτελέσματα είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο (μέχρι 10%) εκτός από την **θέση [O21]** (μπροστά από την πηγή) που είναι πιθανό να οφείλεται στην δημιουργία στάσιμου κύματος ή από ανακλάσεις με τον ανοξείδωτο σιδερένιο σωλήνα εξαερισμού.

6.3 ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΧΩΡΩΝ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Για να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για την ακουστική συμπεριφορά των χώρων είναι απαραίτητο να επεκταθούμε σε περαιτέρω ακουστικούς δείκτες (περιγράφονται στο 2^ο κεφάλαιο) και πειραματικές μετρήσεις που συμπεριλαμβάνουν την ανάλυση της κρουστικής απόκρισης. Παρακάτω θα γίνει προσπάθεια να αναλύσουμε την συμπεριφορά των χώρων για τις παραμέτρους που προσομοιώσαμε στο υπολογιστικό πρόγραμμα με την συμβολή των θεωρητικών υπολογισμών που περιγράφονται στο 4^ο κεφάλαιο :

Ο χώρος του Δεσποτικού έχει επαρκής ακουστότητα (της τάξης 5 dB) σε όλο το χώρο. Η έντονη παρουσία των στάσιμων κυμάτων όμως, προκαλεί αυξημένη ένταση και χρωματισμούς στην αριστερή πλευρά της σκηνής [D11,D12] και στην πίσω δεξιά πλευρά [D34,D35]. Ο χρόνος αντήχησης έχει ομαλή πτώση σε όλο το ακουστό φάσμα και η διάρκεια του είναι σε ανεκτά επίπεδα για εκδηλώσεις θεατρικών παραστάσεων. Αντίθετα όμως, η χρήση του για εκδηλώσεις ομιλίας ή διαλέξεων ο χρόνος αντήχησης είναι ιδιαίτερα αυξημένος (+0.45 sec από τον ιδανικό χρόνο αντήχησης) με συνέπεια να έχουμε προβλήματα στην Αντιληπτότητα Συλλαβών, Απώλεια Συμφώνων και στην Διακριτότητα του ήχου. Επίσης ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο χώρος δεν έχει επαρκής ηχομόνωση, i) έχει στοιχειώδη κατασκευή (απλό μονό τοίχο) παρότι βρίσκεται δίπλα σε κεντρικό δρόμο, ii) διαθέτει κλιματιστικά μεγάλου μεγέθους εντός του χώρου. Δεδομένα που ενδέχεται να επιδεινώνουν τα ακουστικά προβλήματα κατά την διάρκεια εκδηλώσεων στο χώρο. (Προτάσεις Βελτίωσης)

Ο χώρος της Οκτάβας έχει ικανοποιητική ακουστότητα (της τάξης 5dB) σχεδόν σε όλο το φάσμα μέτρησης (44.7Hz – 5623Hz). Παρουσιάζει προβλήματα ακουστότητας κυρίως στις χαμηλές συχνότητες (κάτω από 125 Hz), λόγω της ηχητικής συγκέντρωσης στην πάνω δεξιά γωνιά [O43] αλλά και μεγάλη πτώση της στάθμης πίεσης στις θέσεις [O41] [O21] λόγω της παρουσίας στάσιμων κυμάτων. Ο χρόνος αντήχησης παρότι είναι απαραίτητος σε μια αίθουσα μουσικής έχει αυξημένες τιμές στις χαμηλό-μεσαίες συχνότητες (250Hz – 500Hz) σε σχέση με τον ιδανικό χρόνο αντήχησης. Το γεγονός αυτό, προκαλεί προβλήματα στην Ευκρίνεια και στο Σύνολο του ήχου δημιουργώντας προβλήματα στους μουσικούς, αλλά και οι ακροατές θα αντιλαμβάνονται φαινόμενα παρατεταμένης Ηχούς, χρωματισμού του ήχου και μέτριας ποιότητας ήχο. Ο χώρος αποτελείται από πέτρινους τοίχους πάχους 50cm και διαθέτει εξαερισμό εντός του χώρου. Για να έχουμε ασφαλή συμπεράσματα είναι απαραίτητη η ηχομονωτική μελέτη. (Προτάσεις Βελτίωσης)

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η πιο ενδεδειγμένη διεργασία για ακουστική βελτίωση προς το παρόν, είναι η συνδυαστική χρήση των δυο μεθόδων. Την Πειραματική μέθοδο, για την αξιολόγηση των χώρων πριν και μετά την ακουστική μελέτη, και την Θεωρητική μέθοδο για να προσομοιώσει και να προβλέψει τις ενδεχόμενες επιπτώσεις προσθηκών και λοιπών προτάσεων βελτίωσης του χώρου πριν εφαρμοστούν στην πράξη. Σε μερικά χρόνια, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών θα επαρκεί για την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων σε μεγάλους σύνθετους χώρους σε όλο το συχνολογικό φάσμα καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα είναι βελτιωμένη με την χρήση ολοένα μεγαλύτερης διακριτοποίησης. Υπάρχει η δυνατότητα να επεκταθεί το πρόγραμμα και σε περισσότερες παραμέτρους Ακουστικής βελτίωσης (Χρόνο Αντήχησης, προσομοίωση κρουστικής απόκρισης κ.α.), ώστε να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια ολοκληρωμένη ακουστική μελέτη σε κλειστούς χώρους. Σκοπός είναι στο μέλλον να πραγματοποιούμε την σχεδίαση και την ακουστική μελέτη σε υπολογιστικά προγράμματα και στη συνέχεια να γίνεται η κατασκευή ενός χώρου, γεγονός που θα μας εξασφαλίσει χρόνο, χρήμα και τεχνογνωσία στον τομέα της ακουστικής.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιέχονται όλα τα συμπληρωματικά στοιχεία τα οποία παραλείπονται στο κείμενο της πτυχιακής. Αυτά χωρίζονται στις εξής ενότητες :

- Συμπληρωματικά στοιχεία κειμένου
- Παράρτημα Comsol
- Παράρτημα Πειραματικής Διαδικασίας

I. ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

A. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ (*m*)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης του αέρα (*m*) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσεγγιστική σχέση :

$$m = 5.5 \left(\frac{50}{h} \right) \left(\frac{f}{1000} \right)^{1.7} \times 10^{-4}$$

Ο παραπάνω τύπος έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τιμές υγρασίας (*h*) από 20 % έως 70% και συχνότητες από 1.5 KHz έως 10 KHz.

Για περισσότερη ακρίβεια χρησιμοποιούμε τον **πίνακα 7.1**.

Σχετική Υγρασία	Θερμοκρασία (C)	Συχνότητα(Hz)			
		2000	4000	6300	8000
30%	15	0,0143	0,0486	0,1056	0,1360
	20	0,0119	0,0379	0,0840	0,1360
	25	0,0114	0,0313	0,6850	0,1360
	30	0,0281	0,0281	0,0564	0,1360
50%	15	0,0099	0,0286	0,0626	0,0860
	20	0,0096	0,0244	0,0503	0,0860
	25	0,0095	0,0235	0,0444	0,0860
	30	0,0092	0,0233	0,0426	0,0860
70%	15	0,0088	0,0233	0,0454	0,0600
	20	0,0085	0,0213	0,0399	0,0600
	25	0,0084	0,0211	0,0388	0,0600
	30	0,0082	0,0207	0,0383	0,0600

Πίνακας 7.1 Συντελεστής εξασθένησης του αέρα είναι στα 4m, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας συναρτήσει συχνότητας. [14]

B. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (RT)

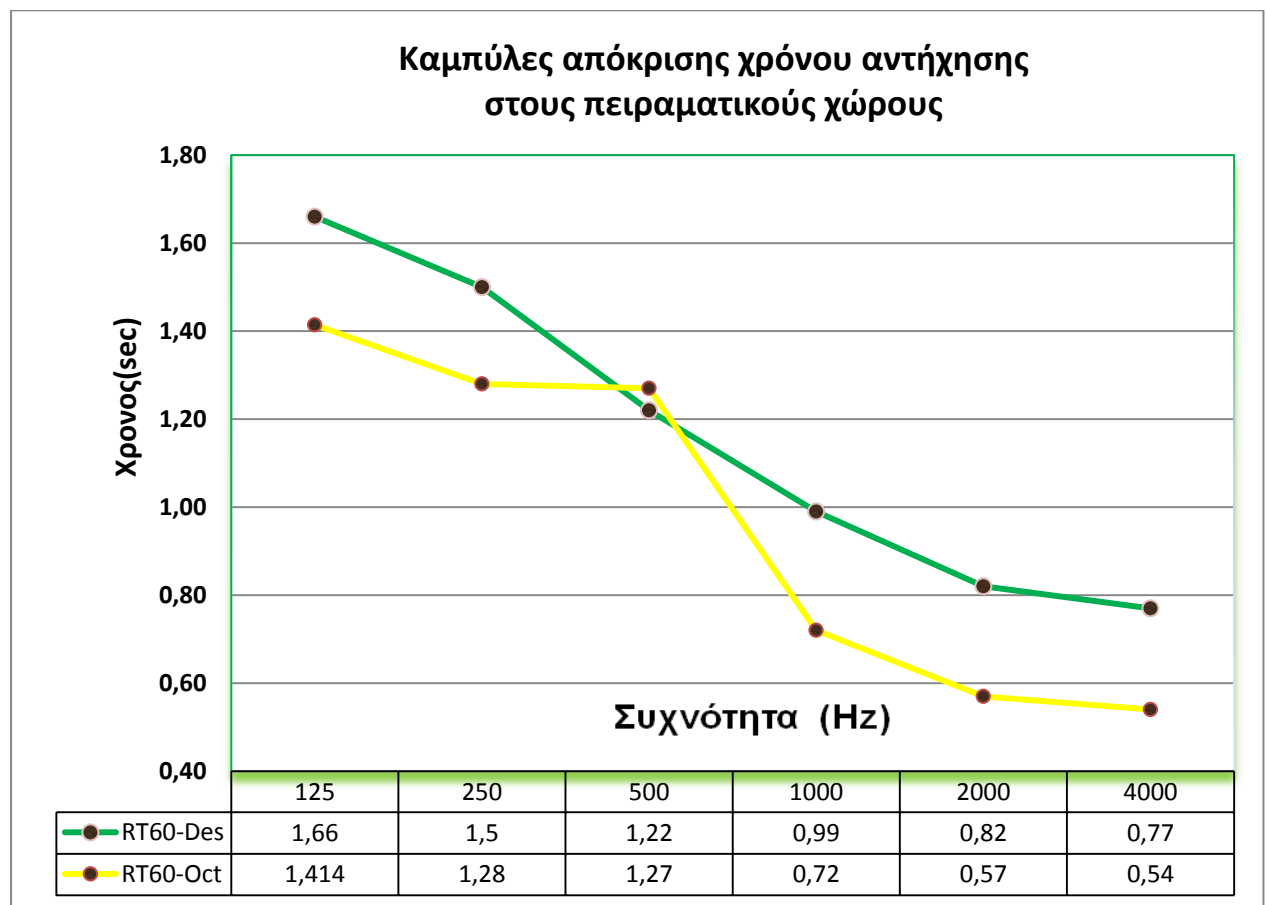
Για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης εφαρμόζουμε τον τύπο του Sabine που χρησιμοποιείται σε χώρους με μεγάλη απορρόφηση:

$$RT60 = \frac{0.161 V}{A + 4 mV} \quad (7.1)$$

Όπου A η μέση απορρόφηση δωματίου
 V ο όγκος της αίθουσας
 m ο συντελεστής εξασθένησης του αέρα

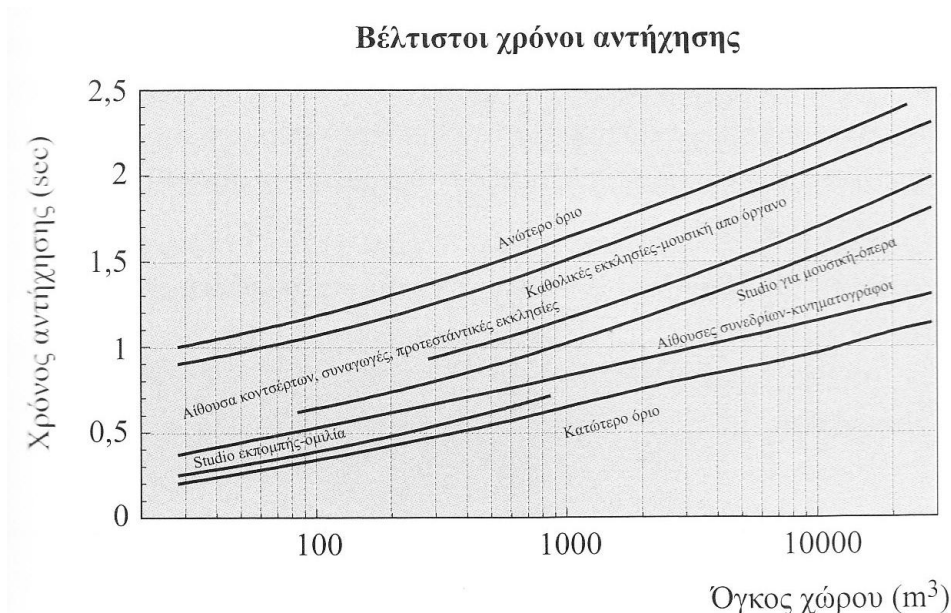
Υπολογίσαμε θεωρητικά τους χρόνους αντήχησης στους πειραματικούς χώρους :
 (οι συντελεστές απορρόφησης είναι από το 5^ο κεφαλαίο)

Χρόνος Αντήχησης, RT60 (s)					
ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ					
125	250	500	1000	2000	4000 Hz
1.66	1.5	1.22	0.99	0.82	0,77
Οκτάβα					
1.414	1.28	1.27	0.72	0.57	0.54



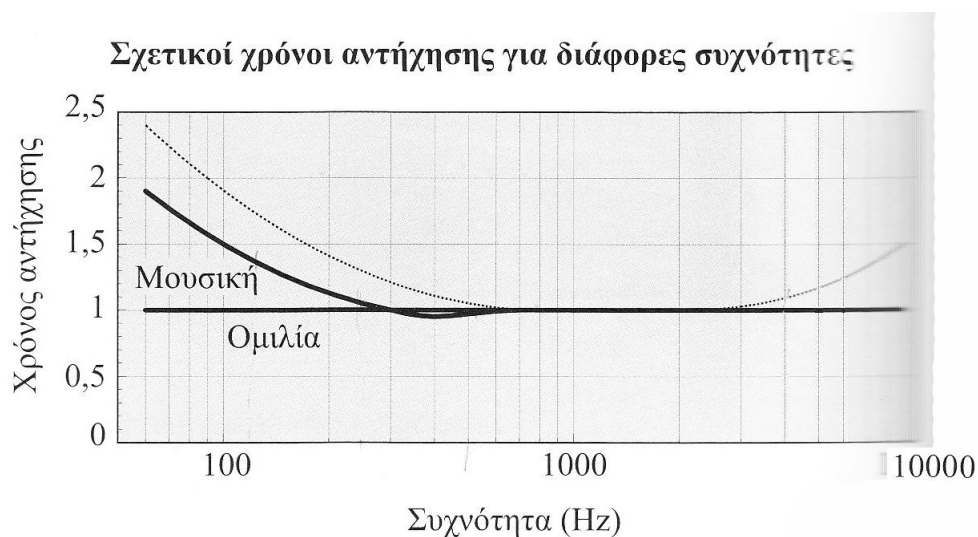
ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (RT)

Παρακάτω παραθέτουμε τους πίνακες που υποδεικνύουν τους βέλτιστους χρόνους αντήχησης για διάφορες χρήσεις κατά *Beranek* :



Πίνακας 7.2 Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για διάφορους δημόσιους χώρους κατά των *Beranek* [14]

Ο υπολογισμός για τον ιδανικό χρόνο αντήχησης στις υπόλοιπες συχνότητες για μουσική και ομιλία σε σχέση με τον πίνακα 7.2 των 500Hz του *Beranek* παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα :³ .



Πίνακας 7.3 Χρόνοι αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με τον χρόνο αντήχησης των 500Hz κατά των *Beranek* [14]

³ Η εστιασμένη γραμμή δίνει τους ιδανικούς χρόνους κατά *MacNair*

II. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ COMSOL

Γενικότερα Στοιχεία Προγράμματος Comsol

• **Αναφορά πίεσης**-Το επίπεδο μηδέν της κλίμακας dB ποικίλει ανάλογα με το είδος του υγρού. Η προκαθορισμένη τιμή (η οποία είναι η τυπική τιμή για τον αέρα) είναι 0,02 mPa (20.10⁻⁶ Pa), η οποία, στη συνέχεια, να αντιστοιχεί σε 0 dB. Η μεταβλητή αυτή εμφανίζεται μόνο σε υπολογισμούς της στάθμης ηχητικής πίεσης με βάση την μέση τετραγωνική ρίζα ενεργής πίεσης (*rms*).

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{2} p \cos j(p)}$$

Καθορισμός Μεταβλητών στο Πρόγραμμα

Οι μεταβλητές στον παρακάτω πίνακα είναι διαθέσιμα για χρήση σε εκφράσεις και σκοπούς μετα-επεξεργασίας. Σχεδόν όλες οι παράμετροι εφαρμογής (*mode*) είναι διαθέσιμες ως μεταβλητές.

Μερικές μεταβλητές είναι διαθέσιμες μόνο σε ορισμένα είδη ανάλυσης (όπως ορίζεται στη στήλη της ανάλυσης, όταν ένα X σημαίνει ότι η μεταβλητή είναι διαθέσιμη μόνο για την λειτουργία χρόνου - αρμονικής ανάλυσης). Ο πίνακας χρησιμοποιεί μια σύμβαση με δείκτη κατά την οποία ο δείκτης (i) υποδηλώνει κάποια από τις γενικές μεταβλητές (*global*) στο χώρο (x, y, z), ενώ ένα άθροισμα πάνω από (i) τρέχει πάνω από τις τρεις διαστάσεις του χώρου.

TABLE 3-1: ACOUSTICS APPLICATION MODE VARIABLES

NAME	SYMBOL NAME	ANALYSIS	DOMAIN	DESCRIPTION	EXPRESSION
P	p	Both	All	pressure	p
Lp	L_p	Both	S	sound pressure level	$10 \log \left(\frac{\bar{p}^2}{p_0^2} \right)$
rho0	ρ_0	Both	S	fluid density	ρ_0
Cs	c_s	Both	S	speed of sound	c_s
K	k	Both	S	wave number	ω / c_s
q_i	q_i	Both	S	dipole source,	q_i

				x_i component	
normq	$ \mathbf{q} $	Both	S	dipole source, norm	$\sqrt{\sum_i q_i^2}$
a_i	a_i	Both	S	local acceleration, x_i component	$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} - q_i \right)$
norma	$ \mathbf{a} $	Both	S	local acceleration, norm	$\sqrt{\sum_i a_i^2}$
Na	a_n	Both	B	outward normal acceleration	$\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right)$
v_i	v_i	H	S	local velocity, x_i component	$a_i / (i\omega)$
normv	$ \mathbf{v} $	Both	S	local velocity, norm	$\sqrt{\sum_i v_i^2}$
Nv	v_n	H	B	outward normal velocity	$a_n / (i\omega)$
I_i	I_i	Both	S	intensity, x_i component	$\text{conj}(v_i) p$
normI	I	Both	S	intensity, norm	$\sqrt{\sum_i I_i^2}$

Μονάδες

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τις μονάδες SI για τις πιο σημαντικές φυσικές ποσότητες στον τρόπο εφαρμογής της Ακουστικής :

QUANTITY	SYMBOL	SI UNIT	ABBREVIATION
Pressure	p	pascal	Pa
Density	ρ	kilogram/meter ³	kg/m ³
Frequency	f	hertz	Hz
Wave number	k	1/meter	1/m
Dipole source	q	newton/meter ³	N/m ³
Monopole source	Q	1/second ²	1/s ²
Speed of sound	c_s	meter/second	m/s
Acoustic impedance	Z	pascal-second/meter	Pa·s/m
Normal acceleration	a_n	meter/second ²	m/s ²
Source location	r_0	meter	m
Wave direction	\mathbf{n}_k	(dimensionless)	1

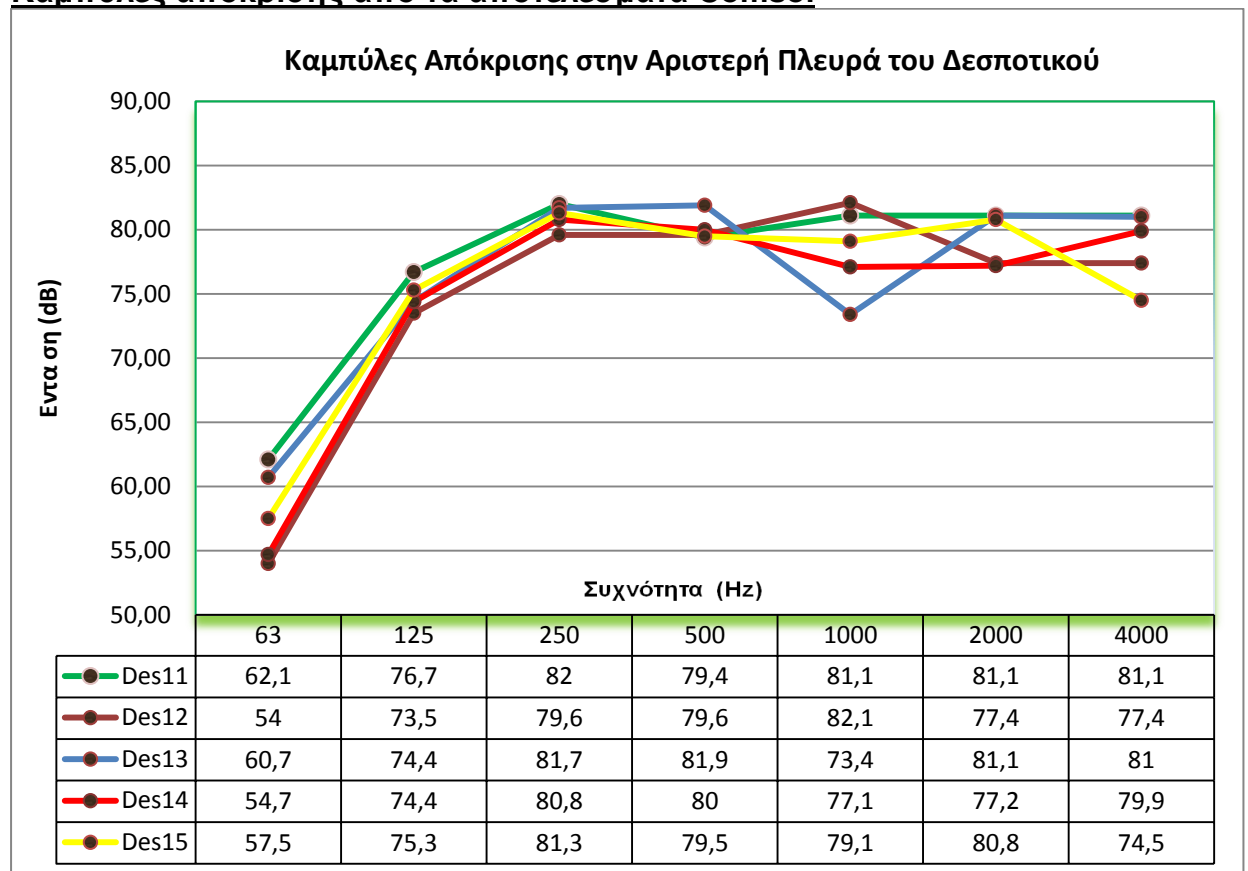
Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Comsol για το χώρο του Δεσποτικού

Θέση Χώρου	Θέση Μνήμης	Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq						
		63	125	250	500	1000	2000	4000
11	232	62,10	76,70	82,00	79,40	81,10	81,10	81,10
12	231	54,00	73,50	79,60	79,60	82,10	77,40	77,40
13	230	60,70	74,40	81,70	81,90	73,40	81,10	81,00
14	229	54,70	74,40	80,80	80,00	77,10	77,20	79,90
15	228	57,50	75,30	81,30	79,50	79,10	80,80	74,50
21	233	73,80	78,90	83,80	83,80	79,60	81,10	79,60
22	234	60,60	80,60	81,50	81,40	75,00	75,00	81,10
23	235	61,60	78,30	80,40	77,5	81,60	82,30	82,90
24	236	60,20	74,20	81,30	80,90	85,90	83,00	83,40
25	237	45,00	75,00	80,20	80,00	77,90	79,20	78,10
31	242	57,50	73,00	82,00	82,70	75,90	75,40	75,30
32	241	61,90	78,30	80,60	80,60	83,20	78,90	88,60
33	240	60,30	79,50	81,30	81,40	81,80	81,90	81,90
34	239	54,30	82,30	82,10	80,00	80,40	77,20	77,20
35	238	42,80	68,90	84,80	84,60	81,70	81,90	81,70

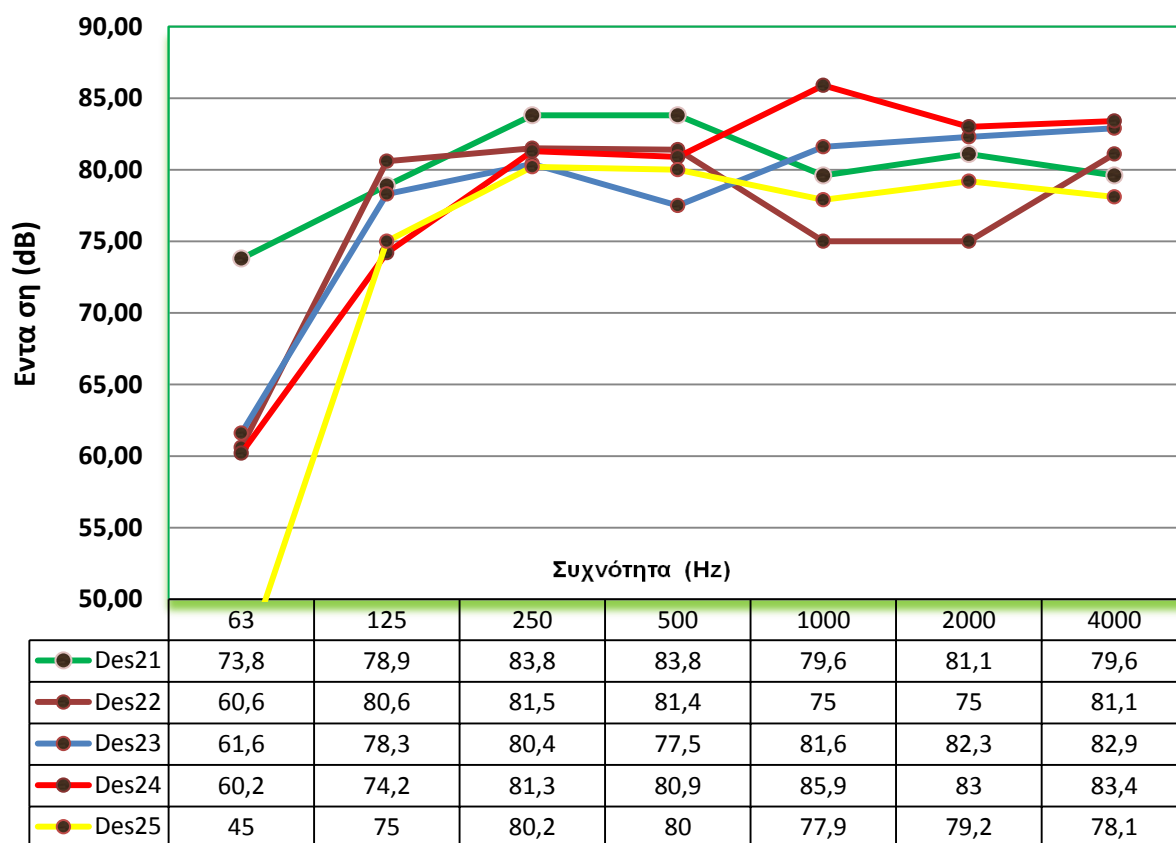
Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Comsol για το χώρο της Οκτάβας

Mic Position	Θέση Μνήμης	Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq							Lp(Z)
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623	
243	ΘΒ2	50,91	47,86	42,57	39,3	32,81	30,0	24,32	56.8
244	O11	61,1	66,7	61,5	81,3	75,0	73,8	-	
245	O12	62,5	58,6	63,7	74,5	78,8	70,0	-	
246	O13	66,0	56,8	61,8	77,4	75,7	43,3	-	
247	O21	69,1	61,4	77,7	84,8	81,2	75,6	-	
248	O22	70,3	53,9	63,7	77,8	74,4	69,3	-	
249	O23	59,8	66,1	58,5	71,5	73,7	41,5	-	
250	O31	61,5	54,1	63,7	73,3	82,8	45,5	-	
251	O32	76,4	58,9	66,5	71,6	83,7	61,7	-	
252	O33	73,3	49,5	67,4	78,0	84,4	40,5	-	
253	O41	63,5	70,5	72,2	79,2	78,5	40,0	-	
254	O42	57,3	57,6	75,3	82,0	77,8	74,0	-	
255	O43	64,5	65,5	69,8	73,8	74,0	68,0	-	

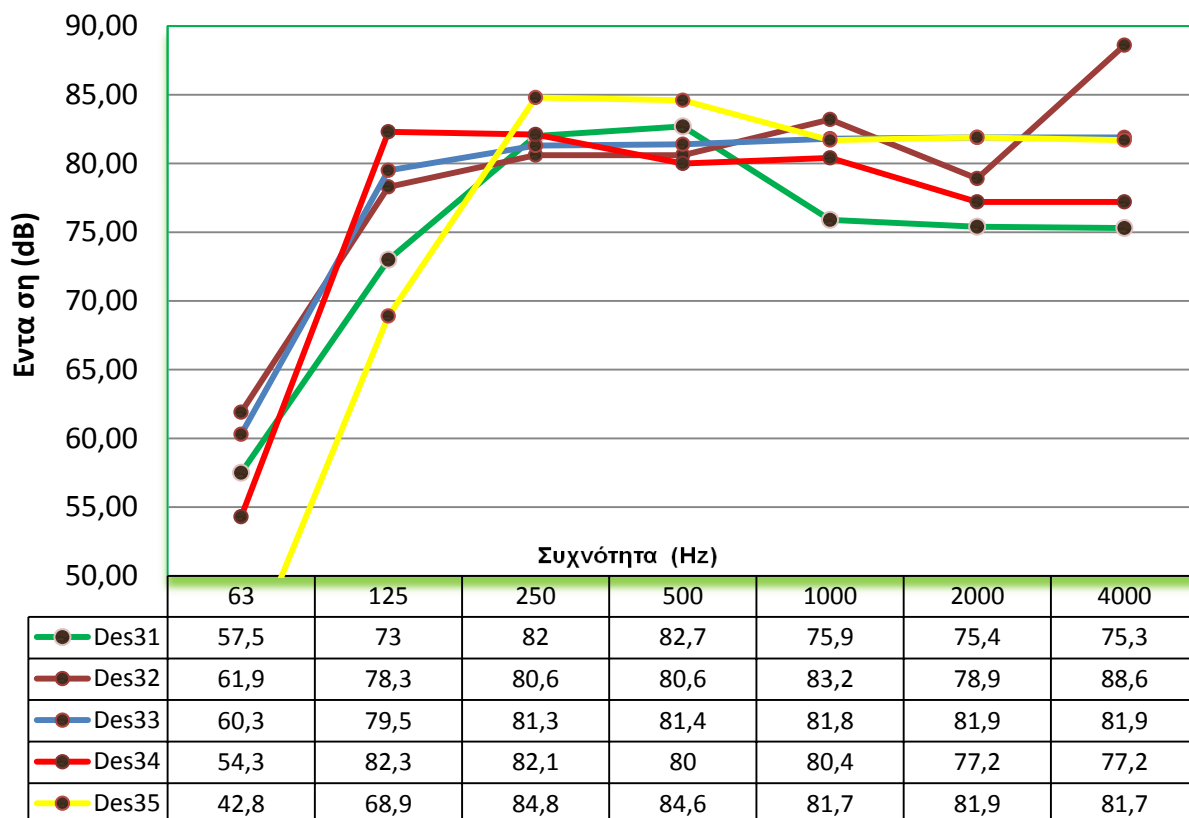
Καμπύλες απόκρισης από τα αποτελέσματα Comsol



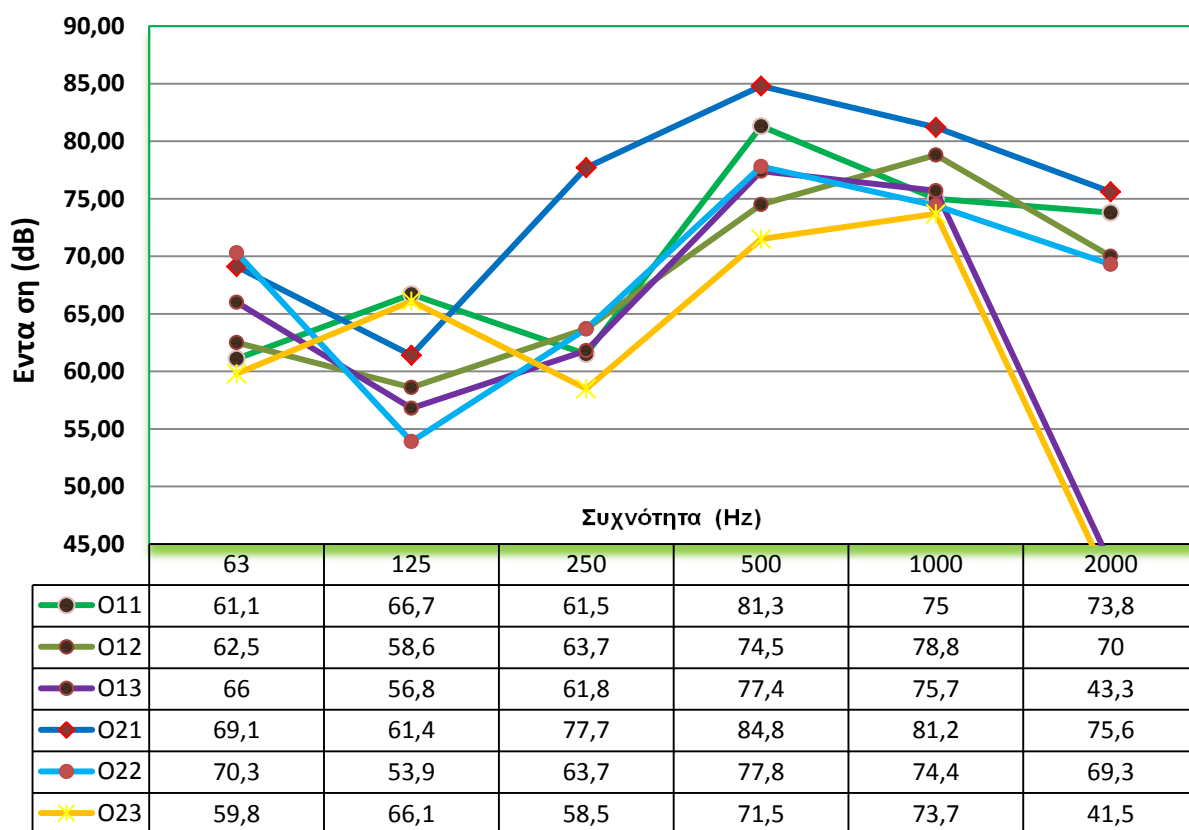
Καμπύλες Απόκρισης στην Κεντρική Πλευρά του Δεσποτικού

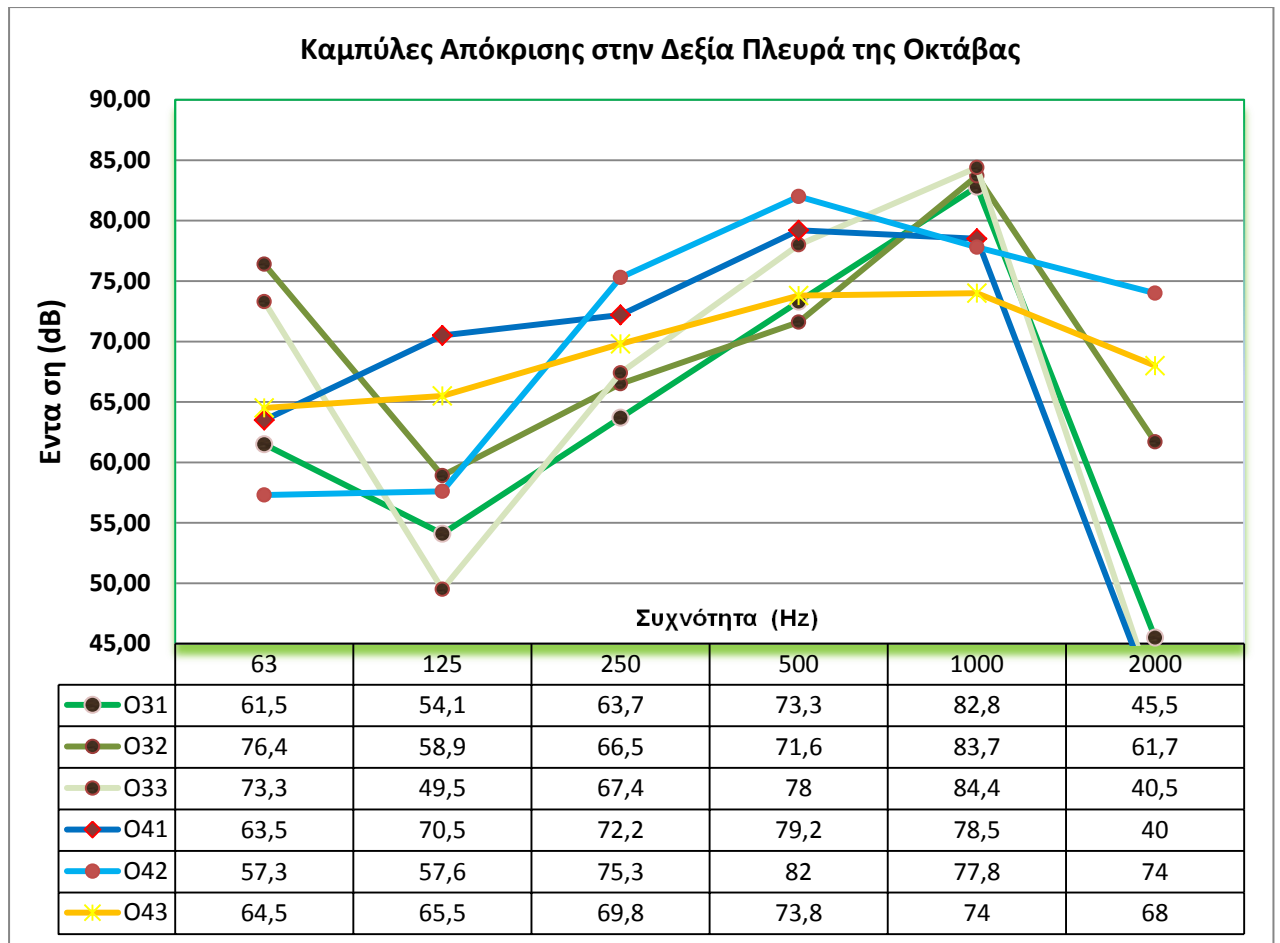


Καμπύλες Απόκρισης στην Δεξιά Πλευρά του Δεσποτικού



Καμπύλες Απόκρισης στην Αριστερή Πλευρά της Οκτάβας





III. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Παρακάτω θα παραθέσουμε α. το θεωρητικό πλαίσιο και τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας των κρουστικών αποκρίσεων στους δυο χώρου, β. της καμπύλες απόκρισης της στάθμης ηχητικής.

Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στις Μετρήσεις

Ηχόμετρο	Cesva SC310 (type 1)
Βαθμονομητή Θορύβου	Cirrus CR511E
Η/Υ με λογισμικό	WinMLSSA Version 10WI
Ενισχυτής	Behringer A500
Δωδεκάεδρο Ηχείο	01 dB Stell D012

Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των συσκευών ανατρέξτε στα εγχειρίδια ή στις αντίστοιχες ιστοσελίδες των συσκευών.

A. ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ MAXMLS (μέθοδο Ακολουθίας Μεγίστου Μήκους).

Η Κρουστική Απόκριση (Impulse Response) του χώρου, είναι η απόκριση του χώρου με διέγερση της κρουστικής συνάρτησης (Δέλτα του Sirac). Αν και δεν αποτελεί κριτήριο για την αξιολόγηση της ακουστικής ποιότητας του χώρου, περιέχει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της. Αποτελεί την βασικότερη παράμετρο μέτρησης διότι :

1. Όταν είναι γνωστή η κρουστική απόκριση του χώρου, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την απόκριση του χώρου σε οποιαδήποτε διέγερση η οποία υπολογίζεται μέσω της συνέλιξης της (Convolution) με την κρουστική απόκριση.

$$h(t) = g(t) * x(t)$$

όπου $g(t)$ Κρουστική Απόκριση
 $h(t)$ Εφαρμοζόμενη Διέγερση
(*) Σύμβολο Συνέλιξης

2. Από την κρουστική απόκριση υπολογίζονται όλοι οι δείκτες που μετρούν την ακουστική ποιότητα του χώρου.

Για την βελτίωση και ορθή κρουστική απόκριση απαιτούνται :

1. Μεγάλος χρόνος σάρωσης (*capture time*)
2. Μεγάλος αριθμός δειγμάτων
3. Ειδικής μορφής διεγέρσεις

Η Συνάρτηση Δέλτα είναι ένα θεωρητικό σήμα και δεν μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη. Για τον λόγο αυτό ως σήματα διέγερσης χρησιμοποιήθηκαν 2 σήματα :

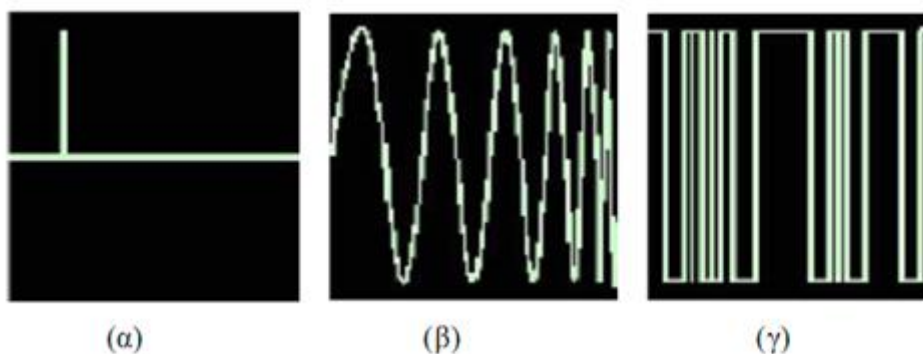
1. Ημιτονοειδές σήμα μεταβλητής συχνότητας (*sweep signal*)

Είναι ένα ημίτονο πολλαπλασιασμένο με μια συνάρτησης βάρους, που αποτελείται από ένα άθροισμα καθυστερημένων παλμών. Η κρουστική απόκριση υπολογίζετε από την αποσυνέλιξη (*de-convolution*) σήματος με την απόκριση. Το σήμα αυτό χρησιμοποιείτε σε χώρους με χαμηλό θόρυβο βάθους (*Background Noise*).

2. Ακολουθία MLS

Όταν ο χώρος έχει μεγάλο θόρυβο βάθους η χρήση ακολουθίας MLS (*Maximum Length Sequence*) ως σήμα διέγερσης, βελτιώνει σημαντικά την κρουστική απόκριση. Η Ακολουθία είναι ένα ψευδοτυχαίο σήμα που αποτελείτε από μια σειρά από συνάρτησης δέλτα με τιμές 1 ή -1, η οποία είναι στάσιμη και έχει περίοδο.

$$l = 2^{n-1} \quad \text{όπου } n \text{ θετικός αριθμός}$$



Σχήμα 4.3.3 Τρόπος δημιουργίας ακολουθίας σήματος κρουστικής απόκρισης [22]

Η κρουστική απόκριση του δωματίου θα ισούται με την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation). Ο υπολογισμός της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης γίνεται με ένα γρήγορο μετασχηματισμό (*Hadamart Transform*) που απαιτεί $I \cdot \log(2)$ υπολογισμούς. Εφόσον ο θόρυβος περιβάλλοντος είναι ασυσχέτιστος από την μια μέτρηση στην άλλη, ο λόγος S / N θα αυξάνει κατά 3dB για κάθε διπλασιασμό του αριθμού μετρήσεων της κρουστικής απόκρισης. Το κέρδος σε σχέση με ένα παλμό θα δίνετε από την σχέση :

$$G = 3 \log (2) \cdot I = 10 \log (I)$$

Η κρουστική απόκριση υπολογίζετε και σε αυτή την περίπτωση, από την αποσυνέλιξη του σήματος με την απόκριση .

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Μεγάλος λόγος σήματος ως προς το θόρυβο S/N (Ο λόγος αυξάνει 3 dB για κάθε διπλασιασμό του αριθμού αθροίσεων της κρουστικής απόκρισης)
- Λιγότερα Ηχεία
- Μικρότερος Ενισχυτής
- Λιγότερη Ενόχληση

Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μέτρηση της Κρουστικής απόκρισης παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Διαδικασία μέτρησης της κρουστικής απόκρισης

Στις 5 Απριλίου 2011 πραγματοποιήθηκε η κρουστική απόκριση με την μέθοδο ακολουθίας Μεγίστου μήκους (MLS) και στους 2 χώρους (Δεσποτικό, Οκτάβα).

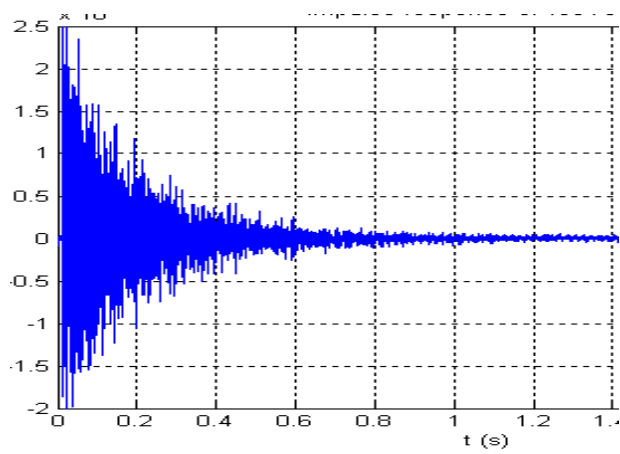
Συνδεσμολογία

Συνδέσαμε το Μικρόφωνο στην είσοδο της κάρτας ήχου και την έξοδο της κάρτας με το πρώτο κανάλι της κονσόλας. Η έξοδο της κονσόλας το οδηγούμε στον Ενισχυτή και από εκεί στο Ηχείο – Monitor.

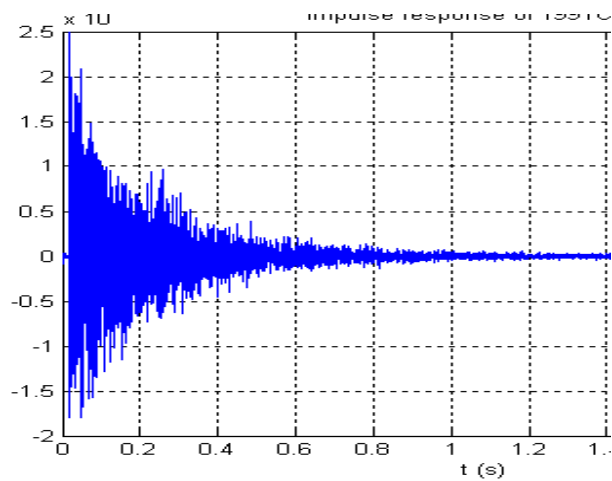
Η διαδικασία προσομοίωσης κρουστικής απόκρισης στο υπολογιστικό πρόγραμμα *Comsol 3.4a*, αποδείχτηκε στην πορεία (όταν έγινε απόπειρα προσομοίωσης στο υπολογιστικό πρόγραμμα *Comsol 3.4a*) ότι ήταν πολύπλοκη και μακρόχρονη διαδικασία που ξεπερνά το όρια πτυχιακής εργασίας

ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΔΕΣΠΟΤΙΚΟΥ

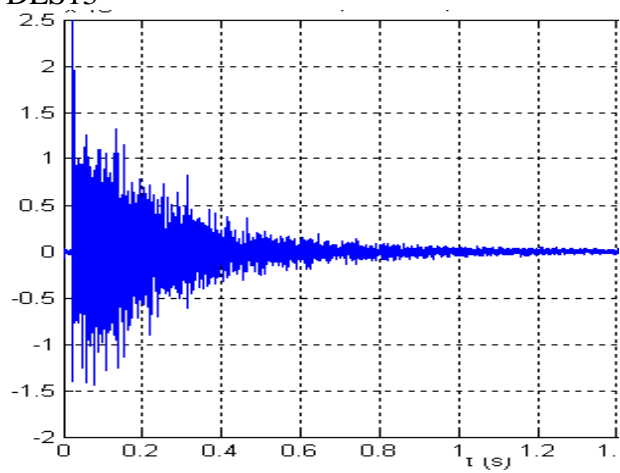
Des11



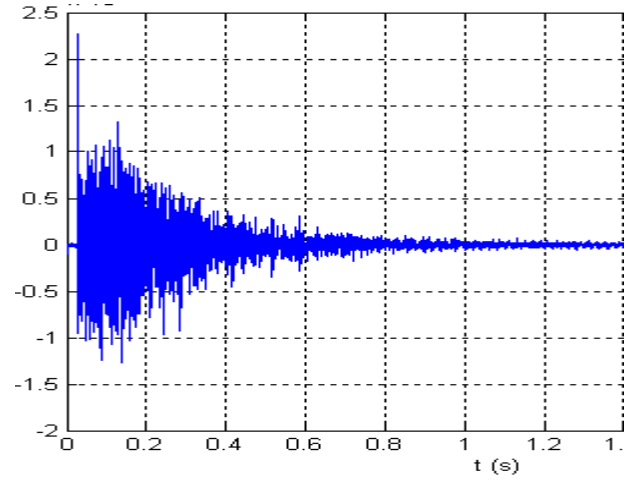
DES12



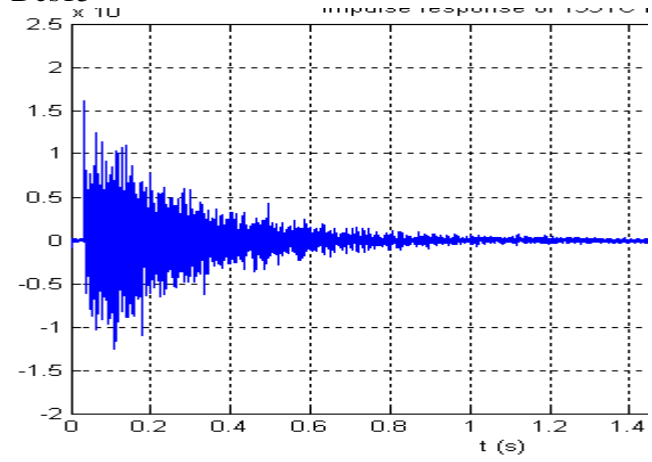
DES13



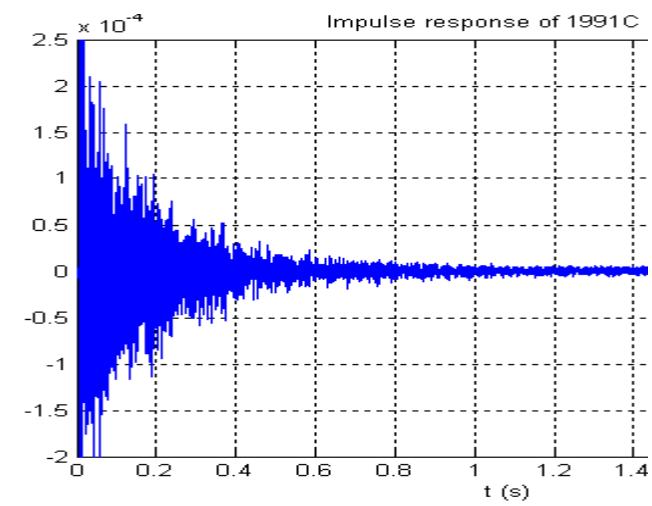
DES14



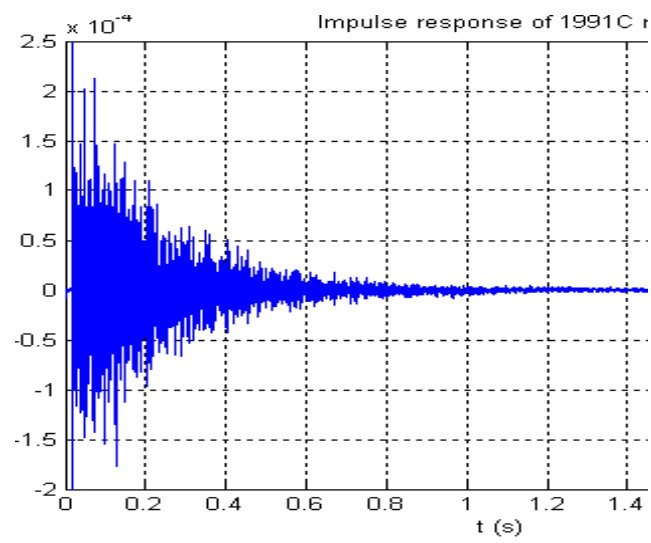
Des15



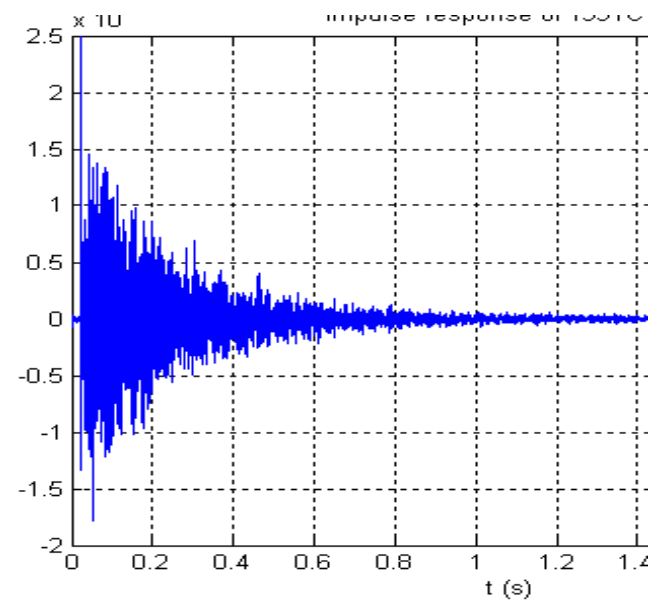
Des21



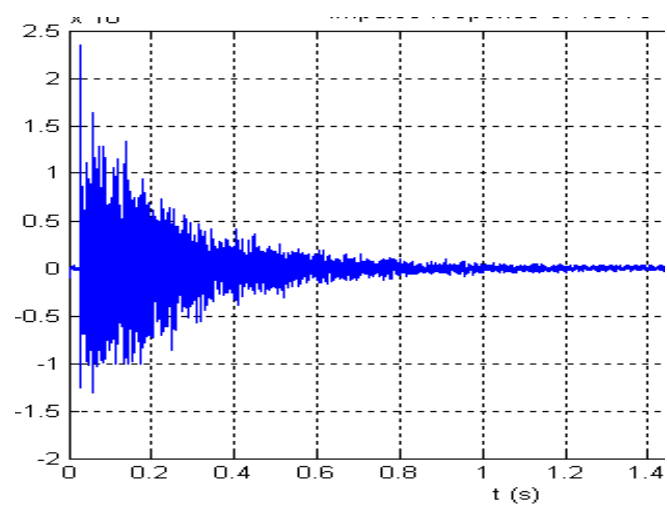
Des22



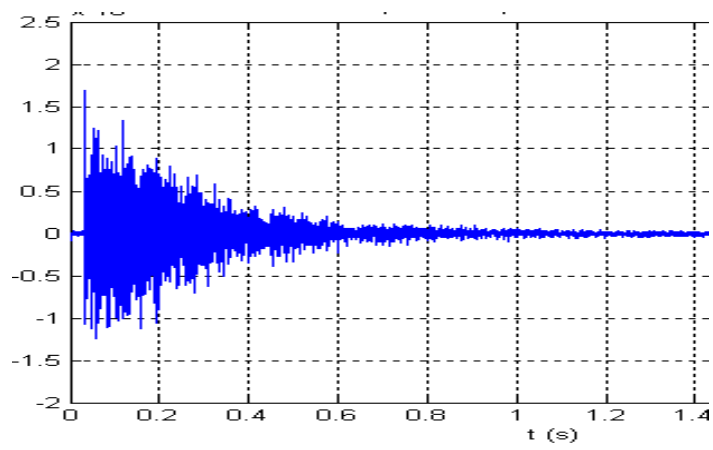
Des23



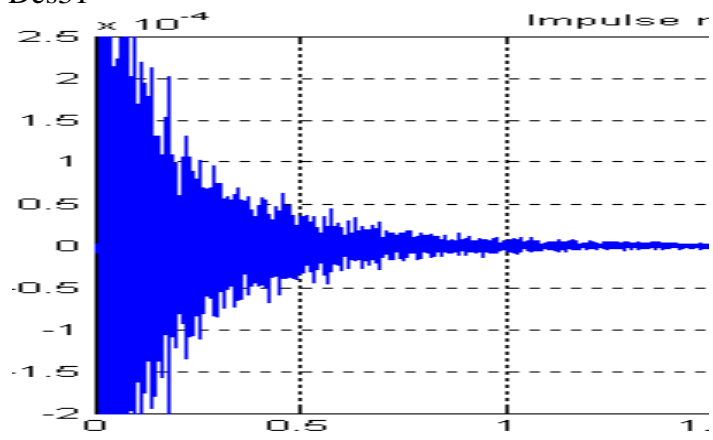
Des24



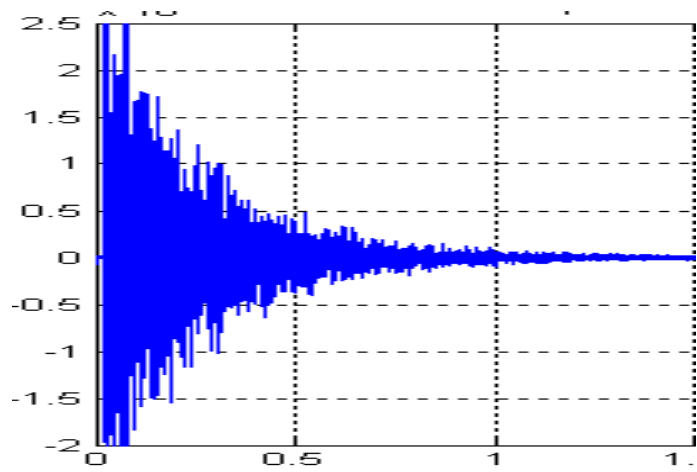
Des25



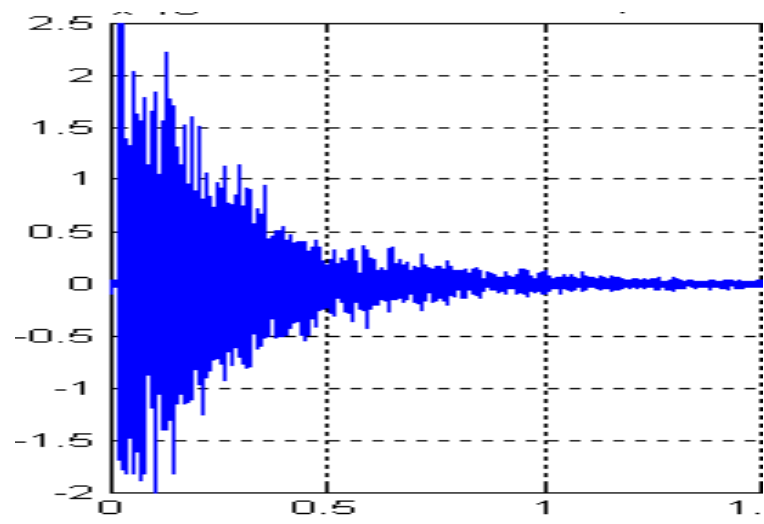
Des31



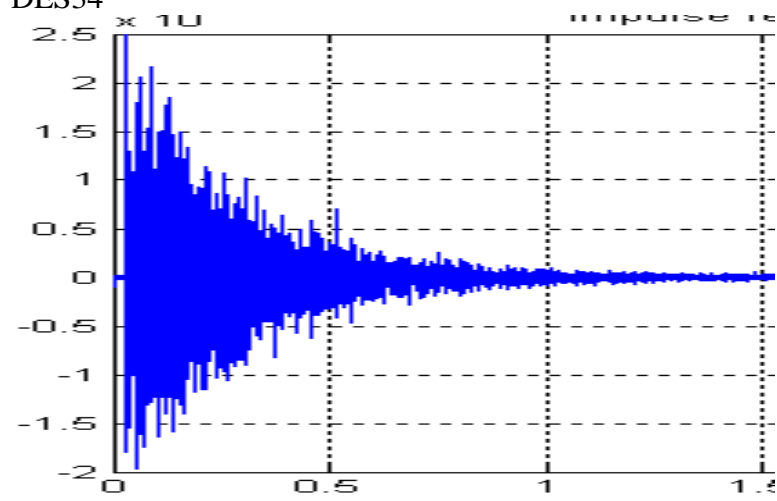
Des32



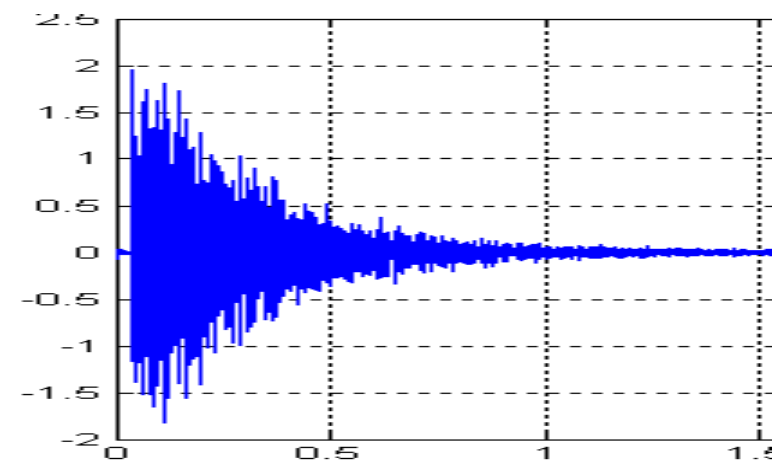
Des33



DES34

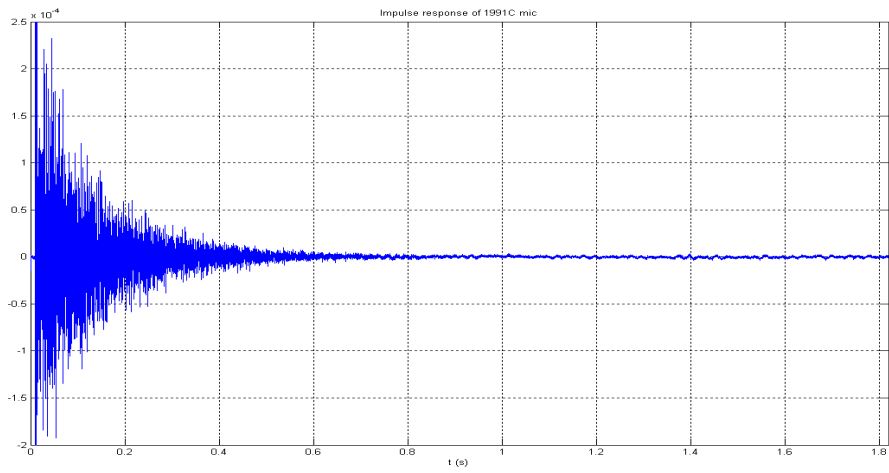


DES35

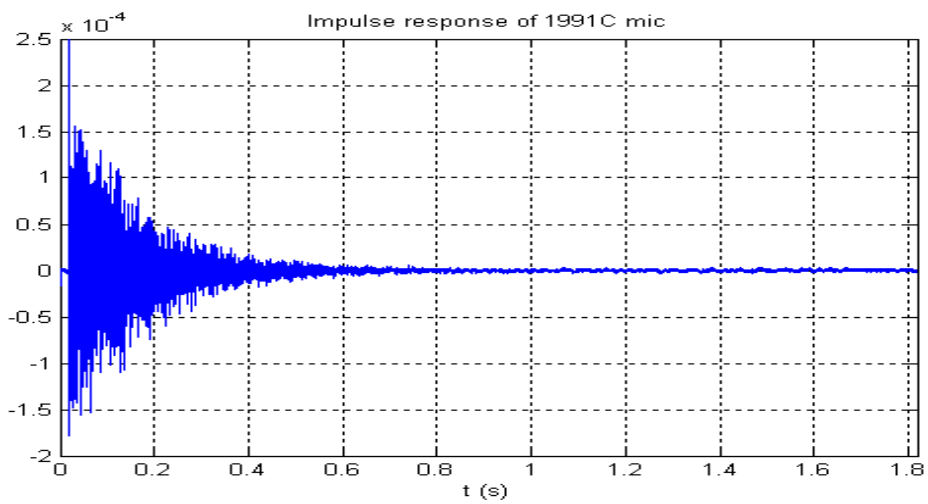


ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΟΚΤΑΒΑΣ

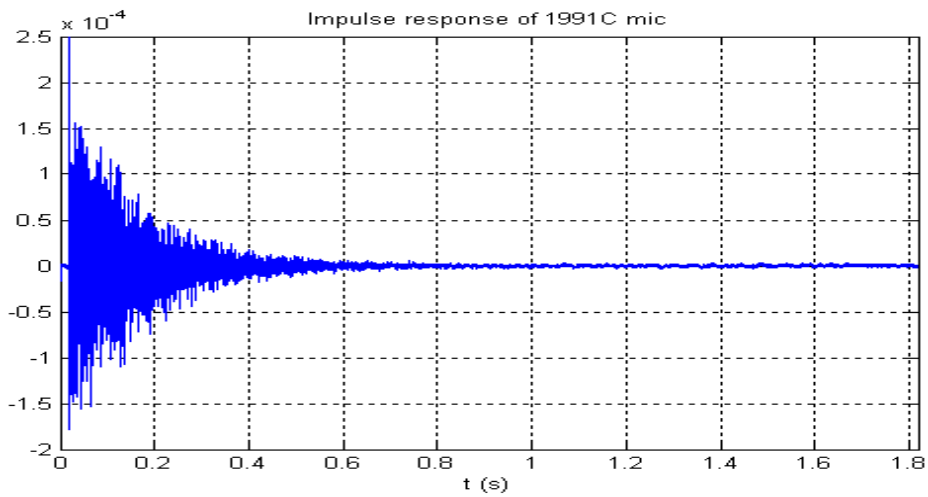
OCT11



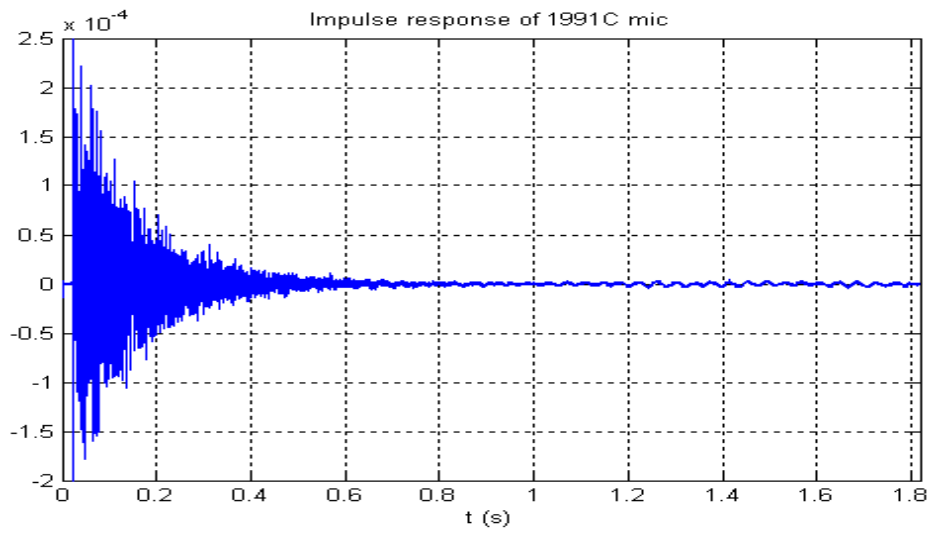
OCT12



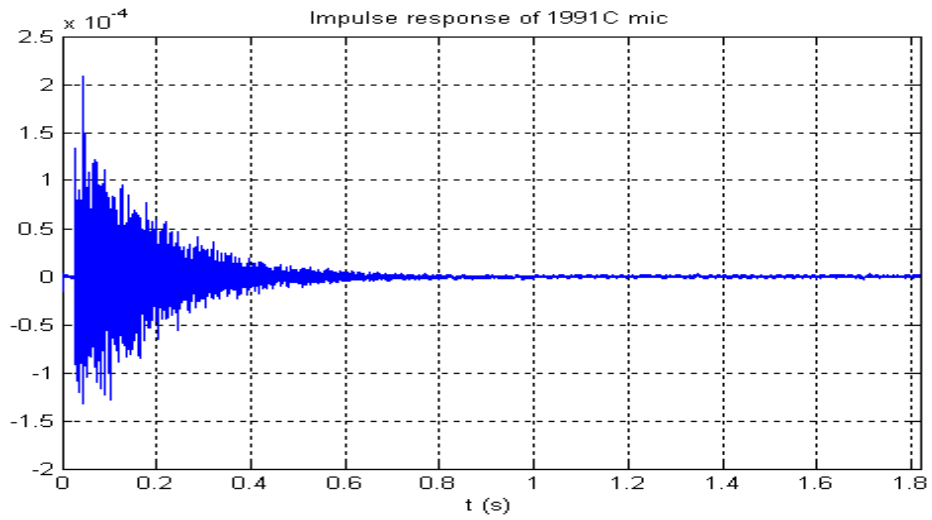
OCT13



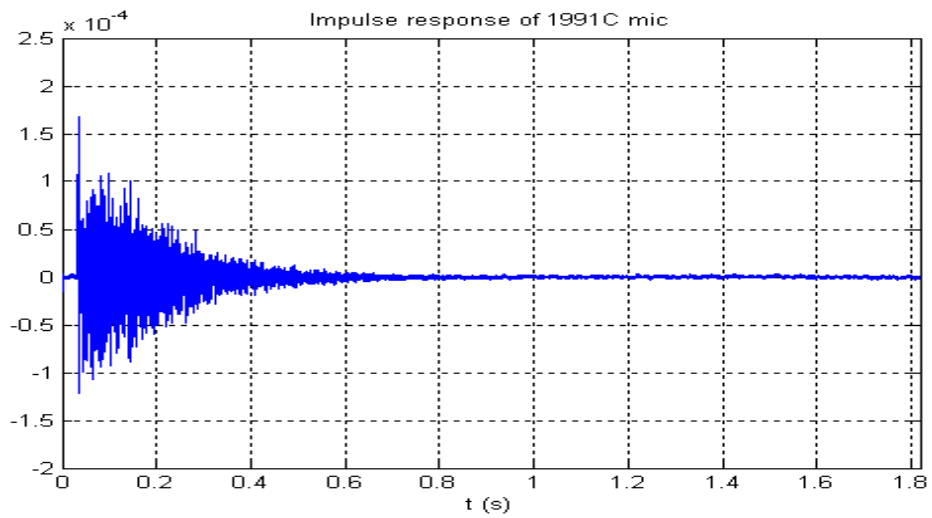
OCT21



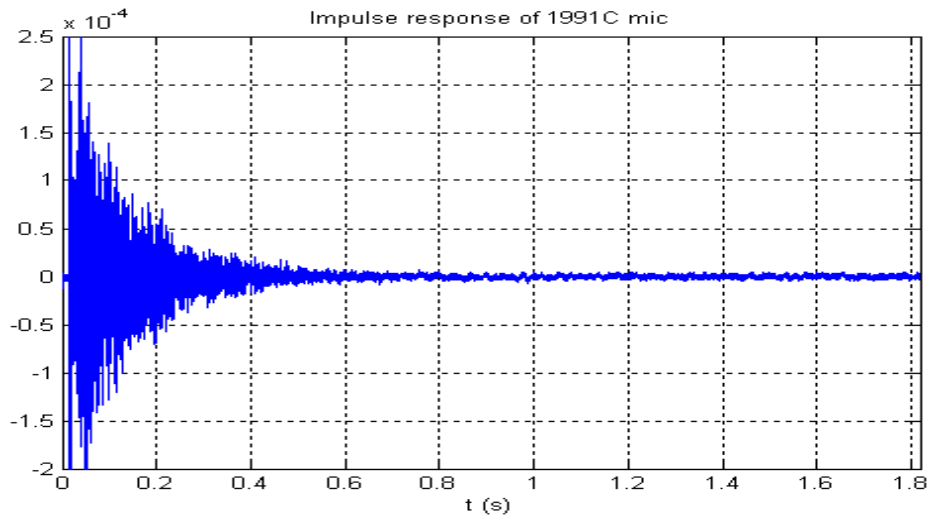
OCT22



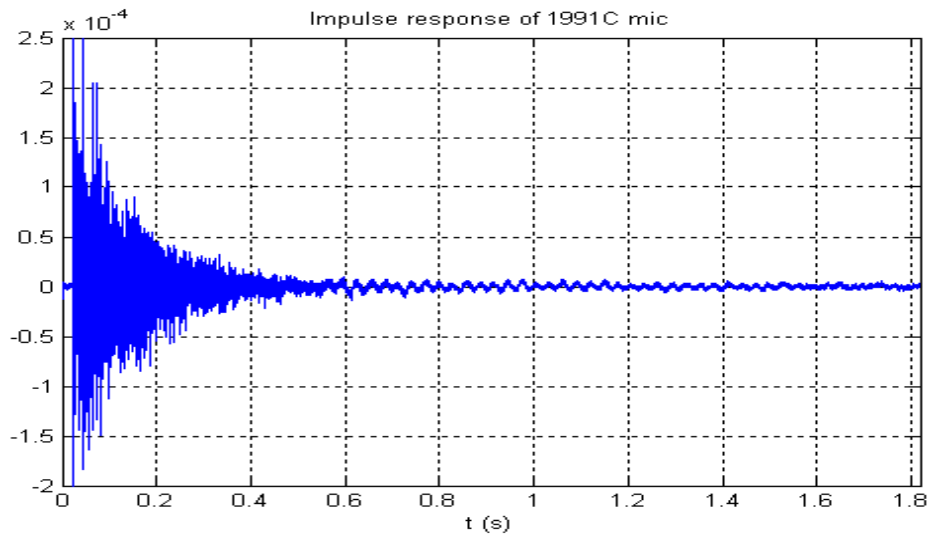
OCT23



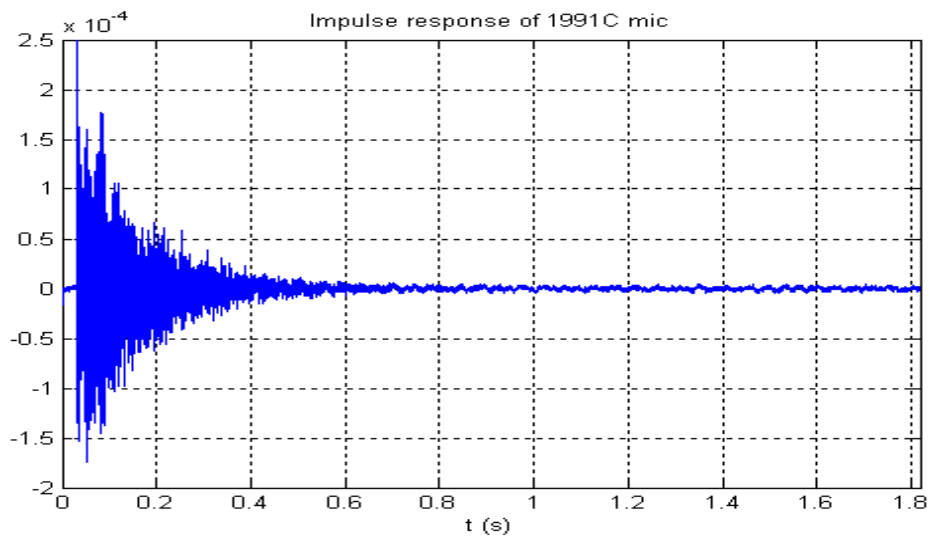
OCT31



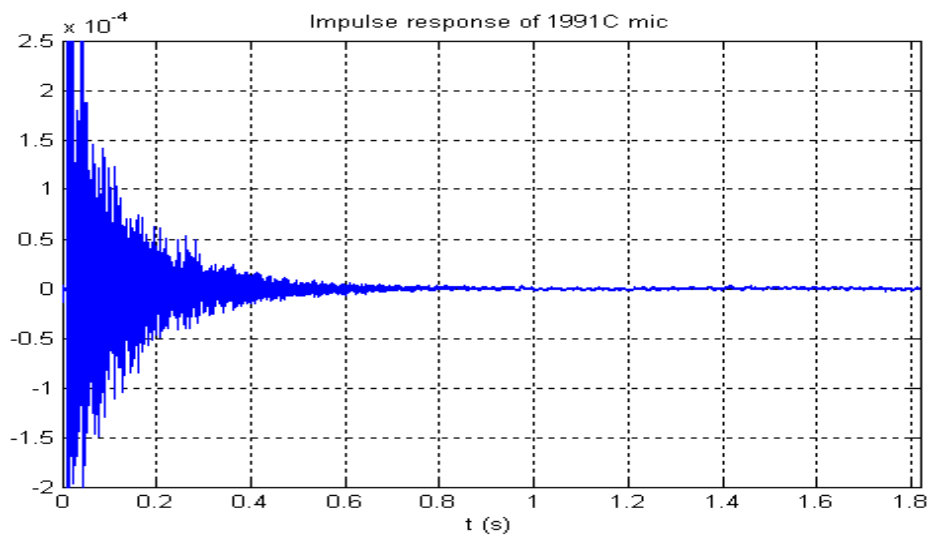
OCT32



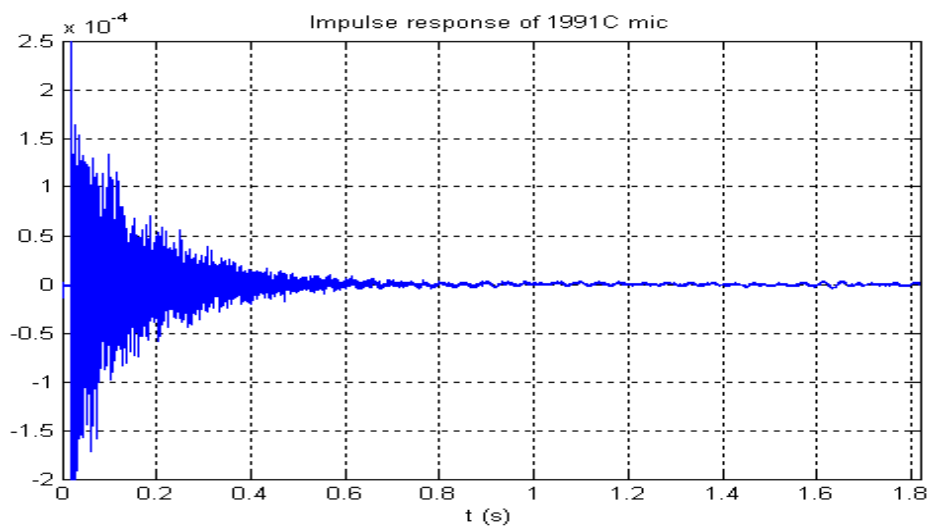
OCT33



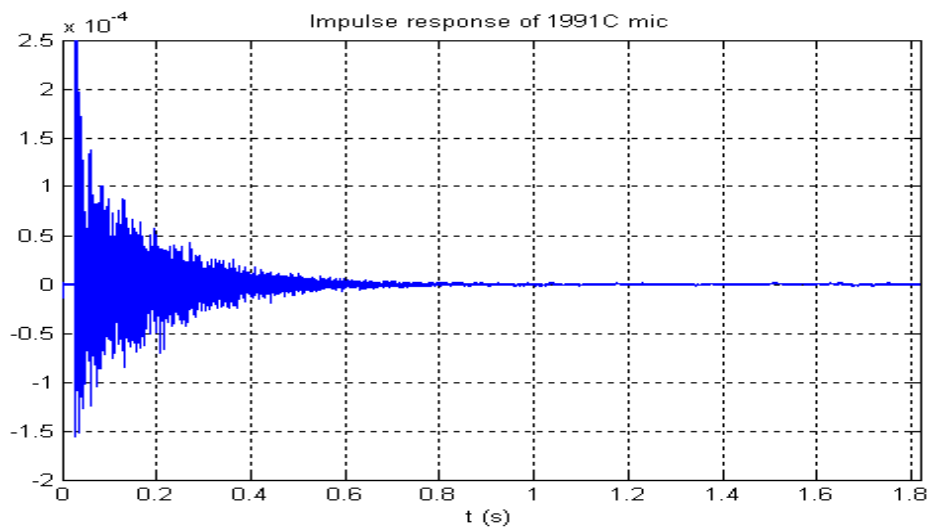
OCT41



OCT42



OCT43



Β. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

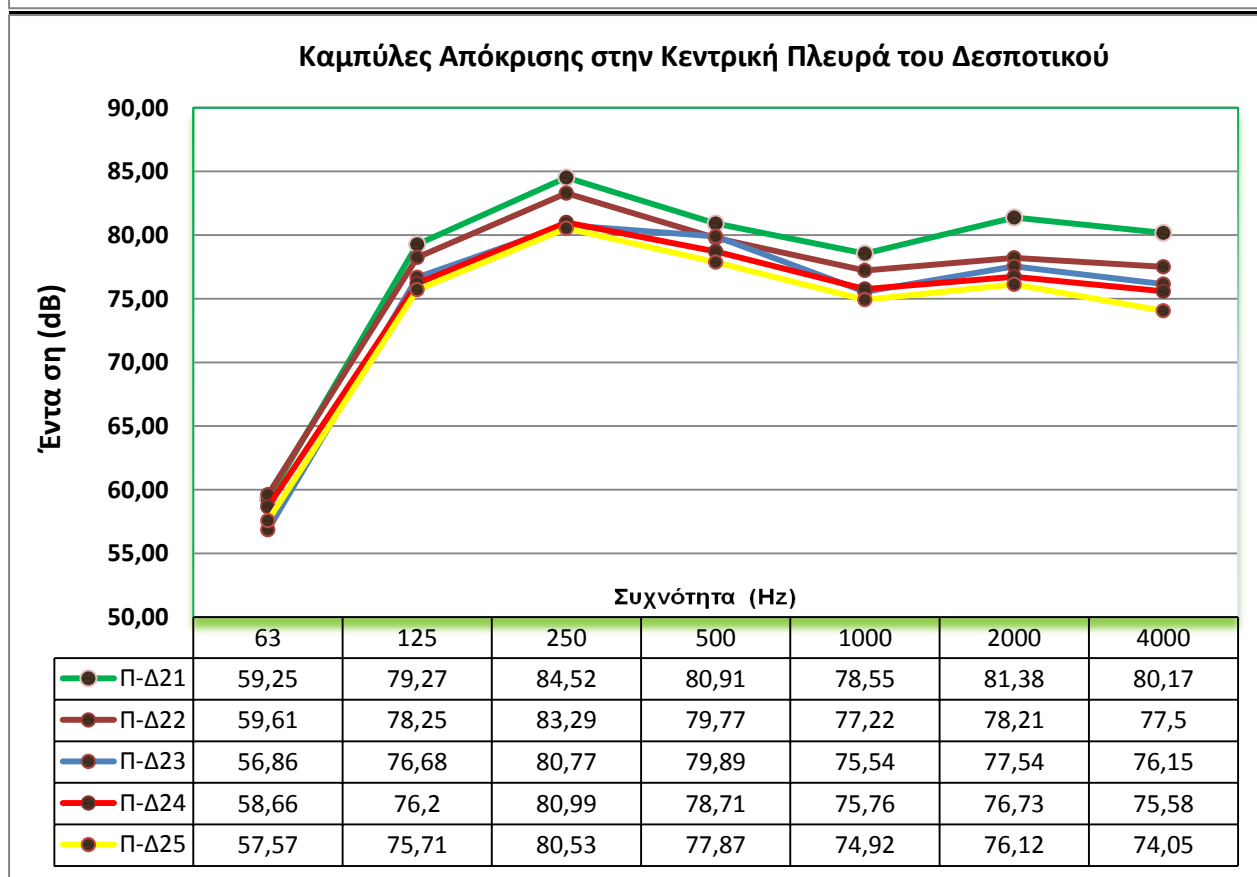
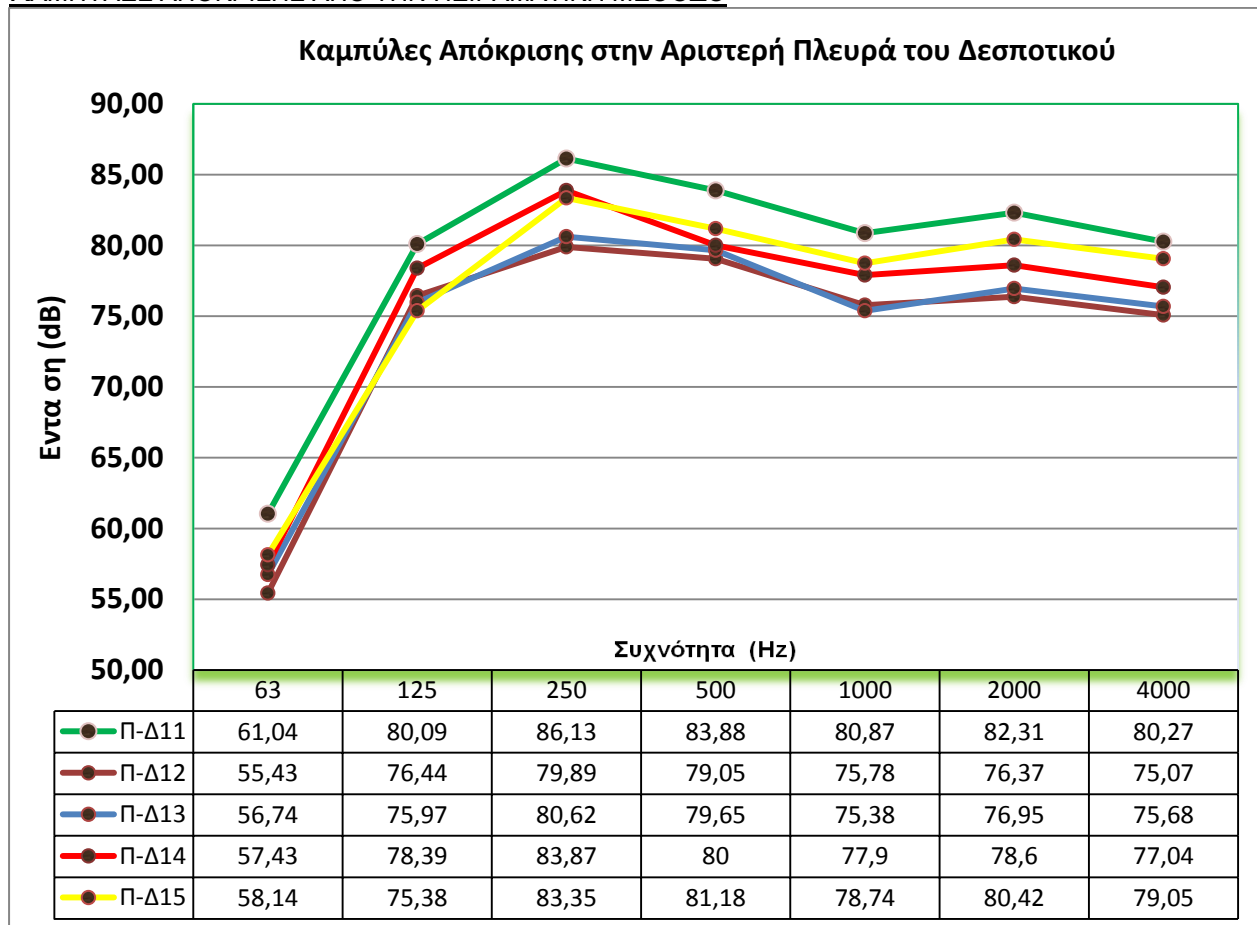
ΔΕΣΠΟΤΙΚΟ με την ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

		Sound Pressure Level (SPL)							Lp(Z)
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623	
ΘΒ	227	42,57	33,55	35,25	31,55	28,61	26,99	19,87	47.8
11	232	61,04	80,09	86,13	83,88	80,87	82,31	80,27	88.2
12	231	55,43	76,44	79,89	79,05	75,78	76,37	75,07	87.7
13	230	56,74	75,97	80,62	79,65	75,38	76,95	75,68	85.6
14	229	57,43	78,39	83,87	80,00	77,90	78,60	77,04	85.2
15	228	58,14	75,38	83,35	81,18	78,74	80,42	79,05	85.1
21	233	59,25	79,27	84,52	80,91	78,55	81,38	80,17	89.1
22	234	59,61	78,25	83,29	79,77	77,22	78,21	77,50	87.3
23	235	56,86	76,68	80,77	79,89	75,54	77,54	76,15	86.0
24	236	58,66	76,20	80,99	78,71	75,76	76,73	75,58	85.6
25	237	57,57	75,71	80,53	77,87	74,92	76,12	74,05	84.9
31	242	54,59	76,39	82,35	80,04	77,35	77,88	75,48	90.6
32	241	59,28	76,78	82,26	80,99	78,32	79,12	76,37	89.1
33	240	57,99	77,97	82,66	81,49	78,77	80,27	77,55	88.0
34	239	59,38	77,22	84,38	83,06	79,28	81,31	78,72	87.2
35	238	61,04	80,09	86,13	83,88	80,87	82,31	80,27	86.6

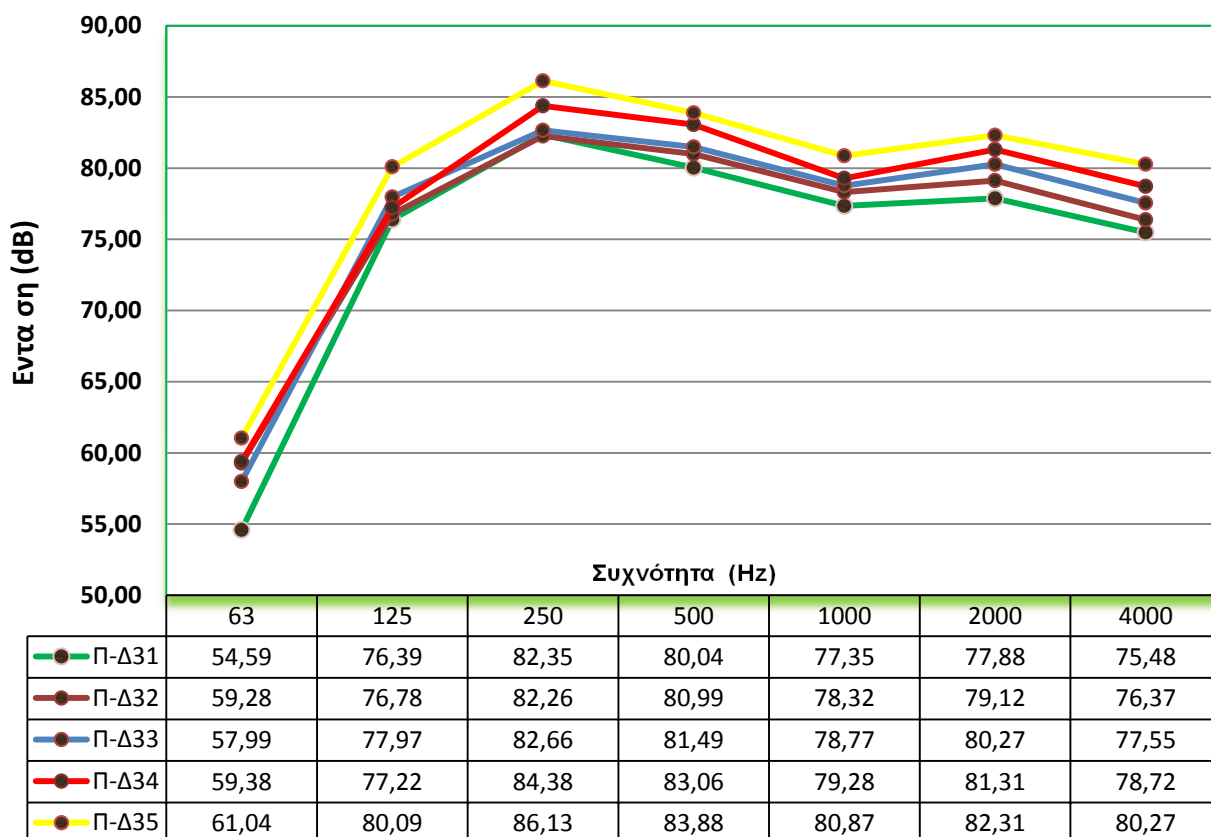
ΟΚΤΑΒΑ με την ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Mic Θέση Position Μνήμης		Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq							Lp(Z)
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
		44.7-89.1	89.1-178	178-355	355-708	708-1413	1778-2239	2239-5623	
243	ΘΒ2	50,91	47,86	42,57	39,3	32,81	30,0	24,32	56.8
244	Ο11	59,03	59,30	61,04	76,88	76,33	76,42	76,39	84.0
245	Ο12	59,44	54,72	55,43	74,26	72,43	73,96	73,08	80.9
246	Ο13	56,57	56,65	56,74	72,84	71,78	72,86	71,69	79.5
247	Ο21	47,18	52,87	57,43	76,42	74,67	77,22	75,99	83.2
248	Ο22	53,80	57,58	58,14	74,21	73,59	74,08	73,08	81.0
249	Ο23	53,64	56,97	59,25	72,12	71,71	72,67	70,97	79.3
250	Ο31	57,62	51,26	59,61	73,58	73,39	74,64	73,22	81.2
251	Ο32	61,55	55,49	56,86	71,86	71,62	72,69	70,83	79.2
252	Ο33	58,00	50,17	58,66	71,26	70,31	71,71	70,11	78.2
253	Ο41	51,58	60,55	57,57	75,21	73,84	75,27	73,81	82.2
254	Ο42	54,58	61,04	54,59	74,53	73,38	75,31	73,12	81.7
255	Ο43	61,77	62,53	59,28	74,26	73,43	74,06	72,15	81.0

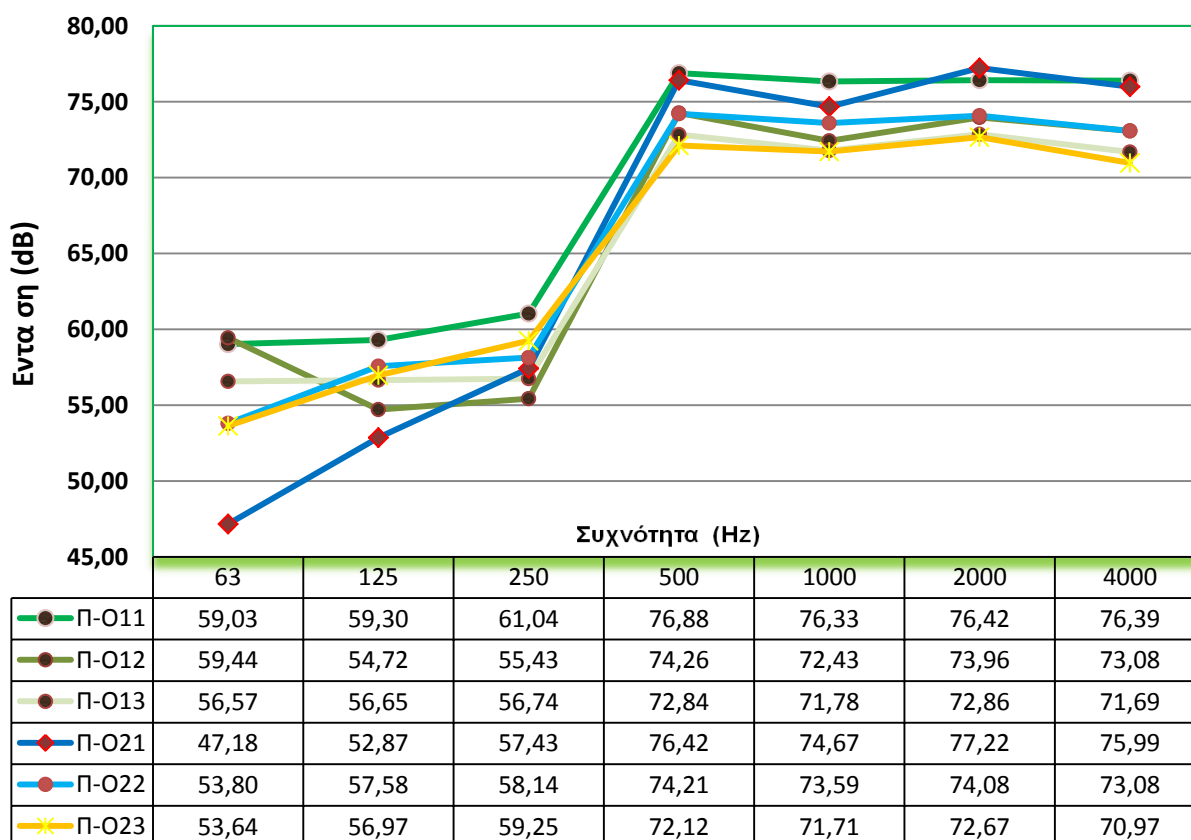
ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ



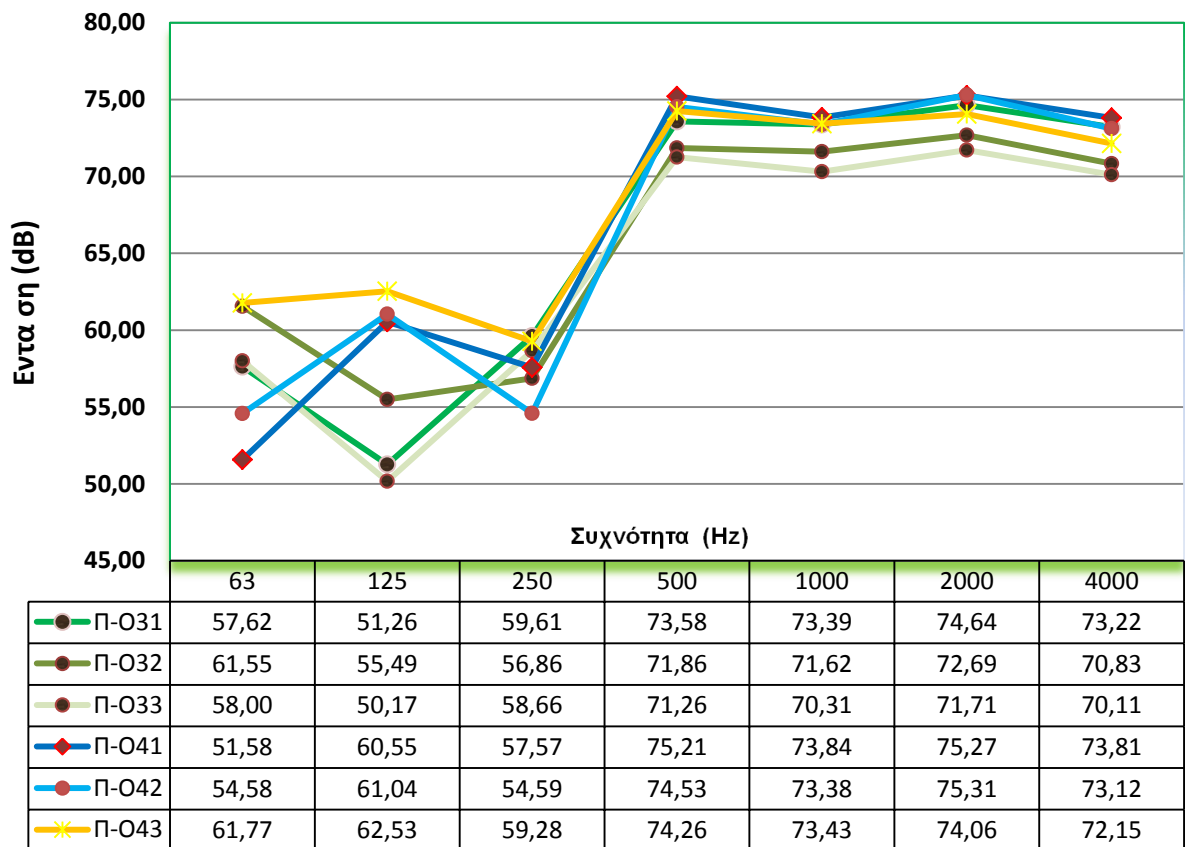
Καμπύλες Απόκρισης στην Δεξιά Πλευρά του Δεσποτικού



Καμπύλες Απόκρισης στην Αριστερή Πλευρά της Οκτάβας



Καμπύλες Απόκρισης στην Δεξιά Πλευρά της Οκτάβας



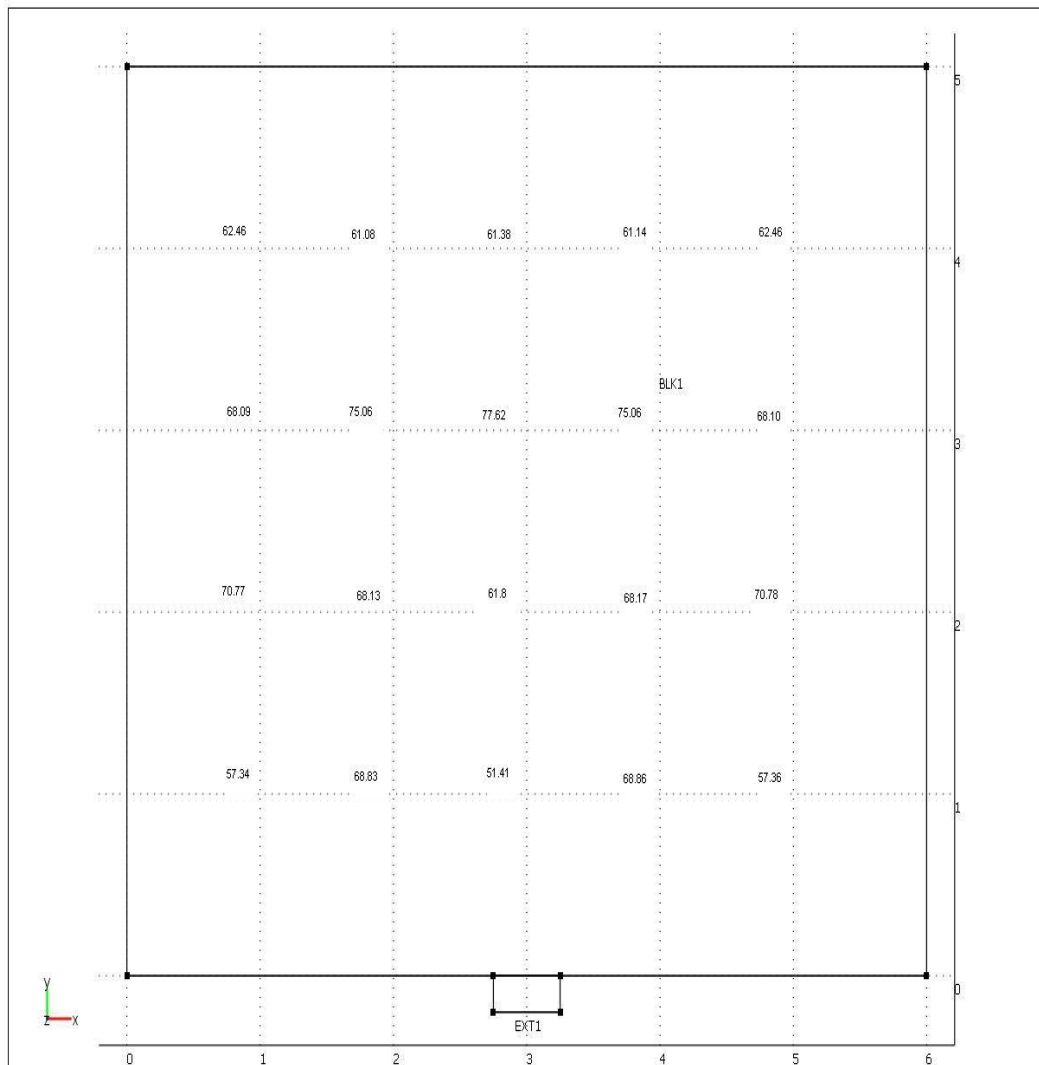
IV. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΔΩΜΑΤΙΟ

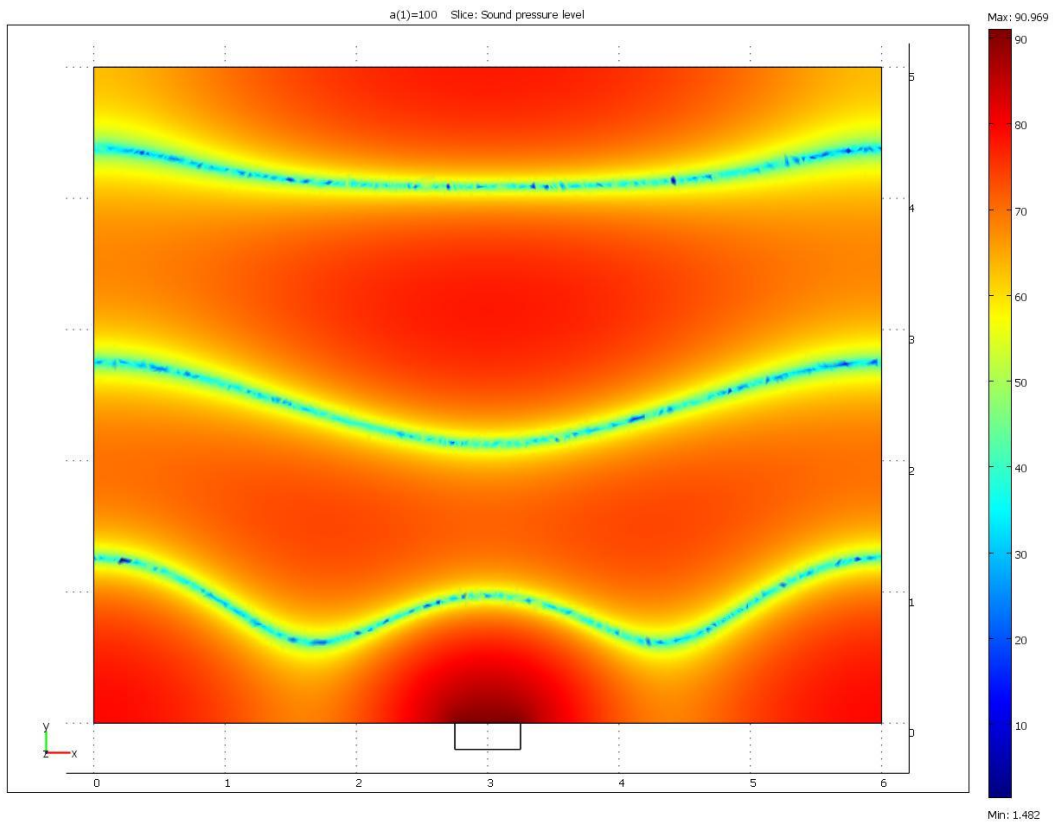
Για να ελέγξουμε την ακρίβεια του προγράμματος Comsol 3.4a σε αποτελέσματα στάθμης ηχητικής πίεσης, πραγματοποιούμε μια εφαρμογή σε ένα δοκιμαστικό δωμάτιο διαστάσεων (6 m*5 m*3 m). Τοποθετούμε μια πηγή επιφάνειας (50 * 50 cm) στο κέντρο του μεγάλου τοίχου που ακτινοβολεί ομοιόμορφα μέσα στο δωμάτιο με ένταση $L_p = 1 \text{ Pa}$.

Παράμετροι Προσομοίωσης

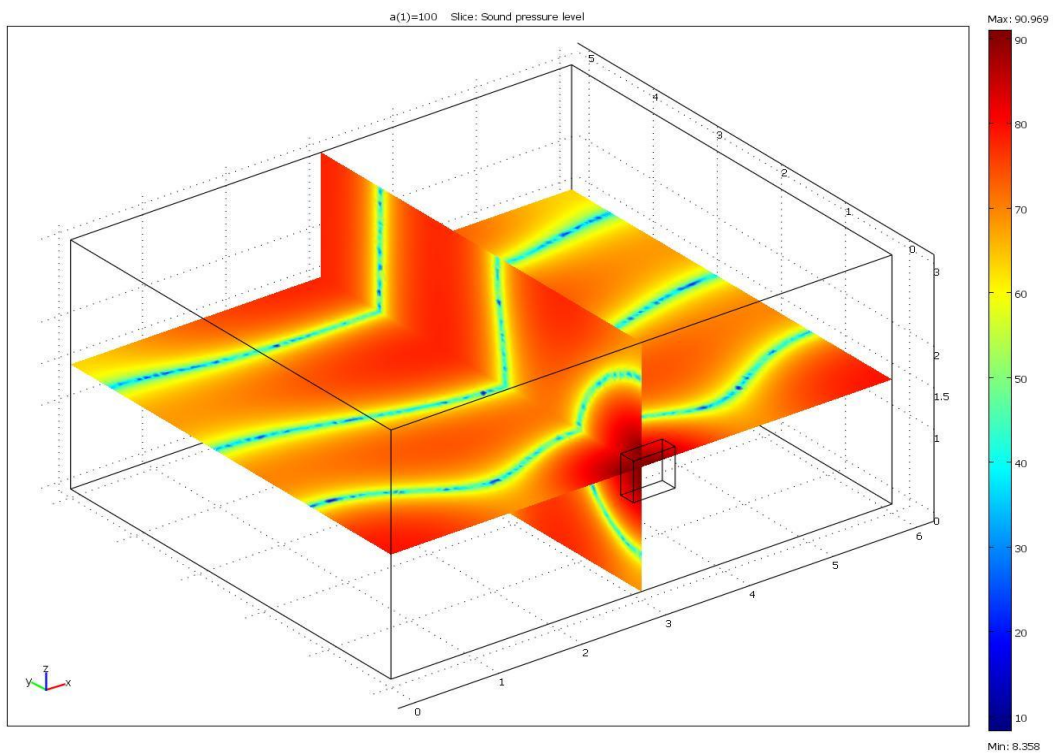
Στα Sub Domain Settings τοποθετήσαμε όλους τους τοίχους σαν Sound Hard Boundaries και τις επιφάνειες της πηγής εκτός τις επιφάνειες που ακτινοβολεί σαν Sound Soft Boundaries. Η διακριτοποίηση έγινε σε Extra fine επίπεδο, με τριγωνικά στοιχεία. Η εξομοίωση διακριτοποίησε τον χώρο σε 602.960 στοιχεία και 840.985 βαθμούς ελευθερίας.

Τα αποτελέσματα μετρήθηκαν σε ύψος $z = 1.5 \text{ m}$ και x, y σημείο μέτρησης ανά μέτρο όπως φαίνονται στην παρακάτω κάτοψη του χώρου.





Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης σε Κάτοψη



Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης σε Τρισδιάστατη Όψη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ

- [1] Anna Pompeia, M. A. Sumbatyanb, and N. F. Todorovb(2009) : *Computer Models in Room Acoustics: The Ray Tracing Method and the Auralization Algorithms*, *ACOUSTICAL PHYSICS* Vol. 55 No. 6
- [2] George Buchanan (1995) : *Schaum_Outline_Finite_Element_Analysis*
- [3] Thomas D. Rossing (2007) : *Springer Handbook of Acoustics*
- [4] Michael Moser (2009) : *Engineering Acoustics, Second Edition*
- [5] Jens Blauert · Ning Xiang (2008) : *Acoustics for Engineers*
- [6] Egan, M. D. (1988) : *Architectural Acoustics, 2th Edition*, McGraw-Hill, Νέα Υόρκη
- [7] O.C.Zienkiewicz and R.L.Taylor (2000) : *Finite Element Method 5th Edition*
- [8] Steele_M_Jefrey (1989) : *Applied Finite Elements Modeling*
- [9] Professor O.C. Zienkiewicz (2005) : *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics 6th Edition*
- [10] Peter Davinsson (2004) : *Structure – Acoustic Analysis*
- [11] Eagle J. (1999) : *JBL – Sound System Design Reference Manual*
- [12] Fish J., Belytschko T. (2007) : *A First Course In Finite Elements*
- [13] Comsol Multiphysics Instruction Manual

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- [14] Σκαρλάτος,Σ.(2008) : *Εφαρμοσμένη Ακουστική, 3η έκδοση, Φιλομάθεια, Πάτρα*

[15] Τσινίκας, Ν. (2005) : *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, 2η έκδοση, University Studio Press, Θεσσαλονίκη

[16] Α. Αντωνιάδης : *Θεωρία αριθμών και εφαρμογές υπό έκδοση*

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΩΝ

[17] Ζαχαριουδάκης, Δ. (2004) : *Σημειώσεις Φυσικής Ακουστικής*, 2η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.

[18] Κουζούπης, Σ. (2006) : *Μηχανική Ήχου II, Εργαστηριακές Ασκήσεις*, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.

[19] Πασχαλίδου, Σ. 2006 : *Μηχανική Ήχου I, Εργαστηριακό Φυλλάδιο*, 1^η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.

[20] Σηφάκης, Μ. 2004 : *Μηχανική Ήχου I, Εργαστηριακές Ασκήσεις*, 2η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.

ΑΡΘΡΑ

[21] Barron, M. (2005) : *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results* [online], Acoustical Science and Technology, σελ. 162-169 - <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ast/-char/en>

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

[22] <http://www.4pi.gr/hitech/data/pdf/0201.pdf>

[23] <http://www.ionio.gr/~floros/courses.html>

[24] www.cc.uoa.gr/~dfassoul/comphysii/comphysii_mde2.ppt

[25] <http://civil.engr.siu.edu/CE551/>

[26] http://www.semfe.gr/files/notes/7/ypologistikh_mhxanikh_1_kef1.pdf

[27] <http://www.youtube.com/watch?v=gzG2p-Su8Vw&feature=relmfu>

[28] <http://www.youtube.com/watch?v=pSdxdfBnuOI&feature=relmfu>