



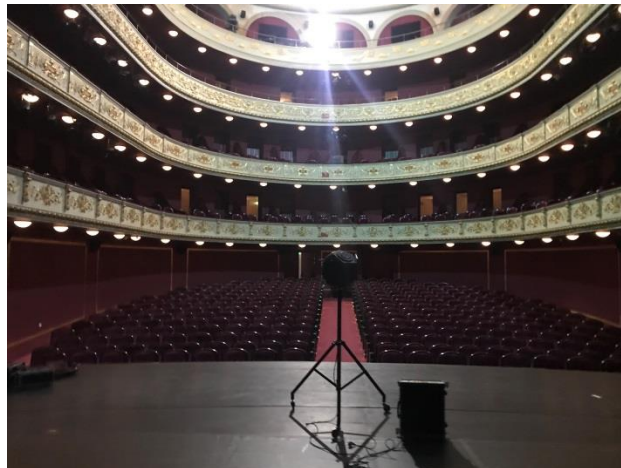
**Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ**

**Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ  
ΘΕΑΤΡΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΡΧΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΤΟΥ ΘΕΑΤΡΟΥ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΖΑΦΕΙΡΙΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ Α.Μ. 1261**

**ΚΟΝΙΔΑΡΗ ΕΥΑΝΘΙΑ Α.Μ. 1416**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΖΑΧΑΡΙΟΥΔΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

**ΡΕΘΥΜΝΟ 2019**

## Περιεχόμενα:

- Εισαγωγή:.....4

### Θεωρητικό τμήμα

- Κεφάλαιο 1ο :

1.1 - Τι είναι ο ήχος, χαρακτηριστικά του ήχου και η σχέση του με τον άνθρωπο .....	6
1.2-Βασικές έννοιες (ένταση - ισχύς - ηχητική πίεση - ανάκλαση - διάδοση - απορρόφηση.).....	9
1.3 Ακουστικά φαινόμενα σε κλειστούς χώρους.....	13
1.4 - Είδη ηχητικών πεδίων.....	28
1.5-Κρίσιμη απόσταση.....	31
1.6 - Διάκριση χώρων –Σύγκριση μικρών και μεγάλων χώρων.....	32

- Κεφάλαιο 2ο :

2.1- Ακουστική κλειστών χώρων.....	37
2.2 –Ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων.....	39
2.3 – Κριτήρια για καλή ακουστική χώρων.....	40
2.4 – Παράμετροι καλής ακουστικής ποιότητας.....	41
2.5 - Ηχοαπορρόφηση – Ηχομόνωση.....	49
2.6 – Χωροθεσία.....	55

### Πρακτικό τμήμα

- Κεφάλαιο 3ο : Δημοτικό Θέατρο Πειραιά περιγραφή χώρου:

3.1 – Λίγα λόγια για την ιστορία του Δημοτικού θεάτρου Πειραιά.....	58
3.2 – Κατόψεις του θεάτρου από τα αρχιτεκτονικά σχέδια.....	61
3.3 – Περιγραφή εξοπλισμού και ηχοαπορροφητικών υλικών βάση της ακουστικής μελέτης του κύριου Schubert .....	66
3.4 – Ηχοπροστασία Η.Μ. εγκαταστάσεων.....	69
3.5- Ηχητικός εξοπλισμός του θεάτρου.....	75

3.6- Ακουστική μελέτη του κύριου Schubert .....	78
3.7- Στόχος της ακουστικής μελέτης.....	80
3.8 –Προδιαγραφές καθισμάτων βάσει της ακουστικής μελέτης.....	82
<b>- Κεφάλαιο 4ο : Πειραματικό μέρος</b>	
4.1 – Εισαγωγή στην πειραματική διαδικασία.....	84
4.2 – Εξοπλισμός για την διεξαγωγή των μετρήσεων.....	84
4.3 –Πειραματική διάταξη και τρόπος διεξαγωγής μετρήσεων .....	88
4.4 – Αναλυτικά οι μετρήσεις και οι τιμές που καταγράψαμε για τους χρόνους αντήχησης.....	97
4.5 –Συγκρίσεις με την μελέτη του κυρίου Schubert.....	115
4.6 – Φωτογραφικό υλικό από την διεξαγωγή των μετρήσεων.....	126
<b>- Κεφάλαιο 5ο :</b>	
5.1-Συμπεράσματα.....	130
5.2 –Προτάσεις βελτίωσης και εκσυγχρονισμού.....	132
Ευχαριστίες.....	133
Βιβλιογραφία.....	134



## Εισαγωγή

Η ακουστική είναι ένας κλάδος της φυσικής που ασχολείται με τη μελέτη του ήχου, δηλαδή με τα φυσικά φαινόμενα που συσχετίζονται με αυτόν, το πως παράγεται και διαδίδεται σε κάποιο μέσο, καθώς και τους τρόπους με τους οποίους γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί.

Η συγκεκριμένη εργασία βασίζεται στην αρχιτεκτονική ακουστική, δηλαδή στην επιστήμη που μελετά τη συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους όπως αμφιθέατρα, αίθουσες συναυλιών, θέατρα κλπ. , με σκοπό τον έλεγχο του παραγόμενου ήχου, του επιπέδου θορύβου και των αντηχήσεων.

Για πολλά χρόνια υπήρχε ασάφεια σχετικά με την έννοια της “καλής ακουστικής” ενός μεγάλου κλειστού χώρου. Σήμερα, μετά από πολλές έρευνες η “καλή ακουστική” ενός χώρου εκφράζεται κάπως καλύτερα με αντικειμενικά κριτήρια, με τη χρήση συγκεκριμένης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της.

Πιο συγκεκριμένα, στις πρώτες δύο ενότητες θα αναλυθεί το βασικό υπόβαθρο που σχετίζεται με αυτή την εργασία, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο ο ήχος γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο, τη διάδοση του ήχου σε μεγάλους κλειστούς χώρους, καθώς και τις βέλτιστες ακουστικές συνθήκες που πρέπει να ισχύουν σε ένα θέατρο, το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο της μελέτης μας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται λεπτομερώς ο χώρος και η διάταξη του θεάτρου, καθώς και ο εξοπλισμός και η υπαρκτή αρχιτεκτονική/ακουστική μελέτη.

Έπειτα, θα ακολουθήσει η αναλυτική διαδικασία που πραγματοποιήσαμε για τη διεξαγωγή μετρήσεων και αποτελεσμάτων, όπως και η σύγκριση με την προϋπάρχουσα μελέτη, με την παρουσία σχεδίων, φωτογραφιών και σχεδιαγραμμάτων του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά.

Εν κατακλείδι, θα παρουσιαστούν συμπεράσματα και τρόποι βελτίωσης, αν αυτοί κριθούν απαραίτητοι. Όσον αφορά το πρακτικό μέρος, για την μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου παραστάσεων θα μετρηθούν τα εξής: ο χρόνος αντήχησης, η ηχομονωση του χώρου, ο θόρυβος βάθους, οι ανακλάσεις του ήχου, καθώς και η ηχητική απορρόφηση του χώρου. Για την διεξαγωγή των παραπάνω μετρήσεων θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω εξοπλισμός: ένα ηχώμετρο,

γεννήτρια ήχου, δωδεκάεδρο ηχείο, υπολογιστής, (χρήση του προγράμματος Room EQ Wizard) και μικρόφωνα.

Όσον αφορά τη συγγραφή της εργασίας, η δομή και ο σκελετός αυτής θα είναι ως εξής:

- Στη πρώτη ενότητα θα αναπτυχθεί το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την εργασία μας, δηλαδή οι παράμετροι που αφορούν το πως ο ήχος γίνεται αντιληπτός στο ανθρώπινο αυτί, τη συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς μεγάλους χώρους και τις βέλτιστες ακουστικές παραμέτρους που πρέπει να πληρούνται για ένα θέατρο, ενότητα που θεωρούμε απαραίτητη ώστε να είναι απολύτως ξεκάθαρο το αντικείμενο της εργασίας-μελέτης μας.
- Στην επόμενη ενότητα θα γίνει αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και την περιγραφή του τρόπου διεξαγωγής των δειγματοληπτικών μετρήσεων με τη ταυτόχρονη χρήση φωτογραφιών και γραφημάτων, η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού και συγκριτική ανάλυση με τα δεδομένα της ακουστικής μελέτης στην οποία βασίστηκε η κατασκευή της αίθουσας σε σχέση με την απόδοση των υλικών (απορροφητικά ή ανακλαστικά πανέλα και λοιπά δομικά στοιχεία) που χρησιμοποιήθηκαν.
- Στην τελική ενότητα θα γίνει αναλυτική παράθεση των συμπερασμάτων, τόσο πάνω στη πορεία της εργασίας και των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αλλά και προτάσεων βελτίωσης και εκσυγχρονισμού συστημάτων ή υλικών, αν αυτό κριθεί απαραίτητο για την βελτιστοποίηση της ακουστικής και την περαιτέρω αναβάθμιση της αίθουσας.

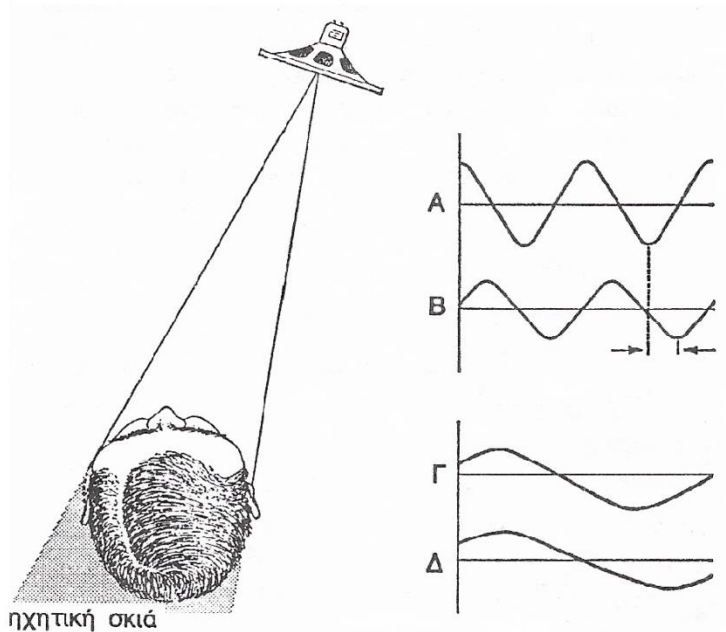
## Κεφάλαιο 1 Θεωρία

### 1.1 Τι είναι ο ήχος / η σχέση του με τον άνθρωπο

Ο ήχος είναι η αίσθηση που προκαλείται λόγω της διέγερσης των αισθητηρίων οργάνων της ακοής από μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων. Πολλές φορές ο συγκεκριμένος όρος στην πράξη σχετίζεται με την έννοια των ηχητικών κυμάτων.

Τα ηχητικά κύματα παράγονται από σώματα που εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις ή αλλιώς δονήσεις, δηλαδή χαρακτηρίζονται ως μηχανικά κύματα που μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διάδοση των κυμάτων είναι η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου μεταξύ πομπού και δέκτη. Το μέσο μπορεί να έχει τη μορφή στερεής, υγρής ή αέριας ύλης, καθώς ο ήχος δεν διαδίδεται στο απόλυτο κενό. Όταν δημιουργηθεί μια μορφή διαταραχής στο υλικό μέσο, εξαιτίας κάποιου ερεθίσματος, τότε τα μετατοπισμένα μόρια ύλης ασκούν δυνάμεις στα γειτονικά μόρια, αναγκάζοντάς τα να βρεθούν εκτός θέσης ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο η διαταραχή ταξιδεύει στο μέσο, κι αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διάδοση. Η ταχύτητα του ήχου ( η απόσταση που διανύουν τα κύματα πίεσης ανά μονάδα χρόνου σε ένα μέσο), εξαρτάται από το μέσο μέσα στο οποίο μεταδίδονται. Για παράδειγμα ο ήχος ταξιδεύει πιο γρήγορα σε υγρά και στερεά παρά σε αέριες μάζες. Στον αέρα ο ήχος διαδίδεται με διαμήκη ηχητικά κύματα, τα οποία όταν φθάσουν στο αισθητήριο της ακοής, δημιουργούν την αίσθηση της ακοής. Τα διαμήκη κύματα αποτελούνται από τοπικές διαταραχές της πίεσης του αέρα.

Η αντίληψη του ήχου αποτελεί βασική αίσθηση σε πολλούς οργανισμούς και πραγματοποιείται μέσω της ακοής. Χρησιμοποιείται για διάφορους λόγους, όπως επικοινωνία, ψυχαγωγία, μουσική σύνθεση, προειδοποίηση και αποφυγή κινδύνων. Στον άνθρωπο η ακοή εκτείνεται για ήχους με συχνότητα μεταξύ 20 Hz και 20.000 Hz. Το εύρος συχνοτήτων αυτό διαφέρει και σε μεγαλύτερες ηλικίες παρατηρείται μείωση της αντίληψης υψηλών συχνοτήτων. Ήχοι με συχνότητα κάτω ή άνω των ορίων αυτών ονομάζονται υπόηχοι ή υπέρηχοι αντιστοίχως και δεν γίνονται αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί.



Υπάρχει διαφορά φάσης (βέλη) και διαφορά πλάτους ταλάντωσης ανάμεσα στο δεξί αυτί (Α κυματομορφή) και στο αριστερό αυτί (Β κυματομορφή). Στις χαμηλές συχνότητες αυτές οι διαφορές δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές (Γ και Δ κυματομορφές). Στο αριστερό αυτί δημιουργείται ηχοπερίθλαση.

Εικόνα(1.1.1)Αναγνώριση της κατεύθυνσης του ήχου. ( από Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 7)

**-Χαρακτηριστικά του ήχου**

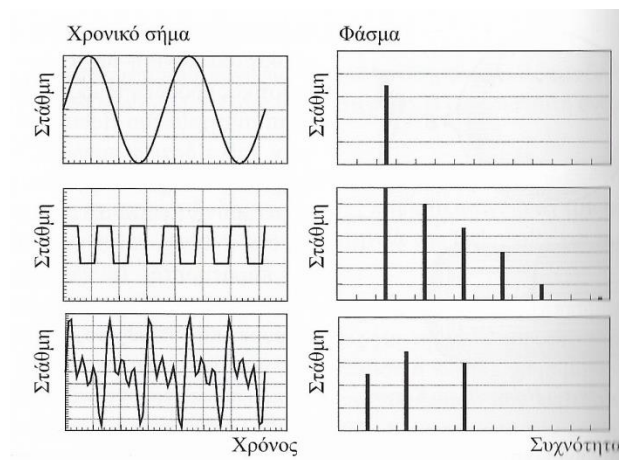
Ο ήχος τις περισσότερες φορές παράγεται από κάποιο δονούμενο αντικείμενο. Για παράδειγμα οι φωνητικές χορδές του ανθρώπου ή η παλλόμενη μεμβράνη ενός τυμπάνου παράγουν ήχο. Ωστόσο ο τοίχος που διαβιβάζει τον ήχο από το ένα δωμάτιο στο άλλο δονείται επίσης, ακόμα κι αν η δόνηση έχει μικροσκοπικό πλάτος. Ένα κύμα αποτελείται από μία διακύμανση της πίεσης (είτε αρνητική, είτε θετική), σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Όλες οι περιοχές συμπίεσης ταξιδεύουν με μία σταθερή ταχύτητα, την ταχύτητα του ήχου. Η οποία υπό κανονικές συνθήκες είναι 343 m/s ή 1125 ft/s. Ένα κύμα χαρακτηρίζεται από το πλάτος, τη συχνότητα, και την κατεύθυνση. Το πλάτος του κύματος καθορίζεται από το μέγεθος της διακύμανσης πίεσης, όπου ο Alexander Bell όρισε σαν μονάδα αναλογίας το dB, κατανοώντας έτσι ,καλύτερα τις διαφορές στα επίπεδα του ήχου. Στην ακουστική οι μονάδες που χρησιμοποιούμε είναι λογαριθμικές, πρώτον λόγω των τιμών των μεγεθών, καθώς το εύρος των μεγεθών της ακουστικής είναι πολύ μεγάλο, για παράδειγμα ένας ήχος μπορεί να έχει ακουστική πίεση από 20μPa έως 100μPa (η τιμή των 20μPa είναι η ελάχιστη τιμή της πίεσης που θα πρέπει να έχει ένας ήχος για να είναι ακουστός). Και δεύτερον εξαιτίας της αντίληψης του ήχου από τον άνθρωπο. Για τη μέτρηση λοιπόν των μονάδων ακουστικής

χρησιμοποιούμε λογαριθμικές μονάδες που ονομάζονται γενικές στάθμες (levels). Τέτοιες είναι οι μονάδες bell ή decibel.

## -Ηχητικό φάσμα

Ηχητικό φάσμα είναι:

- η συνάρτηση ενός χαρακτηριστικού μεγέθους (π.χ. ηχητική πίεση, στάθμη ηχητικής ισχύος κ.λ.π), του ηχητικού πεδίου με τη συχνότητα
- Το σύνολο των συχνοτήτων που μπορεί να περιέχει το ηχητικό πεδίο
- Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία το ηχητικό πεδίο έχει ορισμένα χαρακτηριστικά όπως ακουστικό ηχητικό φάσμα, υπηχητικό κ.λ.π.



Εικόνα(1.1.2)Διάφοροι ήχοι με τα φάσματά τους. Απλοί ήχοι -μία μόνο γραμμή φάσματος στην αντίστοιχη συχνότητα / τελευταίο κουτάκι βλέπουμε την σύνθεση των απλών ήχων που βλέπουμε στα από πάνω . (Σκαρλάτος – Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 78)

-Ακουστός ήχος είναι:

Ο ήχος που μπορεί να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα

Η περιοχή του ηχητικού φάσματος που αντιστοιχεί στους ακουστούς ήχους λέγεται "ακουστή περιοχή του ηχητικού φάσματος".



## 1.2 Βασικές Έννοιες της Ακουστικής

Η ακουστική χρησιμοποιεί δυο βασικά μεγέθη για την περιγραφή και την μελέτη του ήχου. Αυτά είναι η ένταση και η συχνότητα. Ως συχνότητα του ήχου ορίζεται η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης που παράγει τον ήχο και η ένταση είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του ήχου μέσα σε κλειστούς χώρους. Η ακουστική κλειστών χώρων ασχολείται με τη μελέτη και συμπεριφορά του ήχου σε διάφορους κλειστούς χώρους και την αλληλεπίδραση με τα διάφορα αντικείμενα στο εσωτερικό των χώρων αυτών (αίθουσες συναυλιών, αμφιθέατρα, θέατρα, κινηματογράφοι, όπερες, studios, ναοί, γραφεία, άλλοι εργασιακοί χώροι, ακόμη και απλές κατοικίες), με σκοπό τον έλεγχο του παραγόμενου ηχητικού αποτελέσματος και του επιπέδου θορύβου και αντηχήσεων. Η διάδοση του ήχου και η συμπεριφορά του σε κλειστούς χώρους διαφέρει πολύ από την “ελεύθερη” διάδοση του σε υπαίθριο περιβάλλον. Κατά την εκπομπή ενός ήχου στον αέρα δημιουργούνται σφαιρικά κύματα που μεταδίδονται προς τα έξω σε μορφή ομόκεντρων σφαιρών όλο και μεγαλύτερης διαμέτρου με αποτέλεσμα τη συνεχή μείωση της ενέργειας με την αύξηση της απόστασης από την πηγή. Μέσα σε έναν κλειστό χώρο ο ήχος βρίσκει φυσικά εμπόδια τα οποία δημιουργούν διάφορα φυσικά φαινόμενα κατά την διάδοση του ήχου. Αν ένας ακροατής βρίσκεται στην αίθουσα δέχεται τον απευθείας ήχο (direct sound).

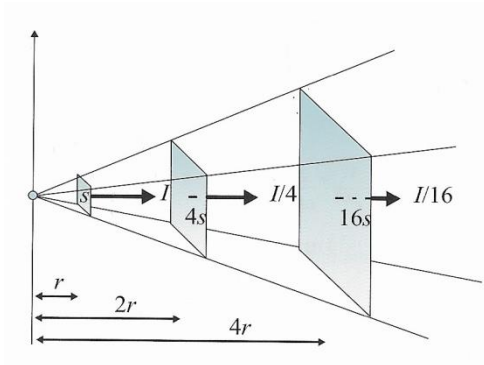
Ο κατευθείαν ήχος, που φθάνει από την πηγή σε ένα ακροατή, δεν επηρεάζεται από το σχήμα, την οροφή και τους τοίχους ενός χώρου, αλλά και από τα αποτελέσματα των διαφόρων φαινομένων που παρατηρούνται. Ας δούμε αναλυτικά αυτά τα φαινόμενα:

### -Ένταση του ήχου

Η ένταση του ήχου αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέγεθος στην ακουστική. Σε αντίθεση με την ηχητική πίεση που είναι μονόμετρο μέγεθος, η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος και εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας. Στη μέτρησή της όμως παρουσιάζει δυσκολία, επειδή ο πλήρης καθορισμός ενός διανύσματος απαιτεί τη γνώση της διεύθυνσης και φοράς, εκτός του μέτρου.

Οπότε για την ένταση δίνεται ο παρακάτω ορισμός: Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μια στοιχειώδη

επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας. Η μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το  $W/m^2$ .



Εικόνα(1.2.1)Ορισμός έντασης ήχου. (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.32)

### -Σχέση έντασης-πίεσης για ελεύθερη διάδοση

Στην περίπτωση που ο ήχος εκπέμπεται από κάποια πηγή το μέτρο της έντασης του ήχου σε κάποιο σημείο όταν είναι γνωστή η πίεση υπολογίζεται από την σχέση :

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \quad (1.2.1 .\alpha)$$

όπου I η ένταση του ήχου,

$P_{rms}$  η ενεργός ακουστική πίεση σε απόσταση r από την πηγή,

$\rho$  η πυκνότητα του μέσου διάδοσης,

c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο

### -Σχέση έντασης-πίεσης για διάχυτο ήχο

Για την περίπτωση διάχυτης ακουστικής ενέργειας (π.χ. για ήχο που προέρχεται από διαδοχικές ανακλάσεις σε τοιχώματα ενός κλειστού χώρου) η σχέση που συνδέει την ένταση με την πίεση είναι :

$$I = \frac{P_{rms}^2}{4\rho c} \quad (1.2.1.\beta)$$

## -Ακουστική ισχύς πηγής

Για την ακουστική ισχύ μιας πηγής μπορούμε να δώσουμε τον ορισμό :

Ακουστική ισχύς μιας πηγής είναι η ακουστική ενέργεια που εκπέμπει η πηγή ανά μονάδα χρόνου προς όλες τις κατευθύνσεις.

Έστω ότι υπάρχει μια σημειακή πηγή που εκπέμπει ήχο ομοιόμορφα στον χώρο. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου  $W$  του ήχου που διέρχεται από μια σφαιρική επιφάνεια  $S$  που περικλείει την πηγή , σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης θα είναι :

$$W = \int_S I * ds, \quad (1.2.1.γ)$$

Όπου  $W$  η ακουστική ισχύς πηγής

$I$  η ένταση του ήχου

## -Ηχητικές στάθμες

Για τις βασικές ποσότητες που αναφέραμε προηγουμένως μπορούμε να ορίσουμε τις εξής στάθμες :

### 1. -Στάθμη πίεσης ήχου ( $L_p$ )

Ορίζεται από τη σχέση :

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad (1.2.1.δ)$$

όπου  $p$  η πίεση ήχου σε κάποιο σημείο και  $P_{ref}$  η πίεση αναφοράς.

Κατά ISO και ΕΛΟΤ οι τιμές αναφοράς ορίζονται :

$$p_{ref} = 20 \mu Pa = 2 * 10^{-5} Pa$$

$$\rho c_{ref} = 400 Rayls$$

$$s_{ref} = 1 m^2$$

$$r_{ref} = 1 m$$

$$\tau_{ref} = 1 sec$$

Η ακουστική πίεση στην παραπάνω σχέση είναι υψωμένη στο τετράγωνο. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενέργεια των ηχητικών κυμάτων είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης. Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται οι στάθμες έντασης και ισχύος.

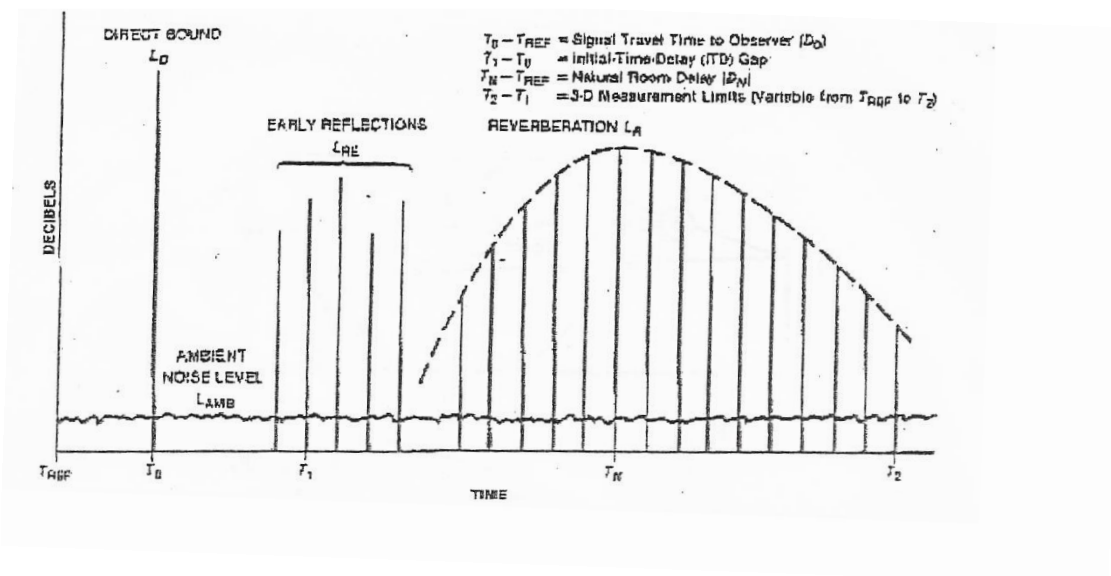
## 2. Στάθμη έντασης ήχου ( $L_I$ )

Ορίζεται από τη σχέση :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \quad (1.2.1, \epsilon)$$

όπου  $I$  το μέτρο της έντασης σε κάποιο σημείο και  $I_{ref}$  η ένταση αναφοράς, που υπολογίζεται από τη σχέση :  $I_{ref} = \frac{p_{ref}^2}{(\rho c)_{ref}}$  , αντικαθιστώντας τις τιμές αναφοράς προκύπτει

$$I_{ref} = \frac{(2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa})^2}{400 \text{ Rayls}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (1.2.1, \epsilon 1)$$



Εικόνα(1.2.2)

Η ιδανική ακουστική απόκριση σε σχέση με την στάθμη έντασης και το χρόνο. (σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης.σελ 36)

### 3. Στάθμη ισχύος ήχου ( $L_W$ )

Τη χρησιμοποιούμε για τον καθορισμό της ολικά εκπεμπόμενης ηχητικής ισχύος από μια πηγή. Ορίζεται από τη σχέση :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \quad (1.2.2.α)$$

όπου  $W$  η ακουστική ισχύς σε watt και  $W_{ref}$  η ισχύς αναφοράς. Η οποία προκύπτει από τη σχέση :

$$W_{ref} = I_{ref} * S_{ref} = 10^{-12} \frac{W}{m^2} * 1m^2 = 10^{-12} \text{ Watt.} \quad (1.2.2,β)$$

### 1.3 Ακουστικά φαινόμενα σε κλειστούς χώρους

Θεωρητικά, ο ήχος διαδίδεται ομοιόμορφα και ισότροπα γύρω από τη σημειακή πηγή του.

Στην πραγματικότητα, η ηχοδιάδοση της ανθρώπινης φωνής παρουσιάζει εκλεκτική και ανισότροπη κατανομή, ανάλογα με τη χροιά του ομιλητή και την απόκλιση του από τη φυσιολογική θέση ομιλίας. Οι στάθμες ομιλίας είναι χαμηλές, αφού το ψιθύρισμα είναι περίπου 30db(A), και η φυσιολογική στάθμη ομιλίας είναι 60db(A), για παράδειγμα ένας ηθοποιός μπορεί υψώσει την στάθμη έντασης της φωνής μέχρι και 70 db (A). Η στάθμη ομιλίας είναι χαμηλότερη από τη στάθμη μουσικής, έτσι απαιτείται υψηλό ποσοστό ευκρίνειας.

Βάση της διαφορετικής κατευθυντηκότητας της ανθρώπινης φωνής ανάλογα με τις διαφορετικές συχνότητες βγαίνει το συμπέρασμα ότι σε χώρους με μεγάλο πλάτος μπροστά από τη σκηνή, οι ακροατές που κάθονται μπροστά και στις πλαϊνές θέσεις, δεν ακούνε τους ήχους υψηλών συχνοτήτων καθώς οι γωνίες κατευθυντικότητας στις υψηλές συχνότητες είναι πολύ μικρές. Η ηχοδιάδοση συνοδεύεται από ενεργειακές απώλειες στο εσωτερικό (ατμόσφαιρα, θεατές-καθίσματα) και στα όρια του χώρου. Ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται χωρίς σοβαρές απώλειες, ενώ οι υψηλές συχνότητες απορροφώνται εύκολα.

Οι ενεργειακές απώλειες σχετίζονται επίσης με τη φύση και την υφή των επιφανειών στα πλευρικά τοιχώματα. Η ηχοαπορροφητική ικανότητα των εσωτερικών επενδύσεων σχετίζεται με το ηχητικό φάσμα και τη γωνία πρόσπτωσης. Η μείωση των συντελεστών ηχοαπορρόφησης, σε συνάρτηση με τις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης βλάπτει την καταληπτικότητα στις

πλάγιες θέσεις. Επιφάνειες με μεγάλο πορώδες υλικό διαθέτουν υψηλή ηχοαπορροφητικότητα και επιτρέπουν τον έλεγχο των μη καλών, καθυστερημένων ανακλάσεων.

Η φύση των πλευρικών τοιχωμάτων καθορίζει τα πλευρικά όρια επέκτασης του θεατρικού χώρου. Θεωρητικά, η πρόσπτωση του ήχου σε επίπεδες, λείες και μεγάλες επιφάνειες καθορίζεται από τους νόμους της γεωμετρικής οπτικής (ηχο-ανάκλαση), ενώ οι επιφάνειες μικρών διαστάσεων και οι ανώμαλες προεξοχές προκαλούν ηχο-διάχυση. Στην πραγματικότητα αυτά τα φαινόμενα συνυπάρχουν σε ποικίλες αναλογίες. Οι αλλαγές κατεύθυνσης στην πορεία της ηχοδιάδοσης, περιπλέκουν την ακουστική αντίληψη.

Ο ήχος μοιάζει να προέρχεται από ένα συμμετρικό είδωλο της πηγής, με χρονική καθυστέρηση, μειωμένη ένταση και αλλοιωμένη φασματική πυκνότητα.

Η συνισταμένη των διαφοροποιήσεων καθορίζει την ποιότητα της τελικής ακουστικής αίσθησης. Οι βασικές συνιστώσες της ακουστικής ποιότητας και άνεσης ενός χώρου είναι: -ο χρόνος της αντήχησης (RT) -η χωρική συνιστώσα της Ακουστικής πίεσης (Ir) -Η καταληπτότητα της ομιλίας (S.I.)

## 1.Ανάκλαση του ήχου

Η ανάκλαση του ήχου είναι το φαινόμενο ,κατά το οποίο ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, επιστρέφει σε γωνία ίδια με τη γωνία πρόσπτωσης. Το μήκος κύματος  $\lambda$  του ήχου που ανακλάται πρέπει να είναι μικρότερο από τις διαστάσεις επιφάνειας στην οποία προσπίπτει. Άρα οι υψηλότερες συχνότητες ανακλώνται από τις επιφάνειες του δωματίου, ενώ οι χαμηλότερες όχι.

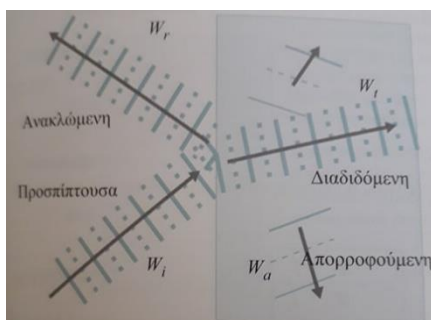
Αναλυτικότερα στην ηχοανάκλαση το ηχητικό κύμα προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δυο μέσων και επιστρέφει από αυτή υπό γωνία, ως προς την κάθετο, ίση με τη γωνία με την οποία προσπίπτει. Η γωνία με την οποία προσπίπτει το ηχητικό κύμα λέγεται “γωνία πρόσπτωσης” ενώ η γωνία με την οποία ανακλάται “γωνία ανάκλασης”. Ο συντελεστής ηχοανάκλασης,  $r$ , μιας επιφάνειας ή ενός υλικού σε ορισμένη συχνότητα και σε ορισμένες συνθήκες είναι ο λόγος της ανακλώμενης ηχητικής ισχύος ( $W_r$ ) προς την προσπίπτουσα ηχητική ισχύ ( $W_i$ ) :

$$r = \frac{W_r}{W_i} \quad (1.3.1.\alpha)$$

Ο συντελεστής ηχοανάκλασης  $r$  είναι αδιάστατο μέγεθος. Καμία φορά αντί για το λόγο των ισχύων λαμβάνεται ο λόγος των αντίστοιχων ηχητικών πιέσεων. Τότε το αντίστοιχο μέγεθος λέγεται συντελεστής ανάκλασης ηχητικής πίεσης,  $C_r$ , ο οποίος είναι επίσης αδιάστατο μέγεθος. Ο συντελεστής ανάκλασης ηχητικής πίεσης,  $C_r$ , μιας επιφάνειας ή ενός υλικού σε ορισμένη συχνότητα και σε ορισμένες συνθήκες είναι το μιγαδικό πηλίκο της ηχητικής πίεσης ( $P_r$ ) του ανακλώμενου ηχητικού κύματος προς την ηχητική πίεση ( $P_i$ ) του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος.

$$C_r = P_r / P_i$$

(1.3.1.β)



Εικόνα(1.3.1)Ανάκλαση-απορρόφηση- διάδοση ήχου( Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.109 )

## 2.Ηχοαπορρόφηση

Άλλο φαινόμενο είναι η απορρόφηση του ήχου. Αν ο ήχος πέσει πάνω σε ένα απορροφητικό υλικό απορροφάται από αυτό και “χάνεται” καθώς το υλικό απορροφά την ηχητική ενέργεια. Κατά το φαινόμενο αυτό η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμότητα.

Η ηχοαπορρόφηση λοιπόν είναι η ιδιότητα των υλικών και αντικειμένων να απορροφούν την ηχητική ενέργεια και να την μετατρέπουν σε άλλη μορφή ενέργειας συνήθως σε θερμότητα. Αυτό γίνεται κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος σε ένα μέσο ή κατά την πρόσπτωση του σε μια διαχωριστική επιφάνεια, όπου στη δεύτερη περίπτωση ένα μέρος αυτής της ενέργειας δεν απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα αλλά μεταδίδεται σαν ηχητική ενέργεια στο δεύτερο μέσο.

Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης,  $\alpha$ , μιας επιφάνειας ή ενός υλικού, σε ορισμένη συχνότητα και σε ορισμένες συνθήκες, είναι ο λόγος της ηχητικής ισχύος που απορροφάται (ή αλλιώς που δεν ανακλάται) από την επιφάνεια προς την ηχητική ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια. Ο συντελεστής (που

είναι ένα αδιάστατο μέγεθος), αντιπροσωπεύει το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που απορροφάται απ το υλικό (μετατρέπόμενη σε θερμική ενέργεια) . Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης . Αν  $r$  είναι ο συντελεστής ηχοανάκλασης,  $\delta$  ο συντελεστής ηχοαπώλειας και  $\tau$  ο συντελεστής ηχομετάδοσης ισχύουν οι σχέσεις :

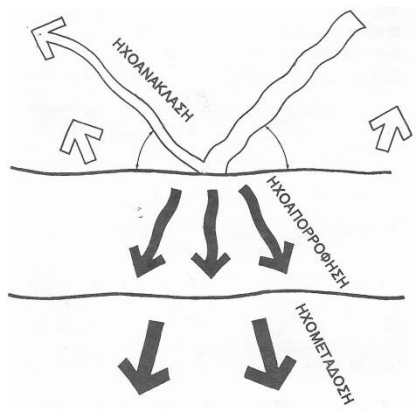
$$\alpha = 1 - r \quad (1.3.2.α)$$

$$\alpha = \delta + \tau \quad (1.3.2.β)$$

Η σταδιακή απόσβεση του ήχου μπορεί να φανεί με δυο τρόπους :

(α) με έναν παλμικό ήχο

(β) με μια πηγή που εκπέμπει συνεχόμενα ηχητική ενέργεια και διακόπτεται απότομα.



Εικόνα(1.3.2)ηχοανάκλαση, ηχοαπορρόφηση, ηχομετάδοση(Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ20)

### 2.1. Σταθερά δωματίου:

Για τον υπολογισμό της έκφρασης της στάθμης πίεσης σε ένα κλειστό χώρο βασικό ρόλο παίζει η απορρόφηση του χώρου που εκφράζεται μέσω μιας σταθεράς που χαρακτηρίζει την απορρόφηση του χώρου , της σταθεράς δωματίου. Η σταθερά αυτή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_c = \frac{s\bar{a}}{1-\bar{a}} \quad (1.3.2.1)$$

Όπου,



$R_c$  η σταθερά του δωματίου σε  $m^2$

$s$  το συνολικό εμβαδόν των τοιχωμάτων του χώρου

$\bar{\alpha}$  ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

### 3. Διάχυση

Μετά έχουμε τη διάχυση, ο ήχος που πέφτει πάνω σε έναν “διαχυτή” διασκορπίζεται ομοιόμορφα σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια ηχητική ένταση. Η διάδοση του ήχου μέσα σε έναν κλειστό χώρο γίνεται από τοίχο σε τοίχο .

### 4. Περίθλαση

Ένα ακόμα φαινόμενο που παρατηρείται είναι η περίθλαση του ήχου, που είναι η αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του ήχου που παρατηρείται κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (παράκαμψη από τα ηχητικά κύματα ενός τοίχου, μιας γωνίας ή αλλοιώσεις από ανοιχτά παράθυρα).

### 5. Αντήρηση:

Αντήρηση είναι η μη ακαριαία απόσβεση του ήχου με το σταμάτημα μιας πηγής και είναι το αποτέλεσμα των πολλαπλών ανακλάσεων στα τοιχώματα. Όπως γνωρίζουμε, όταν ένα ηχητικό κύμα προσπέσει σε μια επιφάνεια, τότε ένα μέρος του απορροφάται από το υλικό (μετατρέπόμενο σε θερμική ενέργεια) και ένα μέρος του ανακλάται (με γωνία ίδια με τη γωνία της πρόσπτωσης), ενώ ένα μέρος υφίσταται το φαινόμενο της περίθλασης. Ο συντελεστής ανάκλασης  $r$ , αντιπροσωπεύει το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης), που ανακλάται κατά την πρόσπτωσή στο υλικό και επιστρέφει στο χώρο :

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (1.3.5.α)$$

,όπου  $E_r$  η ανακλώμενη ενέργεια από το υλικό και  $E_i$  η προσπίπτουσα σ αυτό ενέργεια.

Η αντήρηση συνδέεται με μια ακουστική αίσθηση επιμήκυνσης των ήχων. Σε έναν κλειστό χώρο λοιπόν το ηχητικό πεδίο “φυλακίζεται” από τις περιβάλλουσες επιφάνειες και η ενέργεια του διατηρείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εντός του χώρου, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην ύπαιθρο. Πολλαπλές ανακλάσεις του ήχου φτάνουν στο σημείο ακρόασης

μέσω πρόσκρουσης των κυμάτων στις εσωτερικές επιφάνειες (τοιχοί, δάπεδα, οροφή), ενώ η χρονική απόσταση που τα χωρίζει είναι πολύ μικρή.

Ο χρόνος αντήχησης ( RT, Reverberation Time), είναι ο χρόνος που χρειάζεται να παρέλθει για να μηδενιστεί η πίεση του ήχου ύστερα από το μηδενισμό της πηγής. Πιο συγκεκριμένα ως χρόνο αντήχησης  $RT_{60}$  ορίζουμε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ελαττωθεί η στάθμη του ήχου ( $L_p$ ) κατά 60 dB από την αρχική του τιμή. Ο χρόνος αυτός διαφέρει για διαφορετικές συχνότητες, εφόσον τα διάφορα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική απορρόφηση ανάλογα με τη συχνότητα. Ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται ανάλογα με τον όγκο ενός χώρου, σε αίθουσες μεγάλων διαστάσεων, όπως θέατρα, εκκλησίες, χώρους εκδηλώσεων κλπ η αντήχηση είναι πιο έντονη. Ο ρυθμός απομείωσης των εντάσεων δεν εξελίσσεται με τον νόμο της ηχοδιάδοσης (δηλαδή αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης) το χρονικό διάστημα λοιπόν που μεσολαβεί είναι κρίσιμο. Μια χρονική καθυστέρηση μεγαλύτερη των 50 ms προκαλεί την αίσθηση της ηχούς, ένα φαινόμενο ακουστικής δυσαρμονίας για χώρους ακουστικών απαιτήσεων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιδεινωθεί με το φαινόμενο της παλμικής ηχούς (flutter echo), που είναι η ραγδαία εμφάνιση ενός απροσδιόριστου αριθμού διαδοχικών ηχοανακλάσεων σε παράλληλες επιφάνειες (με χαμηλούς συντελεστές ηχοαπορρόφησης) που έχουν απόσταση μεγαλύτερη των 15 m .

#### 5.1. Προσέγγιση κατά Sabine:

Ο Wallace Sabine το 1898 μετά από μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποίησε σε διάρκεια 2 χρόνων, με σκοπό τη βελτίωση της ακουστικής μιας αίθουσας διαλέξεων στο Πανεπιστήμιο Harvard, κατέληξε εμπειρικά στην πρώτη σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης. Για τις μελέτες του χρησιμοποίησε εκτός από την προβληματική αίθουσα διαλέξεων, μια αίθουσα θεάτρου εξαιρετικής ακουστικής, έναν αντηχητικό χώρο και μια αίθουσα μέτριας ακουστικής. Χρησιμοποιώντας τα μαξιλαράκια των καθισμάτων του θεάτρου ως απορροφητικά υλικά για τις μελέτες του, έφτασε στο συμπέρασμα ότι η αντήχηση ενός χώρου εξαρτάται από τον όγκο του, τη γεωμετρία του, την ανακλαστικότητα των επιφανειών του και την ποσότητα Α του απορροφητικού υλικού που βρίσκεται μέσα στην αίθουσα.

- Προσεγγιστική σχέση υπολογισμού κατά Sabine:

Η σχέση στην οποία κατέληξε, για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης είναι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}} \quad (1.3.5.\gamma 1)$$

$$\text{ή } RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S} \quad (1.3.5.\gamma 2)$$

$$\text{με απορρόφηση } A_S = S \cdot \bar{\alpha} \quad (1.3.5.\delta)$$

Όπου:  $RT_{60}$  ο χρόνος αντήχησης σε sec

$V$  ο όγκος του δωματίου σε  $m^3$

$S$  η ολική επιφάνεια του δωματίου σε  $m^2$

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

$A_S$  η συνολική απορρόφηση σε Sabine

Στη σχέση παρουσιάζεται μια μέση τιμή συντελεστή απορρόφησης διότι μέσα σε ένα χώρο υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλικών, με διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης, ο οποίος είναι διαφορετικός για διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ακτίνας του ήχου. Η μέση τιμή υπολογίζεται με το γινόμενο των επιμέρους συντελεστών απορρόφησης με την αντίστοιχη επιφάνεια τους διαιρούμενη με τη συνολική επιφάνεια:

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n}{S} \quad (1.3.5.\epsilon)$$

Όπου  $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ ,

$\alpha_i$  οι συντελεστές απορρόφησης των επιμέρους επιφανειών και

$S_i$  τα αντίστοιχα εμβαδά τους.

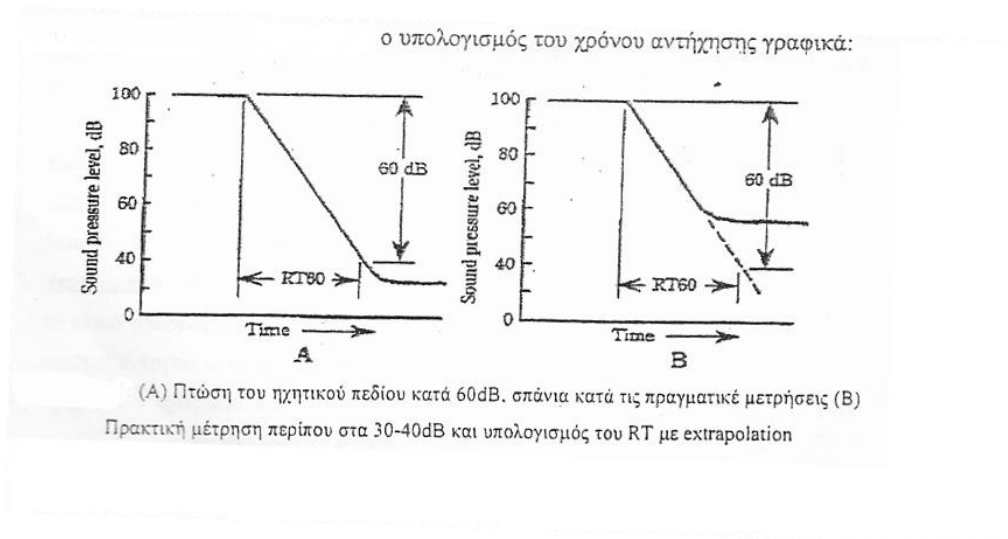
Η απορρόφηση του χώρου κατά τον Sabine δίνεται από την σχέση:

$$A_S = S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n \quad (1.3.5.\zeta)$$

η οποία ισχύει ικανοποιητικά για  $\alpha < 1$ , (όπου  $\alpha$  ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών) αφού τα πειράματά του τα πραγματοποίησε σε

χώρο με μικρή απορρόφηση. Υπάρχουν λοιπόν περιπτώσεις που η προϋπόθεση αυτή δεν ισχύει και υπάρχουν πιο ακριβείς σχέσεις για τον υπολογισμό του  $RT_{60}$ .

Η σχέση (1.3.5.γ1) μας δείχνει ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους: το μέγεθος του χώρου και την απορρόφηση που παρουσιάζει στον ήχο. Όσο μεγαλύτερος ο χώρος και χαμηλότερη η απορρόφηση, τόσο περισσότερο διαρκεί η εξασθένηση του ήχου.



Εικόνα(1.3.5.α)Υπολογισμός του χρόνου αντήχησης γραφικά (σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης σελ 40)

## 5.2 Σχέση υπολογισμού $RT_{60}$ κατά Norris-Eyring :

Η σχέση υπολογισμού του  $RT_{60}$  από τους Norris και Eyring βασίζεται στη μέση ελεύθερη διαδρομή του ήχου μεταξύ δυο διαδοχικών ανακλάσεων. Η προσέγγιση έγινε βάσει της γεωμετρικής ακουστικής, δηλαδή επικρατεί η θεώρηση ότι ο ήχος διαδίδεται σε ακτίνες, δηλαδή σε ευθείες γραμμές μεταξύ δυο διαδοχικών ανακλάσεων. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι μετά από μεγάλο αριθμό ανακλάσεων το ηχητικό πεδίο του χώρου γίνεται διάχυτο μακριά από την πηγή, η πυκνότητα της ενέργειας είναι σταθερή σε ολόκληρο το χώρο μακριά από αυτήν και όλες οι κατευθύνσεις των ανακλάσεων έχουν ίση πιθανότητα. Σύμφωνα με τους ερευνητές ο χρόνος αντήχησης δίνεται από τη σχέση :

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{A_N} \quad (1.3.5.η1)$$

όπου: V ο όγκος του χώρου

$A_N$  η ολική απορρόφηση κατά Norris Eyring

Που δίνεται από τη σχέση :

$$A_N = s \ln(1-\bar{\alpha})^{-1} \quad (1.3.5.\eta 2)$$

Όπου  $\bar{\alpha}$  ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

Η σχέση αυτή ισχύει για  $\bar{\alpha} > 0.1$

Ο τύπος αυτός θεωρείται πιο ακριβής όταν η απορρόφηση όλων των επιφανειών που περικλείουν τον χώρο είναι η ίδια. Στην περίπτωση που ο χώρος είναι υπερβολικά μεγάλος πχ. Θέατρα, εκκλησίες κλπ, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η απορρόφηση του αέρα, άρα οι τύποι (1.3.5.γ2) και (1.3.5.η1) γίνονται

$$T_{60} = \frac{0.161 * V}{A_N + 4mV}, \quad T_{60} = \frac{0.161 * V}{A_S + 4mV} \quad (1.3.5.\theta)$$

Όπου m ο συντελεστής εξασθένισης της ενέργειας που εξαρτάται από την υγρασία και τη συχνότητα,

Για το συντελεστή m μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσεγγιστική σχέση :

$$m = 5.5 \left( \frac{50}{h} \right) * \left( \frac{f}{1000} \right)^{1.7} * 10^{-4} \quad (1.3.5.\iota)$$

Όπου h η % υγρασία και f η συχνότητα

Η σχέση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν η % σχετική υγρασία έχει τιμές μεταξύ 20% και 70% και για συχνότητες μεταξύ 1.5 kHz και 10kHz .

Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιούμε τον παρακάτω πίνακα:

ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ %	Θερμοκρασία	Συχνότητα (Hz)			
		2000	4000	6300	8000
30 %	15	0.0143	0.0486	0.1056	0.1360
	20	0.01190	0.0379	0.0840	0.1360
	25	0.0114	0.0313	0.685	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	0.0223	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(1.3.5.b)Συντελεστής εξασθένησης του αέρα (4m) για διάφορες θερμοκρασίες συναρτήσει της συχνότητας του ήχου. (Σκαρλάτος – Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.151)

### 5.3.Συνιστώμενοι χρόνοι αντήχησης :

Σε χώρους διαλέξεων με πληρότητα ακροατών κατά τα 2/3 ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια να είναι ίσος με 4,στη συχνότητα των 500Hz. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος αντήχησης δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{4VQ_s}{312L^2Q_m} \quad (5.3.1)$$

Όπου V ο όγκος του χώρου

$Q_s, Q_m$  παράγοντες κατευθυντικότητας πηγής και μικροφώνου

L το μήκος του χώρου

Για τους υπόλοιπους χώρους οι ιδανικοί χρόνοι αντήχησης δίνονται από τη σχέση:

$$T_{60} = A \log V+B \quad (5.3.2)$$

Όπου A ΚΑΙ B σταθερές που εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου

V ο όγκος του χώρου σε  $m^3$

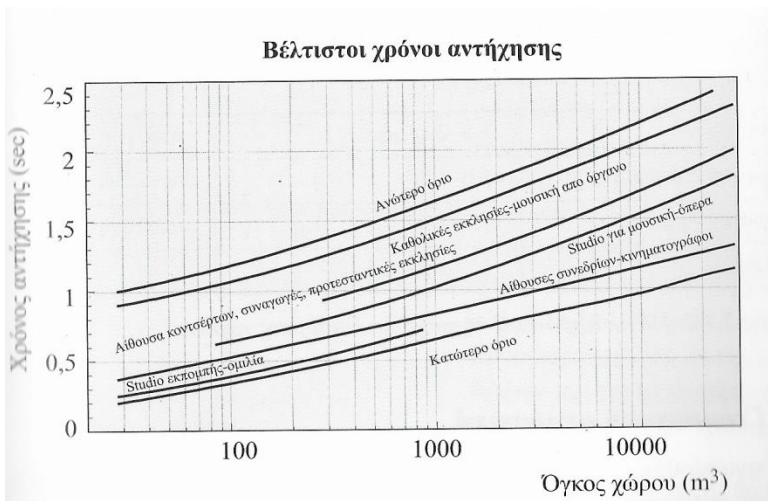
Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις τιμές των παραμέτρων A,B για διάφορους χώρους ανάλογα την χρήση τους για συχνότητα 500 Hz .

Είδος χώρου	A	B
Καθολικοί Ναοί – Αίθουσες συναυλιών	0.4	0.22
Ναοί διαμαρτυρομένων	0.35	0.19
Ορθόδοξες εκκλησίες – Όπερες	0.3	0.16
Κινηματογράφοι Αίθουσες Μουσικής (Music Hall)	0.22	0.11
Χώροι διαλέξεων – Στούντιο	0.2	0.11
Χώροι ελέγχου	0.11	0.148

Πίνακας 1.3.5. Σταθερές για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης σε διάφορους χώρους

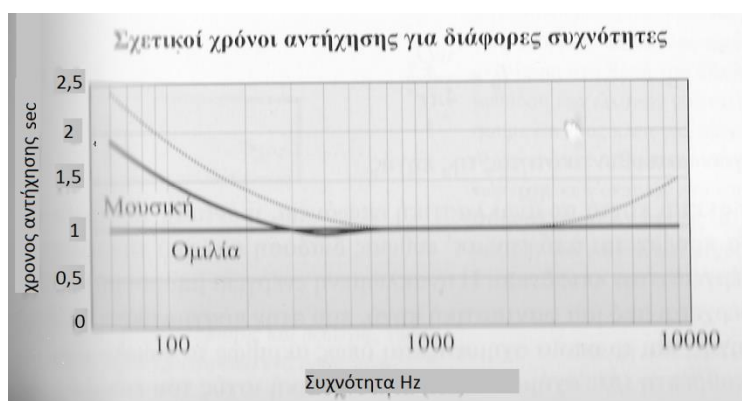
Πίνακας(1.3.5.c) Σταθερές για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης σε διάφορους χώρους. (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.188)

Παρακάτω βλέπουμε γράφικα τους ιδανικούς χρόνους αντήχησης κατά τον Beranek για συχνότητα 500Hz και μετά για διάφορες συχνότητες:



Εικόνα(1.3.5.d) Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για δημόσιους χώρους για 500Hz ( Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.189)

Και για διάφορες συχνότητες:



Εικόνα(1.3.5.e)Χρόνοι αντήχησης για διάφορες συχνότητες. (Σκαρλάτος – Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.189)

Και τέλος ιδανικοί χρόνοι αντήχησης για διάφορους χώρους:

Είδος αίθουσας	Ιδανικός Χρόνος	Παρατηρήσεις
Χώροι διδασκαλίας	<0.8 s	
Κοντσέρτα	1.8–2 s	Ανάλογα του όγκου
Μουσική Baroque	1.6–1.7	Ανάλογα του όγκου
Μουσική Ρομαντική	1.8–1.22 s	Ανάλογα του όγκου
Όπερα	1.2–1.5 s	

Πίνακας(1.3.5f)(Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.190)

6.Θόρυβος βάθους :

Ως θόρυβος βάθους ορίζεται ο συνολικός θόρυβος που υπάρχει στον χώρο όταν δεν λειτουργεί η ηχητική πηγή. Επίσης καλύπτει ένα τμήμα του ωφέλιμου σήματος παρεμβάλλοντας, ευκαιριακά ή μόνιμα, ένα είδος φίλτρου. Στους θορύβους συμπεριλαμβάνονται όλα τα ακουστικά παρεπόμενα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (κλιματισμός, εξαερισμός, φώτα ή ντίμερ, συστήματα ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης, καθώς και οι αντιδράσεις του κοινού κατά τη διάρκεια μιας παράστασης.

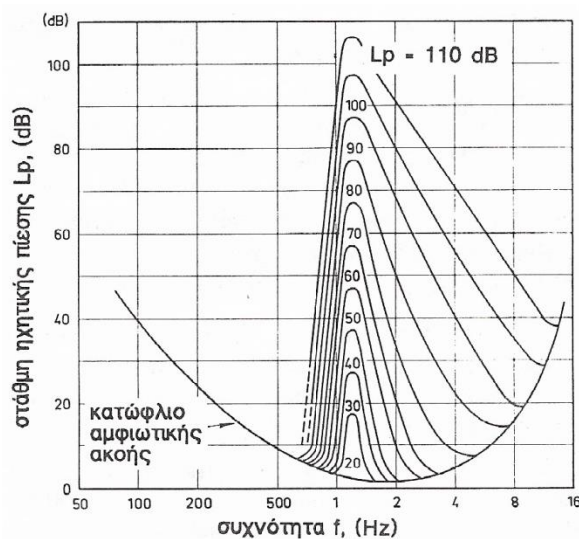


## 7.Θόρυβος περιβάλλοντος :

Ως θόρυβος περιβάλλοντος ορίζεται το σύνολο των αερόφερτων ήχων που παράγονται από πολλές πηγές κοντινές ή μακρινές σε δοσμένο περιβάλλον, οι οποίοι περνάνε συνήθως απαρατήρητοι (πχ ο κλιματισμός)

## 8.Επικάλυψη:

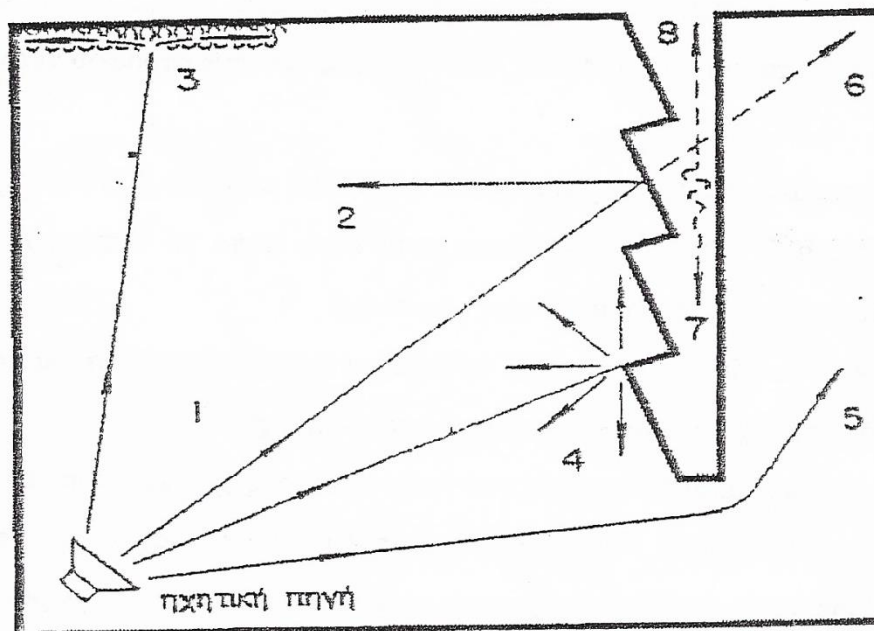
Επικάλυψη είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το κατώφλι ακοής ενός ήχου ανυψώνεται λόγω της παρουσίας ενός άλλου ήχου. Με άλλα λόγια, είναι η αύξηση, εκφρασμένη σε ντεσιμπέλ, του κατωφλίου ακοής ενός ήχου που οφείλεται στην παρουσία ενός άλλου ήχου.



Εικόνα(1.3.9)Επικάλυψη, εξάρτηση του φαινομένου της επικάλυψης από τη στάθμη ηχητικής πίεσης τόνου. (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ11)

Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει πολύ συχνά σε χώρους ακροατηρίου όπου ο ακουστικός σχεδιασμός είναι ανεπαρκής και πιο συγκεκριμένα υπάρχει επικάλυψη μουσικής και ομιλίας από θορύβους αεραγωγών και κυκλοφορίας. Ήχοι χαμηλών συχνοτήτων και μεγάλης έντασης επικαλύπτουν αρκετά ήχους υψηλότερων συχνοτήτων. Μέγιστη επικάλυψη εμφανίζεται από ήχο υψηλής έντασης σε ήχο ίδιας συχνότητας με χαμηλότερη ένταση. Ήχοι υψηλών συχνοτήτων επικαλύπτουν ελάχιστα ήχους χαμηλότερων συχνοτήτων.

## Σχηματική αναπαράσταση των ακουστικών φαινομένων σε κλειστούς χώρους:



Σχηματική αναπαράσταση των φυσικών φαινομένων που δημιουργούνται στα ηχητικά κύματα μέσα σε κλειστούς χώρους.

Εικόνα(1.3.4)(σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης.σελ 32)

Επεξήγηση των αριθμών της εικόνας:

### 1. Απευθείας ήχος

Ο ήχος που παράγεται από την ηχητική πηγή.

### 2. Ανάκλαση

Το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων επιστρέφει από αυτή με γωνία, ως προς την κάθετο, ίση με τη γωνία με την οποία προσπίπτει .

### 3. Απορρόφηση από τον αέρα- $RT_{60}$

Η πτώση της στάθμης του ήχου αφότου διακοπεί η πηγή οφείλεται σε 3 παράγοντες:

-την απόσταση από την πηγή (σε ελεύθερο πεδίο -6db)

- την απορρόφηση από τα τοιχώματα ή άλλα αντικείμενα ( $\bar{\alpha}$ )
- την απορρόφηση από τον αέρα ( $\bar{m}$ , για πολύ μεγάλους χώρους)

Για θέατρα λοιπόν πρέπει να συμπεριληφθεί και ο 3<sup>ος</sup> παράγοντας, η απορρόφηση δηλαδή που οφείλεται από τον αέρα, ο τύπος λοιπόν γίνεται:

$$RT_{60} = \frac{0.161 * V}{A + 4 * m * V}$$

όπου  $m$  ο συντελεστής εξασθένησης στον αέρα (αδιάστατο μέγεθος)

Η απορρόφηση στον αέρα εξαρτάται από την θερμοκρασία του, τη σύσταση του, το σχηματισμό σταγονιδίων νερού (υγρασία) και τη συχνότητα του ήχου. Γίνεται αισθητή στις μεσαίες και υψηλότερες συχνότητες  $f \geq 2\text{kHz}$

Η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα είναι μοριακό φαινόμενο και έχει να κάνει με τις ενεργειακές στάθμες ταλάντωσης των μορίων υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα.

Όταν στο χώρο υπάρχουν ακροατές, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απορρόφησή τους. Αν υποθέσουμε ότι  $\alpha_{\text{ατομ}}$  είναι η απορρόφηση κάθε ατόμου (το γινόμενο του εμβαδού του επί τον συντελεστή απορρόφησης του) οι χρόνοι αντήχησης καταλήγουν :

$$T_{60} = \left( \frac{0.161 * V}{A_N + 4mV + N\alpha_{\text{ατομ}}} \right), \quad T_{60} = \left( \frac{0.161 * V}{A_S + 4mV + N\alpha_{\text{ατομ}}} \right),$$

όπου  $N$  ο αριθμός των ατόμων.

#### 4. Διάχυση

Ο ήχος που πέφτει πάνω σε ένα “διαχυτή” διασπάται ομοιόμορφα σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια ηχητική ένταση.

## 5.Περίθλαση

Η αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης που συμβαίνει κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (πχ παράκαμψη ηχητικών κυμάτων ενός τοίχου)

## 6. Διάδοση

Ο ήχος διαδίδεται από τοίχο σε τοίχο

## 7. Διασπορά του ήχου μέσα στην κατασκευή

## 8. Διάδοση του ήχου μέσα στην κατασκευή

## 1.4 Ηχητικά πεδία

Κατηγορίες πεδίων :

### 1.Ελεύθερο πεδίο (free field)

Ένα πεδίο λέγεται ελεύθερο (free field) αν είναι ομοιόμορφο, ελεύθερο από οριακές επιφάνειες και αδιατάραχτο από άλλες πηγές. Στην πραγματικότητα είναι ένα πεδίο όπου οι οριακές επιφάνειες επηρεάζουν πάρα πολύ λίγο την περιοχή του ενδιαφέροντος. Η ροή της ενέργειας γίνεται προς μια κατεύθυνση. Οι ανηχοϊκοί θάλαμοι και αρκετά ψηλά από το έδαφος εξωτερικά περιβάλλοντα είναι ελεύθερα πεδία.

### 2.Ελεύθερο Πεδίο- Νόμος του αντίστροφου τετραγώνου

Η μείωση της ηχητικής στάθμης πίεσης ενός ελεύθερου πεδίου περιγράφεται από τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Η μεταβολή στην ηχητική στάθμη πίεσης είναι 6 dB μείωση για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την σημειακή πηγή ήχου :

$$L_{p(M)} = L_{p(r)} - 20 \log \left( \frac{D(M)}{Dr} \right) \quad (1.4.2\alpha)$$

όπου:

$L_{p(M)}$  : η στάθμη ηχητικής πίεσης στο σημείο M

$L_{p(r)}$  : η στάθμη ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο αναφοράς r

$D_{(M)}$  : η απόσταση από την πηγή ως το σημείο M

$D_{(r)}$  : η απόσταση από την πηγή ως το σημείο αναφοράς r

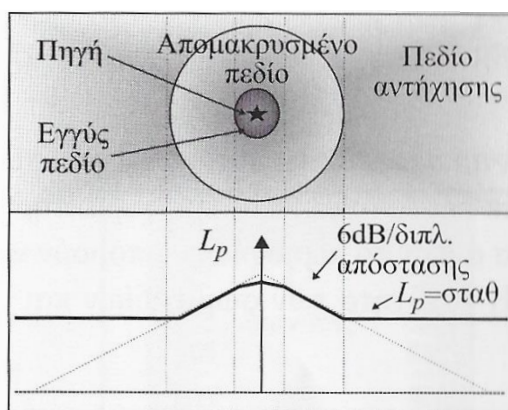
Σε περίπτωση που το σημείο αναφοράς r βρίσκεται σε απόσταση  $D_r = 1\text{ m}$  (συνήθης στα χαρακτηριστικά των ηχείων) ο παραπάνω τύπος απλοποιείται :

$$L_{p(M)} = L_{p(1m)} - 20\log(D_M) \quad (1.4.2.\beta)$$

### 3.Αντηχητικά πεδία (reverberantFields)

Το αντηχητικό πεδίο (reverberant field) είναι αυτό που προέρχεται από την συμβολή των απευθείας και ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. Το πεδίο αυτό έχει σχεδόν σταθερή πυκνότητα ακουστικής ενέργειας. Το αντηχητικό πεδίο σε ένα ολικά ή μερικά κλειστό χώρο όπου λειτουργεί μια ηχητική πηγή είναι η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου που προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στις περατωτικές επιφάνειες του χώρου και στην οποία η επίδραση του ήχου που φτάνει κατευθείαν από την πηγή είναι αμελητέα.

Σε ένα αντηχητικό πεδίο ο χρονικός μέσος όρος του τετραγώνου της πίεσης είναι παντού ο ίδιος. Η ροή της ενέργειας σε όλες τις διευθύνσεις έχει ίση πιθανότητα. Αυτό συμβαίνει σε ένα κλειστό χώρο όπου δεν υπάρχει απορρόφηση. Η ηχητική στάθμη πίεσης του αντηχητικού πεδίου συμβολίζεται  $L_R$ .



Εικόνα(1.4.3) κοντινό – μακρινό και πεδίο αντήχησης. (Σκαρλάτος – Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.162)

#### 4. Ημι-αντηχητικό πεδίο (Semi-Reverberant Field)

Το ημι-αντηχητικό πεδίο (semi-reverberant field) είναι το αντηχητικό πεδίο που επικρατεί σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με επιφάνειες που έχουν μέτρια ηχοανακλαστικότητα. (ΕΛΟΤ 556.1)

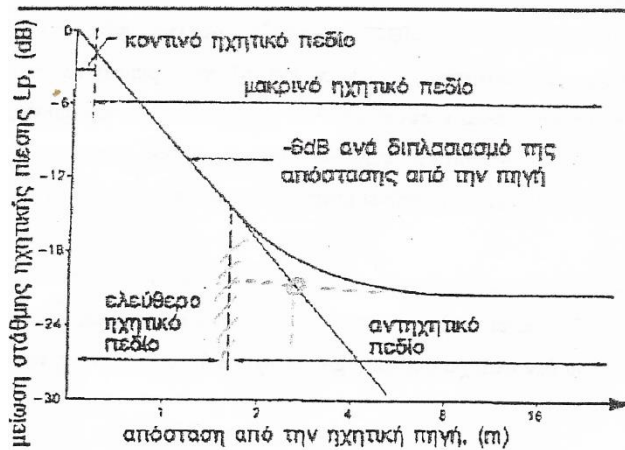
Σε ένα ημιαντηχητικό πεδίο η ηχητική ενέργεια ανακλάται και απορροφάται. Η ροή της ενέργειας έχει περισσότερες από μια κατευθύνσεις. Η περισσότερη ενέργεια προέρχεται πραγματικά από το αντηχητικό πεδίο. Ωστόσο υπάρχουν συστατικά του πεδίου τα οποία έχουν ορισμένη κατεύθυνση διάδοσης από την πηγή του ήχου. Το ημιαντηχητικό πεδίο είναι αυτό που υπάρχει στην πλειοψηφία των αρχιτεκτονικά ακουστικών περιβαλλόντων.

#### 5. Κοντινό ηχητικό πεδίο (Near Field)

Το κοντινό ηχητικό πεδίο (Near Field) μιας πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση. Η έκταση του κοντινού ηχητικού πεδίου εξαρτάται από τον τύπο της πηγής και το μήκος κύματος.

#### 6. Μακρινό ηχητικό πεδίο (Far Field)

Το μακρινό ηχητικό πεδίο (far field) μιας πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι ουσιαστικά σε φάση.



Διακύμανση της στάθμης ηχητικής πίεσης μέσα σε ένα θάλαμο αντηχήσεων

Εικόνα(1.4.6) Διακύμανση της στάθμης ηχητικής πίεσης μέσα σε θάλαμο αντηχήσεων. (σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης. σελ 26)

### 1.5 Κρίσιμη απόσταση

Σε ένα δωμάτιο υπάρχουν δυο ηχητικά πεδία ,το απευθείας και το αντηχητικό.

Το συνολικό πεδίο είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω πεδίων. Η συνολική ηχητική στάθμη  $L_T$  σε ένα σημείο μέσα στο δωμάτιο θα είναι :

$$L_T = L_D + L_R \quad (1.5.1)$$

Όπου  $L_D$  το απευθείας (direct) ηχητικό πεδίο

$L_R$  το αντηχητικό (reverberant) ηχητικό πεδίο

Κοντά στην ηχητική πηγή θα υπερισχύει το απευθείας πεδίο , ενώ μακριά από την πηγή το αντηχητικό πεδίο. Η στάθμη του συνολικού ηχητικού πεδίου είναι 3 dB ψηλότερα από τη στάθμη του αντηχητικού ή τη στάθμη του απευθείας. Η απόσταση αυτή από την πηγή στην οποία  $L_D = L_R$  , ονομάζεται κρίσιμη απόσταση (critical distance)  $D_c$ . Μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση θεωρώντας το απευθείας ηχητικό πεδίο ίσο με το αντηχητικό ,δηλαδή :

$$Q = \frac{Q}{4\pi D_c^2} = \frac{4}{S_a} \quad (1.5.2)$$

Όπου  $Q$  ο παράγοντας κατευθυντηκότητας για την ηχητική πηγή

$S_a$  η αντίστοιχη απορρόφηση

Λύνοντας ως προς  $D_c$ , η κρίσιμη απόσταση δίνεται από την εξίσωση :

$$D_c = 0.141\sqrt{QS_a} \quad (1.5.3)$$

Συνδυάζοντας με την εξίσωση του Sabine παίρνουμε την (1.3.5.γ2), μία πιο χρήσιμη εξίσωση που συμπεριλαμβάνει τον χρόνο αντήχησης ( $RT_{60}$ ) και τον όγκο ( $V$ ) του δωματίου.

$$D_c = 0.057 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}} \quad (1.5.4)$$

## 1.6 Σύγκριση μικρών- μεγάλων δωματίων

Τα δωμάτια μπορούν να χωριστούν σε δύο ακουστικές κατηγορίες – τα μεγάλα και τα μικρά. Η μελέτη των μεγάλων δωματίων γίνεται με τις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής, ενώ τα μικρά δωμάτια μελετούνται με τις αρχές της κυματικής ακουστικής. Ο Manfred Schoeder όρισε την συχνότητα ενός μεγάλου δωματίου ( $f_c$ ), σαν τη συχνότητα πάνω από την οποία μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων του δωματίου (room modes) θα δημιουργούνται στην συχνότητα της πηγής:

$$f_c = K \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (1.6.1)$$

Όπου:  $f_c$  η συχνότητα ενός μεγάλου δωματίου

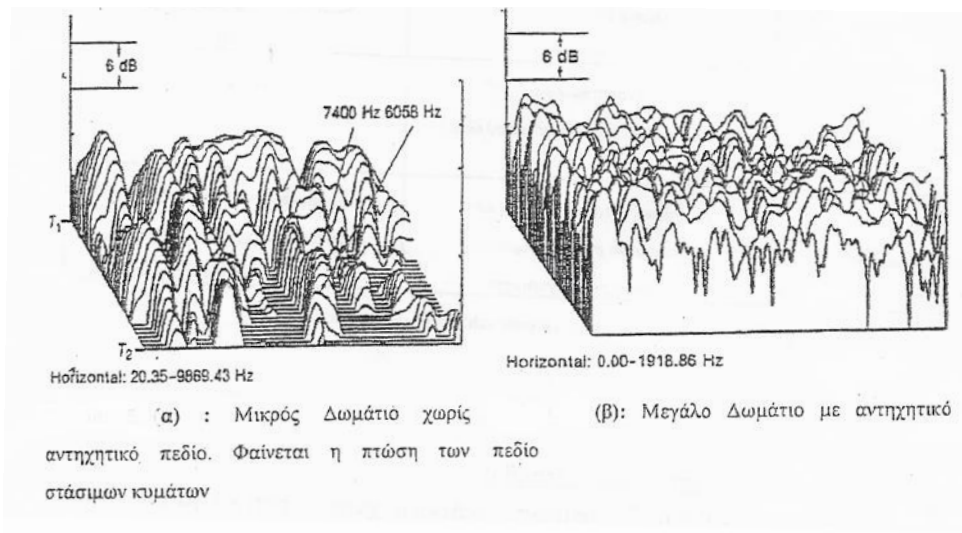
$K$  2000 SI και 11885 U.S

$RT_{60}$  ο χρόνος αντήχησης δωματίου σε sec.

$V$  ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα ή κυβικά πόδια

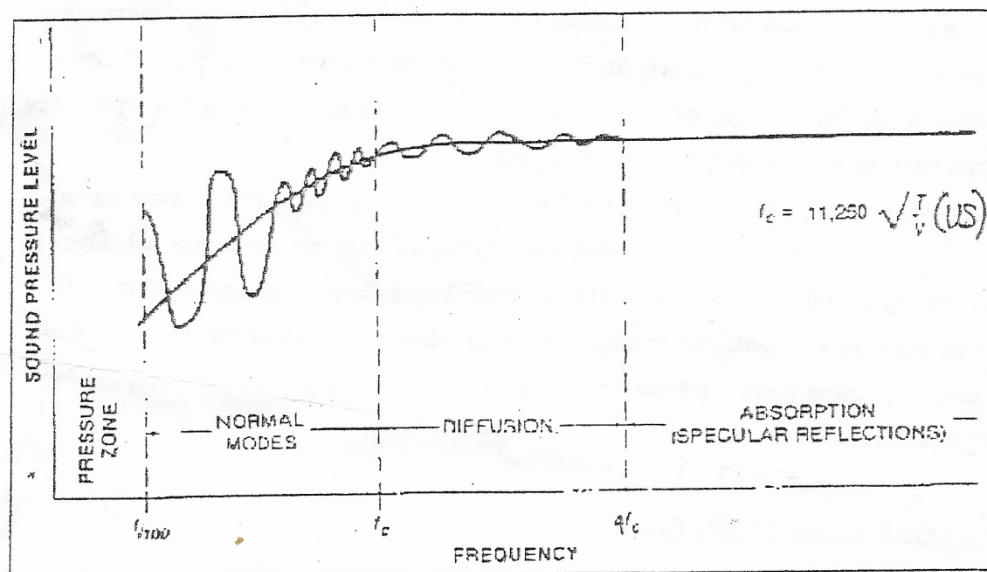
Η εξίσωση αυτή δείχνει πάνω από πια συχνότητα  $f_c$  ένα δωμάτιο με συγκεκριμένο όγκο  $V$  και χρόνο αντήχησης  $RT_{60}$  συμπεριφέρεται ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες.



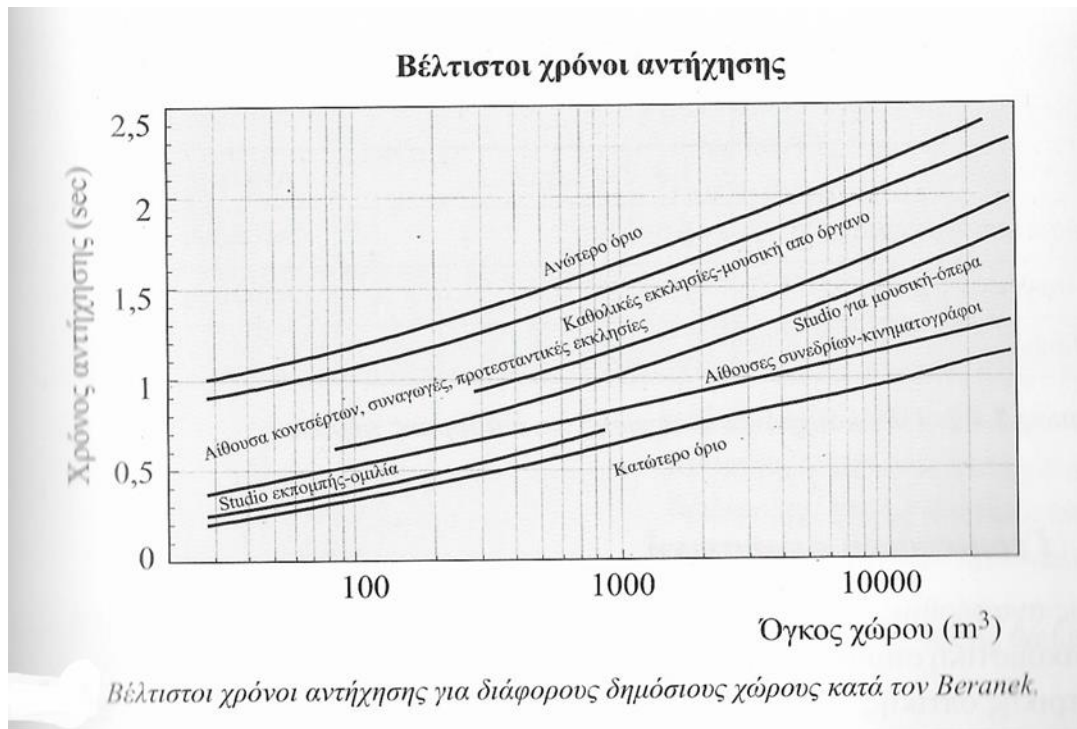


Εικόνα(1.6.1.α)Στάθμη έντασης συναρτήσει της συχνότητας και του χρόνου( σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης. σελ 69)

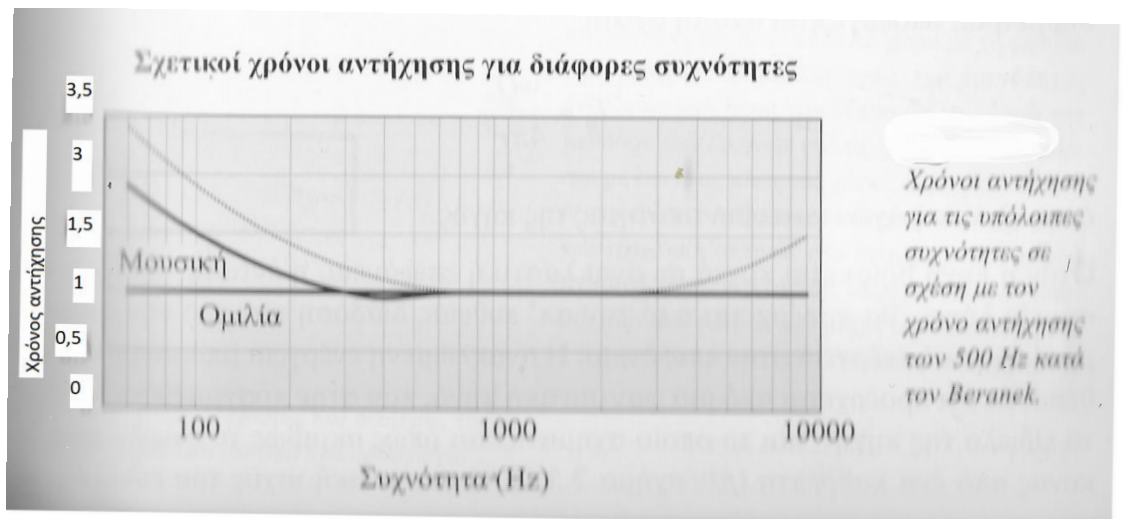
Οι Bolt, Beranek και ο Newman δημιούργησαν ένα διάγραμμα το οποίο ονομάζεται ελεγκτής της σταθερής-κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου:



Εικόνα(1.6.1.β)(σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης. σελ 37)



Εικόνα(1.6.1.c)Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης κατά τον Beranek για διάφορους δημόσιους χώρους. (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.189)



Εικόνα(1.6.1.d)χρόνοι αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με το χρόνο αντήχησης των 500Hz κατά Beranek. ( Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.189)

### 1.6.2 Συγκρίσεις και σχόλια για μικρά και μεγάλα δωμάτια:

- Ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων σε ένα μεγάλο δωμάτιο είναι πολύ μεγάλος έτσι η κατανομή του ηχητικού πεδίου είναι ομοιόμορφη. Ενώ σε ένα μικρό δωμάτιο για την ίδια συχνότητα της ηχητικής πηγής υπάρχει μικρός αριθμός στάσιμων κυμάτων.
- Το ηχητικό πεδίο στα μεγάλα δωμάτια είναι ομοιόμορφο σε όλο το δωμάτιο, έτσι ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες, πολλά στάσιμα κύματα δημιουργούν το πεδίο, και η ηχητική ενέργεια φέρεται από πολλά στάσιμα κύματα. Στα μικρά δωμάτια σε χαμηλές συχνότητες υπάρχει μικρός αριθμός στάσιμων κυμάτων, έτσι το πεδίο είναι διαφορετικό στην μέση και στην άκρη του δωματίου. Δηλαδή αν  $f_{\text{πηγής}}$ , η συχνότητα της πηγής μέσα στο δωμάτιο, διεγείρονται όλα τα στάσιμα κύματα με ιδιοσυχνότητες μικρότερες από  $f_{\text{πηγής}}$ , ( $f_n \leq f_{\text{πηγής}}$ ). Άρα το πεδίο εξαρτάται από τα στάσιμα κύματα που υπάρχουν στο δωμάτιο.
- Μεγάλα δωμάτια -> ομοιογενή / Μικρά δωμάτια -> ανομοιογενή
- Εξαιτίας της ομοιογένειας στα μεγάλα δωμάτια και τις ανομοιογένειας στα μικρά τα μεγάλα χαρακτηρίζονται από χρόνο αντήχησης  $RT_{60}$ , ενώ στα μικρά δωμάτια εφαρμόζεται ρυθμός μείωσης του στάσιμου κύματος DB-persec σε συγκεκριμένη συχνότητα.

Ιδιότητα	Μικρά Δωμάτια	Μεγάλα Δωμάτια
Θεωρία	Κυματική θεωρία	Γεωμετρική Ακουστική (Στατιστική)
Όγκος	Μικρός (Διαστάσεις Παρόμοιες με το μήκος κύματος λ των χαμηλών ακουστικών συχνοτήτων)	Μεγάλος
Το κλειστό Ηχητικό πεδίο μειώνεται	Ρυθμός Πτώσης στάσιμων κυμάτων ( <i>Mode Decay Rate</i> ) [dB-per-sec]	Χρόνος Αντήχησης ( <i>Reverberation RT60</i> ) [sec]
Ηχητικό Πεδίο	Ανομοιόμορφο (Συντονισμός: κορυφές και κοιλάδες)	Ομοιόμορφο
Ενέργεια του ηχητικού πεδίου	Η ηχητική ενέργεια φέρεται από συγκεκριμένα στάσιμα κύματα σε διακεκριμένες συχνότητες.	Ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και τυχαία διεύθυνση της διάδοσης του ήχου

Πίνακας σύγκρισης μικρών και μεγάλων δωματίων.

Πίνακας(1.6.2.α) Πίνακας σύγκρισης μικρών και μεγάλων χώρων.  
(σημειώσεις θεωρία Μηχανικής Ήχου1 ,Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας  
και Ακουστικής, Χρήστος Κουτσοδημάκης. σελ 70)

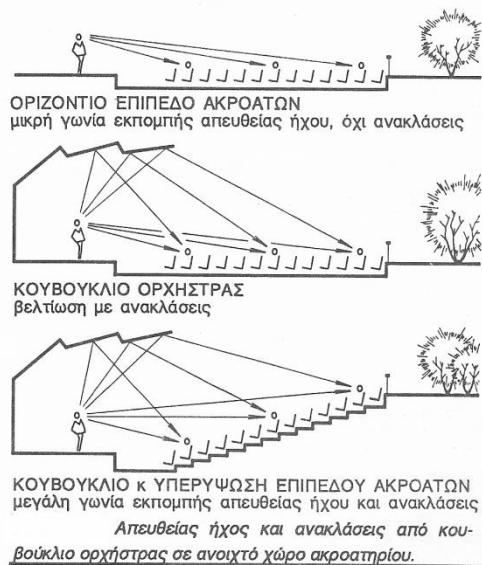
## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Ακουστική Κλειστών Χώρων

Η ακρόαση της μουσικής ή οι συνομιλίες πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο μέσα σε κλειστούς χώρους (σπίτι, κινηματογράφος, θέατρο, αίθουσες μουσικής). Κατά ένα μεγάλο ποσοστό οι χώροι αυτοί είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (παράλληλοι τοίχοι) και σε ένα μικρό ποσοστό έχουν διαφορετικό αρχιτεκτονικό σχήμα.

Ένας πρώτος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει για τους κλειστούς χώρους είναι οι μεγάλοι και οι μικροί κλειστοί χώροι (δωμάτια). Αυτή η βασική κατηγοριοποίηση έχει σαν συνέπεια την διαφορετική αντιμετώπιση στη μελέτη ενός κλειστού χώρου. Άλλη μια εμπειρική παρατήρηση είναι ότι οι χώροι με πολλά έπιπλα, χαλιά και κουρτίνες έχουν «ξερό» ήχο (dry), χωρίς όγκο και ηχώ, ενδεχομένως χωρίς πολύ ευχάριστο αποτέλεσμα για τη μουσική που παίζεται, αλλά ο συνομιλητής ακούγεται καθαρά. Ο χώρος αυτός λέμε ότι έχει μεγάλη απορρόφηση ή αλλιώς μικρή αντήχηση. Αντιθέτως, χώροι χωρίς έπιπλα και χαλιά, σχεδόν άδειοι, έχουν αντήχηση (ζωντανοί χώροι). Δηλαδή, ακούμε τη μουσική ή την ομιλία και στους ήχους υπάρχει κάποια ηχώ (μια διάρκεια η οποία αποσβένει).

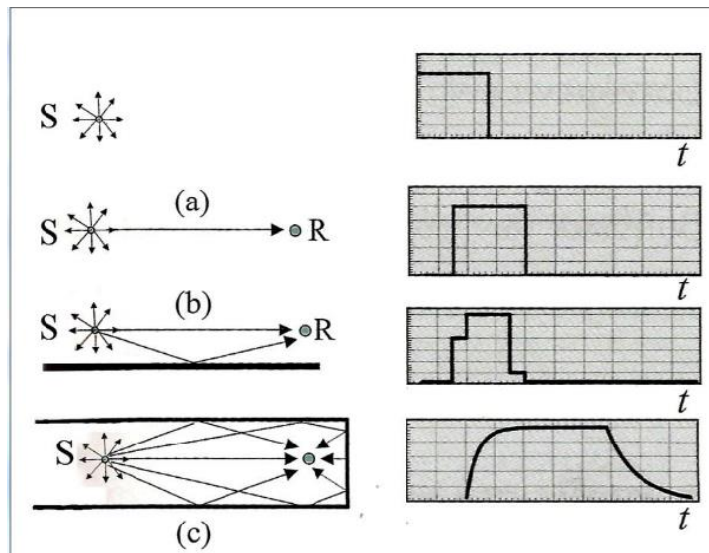
Έστω ότι έχουμε μια ηχητική πηγή σε ένα κλειστό χώρο. Ο ήχος που ακούμε αποτελείται από τον απευθείας ήχο (direct), ο οποίος έρχεται στα αυτιά μας κατευθείαν από την πηγή καθώς και από την αντήχηση (reverberation). Η αντήχηση είναι ο ήχος που φτάνει στα αυτιά μας με κάποια χρονική καθυστέρηση, έχοντας ταξιδέψει από την πηγή στους τοίχους όπου ανακλάται και μετά φτάνει στα αυτιά μας. Στα δωμάτια δηλαδή, δεν υπάρχει μόνο ο ήχος που παράγεται από την πηγή, αλλά και το αντηχητικό πεδίο που παράγεται από τις ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους. Σε μερικές περιπτώσεις π.χ. σε μεγάλες αίθουσες που παίζεται ζωντανά μουσική, η αντήχηση είναι επιθυμητή, καθώς και ελεγχόμενη. Σε άλλες περιπτώσεις όμως η αντήχηση δεν είναι ελεγχόμενη, με αποτέλεσμα να δημιουργεί πρόβλημα στους ακροατές.



Εικόνα(2.1.1) (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 39)

### 2.1.2 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους

Ο ήχος, όταν διαδίδεται σε κλειστούς χώρους συμπεριφέρεται διαφορετικά απ'ότι όταν διαδίδεται σε ανοιχτούς. Στους ανοιχτούς χώρους ο ήχος φθάνει απευθείας από την πηγή στον δέκτη, ενώ σε κλειστούς χώρους, ο ήχος εκτός από την απευθείας διάδοση, φθάνει στον δέκτη μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του χώρου, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η αρχική κυματομορφή του εκπεμπόμενου ήχου. (Εικόνα 2.1.2) Στο σχήμα η πηγή εκπέμπει έναν τετραγωνικό παλμό. Στα διαγράμματα δεξιά φαίνεται η έκφραση της λήψης σε απευθείας διάδοση (α), μετά από ανάκλαση από μια επιφάνεια (b), και σε έναν κλειστό χώρο (c). Βασικό ρόλο στην ακουστική συμπεριφορά των κλειστών χώρων παίζει η απορρόφηση του ήχου και οι διαστάσεις του χώρου.



Εικόνα(2.1.2)(a)εκπομπή ηχητικής ενέργειας σε ελεύθερο χώρο από πηγή,(b)πάνω από ανακλαστική επιφάνεια,(c)σε κλειστό χώρο( Σκαρλάτος – Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 137)

Στο σχήμα φαίνονται οι καθυστερήσεις των ανακλώμενων ακτίνων καθώς και η αύξηση της τελικής στάθμης.

## 2.2 Ακουστική Μεγάλων Κλειστών Χώρων

Η αρχιτεκτονική ακουστική είναι μια σχετικά πρόσφατη επιστήμη και έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια. Ιστορικά, ο νεαρός φυσικός W. C. Sabine το 1898 στο Πανεπιστήμιο του Harvard είχε τελειώσει την έρευνά του με θέμα τους κλειστούς χώρους, βελτιώνοντας έτσι την ακουστική της αίθουσας διδασκαλίας Fogg Art Museum. Ήταν η πρώτη φορά ουσιαστικά που η ακουστική αντιμετωπίστηκε με επιστημονικό τρόπο. Ο Sabine, χρησιμοποιώντας μαξιλαράκια των θέσεων ενός θεάτρου σαν φορητούς απορροφητές, σφυρίχτρες σαν ηχητικές πηγές και ένα χρονόμετρο, κατέληξε σε μια σχέση μεταξύ του όγκου του δωματίου και της απορρόφησης που χρειάζεται για συγκεκριμένο χρόνο αντήχησης.

Ένας χώρος θεωρείται μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι τουλάχιστον δυο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που μας ενδιαφέρει. Ο ίδιος χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν οι αποστάσεις των επιφανειών που ορίζουν το χώρο είναι τόσο μεγάλες, ώστε η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα να είναι σημαντική. Για παράδειγμα, ένας χώρος 2x2x2m θεωρείται μικρός για συχνότητα 100 Hz ενώ θεωρείται μεγάλος για συχνότητα 1000 Hz. Μικρός χώρος μπορεί να θεωρηθεί ένα μικρό δωμάτιο σε χαμηλές συχνότητες. Μεγάλος χώρος

μπορεί να θεωρηθεί μια αίθουσα διδασκαλίας και πολύ μεγάλος χώρος ένα θέατρο.

Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι μελέτης της ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων :

- Η κυματική ακουστική : Με τη μέθοδο αυτή 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 κι αυτό γιατί τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ “μπλεγμένα”.
- Η γεωμετρική ακουστική : Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλους χώρους και οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια των τύπων της γεωμετρικής ακουστικής.

### 2.3 Κριτήρια για καλή ακουστική χώρων

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

- Ο ήχος φθάνει σε όλα τα σημεία του χώρου χωρίς αισθητή μείωση και έχοντας παντού την ίδια κατανομή.
- Δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης (ή είναι περιορισμένο).
- Υπάρχει βέλτιστος ρυθμός μείωσης με αποτέλεσμα την καθαρότητα της συνομιλίας και την βελτίωση της μουσικής. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι στις καλύτερες αίθουσες μουσικής η τιμή του RT για τις μέσες συχνότητες ήταν μεταξύ 1.3 και 1.6 sec. Για τον EDT (Early Decay Time ή Βέλτιστος Ρυθμός Μείωσης) η καλύτερη τιμή είναι 1.7 sec.
- Δεν υπάρχουν δυσάρεστες καταστάσεις όπως ηχώ, ηχητικές σκιές, ηχητικές συγκεντρώσεις, ηχητικές παραμορφώσεις.
- Ο χώρος να διαθέτει επαρκή ηχομόνωση. Σύμφωνα με τον Beranek, η τιμή του εισερχόμενου θορύβου θα πρέπει να είναι μικρότερη από 18 dB.



## 2.4 Παράμετροι καλής ακουστικής ποιότητας

Η μέτρηση των παραμέτρων που περιγράφουν την ακουστική των κλειστών χώρων ανάγεται στη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου. Η κρουστική απόκριση είναι η απόκριση του χώρου που μετρείται με ένα μικρόφωνο, ενώ ο χώρος διεγείρεται από έναν κρουστικό ακουστικό παλμό ή αλλιώς έναν ήχο με πολύ υψηλή στάθμη.

Η καλή ακουστική ενός χώρου περιγράφεται με διάφορες ποσότητες που ονομάζονται δείκτες ακουστότητας και περιγράφονται παρακάτω.

-Ηχώ

Αν σε έναν κλειστό χώρο που βρίσκεται μια πηγή και εκπεμφθεί ένας ήχος, ο ήχος αυτός γίνεται αμέσως ακουστός από κάποιον που βρίσκεται στον ίδιο χώρο. Αν αμέσως μετά ακουστεί το ανακλώμενο σήμα σαν ξεχωριστό ηχητικό γεγονός, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηχώ.

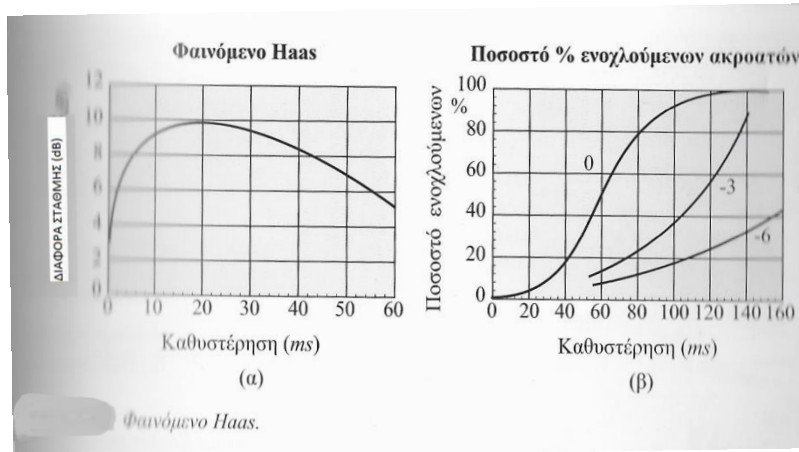
Η ηχώ διαφέρει τελείως από την αντήχηση, κατά την οποία η ανάκλαση δεν διακρίνεται από τον απευθείας διαδιδόμενο ήχο, σαν ξεχωριστό γεγονός. Η ηχώ αντίθετα από την αντήχηση, η οποία είναι επιθυμητή στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι ανεπιθύμητη γιατί καταστρέφει την καλή ακουστική των χώρων, μιας και η επικοινωνία γίνεται δύσκολη η αλλοιώνεται ο μουσικός ρυθμός. Η εμφάνιση της ηχούς δεν εξαρτάται μόνο από την χρονική καθυστέρηση των ανακλώμενων ήχων σε σχέση με τους απευθείας διαδιδόμενους, αλλά και άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η κατεύθυνση πρόσπτωσης σε σχέση με την ανακλώμενη, η στάθμη της ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας κλπ.

Το φαινόμενο της ηχούς παρουσιάζεται όταν η ανάκλαση σε σχέση με τον απευθείας ήχο καθυστερεί τουλάχιστον κατά 100 ms. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι η ταχύτητα του ήχου είναι 340 m/sec σημαίνει ότι για να υπάρξει αυτό το φαινόμενο σε κλειστό χώρο θα πρέπει μια διάσταση του χώρου να είναι από 17 μέτρα και πάνω.

-Φαινόμενο Haas

Το φαινόμενο της ηχούς μπορεί να παρατηρηθεί και για μικρότερες καθυστερήσεις των 100ms για μουσική και 40ms για ομιλία, αρκεί αυτοί οι καθυστερημένοι ήχοι να έχουν μεγαλύτερη στάθμη από τον αρχικό σήμα κατά 10dB. Γεγονός το οποίο μπορεί να συμβεί όταν ο δευτερογενής ήχος

δεν προέρχεται από ανάκλαση αλλά από αναπαραγωγή μέσω μιας μεγαφωνικής εγκατάστασης, ενώ όταν η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη των 100ms το φαινόμενο υπάρχει ανεξάρτητα από την στάθμη του καθυστερημένου ήχου. Εάν η ένταση αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη τότε απλώς ενισχύεται το απευθείας σήμα και αυτές οι πρώτες ανακλάσεις ορίζονται σαν PreDelay.



Εικόνα(2.4.1)( Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 175)

-Πολλαπλή ηχώ (flutter echo)

Όταν στο χώρο υπάρχουν παράλληλες επιφάνειες (δάπεδο-οροφή) με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης, τότε ήχοι μικρής διάρκειας (παλμοί) όπως βηματισμοί στο δάπεδο προκαλούν επαναλαμβανόμενη ηχώ. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πολλαπλή ηχώ (flutter echo).

-Ηχητική συγκέντρωση

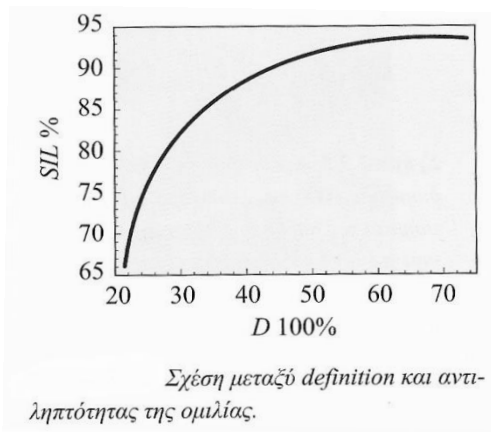
Ο ήχος εστιάζεται σε ορισμένα σημεία, με αποτέλεσμα στα σημεία αυτά η στάθμη πίεσης να παίρνει μεγάλες τιμές. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ακουστική συγκέντρωση. Σε ορισμένα σημεία που ονομάζονται νεκρά σημεία η στάθμη παίρνει αρκετά μικρές τιμές που ίσως να μην ακούγονται καθόλου. Κατά τον σχεδιασμό συνεπώς καμπύλων επιφανειών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο σχηματισμός ηχητικών συγκεντρώσεων.

-Ηχητική σκιά

Ένα άλλο φαινόμενο που επηρεάζει την ακουστική ενός χώρου είναι το φαινόμενο της ηχητικής σκιάς. Όταν ο ήχος συναντά εμπόδια πχ τοιχία με μεγαλύτερο μέγεθος από το μήκος κύματος (ήχοι με υψηλές συχνότητες), αφήνει πίσω απ'αυτά την γεωμετρική σκιά του με συνέπεια οι περιοχές αυτές να έχουν μειωμένη ηχητική στάθμη.

-Διακριτικότητα ,καθορισμός ή προσδιορισμός του ήχου (definition)

Είναι η αναλογία της “χρήσιμης” ηχητικής ενέργειας που φθάνει στον ακροατή στα πρώτα 50 msec σε σχέση με την συνολική ηχητική ενέργεια της ηχητικής πηγής που φθάνει στον ακροατή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτή, τόσο καλύτερη η διακριτικότητα.



Εικόνα(2.4.2) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 178)

-Πλουσιότητα (richness)

Είναι το χαρακτηριστικό του ήχου σε αμφιθέατρο, όπου σε αρκετά μικρό διάστημα φθάνουν πολλές επαναλήψεις και πολλές ηχοανακλάσεις.

-Ξηρότητα (dryness)

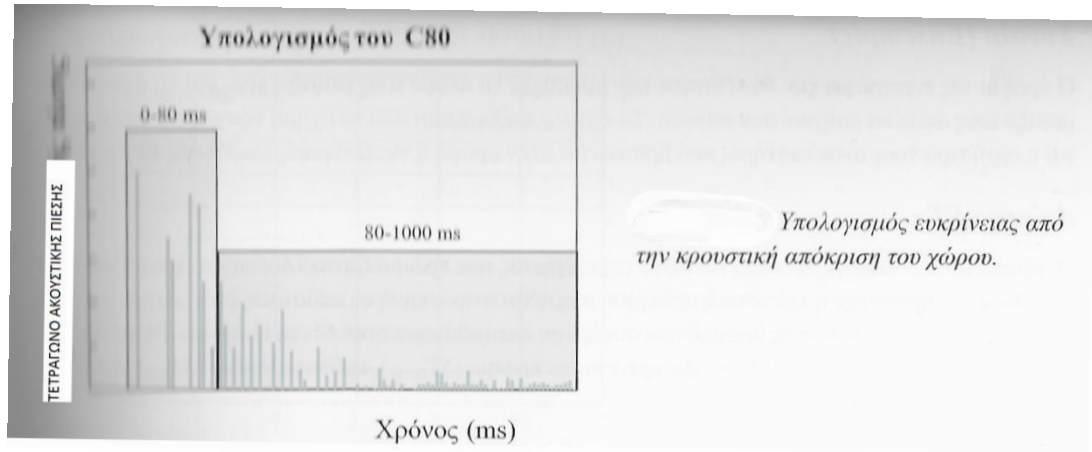
Είναι το αντίθετο της πλουσιότητας και αποτελεί το χαρακτηριστικό αίθουσας με μικρό χρόνο αντήχησης, μικρότερο από τον βέλτιστο.

-Οικειότητα (intimacy)

Είναι η εντύπωση σχετικά με την ποιότητα του ήχου ότι η ηχητική πηγή βρίσκεται πολύ κοντά. Ονομάζεται και παρουσία και ισχύει και για θέσεις μακριά της πηγής, οι οποίες όμως τροφοδοτούνται από πολύ κοντινό ανακλαστήρα.

### -Διαύγεια (clarity)

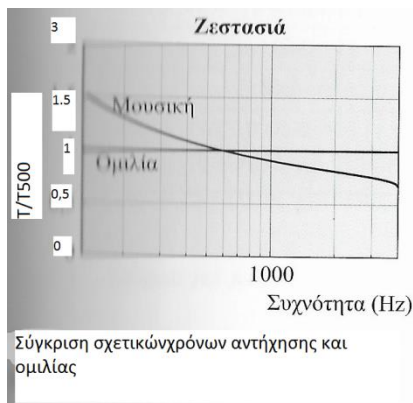
Είναι ο λογάριθμος της “χρήσιμης” ηχητικής ενέργειας που φθάνει στον ακροατή στα πρώτα 80 msec σε σχέση με την συνολική ηχητική ενέργεια της ηχητικής πηγής που φθάνει στον ακροατή. Πολύ ισχυρός απευθείας ήχος αντί ανακλάσεων παρέχει διαύγεια.



Εικόνα(2.4.3) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 179)

### -Ζεστασιά (warmth)

Ζεστασιά είναι το γέμισμα του χαμηλού τόνου σχετικά με τις μεσαίες συχνότητες.



Εικόνα(2.4.4) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.185)

### -Ζωντάνια (liveness)

Ζωντάνια είναι το γέμισμα του τόνου σχετικά με τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

-Λαμπρότητα (brilliance)

Λαμπρότητα είναι η ιδιότητα της αίθουσας για καθαρό ήχο με αρμονικές στις υψηλές συχνότητες.

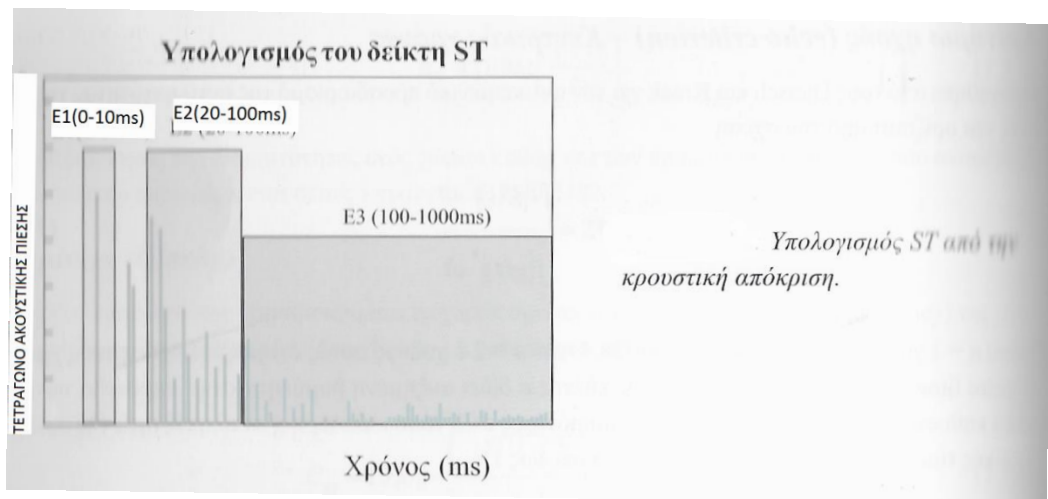
-Σύνολο (ensemble)

Ο όρος αυτός περιγράφει την δυνατότητα των μουσικών να ακούν τους εαυτούς τους και να ακούγονται μεταξύ τους ώστε να παίζουν σαν σύνολο. Το σύνολο καθορίζεται από το σχήμα του χώρου που βρίσκεται η ορχήστρα ή τις πλευρικές επιφάνειες της σκηνής.

-Δείκτης ST

Ο δείκτης ST υπολογίζεται από τον λόγο της ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων και του απευθείας διαδιδόμενου ήχου, όταν η κρουστική απόκριση μετρείται στην σκηνή σε απόσταση ενός μέτρου από την πηγή.

$$ST_{early} = \frac{E_2}{E_1} , ST_{late} = \frac{E_3}{E_1} , ST_{Total} = \frac{E_2 + E_3}{E_1}$$



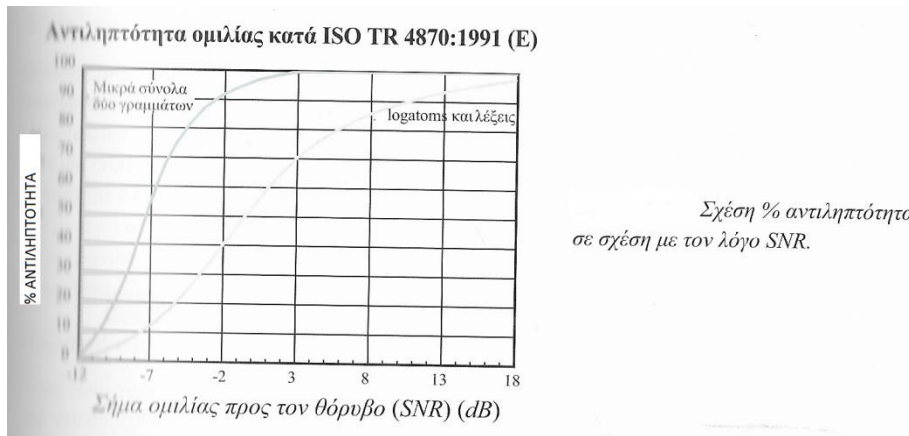
Εικόνα(2.4.5)(Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.180)

-Ισοστάθμιση και μείξη (balance and blend)

Οι όροι αυτοί αφορούν την διάταξη των οργάνων της ορχήστρας. Η τιμή των όρων αυτών όχι μόνο εξαρτάται από την ακουστική της αίθουσας, αλλά και από το είδος της μουσικής.

### -Αντιληπτότητα των συλλαβών (syllable intelligibility)

Η ποσότητα αυτή εκφράζει την “ποιότητα” της ομιλίας. Πιο συγκεκριμένα, η αντιληπτότητα της ομιλίας ορίζεται ως το ποσοστό του αριθμού των προτάσεων που γίνονται αντιληπτές από ένα μέσο ακροατή, προς το σύνολο των προτάσεων που εκφωνούνται κατά τη διάρκεια συνήθους συνομιλίας. Το ποσοστό αυτό κρίνεται ικανοποιητικό όταν το ποσοστό είναι τουλάχιστον 95%.

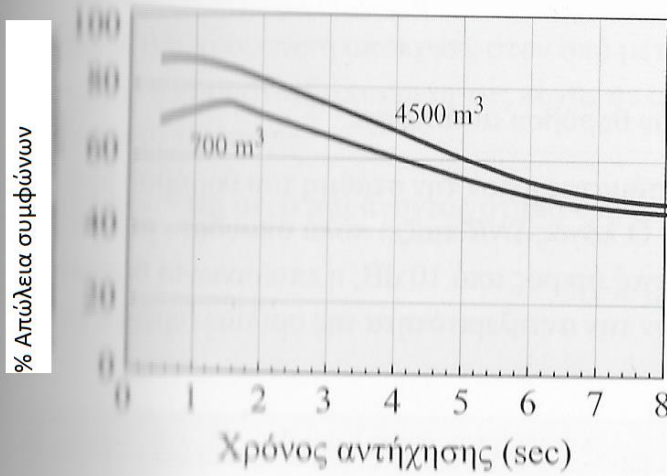


Εικόνα(2.4.6) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 181)

### -Απώλεια συμφώνων (articulation loss)

Η ποσότητα αυτή μετρά το ποσοστό των συμφώνων που δεν αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής.

### Απώλεια συμφώνων (AL) (Articulation Loss)

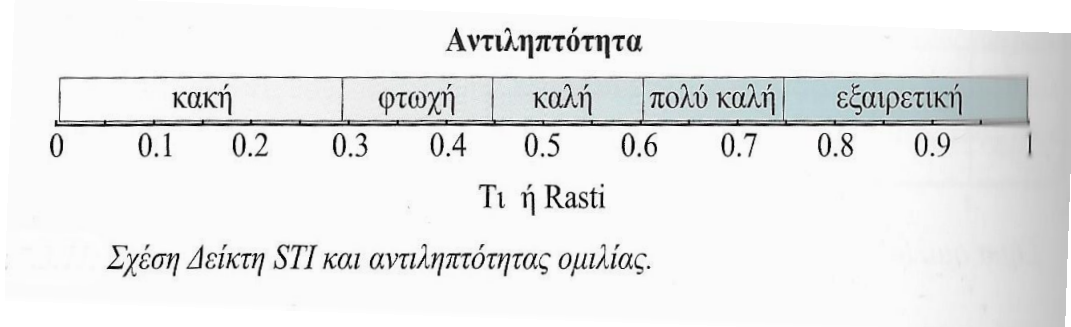


Σχέση AL και  $T_{60}$ .

Εικόνα(2.4.7) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ. 181)

### -Δείκτης STI-RASTI

Ο δείκτης STI (Speech Transmission Index) είναι ένας αντικειμενικός δείκτης που μετρά το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής, λαμβάνοντας υπόψη του ταυτόχρονα τον θόρυβο βάθους και τον χρόνο αντίληψης. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1.



Εικόνα(2.4.8) (Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.182)

-Λόγος σήματος προς θόρυβο(SNR)

$$SNR = 10 \log \frac{p_{sig}^2}{p_{noise}^2} = 10 \log \frac{\frac{p_{sig}^2}{p_{ref}^2}}{\frac{p_{noise}^2}{p_{ref}^2}}$$

$$= 10 \log \frac{p_{sig}^2}{p_{ref}^2} - 10 \log \frac{p_{noise}^2}{p_{ref}^2} = L_{sig} - L_{noise}$$

Λόγος σήματος προς θόρυβο (dB)	Αντηληπτότητα ομιλίας
<-6	Ανεπαρκής
-6 έως 3	Μη ικανοποιητική
-3 έως 0	Επαρκής
0 έως 6	Ικανοποιητική
6 έως 12	Καλή
12 έως 18	Πολύ καλό
>18	Εξαιρετική

Χαρακτηρισμός αντηληπτότητας ομιλίας ανάλογα με τον λόγο SNR

Πίνακας(2.4.9)( Σκαρλάτος –Εφαρμοσμένη ακουστική, έκδοση 4η σελ.182)

-Παράγοντας στιβαρότητας πηγής (strength factor)

Η στάθμη σε ένα σημείο ενός κλειστού χώρου προέρχεται αθροιστικά από τον απευθείας διαδιδόμενο ήχο και τον ήχο που προέρχεται από τις διαφορετικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του χώρου. Οι ανακλάσεις αυτές ενισχύουν τον ήχο, και η ενίσχυση αυτή εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του χώρου καθώς και τους συντελεστές απορρόφησης των διαφόρων επιφανειών. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ενίσχυσης αυτής χρησιμοποιούμε τον παράγοντα στιβαρότητας που προκύπτει αν από την συνολικά μετρούμενη στάθμη στον χώρο αφαιρέσουμε την στάθμη που αντιστοιχεί στην απευθείας διαδιδόμενη ηχητική ενέργεια.

-Ευρυχωρία (spaciousness)

Οι δείκτες που μετρούν την ευρυχωρία σχετίζονται με την χωρική εντύπωση, συνήθως χρησιμοποιούνται σε αίθουσες μουσικής και απαιτούν την ταυτόχρονη μέτρηση δυο κρουστικών αποκρίσεων.

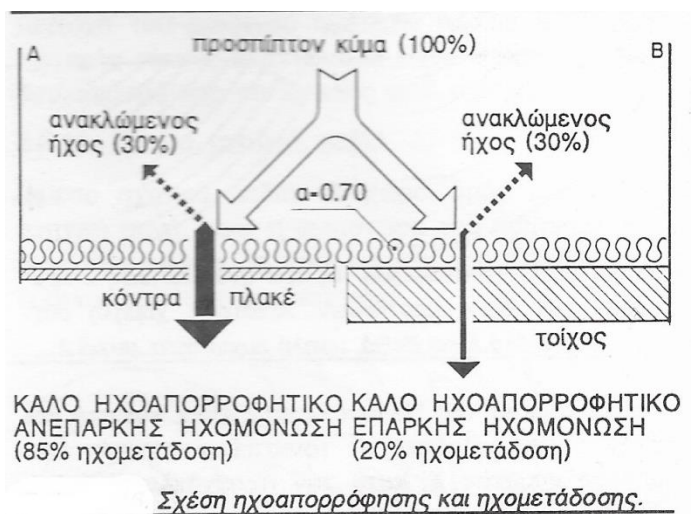


-Πλευρικές ανακλάσεις (LEF)

Ο δείκτης LEF (lateral energy fraction) εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας από τις πλευρικές ανακλάσεις που φθάνουν στον ακροατή τα πρώτα 80 ms, σε σχέση με την απευθείας ενέργεια που εκπέμπει η πηγή.

## 2.5 Ηχοαπορρόφηση και Ηχομόνωση

Ο θόρυβος συχνά δημιουργεί προβλήματα στην ακουστική ενός χώρου και συνεπώς δυσχεραίνει την επίτευξη του επιθυμητού ακουστικού αποτελέσματος. Η μείωση του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαδικασίας της ηχοαπορρόφησης και της ηχομόνωσης. Ηχοαπορρόφηση είναι η ιδιότητα των υλικών και αντικειμένων να απορροφούν την ηχητική ενέργεια και να την μετατρέπουν σε άλλη μορφή ενέργειας, κυρίως θερμότητα. Ηχομόνωση είναι το σύνολο των τεχνικών μεθόδων και υλικών που χρησιμοποιούνται για την προφύλαξη ενός χώρου από τους εξωτερικούς θορύβους, και όχι μόνο.



Εικόνα(2.5.1) (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 21)

### α) Θεωρητικά στοιχεία

Για να επιτύχουμε το επιθυμητό ακουστικό αποτέλεσμα σε χώρους θεατρικών παραστάσεων, και όχι μόνο, είναι απαραίτητο να εξαλείψουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τους ανεπιθύμητους θορύβους. Οι τοίχοι, η οροφή, το πάτωμα μιας αίθουσας βοηθούν στην εξασθένηση μη επιθυμητών ηχητικών συμβάντων, με άλλα λόγια μονώνουν τον εσωτερικό χώρο από τον εξωτερικό θόρυβο, καθώς επίσης εμποδίζουν την μετάδοση

του ήχου που υπάρχει στο εσωτερικό της αίθουσας προς τον εξωτερικό χώρο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 1) διπλασιάζοντας την απόσταση από την πηγή του θορύβου ελαττώνεται η στάθμη του θορύβου κατά 6 db περίπου (Κυριακάκης – Γιαννικάκης 1999 σελ.45, Everest 2003 σελ.161, Σκαρλάτος 2003 σελ.251). Η τοποθέτηση απορροφητικών υλικών ανάμεσα σε πηγή και δέκτη μειώνει σε μεγαλύτερο ποσοστό την στάθμη του θορύβου, δίχως να αυξήσουμε την απόστασή τους. Η αποδοτική μόνωση μιας κατασκευής επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο παραγωγής και διάδοσης του ήχου. Η ηχομόνωση ενός χώρου διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, από έξω προς τα μέσα και από μέσα προς τα έξω.

i. Από Έξω Προς Τα Μέσα

Σε πολλές περιπτώσεις οι χώροι που φιλοξενούν θεατρικές παραστάσεις, βρίσκονται κοντά σε δρόμους, ή σε σημεία όπου υπάρχει θόρυβος. Ένας τέτοιος χώρος λοιπόν, θα πρέπει να είναι προστατευμένος από τα εξωτερικά ηχητικά συμβάντα, διαφορετικά χάνεται η αρμονία και η ροή της παράστασης και αποσπάται η προσοχή του θεατή από το έργο.

Πράγμα το οποίο δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να συμβεί. Ένας πρώτος τρόπος αντιμετώπισης του ανεπιθύμητου εξωτερικού θορύβου είναι η βλάστηση. Θάμνοι και δέντρα συμβάλλουν στην ελάττωση του εξωτερικού θορύβου. Το είδος των δέντρων ή των φυτών και η πυκνότητα του φυλλώματός τους επηρεάζουν το ποσοστό απορρόφησης του ήχου.

Στη συνέχεια, ο εναπομείνας ανεπιθύμητος θόρυβος μπορεί να εισέλθει στον εσωτερικό χώρο από το πάτωμα, τους πλαϊνούς τοίχους, καθώς και από την οροφή. Ο τρόπος μετάδοσής του γίνεται μέσω του αέρα, μέσω των δομικών υλικών κατασκευής, και μέσα από ανοίγματα, αρμούς και σχισμές των τοιχωμάτων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των τοιχωμάτων, τόσο πιο δύσκολο είναι τα ηχητικά κύματα να τον δονήσουν. Η απορροφητικότητα ενός τοιχώματος είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου. Επίσης το είδος, και κατά κύριο λόγο η μάζα του υλικού, είναι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά το ποσοστό απορροφητικότητας του τοιχώματος.

Όσο η μάζα του υλικού αυξάνεται, τόσο καλύτερος είναι ο τοίχος σαν εμπόδιο στους εξωτερικούς θορύβους. Για να επιτύχουμε υψηλό δείκτη ηχομείωσης, θα πρέπει λοιπόν να αυξήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο την μάζα του υλικού που χρησιμοποιείται στα τοιχώματα. Επειδή, όμως αυτό έχει σαν συνέπεια την υπερβολική αύξηση του βάρους της κατασκευής, καταφεύγουμε στην χρήση διπλών και τριπλών τοιχωμάτων

που επιτυγχάνουν μεγάλους δείκτες ηχομείωσης και παράλληλα ελαφριές κατασκευές.

Για την πραγματοποίηση αποτελεσματικής ηχομόνωσης με την χρήση πολλών επιφανειών πρέπει να μονώσουμε ακουστικά και μηχανικά τις επιφάνειες αυτές (Σκαρλάτος 2003 σελ.284). Η ακουστική μόνωση αναφέρεται στη δημιουργία κενού μεταξύ των επιφανειών. Η μηχανική μόνωση αναφέρεται στην παρεμβολή απορροφητικών υλικών, όπως ανάμεσα στα τοιχώματα, στα σημεία στήριξης, με διαφορετική όμως σύσταση, και άλλα.

Ο θόρυβος με την μορφή δονήσεων (κτυπογενής θόρυβος) είναι πολύ δύσκολο να εξαλειφθεί., αφού διαδίδεται μέσω των συμπαγών υλικών και η εξασθένησή του είναι πολύ μικρή ακόμη και για μεγάλες αποστάσεις (λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του ήχου στα συμπαγή υλικά, από αυτή του αέρα). Όταν ο κτυπογενής ήχος κατά την πορεία του μέσα σε ένα υλικό, συναντήσει υλικό διαφορετικής σύστασης, τότε ένα μέρος από αυτόν ανακλάται στο προηγούμενο υλικό, ενώ ένα άλλο συνεχίζει στο δεύτερο. Έτσι, εφόσον αλλάζει η σύνθετη αντίσταση των υλικών μειώνεται ο διαδιδόμενος ήχος (Σκαρλάτος 2003 σελ.311).

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της αντίστασης του ενδιάμεσου υλικού τόσο μεγαλύτερη είναι η ηχομείωση. Συνήθως ανάμεσα σε σκληρά υλικά τοποθετούμε ελαστικές επιφάνειες για μονώσεις κραδασμών.

Για να επιτύχουμε πιο αποτελεσματική ηχομείωση έναντι των κτυπογενών θορύβων στα πατώματα, αυτά είτε θα πρέπει να είναι πλωτά, είτε να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως : χαλί, ξύλο, υαλοβάμβακας, λάστιχο, μπετόν (σε συνδυασμό). Επίσης, το πάτωμα πρέπει να διαχωρίζει την σκηνή από τον χώρο των ακροατών με μονωτικά υλικά έτσι ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά κραδασμών από το ένα μέρος στο άλλο. Αυτό προφυλάσσει την σκηνή από διάφορα προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν λόγω των κραδασμών που δημιουργούνται στο χώρο του ακροατηρίου και από την άλλη πλευρά συμβάλει στην άνεση των ακροατών. Όσο αναφορά την οροφή της αίθουσας, πρέπει να διαθέτει κατάλληλους συνδέσμους σε σχέση με τα πλαϊνά τοιχώματα έτσι ώστε να αποφεύγονται οι ηχογέφυρες.

Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μόνωση της οροφής είναι : μπετόν, λάστιχο, υαλοβάμβακας, γυψοσανίδα κ. α. (Σκαρλάτος 2003 σελ.317).

Οι κλειστοί χώροι, εκτός από τα τοιχώματα, περιλαμβάνουν επίσης παράθυρα και πόρτες μέσω των οποίων ο ήχος μπορεί να διεισδύσει σε

περίπτωση που δεν υπάρχει κατάλληλη μελέτη και σχεδιασμός αυτών. Όσον αφορά τους χώρους θεατρικών παραστάσεων, τα παράθυρα συνήθως είναι ανύπαρκτα. Έτσι λοιπόν, οι πόρτες είναι εκείνες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην μελέτη για την ηχομόνωση. Θα μπορούσε να τοποθετηθεί μια πόρτα μεγάλου βάρους και όγκου, με αεροστεγανότητα. Η αγορά και η συντήρηση μιας τέτοιας πόρτας όμως, κοστίζει ακριβά. Επίσης, η λειτουργικότητά της συνήθως δεν είναι ικανοποιητική, καθώς το σφράγισμα μιας βαριάς πόρτας χρειάζεται μεγάλη δύναμη και παράλληλα, επιτρέπει την διέλευση του φωτός στην αίθουσα όταν ανοίγει, γεγονός ανεπιθύμητο. Προτιμότερη λύση είναι η χρησιμοποίηση μικρών θαλάμων με δύο πόρτες, οι οποίες είναι μικρότερες σε μέγεθος και βάρος, και επίσης κοστίζουν κατά πολύ λιγότερο. Ταυτόχρονα, με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να περιορίσουμε σημαντικά την εισχώρηση φωτός στην αίθουσα. Επιπρόσθετα, η διακόσμηση της πόρτας με την χρήση απορροφητικών υλικών αυξάνει το ποσοστό ηχομόνωσης της. Μεγάλη προσοχή δίνεται επίσης, στο κάσωμα της πόρτας το οποίο συνδέει αυτήν με τον τοίχο. Ο τρόπος σύνδεσης τους πρέπει να είναι κατάλληλος έτσι ώστε πρώτον, να αποφεύγεται η ύπαρξη ανοιγμάτων, σχισμών που επιτρέπουν την διέλευση του ήχου και δεύτερον, να αποφεύγεται η διάδοση των κραδασμών από το ένα υλικό στο άλλο.

ii. Από Μέσα Προς Τα Έξω

Όπως επιθυμούμε να εξαλείψουμε την διέλευση των ανεπιθύμητων εξωτερικών ήχων στο εσωτερικό μιας αίθουσας θεατρικών παραστάσεων, ταυτόχρονα επιθυμούμε την αποφυγή της διάδοσης ήχου από την αίθουσα όπου διαδραματίζεται η θεατρική παράσταση στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο. Και αυτό για λόγους αποφυγής ηχορύπανσης. Για να πετύχουμε τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τις ίδιες μεθόδους ηχομόνωσης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση, μείωσης του μεταδιδόμενου θορύβου από τον εξωτερικό χώρο στον εσωτερικό. Επομένως, προσπαθώντας να μονώσουμε τον χώρο από εξωτερικές πηγές θορύβου επιτυγχάνουμε παράλληλα και το αντίθετο. Να μονώσουμε, δηλαδή τον χώρο μειώνοντας την στάθμη της έντασης που μεταδίδεται από το εσωτερικό της αίθουσας προς τα έξω. Επίσης, θα πρέπει να προσέξουμε σε ποια περιοχή εντάσσεται ο συγκεκριμένος χώρος, γιατί άλλες νομοθετικές διατάξεις ισχύουν για κάθε περιοχή. Στις νομοθετημένες βιομηχανικές περιοχές το ανώτατο όριο σε dB είναι 70, ενώ σε περιοχές που επικρατεί το αστικό στοιχείο είναι 50. Οι περιοχές καθαρά κατοικιών και ειδικής προστασίας 12, έχουν όριο τα 33 dB, αστικές, προαστιακές ή αγροτικές, νοσοκομεία, γηροκομεία, σανατόρια κτλ. (Σαραφόπουλος Ν. σελ. 18, στο Πρακτικά συνεδρίου Ακουστική 2002).

Μια άλλη περίπτωση ανεπιθύμητου θορύβου, η οποία όμως δεν ανήκει αποκλειστικά σε μια από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, είναι ο θόρυβος που προκαλούν μηχανήματα τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της αίθουσας. Όπως για παράδειγμα, ο θόρυβος που προέρχεται από το σύστημα εξαερισμού. Σύστημα απαραίτητο για μια αίθουσα θεατρικών παραστάσεων, το οποίο παράλληλα μπορεί δημιουργήσει προβλήματα στην ακουστική της. Μέσω του συστήματος του εξαερισμού είναι πιθανόν να μεταφερθεί ήχος από το εξωτερικό περιβάλλον στην αίθουσα. Επίσης, δημιουργείται ανεπιθύμητος ήχος μέσω του στροβιλισμού, ένας αεροδυναμικός θόρυβος ο οποίος εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων και οφείλεται στη διαταραχή της πίεσης του αέρα λόγω της περιστροφής του ανεμιστήρα (Σκαρλάτος 2003 σελ.371). Μια καλή μελέτη του συστήματος εξαερισμού, μας βοηθάει να εξασφαλίσουμε τον σωστό εξαερισμό της αίθουσας, διατηρώντας το ποσοστό υγρασίας στο επίπεδο που χρειάζεται, και παράλληλα ν' αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα του αερόφερτου θορύβου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Κοινά ηχοαπορροφητικά υλικά.

κεντρική συχνότητα f οκτάβας σε Hz	125	250	500	1000	2000	4000
τοίχος ασοβάπτος	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.07
τοίχος βαμμένος	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
τοίχος, συμπαγή τούβλα	0.16	0.13	0.15	0.11	0.13	0.14
μπετόν, αδρό	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
μπετόν, λείο άβαφο	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05
κισσηρομπετόν 700kg/m <sup>3</sup>	0.14	0.19	0.24	0.32	0.41	0.5
γυψοσοβάς λείος κούφιος	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05
γυψοσοβάς λείος σε τοίχο	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
σοβάς, αδρός κούφιος	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
σοβάς, αδρός σε τοίχο	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
σοβάς, πεταχτός 15mm	0.08	0.15	0.31	0.5	0.61	0.71
μάρμαρο, επένδυση	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
ραμποτέ 16mm κενό 4cm	0.18	0.12	0.1	0.09	0.08	0.07
ραμποτέ 20mm, αραιό	0.15	0.11	0.12	0.08	0.08	0.11
ραμποτέ κούφιο	0.15		0.1		0.08	
παρκέ σε πάτωμα	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.1
παρκέ σε ψευτοπάτωμα	0.2	0.15	0.1	0.1	0.05	0.05
μοκέτα 5mm σε δάπεδο	0.04	0.04	0.15	0.3	0.5	0.6
μοκέτα 8mm ελεύθερη	0.04	0.12	0.26	0.5	0.28	0.29
χαλί δαπέδου μακριά τρίχα	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.4
παρκέ φελλού	0.04	0.03	0.05	0.11	0.07	0.02
PVC 2.5mm σε δάπεδο	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05
απλό τζάμι	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
διπλό παράθυρο	0.1	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
ξύλινη πόρτα πλακάζ	0.14	0.1	0.06	0.03	0.01	0.01

Πίνακας(2.5.2) (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 38)

## 2.6 Χωροθεσία

Μεγάλο τμήμα της αίθουσας καταλαμβάνει ο χώρος των ακροατών. Η διάταξη των θέσεων των ακροατών λαμβάνεται λοιπόν υπόψη στο σχεδιασμό της καλής ακουστικής της αίθουσας. Οι ακροατές πρέπει να τοποθετούνται κοντά στην πηγή για να είναι ακουστό το απευθείας σήμα και να έχουν καλή οπτική επαφή. Η αμφιθεατρική διάταξη των θέσεων υλοποιεί τον κανόνα αυτό. Εντούτοις, στους κλειστούς χώρους ο αμφιθεατρικός σχεδιασμός των θέσεων αποφεύγεται καθώς δημιουργεί προβλήματα συγκεντρώνοντας τον ήχο σε συγκεκριμένα σημεία.

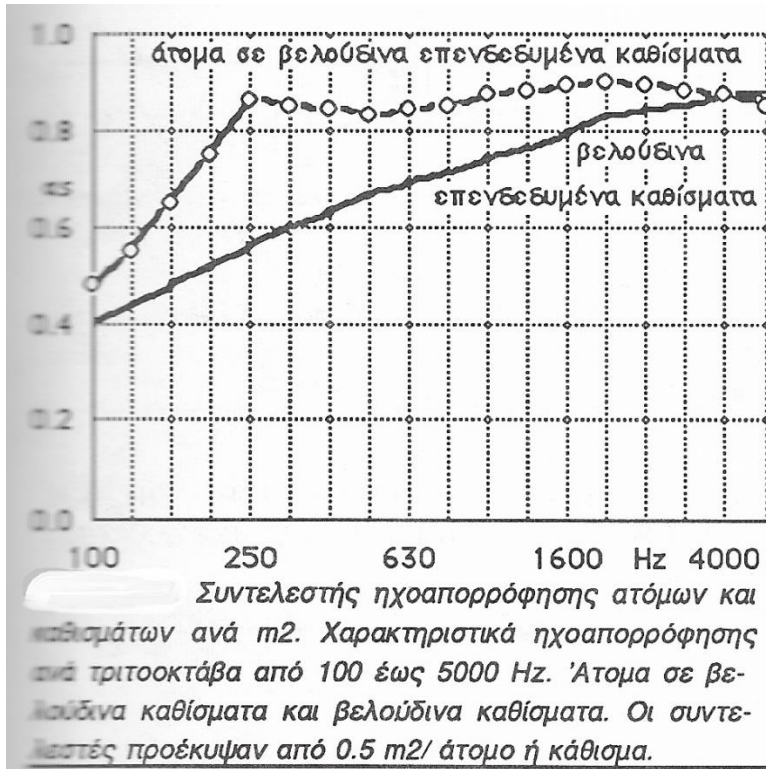
Οι θέσεις των ακροατών, όπως και το δάπεδο, απορροφούν μέρος της απευθείας ηχητικής ενέργειας. Μέρος της ενέργειας αυτής απορροφά επίσης το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών θέσεων, λόγω του ότι συντονίζεται στην περιοχή των 100 με 200 Hz. Για καλύτερη διάδοση του απευθείας ήχου σε όλο το μήκος των θέσεων δίνεται μια κλίση στο δάπεδο ώστε να μην διακόπτεται από τις μπροστινές θέσεις. Επίσης, η κλίση αυτή διασφαλίζει καλύτερο οπτικό πεδίο στους θεατές, καθώς προκύπτει από την χάραξη της νοητής οπτικής γραμμής από τα μάτια του ακροατή επαπτομενικά πάνω από το κεφάλι του μπροστινού ακροατή προς το δάπεδο της σκηνής του θεάτρου. Η κλίση αυτή αλλάζει ανάλογα με την απόσταση των διαδοχικών σειρών του ακροατηρίου και το σημείο που οι ακροατές πρέπει να κοιτούν. Στην περίπτωση των θεάτρων το σημείο αυτό είναι το δάπεδο της σκηνής, ενώ στον κινηματογράφο βρίσκεται πολύ ψηλότερα. Η υπερβολικά απότομη διάταξη των θέσεων του ακροατηρίου μειώνει την χωρητικότητα της αίθουσας. Τα θεωρεία και οι εξώστες χρησιμοποιούνται για να την αυξήσουν. Μπορούν όμως να δημιουργήσουν πρόβλημα στην ακουστική των ακροατών που βρίσκονται κάτω από αυτόν, καθώς εμποδίζουν τον ανακλώμενο ήχο από την οροφή να φτάσει σε αυτούς, δημιουργώντας δηλαδή ηχητική σκιά. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται κυρίως σε εξώστες με μεγάλο βάθος. Συνεπώς, για να αποφύγουμε την δημιουργία ηχητικής σκιάς το βάθος του εξώστη πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από το ύψος του. Οι σύγχρονοι χώροι και εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για θεατρικές παραστάσεις, πλέον είναι πιο ευέλικτοι και μπορούν σχετικά εύκολα να τροποποιήσουν κάποια χαρακτηριστικά τους για τις ανάγκες μιας θεατρικής παράστασης. Στην περίπτωση αυτή η χρήση μεταβλητών ανακλαστικών και απορροφητικών επιφανειών είναι απαραίτητη.

Οι μεταβλητές αυτές επιφάνειες προσαρμόζονται ανάλογα, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά την θέση της σκηνής και των ακροατών, με στόχο την επίτευξη του καλύτερου δυνατού ακουστικού αποτελέσματος.

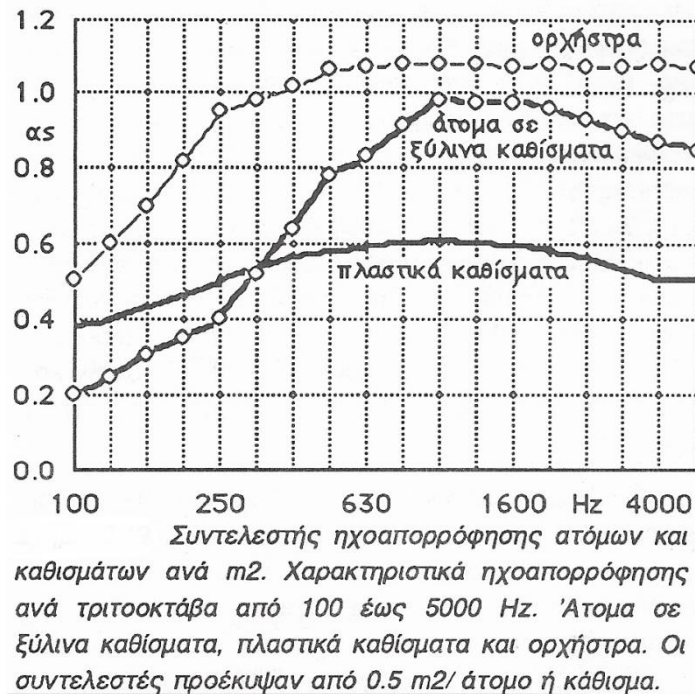
Επίσης, τα καθίσματα των θεατών παίζουν σημαντικό ρόλο. Όταν δεν έχουν σωστή απορροφητικότητα, ο ήχος συμπεριφέρεται διαφορετικά στις πρόβες (όπου είναι άδειες οι θέσεις) και διαφορετικά κατά την διάρκεια της παράστασης (όπου οι θέσεις καταλαμβάνονται από τους θεατές). Επομένως, πρέπει να λάβουμε υπόψη το φαινόμενο αυτό και να ενημερώσουμε τον σκηνοθέτη. Για να αποφύγουμε τέτοιου είδους προβλήματα, οι θέσεις πρέπει να είναι επενδυμένες με κατάλληλα υλικά έτσι ώστε να έχουν τον ίδιο συντελεστή απορρόφησης ηχητικής ενέργειας με τον άνθρωπο.

Όταν μια θεατρική παράσταση περιοδεύει αλλάζουν όλα τα χαρακτηριστικά του χώρου. Είτε αυτό αφορά σχήμα του χώρου, κυβικά του χώρου, ανακλαστικότητα, ηχοαπορρόφηση, ηχομόνωση, χωροθεσία. Παρ' όλα αυτά το ακουστικό αποτέλεσμα της παράστασης πρέπει να είναι το ίδιο κάθε φορά. Επομένως, στην περίπτωση αυτή για να επιτύχουμε το ίδιο ηχητικό αποτέλεσμα οφείλουμε να επαναλαμβάνουμε τον ακουστικό σχεδιασμό σε κάθε αίθουσα όπου μεταφέρεται η παράσταση, τροποποιώντας ανάλογα τα χαρακτηριστικά του χώρου.





Εικόνα(2.6.1) (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 33)



Εικόνα(2.6.2) (Ακουστικός σχεδιασμός χώρων –Νίκος Τσινίκας σελ 33)

## Κεφάλαιο 3ο

### **Δημοτικό Θέατρο Πειραιά-περιγραφή και ανάλυση του χώρου.**

#### **3.1 Λίγα λόγια για την ιστορία του θεάτρου:**



(Εικόνα 3.1) Η πρόσοψη του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά (φωτογραφία από Χριστίνα Ζαφειρίου και Ευανθία Κονιδάρη)

Στις 13 Μαΐου 1882 εγκρίνεται το έργο κατασκευής του θεάτρου και ορίζει ως χώρο κατασκευής το οικοδομικό τετράγωνο απέναντι από το Δημοτικό Παρθεναγωγείο, γνωστό και ως Ράλλειος Σχολή Θηλέων στην Πλατεία Κοραή. Την εκπόνηση του έργου αναλαμβάνει ο αρχιτέκτονας και καθηγητής του Πολυτεχνείου Ιωάννης Λαζαρίμος. Η περιγραφή του θεάτρου ήταν μήκος 45 μέτρων, 34 το πλάτος και 30 το ύψος και έχει 3 σειρές θεωρείων, το καθένα ανά 23 μέτρα και υπερώνων μετά τα 3 θεωρεία. Μπορεί να συμπεριλάβει άνετα 1154 θεατές και στην ανάγκη 1400. Έχει συνολικά 7 εξόδους, 2 στη σκηνή και 5 στην πλατεία και τα θεωρεία. Η συνολική επιφάνεια του κτιρίου καλύπτει τα 9.800 τ.μ.

Τον Απρίλιο του 1884 ξεκινάνε οι πρώτες εκσκαφές, όπου έρχονται στο φως σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα που απασχόλησαν και δίχασαν την επιστημονική κοινότητα της εποχής.

Ο αρχικός προϋπολογισμός του έργου έφτανε τις 450.000 δραχμές, τα συνολικά έξοδα απ'τα δημοτικά τέλη προβλέπονταν στις 365.000 δραχμές και ο δήμος Πειραιά αναγκάστηκε να δανειστεί 250.000 δραχμές από την Εθνική Τράπεζα.

Ωστόσο το συνολικό κόστος για την ολοκλήρωση του έργου άγγιξε τις 900.000 δραχμές.

Στις 9 Απριλίου 1895 πραγματοποιήθηκαν τα εγκαίνια του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά. Κτίστηκε στο πρότυπο του Ωδείου των Παρισίων (Theatre d’Odeon), ακολουθεί αρχιτεκτονικά την κλασικιστική παράδοση και κυρίως την γερμανική σχολή που εκπροσωπούσε ο Ερνέστος Τσίλερ. Ο διάκοσμός του και κυρίως η σκηνή του το καθιστούν ένα απ’τα ελάχιστα δείγματα της εποχής μπαρόκ που διασώζονται μέχρι σήμερα. Η αίθουσα φωτιζόταν από έναν σωζόμενο έως και σήμερα τεράστιο πολυέλαιο ο οποίος τότε λειτουργούσε με γκάζι. Διαθέτει προσκήνιο και χώρο ορχήστρας, ενώ η πλατεία, τα θεωρεία και οι εξώστες εξελίσσονται σε τέσσερα επίπεδα.

Υπήρχαν άνετα καμαρίνια, πολυτελές καθιστικό καθώς και διώροφο φουαγιέ, το οποίο χρησιμοποιούταν για εκθέσεις ζωγραφικής και για χοροεσπερίδες.

Το Δημοτικό Συμβούλιο στις 21 Οκτωβρίου 1898 αποφάσισε την προμήθεια κουστουμιών από την Τεργέστη καθώς και την κατασκευή 400 τροχαλιών για τα σκηνικά του θεάτρου.

Το 1927 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες επισκευές μετά από την εγκατάσταση οικογενειών προσφύγων από την Τουρκία και ακολούθησε η δεύτερη μεγάλη επισκευή τα έτη 1946-1947. Το 1952 τοποθετήθηκαν σύγχρονες φωτιστικές και μηχανικές εγκαταστάσεις, ενώ το 1962 αποφασίστηκε η αντικατάσταση των θορυβωδών ξύλινων καθισμάτων της πλατείας του θεάτρου με βελούδινα. Έξι χρόνια αργότερα το 1968 έγινε ολοκληρωτικός εξωραϊσμός του θεάτρου, εξωτερικός και εσωτερικός καθώς και του φουαγιέ. Το θέατρο ανακηρύχθηκε προστατευόμενο μνημείο ως έργο τέχνης το 1980. Το 1981 και το 1999 υπέστη ζημιές από τους σεισμούς και το 2008 πραγματοποιήθηκαν εργασίες αποκατάστασης, κι έτσι το 2013 το έργο παραδόθηκε.

Το έργο της αποκατάστασης εντάχθηκε στο ΠΕΠ Αττικής 2000-2006 και στο ΠΕΠ Αττικής 2007-2013 και χρηματοδοτήθηκε σε 36 εκατομμύρια ευρώ. Έτσι ανασυλώθηκε το Δημοτικό Θέατρο Πειραιά. Ενισχύθηκαν οι παλιές λιθοδομές και ανακατασκευάστηκαν τα δάπεδα, ενώ αποκαταστάθηκαν οι μοναδικές διακοσμήσεις στους τοίχους και τις οροφές, με σκοπό να παραδοθεί ένα σύγχρονο τεχνολογικό θέατρο. Επίσης αποκαταστάθηκαν οι παλιές μηχανολογικές και τεχνικές εγκαταστάσεις, μπήκαν νέοι μηχανισμοί στη σκηνή, νέα φώτα στις αίθουσες και σύγχρονα οπτικοακουστικά συστήματα.

Το κτήριο του θεάτρου είναι ορθογώνιου σχήματος, διαστάσεων 34x50x47, είναι νεοκλασικής αισθητικής και το πρόπυλο της κύριας εισόδου, αποτελείται από τέσσερις κορινθιακούς κίονες και αέτωμα. Ο προθάλαμος της κεντρικής αίθουσας

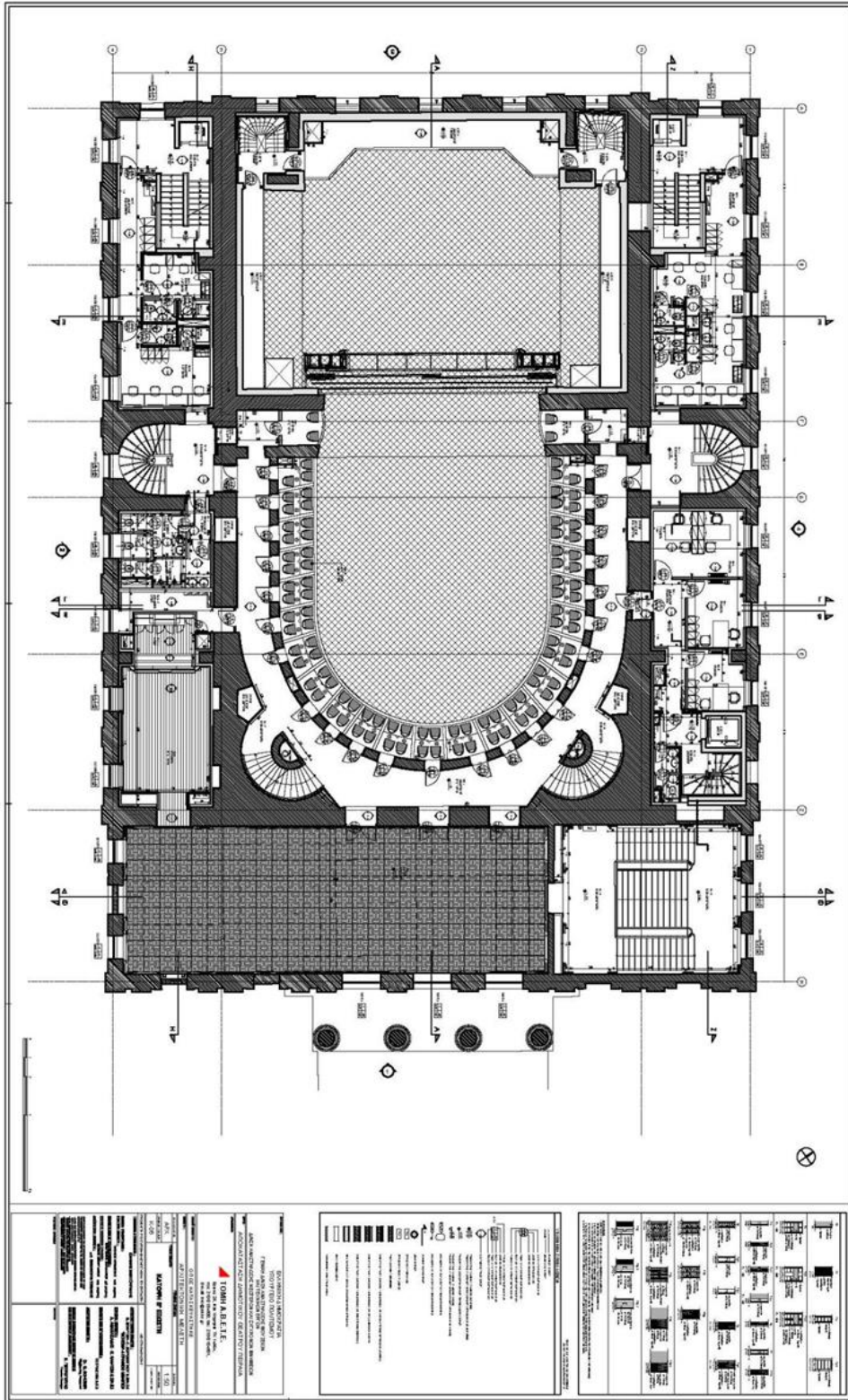
διαθέτει φανωματική οροφή, που στηρίζεται σε κίονες και κιονόκρανα αιγυπτιακής τεχνοτροπίας. Η αίθουσα κοινού είναι σε σχήμα πέταλου, με την κεντρική πλατεία, 24 θεωρεία και εξώστες σε τέσσερα επίπεδα, γαλλικού τύπου και η χωρητικότητα της αίθουσας είναι 641 θέσεων. Πάνω από την αιθούσα μέσα στο μεγάλο θόλο της οροφής υπάρχει η βιβλιοθήκη του θεάτρου.



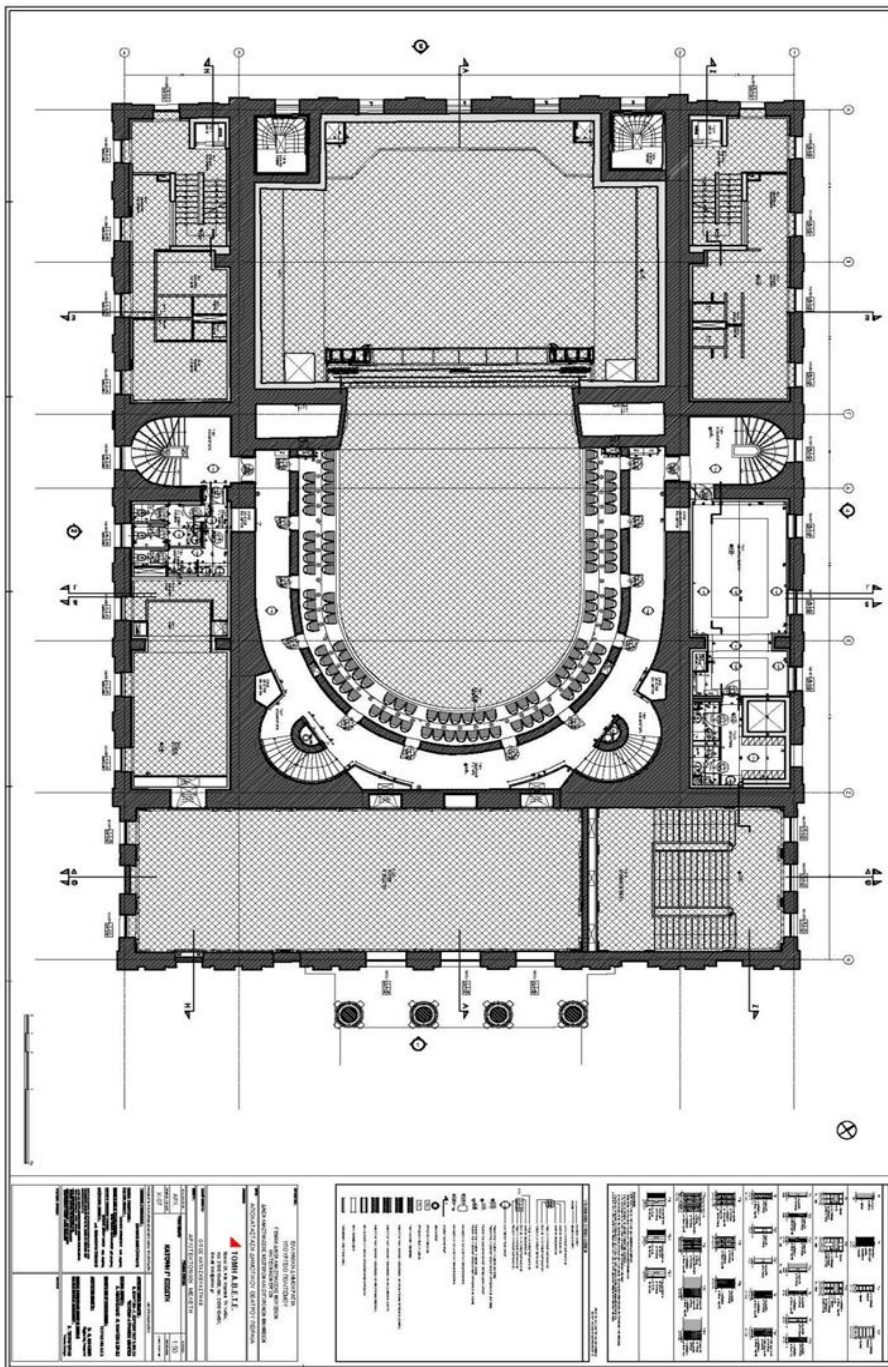
( Εικόνα 3.1.2) Το εσωτερικό του θεάτρου (φωτογραφία από Χριστίνα Ζαφειρίου και Ευανθία Κονιδάρη)





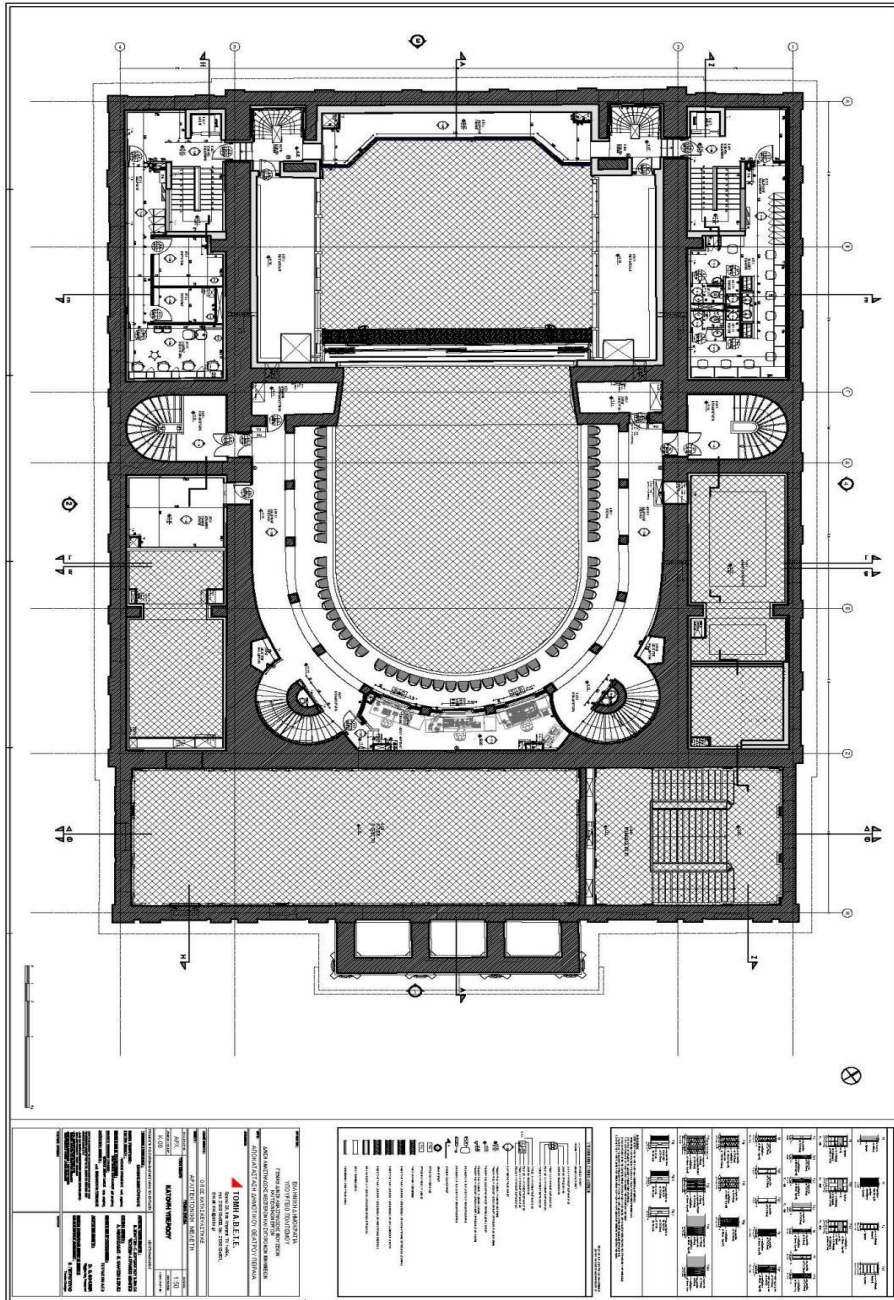


Εικόνα(3.2.3)Κάτοψη Β' εξώστη (αρχιτεκτονικά σχέδια)



Εικόνα(3.2.4)Κάτοψη Γ' εξώστη (αρχιτεκτονικά σχέδια)





Εικόνα(3.2.5)Κάτοψη Υπερώου (αρχιτεκτονικά σχέδια)

### 3.3 Διάταξη και περιγραφή εξοπλισμού και ηχοαπορροφητικών βάσει της Ακουστικής μελέτης του θεάτρου του κυρίου Shubert

Η αίθουσα έχει ως βασική λειτουργία τις παραστάσεις πρόζας, έτσι τα ακουστικά κριτήρια που έχουν τεθεί είναι κατάλληλα για τη λειτουργία αυτή. Η αίθουσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραστάσεις λυρικού θεάτρου, η αρχιτεκτονική της και η ακουστική της την καθιστούν κατάλληλη και γι' αυτό καθώς διαθέτει και pit ορχήστρας. Ο όγκος της σκηνής είναι  $V=5700 \text{ m}^3$ .

#### 3.3.1 Βάσει της μελέτης του κύριου Shubert παραθέτουμε τα εξής :

Ο όγκος της αίθουσας σε σχέση με τη χωρητικότητα της επιτρέπει τη διαμόρφωση του χρόνου αντήχησης χωρίς τη χρήση ηχοαπορροφητικών, και έτσι αξιοποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό η ηχητική ενέργεια των πηγών. Οι διαστάσεις της αίθουσας δεν δημιουργούν προβλήματα στην ακουστική της συμπεριφορά καθώς έχει περιορισμένο μέγεθος. Τα θεωρεία δεν έχουν σημαντικό βάθος που να δημιουργεί προβλήματα και η κλίση της πλατείας συμβάλλει στην καλή ακουστική αλλά και στην καλύτερη οπτική του κοινού.

Η οροφή της κεντρικής αίθουσας του θεάτρου στεγάζει τη βιβλιοθήκη του θεάτρου. Για την ηχομόνωση του πατώματος της βιβλιοθήκης δεν ήταν δυνατό να τοποθετηθεί μεγάλη μάζα υλικών, για στατικούς λόγους. Κάτω από το δάπεδο της βιβλιοθήκης υπάρχει μια πλωτή πλάκα (50mm), όπου από κάτω υπάρχει πλάκα δαπέδου από ορυκτοβάμβακα τύπου ISOVER EP2 ( $15\text{MN/m}^3$ ) και από κάτω μια πλάκα σκυροδέματος με επιφανειακή μάζα  $300 \text{ kg/m}^2$ , από κάτω είναι η οροφή της αίθουσας. Η ηχομονωτική ικανότητα της οροφής είναι  $R'_w=58\text{dB}$ .

Για τη σκηνή για να περιοριστεί ο χρόνος αντήχησης της σκηνής (άδεια) τοποθετούνται στους τοίχους περίπου  $500\text{m}^2$  ηχοαπορροφητικό υλικό πάχους 50mm από ορυκτοβάμβακα με μαύρο υαλοϋφασμα, τύπου Isover SSP2. Το δάπεδο του θεάτρου είναι καλυμμένο με μοκέτα από κάτω έχει κόντρα πλακέ θαλάσσης (2x25)mm Plenum, κάτω από αυτό είναι μια υποκατασκευή του δαπέδου με ελαστική στήριξη, ιδιοσυχνότητας  $\leq 12 \text{ Hz}$ , μετά έχουμε ορυκτοβάμβακα ( $40\text{kg/m}^3$ ) με υαλοϋφασμα (50mm), από κάτω υπάρχει μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (200mm) με από κάτω ένα κενό 50mm και από κάτω και άλλο ορυκτοβάμβακα  $40\text{kg/m}^3$  (3x50mm) και από κάτω γυψοσανίδες με ελαστική ανάρτηση ιδιοσυχνότητας  $\leq 12 \text{ Hz}$  (3x12,5 mm). Στην περιοχή της σκηνής τοποθετείται η ίδια ηχομονωτική ψευδοροφή στους

χώρους κάτω από αυτήν. Η ηχομονωτική ικανότητα του δαπέδου της αίθουσας θεάτρου και της σκηνής εκτιμάται σε  $R'_w \geq 73\text{dB}$ .

-Για την ηχομονωτική ικανότητα της στέγης της σκηνής περιγράφεται η εξής κατασκευή:

Σύμμικτη πλάκα με επιφανειακή μάζα  $375\text{kg/m}^2$ , κενό  $\geq 150\text{mm}$ , ορυκτοβάμβακας  $40\text{ kg/m}^3$  -150 mm και γυψοσανίδες  $3*12,5\text{mm}$ . Η ηχομονωτική ικανότητα της κατασκευής εκτιμάται σε  $R_w \approx 65\text{dB}$ .

Οι θυρίδες απαγωγής καπνού είναι διπλές (smoke hatches) και με συνολική ηχομονωτική ικανότητα  $R_w=52\text{dB}$ .

Η απαιτούμενη ηχομονωτική ικανότητα της στέγης της σκηνής υπολογίζεται ως: όγκος πύργου σκηνής  $V \approx 5700\text{m}^3$ , επιφάνεια στέγης  $S \approx 300\text{ m}^2$ , χρόνος αντήχησης  $T = 1,5\text{ sec}$ , ισοδύναμη απορροφητική επιφάνεια  $A = 620\text{ m}^2$ . Ο υπολογισμός των παραπάνω έγινε με την ποσοστομοριακή στάθμη στο επίπεδο της στέγης  $L_1 = 73\text{dB(A)}$ .

$$R_{\text{WATT}} = L_a - L_b + 10 \log (S/A) + 6\text{dB} = (73 - 20) + 10 \log (300/620) + 6\text{dB}$$

$$R_{\text{WATT}} = 56\text{dB}$$

Η ηχομονωτική ικανότητα της καλύπτει τις απαιτήσεις.

Η στέγη της αίθουσας στη περιοχή του θόλου περιγράφεται ως εξής: σύμμικτη πλάκα με επιφανειακή μάζα περίπου  $375\text{kg/m}^2$ , κενό, ψευδοροφή επάνω - κάτω από τα ζευκτά, ορυκτοβάμβακας  $40\text{ kg/m}^3$  -2\*100mm, γυψοσανίδες  $3*12,5\text{ mm}$ . Η ηχομονωτική ικανότητα της κατασκευής εκτιμάται σε  $R_w \geq 65\text{dB}$ .

Για την ηχομονωτική ικανότητα των περιμετρικών τοίχων του θεάτρου και της σκηνής έχουμε πάχος τοίχου  $>1000\text{ mm}$ , πυκνότητα τοίχου  $1.400\text{-}1.600\text{kg/m}^3$ , επιφανειακή μάζα  $\geq 1400\text{ kg/m}^2$ .

Ανάλογα με την επιφανειακή μάζα η ηχομονωτική ικανότητα του τοίχου είναι  $R_w \geq 68\text{dB}$ .

Για την ηχομόνωση της αίθουσας και της σκηνής τοποθετήθηκαν διπλές ηχομονωτικές πόρτες. Στη σκηνή η ηχομονωτική ικανότητα της κάθε πόρτας είναι  $R'_w = 40\text{dB}$  και στην αίθουσα τοποθετούνται πόρτες με  $R_w = 32\text{dB}$  και  $R_w = 35\text{dB}$ . Ο τοίχος μεταξύ του πάνω μέρους της σκηνής, της βιβλιοθήκης και του μηχανοστασίου αποτελείται από τα εξής, είναι τοίχος μεταλλικού σκελετού τύπου DIVA W145 με διπλό ορθοστάτη και αμφίπλευρα δύο γυψοσανίδες και ορυκτοβάμβακα στο διάκενο, γυψοσανίδα τύπου Piano (12,5mm), γυψοσανίδα (25mm), γυψοσανίδα τύπου Piano (12,5 mm), ορθοστάτης MW ορυκτοβάμβακα

100mm ,40kg/m<sup>3</sup> (100mm), ορυκτοβάμβακα 40kg/m<sup>3</sup>(100mm), ορθοστάτης MW ορυκτοβάμβακα 100mm ,40kg/m<sup>3</sup> (100mm), γυψοσανίδα τύπου Ρίανο (12,5mm), γυψοσανίδα (25mm), γυψοσανίδα τύπου Ρίανο (12,5 mm). Ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης  $R_w \geq 73\text{dB}$  (σταθμισμένος φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης  $R'_w \geq 65\text{dB}$ ). Ο τοίχος ενσωματώνει τα ξύλινα δοκάρια της υφισταμένης κατασκευής και στηρίζεται στα μεταλλικά στοιχεία του νέου στάτικου φορέα της στέγης.

### 3.4 Ηχοπροστασία ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων θεάτρου: μονάδες κλιματισμού και ανεμιστήρες:

Παρακάτω παραθέτουμε τις μετρήσεις και τις απαιτήσεις ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων όπως καταγράφηκαν από τον κύριο Shubert, στην ακουστική μελέτη του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά.

#### 3. Απαιτήσεις ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας ΗΜ εγκαταστάσεων

##### 3.1 Επιτρεπτές εσωτερικές στάθμες θορύβου

Η συνολικά επιτρεπόμενη στάθμη θορύβου είναι η ηχοστάθμη η οποία προέρχεται από το σύνολο των πηγών θορύβου μέσα και έξω από τον χώρο, π.χ. το σύστημα κλιματισμού (προσαγωγή, επιστροφή), ο θόρυβος από την λειτουργία των διπλανών χώρων (αερόφερτος και κτυπογενής), ο θόρυβος από την λειτουργία ΗΜ εγκαταστάσεων μέσα και έξω από τον χώρο, θόρυβος του εξωτερικού περιβάλλοντος κ.λ.π.

Στην διακήρυξη του έργου αναφέρεται ως επιτρεπτή στάθμη θορύβου βάθους της αίθουσας  $L_A \leq 25 \text{ dB(A)}$ .

Για το pit της ορχήστρας, τον πύργο της σκηνής, τους εξώστες και το υπερών ισχύει η ίδια στάθμη θορύβου βάθους.

Αίθουσα του θεάτρου	$L_{eq} = 25 \text{ dB(A)}$
Εξώστες	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Υπερών	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Πύργος σκηνής	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Pit Ορχήστρας	$L_{eq} = 25 \text{ dB(A)}$

Έχοντας υπόψη την ιδιαίτερα δύσκολη κατάσταση για την τροφοδότηση των εξωστών και του υπερώου, μπορεί η στάθμη θορύβου στις περιοχές αυτές να υπερβεί την τιμή των  $25 \text{ dB(A)}$ , να είναι όμως μικρότερη των  $30 \text{ dB(A)}$ .

Για τους λοιπούς χώρους προτείνονται για την ισοδύναμη στάθμη θορύβου τα ακόλουθα:

Χειριστήρια – Καμπίνες ελέγχου	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Διάδρομοι των εξωστών	$L_{eq} = 30 \text{ dB(A)}$
Αίθουσα δοκιμών	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Αίθουσα μπαλέτου	$L_{eq} \approx 25 \text{ dB(A)}$
Φουαγιέ	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Βεστιάριο	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Κιλικείο	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Γραφεία	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Καμαρίνια	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Χώροι Προσωπικού Παραστάσεων	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Βιβλιοθήκη	$L_{eq} = 35 \text{ dB(A)}$
Εργαστήρια	$L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$
Χώροι Υγιεινής	$L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$
Διάδρομοι	$L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$
Κλιμακοστάσια	$L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$
Κατάστημα	$L_{eq} = 40 \text{ dB(A)}$
Χώροι Η/Μ Εγκαταστάσεων	$L_{eq} = 75 \text{ dB(A)}$ για την μελέτη των εγκαταστάσεων $L_{eq} = 80 \text{ dB(A)}$ για την διστασιολόγηση των δομικών στοιχείων

Εικόνα(3.4.1)απαιτήσεις ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων (Απόσπασμα από αρχική μελέτη,)

Επιτρεπτές ηχοστάθμες από την λειτουργία των μηχανισμών της σκηνής κατά την διάρκεια μιας παράστασης

Η επιτρεπτή ηχοστάθμη από την λειτουργία των μηχανισμών της σκηνής είναι, μετρούμενη στο κέντρο της πρώτης σειράς των καθισμάτων της αίθουσας:

Σταγκώνια, λειτουργεί ένα	$L_p = 32 \text{ dB(A)}$
Point hoist	$L_p = 32 \text{ dB(A)}$
Περιστρεφόμενη σκηνή	$L_p = 35 \text{ dB(A)}$

Επιτρεπτές εξωτερικές στάθμες θορύβου από την λειτουργία ΗΜ εγκαταστάσεων

ΠΔ 1180/81 ΦΕΚ 293/Α

«Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο θορύβου, εκπεμπόμενο εις το περιβάλλον υπό εγκαταστάσεων, καθορίζεται ως τούτο αναφέρεται εις τον κατωτέρω παρατιθέμενο πίνακα, μετρούμενον επί του ορίου του ακινήτου επί του οποίου κείται η εγκατάσταση.

Περιοχές στις οποίες επικρατεί το αστικό στοιχείο **50dB(A)**

Εικόνα(3.4.2)επιτρεπτές ηχοστάθμες και επιτρεπτές εξωτερικές στάθμες θορύβου (Απόσπασμα από αρχική μελέτη,)

Το πλαίσιο του κινητήρα και του ανεμιστήρα έχει αντιδονητική στήριξη, και τοποθετείται μέσα στην μονάδα σε χαλύβδινα ελατήρια με ιδιοσυχνότητα  $f_0 \leq 12\text{Hz}$ . Κάτω απο τις μονάδες τοποθετούνται άκαμπτα μεταλλικά πλαίσια. Ανάμεσα στα πλαίσια και την επιφάνεια στήριξης τοποθετούνται λωρίδες από ελαστικό ύλικο ( κυψελωτή ελατωμερής πολυουρεθάνη μικτών κυψελών, τύπου SYLOMER) με πάχος 50mm και πλάτος 120mm. Ο τύπος του ελαστικού υλικού επιλέγεται ανάλογα με το φορτίο και την θέση του κέντρου βάρους της μονάδας. Η ιδιοσυχνότητα ελαστικής έδρασης είναι  $f_0 < 12\text{Hz}$ .

Στο σύστημα κλιματισμού τοποθετούνται κεντρικές ηχοπαγίδες σε κάθε μονάδα και σε κάθε ανεμιστήρα, για την αποφυγή μετάδοσης θορύβου από χώρο σε χώρο τοποθετούνται ηχοπαγίδες cross talk και τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην είσοδο προς το χώρο τροφοδότησης. Ο αεραγωγός και η ηχοπαγίδα είναι επενδυμένες με διπλές γυψοσανίδες και ορυκτοβάμβακα (50mm,  $40 \text{ kg/m}^3$ ), από το σημείο διάτρησης στον τοίχο. Για τη σύνδεση των στομιών με το δίκτυο έχουν χρησιμοποιηθεί εύκαμπτες ηχοπαγίδες τύπου

Sonodec 25 της εταιρίας DEC. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των στομιών πρέπει να είναι η τελική στάθμη θορύβου στο χώρο του θεάτρου από τη λειτουργία του συστήματος κλιματισμού.

ΚΚΜ	Χώρος	Όγκος χώρου	Χρόνος αντήχησης	Μεγ. Ηχοστάθμη	Ισοδ. Ηχοσπ. Επιφάνεια	Μέτρο απόσβεσης	Μεγ. Ηχητική ισχύς Η/Μ
		V [m3]	RT [s]	LpA [dB(A)]	A [m2]	RDM [dB]	LwA [dB(A)]
1	Πλατεία	4300	1,3	25	539	21	43
4	Υπερώο						
13	Ορχήστρα						
15	Εξώστες						

2	Σκηνή	5700	1,4	25	664	22	44
3	Αιθ. Δοκιμών	360	1	25	59	12	34
5	Βιβλιοθήκη	500	1	30	82	13	40
6	Φουαγιέ πλατείας	1223	2	35	100	14	46
7	Φουαγιέ εξώστη	1731	2	35	141	15	47
8	Αιθ. Μπαλέτου	221	0,7	25	51	11	33
9	Καμαρίνια	25	0,5	35	8	3	35
10	Γραφεία	25	0,5	35	8	3	35
11	Φροντιστήριο	113	1,5	40	12	5	42
12	Αποθήκη	115	1,5	40	12	5	42
14	Καφετέρια	150	1	35	24	8	40

Πίνακας(3.4.3)(Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

ΘΕΑΤΡΟ			LWA ΔΙΚΤΥΟ	ΑΡ. ΣΤΟΜΙΩΝ	LWA ΑΝΑ ΣΤΟΜΙΟ	LWA ΣΤΟΜΙΩΝ	LWA ΠΡΟΣ/ΕΠΙΣ
ΚΚΜ-1	ΠΡΟΣ	Πλατεία	28	300	12	37	37
	ΕΠΙΣ		28	1	22	22	29
ΚΚΜ-4	ΠΡΟΣ	Υπερώο	28	13	20	31	33
	ΕΠΙΣ		28	8	20	29	32
ΚΚΜ-13	ΠΡΟΣ	Ορχήστρα	28	5	22	29	32
ΚΚΜ-15	ΠΡΟΣ	Α' ΕΞ	38	37	18	34	39
	ΠΡΟΣ	Β' ΕΞ	38	37	18	34	39
	ΠΡΟΣ	Γ' ΕΞ	38	101	18	38	41
	ΕΠΙΣ		30	8	23	32	34
ΑΝ-8	ΑΠΟΡ		26	1	20	20	27

ΣΥΝΟΛΟ LWA 46 dB(A)

Ανώτατη ηχητική ισχύς κάθε στομίου [dB(A)]

ΚΚΜ	ΠΡΟΣ	ΕΠΙΣ
2	27	29
3	20	25
5	22	25
6	26	35
7	32	33
8	19	21
9	29	
10	29	
11	29	28
12	29	29
14	28	31

Πίνακας(3.4.4)(Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

Σκοπός των παραπάνω υπολογισμών είναι για να διαπιστωθεί αν ο θορυβός απο τον ανεμιστήρα ή απο την ροή του αέρα στο δίκτυο που μεταδίδεται μέσω του κλιματιστικού δικτύου, είναι μικρότερος από την ανώτατη ηχοστάθμη, που επιτρέπεται σε αυτόν τον χώρο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τη χρήση του. Αν υπάρχει υπέρβαση τότε λαμβάνονται μέτρα μείωσης της ηχητικής ισχύος, π.χ. με τοποθέτηση κατάλληλων ηχοπαγίδων, εσωτερική επένδυση τμημάτων αγωγού με ηχοαπορροφητική επένδυση, επιμήκυνση του δικτύου κ.α. μέχρι να αφαιρεθεί το υπόλοιπο (θόρυβος δικτύου-όριο θορύβου) και να γίνει 0 ή (-) για όλες τις οκτάβες απο 63...8000 Hz. Ο στόχος των παραπάνω υπολογισμών είναι η καλύτερη δυνατή προσέγγιση σε λευκό θόρυβο.



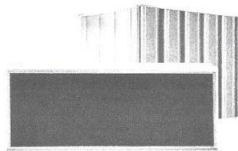
Η συνολική ηχητική ισχύς μέσα σε ένα χώρο αποτελεί το άθροισμα της ισχύος όλων των κλάδων προσαγωγής και επιστροφής και αποτελεί το άθροισμα της ηχητικής ισχύος των επί μέρους τμημάτων του κλάδου απο τον ανεμιστήρα μέχρι τη θέση του στομίου και της ηχητικής ισχύος του εκάστοτε στομίου.

Και εμείς κατα την διεξαγωγή των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε, διαπιστώσαμε την ύπαρξη του συγκεκριμένου προβλήματος καθώς διαπιστώθηκε θόρυβος, αλλά στα δικά μας αποτελέσματα θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι ψύκτες εδράζονται σε πέλματα με ιδιοσυχνότητα  $f_0 \leq 15\text{Hz}$ . Στους πύργους ψύξης έχουν τοποθετηθεί ηχοπαγίδες στην προσαγωγή και την απαγωγή του αέρα, έτσι ώστε η μέγιστη στάθμη θορύβου στον χώρο των πύργων να μην υπερβαίνει τα 75 dB(A). Οι πύργοι ψύξης εδράζονται λοιπόν με ελατήρια μάζας βισκόζης με την ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων να είναι  $f_0=3.5\text{Hz}$ . Τα ελατήρια τοποθετούνται σε πλάκα χάλυβα πάχους 20mm. Μεταξύ των πλακών και του δαπέδου του χώρου εγκατάστασης τοποθετείται ένα ελαστικό υλικό (κυψελωτή ελαστομερής πολυουρεθάνη μικτών κυψελών, τύπου Sylomer), πάχους 25mm. Οι αεραγωγοί έχουν ελαστική ανάρτηση όπως και όλων των σωληνώσεων.

#### Χαρακτηρισμός ηχοπαγίδων:

Οι τύποι Η/Π, που αναφέρονται στην μελέτη είναι οι εξής:

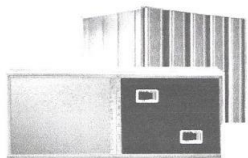


Τύπος XSA: πλευρές με επένδυση υαλοβάμβακα με υαλοπίλημα

RKA200



Τύπος RKA-D: πλευρές από λαμαρίνα



Τύπος MSA: πλευρές με επένδυση υαλοβάμβακα με υαλοπίλημα / λαμαρίνα

Εικόνα(3.4.5)χαρακτηρισμός ηχοπαγίδων (Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

Οι αντλίες και οι κυκλοφορητές στηρίζονται σε ελαστική αντικραδασμική βάση. Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) τοποθετείται σε ελατήρια με μάζα βισκόζης, η ιδιοσυχνότητα της έδρασης είναι  $f_0 \leq 4$  Hz. Έχουν τοποθετηθεί ηχοπαγίδες με  $D_e(250\text{Hz}) = 45$  dB(A) στην προσαγωγή και στην απαγωγή του εξαερισμού του χώρου. Στην οροφή και τους τοίχους του χώρου του μηχανοστασίου H/Z τοποθετήθηκε ηχοαπορροφητική επένδυση από ορυκτοβάμβακα πάχους 80mm και ειδικό βάρος  $40 \text{ kg/m}^3$ . Η επένδυση καλύπτεται με διάτρητη γαλβανισμένη λαμαρίνα (με διάτρηση  $\geq 30\%$ ) με πάχος 0,8mm.

Οι μετασχηματιστές τοποθετούνται σε ελαστικά πέλματα από σύνθετες πλάκες τύπου Sylomer.

Δίπλα στη σκηνή τοποθετούνται υδραυλικοί ανελκυστήρες. Η έδραση των αντλιών γίνεται σε πλάκα από σπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 200mm. Η πλάκα εδράζεται σε ελαστικό υλικό (κυψελωτή ελαστομερής πολυουρεθάνη μικτών κυψελών, τύπου Sylomer), πάχους 50mm.

### 3.5 Ηχητικός Εξοπλισμός θεάτρου:

Παρακάτω παραθέτουμε τον εξοπλισμό που πλαισιώνει την αίθουσα και χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή των παραστάσεων, όπως καταγράφηκαν τον Σεπτέμβριο του 2013.

<b>Δημοτικό Θέατρο Πειραιά</b>							
<b>Σεπτέμβριος 2013</b>							
<b>ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΟΠΤΙΚΟΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b>							
<b>A / A</b>	<b>Περιγραφή υλικού</b>	<b>Ποσότης (τεμ.)</b>	<b>Οίκος</b>	<b>Τύπος</b>			
	<b>ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΗΧΟΥ</b>						
	<b>Ηχεία Αίθουσας</b>						
	Ηχείο Μεγαφώνων Προσκήνιου Κεντρικό, Δεξί και Αριστερό	6	d&b audiotechnik	Ci90 Loudspeaker			

Ηχεία πολύ χαμηλών συχνοτήτων, subwoofer	2	d&b audiotechnik	C7-SUB Subwoofer			
Ηχεία κάλυψης μπροστινών θέσεων ( Front Fill)	4	d&b audiotechnik	E6 Loudspeaker NL4			
Ηχεία Περιφερειακά ηχεία εφφέ & surround	8	JBL	8320			
Συμπληρωματικά ηχεία υπερώου	12	Soundtube	SM590i			
Ηχεία Συμπληρωματικά ηχεία για τους εξώστες & θεωρεία	32	Penton	PBC10/TCOAX			
<b>Θάλαμος Ελέγχου (SCR)</b>						
Κονσόλα μίξης ήχου FOH / Θαλάμου Ελέγχου Ήχου SCR	1	YAMAHA	M7CL-48			

	Αναπαραγωγέας δίσκων CD	2	TASCAM	CD-01U Pro			
	Εγγραφέας σε κάρτες μνήμης	1	TASCAM	SS-R1			
	Εγγραφέας Σκληρού δίσκου και CD	1	TASCAM	DV- RA1000 HD			
	Εγγραφέας δίσκων CD	2	TASCAM	CD- RW901 SL			
	Μονάδα πολυκάναλων ψηφιακών εφφέ και Remote control	1	tc electronic	Reverb 6000 PC + TC Icon			
	Ηχεία μόνιτορ σκηνής	6	d&b audiotechnik	MAX Monitor NL4 connect or			
	Τελικός Ενισχυτής 2x300W / 4Ω	3	Crown	CTs 600			

Πίνακας(3.5.1)Εξοπλισμός θεάτρου

### 3.6 Υπαρκτή ακουστική μελέτη του κύριου Schubert

Ξεκινώντας με τη σκηνή, γνωρίζοντας ότι ο όγκος της σκηνής είναι  $V=5700 \text{ m}^3$ , ο χρόνος αντήχησης της άδειας σκηνής εκτιμάται σε  $T(500\text{Hz})= 5\text{sec}$  η ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνειά της είναι  $A_1=185\text{m}^2$ . Η ηχοαπορροφητική ικανότητα του πρόσθετου ηχοαπορροφητικού υλικού που αναφέραμε παραπάνω (3.3) είναι  $\alpha(500\text{Hz})=0.94$ . Η πρόσθετη ηχοαπορροφητική επιφάνεια είναι  $A_2=470\text{m}^2$ . Έτσι ο χρόνος αντήχησης της σκηνής μετά την τοποθέτηση της ηχοαπορροφητικής επένδυσης είναι  $T(500\text{Hz})=1,4 \text{ sec}$ .

Όσον αφορά την αίθουσα έχει όγκο  $4.200\text{m}^3$ , με αριθμό θέσεων 630 και προβλεπόμενο όγκο ανά ακροατή  $6.7 \text{ m}^3$ . Ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας μετρήθηκε απο διάφορα σημεία της πλατείας και των εξωστών, με κλειστή αυλαία. Η μέση τιμή του χρόνου αντήχησης είναι  $T(500\text{Hz})=1,42\text{sec}$ . Οι μετρήσεις της αρχικής μελέτης έγιναν χωρίς ακροατήριο και με τα παλιά καθίσματα. Η τελική κατασκευή του θεάτρου περιγράφεται :

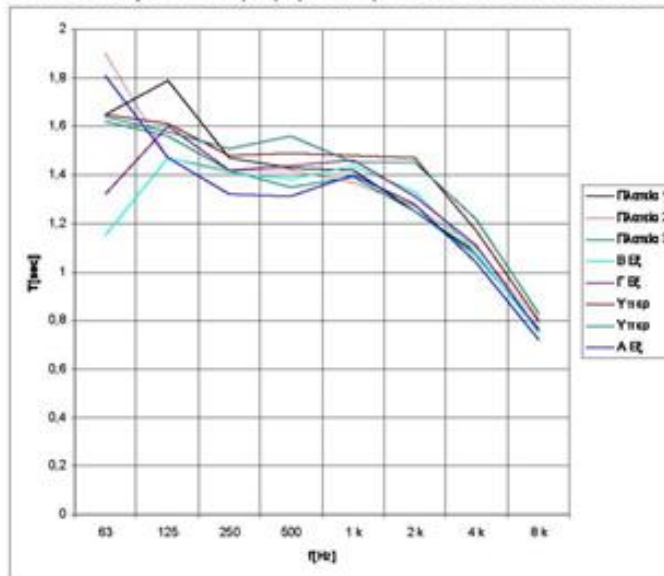
- ◆ Δάπεδο πλατείας και εξωστών > Ξύλινη κατασκευή με μοκέτα
- ◆ Τοίχοι > Επίχρισμα σε πέτρινο τοίχο
- ◆ Οροφές > Επίχρισμα σε ξύλινα λατάκια.

-Παρακάτω παραθέτουμε το γράφημα με τα αποτελέσματα του κύριου Schubert καθώς και την φωτογραφία των παλαιών καθισμάτων, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική μελέτη:

Αριθμός θέσεων 630  
Ο όγκος ανά ακροατή είναι  $6,7 \text{ m}^3$

Ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας με την κλειστή αυλαία, μετρήθηκε σε διάφορα σημεία της πλατείας και των εξωστών.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:



Η μέση τιμή του χρόνου αντήχησης είναι  $T(500\text{Hz}) = 1,42 \text{ sec.}$

Οι μετρήσεις έγιναν χωρίς ακροατήριο και η απορρόφηση των παλαιών καθισμάτων (βλέπε φωτογραφίες) δεν ανταποκρίνεται στις σημερινές απαιτήσεις. Με την τοποθέτηση των νέων καθισμάτων αναμένεται μία μείωση του χρόνου αντήχησης.

Εικόνα(3.6.1)Αποτελέσματα μετρήσεων αρχικής μελέτης, χρόνοι αντήχησης (Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)



Εικόνα(3.6.2)Τα παλαιά καθίσματα (φωτογραφίες από την αρχική μελέτη)



### 3.7 Στόχος της ακουστικής μελέτης Schubert

Γνωρίζουμε ότι ο χρόνος αντήχησης σε έναν χώρο ομιλίας πρέπει να έχει σχετικά χαμηλή τιμή. Ανάλογα το μέγεθος του χώρου η τιμή αυτή μπορεί να κυμαίνεται από 0.6 sec (για πολύ μικρούς χώρους) έως 0.9 (για μεσαίου μεγέθους θέατρα). Η μέγιστη τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 sec με 1.2 sec. Λαμβάνοντας υπόψη το rit της ορχήστρας και την δυνατότητα πραγματοποίησης μουσικών εκδηλώσεων μουσικού θεάτρου και όπερας, προτάθηκε από τον κύριο Subert να μην αλλάξει η γεωμετρία της αίθουσας, να μην τοποθετηθούν ηχοαπορροφητικά υλικά και να αντικατασταθούν, όπως και έγινε, μόνο τα καθίσματα της αίθουσας. Τα ακουστικά κριτήρια που δόθηκαν για την αίθουσα για τις μεσαίες συχνότητες είναι :

- Χρόνος αντήχησης  $T = 1.2 \text{ sec}$
- Δείκτης ισχύος  $G \geq 1\text{dB}$
- Δείκτης ευκρίνειας ήχου  $D \geq 50\%$
- Στάθμη θόρυβου βάθους  $L_A \leq 25\text{dB(A)}$

Πρόβλεψη των ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας με το λογισμικό CATT Acoustic

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T[sec]	1,36	1,32	1,32	1,21	1,15	1,08
D[%]	53	54	53	58	60	62
C[dB]	3	3,4	3	4,2	4,3	5,2
G[dB]	10	10	9	9	8	8

Πίνακας(3.7.1)πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας (Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

3.8 Παρακάτω δίνονται οι προδιαγραφές των καθισμάτων όπως είχαν προβλεφτεί από την μελέτη του κύριου Shubert .

Προδιαγραφές για τα καθίσματα της αίθουσας

Στις περιπτώσεις δοκιμών ή ηχογράφησης χωρίς ακροατήριο, η ακουστική ποιότητα στις Αίθουσες θα πρέπει να είναι αντίστοιχη με την ποιότητα που επιτυγχάνεται όταν είναι γεμάτες. Αυτό σημαίνει ότι η απορροφητικότητα των καθισμάτων θα πρέπει κατά το δυνατόν να παραμένει η ίδια είτε κάθετα κάποιος είτε όχι. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο θα πρέπει να εξεταστούν οι παρακάτω απαιτήσεις:

*Τμήματα του καθίσματος που ανακλούν τον ήχο*

Τα τμήματα του καθίσματος που πρέπει να ανακλούν τον ήχο είναι τα εξής:

- το πίσω μέρος της πλάτης του καθίσματος
- το τμήμα πάνω από το κάλυμμα της πλάτης του καθίσματος, δηλαδή πάνω από το ύψος του ώμου ενός καθισμένου ανθρώπου
- η επένδυση των πλαϊνών τμημάτων του καλύμματος της πλάτης του καθίσματος
- τα πλαϊνά του καθίσματος

Ως υλικό των τμημάτων των καθισμάτων που πρέπει να ανακλούν τον ήχο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ξύλο ή πλαστικό βάρους  $\geq 8 \text{ kg/m}^2$ , για παράδειγμα

κόντρα-πλακέ πάχους  $> 12 \text{ mm}$ . Τα ανακλαστικά τμήματα μπορούν να καλυφθούν με υλικό που θα κολληθεί πάνω στο κόντρα πλακέ.

Εικόνα(3.8.1)προδιαγραφές καθισμάτων (Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

Τμήματα του καθίσματος που απορροφούν τον ήχο

Τα τμήματα του καθίσματος που πρέπει να απορροφούν τον ήχο είναι τα εξής:

- το κάλυμμα της πλάτης του καθίσματος μέχρι το ύψος του ώμου ενός καθισμένου ανθρώπου
- το κάτω μέρος της βάσης του καθίσματος (πρέπει να καλυφθεί με διάτρητο κόντρα-πλακέ)
- τα καλυμμένα μπράτσα του καθίσματος

Τα υλικά πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προδιαγραφές:

Ποιότητα του υφάσματος:  
αντίσταση ροής αέρα: 600 - 1200 Ns / m<sup>3</sup>, κατά προτίμηση 800 Ns / m<sup>3</sup>  
βάρος: περίπου 500-700 g / m<sup>2</sup>

Κάλυμμα

Αφρώδες υλικό με ανοιχτούς πόρους με αντίσταση ροής αέρα 400 - 1000 Ns / m<sup>3</sup>, κατά 600 Ns / m<sup>3</sup>

- Πάχος καλύμματος:  
στο λεπτότερο σημείο πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 cm.
- Η αντίσταση ροής αέρα πρέπει να προσαρμοστεί ανάλογα με τους απαιτούμενους συντελεστές απορρόφησης
- Διάτρηση του κόντρα-πλακέ της βάσης του καθίσματος:  
Αν το κόντρα πλακέ έχει πάχος 15 mm, προτείνεται διάτρηση με ανοίγματα διαμέτρου 10 mm και απόσταση 26 mm μεταξύ τους. Η διάτρηση θα πρέπει να απλώνεται μέχρι τουλάχιστον 7 cm από τα όρια της επιφάνειας του ξύλου. Το διάτρητο τμήμα θα πρέπει να καλύπτεται από πίσω με ένα στρώμα μαλλιού. Σε αυτό το υλικό, η αντίσταση της ροής του αέρα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη (περίπου 10 Ns / m<sup>3</sup>).

Ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης ανά κάθισμα

Η επιφάνεια δαπέδου που αναλογεί σε κάθε κάθισμα, συμπεριλαμβανομένης της απόστασης μεταξύ των σειρών, θα είναι 0,55 x 0,95 m<sup>2</sup>.

Η απαιτούμενη ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης ανά κάθισμα είναι:

Συχνότητα σε Hz	125	250	500	1000	2000	4000
A: ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης σε m <sup>2</sup>	0,25-0,35	0,30-0,40	0,40-0,50	0,40-0,55	0,40-0,55	0,40-0,55

Η απαιτούμενη ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης ανά κάθισμα, που εξαρτάται από τη συχνότητα, πρέπει να βρίσκεται μέσα στα πλαίσια των επιτρεπόμενων ανοχών που αναφέρονται παραπάνω.

Εικόνα(3.8.2)υλικά καθισμάτων, ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης ανά κάθισμα (Απόσπασμα από την αρχική ακουστική μελέτη)

(ΟΛΕΣ ΟΙ ΕΙΚΟΝΕΣ ΣΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΟΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ SCHUBERT)

## Κεφάλαιο 4

### Πειραματικό μέρος

#### 4.1 Εισαγωγή της πειραματικής διαδικασίας

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται το πειραματικό τμήμα της εργασίας. Σε αυτό, γίνεται μια προσπάθεια μελέτης και ανάλυσης της ακουστικής του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά. Το Δημοτικό Θέατρο Πειραιά βρίσκεται επί της λεωφόρου Ηρώων Πολυτεχνείου στον Πειραιά και οι μετρήσεις διεξήχθησαν, στις 22 Οκτωβρίου 2018, μεσημεριανές ώρες, αν και δεν μας απασχόλησαν ιδιαίτερα οι εξωτερικοί παράγοντες και αξίζει να σημειωθεί ότι δεν επηρέασαν τις μετρήσεις μας. Οι συνθήκες που επιλέξαμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν ώρες εκτός παραστάσεων, διότι μας ενδιέφερε και η μέτρηση του θορύβου βάθους, χωρίς τον παράγοντα των θεατών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην κεντρική σκηνή του θεάτρου και έπειτα έγινε μέτρηση ηχομόνωσης στο φουαγιέ . Μετρήσαμε την ηχομόνωση της αίθουσας θεάτρου από έξω προς τα μέσα, τον θόρυβο βάθους και τον χρόνο αντήχησης.

Στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας είναι η επαλήθευση της αρχικής ακουστικής μελέτης του κύριου Schubert , καθώς και να αναγνωρίσουμε πιθανά προβλήματα της ακουστικής του θεάτρου, που απορρέουν από χωροταξικά λάθη (π.χ. θόρυβος μηχανημάτων και server σκηνής). Εν συνεχεία, θέλουμε να διαπιστώσουμε αν η αλλαγή των καθισμάτων επηρέασε την αρχική ακουστική μελέτη. Τέλος , αναλύουμε τις μετρήσεις μας και παραθέτουμε τυχόν προτάσεις βελτίωσης της ακουστικής και των προβλημάτων που διαπιστώσαμε.

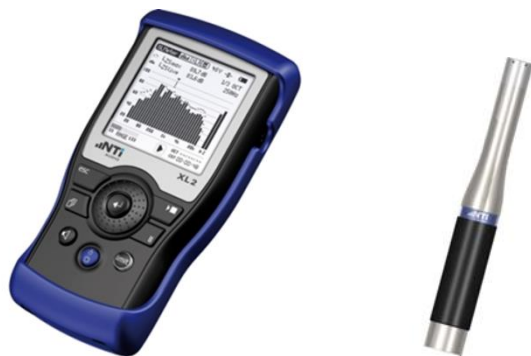
Για την διεξαγωγή των μετρήσεων, βοήθησαν οι σύμβουλοι ακουστικής Dr G. Schubert και ο Χάρης Μωραϊτης, στους οποίους ανήκει ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και οι ηχολήπτες του θεάτρου Τάσος Τσαρδανίδης και Γιάννης Φουντουλάκης.

## 4.2 Εξοπλισμός για την διεξαγωγή των μετρήσεων

Ο εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής :

- Ένας φορητός υπολογιστής με το πρόγραμμα Room EQ Wizard για την καταγραφή των μετρήσεων και την περαιτέρω μελέτη αυτών
- Ένα ηχόμετρο της εταιρείας Norsonic τύπου 118, SNr. 32191 , Type 1 κατά DIN 651/804
- Ένας προενισχυτής μικροφώνου 1206 , SNr. 31117
- Ένα πυκνωτικό μικρόφωνο 1225 , SNr. 103237
- Έναν βαθμονομητή Pulsar Type 105
- Ένα παντοκατευθυντικό δωδεκάεδρο ηχείο, μοντέλο Cesva BP-012
- Έναν ενισχυτή, μοντέλο Cesva AP-600 (noise generator)
- Μπαλόνια
- Πινέζα
- Ρόζ θόρυβος

**Αναλυτικότερα χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω εξοπλισμό:**



Εικόνα(4.2.α) **Sound Level Meter**

Model: NTi XL2-TA  
Serial Number: A2A-04435-D2  
Preamplifier Serial Number: 1696 (Type MA-220)  
Mic Capsule Serial Number: 7526 (Type M2230 - Certified class 1 measurement microphone according to IEC 61672 with metal diaphragm.)  
Supported Standards: IEC 61672, IEC 60651, IEC 60804  
China: GB/T 3785:2010, GB/T 3241, GB 3096-2008, GB 50526,  
GB-T\_4959-1995

Germany: DIN 15905-5, DIN 45645-2, optional: DIN  
45645-1  
Japan: JIS C1509-1:2005, JIS C 1513 class 1, JIS C 1514  
class 0  
Switzerland: SLV  
UK: BS6698, BS5969  
US: ANSI S1.4, ANSI S1.43, ANSI S1.11-2004 class 1



#### Εικόνα(4.2.β) **Sound Level Calibrator**

Model: Pulsar Type 105

Serial Number: 50720

Supported Standards: IEC 60942 Class 1 Level, EN 50081-1, EN 50082-1 & EN  
61010-1

Sound Pressure: 94dB that is a pressure of 1 Pascal

Pressure Tolerance: Model 105 0.2dB

Frequency: 1kHz (1000cps)  $\pm 0.2\%$

Distortion: <1% THD

Microphone Diameter: Nominal Half Inch to IEC 1094-4



Εικόνα(4.2.γ) **Sound Source System**

System Model:	Cesva FP-120
Speaker Model:	Cesva BP-012
Speaker Type:	Omnidirectional (Dodecahedreon)
Speaker Serial Number:	T228795
Amplifier Model:	Cesva AP-600 (Noise Generator)
Sound Power Level:	123dB PWL
Amplifier Serial Number:	T228795
Supported Standards:	ISO 10104-2, ISO 140-4, ISO 16283-1, ISO 3382-1/2, ISO 354

### 4.3 Πειραματική διάταξη και τρόπος διεξαγωγής των μετρήσεων

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, ο όγκος της αίθουσας του θεάτρου είναι  $4200 \text{ m}^3$  και ο όγκος της σκηνής είναι  $5700 \text{ m}^3$ . Ο αριθμός θέσεων είναι 630, με όγκο ανά ακροατή  $6,7 \text{ m}^3$ . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τα καινούργια καθίσματα, που αλλάξανε...

Θέσεις των μετρήσεων :



Εικόνα 4.3 διεξαγωγής μετρήσεων, τυχαία θέση (φωτογραφία, 22/10/18)



#### 4.3.1 Θόρυβος βάθους

Μέτρηση 001 :

Μετρήσαμε τον θόρυβο βάθους στην κεντρική πλατεία του θεάτρου με τα φώτα της πλατείας ανοιχτά . Τα μηχανήματα για τους server και τους πύργους υπολογιστών του θεάτρου που βρίσκονται πίσω από τη σκηνή ήταν ανοιχτά . Πήραμε δύο μετρήσεις, μία με ανοιχτό κλιματισμό και μία με κλειστό για 31 κεντρικές συχνότητες οκτάβων από 20- 20000 Hz.

**Θέση ηχομέτρου :** Σειρά 12, κέντρο πλατείας , μέτρηση 001, ακούγεται θόρυβος βάθους από το δωμάτιο των ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων στο βάθος της σκηνής, αριστερά .

Θόρυβος βάθους : χωρίς κλιματισμό 27,2 dB

Θέτοντας σε λειτουργία τον κλιματισμό της σκηνής της πλατείας και των θεωρείων έχουμε θόρυβο βάθους 40,9 dB ,(+10 dB πάνω λόγω θορύβου εξαερισμού και κλιματισμού)

***Ακολουθεί πίνακας μετρήσεων θορύβου βάθους, με τις τιμές που καταγράψαμε:***

FREQUENCY Hz	Background Noise HVAC OFF (LZeq)	HVAC ON (LZeq)
20	36,8	50,7
25	42,5	53,4
31,5	45,3	47,2
40	41,9	48,3
50	40,4	44,6
63	37,4	41,3
80	34,8	38,7
100	28,3	40,1
125	27,5	37,8
160	34,6	40
200	21,8	37,7
250	22,1	37,3
315	24,8	32,7
400	19,4	33
500	19	33
630	17	34,3
800	14,2	33,6
1000	11,9	32,1
1250	10	30,1
1600	10	27,7
2000	8,7	25,9
2500	6,7	23,7
3150	6,3	20,3
4000	7,6	17
5000	7	13,1
6300	7,4	10
8000	7,6	8,6
10000	6,9	7,3
12500	6,3	6,4
16000	5,5	5,5
20000	16,8	14,6
<b>TOTAL dB(A) - LAeq</b>	<b>27,2</b>	<b>40,9</b>

Πίνακας(4.3.1.α)Μετρήσεις θορύβου βάθους

#### 4.3.2 Χρόνος Αντήχησης :

Για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης, χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο της κρουστικής διεγερσης (impulse) . Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ο χώρος διεγείρεται με ένα θόρυβο που μηδενίζεται ακαριαία και για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε μπαλόνια που σκάνε. Τα μπαλόνια τα σκάγαμε με πινέζα.

Πήραμε μετρήσεις για 18 κεντρικές συχνότητες οκτάβων. Ακολουθούν οι θέσεις οργάνων , όπως αυτές τοποθετήθηκαν για τις μετρήσεις.

Μέτρηση 002 :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Σειρά 12 πλατείας, κεντρικός διάδρομος

Μέτρηση 003 :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Σειρά 10 πλατείας , θέση 16 , δεξιά όπως κοιτάμε την πλατεία από τη σκηνή

Μέτρηση 004 :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Σειρά 10 πλατείας, θέση 3, αριστερά όπως κοιτάμε την πλατεία από τη σκηνή.

Μέτρηση 005 :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Σειρά 4 πλατείας, θέση 8, αριστερά όπως κοιτάμε την πλατεία από τη σκηνή.

Μέτρηση 006, εξώστης Α :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Εξώστης Α17, δεξιά όπως κοιτάμε τους εξώστες από τη σκηνή.

Μέτρηση 007, εξώστης Β :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Εξώστης Β12, κεντρικό μπαλκόνι προβολέα, ακριβώς απέναντι από τη σκηνή.

Μέτρηση 008, εξώστης Β :

*Είναι η ακριβώς ίδια μέτρηση*

Μέτρηση 009, εξώστης Γ :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** Εξώστης Γ3, αριστερά όπως κοιτάμε τους εξώστες από τη σκηνή.

Μέτρηση 010, υπερώο :

**Θέση πηγής :** Στο κέντρο της σκηνής, άξονας μπροστινού πλάτους

**Θέση ηχομέτρου :** αριστερά, με κλίση 1/3 του ηχομέτρου, όπως κοιτάμε το υπερώο από τη σκηνή.

Η μέτρηση είναι λάθος γιατί το ηχώμετρο κοιτούσε την ανακλαστική επιφάνεια του θόλου και είναι 10 dB πάνω λόγω του στομίου απαγωγής αέρα.

Μέτρηση 11:

*ίδιο σημείο ακριβώς με σωστή κλίση ηχομέτρου*

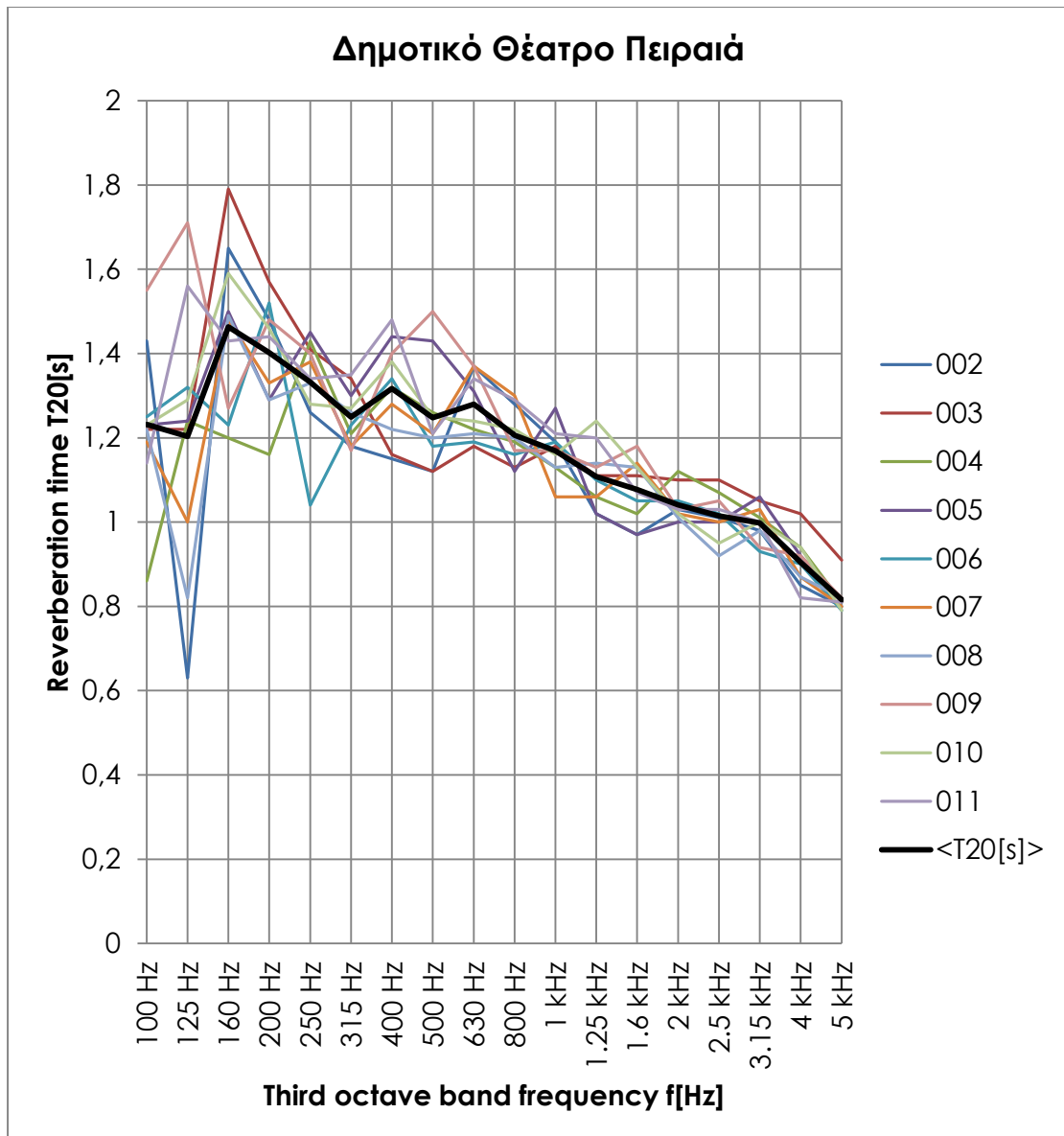
**Ακολουθούν πίνακες με τις τιμές που καταγράψαμε για όλες τις μετρήσεις :**

Ηχόμετρο της εταιρείας Norsonic τύπου 118, SNr. 32191, Type 1 κατά DIN 651/804											
Προενισχυτής μικροφώνου 1206, SNr. 31117											
Πυκνωτικό μικρόφωνο 1225, SNr. 103237											
	Reverberation Time T20[s]										<b>Mean value</b>
	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	<b>&lt;T20[s]&gt;</b>
100 Hz	1,43	1,22	0,86	1,23	1,25	1,19	1,22	1,55	1,23	1,14	<b>1,23</b>
125 Hz	0,63	1,22	1,24	1,24	1,32	1	0,82	1,71	1,29	1,56	<b>1,20</b>
160 Hz	1,65	1,79	1,2	1,5	1,23	1,48	1,49	1,27	1,59	1,43	<b>1,46</b>
200 Hz	1,48	1,57	1,16	1,29	1,52	1,33	1,29	1,48	1,46	1,44	<b>1,40</b>
250 Hz	1,26	1,41	1,43	1,45	1,04	1,38	1,33	1,4	1,28	1,34	<b>1,33</b>
315 Hz	1,18	1,34	1,21	1,3	1,23	1,18	1,26	1,17	1,27	1,35	<b>1,25</b>
400 Hz	1,15	1,16	1,32	1,44	1,34	1,28	1,22	1,4	1,38	1,48	<b>1,32</b>
500 Hz	1,12	1,12	1,26	1,43	1,18	1,21	1,2	1,5	1,25	1,21	<b>1,25</b>
630 Hz	1,37	1,18	1,22	1,31	1,19	1,37	1,21	1,37	1,24	1,34	<b>1,28</b>
800 Hz	1,28	1,13	1,19	1,12	1,16	1,3	1,2	1,17	1,22	1,29	<b>1,21</b>
1 kHz	1,19	1,18	1,13	1,27	1,19	1,06	1,13	1,17	1,16	1,21	<b>1,17</b>
1.25 kHz	1,02	1,11	1,06	1,02	1,1	1,06	1,14	1,13	1,24	1,2	<b>1,11</b>
1.6 kHz	0,97	1,11	1,02	0,97	1,05	1,14	1,13	1,18	1,13	1,07	<b>1,08</b>
2 kHz	1,03	1,1	1,12	1	1,05	1,02	1,01	1,03	1,02	1,03	<b>1,04</b>
2.5 kHz	1,01	1,1	1,07	1	1,02	1	0,92	1,05	0,95	1,03	<b>1,02</b>
3.15 kHz	0,98	1,05	1,01	1,06	0,93	1,03	0,98	0,94	1	1	<b>1,00</b>
4 kHz	0,85	1,02	0,94	0,92	0,9	0,87	0,87	0,92	0,94	0,82	<b>0,91</b>
5 kHz	0,8	0,91	0,81	0,81	0,79	0,8	0,82	0,82	0,79	0,81	<b>0,82</b>

Πίνακας(4.3.2.α)Τιμές μετρήσεων από 002 έως 011

	Octave band reverberation time T20[s]				
		<T20[s]>			
	125Hz	1,30			
	250Hz	1,33			
	500Hz	1,28			
	1kHz	1,16			
	2kHz	1,04			
	4kHz	0,91			

Πίνακας(4.3.2.β)Χρόνοι αντήχησης από 125 Hz έως 4kHz



Εικόνα(4.3.2.γ)Γράφημα χρόνων αντήχησης

### 4.3.3 Μετρήσεις ηχομόνωσης

Για όλες τις μετρήσεις που έγιναν, για να ελέγξουμε την ηχομόνωση της κεντρικής αίθουσας του θεάτρου, χρησιμοποιήσαμε το δωδεκάεδρο ηχείο SRC και ηχοβολήσαμε με συνεχόμενο ροζ θόρυβο (μέθοδος συνεχόμενης στάθμης θορύβου). Έπειτα, καταγράψαμε τη συνεχόμενη στάθμη συνεχούς θορύβου  $L_{\text{zeq}}$  και την ένταση κάθε κεντρικής συχνότητας που περνάει από τρία σημεία της κεντρικής πλατείας για 31 κεντρικές συχνότητες οκτάβων από 20- 20000 Hz.

Το  $L_{\text{eq}}$  είναι η ηχητική στάθμη πίεσης ενός σταθερής στάθμης ήχου, που περικλείει την ίδια ακουστική στάθμη με τον κυμαινόμενο, είναι ένας μέσος όρος και μετριέται σε dB(A) .

Η γεννήτρια και το δωδεκάεδρο ηχείο βρίσκονταν στο φουαγιέ του θεάτρου και οι μετρήσεις με το ηχώμετρο έγιναν στην πλατεία του θεάτρου με κλειστές τις πόρτες. Πρώτα πήραμε τιμές στο φουαγιέ του θεάτρου ,μετρήσαμε δηλαδή τη πηγή.

#### **Θέση ηχομέτρου :**

1. Σειρά 14 πλατείας, θέση 9, αριστερά, όπως κοιτάμε τη σκηνή από την πλατεία , RCV 1, 60 dB(A) διαφορά.
2. Σειρά 9 πλατείας, θέση 16, δεξιά, όπως κοιτάμε τη σκηνή από την πλατεία.
3. Σειρά 5 πλατείας, θέση 7, δεξιά, όπως κοιτάμε τη σκηνή από την πλατεία.
4. Μπροστά στην πλατεία , στο κέντρο της σκηνής

#### **Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές που καταγράψαμε:**

FREQUENCY Hz	Speaker Noise (Source) (LZeq)	Noise Inside Hall (Receiver) (LZeq)
20	58,4	37,1
25	61,4	44,2
31,5	67,9	44,8
40	73,8	44,1
50	78,5	46,5
63	83	39
80	84,5	35,3
100	89,6	36,3
125	95,1	38,1
160	98	39,4
200	98	34,7
250	97,8	35,9
315	96,1	32,1
400	95,2	33,3
500	93,4	28,1
630	92	24,5
800	90,7	21,4
1000	89,2	18,5
1250	88,2	16,8
1600	90,1	17,9
2000	89,1	16,7
2500	87	14,9
3150	84,4	11,3
4000	81,4	9,4
5000	81,7	8,6
6300	80,2	8
8000	74,7	7,9
10000	68,8	7,2
12500	60,4	6,4
16000	51	5,5
20000	57,5	16,5
<b>TOTAL dB(A) - LAeq</b>	<b>100,8</b>	<b>33,6</b>

Πίνακας(4.3.3.α)Μετρήσεις ηχομόνωσης



4.4 Αναλυτικά οι μετρήσεις και οι τιμές που καταγράψαμε για τους χρόνους αντήχησης. Μετρήσεις 002-011.

Μέτρηση 002:

Πλατεία, σειρά 12:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	1,66		
100 Hz	1,43		
125 Hz	0,63		
160 Hz	1,65		
200 Hz	1,48		
250 Hz	1,26		
315 Hz	1,18		
400 Hz	1,15		
500 Hz	1,12		
630 Hz	1,37		
800 Hz	1,28		
1 kHz	1,19		
1.25 kHz	1,02		
1.6 kHz	0,97		
2 kHz	1,03		
2.5 kHz	1,01		
3.15 kHz	0,98		
4 kHz	0,85		
5 kHz	0,8		
6.3 kHz	0,68		
8 kHz	0,59		
10 kHz	0,49		
T20 A	1,05		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,14		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.α)Μέτρηση 002,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time -	T30		
Frequency (Hz)	T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	N/A		
100 Hz	1,57		
125 Hz	1,37		
160 Hz	1,65		
200 Hz	1,47		
250 Hz	1,31		
315 Hz	1,32		
400 Hz	1,4		
500 Hz	1,29		
630 Hz	1,37		
800 Hz	1,31		
1 kHz	1,24		
1.25 kHz	1,1		
1.6 kHz	1,03		
2 kHz	1,08		
2.5 kHz	1,06		
3.15 kHz	1,03		
4 kHz	0,93		
5 kHz	0,84		
6.3 kHz	0,71		
8 kHz	0,64		
10 kHz	0,53		
T20 A	1,05		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,14		
T30 Z	N/A		

Πίνακας (4.4.α1)Μέτρηση 002,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 003:

Πλατεία, σειρά 10, θέση 16:

Primary reverberation time -	T20		
Frequency (Hz)	T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	1,62		
80 Hz	1,35		
100 Hz	1,22		
125 Hz	1,22		
160 Hz	1,79		
200 Hz	1,57		
250 Hz	1,41		
315 Hz	1,34		
400 Hz	1,16		
500 Hz	1,12		
630 Hz	1,18		
800 Hz	1,13		
1 kHz	1,18		
1.25 kHz	1,11		
1.6 kHz	1,11		
2 kHz	1,1		
2.5 kHz	1,1		
3.15 kHz	1,05		
4 kHz	1,02		
5 kHz	0,91		
6.3 kHz	0,74		
8 kHz	0,64		
10 kHz	0,54		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.β)Μέτρηση 003,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30 T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	2,95	?	
100 Hz	1,73		
125 Hz	1,12		
160 Hz	1,51		
200 Hz	1,49		
250 Hz	1,43		
315 Hz	1,37		
400 Hz	1,25		
500 Hz	1,22		
630 Hz	1,2		
800 Hz	1,27		
1 kHz	1,22		
1.25 kHz	1,17		
1.6 kHz	1,13		
2 kHz	1,12		
2.5 kHz	1,12		
3.15 kHz	1,1		
4 kHz	1		
5 kHz	0,89		
6.3 kHz	0,79		
8 kHz	0,65		
10 kHz	0,53		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.β1)Μέτρηση 003,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 004:

Πλατεία, σειρά 7, θέση 3:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	1,52		
80 Hz	1,37		
100 Hz	0,86		
125 Hz	1,24		
160 Hz	1,2		
200 Hz	1,16		
250 Hz	1,43		
315 Hz	1,21		
400 Hz	1,32		
500 Hz	1,26		
630 Hz	1,22		
800 Hz	1,19		
1 kHz	1,13		
1.25 kHz	1,06		
1.6 kHz	1,02		
2 kHz	1,12		
2.5 kHz	1,07		
3.15 kHz	1,01		
4 kHz	0,94		
5 kHz	0,81		
6.3 kHz	0,73		
8 kHz	0,61		
10 kHz	0,49		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.γ)Μέτρηση 004,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	1,46		
100 Hz	1,24		
125 Hz	1,26		
160 Hz	1,46		
200 Hz	1,4		
250 Hz	1,39		
315 Hz	1,3		
400 Hz	1,35		
500 Hz	1,24		
630 Hz	1,18		
800 Hz	1,2		
1 kHz	1,2		
1.25 kHz	1,15		
1.6 kHz	1,07		
2 kHz	1,1		
2.5 kHz	1,12		
3.15 kHz	1,09		
4 kHz	1,01		
5 kHz	0,85		
6.3 kHz	0,77		
8 kHz	0,65		
10 kHz	0,52		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.γ1)Μέτρηση 004,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 005:

Πλατεία, σειρά 4, θέση 8:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	5,04	?	
80 Hz	1,29		
100 Hz	1,23		
125 Hz	1,24		
160 Hz	1,5		
200 Hz	1,29		
250 Hz	1,45		
315 Hz	1,3		
400 Hz	1,44		
500 Hz	1,43		
630 Hz	1,31		
800 Hz	1,12		
1 kHz	1,27		
1.25 kHz	1,02		
1.6 kHz	0,97		
2 kHz	1		
2.5 kHz	1		
3.15 kHz	1,06		
4 kHz	0,92		
5 kHz	0,81		
6.3 kHz	0,73		
8 kHz	0,59		
10 kHz	0,52		
T20 A	1,07		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.δ)Μέτρηση 005,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	2,14 ?		
100 Hz	1,52		
125 Hz	1,29		
160 Hz	1,61 ?		
200 Hz	1,38		
250 Hz	1,27		
315 Hz	1,41		
400 Hz	1,37		
500 Hz	1,38		
630 Hz	1,28		
800 Hz	1,21		
1 kHz	1,31		
1.25 kHz	1,16		
1.6 kHz	1,01		
2 kHz	1,07		
2.5 kHz	1,1		
3.15 kHz	1,09		
4 kHz	1,01		
5 kHz	0,86		
6.3 kHz	0,75		
8 kHz	0,63		
10 kHz	0,53		
T20 A	1,07		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.δ1)Μέτρηση 005,Πλατεία,χρόνοι αντήχησης T30



Μέτρηση 006:

Εξώστης A17:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	1,6		
100 Hz	1,25		
125 Hz	1,32		
160 Hz	1,23		
200 Hz	1,52		
250 Hz	1,04		
315 Hz	1,23		
400 Hz	1,34		
500 Hz	1,18		
630 Hz	1,19		
800 Hz	1,16		
1 kHz	1,19		
1.25 kHz	1,1		
1.6 kHz	1,05		
2 kHz	1,05		
2.5 kHz	1,02		
3.15 kHz	0,93		
4 kHz	0,9		
5 kHz	0,79		
6.3 kHz	0,71		
8 kHz	0,58		
10 kHz	0,52		
T20 A	1,05		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,1		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.ε)Μέτρηση 006, εξώστης A17,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	N/A		
100 Hz	3,05		
125 Hz	1,21		
160 Hz	1,83		
200 Hz	1,58		
250 Hz	1,36		
315 Hz	1,35		
400 Hz	1,32		
500 Hz	1,27		
630 Hz	1,2		
800 Hz	1,25		
1 kHz	1,21		
1.25 kHz	1,13		
1.6 kHz	1,09		
2 kHz	1,1		
2.5 kHz	1,03		
3.15 kHz	0,98		
4 kHz	0,9		
5 kHz	0,8		
6.3 kHz	0,71		
8 kHz	0,62		
10 kHz	0,51		
T20 A	1,05		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,1		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.ε1)Μέτρηση 006, εξώστης A17,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 007:

Εξώστης B12:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	5,09		
80 Hz	2,03		
100 Hz	1,19		
125 Hz	1		
160 Hz	1,48		
200 Hz	1,33		
250 Hz	1,38		
315 Hz	1,18		
400 Hz	1,28		
500 Hz	1,21		
630 Hz	1,37		
800 Hz	1,3		
1 kHz	1,06		
1.25 kHz	1,06		
1.6 kHz	1,14		
2 kHz	1,02		
2.5 kHz	1		
3.15 kHz	1,03		
4 kHz	0,87		
5 kHz	0,8		
6.3 kHz	0,73		
8 kHz	0,62		
10 kHz	0,46		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.ζ)Μέτρηση 007, εξώστης B12,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30 T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	N/A		
100 Hz	1,3		
125 Hz	1,45		
160 Hz	1,65		
200 Hz	1,31		
250 Hz	1,29		
315 Hz	1,3		
400 Hz	1,37		
500 Hz	1,28		
630 Hz	1,32		
800 Hz	1,25		
1 kHz	1,15		
1.25 kHz	1,2		
1.6 kHz	1,11		
2 kHz	1,08		
2.5 kHz	1,05		
3.15 kHz	0,98		
4 kHz	0,88		
5 kHz	0,82		
6.3 kHz	0,71		
8 kHz	0,63		
10 kHz	0,51		
T20 A	1,09		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,13		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.ζ1)Μέτρηση 006, εξώστης Β12,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 008:

Εξώστης B12: ίδια μέτρηση με 007

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	7,48		
63 Hz	9,21		
80 Hz	1,56		
100 Hz	1,22		
125 Hz	0,82		
160 Hz	1,49		
200 Hz	1,29		
250 Hz	1,33		
315 Hz	1,26		
400 Hz	1,22		
500 Hz	1,2		
630 Hz	1,21		
800 Hz	1,2		
1 kHz	1,13		
1.25 kHz	1,14		
1.6 kHz	1,13		
2 kHz	1,01		
2.5 kHz	0,92		
3.15 kHz	0,98		
4 kHz	0,87		
5 kHz	0,82		
6.3 kHz	0,65		
8 kHz	0,57		
10 kHz	0,47		
T20 A	1,07		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,14		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.η)Μέτρηση 008, εξώστης B12,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30	T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A			
63 Hz	N/A			
80 Hz	N/A			
100 Hz		1,38		
125 Hz		1,41		
160 Hz		1,76		
200 Hz		1,3		
250 Hz		1,34		
315 Hz		1,33		
400 Hz		1,32		
500 Hz		1,26		
630 Hz		1,27		
800 Hz		1,24		
1 kHz		1,2		
1.25 kHz		1,18		
1.6 kHz		1,14		
2 kHz		1,04		
2.5 kHz		1		
3.15 kHz		0,96		
4 kHz		0,89		
5 kHz		0,84		
6.3 kHz		0,68		
8 kHz		0,61		
10 kHz		0,51		
T20 A		1,07		
T20 Z	N/A			
T30 A		1,14		
T30 Z	N/A			

Πίνακας(4.4.η1)Μέτρηση 008, εξώστης Β12,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 009:

Εξώστης Γ3:

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	0,99		
80 Hz	1,03		
100 Hz	1,55		
125 Hz	1,71		
160 Hz	1,27		
200 Hz	1,48		
250 Hz	1,4		
315 Hz	1,17		
400 Hz	1,4		
500 Hz	1,5		
630 Hz	1,37		
800 Hz	1,17		
1 kHz	1,17		
1.25 kHz	1,13		
1.6 kHz	1,18		
2 kHz	1,03		
2.5 kHz	1,05		
3.15 kHz	0,94		
4 kHz	0,92		
5 kHz	0,82		
6.3 kHz	0,72		
8 kHz	0,59		
10 kHz	0,51		
T20 A	1,16		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,22		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.θ)Μέτρηση 009, εξώστης Γ3,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30 T30 mean (sec)	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	2,71		
100 Hz	1,69		
125 Hz	1,75		
160 Hz	1,3		
200 Hz	1,49		
250 Hz	1,41		
315 Hz	1,38		
400 Hz	1,33		
500 Hz	1,31		
630 Hz	1,31		
800 Hz	1,34		
1 kHz	1,21		
1.25 kHz	1,19		
1.6 kHz	1,14		
2 kHz	1,07		
2.5 kHz	1,05		
3.15 kHz	0,97		
4 kHz	0,92		
5 kHz	0,84		
6.3 kHz	0,73		
8 kHz	0,61		
10 kHz	0,53		
T20 A	1,16		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,22		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.θ1)Μέτρηση 009, εξώστης Γ3,χρόνοι αντήχησης T30

Μέτρηση 010:

Υπερώο: ΛΑΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ



Μέτρηση 011:

Υπερώο: η μέτρηση 010 σωστά

Primary reverberation time - Frequency (Hz)	T20 T20 mean (sec)	Status	T20 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	5,63		
80 Hz	1,35		
100 Hz	1,14		
125 Hz	1,56		
160 Hz	1,43		
200 Hz	1,44		
250 Hz	1,34		
315 Hz	1,35		
400 Hz	1,48		
500 Hz	1,21		
630 Hz	1,34		
800 Hz	1,29		
1 kHz	1,21		
1.25 kHz	1,2		
1.6 kHz	1,07		
2 kHz	1,03		
2.5 kHz	1,03		
3.15 kHz	1		
4 kHz	0,82		
5 kHz	0,81		
6.3 kHz	0,72		
8 kHz	0,57		
10 kHz	0,44		
T20 A	1,12		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,14		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.κ)Μέτρηση 011, Υπερώο: η μέτρηση 010 σωστά ,χρόνοι αντήχησης T20

Secondary reverberation time - Frequency (Hz)	T30	Status	T30 stdev (sec)
50 Hz	N/A		
63 Hz	N/A		
80 Hz	N/A		
100 Hz	1,91		
125 Hz	1,56		
160 Hz	1,59		
200 Hz	1,5		
250 Hz	1,41		
315 Hz	1,27		
400 Hz	1,34		
500 Hz	1,33		
630 Hz	1,36		
800 Hz	1,27		
1 kHz	1,18		
1.25 kHz	1,17		
1.6 kHz	1,11		
2 kHz	1,08		
2.5 kHz	1,01		
3.15 kHz	0,96		
4 kHz	0,88		
5 kHz	0,83		
6.3 kHz	0,72		
8 kHz	0,62		
10 kHz	0,49		
T20 A	1,12		
T20 Z	N/A		
T30 A	1,14		
T30 Z	N/A		

Πίνακας(4.4.κ1)Μέτρηση 011, Υπερώο: η μέτρηση 010 σωστά ,χρόνοι αντήχησης

T30

## 4.5 Συγκρίσεις με τη μελέτη του κύριου Schubert.

### 4.5.1 Θόρυβος Βάθους

Παρατηρούμε ότι βάσει της μελέτης του κυρίου Schubert ,έχει δοθεί στην διακήρυξη του έργου η εξής επιτρεπτή στάθμη θορύβου  $L_A \leq 25$  dB(A).

Αναλυτικότερα για την αίθουσα του θεάτρου, τους εξώστες, το υπερώο, τον πύργο της σκηνής και το pit της ορχήστρας δίνεται για το καθένα  $L_{eq} = 25$  dB(A).

Ο κύριος Schubert στη μελέτη προβλέπει ότι λόγω της δύσκολης κατάστασης τροφοδότησης των εξωστών και του υπερώου μπορεί η στάθμη θορύβου στις περιοχές αυτές να υπερβαίνει την τιμή των 25 dB(A), αλλά δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 30 dB(A).

Στις μετρήσεις μας καταγράψαμε την συνολική τιμή των 27,2 dB(A) με τον κλιματισμό κλειστό

Και την συνολική τιμή των 40,9 dB(A) με τον κλιματισμό ανοιχτό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις του κυρίου Schubert διεξήχθησαν στις 15.12.2005 με τα παλιά καθίσματα του θεάτρου. Οι μετρήσεις μας έλαβαν χώρα με τα καινούργια καθίσματα τα οποία τοποθετήθηκαν μετά την ανακαίνιση (2012-2013) . Καθώς δεν καταφέραμε να βρούμε τις προδιαγραφές των καινούργιων καθισμάτων, θεωρούμε ότι συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές που έχει θέσει ο κύριος Schubert στην μελέτη του, τις οποίες αναφέρουμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 της εργασίας μας.

Παρουσιάζουμε φωτογραφικό υλικό, δικό μας, από τα καινούργια καθίσματα (22/10/2018):



Εικόνα 1 Τα καθίσματα



Εικόνα 2 Το κάθισμα



Εικόνα 3 Το κάθισμα ανοιχτό



Εικόνα 4 Από το πλάι τα καθίσματα



Εικόνα 5 Το κάθισμα ολόκληρο

Παρατηρούμε λοιπόν μια εμφανή απόκλιση από τα 25 dB(A) που δόθηκαν σαν επιτρεπτή στάθμη θορύβου χωρίς όμως, με τον κλιματισμό κλειστό, να υπερβαίνει τα 30 dB(A) που έθεσε ως όριο ο κύριος Schubert.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων του θορύβου βάθους με κλειστό κλιματισμό, παρατηρήσαμε έναν αξιοσημείωτο συνεχόμενο βόμβο, που επηρέασε αισθητά τις μετρήσεις μας ,αλλά και την αίθουσα από ακουστική άποψη. Ο βόμβος αυτός προερχόταν από το δωμάτιο ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων , που βρίσκεται στο βάθος της σκηνής αριστερά.



Εικόνα 6-το δωμάτιο ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων



Εικόνα 7-η πυράντοχη πόρτα



Εικόνα 8-η πόρτα

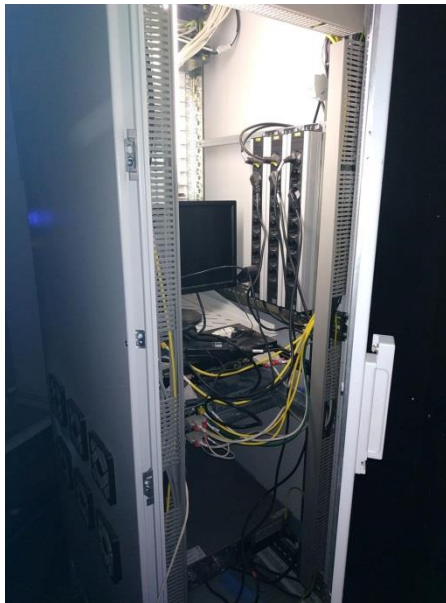


Εικόνα 9-σύστημα πυρασφάλειας





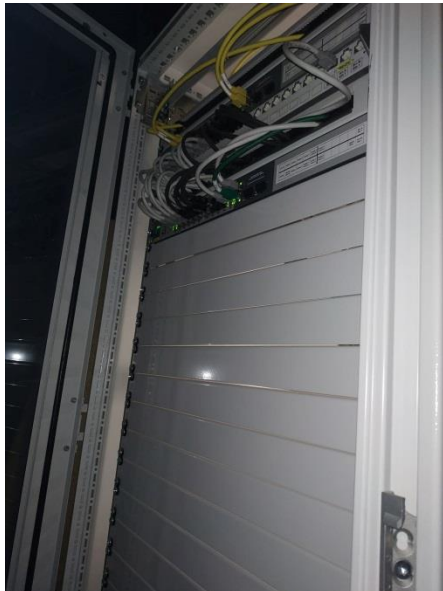
Εικόνα 10 - σύστημα πυρασφάλειας και rack ηλεκτρονικών



Εικόνα 11-rack ηλεκτρονικών και server σκηνής



Εικόνα 12-rack ηλεκτρονικών και server σκηνής



Εικόνα 13-rack ηλεκτρονικών και server σκηνής



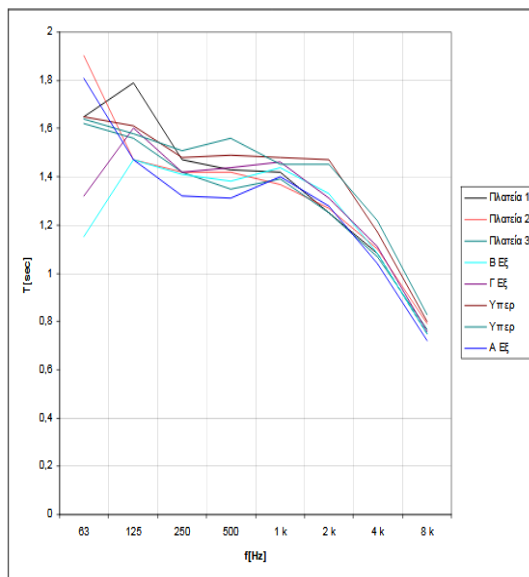
Εικόνα 14-rack ηλεκτρονικών και server σκηνής

Ενεργοποιώντας τον κλιματισμό- εξαερισμό της αίθουσας ,παρατηρήσαμε μια αύξηση της τάξης των 10 dB πάνω και η αρχική μας μέτρηση έφτασε τα 40,9 dB(A). Μετρούμε ένα θόρυβο από την εκροή του αέρα από τα στόμια κλιματισμού, που βρίσκονται στο δάπεδο κάτω από κάθε κάθισμα κατά την λειτουργία του κλιματισμού και του εξαερισμού της αίθουσας , ο οποίος οφείλεται στο velocity pressure των στομιών ,που θεωρείται αμελητέος κατά την διάρκεια μίας παράστασης.

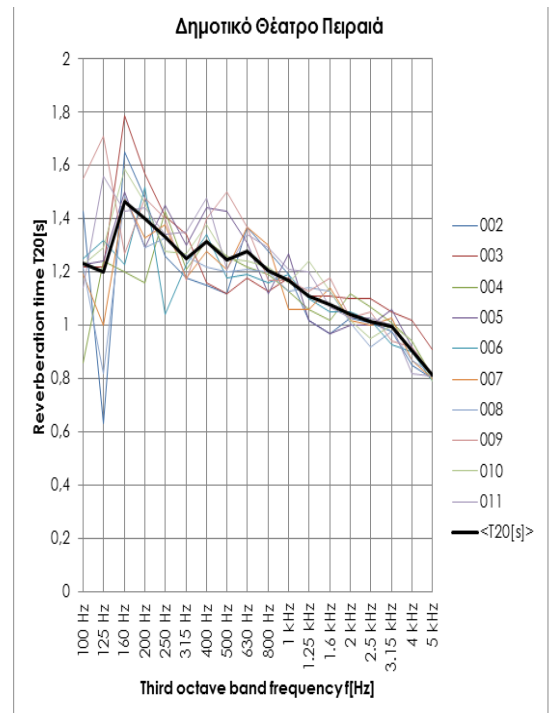


Εικόνα 15 -στόμια κλιματισμού

#### 4.5.2 Χρόνος αντήχησης



Χρόνοι αντήχησης από την μελέτη του Schubert, με τα παλιά καθίσματα



Χρόνοι αντήχησης όπως μετρήθηκαν από εμάς με τα καινούργια καθίσματα (2012-2013)

#### Εικόνα (4.5.2) Σύγκριση μετρήσεων

Συγκρίνοντας τους χρόνους αντήχησης που μετρήθηκαν στη μελέτη του Schubert Εικόνα (3.6.1) και αντίστοιχα σε αυτήν την εργασία Εικόνα(4.3.2.γ) , παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση των δεδομένων που πήραμε από κάθε μελέτη. Η μέση τιμή του χρόνου αντήχησης , βάσει της μελέτης Schubert είναι  $T(500\text{Hz})=1.42 \text{ sec}$ .

Αντίστοιχα στις μετρήσεις μας για χρόνο αντήχησης  $T(500\text{Hz}) = 1,28 \text{ sec}$   
 Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στην απορρόφηση των καινούργιων καθισμάτων ,τα οποία παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο.

Παρατηρώντας τα ακουστικά κριτήρια και τις προβλέψεις των ακουστικών παραμέτρων τις αίθουσας, που έθεσε ο κύριος Schubert στη μελέτη του, βλέπουμε ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη απόκλιση σε σχέση με τις δικές μας μετρήσεις. Το οποίο μπορεί να σχετίζεται με την αλλαγή των καθισμάτων καθώς και το γεγονός ότι οι μετρήσεις μας, έγιναν με ανοιχτή αυλαία, εν' αντιθέσει των μετρήσεων του κυρίου Schubert.

Πρόβλεψη των ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας με το λογισμικό CATT Acoustic

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T[sec]	1,36	1,32	1,32	1,21	1,15	1,08
D[%]	53	54	53	58	60	62
C[dB]	3	3,4	3	4,2	4,3	5,2
G[dB]	10	10	9	9	8	8

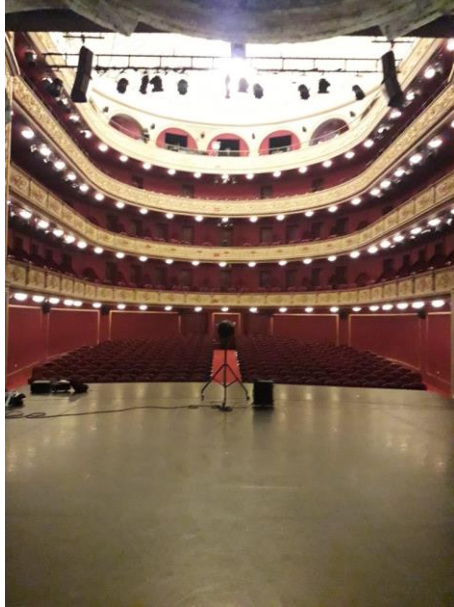
Πίνακας(4.5.2.α) (Από μελέτη Schubert)

Ακουστικά κριτήρια της αίθουσας για μεσαίες συχνότητες:

Χρόνος αντήχησης	T = 1,2 sec
Στάθμη θορύβου βάθους	L <sub>A</sub> ≤ 25 dB(A)

Πίνακας(4.5.2.β) (Από μελέτη Schubert)

#### 4.6 Φωτογραφικό υλικό από την διεξαγωγή των μετρήσεων(22/10/2018)



Εικόνα (4.6.1) θέση δωδεκάεδρου ηχείου και γεννήτριας



Εικόνα (4.6.2) θέση δωδεκάεδρου ηχείου



Εικόνα (4.6.3) 1η θέση μέτρησης



Εικόνα (4.6.4) θέση μέτρησης από εξώστη Α



Εικόνα (4.6.5) θέση μέτρησης από εξώστη Β12



Εικόνα (4.6.6) θέση μέτρησης από εξώστη A17



Εικόνα (4.6.7.1) σταγκόνι φώτων και ηχείων



Εικόνα (4.6.7.2) σταγκόνι φώτων και ηχείων





Εικόνα (4.6.8) sub woofer στη σκηνής



Εικόνα (4.6.9) sub woofer σκηνής



Εικόνα (4.6.10) σημείο κονσόλας θεάτρου στο υπερώο

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Συμπεράσματα:

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήσαμε τα ακουστικά χαρακτηριστικά μεγάλων χώρων, που χρησιμοποιούνται για θεατρικές παραστάσεις. Πιο συγκεκριμένα μελετήσαμε την ακουστική συμπεριφορά του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά, βασιζόμενοι στην αρχική ακουστική μελέτη αναλύοντας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής, με δικές μας νέες μετρήσεις. Στόχος μας ήταν η επαλήθευση των προηγούμενων μετρήσεων, έτσι ώστε να δούμε αν συμβαδίζουν με τις τωρινές και να γίνουν προτάσεις διόρθωσης για την βελτίωση της ακουστικής του χώρου, όπου κρίνονται απαραίτητες.

Στην εργασία αυτή αναλύθηκαν τα βασικότερα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για τον ακουστικό σχεδιασμό μεγάλων χώρων και εγκαταστάσεων θεατρικών παραστάσεων. Και παρατηρήθηκε η επιρροή τους στην λειτουργικότητα του χώρου.

Πρώτον, διαχωρίσαμε τα χαρακτηριστικά ενός μεγάλου από ένα μικρό χώρο και κατανοήσαμε ότι ο όγκος και το σχήμα ενός χώρου παίζουν σημαντικό ρόλο στην ακουστική του λειτουργία, αλλά και στην ακουστική συμπεριφορά του ήχου μέσα σ' αυτόν.

Επιπλέον, είδαμε την ανακλαστικότητα του χώρου. Παράγων αναπόφευκτος, αφού η διάδοση οποιουδήποτε ηχητικού σήματος μέσα σε κλειστό χώρο, έχει σαν φυσικό επακόλουθο την ανάκλασή του στα αντικείμενα και στις επιφάνειες του χώρου.

Στη συνέχεια, είδαμε την χωροθεσία του χώρου και πως μπορούν να επηρεάσουν οι αλλαγές αυτής, την ακουστική ποιότητα αυτού.

Τέλος, παρατηρήσαμε την ηχοαπορρόφηση και ηχομόνωση του χώρου, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο για να επιτευχθεί το καλύτερο ακουστικό αποτέλεσμα και η προφύλαξη του χώρου από ανεπιθύμητους θορύβους.

Έτσι λοιπόν, η εργασία χωρίστηκε σε τρία μέρη για την αποτελεσματικότερη ανάλυση και κατανόηση του θέματος. Το πρώτο μέρος (κεφάλαια 1-2) αποτέλεσε το θεωρητικό τμήμα, στο οποίο έγινε ποιοτική μέθοδος ανάλυσης, βάσει θεωρίας. Για την συλλογή αυτών των στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν βιβλία, άρθρα, αναφορές από επιστημονικά περιοδικά, που ασχολούνται με την ακουστική και τον ήχο γενικότερα, το internet και σημειώσεις που δόθηκαν στα μαθήματα του ΑΤΕΙ Μ.Μ.Τ.Κ.Α.

Το δεύτερο μέρος αποτέλεσε την περιγραφή του χώρου παραστάσεων του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά, παρουσιάζοντας τα ήδη υπάρχοντα χαρακτηριστικά του και τις ιδιομορφίες του, με βάση την υπάρχουσα ακουστική μελέτη και την ανάλυσή της.

Στο τελευταίο μέρος έγινε η συλλογή στοιχείων μέσω μετρήσεων εντός του χώρου και παρουσιάστηκαν οι ακουστικές μετρήσεις με την ανάλυσή τους.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι βασικότερες που μπορούν να γίνουν σε χώρους σαν κι αυτόν. Βέβαια, όλοι αυτοί οι παράμετροι που εξετάσαμε μπορούν να αναλυθούν πιο διεξοδικά. Στα πλαίσια όμως της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, δεν μπορεί να επιτευχθεί μια τέτοια ανάλυση. Παρόλαυτα από αυτή τη μελέτη, μπορούμε να καταλήξουμε σε αρκετά και σημαντικά συμπεράσματα.

Παρατηρώντας λοιπόν τα δεδομένα μας και συγκρίνοντάς τα, καταλήξαμε σε μια μικρή απόκλιση των μετρήσεών μας, σε σχέση με τις προηγούμενες. Αυτό θεωρούμε ότι οφείλεται σε κάποιες διαφοροποιήσεις που έχουν γίνει στο χώρο, κατά το πέρασμα των χρόνων. Αναλυτικότερα, αναφερόμαστε στην αλλαγή των καθισμάτων, που έγινε κατά την ανακαίνιση του κτιρίου μεταξύ 2012-2013, καθώς και την διαφοροποίηση κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αρχική μελέτη έγινε με κλειστή αυλαία. Αντίθετα, η δική μας μέτρηση πραγματοποιήθηκε με ανοιχτή αυλαία. Όσον αφορά τα καθίσματα, παρότι δε μπορέσαμε να βρούμε τα στοιχεία των προδιαγραφών των τωρινών καθισμάτων, θεωρούμε ότι τηρήθηκαν οι προδιαγραφές που δόθηκαν στην αρχική μελέτη του Dr. Schubert, τις οποίες και αναφέρουμε αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια. Γνωρίζοντας ότι η απορροφητικότητα των υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική ενός χώρου, θεωρούμε ότι η απορροφητικότητα των υλικών των καινούργιων καθισμάτων συνέβαλε στις διαφοροποιήσεις των μετρήσεών μας.

Επίσης παρατηρήσαμε, με την ενεργοποίηση του κλιματισμού της σκηνής, της πλατείας και των θεωρείων, κατά τη μέτρηση του θορύβου βάθους, μια αύξηση της τάξης των 10 Db της στάθμης, από την εκροή του αέρα από τα στόμια κλιματισμού. Αυτό οφείλεται, όπως μας διαβεβαίωσε εξειδικευμένος μηχανικός σε θέματα κλιματισμού σε τέτοιους χώρους, στο velocity pressure των στομιών, που κρίνεται αμελητέος θόρυβος κατά την διάρκεια μίας παράστασης.

Ένα σημαντικό ζήτημα που παρατηρήθηκε ήταν η διαφορά του θορύβου βάθους, σε σχέση με τη δοθείσα τιμή της αρχικής μελέτης. Αυτό ανακαλύψαμε ότι οφείλεται σε έναν συνεχόμενο θόρυβο χαμηλής, αλλά αισθητής έντασης, που προερχόταν από το δωματιάκι ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων, που βρισκόταν πίσω αριστερά της σκηνής. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η ηχομόνωση του συγκεκριμένου χώρου δεν είναι επαρκής και επηρεάζει σημαντικά τον επιτρεπτό θόρυβο βάθους του χώρου.

## 5.2 Πρόταση βελτίωσης:

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η αίθουσα παραστάσεων του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά, κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα ακουστικής. Παρόλαυτα, θεωρούμε σημαντικό να προτείνουμε, για την περαιτέρω βελτίωση ακουστικής του χώρου, την καλύτερη δυνατή ηχομόνωση του δωματίου ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων. Αυτό θα προκαλέσει σημαντική μείωση του θορύβου βάθους που παρατηρήσαμε.

Το συγκεκριμένο δωμάτιο στην τωρινή του μορφή είναι κατασκευασμένο από γυψοσανίδα και ξύλινο πάτωμα και διαθέτει μια σχετικά λεπτή πόρτα πυρασφάλειας. Μέσα υπάρχει το rack των ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων – server, που είναι μεταλλικό και διαθέτει μια γυάλινη πόρτα.

Για να επιτευχθεί καλύτερη ηχομόνωση πρέπει να επενδυθεί ο χώρος αυτός με διπλό τοίχο γυψοσανίδας, με επένδυση ανάμεσα από κάποιο ηχοαπορροφητικό υλικό (π.χ. ορυκτοβάμβακα), να επενδυθεί ή να αντικατασταθεί η πόρτα πυρασφάλειας με μια μεγαλύτερου πάχους και ίσως, αν κριθεί απαραίτητο, να τοποθετηθούν στους τοίχους γύρω από το rack κάποια ηχοαπορροφητικά πάνελ. Θεωρούμε έτσι, ότι θα βελτιωθεί σημαντικά η ηχομόνωση του συγκεκριμένου χώρου και η επιρροή του θορύβου των ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων θα μειωθεί σημαντικά.

## **Ευχαριστίες:**

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όσους συνέβαλλαν με τη βοήθειά τους για την διεξαγωγή της παραπάνω εργασίας. Αρχικά ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Δημήτρη Ζαχαριουδάκη για την συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξε κατά την διάρκεια πλαισίωσης αυτής της πτυχιακής εργασίας. Επίσης ευχαριστούμε θερμά τον Γεώργιο Χαλδαίο ,Ηλεκτρολόγο Μηχανικό της εταιρίας ΤΟΜΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε που μας παρείχε τις μελέτες του θεάτρου, τους σύμβουλους ακουστικής Dr G. Schubert και Χάρη Μωραϊτή για τις πολύτιμες συμβουλές και την βοήθειά τους στην εύρεση και την χρήση του εξοπλισμού που χρειαστήκαμε για την διεκπεραίωση των μετρήσεων. Θερμές ευχαριστίες θα θέλαμε , επίσης να δώσουμε στους ηχολήπτες του θεάτρου Τάσο Τσαρδανίδη και Γιάννη Φουντουλάκη για τις πληροφορίες και το υλικό σχετικά με τον εξοπλισμό του θεάτρου που μας παρείχαν. Τέλος να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στο προσωπικό και τον υπεύθυνο του θεάτρου Άγγελο Μαρινάκη για την παραχώρηση του χώρου καθώς και την κατανόηση κατά την διάρκεια των μετρήσεων.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:**

- ❖ Σκαρλάτος Δημήτρης (2012) «Εφαρμοσμένη Ακουστική», Έκδοση τέταρτη, εκδόσεις Gotsis, Πάτρα, ISBN: 978-960-9427-22-7
- ❖ Τσινίκας Νίκος (1990 ) «Ακουστικός σχεδιασμός χώρων», εκδόσεις University studio press, Θεσσαλονίκη, ISBN: 960-12-0293-5
- ❖ F. Alton Everest (1977), «ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ» 3η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, (τίτλος πρωτοτύπου: “The Master Handbook of Acoustics, 3rd edition”), ISBN: 960-7219-67-8
- ❖ Πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α. (Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής) (2003) Πάτρα, «ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2002», εκδόσεις Τυροαμα, ISBN: 960-7620-27-5
- ❖ Κυριακάκης Ηρακλής– Γιαννικάκης Ιωάννης (1999) , «Μείωση & έλεγχος θορύβων σε συστήματα και εγκαταστάσεις ήχου», εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, ISBN: 960-405-900-9
- ❖ Dr Alfred Tomatis (2000), «ΤΟ ΑΥΤΙ ΚΑΙ Η ΦΩΝΗ», εκδόσεις Ελληνικά Γράμματα, ISBN: 960-344-5614
- ❖ Σημειώσεις του Α.Τ.Ε.Ι. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής «ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΗΧΟΥ Ι Θεωρεία», Χρήστος Κουτσοδημάκης & Μηνάς Σηφάκης
- ❖ Σημειώσεις του Α.Τ.Ε.Ι. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής « ΦΥΣΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ», Δημήτρης Ζαχαριουδάκης (2006)
- ❖ Παρασκευόπουλος Σταύρος (2006), πτυχιακή εργασία για το Α.Τ.Ε.Ι. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, με τίτλο: «Ακουστικά χαρακτηριστικά χώρων και εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για θεατρικές παραστάσεις»
- ❖ Περιοδικό Δημοτικού θεάτρου Πειραιά ,πύλη πολιτισμού « Δημοτικό θέατρο Πειραιά- Μια ιστορία 130 χρόνων»-23.12.2015.Περιφέρεια Αττικής, Αθήνα.
- ❖ Dimotiko Theatro Peiraia Text Acoustics Meleti Efarmogis.pdf ,(Ιούνιος 2008), Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Πολιτισμού « Αποκατάσταση Δημοτικού θεάτρου Πειραιά, Τεχνική έκθεση, μελέτη εφαρμογής» ΤΟΜΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε, Dr.G.Schubert ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ.
- ❖ Αρχιτεκτονική μελέτη Δημοτικού θεάτρου Πειραιά , « Αποκατάσταση Δημοτικού θεάτρου Πειραιά, Τεχνική έκθεση, μελέτη εφαρμογής» ΤΟΜΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε, κατόψεις (Ιανουάριος 2012)

## Διαδίκτυο :

- ❖ Wikipedia: <https://www.wikipedia.org/> (Δεκέμβριος 2018)
- ❖ Νίκος Κ. Μπάρκας : Σημειώσεις «Αρχιτεκτονική ακουστική .Κριτήρια ακουστικής αξιολόγησης αιθουσών»-  
<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMD101/5%CE%B1.%20%CE%91%CE%9A%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20%CE%91%CE%99%CE%98%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%A9%CE%9D%20%CE%B8%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1.pdf>
- ❖ Παναγιώτης Χατζηαντωνίου Εκπαιδευτικός, ΠΕ19 PhD Ψηφιακής Τεχνολογίας Ήχου «Η συμπεριφορά του ήχου σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους»
- ❖ Κεφάλαιο 2 <http://netacoustics.sch.gr/auto/SoundTransmission.pdf>
- ❖ Περιοδικό «Ελληνικές κατασκευές» – Μάιος 2012, τεύχος 167
- ❖ Παναγιώτης Χατζηαντωνίου Καθηγητής Δ.Ε.Πληροφορικός ,PhD Ψηφιακής Τεχνολογίας Ήχου, «Ακουστική Κλειστών Χώρων» -  
<http://netacoustics.sch.gr/presentations/hatziantoniou.pdf>
- ❖ Istvan L. Ver – Leo L. Beranek “Noise and vibration control engineering- principles and applications ” (2006)– second edition. Εκδόσεις John Wiley and sons, INC. Canada. Printed in USA-  
[http://health.sbmu.ac.ir/uploads/22\\_1949\\_1448281115536\\_1.pdf](http://health.sbmu.ac.ir/uploads/22_1949_1448281115536_1.pdf)

