



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ακουστική μελέτη σε κλειστά θέατρα στην περιοχή των Αθηνών.**

## **Διπλωματική Εργασία**

Αναγνώστου Κωνσταντίνο και Μπαλαμπέκου Σταυρούλα

Επιβλέπων: Καμπουράκης Γεώργιος  
Καθηγητής ΕΜΠ.

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2017





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΟΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ακουστική μελέτη σε κλειστά θέατρα στην περιοχή των Αθηνών.**

## Διπλωματική Εργασία των

Αναγνώστου Κωνσταντίνο και Μπαλαμπέκου Σταυρούλα

Επιβλέπων: Καμπουράκης Γεώργιος  
Καθηγητής ΕΜΠ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την .... η Σεπτεμβρίου 2017 :

.....  
Γεώργιος Καμπουράκης

.....  
Βασίλειος Λούμος

.....  
Ηλίας Κουκούτσης

.....

Σταυρούλα Μπαλαμπέκου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

.....

Κωσταντίνος Αναγνώστου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Ε.Μ.Π. Copyright © Μπαλαμπέκου Σταυρούλα και Αναγνώστου Κωνσταντίνος, 2017 . Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου





## Πρόλογος

Το θέατρο εκ προοιμίου υπήρξε βασικό μέσω ψυχαγωγίας του ανθρώπου. Ο καλός ακουστικός σχεδιασμός είναι πολύ σημαντικός καθώς εξυπηρετεί στην άνετη και ευχάριστη παρακολούθηση του δρώμενου. Ο σωστός χρόνος αντήχησης, η ευκρίνεια, η καταληπτότητα και η χαμηλή στάθμη θορύβου είναι από τις βασικές παραμέτρους που χρήζουν σωστής μελέτης ανάλογα με τις ιδιότητες του χώρου και το είδος της χρήσης για τον οποίο προορίζεται.

Μη σωστός σχεδιασμός οδηγεί σε δυσκολίες κατά την παρακολούθηση των παραστάσεων. Ο κακός αυτός σχεδιασμός αναφέρεται είτε στην έλλειψη ήχου είτε στην υπερ-συγκέντρωση ήχου, ο οποίος μπορεί να αποδειχθεί το ίδιο καταστροφικός.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ακουστική ποιότητα και το επίπεδο θορύβου τριών θεατρικών αιθουσών στην περιοχή των Αθηνών, μέσω δύο μεθόδων. Συγκεκριμένα μελετήθηκε το θέατρο Βαφείο, μία αίθουσα του Ιδρύματος Μιχάλης Κακογιάννης και η αίθουσα Υπόγειο του θεάτρου Τέχνης.

Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την καταγραφή ακουστικών αρχείων (.wav) και επεξεργασία αυτών των αρχείων στο πρόγραμμα Matlab για την μέτρηση κάποιων ακουστικών παραμέτρων όπως ο χρόνος αντήχησης, η καταληπτότητα του λόγου και ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR). Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ακουστικό πρόγραμμα προσομοιώσεων ODEON.

Τα ακουστικά σήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κρουστικός παλμός, MLS, λογαριθμικό και γραμμικό sine sweep και τέλος λευκός και ροζ θόρυβος.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η σύγκριση των δύο μεθόδων και η αξιολόγηση της ακουστικότητας των αιθουσών αυτών.

**Λέξεις κλειδιά:** Ακουστική κλειστών χώρων, θόρυβος, ODEON, χρόνος αντήχησης, δείκτες ακουστικής, καταληπτότητα, σηματοθορυβικός λόγος.





## Abstract

Premiere theater has been a basic entertainment experience for man. Good audio design is very important as it serves in the comfortable and pleasant attendance of the event. The right reverberation time, clarity, intelligibility, and low noise levels are among the basic parameters that require proper study depending on the properties of the room and the type of its use.

Incorrect design leads to difficulties in watching theatrical plays. This bad design refers either to the lack of sound or to the over-concentration of sound, both of them can have equally catastrophic effects.

In this diploma thesis, the acoustic quality and noise level of three theaters in the Athens area was studied through two methods. In particular, the Vafio Theater, a Mihalis Kakoyannis Foundation Hall and the Art Theater Karolos Koun Hall were studied.

The first method involves recording audio files (.wav) and editing these files in the Matlab program to measure some audio parameters such as reverberation time, speech intelligibility, and SNR. These results were compared with the results obtained from the ODEON Acoustics Simulation Software.

The audio signals we used were impulse, MLS, logarithmic and linear sine sweep and finally white and pink noise.

The aim of this diploma thesis is to compare the two methods and to assess the audibility of these rooms.

**Key words:** Acoustic of enclosure theaters, noise, ODEON, reverbation time, acoustic parameters, clarity, SNR.

Ευχαριστίες,

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Καμπουράκη για τις γνώσεις που μας μετέδωσε κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διπλωματικής. Τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Κωνσταντίνο Μπακογιάννη για την καθοδήγηση και τη βοήθεια του, τον συνάδελφο Πέτρο Δαγκρέ και την Μαρία Δούρου.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την υπομονή τους και στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους υπεύθυνους των θεάτρων για την διαθεσιμότητα και την βοήθειά τους.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	iii
Abstract.....	ix
Περιεχόμενα .....	xi
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> .....	1
Εισαγωγή.....	1
1. Βασικές έννοιες. ....	1
1.1 Ήχος και θόρυβος. ....	1
1.2 Είδη Θορύβου.....	2
1.3 Ακουστικά μεγέθη.....	4
1.3.1 Ακουστικές ποσότητες.....	5
1.3.2 Ηχητικές στάθμες. ....	6
1.3.3 Φασματικές στάθμες θορύβου. ....	8
1.3.4 Είδη ηχητικών πεδίων .....	9
1.3.5 Μονάδα μέτρησης – Decibel.....	10
1.3.6 Φίλτρα A, B, C, D – Ηχοστάθμιση A, B, C, D. ....	11
1.3.7 Η συχνότητα του ήχου στην ακουστική μελέτη.....	15
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> .....	17
Ακουστική Αρχιτεκτονική.....	17
2.1 Διάδοση του ήχου .....	17
2.2 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους .....	18
2.2.1. Διάκριση μικρών και μεγάλων χώρων .....	21
2.2.2. Απόκριση του ήχου σε μικρούς χώρους .....	22
2.2.3. Απόκριση του ήχου σε μεγάλους χώρους.....	24
2.3 Ανθρώπινο αυτί.....	28
2.4. Ακουστικοί παράμετροι. ....	31
2.4.1. Δείκτες που σχετίζονται με την ομιλία και την μουσική. ....	31
2.4.2. Δείκτες που σχετίζονται μόνο με την ομιλία. ....	33
2.4.3. Κριτήρια που σχετίζονται μόνο με την ακουστική της μουσικής. ....	37
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> .....	39
Ιστορική Αναδρομή.....	39
3.1 Το θέατρο στην Αρχαία Ελλάδα.....	40

3.2 Το θέατρο στην Αρχαία Ρώμη .....	43
3.3 Το θέατρο στο Μεσαίωνα .....	44
3.4 Το θέατρο στην Αναγέννηση.....	45
3.5 Το θέατρο του 17 <sup>ου</sup> και 18 <sup>ου</sup> αιώνα. ....	45
3.6 Το θέατρο του 19 <sup>ου</sup> αιώνα. ....	46
3.7 Το Σύγχρονο θέατρο.....	47
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> .....	49
Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός .....	49
Παράμετροι ακουστικού σχεδιασμού μιας αίθουσας. ....	51
Σχήμα αίθουσας. ....	51
Καθίσματα. ....	52
Χρόνος αντήχησης. ....	53
Απορρόφηση. ....	53
Εξώστες.....	54
Οροφή.....	56
Ανακλαστήρες.....	56
Γενικές προβλέψεις ανάλογα το μέγεθος της αίθουσας.....	56
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> .....	59
Μεθοδολογία και Εξοπλισμός .....	59
Βαθμονόμηση .....	61
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> .....	62
Διαδικασία μετρήσεων- Προσομοιώσεις .....	62
1. Θέατρο Βαφείο .....	62
Μετρήσεις .....	63
1. Φασματική κατανομή .....	63
2. Χρόνος Αντήχησης.....	66
3. Επιπλέον ακουστικά μεγέθη .....	68
1. SNR.....	68
2. STI-RASTI.....	69
3. C50, D80.....	70
Προσομοίωση .....	72
Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	77
1. Χρόνος Αντήχησης (RT). ....	77

2. SPL .....	81
3. LAeq.....	85
Επιπλέον ακουστικά μεγέθη .....	86
1. STI/ RASTI.....	86
2. D50, C80.....	88
3. EDT.....	94
2. Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης .....	97
Μετρήσεις .....	98
1. Φασματική κατανομή .....	98
2. Χρόνος Αντήχησης.....	101
3. Επιπλέον μεγέθη .....	106
1. SNR.....	106
2. STI-RASTI .....	111
3. C50, D80.....	112
Προσομοίωση .....	114
Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	118
1. Χρόνος Αντήχησης (RT). .....	118
2. SPL .....	122
3. LAeq.....	125
Επιπλέον ακουστικά μεγέθη .....	127
1. STI .....	127
2. D50, C80.....	129
3. EDT.....	135
3.Θέατρο Τέχνης- Υπόγειο .....	138
Μετρήσεις .....	139
1. Φασματική κατανομή .....	139
2. Χρόνος Αντήχησης.....	143
3. Επιπλέον μεγέθη .....	152
1. SNR.....	152
2. STI-RASTI .....	157
3. C50, D80.....	158
Προσομοίωση .....	160
Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	165

1. Χρόνος Αντήχησης (RT). .....	165
2. SPL .....	169
3. LAeq.....	172
Επιπλέον ακουστικά μεγέθη .....	173
1. STI .....	173
2. D50, C80.....	175
3. EDT.....	181
Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> .....	184
Συμπεράσματα.....	184
1. Θέατρο Βαφείο. ....	184
2. Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννη.....	188
3. Θέατρο Τέχνης-Υπόγειο. ....	192
Παράρτημα 1 .....	196
Κώδικας Matlab.....	196
Πίνακας Σχημάτων .....	203
Πίνακας Πινάκων .....	203
Πίνακας εικόνων .....	204
Πίνακας διαγραμμάτων .....	205
Βιβλιογραφία .....	211

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

### 1. Βασικές έννοιες.

#### 1.1 Ήχος και θόρυβος.

Ως ήχο χαρακτηρίζουμε κάθε μεταβολή της πίεσης του αέρα που διεγείρει την ανθρώπινη ακοή. Ο ήχος λοιπόν είναι ένα κύμα, το οποίο χρειάζεται κάποιο μέσο για να διαδοθεί (ύπαρξη σωματιδίων). Όσο πιο “πυκνό” είναι το μέσο τόσο πιο γρήγορη η μετάδοση του ήχου. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 343 m/sec, στο νερό 1493 m/sec ενώ στο διάστημα λόγω απώλειας σωματιδίων ο ήχος είναι αδύνατο να διαδοθεί.

Ο ήχος, ως κύμα, μεταδίδεται σε “ευθείες γραμμές” ελεύθερα στο χώρο. Η μετάδοση αυτή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε κατά μήκος του μέσου, εγκάρσια κύματα, είτε κάθετα ως προς τον άξονα έκτασης του μέσου, διαμήκη κύματα. Στην περίπτωση του αέρα τα ηχητικά κύματα διαδίδονται πάντα ως διαμήκη.

Ο ήχος λοιπόν παρουσιάζει κάποια φαινόμενα και κάποιες φυσικές ιδιότητες, των οποίων οι επιδράσεις είναι αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, άμεσα ή έμμεσα. Τα φαινόμενα αυτά επιγραμματικά είναι η ανάκλαση, η περίθλαση, η διάθλαση και η συμβολή, εξ’ αιτίας των οποίων ακούμε τον ήχο για μεγαλύτερη διάρκεια, σε μεγαλύτερη απόσταση και διαφορετική κατεύθυνση. Από την άλλη οι φυσικές ιδιότητες του ήχου είναι η συχνότητα, η περίοδος, το μήκος κύματος, το πλάτος ταλάντωσης, ο χρόνος και η κυματομορφή. Ιδιότητες οι οποίες, μας δίνουν την δυνατότητα να περιγράψουμε τον ήχο με τέσσερα χαρακτηριστικά: το ύψος (οξύς ή βαρύς ήχος), την ένταση, την διάρκεια και την χροιά.

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τον ήχο για ποικίλους λόγους. Από απλό μέσω επικοινωνίας, ψυχαγωγίας και εκπαίδευσης, μέχρι μέσω προειδοποίηση κινδύνου.

Όπως είναι φυσικό κάποιοι ήχοι μπορεί να είναι ενοχλητικοί για τον άνθρωπο είτε βρίσκονται σε συχνότητες που μπορεί να τις ακούσει είτε όχι. Αυτοί οι ήχοι ονομάζονται θόρυβος.

Σύμφωνα με τον Ε.Λ.Ο.Τ. 263.1: «Θόρυβος ονομάζεται κάθε απεριοδικός σύνθετος ήχος που η στιγμιαία τιμή του αυξομειώνεται με τυχαίο τρόπο»

Ο θόρυβος μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα τη συχνότητα του και την αιτία που τον προκάλεσε. Η επίδραση του στον άνθρωπο, είναι άμεση και πολλές φορές καταστροφική καθώς μπορεί να οδηγήσει σε χρήση φαρμακευτικών σκευασμάτων και ψυχοσωματικών διαταραχών. Η επίδραση του θορύβου σχετίζεται με τις συχνότητες που τον απαρτίζουν, την ένταση, την διάρκεια και την επαναληπτικότητα του. [1]

## 1.2 Είδη Θορύβου.

### 1. Θόρυβος Περιβάλλοντος (ambient noise) :

Είναι ο θόρυβος που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές που μας ενδιαφέρουν κατά τη στιγμή της μέτρησης (π.χ. κλιματιστικό σε μια αίθουσα διδασκαλίας)

- i. Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 263,1 (1.209): «Είναι το συνολικό αποτέλεσμα όλων των ήχων που παράγονται από πολλές πηγές, κοντινές ή μακρινές, σε δεδομένο περιβάλλον, από τους οποίους κανένας δε παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.»

Types of occupancy/activity	Recommended sound level (dB (A))	Recommended reverberation time at 500 to 1000 Hz (sec)
Lecture rooms, assembly halls, conference venues	30	0.6 for 300 m <sup>3</sup> to 1.4 for 50 000 m <sup>3</sup> varying with log <sub>10</sub> (room volume)
Audio-visual areas	40	0.6-0.8
Churches (250 or less people)	30	–
Computer rooms (teaching)	40	0.4-0.6
Computer rooms (working)	45	0.4-0.6
Conference rooms, seminar rooms, tutorial rooms	30	0.6-0.7
Corridors and lobbies	45	–
Drama studios	30	10% to 20% higher than lecture rooms above
Libraries (reading)	40	10% to 20% higher than lecture rooms above
Libraries (stack area)	45	10% to 20% higher than lecture rooms above
Music studios and concert halls	30	0.8 for 400 m <sup>3</sup> to 2.2 for 50 000 m <sup>3</sup> , varying linearly with log (room volume)
Professional and admin. offices	35	0.6-0.8
Design offices, drafting offices	40	0.4
Private offices	35	0.6-0.8
Reception areas	40	–
Airport terminals	45	–
Restaurants	40	–
Hotel bar	45	–
Private house (sleeping)	25	–
Private house (recreation)	30	–

Εικόνα 1. 1: Προτεινόμενα επίπεδα Θορύβου Περιβάλλοντος για διαφορετικούς χώρους σε κτήρια

[2]



Στην Εικόνα 1.1, παραπάνω, καταγράφονται τα προτεινόμενα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος, κατά φίλτρο-A, για διαφορετικούς χώρους.

2. Θόρυβος Βάθους (background noise):

Ονομάζεται ο θόρυβος που εκπέμπεται από όλες τις πηγές που βρίσκονται στο περιβάλλον και δε μας ενδιαφέρουν (περιλαμβάνει τον θόρυβο περιβάλλοντος).

- i. ΕΛΟΤ 263,1 (1210):«Ο θόρυβος που προέρχεται από όλες τις πηγές, που δεν έχουν σχέση με έναν ορισμένο ήχο, ο οποίος αποτελεί το αντικείμενο ενδιαφέροντος.»

3. Λευκός Θόρυβος (white noise):

Είναι ο θόρυβος που έχει σταθερή φασματική πυκνότητα και συνεχές ηχητικό φάσμα σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. (Εικόνα 1.2)

- i. Το φάσμα του είναι μια γραμμή παράλληλη στον άξονα των συχνοτήτων
- ii. Είναι ο θόρυβος ο οποίος εκπέμπεται από μια πηγή και κατανέμεται ομοιόμορφα σ' όλο το φάσμα των συχνοτήτων, δηλαδή περικλείει την ίδια ηχητική ενέργεια σε Hz.

4. Ροζ Θόρυβος (pink noise):

Είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα, με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη, μεταβλητού ζωνικού εύρους (Εικόνα 1.2).

- i. Ο θόρυβος κατανέμεται περισσότερο στις χαμηλές συχνότητες και η κατανομή αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη με την συχνότητα.

5. Σταθερός θόρυβος:

Παρουσιάζει αμελητέες διακυμάνσεις στάθμης κατά την διάρκεια της μέτρησης

6. Μεταβλητός θόρυβος:

Ο θόρυβος που δεν είναι σταθερός

7. Κυμαινόμενος θόρυβος:

Είναι ο μεταβλητός θόρυβος που η στάθμη του αλλάζει συνεχώς σε σημαντικό βαθμό, κατά την διάρκεια της μέτρησης\παρατήρησης.

[3]

### 1.3 Ακουστικά μεγέθη.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, μερικές από τις φυσικές ιδιότητες του ήχου είναι:

- **Η συχνότητα (f):** ο αριθμός των περιοδικών μεταβολών στη μονάδα του χρόνου. Μονάδα μέτρησης το Hz.
- **Η περίοδος (T):** ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος ενός ηχητικού κύματος. Μονάδα μέτρησης το seconds

Η συχνότητα και η περίοδος σχετίζονται με την εξίσωση: 
$$T(sec) = \frac{1}{f(Hz)}$$

- **Μήκος κύματος (λ):** η φυσική απόσταση που καλύπτεται σε μία περίοδο. Μονάδα μέτρησης το μέτρο (m).

Η συχνότητα και το μήκος κύματος συνδέονται από τη σχέση: 
$$\lambda (meter) = \frac{u (m/sec)}{f (Hz)}$$

Όπου u: η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Αυτές οι ιδιότητες μας δίνουν την δυνατότητα να μελετήσουμε τις πρωταρχικές ποσότητες, με τις οποίες αξιολογούμε την ακουστικότητα ενός χώρου.

#### ➤ Συχνοτικό Φάσμα:

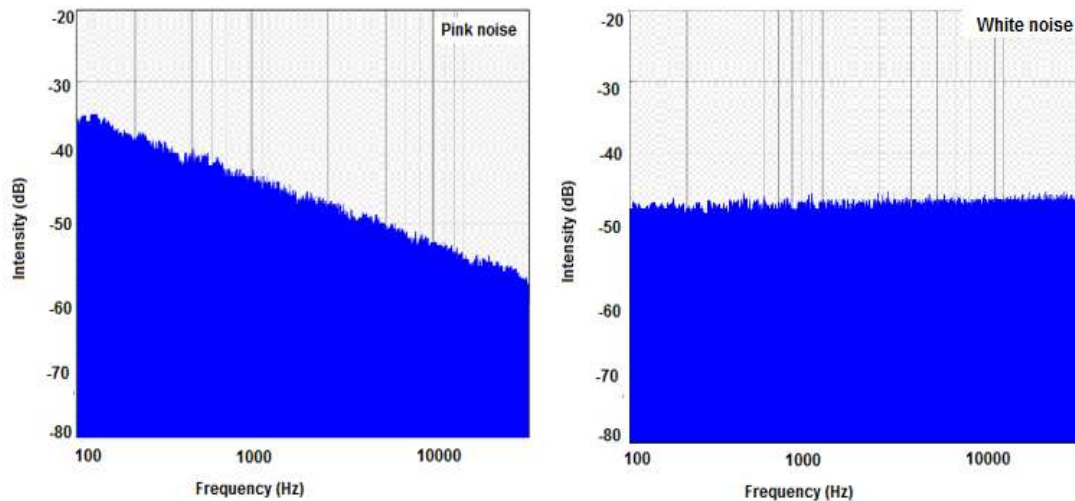
Το συχνοτικό φάσμα περιέχει τις πληροφορίες αυτές, που αφορούν την αναλογία των πλατών των συχνοτικών συνιστωσών του ήχου μεταξύ τους.

Αν θέλαμε να μετρήσουμε την ένταση που παράγεται από έναν ήχο και στην συνέχεια να σχεδιάσουμε μια γραφική παράσταση της έντασης αυτής συναρτήσει της συχνότητας, θα είχαμε την γραφική παράσταση του εύρους.

Όταν ο ήχος αποτελείται μόνο από μια συχνότητα λέγεται pure tone και το φάσμα του αποτελείται από μια ευθεία γραμμή της οποίας το ύψος εξαρτάται από την ένταση.

Ως πηγές, στις ακουστικές μελέτες, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά σήματα που περικλείουν όλες τις συχνότητες μέσα σε ένα εύρος συχνοτήτων. Τα περισσότερα χρησιμοποιημένα σήματα στις μελέτες αυτές είναι ο λευκός θόρυβος, καθώς περιέχει ίση ενέργεια σε κάθε συχνότητα, και ο ροζ θόρυβος, επειδή περιέχει ίση ενέργεια σε κάθε οκτάβα ή τριτοκτάβα.

Στην Εικόνα 1.2, παρακάτω, απεικονίζονται οι φασματικές κατανομές του λευκού και ροζ θορύβου.



Εικόνα 1. 2: Φασματικές κατανομές Ροζ Θορύβου (αριστερά) – Λευκού θορύβου (δεξιά)

[4]

### ➤ Ηχηρότητα:

Ως ηχηρότητα περιγράφουμε την υποκειμενική αντίληψη της έντασης ενός ήχου. Δηλαδή, το κατά πόσο δυνατά ή όχι αντιλαμβανόμαστε τον ήχο αυτό. Η αντίληψη αυτή εξαρτάται από την ένταση της πηγής, την απόσταση μας από αυτήν και βέβαια από την ευαισθησία του οργάνου ακοής του ακροατή.

#### 1.3.1 Ακουστικές ποσότητες.

I. Ηχητική πίεση (Sound Pressure, p):

Ως ηχητική πίεση, σ ένα σημείο του ηχητικού πεδίου, ονομάζουμε τη διαφορά της στατικής πίεσης του μέσου από την ολική πίεση που υπάρχει στο σημείο αυτό. Μονάδα μέτρησης είναι το pascal(Pa)

II. Ηχητική Ενέργεια (Sound Energy, E):

Είναι η ενέργεια που μεταδίδεται κατά την διάδοση ενός ηχητικού κύματος. Είναι πρακτικά το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων του μέσου.

III. Ηχητική ισχύς (Sound Power, W):

Είναι ο ρυθμός μετάδοσης της ηχητικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Μονάδα μέτρησης το Watt

$$W = \frac{E}{T}$$

IV. Ηχητική Ένταση (Sound Intensity, I):

Η ηχητική ένταση ορίζεται ως, η μέση ηχητική ισχύς που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας ( $I = \text{Watt}/\text{m}^2$ ).

$$I = \frac{W}{S} \quad (1.2.1)$$

V. Πυκνότητα Ηχητικής Ενέργειας (Energy Density, w):

Είναι η συνολική ηχητική ενέργεια σε ένα σημείο ανεξάρτητα από την διεύθυνση διάδοσης ( $\text{Watt} = \text{Pa} \cdot \text{m}/\text{s}$ )

$$w = \frac{p^2}{\rho_0 c^2}$$

Όπου:  $p$  η ηχητική πίεση και  
 $\rho_0 c^2$  η ειδική ακουστική εμπέδηση

Βάση των παραπάνω μεγεθών, υπολογίζουμε τις διάφορες ηχητικές στάθμες των δεικτών ακουστικότητας.

### 1.3.2 Ηχητικές στάθμες.

I. Στάθμη πίεσης ήχου ( $L_p$ , Sound Pressure Level):

Η στάθμη ηχητικής πίεσης καταγράφει μεταβολές σε σχέση με την πίεση αναφοράς. Η στάθμη αυτή ταιριάζει απόλυτα με την υποκειμενική εκτίμηση του ήχου από το ανθρώπινο αυτί, καθώς και αυτό λειτουργεί λογαριθμικά.

Η στάθμη πίεσης ήχου ορίζεται από τη σχέση:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

Όπου  $p$ : είναι η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης και  
 $p_0$ : η ηχητική πίεση αναφοράς. (Στον αέρα  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .)

Η στάθμη πίεσης ήχου αναφέρεται και ως SPL και αποτελεί ένα από τα μεγέθη που μετράμε κατά την διάρκεια μια ακουστικής μελέτης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι 0dB SPL δε συνεπάγεται με ανυπαρξία ήχου, αλλά με την μικρότερη ηχητική πίεση που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί (20μPa), η οποία ονομάζεται κατώφλι ακουστικότητας.

- II. Στάθμη ισχύος ήχου ( $L_w$ , Sound Power Level):  
Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ολικά εκπεμπόμενης ηχητικής ισχύος από μια πηγή. Η στάθμη ισχύος ορίζεται από τη σχέση:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$$

Όπου  $W$ : η ακουστική ισχύς της πηγής και  
 $W_{ref}$ : η ισχύς αναφοράς.

Η στάθμη πίεσης ήχου αναφέρεται και ως SWL.

- III. Στάθμη έντασης ήχου ( $L_i$ , Sound Intensity Level):  
Είναι η ένταση της πηγής ως προς την ένταση αναφοράς και ορίζεται από τη σχέση:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

Όπου  $I$ : είναι το μέτρο της έντασης του ήχου σε κάποιο σημείο και  
 $I_{ref}$ : είναι η ένταση αναφοράς

Η στάθμη πίεσης ήχου αναφέρεται και ως SIL.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται, η στάθμη έντασης χαρακτηριστικών ήχων, Πίνακας 1.1, και οι τυπικές εντάσεις ήχου, Πίνακας 1.2.

Χαρακτηριστικοί ήχοι	Σταθμη έντασης (dB)	Ηχητική ένταση $I$ ( $W/m^2$ )
Αεριοθούμενο	140	100
Πολυβόλο	130	10
Όριο πόνου ανθρώπινου αυτιού	120	1
Ροκ συναυλία	120	1
Κυκλοφοριακή κίνηση	80	$10^{-4}$
Μέσος θόρυβος σπιτιού	50	$10^{-7}$
Ψίθυρος	30	$10^{-9}$
Θρόισμα φύλλων	10	$10^{-11}$

Πίνακας 1. 1: Σταθμη έντασης χαρακτηριστικών ήχων

Τυπικές εντάσεις ήχου	Πίεση(Pa)	Decibel (dB)
Κατώφλι ακουστικότητας	0.00002	0
Ήσυχο γραφείο	0.002	40
Ξυπνητήρι σε απόσταση 1m	0.2	80
Μηχανοστάσιο πλοίου	20	120
Μηχανή turbo-jet στα 25 m	200	140

Πίνακας 1. 2: Τυπικές εντάσεις ήχου

[5]

### 1.3.3 Φασματικές στάθμες θορύβου.

I. Φασματική στάθμη πίεσης ( $L_{ps}$ ):

Δίνει τη στάθμη απλών ήχων-τόνων. Ορίζεται από τη σχέση:

$$L_{ps} = 20 \log \frac{p_s}{p_{ref}}$$

Όπου  $p_s$  η πίεση που οφείλεται σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων με κεντρική συχνότητα  $f$  και εύρος  $\Delta f = 1$  Hz

II. Ζωνική στάθμη πίεσης ( $L_{pB}$ ):

Δίνει τη στάθμη του ήχου όταν αυτός κατανέμεται σε μια ζώνη οκτάβας ( $1/1$ ,  $1/3$ ,  $1/10$ ) και ορίζεται από τη σχέση:

$$L_{pB} = 10 \log \frac{\int_{f_1}^{f_2} p^2 f_{rms}}{p_{ref}^2} df$$

Όπου  $f_1, f_2$ : οι πλευρικές συχνότητες κάθε ζώνης και

$p_{f_{rms}}$ : η rms φασματική πίεση κάθε συχνότητας.

III. Ολική στάθμη πίεση ( $L_{p_{ολ}}$ ):

Είναι η στάθμη που οφείλεται στον ήχο, ανεξάρτητα από τη συχνότητα του, και δίνεται από τη σχέση:

$$L_{p_{ολ}} = 10 \log \frac{\int_{16}^{20000} p^2 f_{rms}}{p_{ref}^2} df$$

Οι στάθμες που αναφέρθηκαν παραπάνω μετρούν ήχους σταθερού πλάτους. Όμως ήχοι με σταθερό πλάτος είναι ελάχιστοι και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται άλλες στάθμες-δείκτες.

Μια από αυτούς είναι η ισοδύναμη στάθμη θορύβου που αποτελεί έναν από τους πιο εύχρηστους δείκτες θορύβου και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό άλλων δεικτών.

IV. Ισοδύναμη στάθμη θορύβου (Leq):

Εκφράζει τη στάθμη, που θα πρέπει να έχει ένας σταθερής στάθμης ήχος, περικλείοντας την ίδια ακουστική ενέργεια με τον κυμαινόμενο. Ορίζεται από τη σχέση:

$$Leq = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L(t)} dt \right]$$

Όπου T: ο χρόνος παρατήρησης και  
L(t): η στιγμιαία στάθμη θορύβου.

[6], [7]

### 1.3.4 Είδη ηχητικών πεδίων

I. Κοντινό πεδίο (near field):

Είναι ο χώρος κοντά στην ηχητική πηγή και συνήθως βρίσκεται σε απόσταση μέχρι και δύο μήκη κύματος από αυτήν (χαμηλότερη συχνότητα σημαίνει μεγαλύτερο μήκος κύματος). Η στάθμη ηχητικής πίεσης μπορεί να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις σε αυτό το πεδίο, αναλόγως τα υλικά των κοντινών επιφανειών. Συνεπώς η μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης θα πρέπει να αποφεύγεται σε αυτό το πεδίο.

II. Μακρινό πεδίο (far field):

Ορίζεται ως η περιοχή μετά το κοντινό πεδίο. Αυτό το πεδίο είναι κατάλληλο για την μέτρηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από μια πηγή.

III. Αντηχητικό πεδίο (Reverberant Field):

Είναι το πεδίο στο οποίο, οι ανακλάσεις από τους τοίχους και από άλλα αντικείμενα επηρεάζουν σημαντικά τα απευθείας ηχητικά κύματα της πηγή. Δηλαδή έχουμε συμβολή των απευθείας και των ανακλώμενων κυμάτων.

Το πεδίο αυτό έχει σχεδόν σταθερή πυκνότητα ακουστικής ενέργειας και είναι η ελάχιστη στάθμη ισχύς που μπορεί να έχει η αίθουσα. Το επίπεδο της ισχύς αυτό εξαρτάται από τα υλικά των επιφανειών της αίθουσας και από το μέγεθός της.

IV. Ελεύθερο πεδίο (free field):

Είναι το ηχητικό πεδίο που δεν έχουμε καμία ανάκλαση από τις υπόλοιπες επιφάνειες της αίθουσας και δεν υπάρχουν εμπόδια στον ηχητικό μονοπάτι μεταξύ πηγής - ακροατή. Το ελεύθερο πεδίο πολλές φορές αναφέρεται ως άμεσο οπτικό πεδίο. Στο πεδίο αυτό η στάθμη πίεσης του ήχου ακολουθεί τον νόμο του

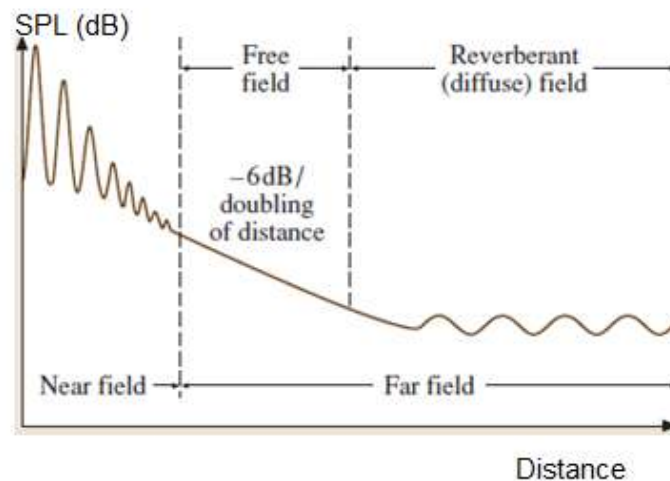
τετραγώνου δηλαδή όσο διπλασιάζεται η απόσταση από την πηγή, τόσο το SPL και η ευαισθησία πέφτουν κατά 6dB. Τέτοια πεδία συναντώνται σε εξωτερικούς χώρους ή σε κλειστούς χώρους με πολύ απορροφητικές επιφάνειες.

[8]

Ένα ακόμα μέγεθος που πρέπει να αναφερθεί όταν έχουμε κατευθυντική πηγή είναι η κρίσιμη απόσταση. Ως **κρίσιμη απόσταση** χαρακτηρίζουμε την απόσταση αυτή, στην οποία η στάθμη ηχητικής πίεσης άμεσου ήχου και αντήχησης είναι ίσες.

Όλα τα μεγέθη στην ακουστική υπολογίζονται λογαριθμικά, όπως ακριβώς ανταποκρίνεται και το ανθρώπινο αυτί.

Στην παρακάτω εικόνα, Εικόνα 1.3, φαίνονται τα πεδία αυτά, συναρτήση της ηχητικής πίεσης.



Εικόνα 1. 3: Ακουστικά πεδία σε ένα χώρο.

[9]

### 1.3.5 Μονάδα μέτρησης – Decibel

Η μονάδα μέτρησης είναι το decibel (dB), προς τιμή του Graham Bell και ορίζεται ως:

$$A(\text{dB}) = 10 * \log\left(\frac{k1}{k_{\text{ref}}}\right)$$

Όπου  $k1$  μια φυσική ποσότητα και  $k_{\text{ref}}$  η ποσότητα αναφοράς της.

Ουσιαστικά η μονάδα αυτή, εκφράζει τη διαφορά στάθμης μιας ποσότητας,  $k1$ , από το επίπεδο αναφοράς,  $k_{\text{ref}}$ .



Από την εξίσωση συμπεραίνουμε ότι η τιμή των dB είναι 10 φορές ο λογάριθμος, με βάση το 10, του λόγου των δυο ενεργειακών ποσοτήτων και κάθε δεκαδική αλλαγή του κλάσματος αντιστοιχεί σε αλλαγή 10 dB.

Για την ακουστική είναι σημαντικό να αναφερθούν δύο σταθμικές μεταβολές. Η μία ισούται με τον διπλασιασμό ή τον υποδιπλασιασμό του λογαριθμικού λόγου, καθώς επιφέρει αλλαγή των 3 dB της αρχικής στάθμης. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετά σημαντική καθώς 3 dB είναι η ελάχιστη μεταβολή που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί. Η άλλη μεταβολή ισούται με (υπό-)τετραπλασιασμό του λόγου που επιφέρει αλλαγή των 6 dB. Η ποσότητα αυτή των 6 dB είναι πολύ χαρακτηριστική όταν αναφερόμαστε στις μεταβολές των ακουστικών μεγεθών.

### 1.3.6 Φίλτρα A, B, C, D – Ηχοστάθμιση A, B, C, D.

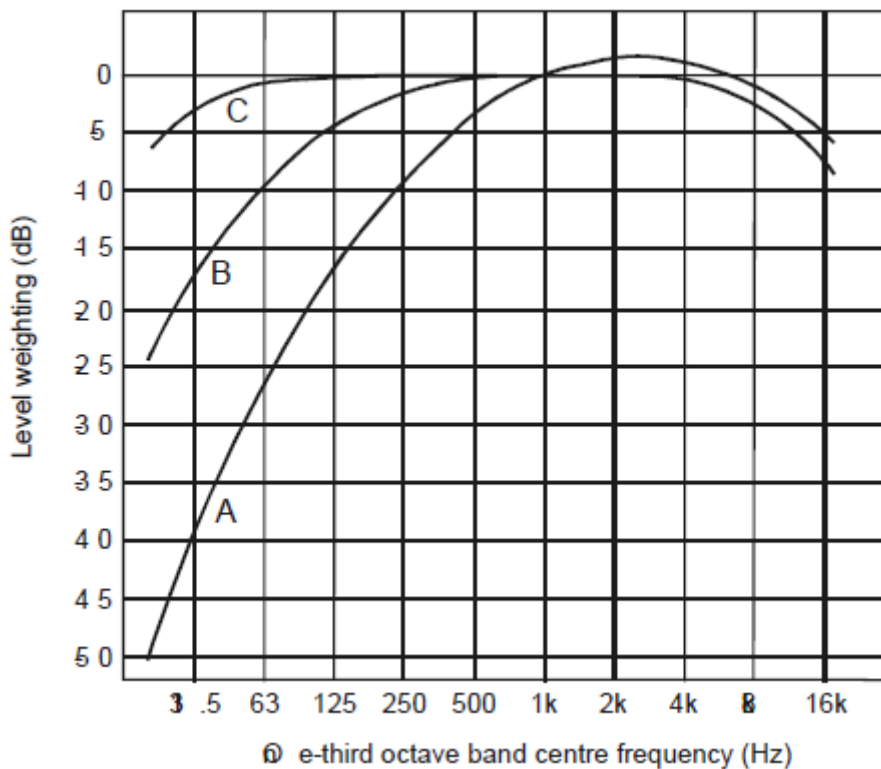
Όπως είναι φυσικό, η φαινομενική ηχηρότητα του ήχου (δηλαδή η υποκειμενική απόκριση του αυτιού) ποικίλλει ανάλογα, με τη συχνότητα και την πίεση του ήχου, μεγέθη τα οποία είναι αλληλένδετα σε κάποιο βαθμό. Τα περισσότερα όργανα ηχομέτρησης έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του αυτιού με χρήση ηλεκτρονικών φίλτρων.

Τα φίλτρα αυτά, ονομάζονται δείκτες βάρους ή φίλτρα A, B, C ή κανονικοποιημένες καμπύλες διόρθωσης. Όταν κάποια μέτρηση γίνεται μέσω κάποιου φίλτρου τότε τα επίπεδα dB σημειώνονται ως dB(A), dB(B) και dB(C) αντίστοιχα.

Ο δείκτης-A σχεδιάστηκε για να προσεγγίσει την απόκριση του ανθρώπινου αυτιού σε χαμηλά επίπεδα ήχου. Ομοίως οι δείκτες B και C σχεδιάστηκαν για να προσεγγίσουν την απόκριση του αυτιού σε επίπεδα των 55-85 dB και άνω των 85 dB αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες των δεικτών αυτών.

Το φίλτρο -D είχε προταθεί ειδικά για μετρήσεις θορύβου από αεροσκάφη. Παρ' όλα αυτά δεν έχει μεγάλη αποδοχή και το φίλτρο -C χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό τέτοιων θορύβων.



Σχήμα 1. 1: Διεθνή Πρότυπα φίλτρων A,B,C— καμπύλες ηχομέτρων σε τριοκταβική ανάλυση.

[2]

Το φίλτρο-A είναι αυτό που χρησιμοποιείται στα περισσότερα όργανα μέτρησης, καθώς προσεγγίζει την απόκριση του ανθρώπινου αυτιού στα χαμηλά ηχητικά πεδία, τα πεδία δηλαδή που συναντάμε στο καθημερινό μας περιβάλλον.

Στον Πίνακα 1.3 παρατίθενται οι τιμές σε τριοκταβική ανάλυση κατά φίλτρο-A.

Frequency (Hz)	A-weighting correction	Frequency (Hz)	A-weighting correction	Frequency (Hz)	A-weighting correction
10	-70.4	160	-13.4	2500	1.3
12.5	-63.4	200	-10.9	3150	1.2
16	-56.7	250	-8.6	4000	1.0
20	-50.5	315	-6.6	5000	0.5
25	-44.7	400	-4.8	6300	-0.1
31.5	-39.4	500	-3.2	8000	-1.1
40	-34.6	630	-1.9	10000	-2.5
50	-30.2	800	-0.8	12500	-4.3
63	-26.2	1000	0.0	16000	-6.6
80	-22.5	1250	0.6	20000	-9.3
100	-19.1	1600	1.0		
125	-16.1	2000	1.2		

Πίνακας 1. 3: Διορθώσεις κατά φίλτρο-A (dBA)

[2]

Παράδειγμα μέτρησης κατά φίλτρο-A στις κεντρικές συχνότητες σε τριοκταβική ανάλυση φαίνεται στον Πίνακα 1.4.

Octave band centre frequency (Hz)	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Linear level (dB)	95	95	90	85	80	81	75	70	65
A-wt correction	-39.4	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1.0	-1.1
A-wt level	55.6	68.6	73.9	76.4	76.8	81.0	76.2	71.0	63.9

Πίνακας 1. 4: Παράδειγμα μέτρησης κατά φίλτρο –A

[2]

Στα 125Hz, για παράδειγμα, το γραμμικό επίπεδο ήχου είναι 90dB η διόρθωση κατά φίλτρο-A είναι 16,1dB άρα μετρώντας κατά φίλτρο-A θα μετρήσω 73,9dB(A) επίπεδο ήχου.

Όσο χρήσιμο και αν είναι το φίλτρο A, δεν υποδεικνύει σε ποια συχνότητα βρίσκεται η πηγή του θορύβου.

Για τους ακουστικούς σχεδιασμούς χρησιμοποιούνται οι καμπύλες κατάταξης θορύβου, οι οποίες υπολογίζουν το θόρυβο σε σχέση με την συχνότητα τους, όπως περιγράφονται στους κανονισμούς ISO 1996-1(1982), 1996-2(1987) και στον ΕΛΟΤ 360. Αυτές οι καμπύλες παρέχουν κατάταξη θορύβου NR (noise rating), κριτήρια θορύβου NC (noise criteria), κριτήρια δωματίου RC (room criteria), κριτήρια ισορόπησης θορύβου NCB (balanced noise criteria ) και κριτήρια θορύβου δωματίου RNC (room noise criteria).

- NR καμπύλη (noise rating): Έχουν εγκριθεί από τον διεθνή οργανισμό προτύπων (ISO) και χρησιμοποιείται για γενικούς σκοπούς κυριώς για βιομηχανικό και περιβαλλοντολογικό θόρυβο. Υπολογίζεται ο θόρυβος βάση των συχνοτήτων του ήχου. Στην πράξη υπάρχει ανοχή των  $\pm 2$  dB σε οποιοδήποτε συχνοτικό εύρος.
- NC καμπύλη (noise criteria): Οι καμπύλες αυτές θέτουν τα αποδεκτά όρια θορύβου σε κατειλημμένα κτήρια όταν όλα τα συστήματα (εξαερισμός, θέρμανση, υπολογιστές, φώτα κ.τ.λ) είναι σε λειτουργία. Οι καμπύλες αυτές δεν ορίζονται στο συχνοτικό εύρος με κεντρική συχνότητα 31,5Hz ενώ είναι πολύ ανεκτικά τα όρια για συχνότητες μεγαλύτερες των 2kHz.
- RC καμπύλη (room criteria): Αναπτύχθηκε με σκοπό να αντικαταστήσει την NC καμπύλη για την αξιολόγηση του θορύβου από τον κλιματισμό σε μη κατειλημμένους χώρους.

Οι καμπύλες NC και RC χρησιμοποιούνται ως μέτρο, για την θέσπιση μέγιστου ορίου στον θόρυβο βάθους.

- NCB καμπύλη (balanced noise criteria): Χρησιμοποιούνται για την θέσπιση αποδεκτών ορίων θορύβου βάθους σε κατειλημμένους χώρους λαμβάνοντας υπ' όψη τον θόρυβο του συστήματος εξαιρισμού και οποιοδήποτε άλλο θόρυβο περιβάλλοντος. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται ως αντικατάστατα των καμπυλών NC.

Οι καμπύλες RC και NCB έχουν περιορισμούς που μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Από την μία, οι καμπύλες RC θέτουν όρια που βρίσκονται κάτω από το κρίσιμο σημείο προστασίας της ακοής από θορύβους χαμηλών συχνοτήτων, υψηλής όμως ενέργειας. Φαινόμενο το οποίο, δε μπορούν να προβλέψουν σωστά οι καμπύλες NCB.

Από την άλλη βέβαια, οι καμπύλες NCB παρέχουν ακριβή πρόβλεψη θορύβου ενός HVAC συστήματος, ενώ οι καμπύλες RC μπορεί να απορρίψουν ακόμα και ένα καλά σχεδιασμένο τέτοιο σύστημα.

- RNC καμπύλη (room noise criteria): Οι καμπύλες αυτές έχουν ως στόχο να συνδυάσουν τις δυνατότητες που έχουν οι καμπύλες RC και NCB. Παρ' όλο που οι καμπύλες αυτές παρέχουν καλή πρόβλεψη, δύσκολα χρησιμοποιούνται λόγω της πολύπλοκης διαδικασίας επεξεργασίας.

Στον πίνακα 1.5 παρακάτω, φαίνεται η σύγκριση ως προς τον θόρυβο περιβάλλοντος όλων αυτών των καμπυλών μεταξύ τους και σε σχέση με τα επίπεδα κατά φίλτρο A.

Με μπλε έχει σημειωθεί η τιμή θορύβου περιβάλλοντος που θα πρέπει να έχει ένα θέατρο.

dB(A)	NR	NC, NCB and RNC	RC	Comment
25-30	20	20	20	Very quiet
30-35	25	25	25	
35-40	30	30	30	Quiet
40-45	35	35	35	
45-50	40	40	40	Moderately noisy
50-55	45	45	45	
55-60	50	50	50	Noisy
60-65	55	55	–	
65-70	60	60	–	Very noisy

Πίνακας 1. 5: Σύγκριση τιμών Θορύβου Περιβάλλοντος μεταξύ φίλτρου A και καμπυλών κατάταξης θορύβου.

[2]

### 1.3.7 Η συχνότητα του ήχου στην ακουστική μελέτη.

Η ακουστική είναι ο κλάδος που μελετά την συμπεριφορά του ήχου σε έναν χώρο (στεγασμένο ή υπαίθριο). Ιδανική μελέτη ενός χώρου είναι αυτή, που μελετά πως συμπεριφέρεται αυτός σε κάθε συχνότητα ξεχωριστά. Η διαδικασία αυτή όμως, καθίσταται χρονοβόρα και περίπλοκη, αφού το εύρος συχνοτήτων που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί είναι μεγάλο, από 20Hz μέχρι 20.000Hz, και η απόκριση του συστήματος πηγή-μέσο διάδοσης-δέκτης δεν είναι ούτε σταθερή, ούτε μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την συχνότητα.

Για τον λόγο αυτό οι ακουστικές μελέτες γίνονται συνήθως σε ζώνες (bands) συχνοτήτων. Με τον όρο ζώνες εννοούμε τις διαδοχικές περιοχές συχνοτήτων μεταβλητού ή σταθερού εύρους και η μελέτη γίνεται σε μια μόνο συχνότητα της περιοχής - ζώνης που ονομάζεται κεντρική.

Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον έγκυρη και αποδεκτή μέθοδος για ακουστικές μελέτες.

Οι ζώνες συχνοτήτων λοιπόν, χαρακτηρίζονται από τις πλευρικές συχνότητες  $f_1$ ,  $f_2$  και από την κεντρική συχνότητα  $f_0$ .

Όπου: 
$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2}$$

Όταν έχουμε σταθερό εύρος συχνοτήτων, η μεταβολή αυτή ορίζεται από τις εκάστοτε πλευρικές συχνότητες και ισούται με την ποσότητα :

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Όταν έχουμε μεταβλητό εύρος συχνοτήτων, η μεταβολή αυτή ορίζεται λογαριθμικά. Οι ζώνες μεταβλητού εύρους είναι οι εξής:

- Οκτάβες:  $\frac{f_2}{f_1} = 2$
- Τριοκτάβες :  $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$
- Δεκαοκτάβες :  $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/10}$
- N – οκτάβες:  $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/N}$

Στον Πίνακα 1.6 παρακάτω, παρουσιάζονται οι συχνότητες σε οκταβικό και τριοκταβικό εύρος, με τα συχνοτικά τους όρια, έτσι ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμα.

Παρ' ότι το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ήχους σε ένα ευρύ συχνοτικό φάσμα, δεν είναι όλες οι συχνότητες ίδιες. Έχει παρατηρηθεί ότι οι χαμηλές συχνότητες είναι πιο 'θορυβώδης' από τις μεσαίες και τις υψηλές συχνότητες.

Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι μεταξύ 20Hz και 60Hz το ανθρώπινο αυτί δε μπορεί να ξεχωρίσει τις συχνότητες που απαρτίζουν τον ήχο. Έτσι αυτό που ακούγεται είναι μία αυξομείωση της συνολικής έντασης του ήχου. Σ' αυτές τις συχνότητες παρατηρούνται δευτερογενή φαινόμενα που προκαλούν ενοχλήσεις.

Για συχνότητες άνω των 60Hz ο άνθρωπος μπορεί να ξεχωρίσει τις διαφορετικές συχνότητες και χροιές του ήχου. Τα δευτερογενή φαινόμενα είναι ασήμαντα ενώ ο θόρυβος προκαλείται από ήχους που έχουν διακριτό συχνοτικό περιεχόμενο.

[10]

Band number	Octave band centre frequency	One-third octave band centre frequency	Band limits	
			Lower	Upper
14		25	22	28
15	31.5	31.5	28	35
16		40	35	44
17		50	44	57
18	63	63	57	71
19		80	71	88
20		100	88	113
21	125	125	113	141
22		160	141	176
23		200	176	225
24	250	250	225	283
25		315	283	353
26		400	353	440
27	500	500	440	565
28		630	565	707
29		800	707	880
30	1,000	1,000	880	1,130
31		1,250	1,130	1,414
32		1,600	1,414	1,760
33	2,000	2,000	1,760	2,250
34		2,500	2,250	2,825
35		3,150	2,825	3,530
36	4,000	4,000	3,530	4,400
37		5,000	4,400	5,650
38		6,300	5,650	7,070
39	8,000	8,000	7,070	8,800
40		10,000	8,800	11,300
41		12,500	11,300	14,140
42	16,000	16,000	14,140	17,600
43		20,000	17,600	22,500

Πίνακας 1. 6: Προτεινόμενα συχνοτικά εύρη (Hz)

[2]

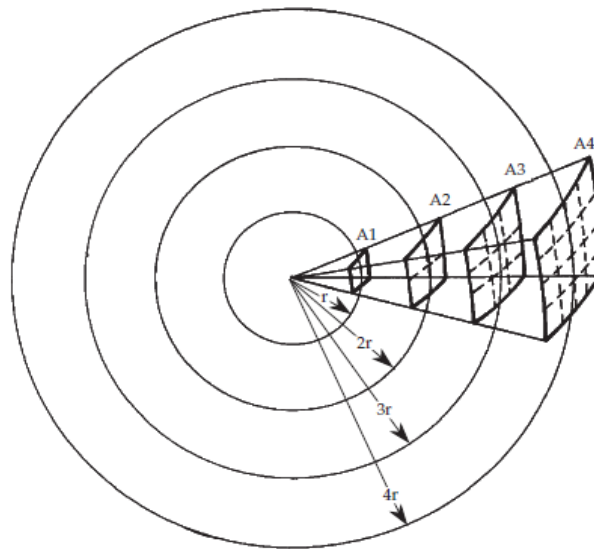
## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Ακουστική Αρχιτεκτονική

#### 2.1 Διάδοση του ήχου

Η πιο απλή περίπτωση διάδοσης του ήχου είναι αυτή σε ελεύθερο πεδίο, όπου ο ήχος ταξιδεύει σε ευθείες γραμμές χωρίς εμπόδια.

Έστω μια σταθερή, σημειακή, ηχητική πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διάδοση του ήχου θα μοιάζει όπως στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2. 1: Διάδοση του ήχου από σημειακή πηγή.

[11]

Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν σφαίρες με ακτίνα, αλλά πολλαπλάσια της ακτίνας  $r$ . Όλη η ηχητική ενέργεια που περνά από την μικρότερη τετραγωνική περιοχή  $A1$  της σφαίρας ακτίνας  $r$ , περνά επίσης από τις περιοχές  $A2$ ,  $A3$  και  $A4$  των σφαιρών ακτίνας  $2r$ ,  $3r$  και  $4r$  αντίστοιχα. Παρ' όλο που η συνολική ενέργεια που ταξιδεύει προς μια κατεύθυνση είναι η ίδια, η περιοχή στην οποία επεκτείνεται είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της έντασης. (Εξίσωση 1.2.1)

Όπως είναι φυσικό ο ήχος ανταποκρίνεται διαφορετικά σε κλειστούς και διαφορετικά σε υπαίθριους χώρους.

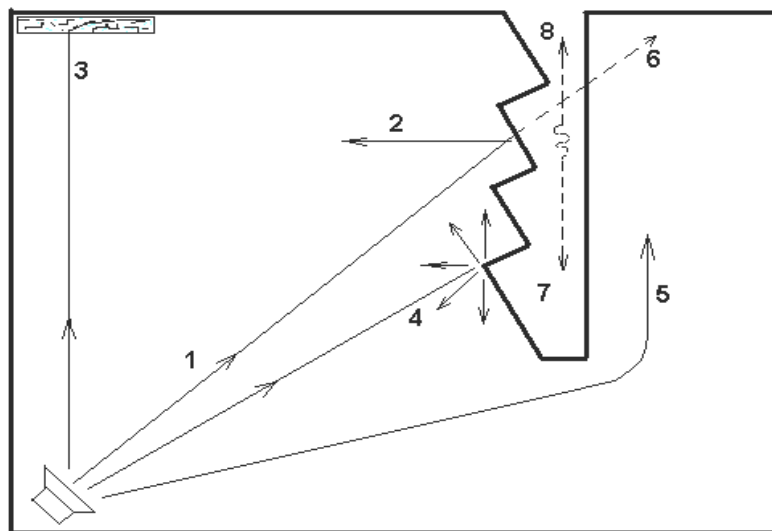
Σε ανοιχτούς χώρους ο ήχος φτάνει απευθείας από την πηγή στον δέκτη. Έχουμε δηλαδή ελεύθερο πεδίο και εφαρμόζεται ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου. Δηλαδή η ηχητική στάθμη μειώνεται κατά 6 dB, σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την σημειακή πηγή.

Σε κλειστούς χώρους εκτός από την απ' ευθείας διάδοση, ο ήχος φτάνει στον δέκτη και μέσω άλλων φαινομένων όπως η ανάκλαση.

## 2.2 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους

Πολλές φορές έχουμε παρατηρήσει ότι αντιλαμβανόμαστε τον ήχο διαφορετικά σε κάθε χώρο. Η διαφορετικότητα αυτή έγκειται, όχι μόνο σε κυματικά φαινόμενα αλλά και σε άλλες παραμέτρους όπως, στη γεωμετρία και στα κατασκευαστικά υλικά του χώρου καθώς και στον ίδιο τον ήχο. Σε κάθε κλειστό χώρο τα ηχητικά κύματα υπόκεινται σε διάφορα φυσικά φαινόμενα, τα οποία συμβάλλουν λιγότερο ή περισσότερο, στον τρόπο με τον οποίο ακούμε τον ήχο.

Στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 2.2, φαίνονται οι πιθανοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να συμπεριφερθεί ο ήχος σε έναν κλειστό χώρο. Ο ήχος που φτάνει στο ακουστικό μας νεύρο μπορεί να είναι αποτέλεσμα, είτε από ένα μόνο φαινόμενο, είτε από συμβολή διαφόρων φαινομένων.

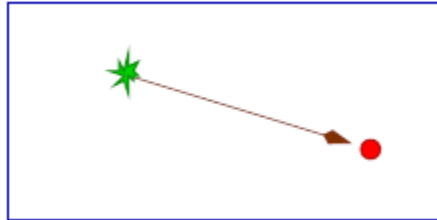


Σχήμα 2. 2: Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους: 1) απ' ευθείας ήχος 2) ηχοανάκλαση 3) ηχοαπορρόφηση 4) ηχοδιάχυση 5) ηχοπερίθλαση 6) ηχοδιάδοση-διάθλαση 7) διασπορά του ήχου μέσα στη κατασκευή 8) ηχοδιάδοση μέσα στη κατασκευή.

[12]



- Απ' ευθείας ήχος (Direct sound)  
Είναι ο ήχος που φτάνει σε ένα σημείο κατ'ευθείαν από την πηγή.



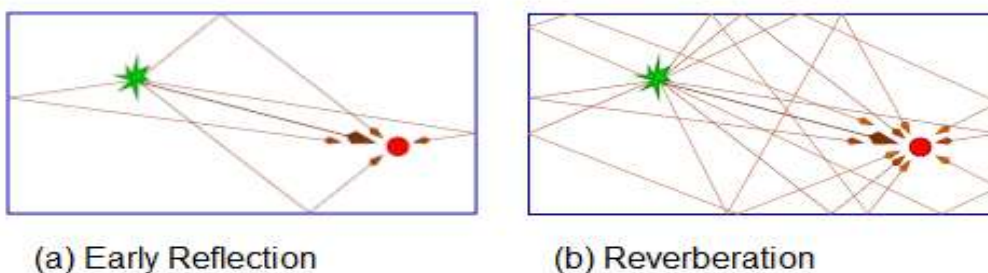
Σχήμα 2. 3: Απ' ευθείας ήχος

[13]

- Ηχώ-ανάκλαση (Reflection)  
Όταν ο ήχος προσπίπτει σε ένα εμπόδιο, τότε ένα μέρος της ενέργειας του κύματος απορροφάται, ενώ ένα άλλο ανακλάται και διαδίδεται στον χώρο. Κατά την διάδοση αυτή θα συμβάλει με τα άλλα ακουστικά κύματα και θα ανακλαστεί αρκετές φορές μέχρι να αποσβέσει τελείως. Ο αριθμός των ανακλάσεων είναι υπεύθυνος, για τον τρόπο που ακούμε τον ήχο σ ένα δωμάτιο, δηλαδή για την καλή ή κακή ακουστικότητα του χώρου.

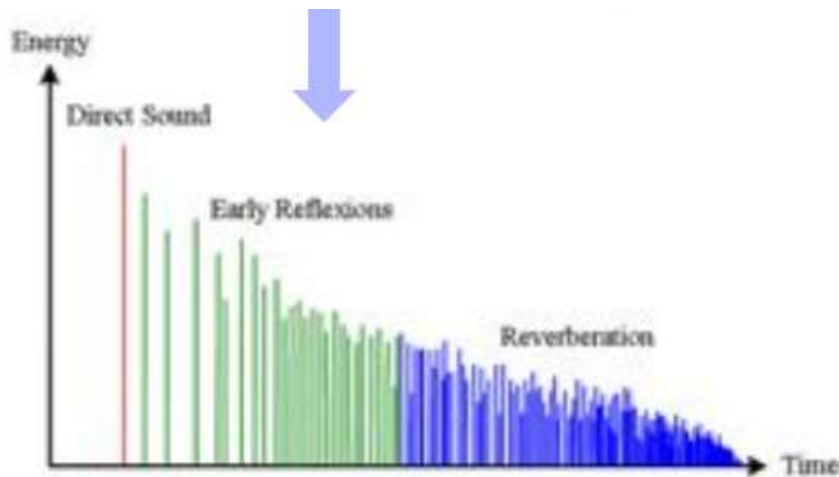
Συγκεκριμένα, μέσω των πρώτων ανακλάσεων αντλούμε πληροφορίες, για το μέγεθος και τις διαστάσεις του χώρου, και ενισχύουν τον απ' ευθείας ήχο. Από την άλλη, μέσω των καθυστερημένων ανακλάσεων πληροφορούμαστε για την αντηχητικότητα του δωματίου, μέγεθος το οποίο αναλύεται παρακάτω.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται οι πρώτες και οι καθυστερημένες ανακλάσεις ως προς ένα σημείο του χώρου, ενώ στο Σχήμα 2.5 φαίνονται ο απευθείας ήχος (direct sound), οι πρώτες (early reflections) και οι καθυστερημένες ανακλάσεις (reverberation) ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 2. 4: Ανάκλαση ήχου (α) πρώτες ανακλάσεις ως προς ένα σημείο (β) αντήχηση ως προς ένα σημείο

[13]



Σχήμα 2. 5: Απ'ευθείας ήχος (κόκκινο), οι πρώτες ανακλάσεις (πράσινο) και οι καθυστερημένες ανακλάσεις (μπλε) ως προς το χρόνο.

[13]

- Ηχώ-απορρόφηση (Absorption)

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια δε μπορεί να καταστραφεί ούτε να δημιουργηθεί από το μηδέν. Έτσι όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται στον αέρα, ένα μέρος της ενέργειας του μετατρέπεται σε θερμική, όταν προσπίπτει σε άλλα αντικείμενα. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται απορρόφηση και εξαρτάται από το είδος του υλικού στο οποίο προσπίπτει το ηχητικό κύμα. Τα υλικά που έχουν την δυνατότητα να απορροφούν μεγάλο μέρος της ενέργειας του ήχου ονομάζονται απορροφητικά και χρησιμοποιούνται όταν η αντήχηση του χώρου είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, με σκοπό την βελτίωση της καλής ακουστικότητας του χώρου αυτού.

- Ηχώ-διάχυση (Diffusion)

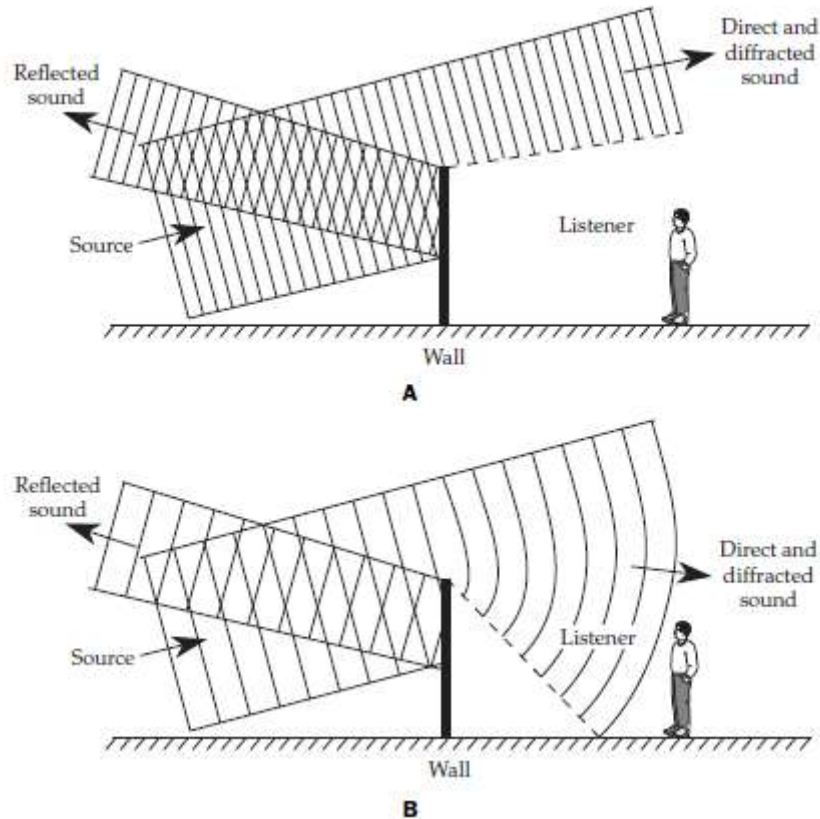
Ως διάχυση χαρακτηρίζουμε το φαινόμενο της ομοιόμορφης κατανομής του ήχου σε όλο το δωμάτιο. Το φαινόμενο αυτό είναι σπάνιο και η έλλειψή του, αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της καλής ακουστικής ενός χώρου. Η διάχυση μαζί με την ανάκλαση είναι οι δυο βασικές παράμετροι στην ακουστική σε κλειστούς χώρους.

Τα τελευταία χρόνια πολλά κέντρα συνεστίασης (Θέατρα, όπερες, μουσικά κέντρα), έχουν εγκατεστημένα, είτε στο ταβάνι είτε στους πλαϊνούς τοίχους, ειδικές κατασκευές οι οποίες διαχέουν τον ήχο με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουν καλύτερη, γρηγορότερη και πιο στοχευμένη διάδοση του ήχου.

- Ηχώ-περίθλαση (Diffraction)

Περίθλαση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, παρατηρείται αλλαγή στην κατεύθυνση του ήχου όταν αυτός συναντήσει κάποιο εμπόδιο. Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Ήχοι με μικρή συχνότητα (μεγάλο μήκος κύματος) περιθλώνται περισσότερο σε σύγκριση με ήχους μεγάλης συχνότητας (μικρό μήκος κύματος), όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2. 6: Ανακλώμενος- Περιθλώμενος ήχος καθώς προσπίπτει σε τείχος.  
(A) Κύμα μεγάλης συχνότητας (B) Κύμα μικρής συχνότητας.

[11]

- Ηχο-διάδοση/διάθλαση (Refraction)

Το φαινόμενο της ηχο-διάδοσης/διάθλασης προκύπτει όταν ο ήχος αλλάζει κατεύθυνση λόγω αλλαγής του μέσου διάδοσης. Η αλλαγή της κατεύθυνσης του ήχου, εξαρτάται από το υλικό στο οποίο μεταβαίνει. Επιπλέον, στον αέρα ο ήχος μπορεί να διαθλαστεί είτε λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας είτε λόγω ανέμου.

- Ηχο-διασπορά και Ηχο-διάδοση στην κατασκευή

Λαμβάνει χώρα κατά την απορρόφηση ενέργειας του ηχητικού κύματος, από το υλικό της κατασκευής.

### 2.2.1. Διάκριση μικρών και μεγάλων χώρων

Ένας κλειστός χώρος, όσον αφορά στην ακουστική του μελέτη, διακρίνεται σε μικρό, μεγάλο και πολύ μεγάλο. Ένας χώρος θεωρείται μεγάλος, όταν η μικρότερη του διάσταση

είναι τουλάχιστον κατά δύο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου που μελετάμε. Από την άλλη, ένας χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος, όταν η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα, είναι τέτοια ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν. Στην πράξη βέβαια το οριακό σημείο μεταξύ μικρών και μεγάλων χώρων δεν είναι τόσο ξεκάθαρο και η διάκριση αυτή γίνεται βάση της συχνότητας αποκοπής (cut-off frequency) όπως αυτή ορίστηκε από τον Schroeder.

Η εξίσωση αυτή, ορίζεται ως:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}$$

Όπου: RT: είναι ο χρόνος αντήχησης και

V: είναι ο όγκος του δωματίου.

Πάνω από την συχνότητα αποκοπής χαρακτηρίζουμε έναν χώρο μεγάλο και η μελέτη του γίνεται βάση της στατιστικής μεθόδου και όχι με την αρχή της κυματικής, όπως συμβαίνει στους μικρούς χώρους.

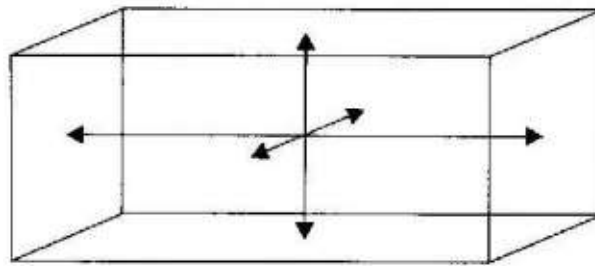
Βέβαια κατά την ακουστική μελέτη, πέρα των διαστάσεων του χώρου που εξετάζουμε, καθοριστικό ρόλο έχει και η χρήση για την οποία προορίζεται ο χώρος αυτός. Έτσι μπορούμε να τους διακρίνουμε σε χώρους ακρόασης μουσικής, σε χώρους ομιλίας/διαλέξεων και σε χώρους γενικών-πολλαπλών χρήσεων.

### 2.2.2. Απόκριση του ήχου σε μικρούς χώρους

Στους μικρούς χώρους επικρατούν τα κυματικά φαινόμενα του ήχου και μπορούμε να τον προσεγγίσουμε βάση των αρχών της κυματικής ακουστικής. Τα κυριότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν έναν μικρό χώρο είναι τα στάσιμα κύματα και ισχυρές πρώτες ανακλάσεις.

Τα είδη στάσιμων κυμάτων, τρόποι ταλάντωσης, που μπορούν να εμφανιστούν σε έναν μικρό χώρο είναι τα εξής:

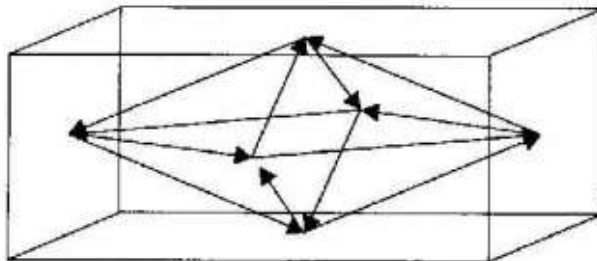
- ❖ Αξονικός τρόπος ταλάντωσης (Axial Modes): Περιέχει την μεγαλύτερη ενέργεια του αντηχητικού πεδίου και είναι ο ισχυρότερος των τριών ειδών ταλαντώσεων. Δημιουργείται από διαδοχικές και συμφασικές ανακλάσεις του ήχου μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών (απέναντι επιφάνειες).



Axial modal paths

Σχήμα 2. 7: Αξονικός τρόπος διάδοσης

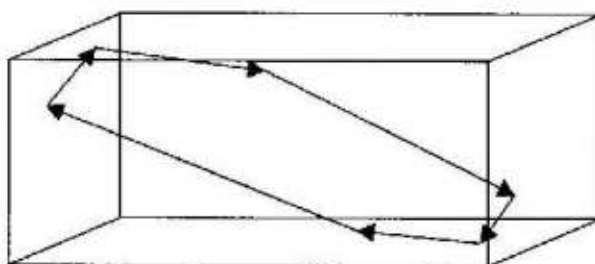
- ❖ Εφαπτομενικός Τρόπος ταλάντωσης (Tangential Modes): Έχει το μισό της ενέργειας των αξονικών και συνεπώς τα κύματα αυτά είναι κατά 3 dB ασθενέστερα. Δημιουργούνται από τις διαδοχικές και συμφασικές ανακλάσεις που προκύπτουν μεταξύ των τεσσάρων επιφάνειες του δωματίου



Tangential modal paths

Σχήμα 2. 8: Εφαπτομενικός τρόπος διάδοσης

- ❖ Πλάγιος Τρόπος ταλάντωσης (Oblique Modes): Έχει το ένα τέταρτο της ενέργεια των αξονικών ταλαντώσεων και συνεπώς τα κύματα αυτά είναι κατά 6 dB ασθενέστερα. Δημιουργούνται από διαδοχικές και συμφασικές ανακλάσεις που προκύπτουν και από τις έξι επιφάνειες του δωματίου



An oblique modal path

Σχήμα 2. 9: Πλάγιοι τρόποι διάδοσης

[14]

Η διάδοση του ήχου, σε πολύ μικρούς χώρους είναι ακόμα πιο απλή και μπορεί να περιγραφεί όπως η διάδοση κυμάτων σε έναν κλειστό αγωγό.

### 2.2.3. Απόκριση του ήχου σε μεγάλους χώρους

Στους μεγάλους χώρους τα κύματα εκφυλίζονται λόγω των ανακλάσεων και των διαθλάσεων, γι' αυτό το λόγο η μελέτη τέτοιων χώρων γίνεται με την βοήθεια στατιστικών τύπων. Όταν ένας κλειστός χώρος διαθέτει επιφάνειες που δεν ανακλούν τον ήχο αλλά τον διαχέουν προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε ο ήχος είναι διάχυτος.

Οι μεγάλοι χώροι επίσης ονομάζονται και χώροι Sabine καθώς σ' αυτούς τους χώρους ισχύει η εξίσωση του Wallace Clement Sabine για τον χρόνο αντήχησης. Η εξίσωση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \text{ (sec)}$$

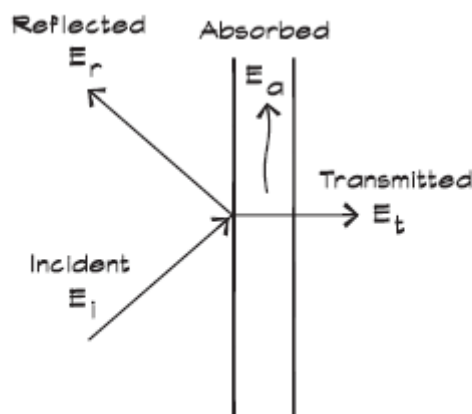
Όπου T: ο χρόνος αντήχησης,  
V: ο όγκος του δωματίου και  
A: η συνολική απορρόφηση του χώρου.

Τα κυριότερα μεγέθη λοιπόν, που χαρακτηρίζουν τους μεγάλους κλειστούς χώρους είναι η απορρόφηση, η κρίσιμη απόσταση και ο χρόνος αντήχησης.

#### ❖ Απορρόφηση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά την πρόσπτωση ενός κύματος σε μία επιφάνεια, μέρος της ενέργειας ανακλάται, ένα μέρος απορροφάται από το υλικό και ένα μέρος διαδίδεται μέσω του υλικού.

Στο σχήμα 2.10 απεικονίζεται αυτή η αλληλεπίδραση του ακουστικού κύματος με μια επιφάνεια.



Σχήμα 2. 10: Αλληλεπίδραση ακουστικού κύματος με μια επιφάνεια

Κατά την μελέτη της ακουστικής ενός χώρου, μας ενδιαφέρει η ενέργεια του ανακλώμενου κύματος κι όχι η ενέργεια που απορροφήθηκε ή διαδόθηκε πέραν του υλικού. Συνεπώς ορίζουμε τον συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$ , ο οποίος περιλαμβάνει το άθροισμα των δύο τελευταίων ενεργειών.

$$\alpha = \frac{E\alpha + Et}{Ei}$$

Αντίστοιχα ο συντελεστής ανάκλασης είναι:

$$a_r = \frac{Er}{Ei}$$

Και καθώς η ενέργεια ούτε καταστρέφεται ούτε δημιουργείται από το μηδέν:

$$\alpha_\theta + a_r = 1$$

Ο συντελεστής απορρόφησης παίρνει τιμές από 0 (0% απορρόφηση) έως 1 (100% απορρόφηση). Μονάδα μέτρησης είναι το Sabine, προς τιμή του φυσικού Sabine, ο οποίος ήταν ο πρώτος που μελέτησε την επίδραση της απορρόφησης στα ηχητικά κύματα. Συνήθως οι ενδεικνύμενες τιμές που δίνονται για τον συντελεστή απορρόφησης βρίσκονται στις κεντρικές συχνότητες της οκταβικής ανάλυσης.

Η συνολική απορρόφηση της αίθουσας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n$$

Όπου  $A$ : η συνολική απορρόφηση της αίθουσας ( $m^2$  Sabine)

$S$ : το εμβαδόν της επιφάνεια ( $m^2$ )

$\alpha$ : ο συντελεστής απορρόφησης της συγκεκριμένης επιφάνειας (Sabine)

Στον Πίνακα 2.1 καταγράφονται οι ενδεικνύμενες τιμές του συντελεστή απορρόφησης διαφόρων υλικών στις κεντρικές συχνότητες της οκταβικής ανάλυσης.

Υλικά	Συχνότητα σε οκταβική ανάλυση σε Hz						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Τοίχος από τούβλο	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Σκήνη από ξύλο των 27mm κενό μεταξύ των πλακών	0,10	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	-
Λεπτό ξύλινο κόντρα πλακέ	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06	-
Βελούδινες κουτίνες	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36	0,36
Κουρτίνες για στούντιο 22cm από τον τοίχο	0,36	0,26	0,51	0,45	0,62	0,76	-
Ξύλινη καρέκλα χωρίς επένδυση	0,05	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12	-
Μέτρια επενδυμένη καρέκλα για concert hall, άδεια	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	-
Βαριά επενδυμένη καρέκλα, άδεια	0,70	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81	-
Κοινό σε ξύλινες καρέκλες 2 άτομα ανα m <sup>2</sup>	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,87
Αέρας 20°C, 30-50% υγρασία	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3

Πίνακας 2. 1: Ενδεικνυόμενες τιμές συντελεστή ακουστικής απορρόφησης α διαφόρων υλικών.

(Μερικοί πίνακες ενδεικνυόμενων συντελεστών απορρόφησης δίνονται στην σχετικά βιβλιογραφία [15], [16], [17], [18], [19])

#### ❖ Χρόνος Αντήρησης

Ο χρόνο αντήρησης είναι ο χρόνος που χρειάζεται να παρέλθει, ώστε να μηδενιστεί η ηχητική πίεση, ύστερα από διακοπή της πηγής.

[20]

Υπάρχουν τρεις καταστάσεις που χαρακτηρίζουν το χρόνο αντήρησης.

##### i. Το μέγεθος του χώρου.

Όσο μεγαλύτερος ο χώρος, τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος αντήρησης, καθώς απαιτείται περισσότερος χρόνος ώστε να δημιουργηθεί το αντηχητικό πεδίο στην σταθερή του κατάσταση. Βέβαια στο χρόνο αυτό σημαντικό ρόλο παίζει και η απορρόφηση του χώρου.

##### ii. Το επίπεδο της σταθερής κατάστασης του χρόνου αντήρησης

Είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο χρόνος αντήρησης έχει την μεγαλύτερη τιμή και αποκτά σταθερή τιμή. Σ' αυτό το διάστημα έχουμε ισορροπία, μεταξύ της ενέργειας του ήχου και της ενέργειας που χάνεται λόγω της απορρόφησης

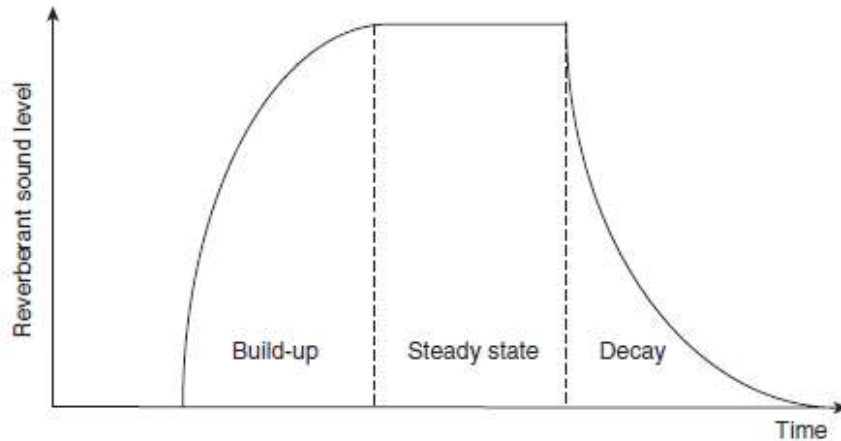
##### iii. Η πτώση του αντηχητικού επιπέδου

Μόλις η πηγή σταματήσει, αν όχι αμέσως, μετά από λίγο η ένταση του ήχου αρχίζει να μειώνεται σταδιακά σε κάθε ηχητική ανάκλαση και εξαρτάται από



την ενέργεια που χάνεται σε κάθε τέτοια ανάκλαση. Χώροι με μικρή απορροφητική ικανότητα έχουν μεγαλύτερο χρόνο πτώσης.

Στο Σχήμα 2.11 παρακάτω παρουσιάζονται αυτές οι τρεις περιοχές.



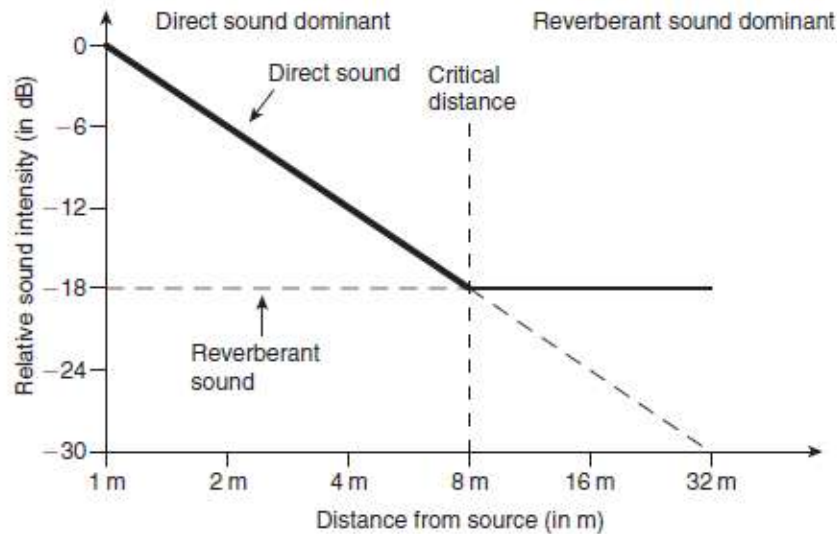
Σχήμα 2. 11: Χρονική εξέλιξη του πλάτους του αντηχητικού ήχου σε ένα δωμάτιο

[21]

❖ Κρίσιμη απόσταση

Κρίσιμη απόσταση είναι η απόσταση εκείνη, στην οποία το αντηχητικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο του απευθείας πεδίου. Εν αντιθέσει με το αντηχητικό πεδίο, στο οποίο η θέση του δέκτη είναι ανεξάρτητη σε σχέση με την πηγή, στο απευθείας πεδίο η σχέση πηγής-δέκτη είναι εξαρτημένη από την απόσταση.

Στο Σχήμα 2.12 παρακάτω βλέπουμε, την μέση ηχητική ένταση σε dB σε σχέση με την απόσταση διακρίνοντας την κρίσιμη απόσταση.



Σχήμα 2. 12: Μέση αντηχητική ένταση σε dB σε σχέση με την απόσταση

[21]

Στους πολύ μεγάλους χώρους πρέπει επιπλέον, να ληφθεί υπ'όψιν η απορρόφηση από τον αέρα. Συνεπώς, πέρα των ιδιοτήτων του χώρου, λαμβάνουμε υπ'όψιν την θερμοκρασία και την υγρασία της αίθουσας σε κάθε συχνότητα ξεχωριστά, συναρτήσει της πίεσης περιβάλλοντος, καθώς από αυτά εξαρτάται η απορρόφηση της ενέργειας από τον αέρα.

Όσον αναφορά τους θεατρικούς χώρους εμπειρικά μπορούμε να τους κατηγοριοποιήσουμε ανάλογα την χωρητικότητά τους. Έτσι έχουμε:

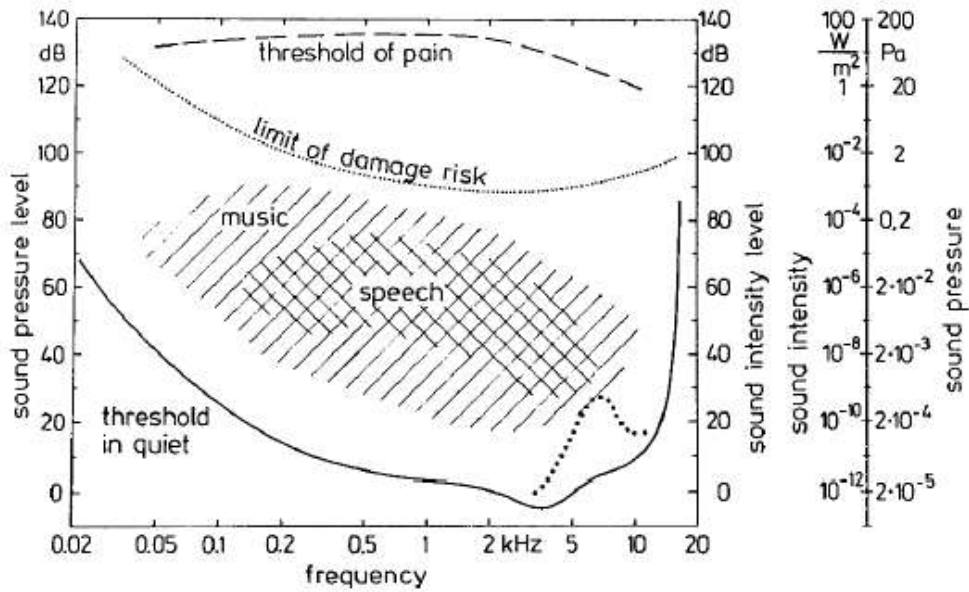
- πολύ μικρή αίθουσα  $\leq 200$  θέσεις.
- μικρή αίθουσα : 200-800 θέσεις.
- μεγάλη αίθουσα 800 – 1200 θέσεις.
- πολύ μεγάλη αίθουσα  $\geq 1200$  θέσεων

### 2.3 Ανθρώπινο αυτί.

Σε κάθε μελέτη, βασικό στοιχείο για έγκυρες μετρήσεις, αποτελεί το σημείο αναφοράς.

Στις ακουστικές μελέτες το σημείο αναφοράς μας είναι το ανθρώπινο αυτί και ο τρόπος που αυτό αντιλαμβάνεται τον κάθε ήχο. Στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 2.13, φαίνονται το κατώφλι ησυχίας και το κατώφλι πόνου. Αριστερά καταγράφεται το επίπεδο της ηχητικής πίεσης και δεξιά το επίπεδο της ηχητικής έντασης σε σχέση με τη συχνότητα.

Επίσης, στα δεξιά του πίνακα απεικονίζεται, σε κανονική κλίμακα, η σχέση της ηχητικής έντασης, σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $W/m^2$ ), με την ηχητική πίεση σε Pascal (Pa).

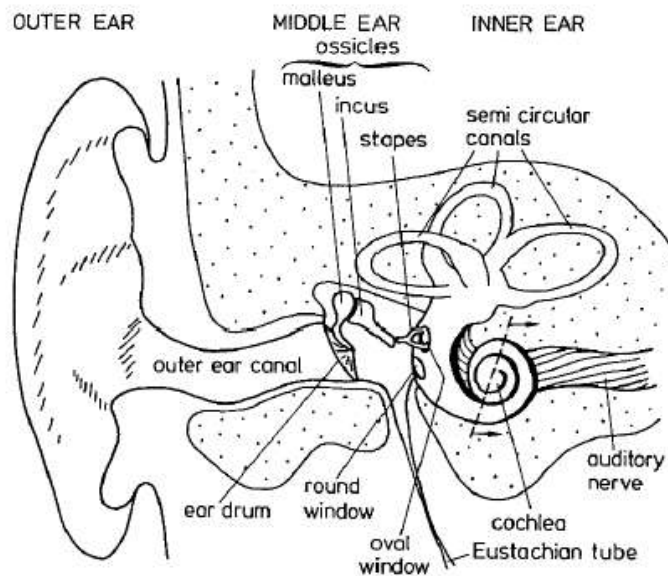


Σχήμα 2. 13: Ακουστική περιοχή μεταξύ ησυχίας και ακουστικού πόνου

[12]

Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι περιοχές ομιλίας και μουσικής καθώς και το όριο πάνω από το οποίο υπάρχει ο κίνδυνος βλάβης για το αυτί. Το διακεκομμένο τμήμα αντιστοιχεί στα άτομα που ακούνε συχνά πολύ δυνατή μουσική.

Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να διακριθεί σε τρεις περιοχές κατά τις οποίες ο ήχος υπόκειται σε διαφορετική επεξεργασία. Οι περιοχές αυτές είναι το έξω αυτί, το μέσο αυτί και το έσω αυτί. Στο Σχήμα 2.14 μπορούμε να δούμε αυτές τις περιοχές.



Σχήμα 2. 14: Σχηματικό διάγραμμα των τριών περιοχών του ανθρώπινου αυτιού.

[12]

❖ Έξω αυτί :

Το έξω αυτί συγκεντρώνει την ηχητική ενέργεια και μέσω του εξωτερικού καναλιού την μεταφέρει στη μεμβράνη. Το εξωτερικό αυτί έχει δύο πλεονεκτήματα. Πρώτον, προστατεύει την μεμβράνη και τον υπόλοιπο μηχανισμό του αυτιού. Κατά δεύτερον τοποθετεί το έσω αυτί κοντά στον εγκέφαλο, με αποτέλεσμα το μικρό μήκος των νευρώνων που μεταφέρουν τα ακουστικά σήματα.

Το εξωτερικό κανάλι λειτουργεί σαν ανοιχτός αγωγός με μήκος περίπου 2cm το οποίο αντιστοιχεί στο  $\frac{1}{4}$  του μήκους κύματος των 4kHz. Γι' αυτό και έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερη ευαισθησία ακόμα και βλάβες του ακουστικού νεύρου σ αυτή τη συχνότητα.

❖ Μέσο αυτί:

Το μέσο αυτί παίζει τον ρόλο του μετασχηματιστή. Η περιοχή αυτή μεταφέρει την ενέργεια από την εξωτερική μεμβράνη στο έσω αυτί, με όσον το δυνατόν τις μικρότερες απώλειες. Ο μετασχηματισμός έγκειται στο γεγονός ότι, οι ταλαντώσεις που συμβαίνουν στον αέρα και εντοπίζει το έξω αυτί θα πρέπει να διαδοθούν σε υγρό, το οποίο γεμίζει το έσω αυτί και περιβάλλει τους ακουστικούς αισθητήρες.

Η μετατροπή αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την πίεση που δέχεται η μεμβράνη. Μικρότερη ή μεγαλύτερη πίεση, μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο που ακούμε. Η μεταβολή της πίεσης της μεμβράνης είναι ο λόγος που "βουλώνουν" τα αυτιά μας όταν βρισκόμαστε σε μεγάλο υψόμετρο.

❖ Έσω αυτί:

Το εσωτερικό αυτί μεταφέρει τα ηχητικά κύματα στα ακουστικά νεύρα. Αυτά με την σειρά τους τα μεταφράζουν σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία μεταφέρονται μέσω των νευρώνων στον εγκέφαλο.

Η δομή του εσωτερικού αυτιού αν και είναι περίπλοκη, μπορεί να απεικονιστεί ως ένας κλειστός αγωγός με υγρό στο εσωτερικό του.

Έχει παρατηρηθεί ότι η τοποθέτηση του κεφαλιού σε σχέση με την πηγή επηρεάζει τον τρόπο που ακούμε έναν ήχο. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο λόγω της κατεύθυνσης των κυμάτων αλλά επιπλέον λόγω του κεφαλιού και των ώμων του ανθρώπου, τα οποία μπορούν να συμβάλλουν, προσθετικά ή μειωτικά, στην ηχητική πίεση μπροστά από την μεμβράνη του αυτιού. Βέβαια η επιρροή αυτή είναι σημαντική για συχνότητες κάτω των 1500Hz και προκύπτουν λόγω των ιδιοτήτων της σκίασης και της ανάκλασης.

## 2.4. Ακουστικοί παράμετροι.

### 2.4.1. Δείκτες που σχετίζονται με την ομιλία και την μουσική.

#### 1. Χρόνος Αντήχησης (RT).

Ο χρόνος αντήχησης (Reverberant Time) είναι μια σημαντική παράμετρος στον χαρακτηρισμό της καλής ακουστικής ενός χώρου. Όσο αυξάνεται, τόσο επηρεάζει αρνητικά την καθαρότητα του λόγου και δυσκολεύει στον προσδιορισμό της θέσης της ηχητικής πηγής. Για την μέτρηση του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιείται κρουστικό σήμα, μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Sabine. Ο κρουστικός αυτός παλμός δημιουργείται είτε από πιστόλι αφέτη είτε από μπαλόνι.

Η εξίσωση του Sabin για τον χρόνο αντήχησης είναι:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A}$$

Όπου  $RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης

$V$ : ο όγκος του δωματίου σε  $m^3$

$A$ : η συνολική απορρόφηση του δωματίου σε Sabin

Η εξίσωση του Sabin λειτουργεί για ζωντανά δωμάτια, όπου η μέση απορρόφηση είναι λιγότερη από 0,25.

Για τα ποιο απορροφητικά δωμάτια χρησιμοποιείται η εξίσωση των Eyring-Norris:

$$RT_{60} = 0.049V / -\ln(1 - \alpha_{\text{average}}).$$

Όπου  $V$ : ο όγκος του δωματίου σε  $ft^3$

$S$ : η συνολική επιφάνεια του δωματίου  $ft^2$

$\alpha_{\text{average}}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

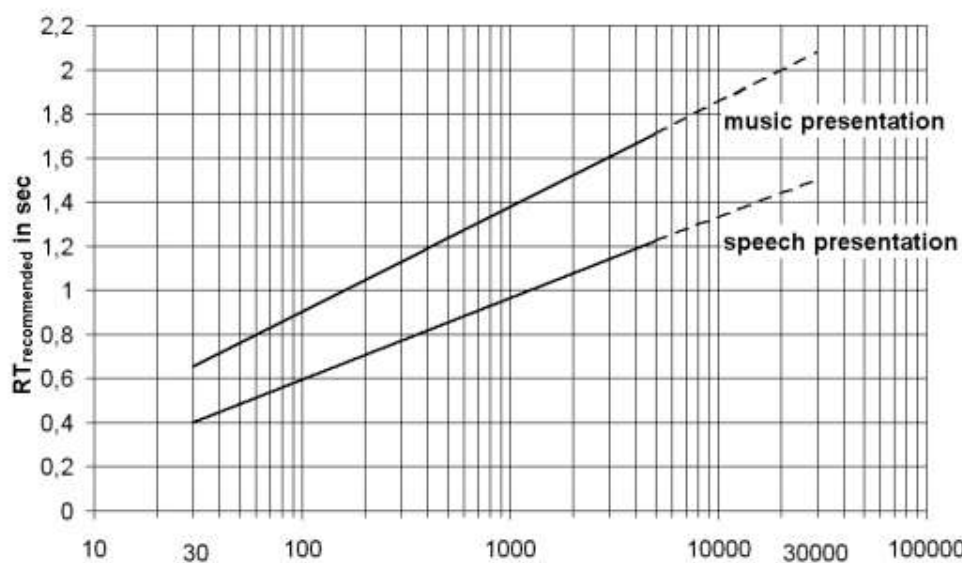
Στην περίπτωση που το δωμάτιο είναι αρκετά μεγάλο, τότε στον παρανομαστή του κλάσματος προστίθεται η ποσότητα  $4mV$  που αντιπροσωπεύει την απορρόφηση από τον αέρα.

Ο χρόνος αντήχησης  $RT$  αναφέρεται επίσης και ως χρόνος  $T60$ , διότι είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά 60dB από την στιγμή που η ηχητική πηγή σταματάει. Βέβαια στην πράξη ο ήχος φτάνει το επίπεδο του θορύβου περιβάλλοντος πριν

προλάβει να πέσει κατά 60dB. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν οι δείκτες T30, T20 και T10, οι οποίοι μετράνε την πτώση έντασης του ήχου κατά 30dB, 20dB και 10dB αντίστοιχα.

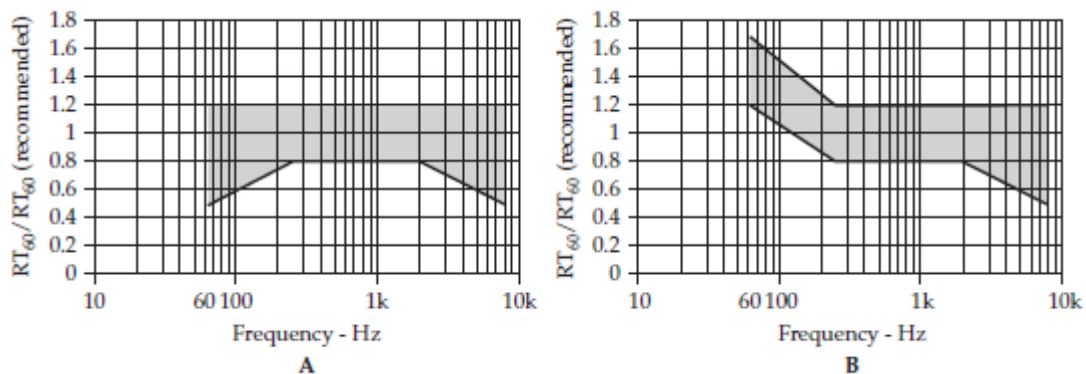
Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές χρόνου αντήχησης σε σχέση με τον όγκο του χώρου, για συχνότητες 500Hz – 1000Hz, ενώ στον Σχήμα 2.16 παρουσιάζονται οι αποδεκτές τιμές του χρόνου αντήχησης σε σχέση με την συχνότητα, για ομιλία (A) και μουσική (B).

Στον Πίνακα 2.2 καταγράφονται κάποιες αποδεκτές τιμές χρόνου αντήχησης ανάλογα με τη χρήση της αίθουσας στις μεσαίες συχνότητες (500-1000Hz).



Σχήμα 2. 15: Προτεινόμενος χρόνος αντήχησης RT σε σχέση με τον όγκο του χώρου για συχνότητα από 500Hz-1000Hz

[22]



Σχήμα 2. 16: Αποδεκτές τιμές συχνότητας – χρόνου αντήχησης σε σχέση με τον προτεινόμενο χρόνο αντήχησης για Α)Ομιλία και Β) Μουσική

[11]

Type of facility	Optimum mid-frequency RT <sub>60</sub> (s)
Broadcast studio	0.5
Classroom	1.0
Lecture/conference room	1.0
Movie/drama theater	1.0
Multipurpose auditorium	1.3 to 1.5
Contemporary church	1.4 to 1.6
Rock concert hall	1.5
Opera house	1.4 to 1.6
Symphony hall	1.8 to 2.0
Cathedral	3.0 or higher

Πίνακας 2. 2: Αποδεκτές τιμές χρόνου αντήχησης ανάλογα τη χρήση της αίθουσας.

[9]

## 2. EDT.

Ο δείκτης αυτός είναι η χρονική διάρκεια φθοράς της πρώιμης ενέργειας και συνδέεται με την ζωντάνια του χώρου. Είναι ουσιαστικά ο δείκτης T10. Ο δείκτης αυτός είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός για την ακουστικότητα ενός χώρου.

### 2.4.2. Δείκτες που σχετίζονται μόνο με την ομιλία.

Η χρήση αυτών των δεικτών στοχεύει στην αξιολόγηση της καλής ή κακής κατανόησης του λόγου (intelligibility). Οι δείκτες που παρουσιάζονται παρακάτω, αποτελούν διαφορετικούς τρόπους μέτρησης της νόησης του λόγου.

## 3. Δείκτης SNR (Signal to Noise Ratio) –Σηματοθορυβικός λόγος.

Η παράμετρος αυτή, βοηθά στο καθορισμό της καθαρότητας του λόγου. Το SNR σε dB ορίζεται ως η ένταση του ήχου σε dB μείον το θόρυβο περιβάλλοντος σε dB. Όσο μεγαλύτερος ο σηματοθορυβικός λόγος, τόσο πιο κατανοητή και η ομιλία. Εάν το SNR είναι πολύ μικρό ή αρνητικό τότε ο θόρυβος περιβάλλοντος καλύπτει τον ήχο. Όσο πιο μακριά βρίσκεται ο δέκτης, τόσο λιγότερο θα ακούει. Για κάθε διπλασιασμό της απόστασης σε μέτρα από τη πηγή του ήχου, η ένταση του ήχου μειώνεται κατά 6 dB.

[23]

Απλούστερα ο δείκτης SNR είναι το κλάσμα του ήχου προς τον θόρυβο και δείχνει πόσο επικρατεί ή όχι ο θόρυβος έναντι του ήχου.

Στον Πίνακα 2.3 αναγράφεται το επίπεδο κατανόησης της ομιλίας ανάλογα με τις τιμές του SNR σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 9921-1

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

Πίνακας 2. 3: Αντιληπτότητα ομιλίας σύμφωνα με τον Δείκτη SNR, σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 9921-1

[22]

#### 4. Δείκτης ευκρίνειας D50.

Μέσω αυτού του δείκτη μελετάμε τη κατανόηση του λόγου, δηλαδή την καταληπτότητα του λόγου (speech intelligibility). Αξιολογείται ουσιαστικά, η σαφήνεια της ομιλίας και των συλλαβών. Ορίζεται ως η ενέργεια του ήχου που φτάνει σε ένα σημείο στα πρώτα 50ms προς την συνολική ενέργεια που φτάνει στον ακροατή. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται σε ποσοστιαία κλίμακα.

$$D50 = \frac{E_{50}}{E_{\infty}}$$

Για να έχουμε καλή κατανόηση του λόγου θα πρέπει  $D50 > 0.5$  ανεξάρτητα της συχνότητας. Ένας χώρος κρίνεται ότι έχει κακή ευκρίνεια, ακόμα και όταν ο ακροατής καταλαβαίνει την ομιλία, αλλά αδυνατεί να συγκρατήσει αυτά που άκουσε.

#### 5. Δείκτης διαύγειας C50 (clarity).

Ο δείκτης αυτός αξιολογεί την καθαρότητα της ομιλίας που φτάνει στον ακροατή και είναι αντίστοιχος της διακριτότητας. Ορίζεται ως το λογαριθμικό κλάσμα της ενέργειας σε ένα σημείο μεταξύ της ενέργειας των αρχικών αφίξεων του ήχου (50ms) και της ενέργειας που φτάνει μετά.

$$C50 = 10 \log\left(\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}\right) \text{ dB}$$



Ο δείκτης αυτός για την ομιλία έχει αποδεκτές τιμές μεγαλύτερες των -3dB.

Η διαύγεια είναι πολύ σημαντική καθώς ορίζει πόσο καθυστερημένα έρχεται ο ήχος από της ανακλάσεις και αναμγνύεται με τον απευθείας ήχο.

#### 6. RASTI (Rapid Speech Transmission Index) – STI (Speech Transmission Index).

Είναι μέθοδος που αξιολογεί την κατανόηση των συλλαβών. Η μέγιστη πιθανή τιμή που μπορεί να εμφανιστεί είναι 0,96.

Η επιστημονική ανάλυση των μεγεθών αυτών είναι αρκετά πολύπλοκη. Το μέγεθος RASTI αποτελεί βελτίωση του δείκτη STI καθώς είναι πιο γρήγορη μέθοδος. Στην πράξη, τα μεγέθη αυτά ασχολούνται με τα φυσικά χαρακτηριστικά που έχει ένα μέσο διάδοσης (δωμάτιο, ακουστικός ηλεκτρονικός εξοπλισμός, γραμμές τηλεφώνου κ.α) και εκφράζουν την δυνατότητα του μέσου να μεταφέρει ακέραια τα φυσικά χαρακτηριστικά του λόγου.

Η καταληπτότητα της ομιλίας επηρεάζεται από τα εξής χαρακτηριστικά του μέσου:

- την ένταση της ομιλίας.
- την συχνотική απόκριση του μέσου.
- μη-γραμμικές αλλοιώσεις.
- το επίπεδο του θορύβου βάθους.
- τον εξοπλισμό ενίσχυσης του ήχου.
- τον χρόνο αντήχησης – ηχώ.
- ψυχοακουστικοί παράμετροι.

Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει την καθαρότητα των συλλαβών κατά μέτρηση (RA)STI.

(RA)STI	Καταληπτότητα συλλαβών
0 – 0,3	Κακή
0,3 – 0,45	Φτωχή
0,45 – 0,6	Ικανοποιητική
0,6 – 0,75	Καλή
0,75 – 1	Άριστη

Πίνακας 2. 4: Δείκτης (RA)STI

[22]

## 7. Δείκτης ALcons.

Υπολογίζεται από την κρουστική απόκριση του δωματίου μέσω των STI και RASTI. Ο δείκτης αυτός περιγράφει την επί της εκατό απώλεια των συμφώνων και εξαρτάται από το χρόνο αντήχησης, το θόρυβο βάθους και τη σχετική θέση του ομιλητή.

Το μέγεθος αυτό περιγράφεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\%ALcons = 200 * \left[ \frac{d^2 * T60^2}{V * Q} \right]$$

όπου: d: η απόσταση ομιλητή - πηγής.

V: ο όγκος του δωματίου.

Q: η κατεύθυνση της πηγής.

Ο Πίνακας 2.5 παρουσιάζει την καταληπτότητα του λόγου κατά μέτρηση ALcons(%)

ALcons	Καταληπτότητα λόγου
≤ 3%	Ιδανική
= 3 to 8%	Πολύ καλή
= 8 to 11%	Καλή
>11 to 20%	Φτωχή
>20%	Ασήμαντη (limit value 15%)

Πίνακας 2. 5: Δείκτης ALcons

[22]

Όταν ένας χώρος έχει κακή καταληπτότητα δεν είναι δυνατή η κατανόηση του λόγου, δηλαδή ο ακροατής αδύνατη να καταλάβει την ομιλία.

Επειδή στο θέατρο δεν χρησιμοποιείται μόνο ο λόγος αλλά και η μουσική, αναφέρουμε επιγραμματικά τους δείκτες που σχετίζονται αποκλειστικά με την μουσική.

### 2.4.3. Κριτήρια που σχετίζονται μόνο με την ακουστική της μουσικής.

#### 8. Άμεσο ηχητικό επίπεδο C7.

Υπολογίζει την ενέργεια του άμεσου ήχου σε σχέση με την ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων που φτάνουν στη θέση του δέκτη.

Ορίζεται ως:

$$C7 = 10\log\left(\frac{E7}{E_{\infty}-E7}\right)\text{dB}$$

Αυτή η μέτρηση σχετίζεται με την κατεύθυνση και την απόσταση της ηχητικής πηγής.

#### 9. Δείκτης διαύγειας της μουσικής C80.

Εκφράζει την αναλογία της ηχητικής ενέργειας που φθάνει στη θέση του ακροατή, κατά τη διάρκεια των πρώτων 80 ms. Είναι ο λόγος της ενέργειας αυτής, προς την ενέργεια που υπολείπεται.

Ορίζεται ως:

$$C80 = 10\log\left(\frac{E80}{E_{\infty}-E80}\right)\text{dB}$$

Οι Διεθνής αποδεκτές τιμές είναι:

Για θέατρα :  $-1\text{dB} \leq C80 \leq +3\text{dB}$

Για κονσέρτα :  $-1\text{dB} \leq C80 \leq +3\text{dB}$

Για όπερα :  $0\text{dB} \leq C80 \leq +2\text{dB}$

Για λαϊκή μουσική :  $-2\text{dB} \leq C80 \leq +6\text{dB}$

Ο δείκτης αυτός εκφράζει τον βαθμό στον οποίο οι γρήγοροι ξεχωριστοί ήχοι που συνθέτουν μια μελωδία είναι ευδιάκριτοι από τον ακροατή.

#### 10. Δείκτης IACC.

Για τον δείκτη αυτόν χρειαζόμαστε την απόκριση του κρουστικού ηχητικού επιπέδου που αντιλαμβάνεται το κάθε αυτί ξεχωριστά. Μέσω αυτού του δείκτη εκφράζονται δύο μεγέθη. Το μέγεθος  $\rho = (1 - IACC_E)$ , που εκφράζει την διάχυση της ηχητικής πηγής στον χώρο και το μέγεθος  $\varepsilon = (1 - IACC_I)$ , που εκφράζει το κατά πόσο η μουσική "περιβάλλει" τον θεατή-δέκτη.

Ο δείκτης αυτός παίρνει τιμές μεταξύ μηδέν (0) και ένα (1).

#### 11. Δύναμη- Δείκτης ισχύος G.

Η επιρροή του δωματίου στην ηχηρότητα του ήχου στο δωμάτιο αυτό είναι μία ακόμα σημαντική παράμετρος στις ακουστικές μελέτες.

Ο δείκτης ισχύος περιγράφει την αίσθηση της έντασης του ήχου που δημιουργείται στη θέση του ακροατή και αποτελεί παράμετρο υπολογισμού της ηχητικής ενέργειας, που διαδίδεται από την ηχητική πηγή προς τη θέση του ακροατή. Εκφράζει την αναλογία της στάθμης της ηχητικής πίεσης που μετριέται στη θέση του δέκτη, με αυτή που μετριέται σε απόσταση 10m σε ανοιχτό χώρο. Υψηλός δείκτης ισχύος σημαίνει εύκολη μετάδοση του ήχου από την πηγή στον ακροατή.

Το κατώτερο όριο του δείκτη είναι 1dB

[22], [24]

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Ιστορική Αναδρομή

Το θέατρο αποτελούσε πάντα κομμάτι της ζωής του ανθρώπου. Ο σκοπός του θεάτρου είναι να ψυχαγωγεί και να εκπαιδεύει τους θεατές.

Παρόλο που οι διαφορετικές εποχές το αλλάξαν ως προς ύφος και μορφή, η κάθε μια ανάλογα με τις ανάγκες της και με σημαντική παρακμή του κατά τον μεσαίωνα, κατάφερε όχι μόνο να επιβιώσει αλλά και ανθίσει με ταχύς ρυθμούς.

Οι κύριες εποχές που μπορούμε να χωρίσουμε το θέατρο όσον αφορά στην αρχιτεκτονική του είναι οι εξής: η εποχή της αρχαίας Ελλάδας και το Ρωμαϊκό θέατρο, η εποχή του μεσαίωνα, η εποχή της αναγέννησης, η εποχή του 17<sup>ου</sup> και 18<sup>ου</sup> αιώνα, το θέατρο του 19<sup>ου</sup> αιώνα και τέλος το σύγχρονο θέατρο.

Ο κεντρικός στόχος σχεδόν όλων των εποχών όσον αφορά στον θεατρικό σχεδιασμό είναι:

1. Η εξασφάλιση οπτικής και ακουστικής άνεσης.
2. Η κάλυψη χώρων μεγάλου μεγέθους.
3. Ο τεχνολογικός εξοπλισμός της σκηνής.

Θεατρικός χώρος, θεωρείται ο χώρος μέσα στον οποίο εκτυλίσσεται η θεατρική πράξη. Κάθε τέτοιος χώρος μπορεί να περιγραφεί από τρία βασικά χαρακτηριστικά:

A) Ως προς την στέγαση.

- Υπαίθρια θέατρα
- Κλειστά θέατρα

B) Ως προς τη σχέση θεατή-σκηνής:

- μετωπική διάταξη (οι θεατές είναι απέναντι από την σκηνή).
- διάταξη σε σχήμα πετάλου ή Π (οι θεατές βλέπουν από 3 πλευρές).
- αμφιθεατρική διάταξη (θεατές σε ημικύκλιο).
- κυκλική διάταξη (οι θεατές περιβάλλουν τη σκηνή).
- τυχαία διάταξη (οι θεατές είναι διάσπαρτοι στο χώρο, βλέπουν την παράσταση απο διαφορετικές και τυχαίες γωνίες).

Γ) Ως προς το μέγεθος:

- πολύ μεγάλης χωρητικότητας.
- μεγάλης χωρητικότητας.
- μεσαίας χωρητικότητας.
- μικρής χωρητικότητας.

Τέλος στη σύγχρονη εποχή γεννήθηκε το λεγόμενο Πειραματικό θέατρο. Συνήθως είναι πολύ μικροί χώροι με πολυμορφική χρήση, προορισμένοι να στεγάσουν παραγωγές με περιορισμένες τεχνικές απαιτήσεις και πειραματικό περιεχόμενο και απευθύνονται σε μικρό αριθμό κοινού.

### 3.1 Το θέατρο στην Αρχαία Ελλάδα.

Τα πρώτα οργανωμένα θέατρα εμφανίζονται περίπου τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. στην Ελλάδα και είναι υπαίθρια. Τα θέατρα αυτά αποτελούνται από τρία μέρη, το κοίλον, την ορχήστρα και την σκηνή. Τα μέρη αυτά απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα, Εικόνα 3.1. Το κοίλον έχει αμφιθεατρική ημικυκλική κάτοψη, η οποία χωρίζεται από διαζώματα, οριζόντιους διαδρόμους και κάθετες παρόδους. Το κοίλον αποτελούσε τον κύριο όγκο του θεάτρου και στέγαζε τους θεατές, αριθμός ο οποίος ποίκιλλε ανάλογα το θέατρο. Τα μεγαλύτερα θέατρα μπορούσαν να στεγάσουν μέχρι και 2.500 θεατές.

Στο κέντρο αυτού του αμφιθεάτρου βρίσκεται η ορχήστρα, το σχήμα της οποίας είναι μια κυκλική πλατεία. Στο μέρος αυτό βρισκόταν η ορχήστρα - χορός καθώς και ο βωμός στον οποίο γινόντουσαν θυσίες και τελετουργίες.

Πίσω από την ορχήστρα υπάρχει η σκηνή. Η σκηνή είναι ένα ορθογώνιο χαμηλό κτίριο, το οποίο στο εσωτερικό του αποτελούσε τα παρασκήνια όπου άλλαζαν ρούχα οι ηθοποιοί και αποθήκευαν τα σκηνικά. Αρχικά το ορθογώνιο αυτό κτίσμα λειτουργούσε μόνο ως παρασκήνιο, καθώς στα πρώιμα έργα δεν υπήρχε η ανάγκη της σκηνής όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Σε σύντομο χρονικό διάστημα ο Αισχύλος αυξάνοντας τον αριθμό των ηθοποιών, επέβαλε την δημιουργία μιας υπερυψωμένης σκηνής πάνω στην οποία θα διαδραματιζόταν η τραγική πράξη. Έτσι λοιπόν η σκηνή μεταφέρθηκε πάνω σ αυτό το κτίσμα, αφήνοντας το χώρο μπροστά ως προσκήνιο στο οποίο εκτυλίσσονταν παράλληλες πράξεις. Το μέγεθος και η μορφή της σκηνής διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του θεάτρου και την τοποθεσία του.



Εικόνα 3. 1: Τα μέρη του Αρχαίου Θεάτρου

Στα πρώιμα χρόνια τα θέατρα αυτά ήταν ξύλινα και σε ξέφωτα. Η ανάγκη όμως για κάτι πιο ασφαλές και σταθερό οδήγησε στην κατασκευή των θεάτρων από πέτρα και μάρμαρο, όπως τα γνωρίζουμε σήμερα. Επίσης η τοποθεσία άλλαξε καθώς προτιμήθηκαν κεκλιμένα επίπεδα, τα οποία έκαναν εύκολη την ανοικοδόμηση του κοίλου αμφιθεάτρου από πέτρα. Σε πολλά θέατρα βέβαια, όπως στο θέατρο των Δελφών, έγιναν επιπλέον επιχωματώσεις ώστε να δημιουργηθεί το υπόβαθρο που χρειαζόταν.

Η ορχήστρα αποτελούταν από χώμα ή μάρμαρο. Τέλος, η σκηνή άλλοτε πέτρινη άλλοτε ελαφρύ ξύλινο κατασκευάσμα, αποτελούσε το φόντο σε κάθε σκηνική και θεατρική δράση. Το προσκήνιο με την σειρά του ήταν ξύλινη και μάλλον πτυσσόμενη κατασκευή.

### Ακουστική

Η ακουστική των Αρχαίων θεάτρων είναι αξιοθαύμαστη. Παρά το μέγεθος τους τα θέατρα αυτά κατένειμαν τον ήχο πολύ καλά σε όλο τον όγκο τους.

Η ακουστική αυτή άνεση, οφείλεται σε διάφορες κατασκευαστικές επιλογές. Κατ' αρχάς η επιλογή της τοποθεσίας ήταν πρωταρχική. Η επιλογή των επικλινών επιπέδων εκμεταλλευόταν την αντηχητικότητα των βουνών, τα οποία λειτουργούσαν όπως λειτουργούν οι τοίχοι και η οροφή εγκλωβίζοντας την ενέργεια στον συγκεκριμένο χώρο με αποτέλεσμα την καλύτερη ακουστικότητα και την αύξηση της έντασης του ήχου.

Επιπλέον το σχήμα του θεάτρου ήταν πολύ σημαντικό. Είχε παρατηρηθεί ότι όταν ο ήχος δε μεταδίδεται κατευθείαν προς το αυτί, τότε δεν ακούγεται καθαρά. Αυτό συνέβαλε στην απόφαση τα θέατρα να έχουν αμφιθεατρική και ανυψωτική μορφή, έτσι ο θεατής μπορούσε να ακούει άμεσα τον ήχο και ταυτόχρονα περισσότεροι θεατές μπορούσαν να παρακολουθήσουν το δρώμενο. Πιο συγκεκριμένα όταν ο ηθοποιός βρισκόταν στο μπροστά μέρος της σκηνής, στους θεατές έφτανε ο απ'ευθείας ήχος. Όταν ο ηθοποιός βρισκόταν στο μέσο της σκηνής εκτός από τον απ'ευθείας ήχο προστίθεται ο καθυστερημένος, ανακλώμενος στην ορχήστρα ήχος. Τέλος όταν ο ηθοποιός βρισκόταν στο πίσω μέρος της σκηνής, τότε είχαμε τον απ'ευθείας ήχο, τις ανακλάσεις από την ορχήστρα και τις ανακλάσεις στην ίδια τη σκηνή, κάνοντας τελικά τον ήχο πιο πλούσιο και πιο δυνατό. Οι ανακλάσεις αυτές φαίνονται στην Εικόνα 4.

Τέλος η χρήση μικροφώνων και ηχείων ήταν απαραίτητη για την αναμετάδοση του ήχου στα υψηλότερα διαζώματα.

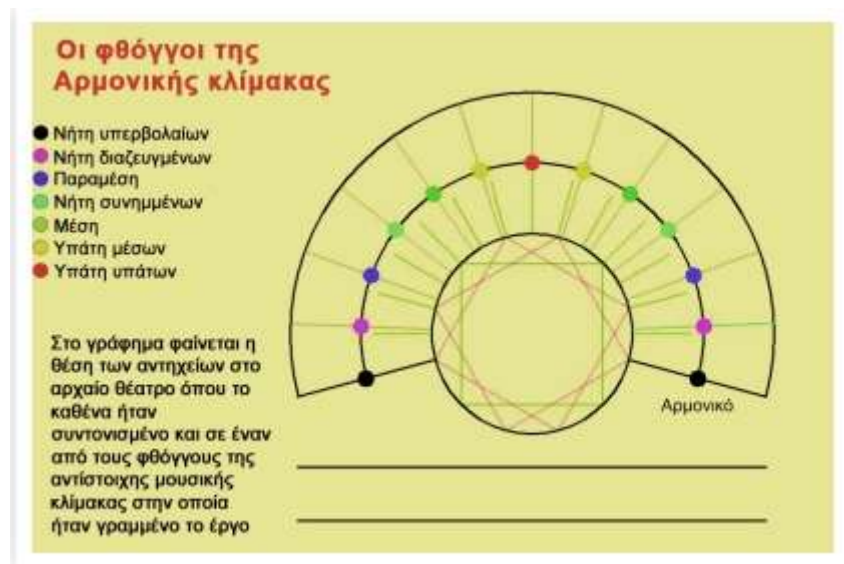
Σαν ηχεία χρησιμοποιούντο μπρούτζινα και χάλκινα ή κεραμικά και πήλινα αντηχητικά αγγεία. Τα μπρούτζινα αγγεία ενίσχυαν τον ήχο ενώ τα κεραμικά λειτουργούσαν σαν απορροφητικά ή διαχυτικά χωρίς να ενισχύουν τον ήχο.

[26]

Τα αντηχεία αυτά βρίσκονταν κάτω από ειδικές κόγχες στις σκάλες του κοίλου σύμφωνα με τη χρυσή τομή φ, διαιρεμένα σύμφωνα με την αντηχητική ικανότητα του καθενός στις διάφορες νότες. Έτσι οι φωνές των ηθοποιών όταν ήταν στον κατάλληλο τόνο (κεντρική συχνότητα), το αντίστοιχο αγγείο αντηχούσε και προκαλούσε την ενίσχυση. Έτσι η φωνή γινόταν πιο δυνατή και επιβλητική. Μελέτες έδειξαν ενίσχυση της τάξης των 12-15 dB σε ανοικτούς χώρους.

Οι θέσεις όπως και τα υλικά των ηχείων αυτών προσδιορίστηκαν ακριβέστατα από τον Αριστόξενο και τα αναφέρει αναλυτικά ο Βιτρούβιος στις περιγραφές του.

Οι θέσεις αυτές φαίνονται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3. 2: Αναπαράσταση του μουσικού διαγράμματος του Αριστόξενου για την θέση των αντηχούντων αγγείων με βάση την περιγραφή του Βιτρούβιου.

[25]

Ως μικρόφωνα μπορούμε να παρομοιάσουμε τα προσωπεία που φορούσαν οι ηθοποιοί. Τα προσωπεία αυτά λειτουργούσαν ως συγκεντρωτικά και ενισχυτικά της φωνής. Λειτουργούσαν ακριβώς όπως λειτουργούν τα χέρια μας όταν τα κάνουμε χωνί μπροστά από το στόμα μας για να ακουστούμε πιο δυνατά και μακριά.

[27]

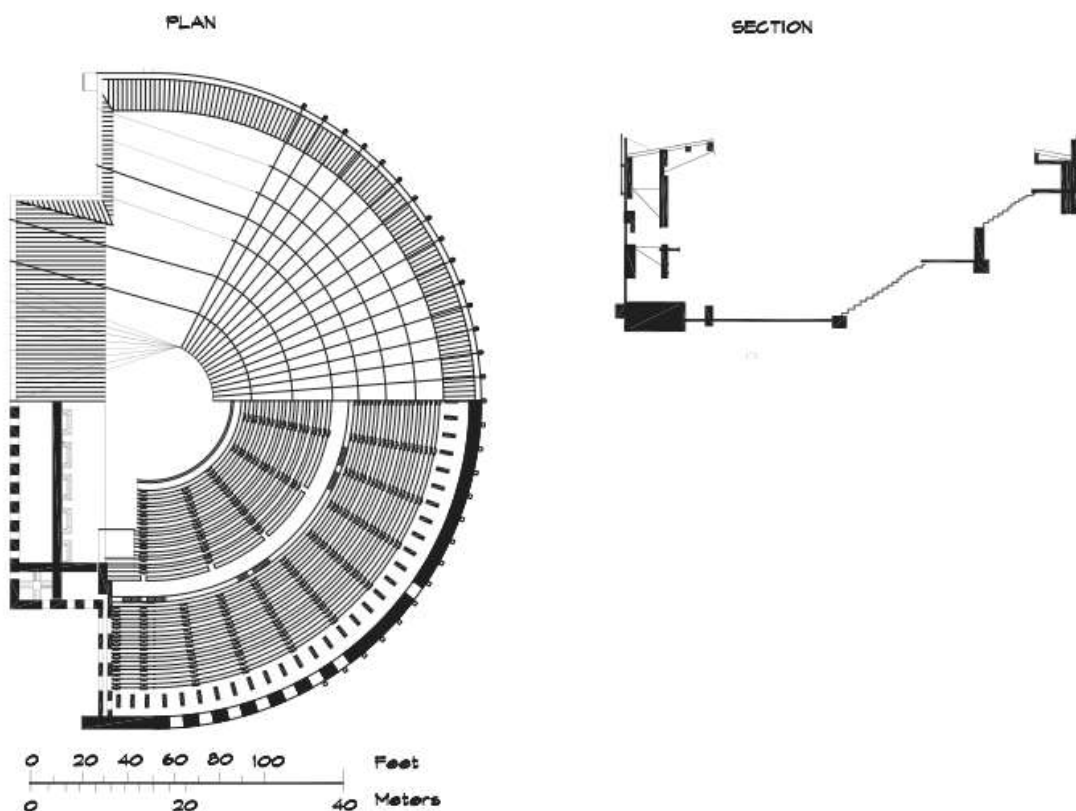


### 3.2 Το θέατρο στην Αρχαία Ρώμη

Τα θέατρα της Ρωμαϊκής εποχής δεν είναι πολύ διαφορετικά από αυτά της αρχαίας Ελλάδας όσον αφορά στην βασική τους αρχιτεκτονική. Οι Ρωμαίοι έχοντας την τεχνολογία μπόρεσαν να κατασκευάσουν τα ογκώδη αυτά θέατρα σε επίπεδα εδάφη, και όχι σε λοφοπλαγιές. Οι Ρωμαίοι αρχιτέκτονες ενώ διατήρησαν την αμφιθεατρική μορφή των θεάτρων, πρόσθεσαν έναν τεράστιο πέτρινο περίφρακτο τοίχο συχνά διακοσμημένο με πολυτέλεια. Σε σύντομο χρονικό διάστημα ο χορός εξαφανίστηκε αφήνοντας το χώρο της ορχήστρας κενό. Τα θέατρα είναι μεγαλύτερα σε όγκο, με πιο απότομη κλίση των θεατών και κατασκευάζονται πια μέσα στις πόλεις.

Τα βασικά μέρη του θεάτρου τώρα είναι, μια υπερυψωμένη σκηνή που πίσω της βρίσκεται ένας διώροφος ή τριώροφος διακοσμημένος τοίχος, ενώ μπροστά της βρίσκονται οι σειρές των θεατών. Η κατασκευή του κοίλου γίνεται με λιθόπλινθους, οπτόπλινθους, λιθοδέματα ή μεικτή κατασκευή.

Επιπλέον για προστασία από την βροχή ή από τον ήλιο στα μικρά θέατρα προστέθηκε ξύλινο στέγαστρο ενώ στα μεγάλα χρησιμοποιούνταν τέντες.



Εικόνα 3. 3: Κάτοψη και πλάγια όψη Ρωμαϊκού Θεάτρου

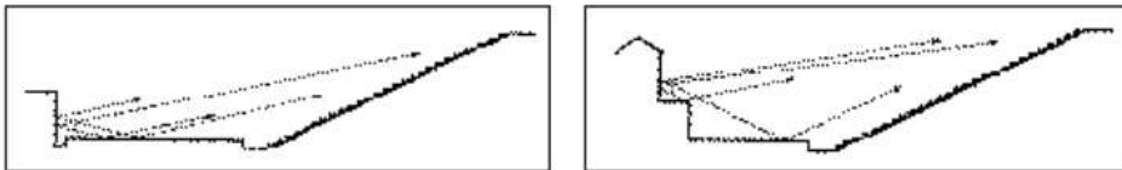
Στην Εικόνα 3.3 απεικονίζεται η κάτοψη και η πλάγια όψη ενός Ρωμαϊκού θεάτρου με στέγαστρα στο πίσω μέρος της σκηνής και στο πίσω μέρος του κοίλου.

### Ακουστική

Η ακουστική των ρωμαϊκών θεάτρων είναι καλύτερη από αυτή των Ελληνικών.

Η υπερύψωση της σκηνής και η μείωση της απόστασής της από τους θεατές βελτίωσε τον άμεσο ήχο, χωρίς να καταργήσει την ανάκλαση από την ορχήστρα και από την σκηνή. Το κοίλο αποκτά μεγαλύτερη κλίση με καλύτερα ακουστικά και οπτικά αποτελέσματα. Επιπλέον έχουμε την μετάβαση από το υπαίθριο στο ημιυπαίθριο θέατρο καθώς ο τοίχος πίσω από το κοίλο και το ύψος του τοίχου πίσω από τη σκηνή, καθώς επίσης και τα στέγαστρα-τέντες δημιουργούν την αίσθηση του κλειστού χώρου. Επιπλέον έχουμε την δημιουργία των πρώτων ανακλαστήρων, καθώς προστίθεται στέγαστρο με κατάλληλη κλίση πίσω από τη σκηνή. Η κύρια λειτουργία αυτού του κλείστρου-στεγάστρου ήταν η απομόνωση του θεάτρου από τους εξωτερικούς ήχους.

Οι διαφορές των δύο αυτών θεατρικών κατασκευών απεικονίζονται στην Εικόνα 3.4.



*Το ρωμαϊκό θέατρο ανέβασε τον ηθοποιό υψηλότερα, στο λογείο. Αυτό βελτίωσε τόσο τον άμεσο ήχο, όσο και την ανάκλασή του από την ορχήστρα, χωρίς να καταργήσει ούτε την πίσω ούτε τη διπλή ανάκλαση. Αριστερά, ο ήχος από τον ηθοποιό στη σκηνή του ελληνικού θεάτρου, δεξιά από τον ηθοποιό στο λογείο του ρωμαϊκού. (Σκίτσα Ε. Τζεκάκη)*

Εικόνα 3. 4: Αντήχηση του ήχου από τον ηθοποιό στα Ελληνικά θέατρα(αριστερά) σε σχέση με τα Ρωμαϊκά (δεξιά)

[29]

### 3.3 Το θέατρο στο Μεσαίωνα.

Κατά την περίοδο αυτή τα θέατρα εγκαταλείπονται και η θεατρική πράξη λάμβανε χώρα στις εκκλησίες ή στις αυλές αυτών, οι ηθοποιοί ήταν ιερείς και η θεματολογία κινούνταν γύρω από θρησκευτικά θέματα.

Με το πέρασμα του χρόνου όμως, το θέατρο ξέφυγε από τα στενά όρια της εκκλησίας και εμφανίστηκαν καινούριοι ηθοποιοί οι οποίοι ήταν πλανόδιοι και περιφερόντουσαν ανά της χώρες με σκηνές - άμαξες ενώ προς το τέλος της εποχής, πριν ξεκινήσει η αναγέννηση άρχισαν οι πρώτες προσπάθειες επιστροφής στα θέατρα που είχαν απομείνει από την Ελληνιστική και Ρωμαϊκή εποχή.

### 3.4 Το θέατρο στην Αναγέννηση.

Κατά την περίοδο της Αναγέννησης κατασκευάζονται νέα θέατρα τα οποία ακολουθούν την Ρωμαϊκή και αρχαιοελληνική θεατρική αρχιτεκτονική, επηρεασμένα ανάλογα από τις ανάγκες της εποχής. Τότε δημιουργείται και το ιταλικό θέατρο το οποίο έθεσε τις βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής των θεάτρων του δυτικού κόσμου που ακολουθούνται μέχρι και σήμερα.

Η βασική διάταξη των θεάτρων, την περίοδο της Αναγέννησης, είναι το κοίλο των αρχαίων χρόνων σε συνδυασμό με την μετωπική σκηνή του μεσαίωνα. Είχε πλέον ανοίξει ο δρόμος για τα κλειστά θέατρα και τα ζωγραφισμένα προοπτικά σκηνικά.

Η αρχιτεκτονική των αναγεννησιακών θεάτρων στηρίζεται στις βασικές αρχές που έθεσε ο Ιταλός αρχιτέκτονας Sebastian Serlio.

Οι θέσεις αυτές είναι οι εξής:

1. Μετωπική σχέση σκηνής-αμφιθεάτρου, σε κλειστό και παραλληλόγραμμο σχήμα χώρου. Οι θέσεις των θεατών διατάσσονται ημικυκλικά όπως στα αρχαία θέατρα.
2. Συνδυασμός ρωμαϊκού προσκηνίου με αναγεννησιακή σκηνογραφία. Η σκηνή διαμορφώνεται από μια χαμηλή και στενή πλατφόρμα προσκηνίου, ένα επικλινές επίπεδο με πλευρικά σκηνικά και σκηνογραφημένο βάθος
3. Εφαρμογή της προοπτικής απεικόνισης. Καθιέρωσε τρεις ζωγραφισμένες σκηνές, μία για κάθε είδος (τραγωδία, κωμωδία και σατυρικό δράμα).

Στην Ιταλία κυριαρχούν τα ξύλινα αυλικά θέατρα με κινητές και προοπτικά ζωγραφισμένες κουίντες, με πολλά σκηνικά ενώ το νέο που προστίθεται είναι η αψίδα στο προσκήνιο.

Οι αρχές αυτές του Serlio επιστρέφουν την αρχιτεκτονική του θεάτρου στην παλιά του μορφή της καλής ακουστικής και οπτικής. Με την προσθήκη όμως των ογκωδών σκηνικών δημιουργούνται λειτουργικά προβλήματα στην αναγεννησιακή σκηνή. Ουσιαστικά ο χώρος που μπορούσαν να παίζουν οι ηθοποιοί περιορίζεται στο προσκήνιο, διαφορετικά με την μετακίνησή τους θα διαταράσσονταν οι αναλογίες της προοπτικής απόδοσης και η ψευδαίσθηση της τρισδιάστατης αναπαράστασης θα χανόταν.

### 3.5 Το θέατρο του 17<sup>ου</sup> και 18<sup>ου</sup> αιώνα.

Οι δυο αυτοί αιώνες είναι ίσως οι σημαντικότερες εποχές στην αρχιτεκτονική του θεάτρου. Οι βασικές διαφορές των θεάτρων αυτών από αυτά της αναγέννησης είναι τα εξής:

- Αντί του αμφιθεάτρου με τους ενα- δυο εξώστες έχουμε πλέον τρεις και τέσσερις σειρές θεωρίων.
- Η άλλοτε άδεια πλατεία γεμίζει όρθιους θεατές ή καθισμένους σε εδώλια
- Η ορχήστρα καταλαμβάνει το χώρο που παλιότερα ένωνε τη σκηνή με την πλατεία.

Τα μέρη του θεάτρου πλέον, είναι η σκηνή με μεγάλο βάθος, το προσκήνιο με αψίδα και την ορχήστρα μπροστά της και απέναντι σε πεταλοτό σχήμα βρίσκεται η πλατεία με τους εξώστες και τα θεωρεία.

Η ακουστική των κτηρίων αυτών είναι προσεγγισμένη αφού το είδος που κυριαρχεί στην Ιταλία αυτήν την περίοδο είναι η όπερα.

Δυστυχώς αυτός ο τρόπος κατασκευής προκάλεσε προβλήματα στην ορατότητα η οποία δεν ήταν ιδανική από όλες τις θέσεις του θεάτρου. Την καλή ορατότητα προσπάθησαν να επαναφέρουν οι Γάλλοι αρχιτέκτονες τον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Αν και κράτησαν το ιταλικό πρότυπο, επανέφεραν το κυκλικό σχήμα, με ανοιχτή και ποικίλη διάταξη του κοινού (πλατεία, θεωρεία, αμφιθεατρικοί εξώστες).

### 17<sup>ος</sup> αιώνας.

Τον αιώνα αυτό τα θέατρα έχουν σχήμα σφενδόνης. Η πλατεία των θεατών είναι σε πεταλόμορφο σχήμα ενώ με τους πολλαπλούς εξώστες δημιουργείται μεγάλη υψομετρική διαφορά από το επίπεδο της σκηνής. Κάποιοι από αυτούς τους εξώστες επειδή βρίσκονταν στο χώρο του προσκήνιου η οπτική τους γωνία παραμορφωνόταν.

Μπορεί οι εξώστες, τα θεωρεία και τα ανεξάρτητα διαμερίσματα γύρω από την πλατεία να μειονεκτούσαν από πλευράς ακουστικής και ορατότητας, εξυπηρετούσαν όμως τον διαχωρισμό των τάξεων και την ανάδειξη του πλούτου.

Βέβαια με την πάροδο του χρόνου άρχισε να εγκαταλείπεται το σχήμα αυτό της σφενδόνης λόγω της μειονεκτικής προσέγγισης του προοπτικού θεάματος.

### 18<sup>ος</sup> αιώνας.

Τον αιώνα αυτό οριστικοποιείται η μορφή των θεάτρων. Στην Ιταλία καθιερώθηκε το τυπικό κτήριο μορφής πετάλου (Σκάλα του Μιλάνου) και οι διάφορες παραλλαγές του όπως το σχήμα κώδωνος (της Νάπολης), το ελλειπτικό (Τορίνο) και το ωοειδές (Ιμόλα).

Η υπόλοιπη Ευρώπη ακολούθησε την ίδια θεατρική αρχιτεκτονική με κάποιες αποκλίσεις είτε στην σχέση σκηνής-θεατών είτε στον τρόπο επίτευξης καλής οπτικοακουστικής άνεσης. Πολλά Ευρωπαϊκά θέατρα κατήργησαν το τοξωτό προσκήνιο, επέκτειναν τη σκηνή στο χώρο των θεατών και το σχήμα της πλατείας γίνεται πιο καμπυλωτό.

## 3.6 Το θέατρο του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Ο αιώνας αυτός δεν έχει να αναδείξει αλλαγές στο αρχιτεκτονικό κομμάτι του θεάτρου. Αυτό που αλλάζει δραματικά είναι η σκηνογραφία και οι σκηνικές υποδομές, ενώ

καθοριστική είναι η είσοδος του ηλεκτρισμού, ο οποίος δίνει νέες δυνατότητες στην απεικόνιση μιας παράστασης.

Κατά το τέλος του αιώνα αυτού, αλλά κυρίως τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, το θέατρο άρχισε και πάλι να αποκτά κάποια κινητικότητα. Εμφανίστηκαν καινούρια θεατρικά ρεύματα τα οποία προσπάθησαν να θέσουν σε άλλη βάση τη σχέση θεατή-ηθοποιού. Αυτό με τη σειρά του δημιούργησε την ανάγκη καινούργιων διαφορετικών αρχιτεκτονικά θεατρικών χώρων. Το εμπορικό θέατρο συνέχισε να διατηρεί την παλαιά ασφαλή αρχιτεκτονική του ενώ τα νέα ρεύματα στράφηκαν στην διαμόρφωση πρόχειρων εγκαταστάσεων, μικρής κλίμακας και την αξιοποίηση παραμελημένων αιθουσών.

### 3.7 Το Σύγχρονο Θέατρο.

Κατά τον αιώνα αυτόν, τα νέα ρεύματα του προηγούμενου αιώνα, αποκτούν στέγαση. Τα βασικά λοιπόν ερωτήματα που τίθενται κατά την ανοικοδόμηση των θεάτρων είναι:

1. Το μέγεθος του θεάτρου.

Πλέον βασικό συστατικό μιας παράστασης είναι ο λόγος και η σκηνική πράξη χωρίς να απαιτούνται πολλά σκηνικά ή μεγάλος θίασος. Αυτό οδήγησε στην κατασκευή μικρότερων και περισσότερων θεάτρων.

2. Η λειτουργικότητα και η ευελιξία της σκηνής.

Λόγο του ανταγωνισμού και της αύξησης των θεατρικών παραστάσεων γεννήθηκε η ανάγκη για πολυσύνθετες απαιτήσεις ως προς το μέγεθος, τη μορφή και τις εγκαταστάσεις της σκηνής. Η σκηνή πρέπει να είναι μια ευέλικτη κινητή πλατφόρμα που μπορεί να φιλοξενήσει και να ικανοποιήσει τις διακεκριμένες ανάγκες είτε μιας μεγάλης είτε μιας περιορισμένης σκηνικής παράστασης.

3. Η λειτουργικότητα και ευελιξία των θέσεων των θεατών.

Πλέον η διάταξη των θέσεων ως προς την σκηνή μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις αναπαραστατικές απαιτήσεις κάθε παράστασης (προσκήνιο ή εκτεταμένη πλατφόρμα σκηνής, σε μετωπική ή πολύπλευρη σχέση με τους θεατές).

Βέβαια η πολυμορφικότητα του κάθε θεάτρου, όσον αφορά στην σκηνή και τις θέσεις των θεατών, είναι επιπρόσθετη και προαιρετική και εξαρτάται από την οικονομική αυτοδυναμία του ίδιου του θεάτρου.

Σήμερα τα θέατρα διακρίνονται σε 4 μορφές:

1. Το θέατρο προσκήνιου: Αποτελεί εξελιγμένη εκδοχή της αναγεννησιακής σκηνής με τεχνολογικά σύγχρονη υποδομή και εξοπλισμό.
2. Το θέατρο ανοικτής σκηνής: Αποτελεί τη σύγχρονη εκδοχή των αρχαίων θεάτρων, με αμφιθεατρική διάταξη καθισμάτων, που περιβάλλει κατά τα  $\frac{3}{4}$  τη σκηνή. Ο πίσω τοίχος διευκολύνει τις μετακινήσεις των ηθοποιών και διαχωρίζει το θεατρικό χώρο από τα παρασκήνια.
3. Το κυκλικό θέατρο: Αποτελεί μια παραπλήσια διαμόρφωση με το θέατρο ανοικτής σκηνής, με τους θεατές σε αυτή την περίπτωση σε ανάπτυγμα αρένας να περιβάλλουν τα δρώμενα από όλες τις πλευρές. Δεν υφίσταται η τυπική διαμόρφωση σκηνής και δε χρησιμοποιείται κάποια σκηνογραφική αναπαράσταση.
4. Το προσαρμοσμένο ή πειραματικό θέατρο: Αποτελεί την πλέον σύνθετη και τεχνολογικά εξελιγμένη εκδοχή του θεατρικού χώρου, ικανή να συνδυάζει τη διαμόρφωση όλων των παραπάνω μορφών (προσκήνιο, ανοικτή σκηνή, εκτεταμένο προσκήνιο με σκηνή, αρένα) και εξυπηρετεί διαφορετικές σκηνικές ανάγκες ανάλογα την παράσταση (θέατρο, χορό, χοροθέατρο, όπερα, συναυλίες).

Παρά τον πειραματισμό και την ανάγκη για έναν εναλλασσόμενο πολυχώρο, η κλασική διαμόρφωση της σκηνής με προσκήνιο, σε μετωπική αντιπαράθεση με τους θεατές, αποτελεί την δημοφιλέστερη και πιο οικία μορφή θεατρικού χώρου, προορισμένη να εξυπηρετεί την θεατρική ψευδαίσθηση.

[28]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

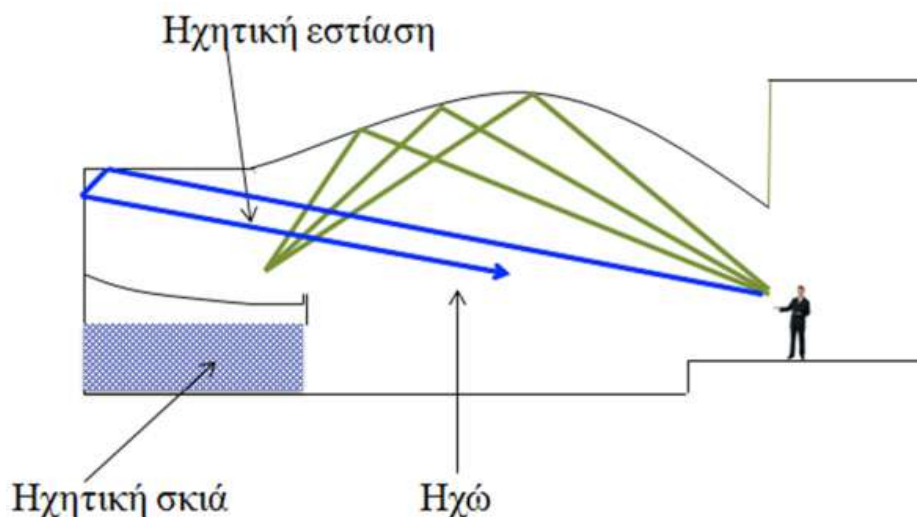
### Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός

Συνήθως ένας προσεκτικά σχεδιασμένος χώρος για μουσική είναι ακατάλληλος για ομιλία και αντίστροφα. Σε δωμάτια που προορίζονται για ομιλία, για να έχουμε καλή κατανόηση του λόγου (intelligibility) ο όγκος του δωματίου και ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι μικροί. Παράλληλα οι πρώτες ανακλάσεις στο χώρο αυτό πρέπει να προέρχονται από το ταβάνι ενώ η ανάγκη για διαχυτικά είναι μικρή. Αντιθέτως, τα δωμάτια που προορίζονται για μουσική, χωρίς ηλεκτροακουστικά μέσα, πρέπει να έχουν μεγάλο χρόνο αντήχησης, μεγάλο όγκο, πλευρικές ανακλάσεις από τους τοίχους και μεγάλη διάχυση στο χώρο. Συνεπώς χώροι προορισμένοι και για τα δύο, ομιλία και μουσική, πρέπει να συμβιβάσουν τις δυο αυτές ανάγκες αναλόγως. Τέτοιοι χώροι είναι τα θέατρα, οι εκκλησίες και τα αμφιθέατρα.

Οι γενικές αρχές που ακολουθούνται σε τέτοιου είδους χώρους είναι οι εξής:

1. Η σκηνή πρέπει να είναι ανυψωμένη, ώστε η θέαση να είναι άνετη χωρίς εμπόδια.
2. Το ηχοσύστημα θα πρέπει να καλύπτει όλο το συχνοτικό εύρος, ενώ η ένταση των ηχείων δε θα πρέπει να καλύπτει τη φωνή του ομιλητή.
3. Όταν υπάρχει μη ενισχυμένη μουσική ο τραγουδιστής ή οι μουσικοί θα πρέπει να υποβοηθούνται από ανακλαστές που βρίσκονται κοντά στη σκηνή και αντανακλούν από τους τοίχους και το ταβάνι.
4. Το επίπεδο των καθισμάτων θα πρέπει να έχει τέτοια κλίση ώστε να προσφέρει άμεση οπτική επαφή της σκηνής από οποιαδήποτε σειρά καθισμάτων.
5. Τα καθίσματα θα πρέπει να έχουν τέτοια επένδυση, ώστε η ακουστική ποιότητα του χώρου να μην διαφέρει πολύ, όταν αυτός είναι άδειος ή γεμάτος. Ο χρόνος αντήχησης θα πρέπει να είναι κατάλληλος ανάλογα τον όγκο της αίθουσας και το είδος των παραστάσεων.
6. Η ένταση του θορύβου βάθους θα πρέπει να είναι μικρότερη από κάποιο συγκεκριμένο όριο ανάλογα τον αριθμό των θέσεων και τον όγκο της αίθουσας.

Τα ακουστικά λάθη που συναντώνται πιο συχνά σε μία αίθουσα φαίνονται στην Εικόνα 4.1 παρακάτω:



Εικόνα 4. 1: Ακουστικά αρχιτεκτονικά λάθη σε μια αίθουσα.

[20]

- **Ηχητική εστίαση (sound focusing):** Είναι η περιοχή ενός χώρου όπου ήχος συγκεντώνεται.
- **Ηχητική σκίαση ( acoustic shadow/ sound shadow):** Είναι η περιοχή ενός χώρου που ο ήχος αποτυγχάνει να διαδοθεί για οποιαδήποτε λόγο.
- **Ηχώ (Echo):** Ονομάζουμε το φαινόμενο της ανάκλασης όπου ο ανακλώμενος ήχος είναι πιο έντονος ακουστικά από τον απ'ευθείας ήχο με αποτέλεσμα να ακούγεται σαν ξεχωριστό γεγονός (π.χ. επανάληψη του αρχικού ήχου). Παρ' όλην την συμβολή της ανάκλασης στην καλή ακουστική ενός θεάτρου, αν ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ μεγάλος προκαλεί σύγχυση και δυσφορία στον ακροατή.

Ο Haas μελέτησε τα όρια στα οποία το φαινόμενο της ανάκλασης είναι ανεκτά και πότε προκαλείται ηχώ.

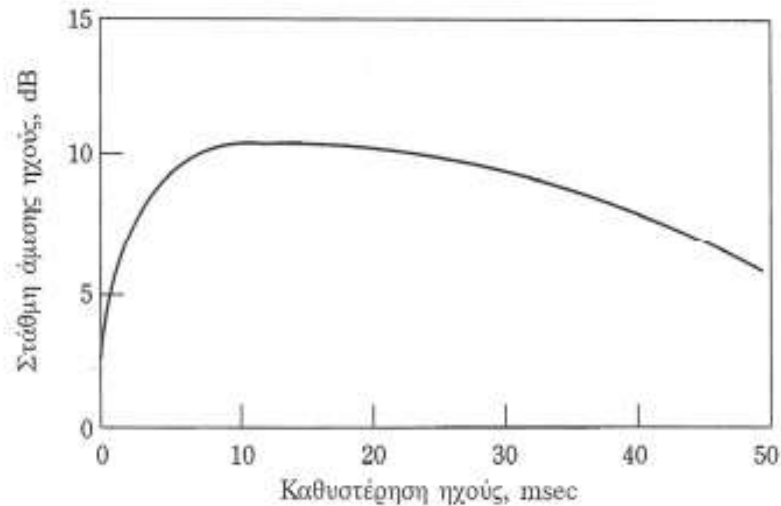
Το φαινόμενο της ηχούς φαίνεται να εξαφανίζεται όταν ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ ανακλάσεων και απ'ευθείας ήχου μειώνεται. Βέβαια η ηχώ εκτός από το χρόνο καθυστέρησης, χρόνος αντήχησης, εξαρτάται επίσης από την ένταση, την κατεύθυνση του ήχου και βέβαια από την ύπαρξη απορροφητικών ή ανακλαστικών επιφανειών.

Τα πειράματα του Haas έδειξαν ότι για χρόνο καθυστέρησης μεταξύ 5 και 35 ms και ανακλώμενο ήχο μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερο σε ένταση από τον απ' ευθείας ήχο, ο ακροατής αντιλαμβάνεται έναν μόνο ήχο. Για καθυστέρηση μεγαλύτερη των 50ms για ομιλία και 100ms για μουσική, ο ακροατής μπορεί να αντιληφθεί τον απ' ευθείας ήχο και τον ανακλώμενο ως δύο διαφορετικά συμβάντα.



Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Haas ή φαινόμενο προβαδίσματος, λαμβάνεται υπ' όψιν στο σχεδιασμό κλειστών χώρων και έχει εφαρμογές κατά την χρήση ενισχυτικών ηχητικών μέσων.

Στην Εικόνα 4.2 παρακάτω, απεικονίζεται η σχέση χρόνου αντήχησης και έντασης ηχούς όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 4. 2: Φαινόμενο Haas (προβαδίσματος) στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα.

[11]

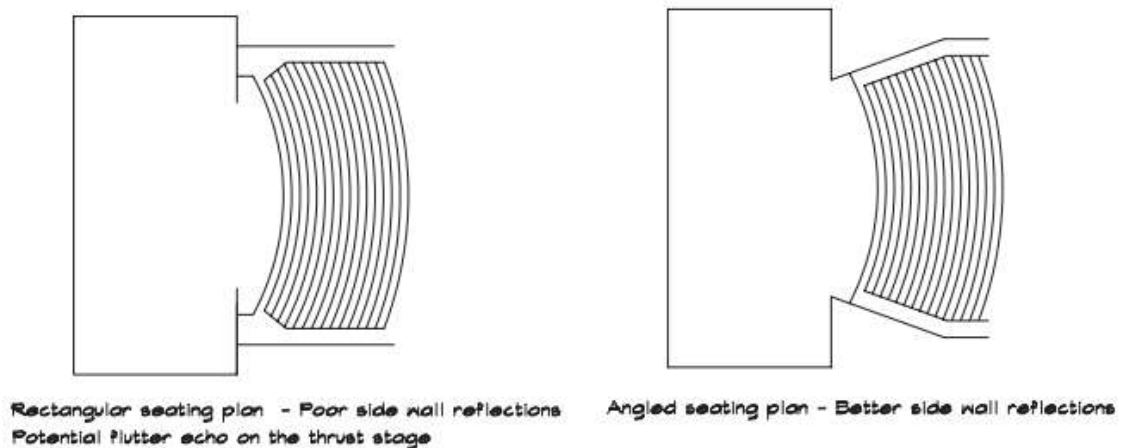
Παράμετροι ακουστικού σχεδιασμού μιας αίθουσας.

*Σχήμα αίθουσας.*

Συνήθως μια αίθουσα σχεδιάζεται ανάλογα με τον τρόπο χρήσης της. Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει τον αριθμό των θέσεων, τις γραμμές θέασης, τον κλιματισμό και την αισθητική. Σε δωμάτια προορισμένα για ομιλία είναι καλό οι θεατές να κάθονται κοντά στον ομιλητή. Έτσι τα δωμάτια σε σχήμα βεντάλιας με μπαλκόνια επιτρέπουν σε μεγαλύτερο αριθμό θεατών να είναι κοντά στη σκηνή, σε σύγκριση με ένα ορθογώνιο δωμάτιο. Τα ορθογώνια δωμάτια προτιμώνται σε χώρους προορισμένους για μουσική, με υψηλή οροφή για καλύτερα αποτελέσματα.

Οι μικροί χώροι γενικής χρήσης έχουν συνήθως ορθογώνιο σχήμα με τους τοίχους μπροστά από την σκηνή σε κλίση. Για δωμάτια προορισμένα μόνο για ομιλία η κλίση δε πρέπει να ξεπερνά τις  $140^\circ$ , ενώ για χώρους με πολλαπλές χρήσεις η κλίση είναι μεταξύ των  $40^\circ$  και  $80^\circ$ , με τις μικρότερες τιμές να είναι καλύτερες για μουσική.

Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται αυτή η κλίση των τοίχων μπροστά από το προσκήνιο.



Εικόνα 4. 3: Σχεδιασμός τοίχων προσκηνίου.

[28]

Οι πλαϊνοί τοίχοι είναι είτε παράλληλοι είτε με μια μικρή κλίση προς τη σκηνή. Αυτή η διάταξη προσφέρει χρήσιμες πρώτες ανακλάσεις από τους τοίχους κοντά στην σκηνή, ενώ επιτρέπει διαδρόμους και μεγάλο άνοιγμα για καθίσματα στο πίσω μέρος.

Στα μεγάλα θέατρα είναι δύσκολο να επιτευχθεί η καλή οπτική για όλες τις θέσεις. Το σχήμα βεντάλιας είναι η συνήθης επιλογή με ένα ή περισσότερα μπαλκόνια ώστε περισσότερος κόσμος να βρίσκεται κοντά στη σκηνή.

Το πιο μακρινό κάθισμα δε μπορεί να τοποθετηθεί μακρύτερα από τα 24,4 μέτρα. Πέραν αυτής της απόστασης το μάτι παύει να ξεχωρίζει αντικείμενα και συνεπώς η οπτική άνεση του θεατή χάνεται.

### *Καθίσματα.*

Η τοπογραφική θέση του κτηρίου και οι νομοθετικοί κανονισμοί επηρεάζουν την διάταξη των καθισμάτων.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται μερικές ενδεικτικές τιμές του όγκου που καταλαμβάνει μια θέση θεατή ανάλογα με το είδος της αίθουσας. Τα μεγέθη είναι σε κυβικά πόδια ενώ σε παρένθεση έχουμε τα μεγέθη σε κυβικά μέτρα.

Type of Auditorium	Volume per Seat cu ft (cu m)		
	Min	Mid	Max
Rooms for Speech	80 (2.3)	110 (3.1)	150 (4.3)
Concert Halls	220 (6.2)	275 (7.8)	380 (10.8)
Opera Houses	160 (4.5)	200 (5.7)	260 (7.4)
Churches/Synagogues	180 (5.1)	255 (7.2)	320 (9.1)
Multipurpose Auditoriums	180 (5.1)	250 (7.1)	300 (8.5)
Motion-picture Theaters	100 (2.8)	125 (3.5)	180 (5.1)

Πίνακας 4. 1: Όγκος θέσεων ακροατηρίου σε σχέση με την χρήση της αίθουσας.

[28]

### Χρόνος αντήχησης.

Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τον όγκο του δωματίου και από τη χρήση για την οποία προορίζεται. Στο κεφάλαιο 2, στο Σχήμα 16, καταγράφεται η σχέση χρόνου αντήχησης – όγκος δωματίου.

Σε μεγάλα δωμάτια είναι απαραίτητη η χρήση απορροφητικών υλικών ώστε να ελεγχθεί η αντήχηση στη μέση συχνότητα.

Όσο χαμηλότερη συχνότητα έχουμε τόσο μικρότερο χρόνο αντήχησης λαμβάνουμε. Αυτό συμβαίνει λόγω της απορρόφησης από τον αέρα και τα λεπτά απορροφητικά υλικά. Η χρήση ξύλου πάνω από απορροφητικά πάνελ είναι πιθανό να περιορίσει αυτό το φαινόμενο και να αυξήσει το χρόνο αντήχησης του δωματίου στις υψηλές συχνότητες. Αυτό προσφέρει μια ευνοϊκή συχνοτική ισορροπία ενώ η μελέτη απορρόφησης δε παύει να είναι απαραίτητη και στις άλλες συχνότητες.

Στο Σχήμα 16, του κεφαλαίου 2, φαίνονται ενδεικτικές τιμές του χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τον όγκο της αίθουσας μεταξύ των συχνοτήτων 500Hz και 1000Hz.

### Απορρόφηση.

Σε μεγάλα αμφιθέατρα η μεγαλύτερη απορροφητική επιφάνεια είναι το κοινό. Στους συναυλιακούς χώρους το 85% της απορρόφησης ανήκει στους θεατές. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όταν χρησιμοποιούνται απορροφητικά υλικά.

Από τη στιγμή που ο στόχος είναι η διατήρηση μιας ενιαίας ακουστικής συμπεριφοράς ανεξαρτήτου του αριθμού των θεατών. Συνιστάται λοιπόν η χρήση καθισμάτων που η απορροφητική τους ικανότητα είναι ίδια με αυτήν που θα υπήρχε αν στη θέση αυτή καθόταν κάποιος θεατής. Για να επιτευχθεί αυτό η θέση θα πρέπει να έχει χοντρή επένδυση στο κάθισμα και την πλάτη.

Το σημαντικό για τον υπολογισμό της απορροφητικής ικανότητας των θέσεων του κοινού δεν είναι ο αριθμός των θέσεων, αλλά ο όγκος του δωματίου που καλύπτουν. Μ αυτήν την

παραδοχή λοιπόν, ο υπολογισμός της απορρόφησης μπορεί να γίνει με έναν συντελεστή απορρόφησης ανά μονάδα επιφανείας και όχι με τον αριθμό των καθισμάτων.

Εκτός από την απορόφηση υπάρχει μια επιπλέον εξασθένιση του ήχου λόγο απόστασης και τριβών. Αυτή η επιπρόσθετη εξασθένιση εντοπίζεται κυρίως την συχνότητα των 125 Hz.

Όταν η ακουστική ενός δωματίου αυξάνεται από ηλεκτρονικό ηχοσύστημα τότε η επιλογή των απορροφητικών υλικών, το σχήμα της αίθουσας και ο προσανατολισμός των επιφανειών είναι λιγότερο κρίσιμη από ότι σε ένα απλό περιβάλλον. Σ αυτήν την περίπτωση τα απορροφητικά υλικά χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των ανεπιθύμητων ανακλάσεων και αντηχήσεων, αφού το ηχοσύστημα εγγυάται το ηχητικό επίπεδο. Σε χώρους που προορίζονται για μουσική και ομιλία ο καλύτερος σχεδιασμός είναι ο σχεδιασμός για μουσική, ενώ η καθαρότητα του λόγου επιτυγχάνεται με ενισχυτικά μέσα. Αν πρέπει να υποστηριχθεί μη ενισχυμένος λόγος τότε διάφορα απορροφητικά υλικά μπορούν να βοηθήσουν καταλλήλως.

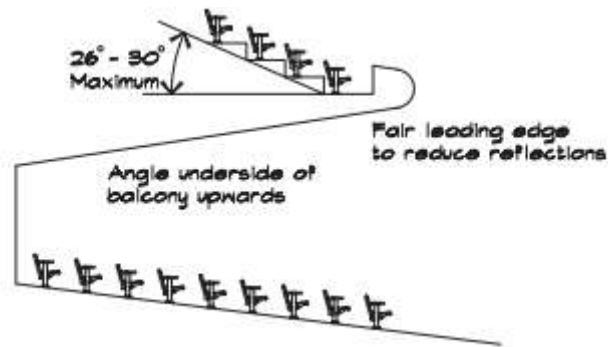
### *Εξώστες.*

Οι εξώστες επιτρέπουν το κοινό να κάθεται πιο κοντά στη σκηνή και περιορίζουν την κλίση της ορχήστρας. Τα μπαλκόνια θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη κλίση από ότι η ορχήστρα. Η κλίση του εξώστη θα πρέπει να είναι μεταξύ  $26^{\circ}$  –  $30^{\circ}$  από το οριζόντιο επίπεδο, ενώ η κορυφή του δε πρέπει να ξεπερνά τα 20 μέτρα ύψος από το επίπεδο της σκηνής, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος ζάλης.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στον σχεδιασμό του εξώστη είναι η απώλεια του αντηχητικού πεδίου στο πίσω κάτω επίπεδο από τον εξώστη.

Οι εξώστες λοιπόν, θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν στον ήχο να κυκλοφορεί στις πίσω θέσεις του κάτω επιπέδου. Σ' αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει η δημιουργία ενός κυρτού ταβανιού κάτω από τον εξώστη, έτσι ο απ' ευθείας ήχος αναμεταδίδεται στις πίσω θέσεις του κάτω επιπέδου. Μία άλλη λύση είναι η δημιουργία μιας ανυψωτικής κλίση στο μπροστά μέρος του εξώστη.

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται ένα σχέδιο εξώστη.

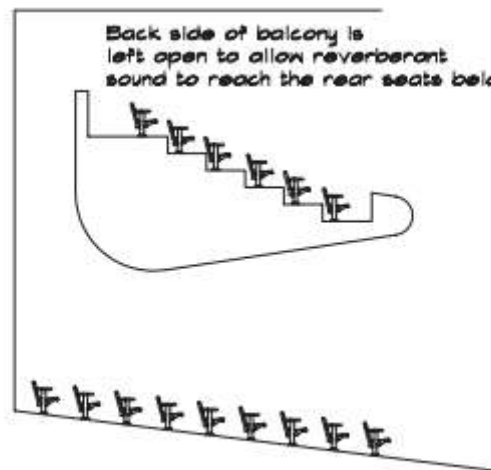


Εικόνα 4. 4: Σχέδιο Μπαλκονιού με ανυψωτική κλίση στο μπροστινό μέρος.

[28]

Στην περίπτωση που ο εξώστης προεξέχει αρκετά τότε καθίσταται δύσκολο για τον απ' ευθείας και αντηχητικό ήχο να διεισδύσουν στα πίσω καθίσματα. Σ' αυτή την περίπτωση μπορούν να τοποθετηθούν μικρόφωνα κάτω από το μπαλκόνι για τον απ' ευθείας ήχο. Επιπλέον με ένα ημικυκλικό κοίλο ταβάνι μπορεί να δημιουργεί το χαμένο αντηχητικό πεδίο.

Πιο σπάνια βλέπουμε τους "ιπτάμενους" εξώστες. Οι εξώστες αυτοί ουσιαστικά είναι αποκομμένοι από τον πίσω τοίχο του δωματίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4. 5: Σχέδιο "ιπτάμενου" εξώστη

[28]

Αυτή η διάταξη επιτρέπει στον ήχο να κινείται από το επάνω μέρος του εξώστη στις τελευταίες θέσεις του κάτω επιπέδου, βέβαια αυτή είναι μια πολυέξοδη λύση καθώς κατασκευαστικά είναι αρκετά απαιτητική.

### *Οροφή.*

Η οροφή είναι ένα από τα πιο απαιτητικά κομμάτια σε ένα θέατρο. Σε χώρους σχεδιασμένους για ομιλία ζητείται εναέρια ανάκλαση πάνω από τον ομιλητή, ώστε ο ήχος να ανακλαστεί προς την περιοχή των θεατών. Από την άλλη για μουσικούς χώρους απαιτείται ταβάνι που διαχέει τον ήχο, ώστε να υπάρχει η αίσθηση ότι ο ήχος περικυκλώνει τους θεατές.

Ένα επίπεδο ταβάνι είναι αρκετό σε αίθουσες προορισμένες για ομιλία, αρκεί το ταβάνι να είναι κοντά στον ομιλητή και επιπλέον το επίπεδο των θεατών να έχει την απαραίτητη κλίση.

### *Ανακλαστήρες*

Η καλή ανακλαστική συμπεριφορά ενός χώρου εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο ανακλάται ο ήχος στους τοίχους και στο ταβάνι. Όταν η αίθουσα προορίζεται για πολλαπλές χρήσεις ή είναι κακώς σχεδιασμένη, η τοποθέτηση ανακλαστήρων στα κατάλληλα σημεία στους πλαϊνούς τοίχους ή και στο ταβάνι είναι χρήσιμη και βελτιώνει την ακουστική του χώρου αυτού.

### **Γενικές προβλέψεις ανάλογα το μέγεθος της αίθουσας.**

Οι γενικοί κανονισμοί που ισχύουν στα θέατρα σύμφωνα με τα Άρθρα 13 έως 15, 20 και 33 του Κεφαλαίου 3 του Διατάγματος είναι οι εξής:

1. Το ελεύθερο ύψος της αίθουσας δε πρέπει να είναι:
  - α) σε κεκλιμένο επίπεδο μικρότερο των 5m από το υψηλότερο σημείο του κεκλιμένου επιπέδου.
  - β) σε οριζόντιο επίπεδο μικρότερο των 5,5m.
2. Για κάθε καθήμενο θεατή θα πρέπει να προβλέπεται επιφάνεια τουλάχιστον 0,45 m<sup>2</sup>, ξεχωριστά από τους διαδρόμους. Σε θεωρεία προβλέπεται επιφάνεια τουλάχιστον 0,80 m<sup>2</sup>, ενώ απαγορεύεται η διαμόρφωση χώρου για όρθιους θεατές εντός της αίθουσας θέασης.
3. Το ελάχιστο ύψος μεταξύ πλατείας-θεωρείου/εξώστη ή θεωρείου/εξώστη-θεωρείου/εξώστη είναι 2,5m.

4. Για λόγους ασφαλείας και καλής οπτικής άνεσης δεν επιτρέπεται η κατασκευή περισσότερων από τρεις σειρές εξωστών και τρεις σειρές θεωρείων. Οι εξώστες δε πρέπει να καλύπτουν περισσότερο από το  $\frac{1}{3}$  του μήκους της πλατείας. Μερικές φορές δίνεται η δυνατότητα κάλυψης του μισού μήκους της πλατείας, με την προϋπόθεση να εξασφαλίζεται η καλή ορατότητα όλων των θεατών, όλων των θέσεων και κυρίως ο καλός εξαερισμός.
5. Το ελεύθερο πλάτος των καθισμάτων δεν πρέπει να είναι μικρότερο των 0,48m. Το ύψος του καθίσματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,45m. Το ύψος της πλάτης του καθίσματος θα πρέπει να είναι 0,43m με μια μικρή κλίση προς τα πίσω. Τα καθίσματα διαχωρίζονται το ένα από το άλλο με υποχείρια πλάτους 7 εκατοστών.
6. Η ελεύθερη απόσταση δυο διαδοχικών σειρών πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,85m.
7. Μια σειρά θεατών δε μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από 14 θέσεις καθισμάτων στην πλατεία και 12 θέσεις στον εξώστη. Οι 14 θέσεις της πλατείας μπορούν να αυξηθούν στις 21 θέσεις αρκεί η απόσταση μεταξύ των σειρών να αυξηθεί κατά 2 εκατοστά άρα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,05m και ταυτόχρονα ο διάδρομος να αυξηθεί σε πλάτος κατά 5 εκατοστά.

[30]

#### *1. Μικροί χώροι*

Η ποικιλία στο σχήμα, τα καθίσματα, τους τοίχους και την οροφή είναι μεγάλη. Στους θεατρικούς χώρους η σκηνή προσκηνίου είναι η πιο διαδεδομένη και εξυπηρετική.

Στα θέατρα προσκηνίου τα χαμηλά επίπεδα του τοίχου είναι ανακλαστικά ενώ οι πίσω τοίχοι είναι πάντα απορροφητικοί (ανεξαρτήτως του μεγέθους και του τύπου του θεάτρου). Το πάνω μέρος των τοίχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αναλόγως με τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης.

Η ύπαρξη ανακλαστήρων στο πλαϊνά μέρη του προσκηνίου είναι πολύ χρήσιμη, ώστε ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ήχου, αυτός να γυρνάει πάντα προς την περιοχή των θεατών. Η τυπική αναλογία όσον αναφορά τις διαστάσεις του προσκηνίου είναι 2:1 (πλάτος προς ύψος).

## *II. Μεσαία θέατρα*

Θα πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ομιλία και για μουσική. Ο σχεδιασμός που ακολουθείται είναι ο ίδιος με αυτόν για τα μικρά θέατρα.

## *III. Μεγάλα θέατρα*

Θα πρέπει να είναι ικανά να στεγάσουν οποιαδήποτε μορφή θεατρικής παράστασης (λόγο, μουσική, χορό). Το μέγεθος της αίθουσας καθώς και τα ακουστικά χαρακτηριστικά της μπορεί να κινούνται σε μεγάλο εύρος. Η σκηνή θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της εκάστοτε παράστασης.

Στα μεγάλα θέατρα το προσκήνιο μπορεί να έχει πλάτος 12 με 18 μέτρα και το ύψος θα πρέπει να είναι περίπου το μισό του πλάτους του.

[28]



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Μεθοδολογία και Εξοπλισμός

Σε όλα τα θέατρα που επισκεφτήκαμε ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία.

Αρχικά σχεδιάστηκε η κάθε θεατρική αίθουσα σε τρισδιάστατη μορφή με το πρόγραμμα Autocad (έκδοση 2016). Τα σχέδια αυτά χρησιμοποιήθηκαν στο ακουστικό λογισμικό ODEON το οποίο προσομοιώνει την διάδοση του ήχου στον χώρο και υπολογίζει ακουστικά μεγέθη όπως ο χρόνος αντήχησης. Στο λογισμικό αυτό η ηχητική πηγή τοποθετήθηκε στις ίδιες θέσεις που βρίσκονταν τα ηχεία σε κάθε θέατρο (κάθε φορά γινόταν χρήση ενός μόνο ηχείου). Η επιλογή να τοποθετήσουμε τις ηχητικές πηγές στην ίδια θέση έγινε για λόγους ακριβείας, καθώς ενώ ο χρόνος αντήχησης δεν εξαρτάται από την θέση της ηχητικής πηγής, άλλα μεγέθη όπως η ευκρίνεια και η καταληπτότητα εξαρτώνται άμεσα από την σχέση πηγή-δέκτη στο χώρο.

Μέσω του προγράμματος Dirac καταγράψαμε τα ακουστικά σήματα. Το πρόγραμμα DIRAC (έκδοση 3.1) της Bruel and Kjaer είναι πρόγραμμα καταγραφής και αναπαραγωγής ήχων. Από τη μία καταγράφει ήχους και τους αποθηκεύει σε μορφή .wav (θόρυβο, κρουστικό παλμό, MLS, sinesweep), ενώ από την άλλη αναπαράγει τα σήματα MLS και sinesweep (εκθετικό και λογαριθμικό). Επίσης δίνει την δυνατότητα να καταγραφούν δύο ξεχωριστά κανάλια ταυτόχρονα σε διαφορετικά αρχεία. Το λογισμικό Dirac ακολουθεί τα αντίστοιχα πρότυπα ISO.

Τέλος αυτά τα αρχεία ήχου, αναλύθηκαν σε κώδικα Matlab (έκδοση 2015b). Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν συνταχθεί από τους Γεώργιο Καμπουράκη και Christophe COUNTEUR. Οι κώδικες αυτοί σχετίζονται με τον υπολογισμό συγκεκριμένων μεγεθών που θέλαμε να μελετήσουμε καθώς και με την ανάγκη διόρθωσης των σημάτων μας. Η διόρθωση αυτή προέκυψε μετά την διαδικασία βαθμονόμησης των οργάνων μέτρησης και αφορά υπολογιστικές παραμέτρους, όπως την επεξεργασία των σημάτων σε οκταβική ανάλυση. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης των οργάνων δημιουργήθηκε πίνακας διόρθωσης ανά συχνότητα. Ο πίνακας αυτός, διορθώνει το σφάλμα που παρουσιάζεται κατά την καταγραφή των σημάτων από τα βαθμονομημένα όργανα μέτρησης (ηχόμετρο της Bruel and Kjaer). Οι κώδικες του matlab που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

Σε κάθε θέατρο οι θέσεις των μικροφώνων είχαν ως στόχο να καλύψουν όλες τις πιθανές περιοχές διαφορετικής συμπεριφοράς του ήχου ώστε να ληφθούν σωστά αποτελέσματα. Τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν στο ένα μισό του κάθε θεάτρου καθώς οι χώροι ήταν συμμετρικοί και ο ήχος θα συμπεριφέρεται το ίδιο.

Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

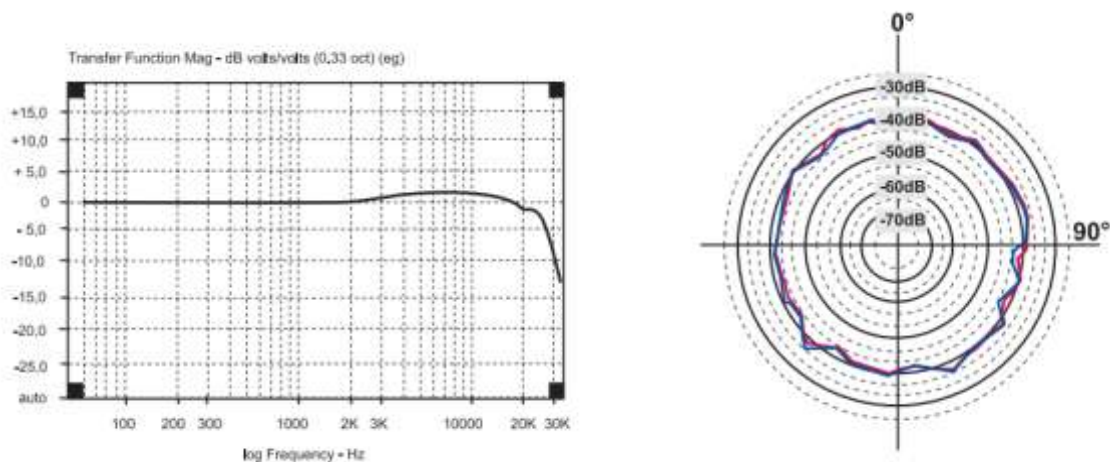
- 2 κάρτες ήχου της εταιρίας Digigram UAX22.

[31]

➤ 4 μικρόφωνα Behringer ECM8000

Τα μικρόφωνα αυτά είναι πολυκατευθυντικά μικρόφωνα πίεσης . Η αντίσταση εισόδου είναι 600 Ω , η ευαισθησία -60dB και ανταποκρίνονται στο φάσμα ακουστικών συχνοτήτων.

Το πολικό διάγραμμα και η απόκριση συχνότητας φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 5. 1: Συχνотική απόκριση και φασματική απόκριση του μικροφώνου BehringerECM8000

[32]

Τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν κάθετα προσεγγιστικά στο ύψος του κεφαλιού των θεατών.

➤ 1 ηχώμετρο Bruel and Kjaer 2270 για καλιμπράρισμα.

Το ηχώμετρο αυτό δίνει τα μεγέθη σε οκταβική (1/1) και τριοκταβική ανάλυση (1/3), χρησιμοποιώντας ανάλυση Fourier.

Ο τύπος των ηχείων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε θέατρο, καθώς και η θέση τους, διαφέρει σε κάθε περίπτωση.

Τα σήματα που καταγράψαμε ήταν τα εξής:

- ◆ MLS
- ◆ Sine sweep (linear & logarithmic)
- ◆ Θόρυβος (ροζ και λευκός)
- ◆ Κρουστικό

Για το κρουστικό σήμα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι. Η μέτρηση λήφθηκε είτε με χρήση πιστολιού αφέτη είτε με χρήση μπαλονιού.

Το όπλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Olympic .380 Blank Firing Revolver - 9mm.

## Βαθμονόμηση

Βαθμονόμηση είναι η διόρθωση του σφάλματος μέτρησης σε σύγκριση με κάποιο όργανο αναφοράς. Ως αναφορά τέθηκε το ηχόμετρο της Bruel and Kjaer 2270. Για την καταγραφή των ήχων χρησιμοποιήθηκαν δύο φορητοί υπολογιστές και σε κάθε έναν αντιστοιχούσε μία κάρτα ήχου και δύο μικρόφωνα. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σετ κάρτας ήχου- μικροφώνων στον ίδιο υπολογιστή σε όλα τα θέατρα.

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, αναπαράχθηκαν μέσω ενός ηχείου, ροζ και λευκός θόρυβος και μέσω του προγράμματος Dirac τα σήματα MLS και sine sweep. Τα σήματα αυτά καταγράφηκαν από το ηχόμετρο και από κάθε μικρόφωνο μέσω της κάρτας ήχου στον αντίστοιχο υπολογιστή στο πρόγραμμα Dirac. Τα μικρόφωνα και το ηχόμετρο βρίσκονταν στην ίδια απόσταση από το ηχείο και είχαν την ίδια διεύθυνση. Στη συνέχεια συγκρίναμε τα αποτελέσματα του Dirac με αυτά του ηχομέτρου. Επίσης με την χρήση πιστολιού αφέτη καταγράψαμε κρουστικό σήμα ώστε να υπολογίσουμε την διαφορά στο χρόνο αντήχησης. Τέλος βάση αυτών των διαφορών δημιουργήθηκε ο πίνακας διόρθωσης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων.

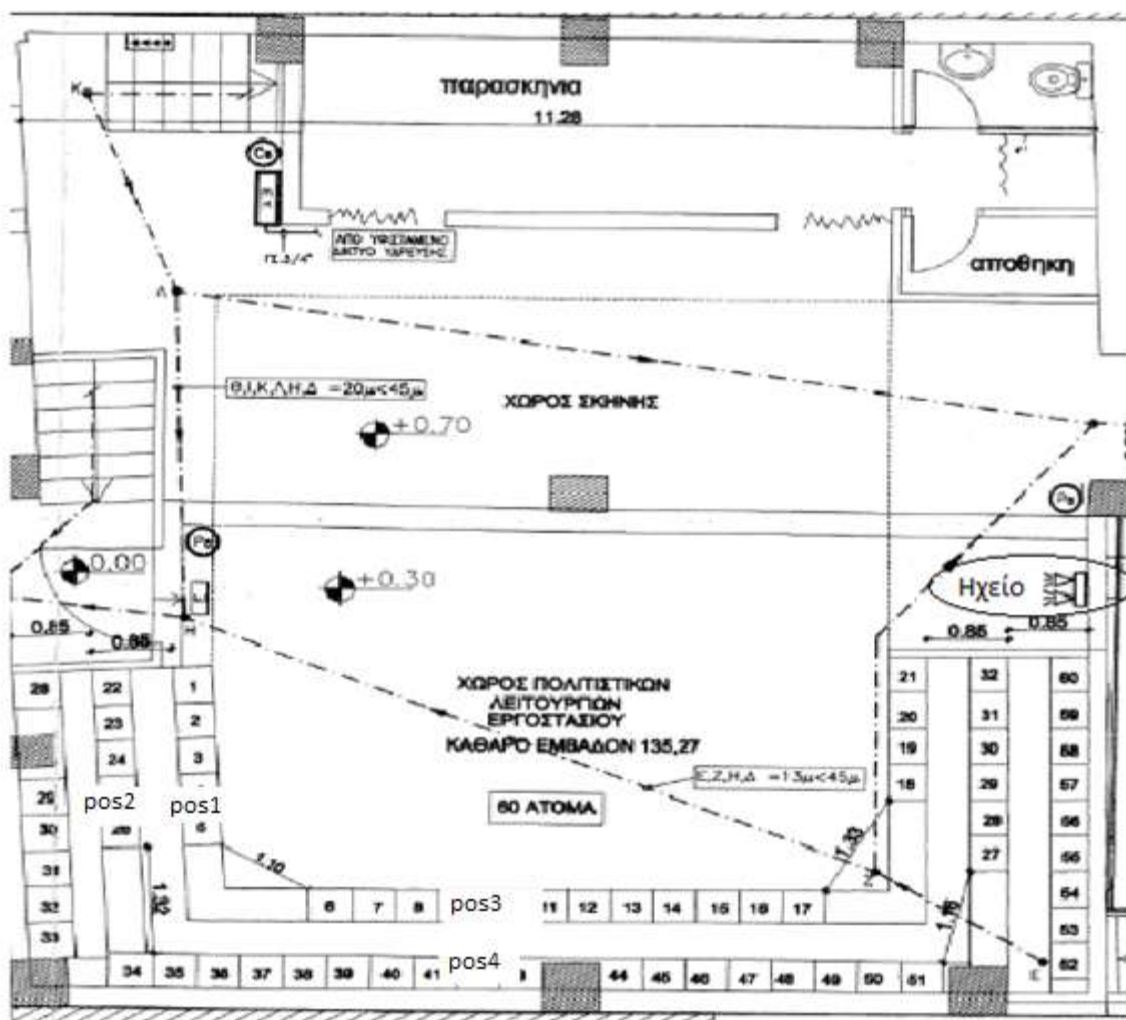
## Κεφάλαιο 6°

### Διαδικασία μετρήσεων- Προσομοιώσεις

#### 1. Θέατρο Βαφείο

Το θέατρο Βαφείο βρίσκεται στην οδό Αγ. Όρους 16 & Κωνσταντινουπόλεως 115, Αθήνα (Βοτανικός). Η αίθουσα που εξετάσαμε έχει χωρητικότητα 95 θέσεων με διαστάσεις 11.2m x 13m x 5.2m και βρίσκεται στο ισόγειο

Οι θέσεις των μικροφώνων και της πηγής κατά την διάρκεια των μετρήσεων φαίνονται στην Εικόνα 6.1.1 παρακάτω.



Εικόνα 6.1 1: Θέσεις μικροφώνων και ηχείου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στο θέατρο Βαφείο.

Οι αναλύσεις όλων των παραμέτρων έγιναν σε οκταβική ανάλυση ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του προγράμματος ODEON, το οποίο επεξεργάζεται τα σήματα σε οκταβική ανάλυση μόνο.

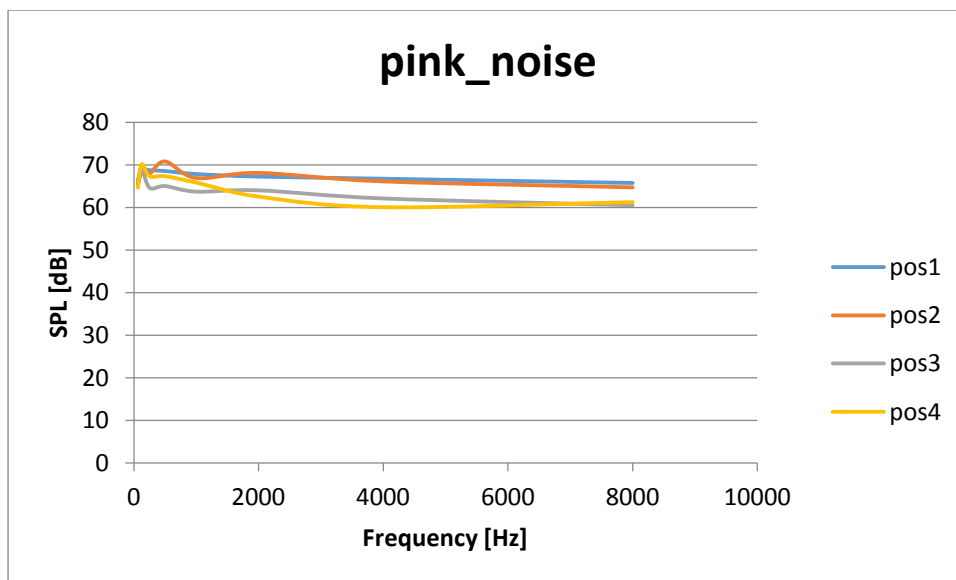
## Μετρήσεις

### 1. Φασματική κατανομή

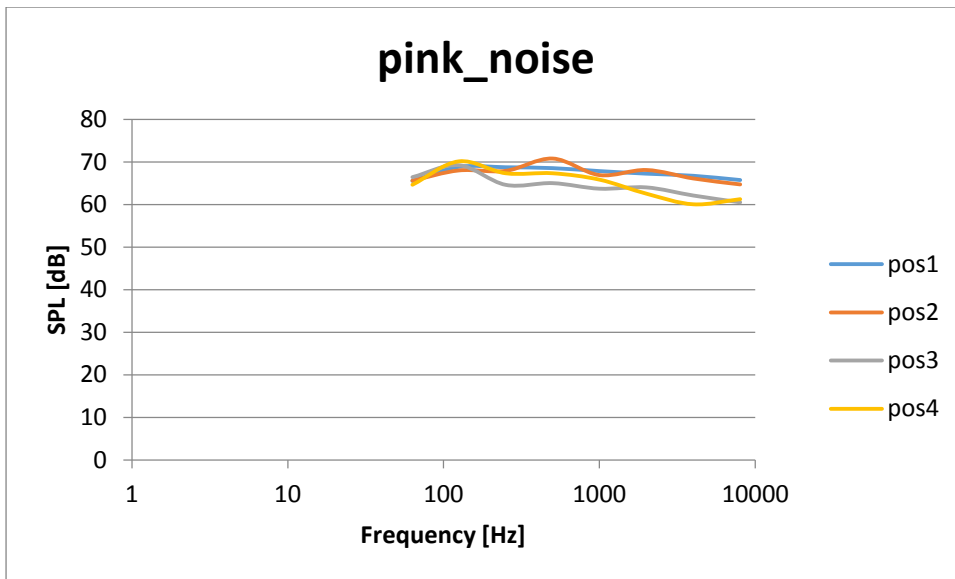
Ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη που μελετάται σε ένα χώρο είναι η συχνοτική κατανομή του ήχου στο χώρο αυτό. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) σε dB, καθώς μας δείχνει πόσο καλά κατανέμεται ο ήχος ανά συχνότητα και το μέγεθος LAeq(dB), το οποίο μας δείχνει τη στάθμη του ισοδύναμου θορύβου ανά σημείο, κατά φίλτρο A.

Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν μέσω δύο σημάτων εισόδου, pink noise και white noise. Τα σήματα αυτά, μετά από επεξεργασία στο πρόγραμμα Matlab μας έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Ακολουθούν οι μετρήσεις με σήματα εισόδου αρχικά Pink\_noise και στη συνέχεια White\_noise σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

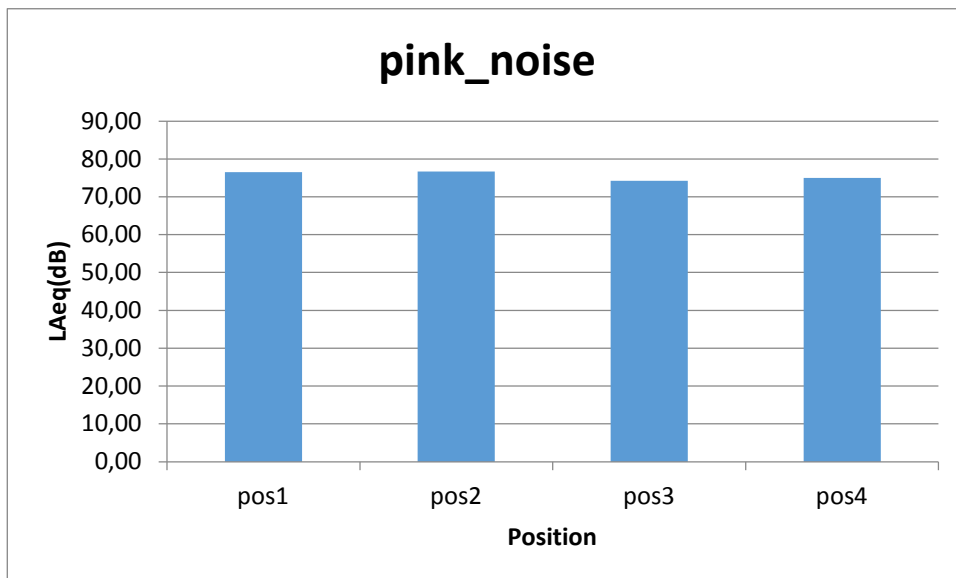


Διάγραμμα 6.1 1: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.



Διάγραμμα 6.1 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

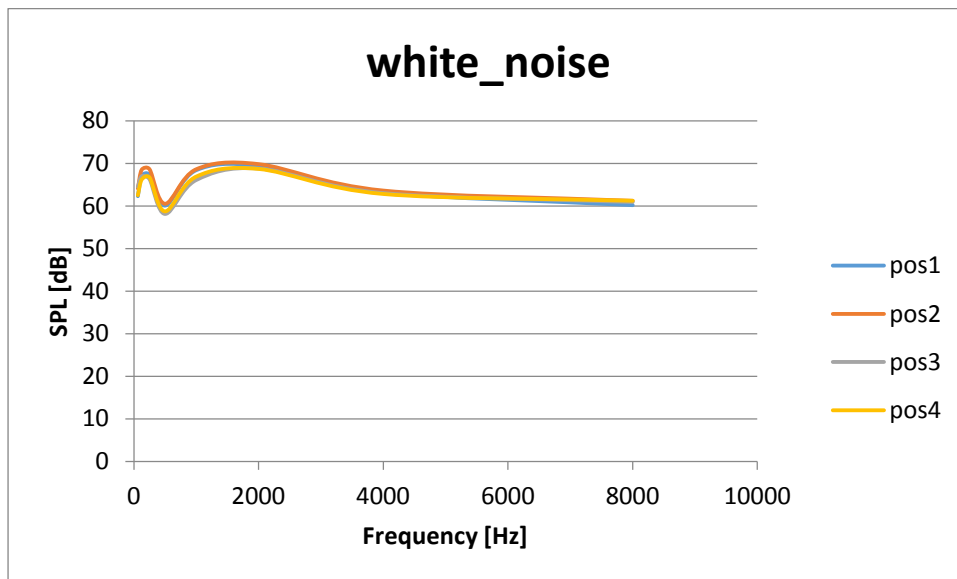
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι η φασματική κατανομή του ροζ θορύβου στο χώρο δεν ακολουθεί ακριβώς την θεωρητική καμπύλη όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Σύμφωνα με αυτή, θα αναμέναμε μια συνεχή πτώση της στάθμης θορύβου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, η πτώση αυτή δεν είναι αρκετά μεγάλη.



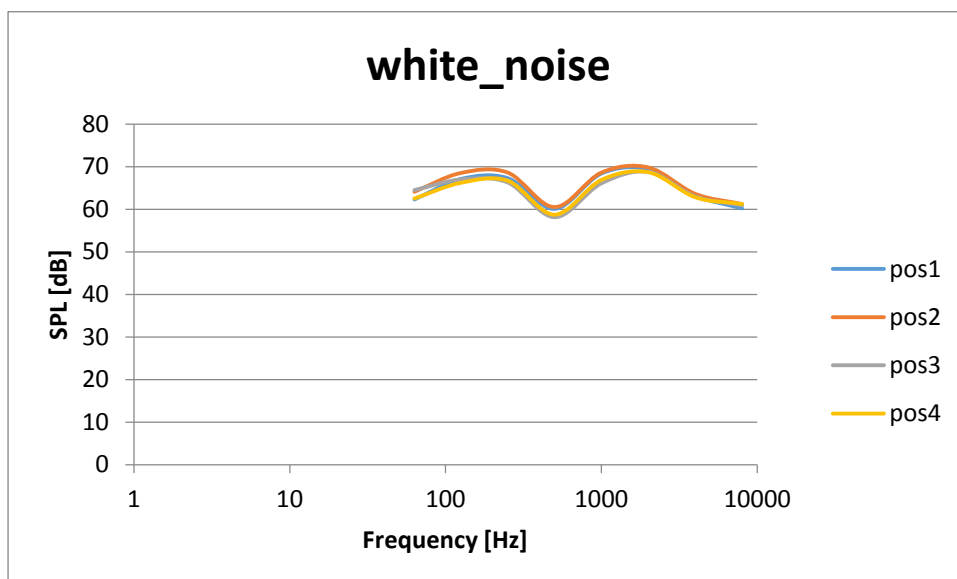
Διάγραμμα 6.1 3: Μέγεθος LAeq (dB) ανά σημείο για ροζ θόρυβο στο θέατρο Βαφείου.

Από το διάγραμμα του LAeq παρατηρούμε μια σταθερή κατανομή στο χώρο, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρούμενες θέσεις είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, αφού ο χώρος είναι μικρός με συνολικά τρεις σειρές θεατών σε κάθε πλευρά και δύο σειρές στο

κέντρο. Λόγω της εγγύτητας των μετρούμενων θέσεων αναμενόταν σε όλες τις θέσεις να έχουμε παρόμοιες τιμές του LAeq.

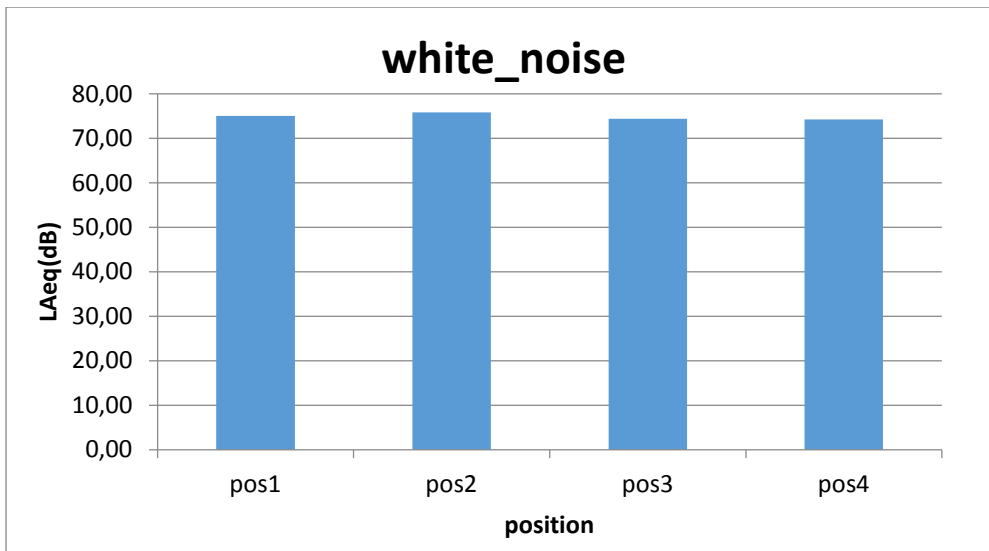


Διάγραμμα 6.1 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.



Διάγραμμα 6.1 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

Τα διαγράμματα του λευκού θορύβου ακολουθούν την φασματική του κατανομή όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 1.2. Παρατηρούμε ότι η ενέργεια παραμένει η ίδια σε όλο το συχνοτικό φάσμα, όπως αναμενόταν από τη θεωρητική καμπύλη.



Διάγραμμα 6.1 6: Μέγεθος LAeq (dB) ανά σημείο για λευκό θόρυβο στο θέατρο Βαφείο.

Το διάγραμμα του LAeq είναι και αυτό ανάλογο του ροζ θορύβου πιο πάνω. Η ενεργειακή στάθμη είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και ίδια για όλες τις θέσεις που μελετήσαμε με ελάχιστες διαφορές της τάξεως του 1-2 dB.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε υψηλό SPL σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Οι τιμές αυτές είναι απόρροια του μικρού μεγέθους και της μορφολογίας του χώρου. Όλα τα μικρόφωνα βρίσκονται αρκετά κοντά στην πηγή και συνεπώς η πίεση που φτάνει σε αυτά είναι μεγάλη και επομένως και το SPL.

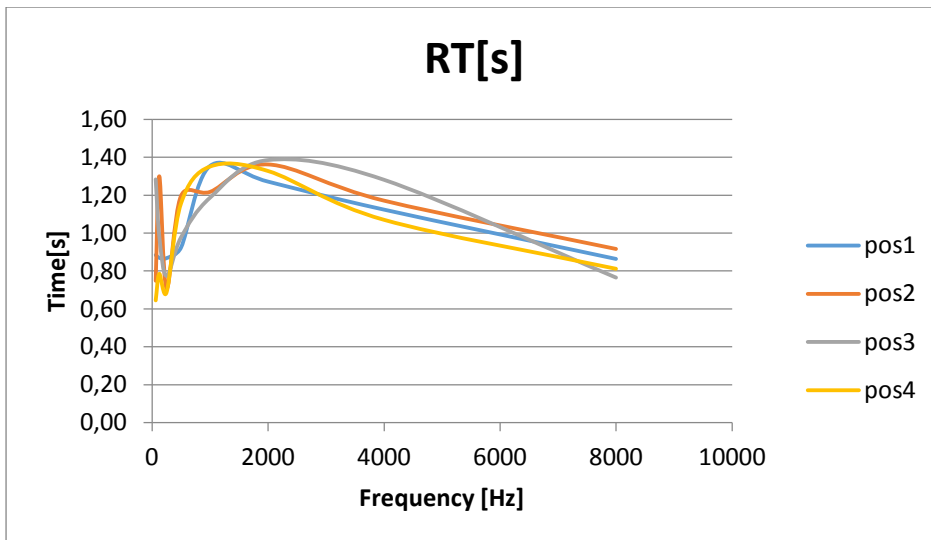
## 2. Χρόνος Αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης είναι μια από τις πιο βασικές παραμέτρους για την ακουστική μελέτη ενός χώρου. Το σήμα που ηχογραφήθηκε είναι κρουστικός παλμός για την εξαγωγή του RT.

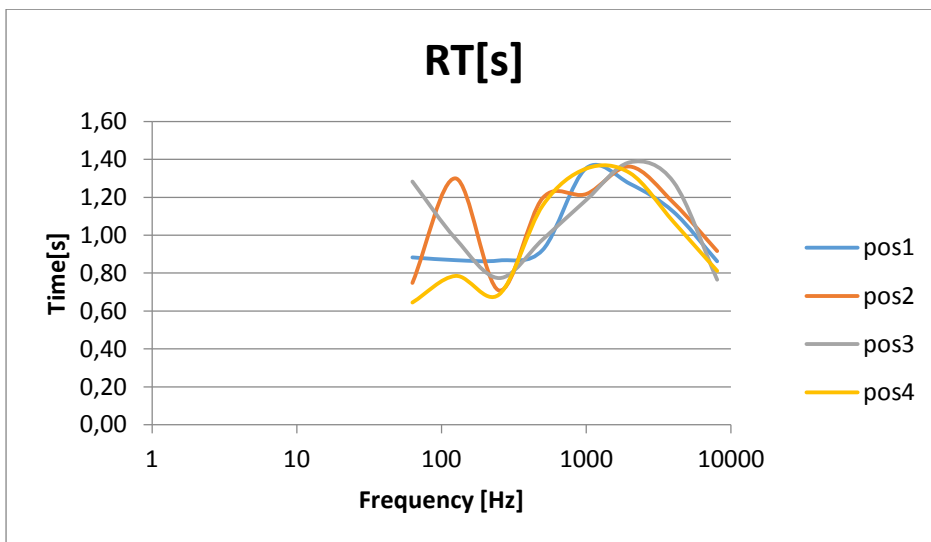
Τα σήματα αυτά ηχογραφήθηκαν από το λογισμικό Dirac και η επεξεργασία τους έγινε στο λογισμικό matlab.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για τις διάφορες θέσεις που μετρήσαμε.





Διάγραμμα 6.1 7: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.



Διάγραμμα 6.1 8: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος αντίληψης για την μέτρηση με τον κρουστικό παλμό είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς οι τιμές κυμαίνονται γύρω από την τιμή 1 second (0.76-1.34 second). Γεγονός που υποδεικνύει καλό χρόνο αντίληψης για χώρους που προορίζονται για θέατρο (μουσική και ομιλία).

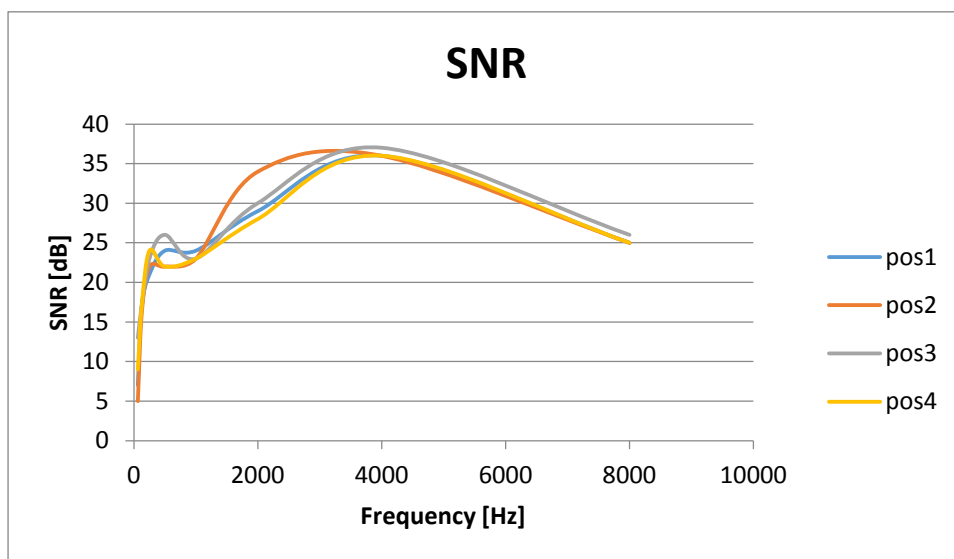
Παρατηρείται επίσης ότι οι θέσεις 2 και 4 έχουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές από τις θέσεις 1 και 3 αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκονταν κοντά στους τοίχους και συνεπώς οι ανακλάσεις από αυτούς ήταν εντονότερες και γινόντουσαν αντιληπτές από τον μετρητικό μας εξοπλισμό.

### 3. Επιπλέον ακουστικά μεγέθη

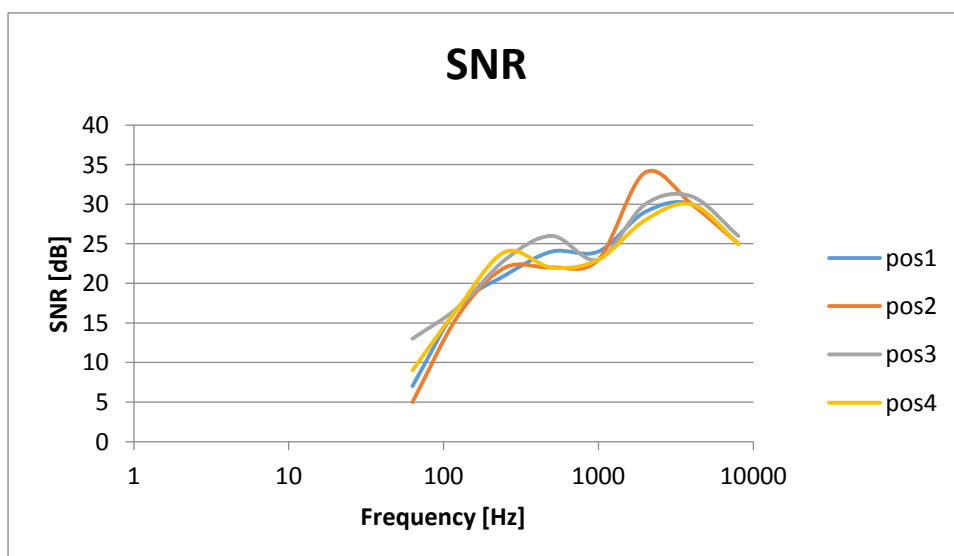
Στο κομμάτι αυτό εξετάζονται τα μεγέθη που μελετούν την καταληπτότητα του λόγου στο χώρο.

Για την εξαγωγή των παρακάτω μεγεθών SNR, STI, STI-MALE, STI-FEMALE, RASTI, ALcons(%), C80 και D50, χρησιμοποιήθηκε ανθρώπινη ηχογραφημένη απαγγελία.

#### 1. SNR



Διάγραμμα 6.1 9: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του Θεάτρου Βαφείου.

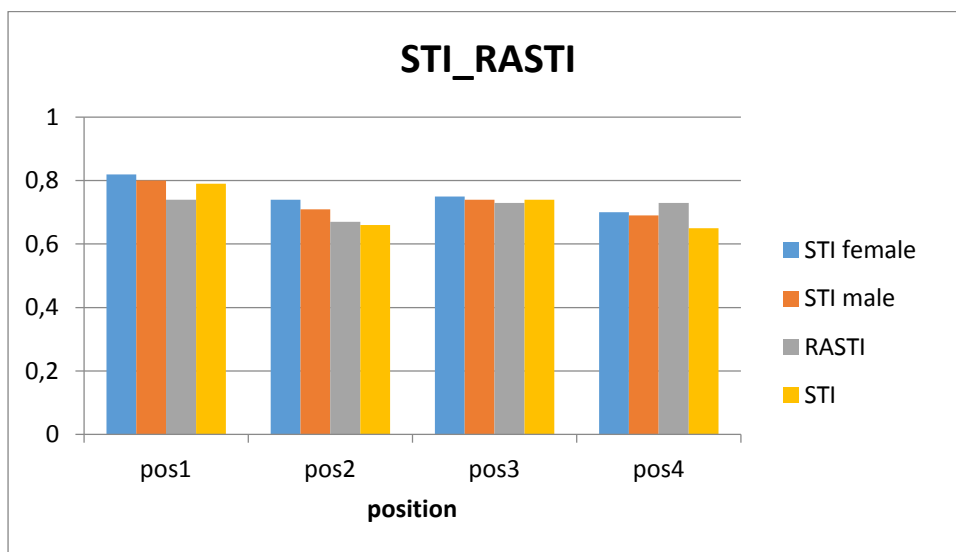


Διάγραμμα 6.1 10: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

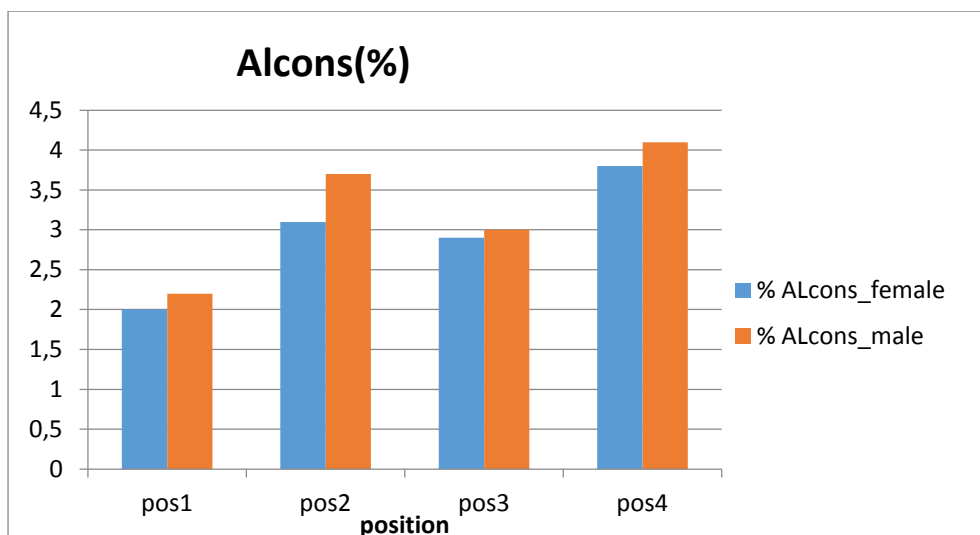
Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SNR στις τέσσερις αυτές θέσεις είναι εξαιρετικές (>18dB) σύμφωνα με το ISO 3382-3:2012. Εξαιρούνται οι τιμές στις χαμηλές συχνότητες που είναι μικρότερες των 18dB, παρ'όλα αυτά κρίνονται ικανοποιητικές.

Πρέπει να τονιστεί ότι η έλλειψη λειτουργίας οποιουδήποτε συστήματος εξαερισμού, θέρμανσης ή λειτουργικού εξοπλισμού του θεάτρου π.χ Dimmers και φώτα, τα οποία συγχρονίζονται σε συγκεκριμένη συχνότητα, παράγουν θόρυβο και συνεπώς θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα μας. Επιπλέον οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τις ώρες μεταξύ 12:00-15:00, που δεν αποτελούν ώρα αιχμής. Λόγω της ελλιπούς ηχομόνωσης του θεάτρου, σε ώρα αιχμής ο θόρυβος βάθους (background noise) από το δρόμο θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερος. Οι παραπάνω παράγοντες θα επηρέαζαν σημαντικά το SNR αφού αυξάνοντας το θόρυβο οι τιμές του θα μειώνονταν σημαντικά. Μια εκτιμώμενη αύξηση του θορύβου είναι κατά μέσο όρο στα 7-8dB, με αντίστοιχη μείωση του SNR.

## 2. STI-RASTI



Διάγραμμα 6.1 11: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

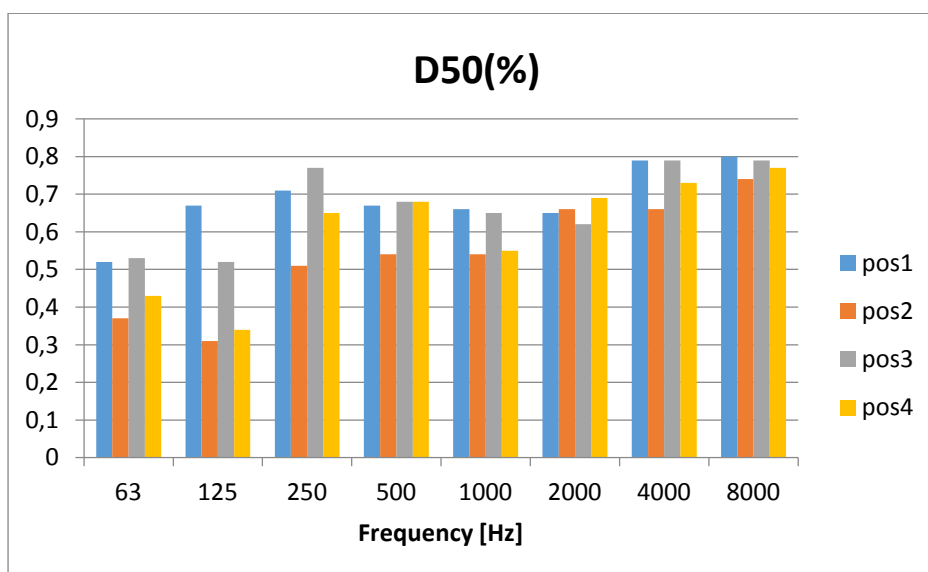


Διάγραμμα 6.1 12: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος ALcons(%) [female-male] για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.

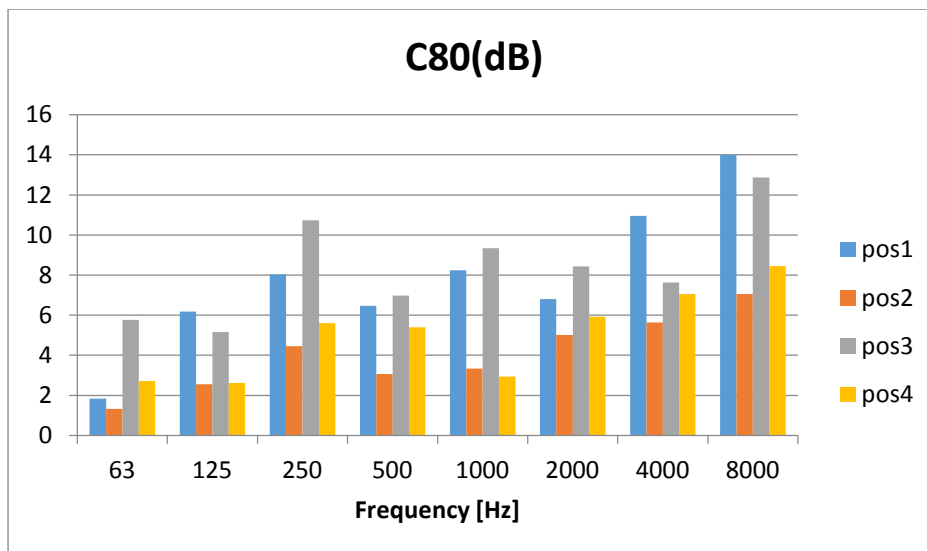
Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η καταληπτότητα του χώρου χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή και επιπλέον η απώλεια συμφώνων τόσο στην αντρική όσο και στη γυναικεία φωνή είναι μικρή σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των δεικτών είναι σημαντικά αυξημένες από τις αναμενόμενες. Αυτό είναι αποτέλεσμα της έλλειψης του λειτουργικού θορύβου του θεάτρου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς επίσης και του γεγονότος ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν σε μη ώρα αιχμής μειώνοντας αισθητά των θόρυβο βάθους.

### 3. C50, D80



Διάγραμμα 6.1 13: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο για το θέατρο Βαφείου.



Διάγραμμα 6.1 14: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80[dB] ανά σημείο για το θέατρο Βαφείο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η διακριτότητα D50 του χώρου είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς το D50 βρίσκεται πάνω από το 0,5 (50%), όπως ορίζει το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Παρ' όλα αυτά κάποιες τιμές ξεφεύγουν από τα όρια.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για τις συχνότητες 63 και 125Hz έχουμε τιμές μικρότερες του 0,5 στα μικρόφωνα 2 και 4 ενώ για τη συχνότητα 63 Hz τα μικρόφωνα 1 και 2 παίρνουν τιμές περίπου στο 0,5 (0,52 και 0,53 αντίστοιχα). Ακόμα παρατηρούμε ότι στις υψηλές συχνότητες έχουμε τις μεγαλύτερες τιμές του D50 ανεξαρτήτως θέσεως. Τα δύο αυτά γεγονότα είναι αποτέλεσμα της απορροφητικής ικανότητας του ξύλου, ενός από τα δύο βασικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στο θέατρο Βαφείο.

Από την άλλη, η διαύγεια C80 θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -1 και 3 dB για θεατρικούς χώρους, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Στις μετρήσεις μας ο δείκτης κυμαίνεται σε μεγαλύτερες τιμές ανεξαρτήτως μικροφώνου και συχνότητας. Εξαιρέση αποτελούν οι συχνότητες 63 και 125Hz. Ο δείκτης αυτός αφορά την δυνατότητα αντίληψης της μουσικής σε ένα χώρο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος υποστηρίζει καλύτερα παραστάσεις λόγου παρά μουσικής.

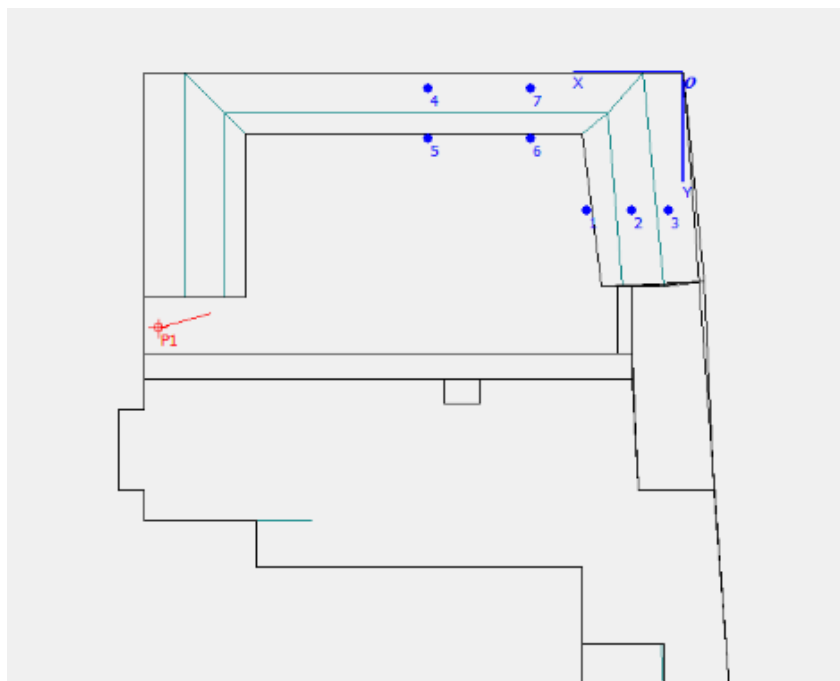
Οι τιμές της διακριτότητας D50 είναι καλύτερες από τις αναμενόμενες. Οι αναμενόμενες τιμές θα περιμέναμε να είναι χαμηλότερα καθώς ο χώρος έχει πολλές ατέλειες αφού αρχικά δεν προοριζόταν για θεατρικές παραστάσεις. Παρ' όλα αυτά το ταβάνι είναι αρκετά κοντά στον ομιλητή (τρία μέτρα πάνω από τον ομιλητή) και η κλίση των θεατών είναι τέτοια ώστε να φτάνει σε αυτούς ο απευθείας ήχος ανεμπόδιστος.

Οι τιμές του δείκτη C80 είναι εκτός των ορίων που θέτει ο Διεθνής κανονισμός για τα θέατρα. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω των καλών τιμών του δείκτη D50 καθώς είναι δύσκολο ένας χώρος με καλή διακριτότητα και ταυτόχρονα καλή διαύγεια. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος είναι κατάλληλος για ομιλία αλλά όταν υπάρχει ανάγκη μουσικής θα υπάρχουν προβλήματα.

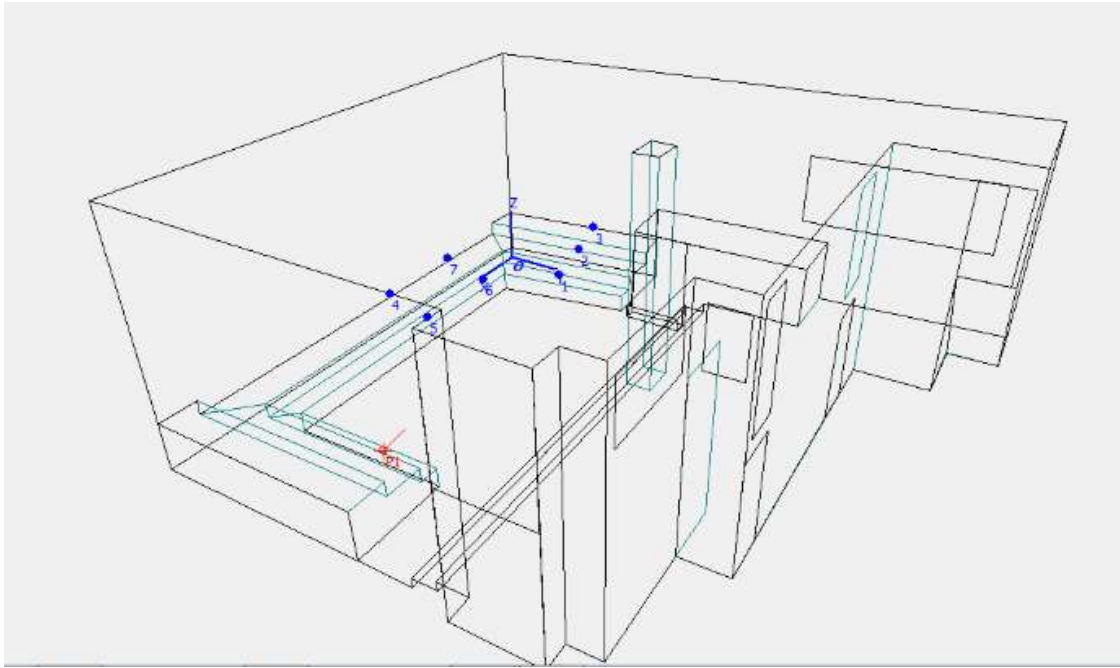
## Προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση στο πρόγραμμα ODEON, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου το οποίο σχεδιάστηκε στο λογισμικό Autocad. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα μικρόφωνα και η ηχητική πηγή με βάση τις μετρήσεις που έγιναν στο θέατρο. Να τονιστεί ότι σε σύγκριση με την μέτρηση έχουν τοποθετηθεί τρία μικρόφωνα παραπάνω για καλύτερη ηχητική κατανόηση του χώρου. Τα επιπλέον μικρόφωνα είναι τα 2, 6 και 7.

Οι θέσεις των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής φαίνονται στις Εικόνα 6.1.2 και Εικόνα 6.1.3 παρακάτω.



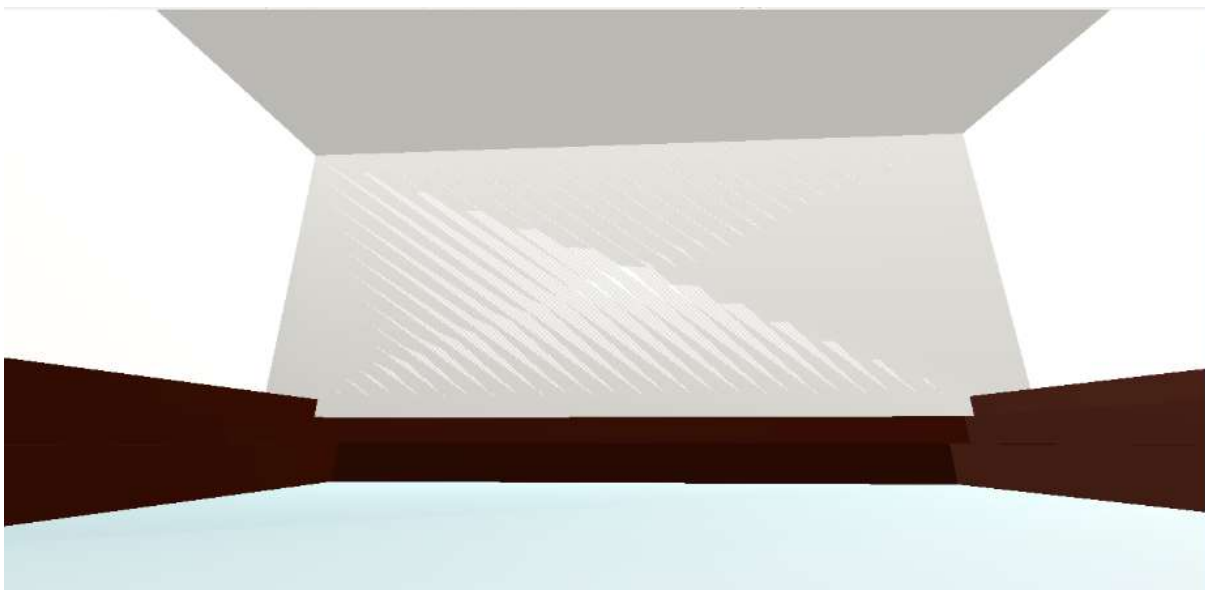
Εικόνα 6.1 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Βαφείου.



Εικόνα 6.1 3: 3D απεικόνιση των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Βαφείου.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν τα υλικά του χώρου στις αντίστοιχες επιφάνειες.

Στις παρακάτω εικόνες, Εικόνα 6.1.4 και Εικόνα 6.1.5, φαίνονται οι 3D απεικονίσεις του χώρου των θεατών και της σκηνής αντίστοιχα. Στις εικόνες αυτές περιλαμβάνονται τα υλικά του θεάτρου με διαφορετικά χρώματα. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό υλικό με διαφορετική απορροφητική ικανότητα το καθένα.



Εικόνα 6.1 4: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του θεάτρου Βαφείου με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών.



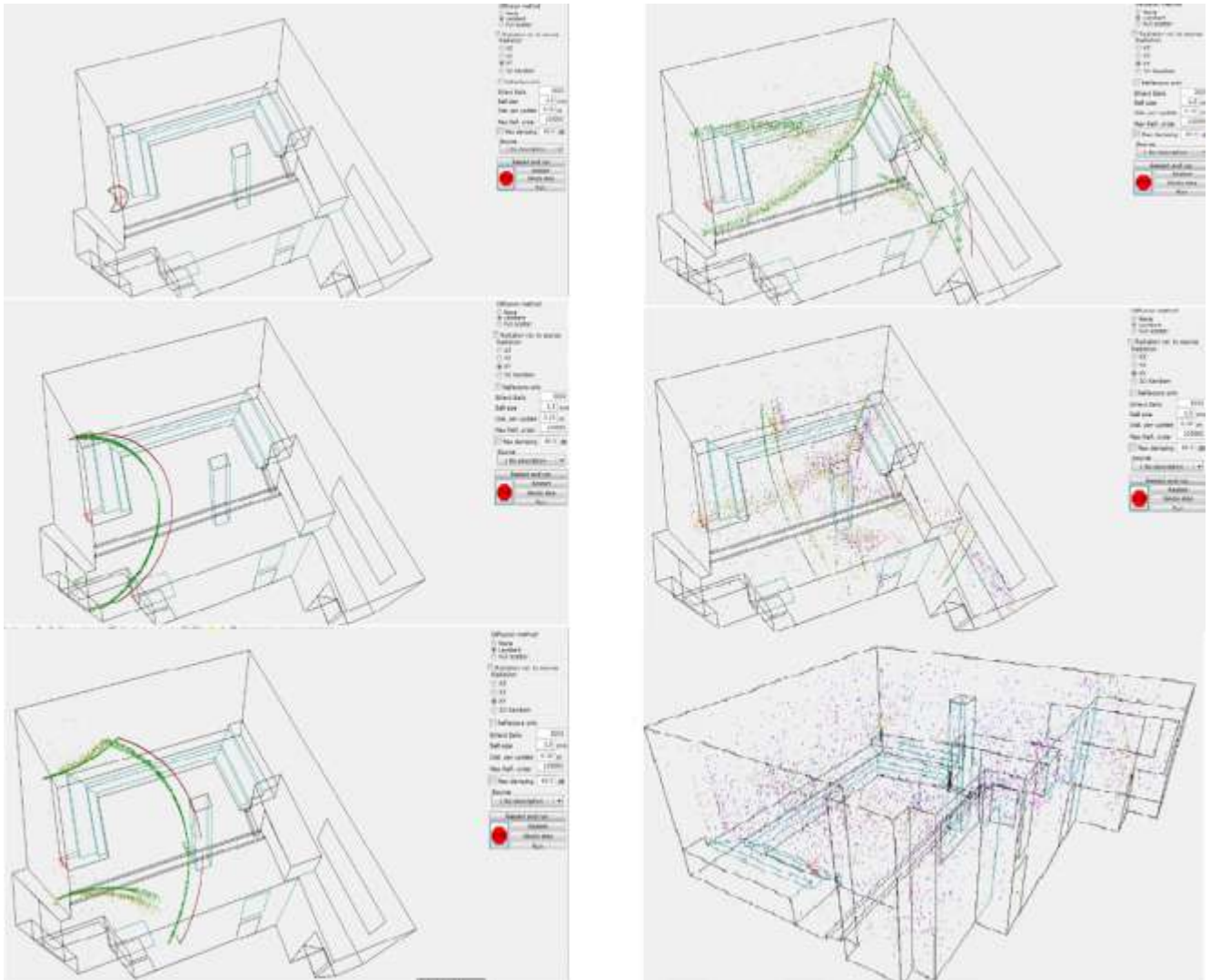
Εικόνα 6.1 5: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του θεάτρου Βαφείου με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών.

Να σημειωθεί ότι το λογισμικό ODEON, χρησιμοποιεί την εξής χρωματική κλίμακα:

1. Όσο πιο ζεστό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απρροφητικό είναι στις υψηλες συχνότητες (π.χ καφέ)
2. Όσο πιο ψυχρό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απορροφητικό είναι στις χαμηλές συχνότητες (π.χ. γαλάζιο)
3. Το λευκό και γκρι χρώμα είναι ουδέτερα και έχουν την ίδια απορροφητική ικανότητα σε όλες τις συχνότητες.

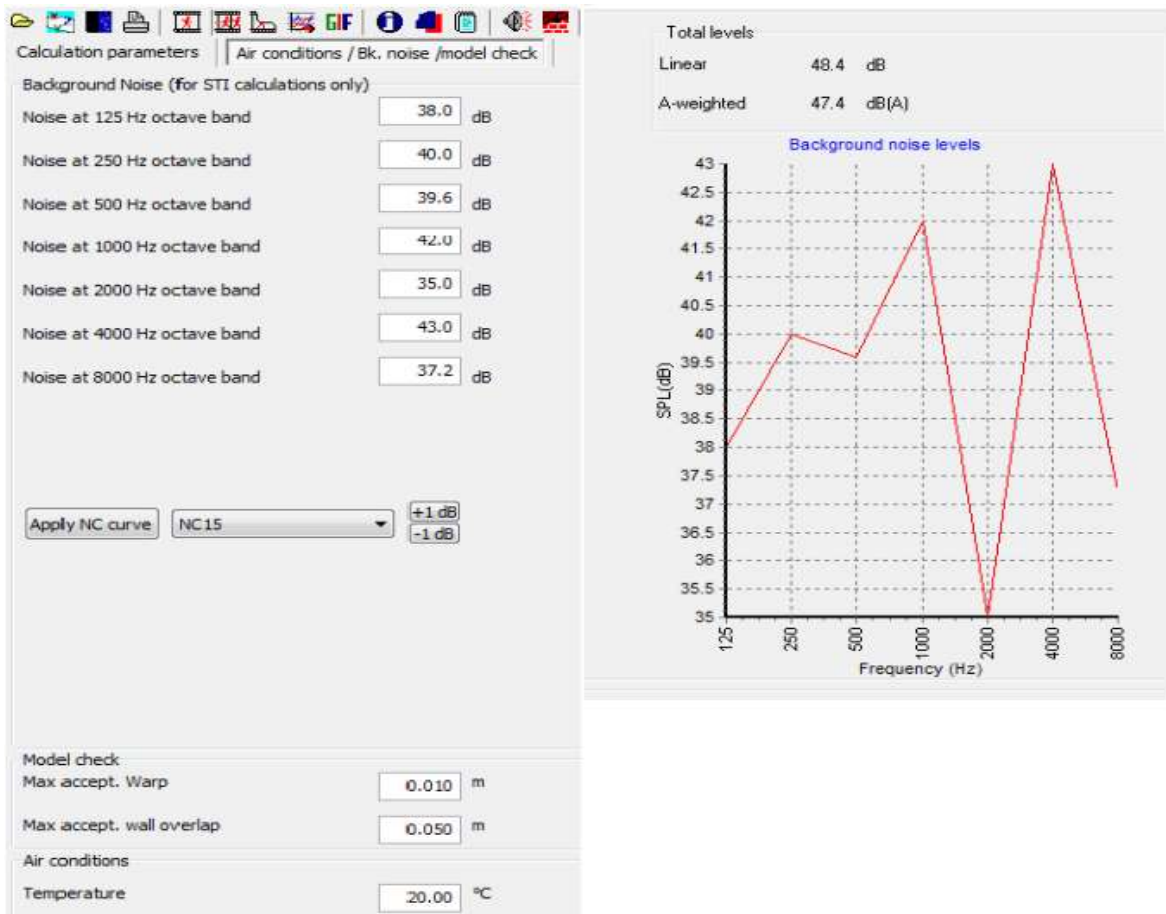
Επόμενο βήμα ήταν να ελέγξουμε την διάδοση του ήχου στο χώρο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο 3D Billard, που παρέχει το λογισμικό ODEON. Το συγκεκριμένο εργαλείο σου δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της κίνησης των “ηχητικών σωματιδίων” στο χώρο, που εκπέμπονται από σημειακή ηχητική πηγή. Στην παρακάτω εικόνα, Εικόνα 6.1.6, φαίνεται η κίνηση αυτή. Μπορούμε να διακρίνουμε με διαφορετικά χρώματα τον απ’ ευθείας ήχο και τις πρώτες, δεύτερες και λοιπές ανακλάσεις.



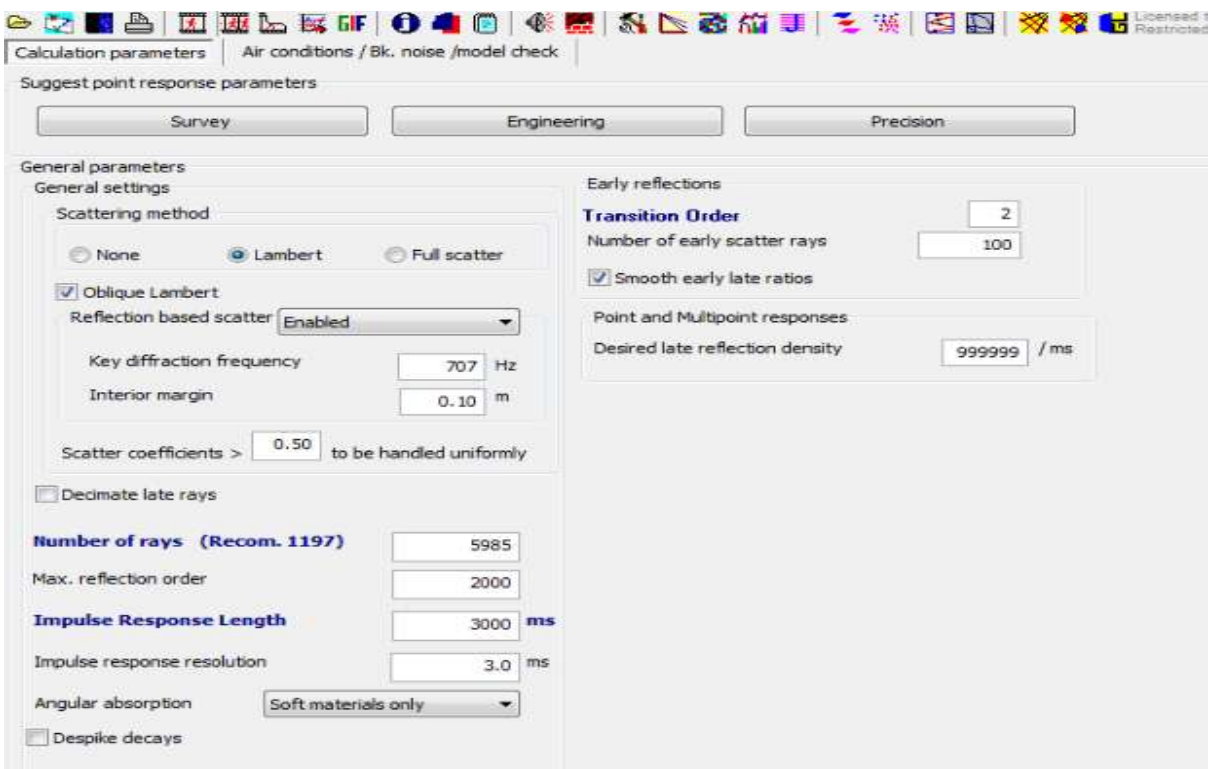


Εικόνα 6.1 6: 3D Billard εργαλείο.

Στη συνέχεια ρυθμίσαμε τις παραμέτρους του συστήματος. Ένας από αυτούς είναι ο θόρυβος βάθους για την εξαγωγή του μεγέθους STI. Ο προσδιορισμός του θορύβου βάθους έγινε με την καταγραφή σήματος ηχητικής ισχύος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το αρχείο αυτό μας έδωσε τα dB του θορύβου ανά συχνότητα με χρήση του λογισμικού matlab. Στην Εικόνα 6.1.7 φαίνονται τα dB του θορύβου ανά συχνότητα.



Εικόνα 6.1 7: Θόρυβος βάθους για STI.



Εικόνα 6.1 8: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση αποτελεσμάτων.

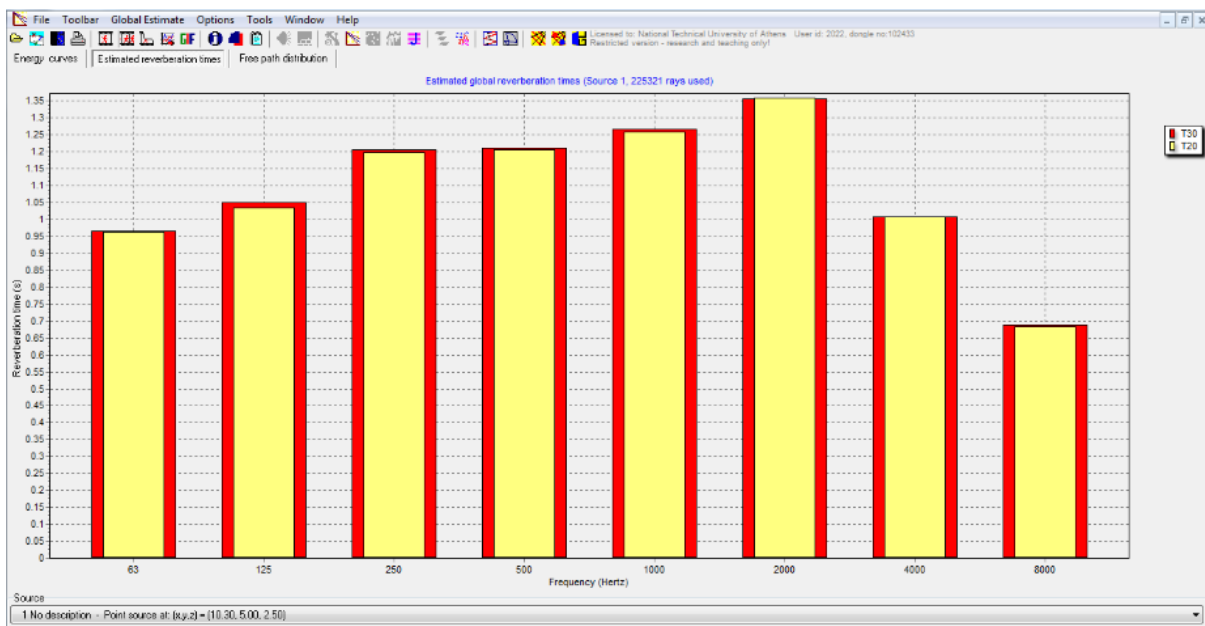
## Ανάλυση αποτελεσμάτων

Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων μέσω τριών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος είναι το Global estimate (γενική εκτίμηση βασικών παραμέτρων). Η δεύτερη μέθοδος είναι το multi-point response (προσομοίωση του χώρου ανά μετρούμη θέση). Η μέθοδος αυτή αποτελεί το βασικό μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος η τρίτη μέθοδος είναι το Grid estimate, σ' αυτήν επιλέξαμε το χώρο των θεατών και πρακτικά απεικονίσαμε την απόκριση του χώρου ανά θεατή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δείκτες που μελετήσαμε στην προσομοίωση του χώρου, με τις τρεις παραπάνω μεθόδους

### 1. Χρόνος Αντήχησης (RT).

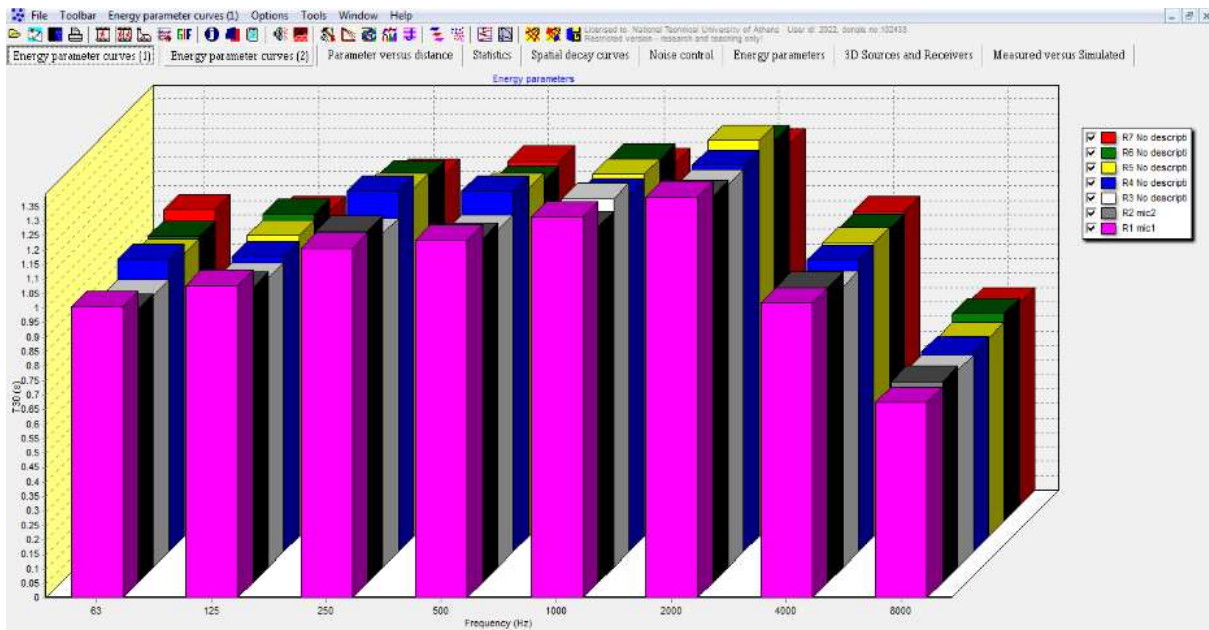
Αρχικά βλέπουμε τα αποτελέσματα από το global estimate.



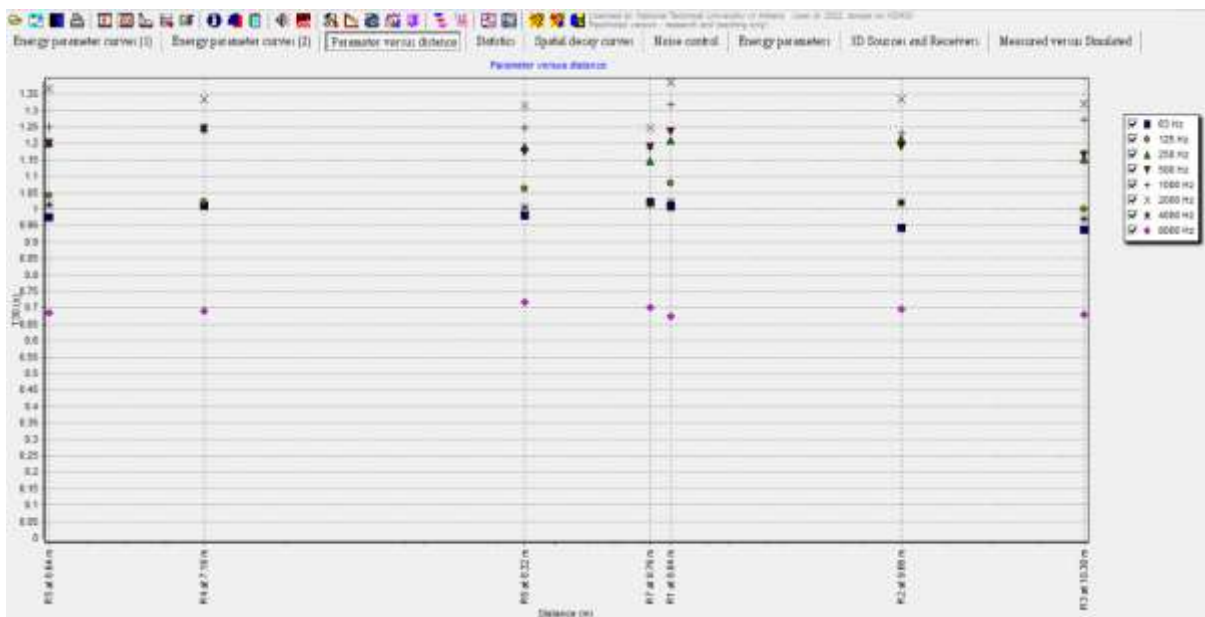
Διάγραμμα 6.1 15: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, μέσω του global estimate

Παρατηρούμε ότι οι μεσαίες συχνότητες παίρνουν τιμές από 1,2s έως 1,35s. Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές για έναν θεατρικό χώρο. Ακόμη, στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες έχουμε τιμές γύρο στο 1s οι οποίες είναι προτιμότερες για ένα χώρο με τον όγκο του συγκεκριμένου θεάτρου. Εξάιρεση αποτελούν τα 8kHz που η τιμή είναι αρκετά μικρότερη αλλά δεν αποτελεί συχνότητα ομιλίας οπότε δε μας προκαλεί προβλήματα.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από το multi-point estimation.

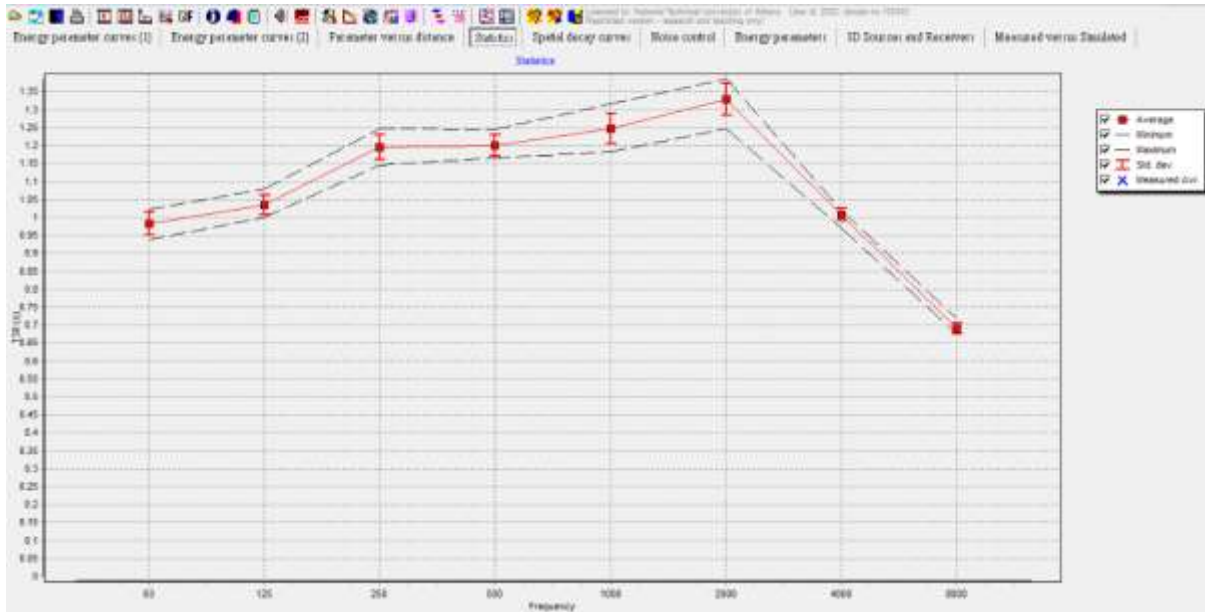


Διάγραμμα 6.1 16: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.1 17: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

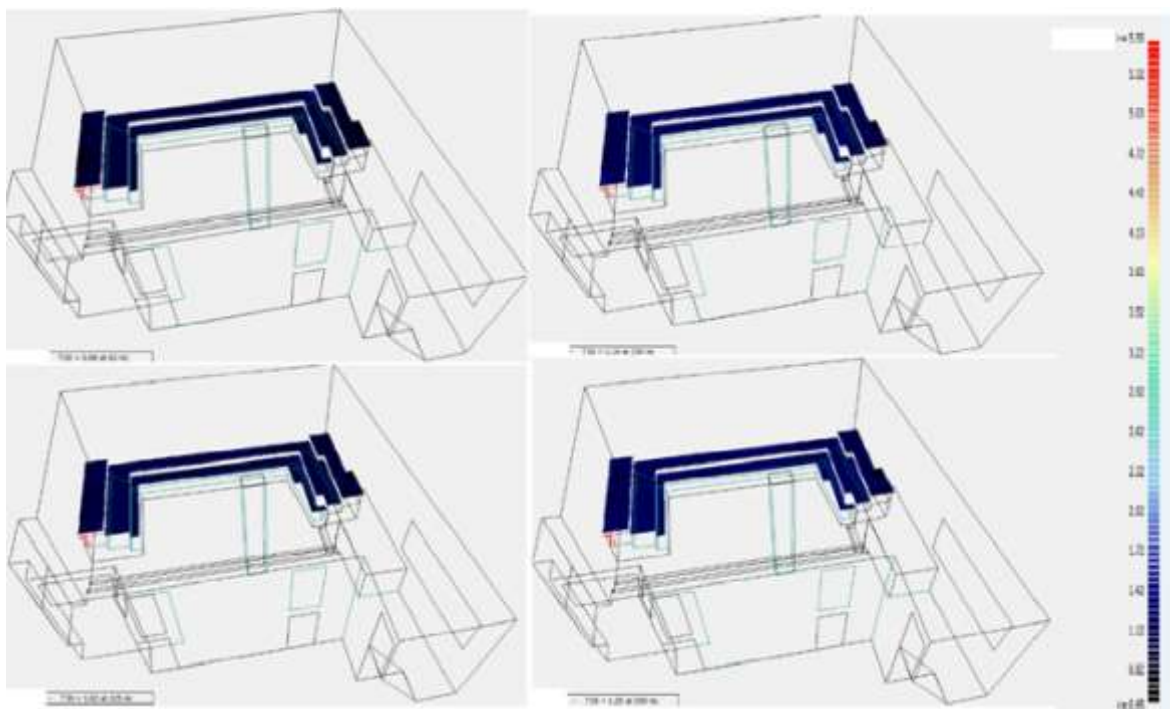




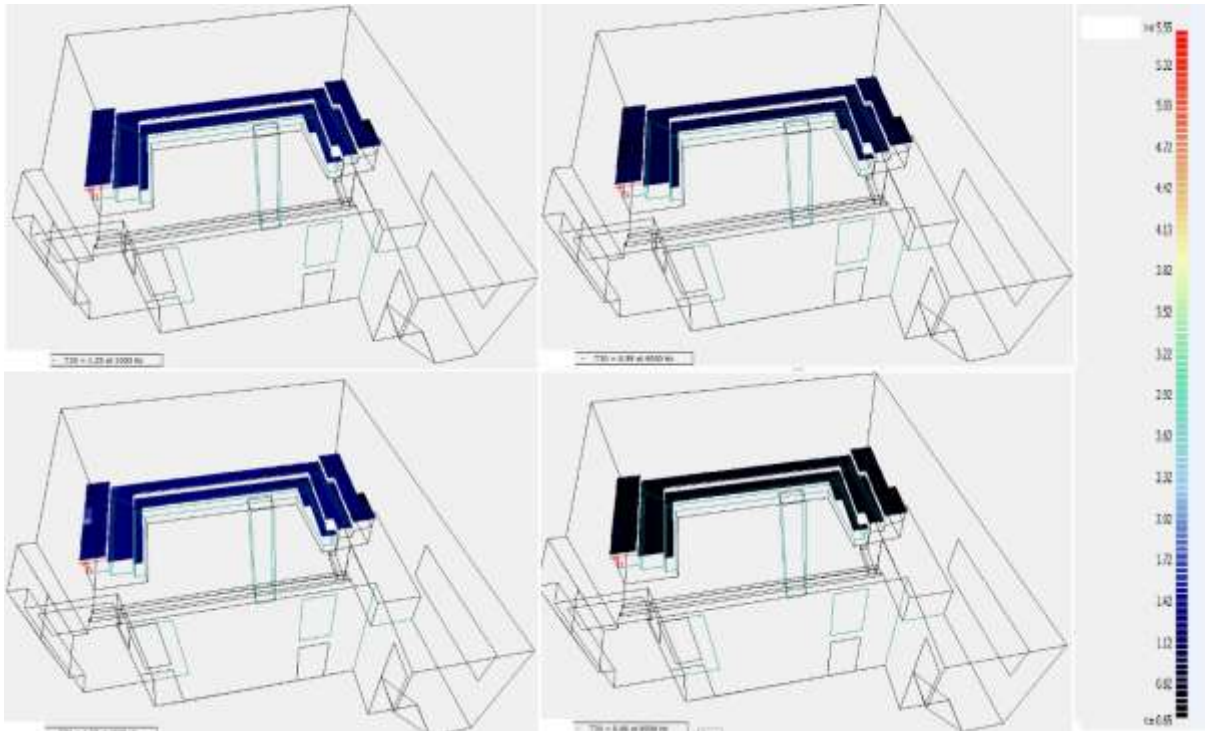
Διάγραμμα 6.1 18: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα.

Παρατηρούμε ότι όλα τα μικρόφων ακολουθούν την ίδια κατανομή ανά συχνότητα. Ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1s και 1,37s. Μόνο στα 8kHz παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις έχουν χρόνο αντήχησης γύρω στα 0,7s.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Grid.

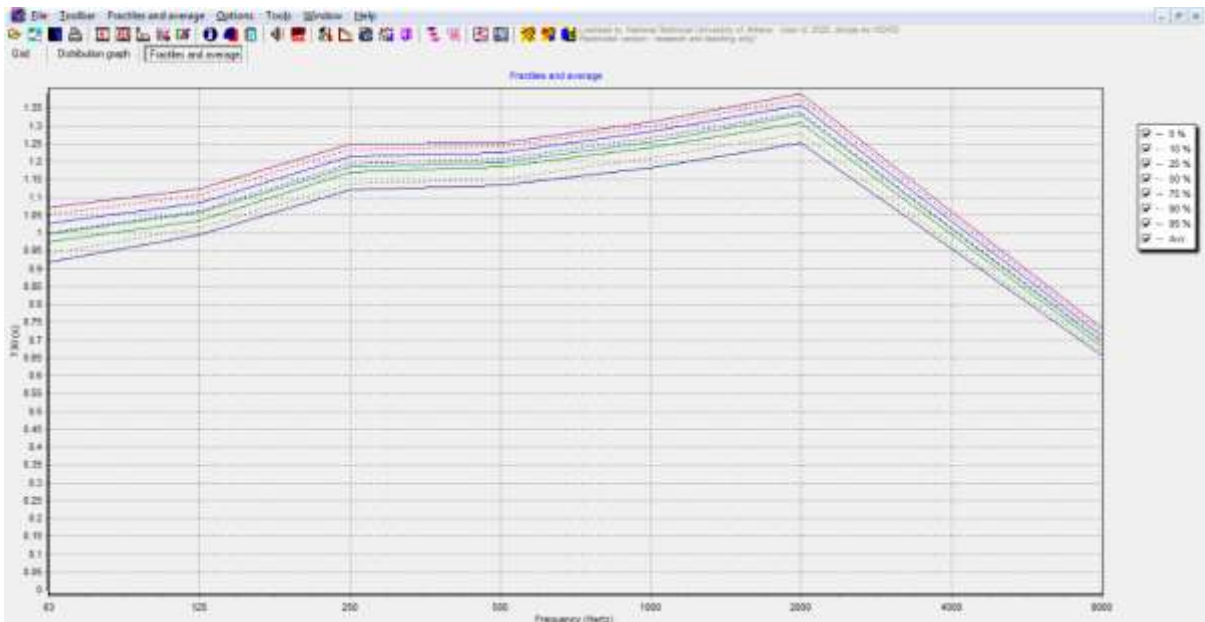


Διάγραμμα 6.1 19: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.1 20: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε την χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης στο χώρο των θεατών.



Διάγραμμα 6.1 21: Επι τοις εκατό στατιστική κατανομή του χρόνου αντήχησης στο χώρο ανά συχνότητα.

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε με μωβ χρώμα την καμπύλη του RT ανά συχνότητα του 95% των θέσεων των θεατών. Ομοίως φαίνεται με διαφορετικό χρώμα η επί τοις εκατό κατανομή του RT στο χώρο των θεατών. Η συνεχής πράσινη καμπύλη μας δίνει την μέση τιμή.

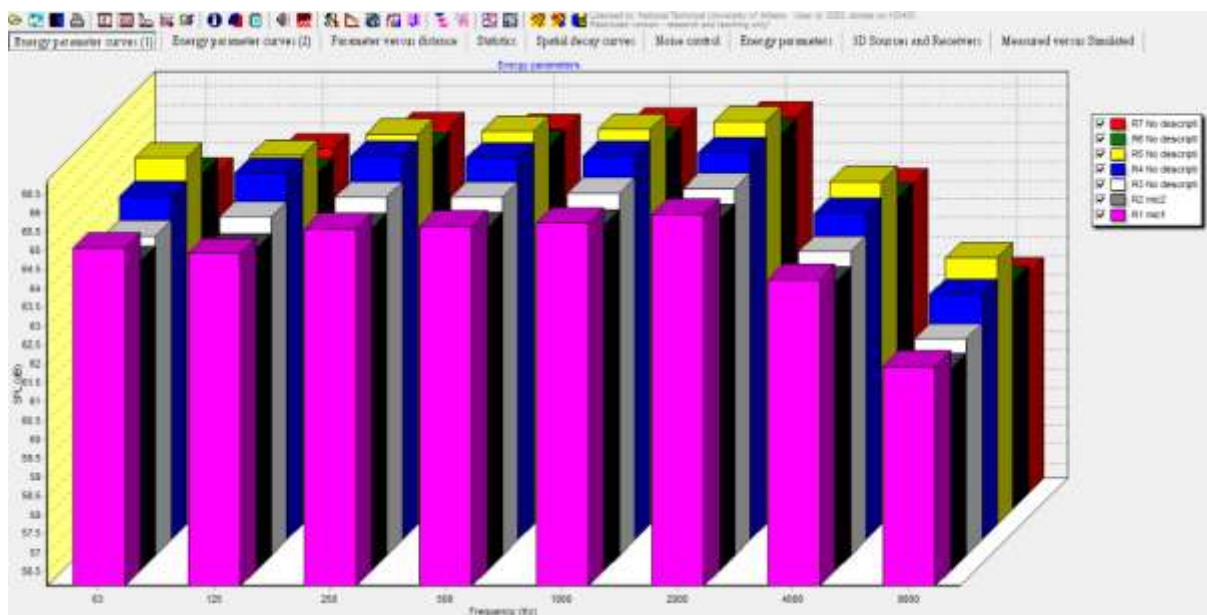
Από όλες τις μεθόδους προσομοίωσης το RT κρίνεται ικανοποιητικό αναφορικά με το μέγεθος του χώρου. Εξαίρεση αποτελούν τα 8kHz όπου οι τιμές του RT είναι αισθητά μικρότερες, οι οποίες όμως βρίσκονται έξω από το φάσμα της ανθρώπινης ομιλίας.

## 2. SPL

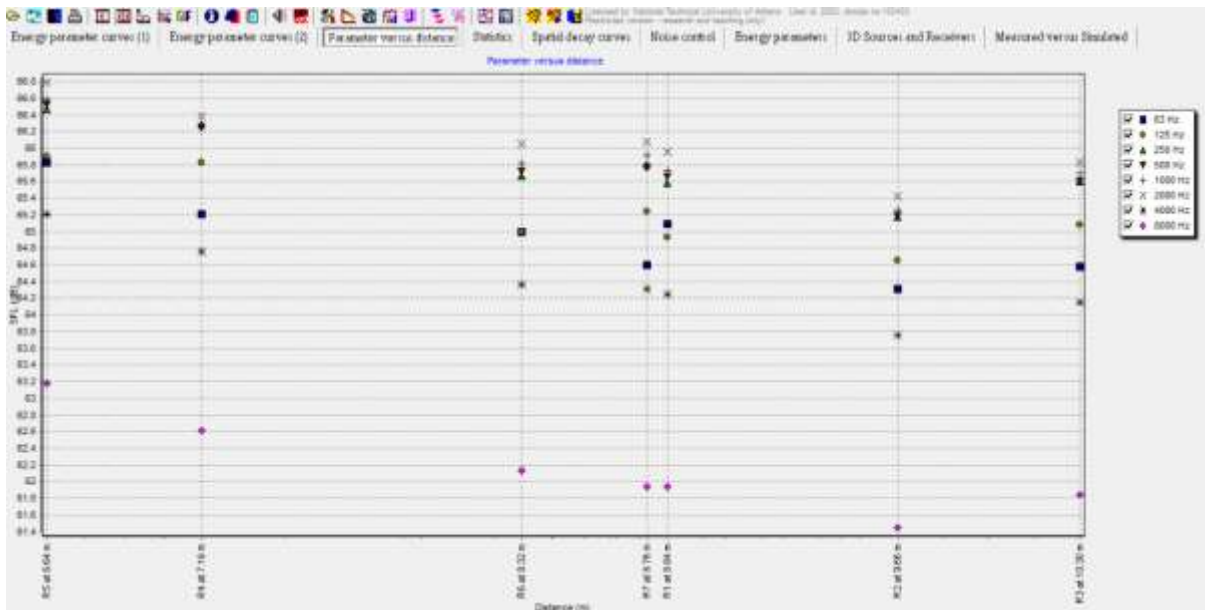
Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε πολυκατευθυντική πηγή με κέρδος 80dB ούτως ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η μέθοδος global estimate δε μας δίνει τιμές για το SPL.

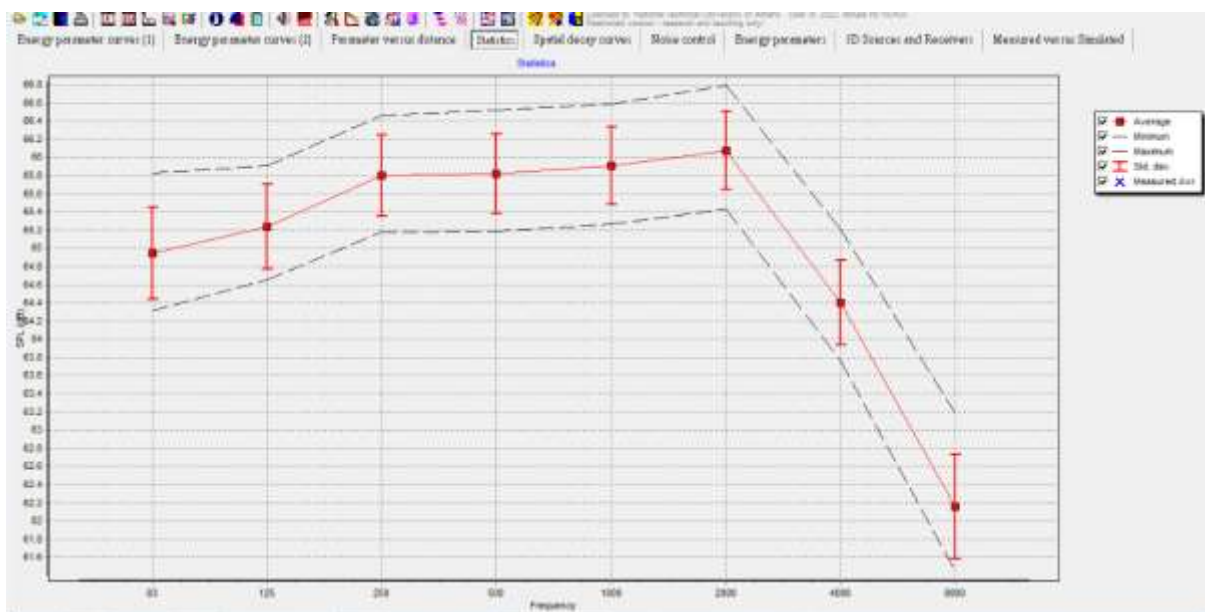
Παρακάτω φαίνεται ο υπολογισμός του SPL από τη χρήση του multi-point estimation ανά θέση και συχνότητα, ανά θέση και απόσταση και τέλος η μέγιστη τιμή, η ελάχιστη τιμή και ο μέσος όρος ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 6.122: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.1 23: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

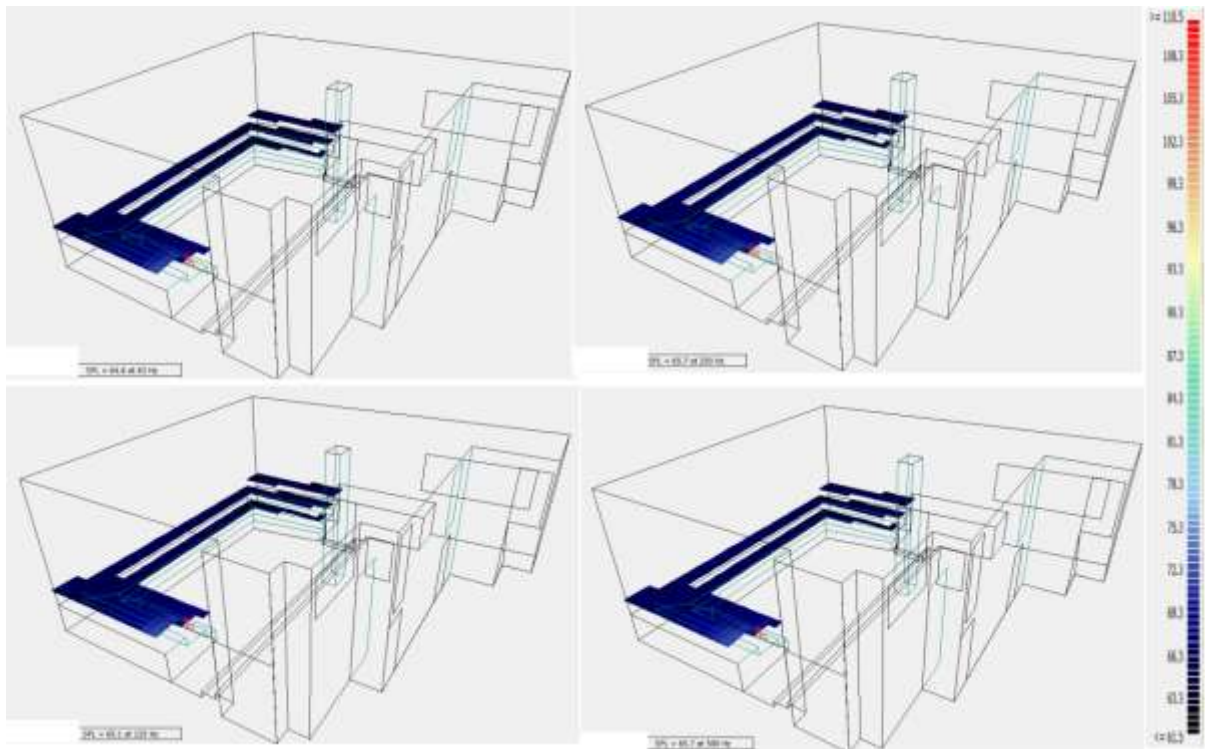


Διάγραμμα 6.1 24: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα.

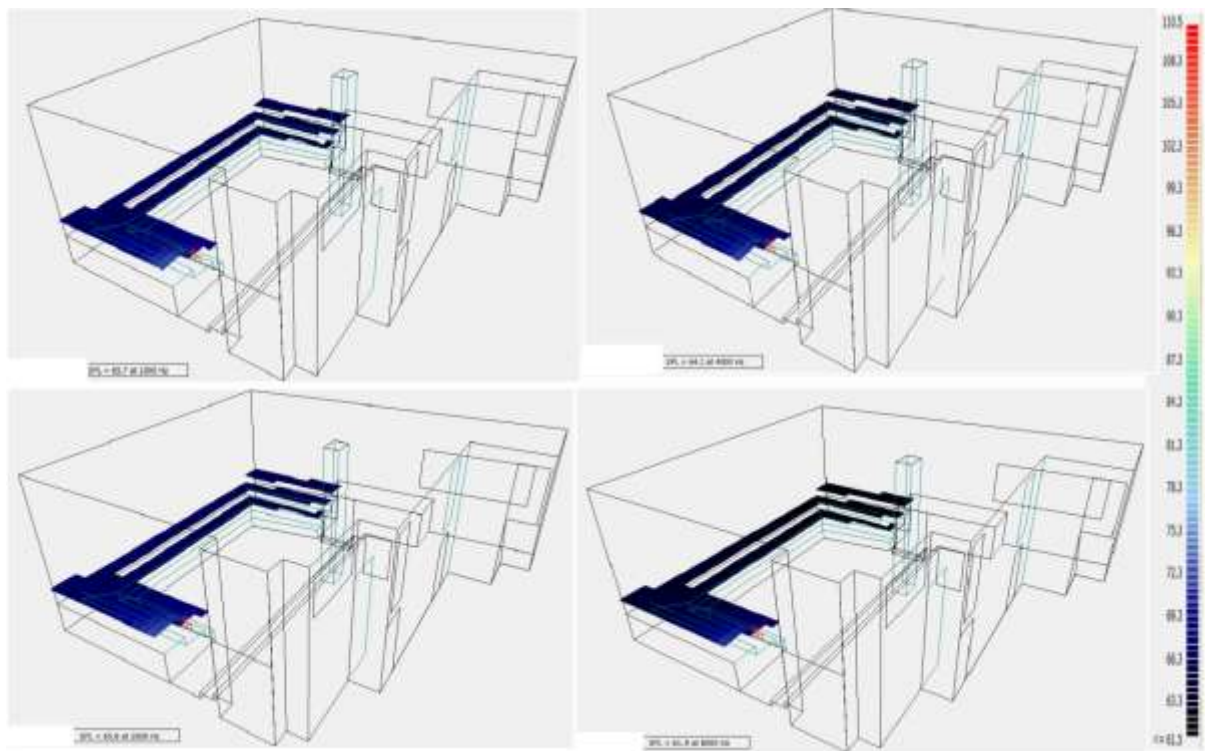
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις ακολουθούν την ίδια κατανομή ανά συχνότητα. Το SPL κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 64,3dB ως 66.8 dB και μόνο στα 8kHz παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις έχουν SPL λίγο χαμηλότερες τιμές. Παρ'όλα αυτά οι τιμές κρίνονται ικανοποιητικές.



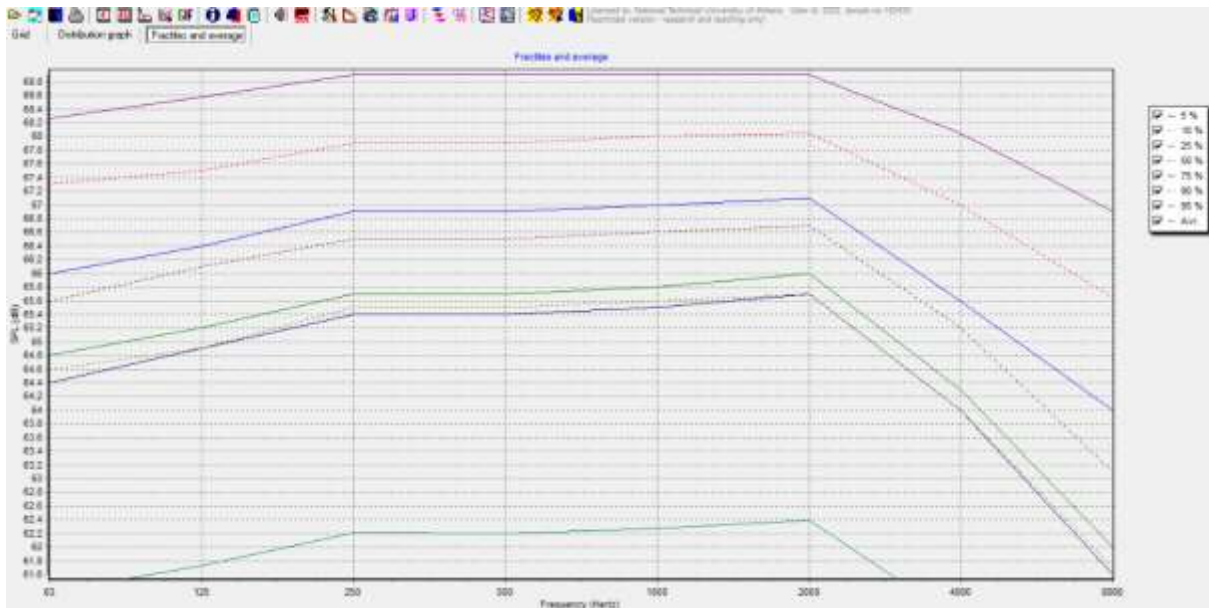
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα από τη μέθοδο Grid.



Διάγραμμα 6.1 25: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.1 26: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



Διάγραμμα 6.1 27: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα.

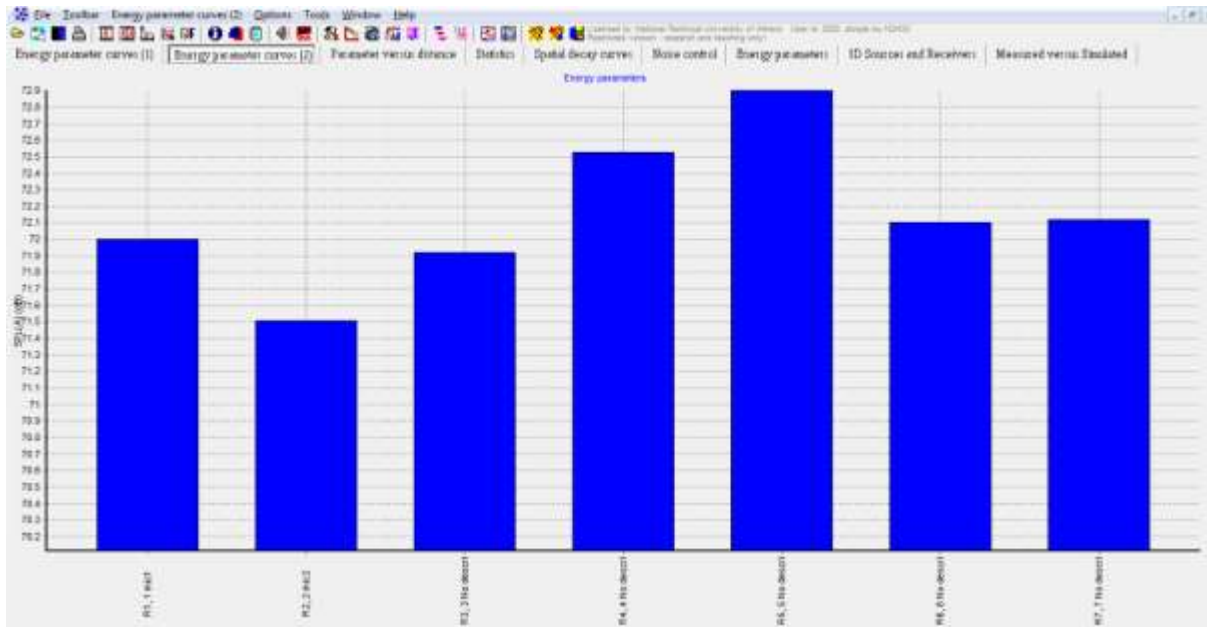
Στα Διαγράμματα 6.1.29 και 6.1.30 παρατηρούμε με χρωματική κλίμακα την τιμή του SPL για κάθε θεατή.

Στο τελευταίο διάγραμμα βλέπουμε με μωβ χρωμα την καμπύλη του SPL ανά συχνότητα του 95% των θέσεων των θεατών. Ομοίως φαίνεται με διαφορετικό χρώμα η επι τοις εκατό κατανομή του SPL στο χώρο των θεατών. Η συνεχής πράσινη καμπύλη μας δίνει την μέση τιμή.

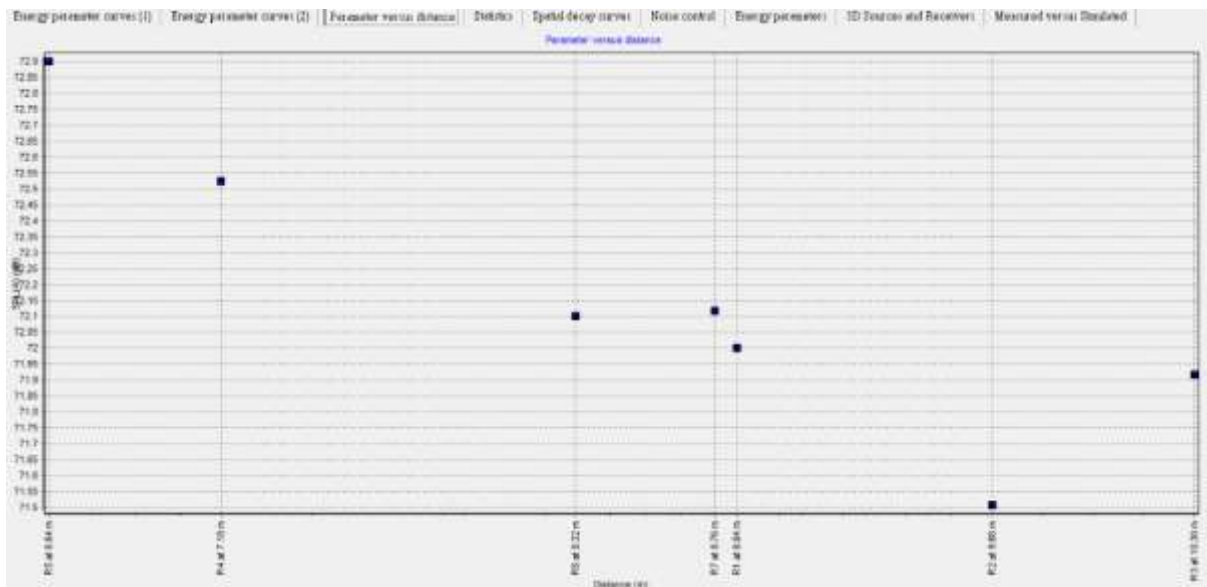
Από την προσομοίωση παρατηρούμε ότι η θέση 5 έχει τις υψηλότερες τιμές SPL, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς βρίσκεται πλησιέστερα στην πηγή. Επίσης οι θέσεις 1 και 6 έχουν περίπου ίσες τιμές καθώς βρίσκονται περίπου σε ίδια απόσταση από την πηγή. Τέλος παρατηρούμε ότι οι θέσεις 4, 7 και 3 έχουν ελαφρά μεγαλύτερο SPL από ότι αν δεν βρίσκονταν τόσο κοντά σε τοίχο.

### 3. LAeq

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

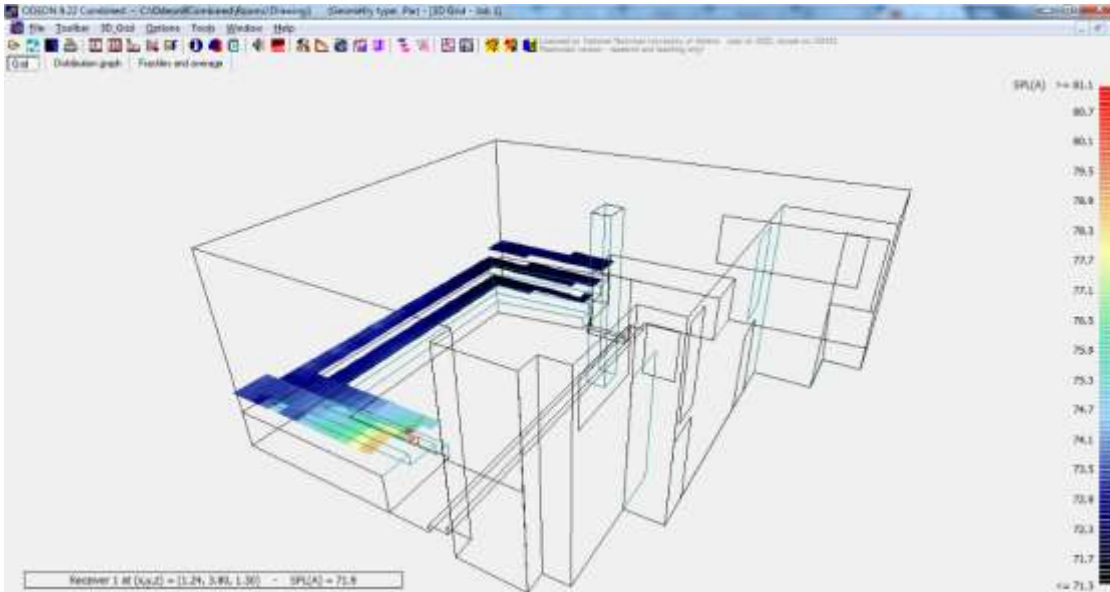


Διάγραμμα 6.1 28: Τιμές του LAeq ανά θέση.



Διάγραμμα 6.1 29: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



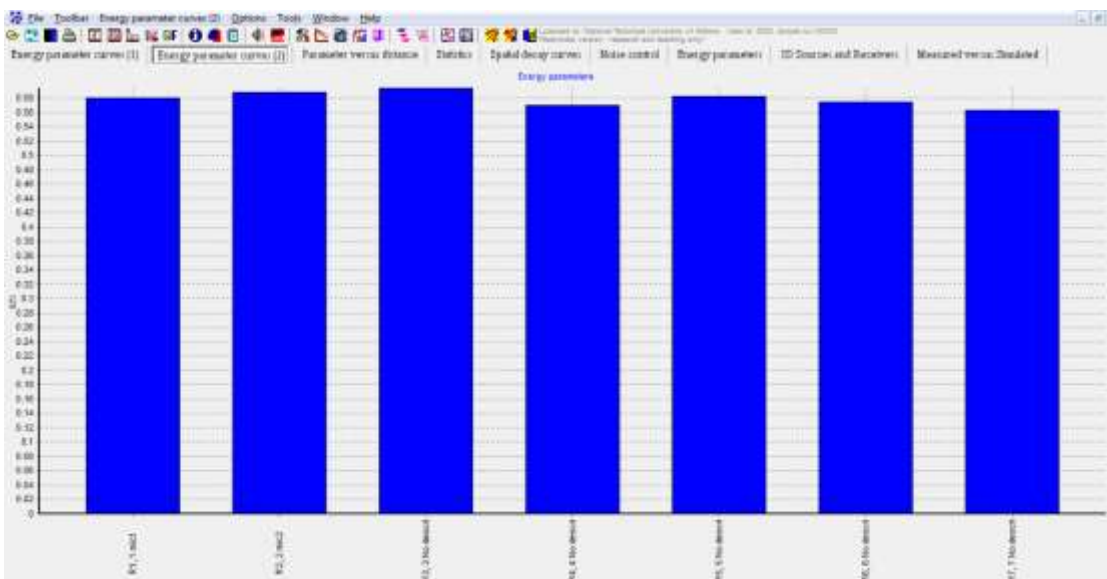
Διάγραμμα 6.1 30: : Grid ανάλυση του LAeq.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του LAeq είναι αντίστοιχα του SPL όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης οι θέσεις κοντά στο ηχείο έχουν τις τιμές αυτού σε dB και όσο απομακρυνόμαστε από αυτό παρατηρείται μια μικρή πτώση.

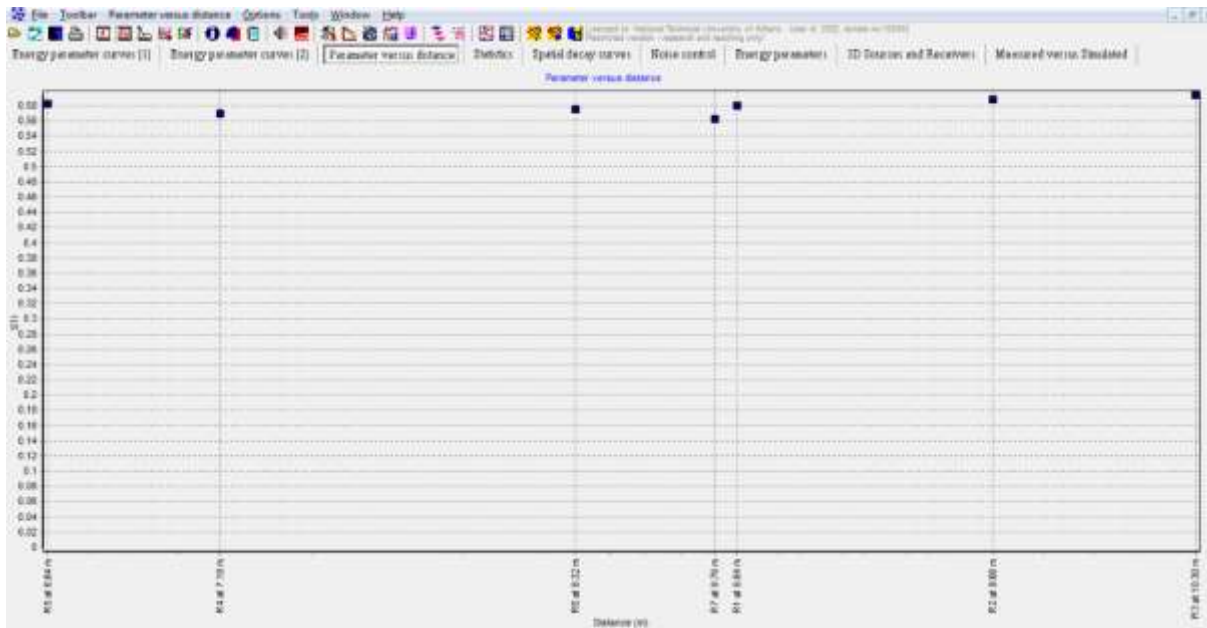
## Επιπλέον ακουστικά μεγέθη

### 1. STI/RASTI

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

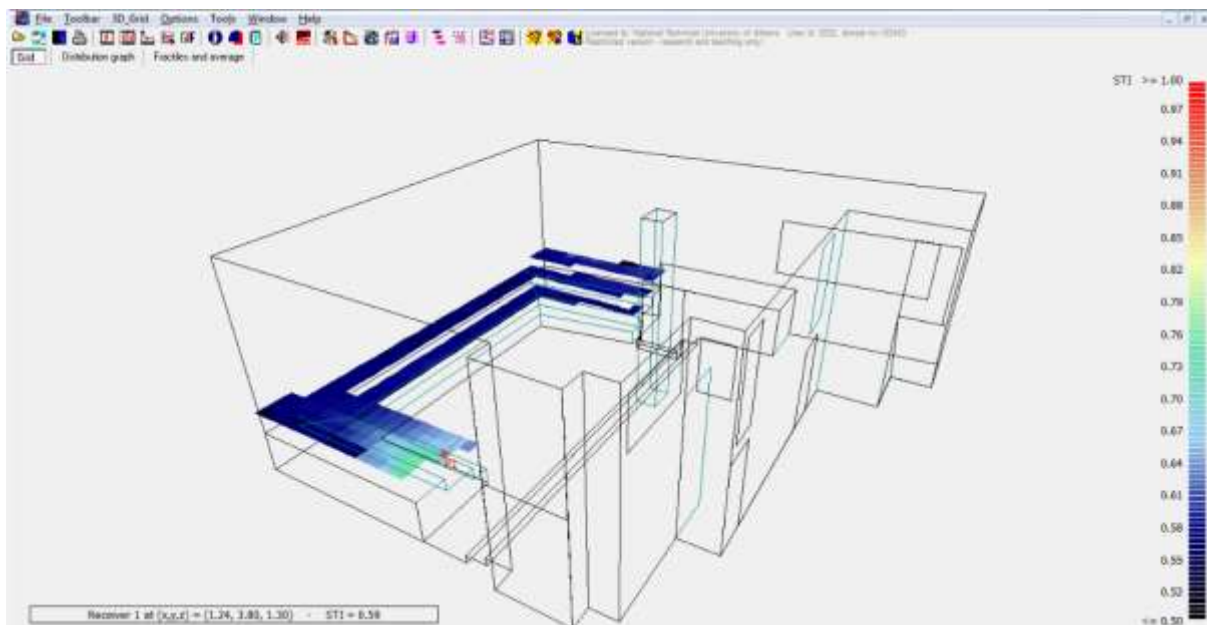


Διάγραμμα 6.1 31: Τιμές του STI ανά θέση.



Διάγραμμα 6.1 32: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.1 33: Grid ανάλυση του STI.

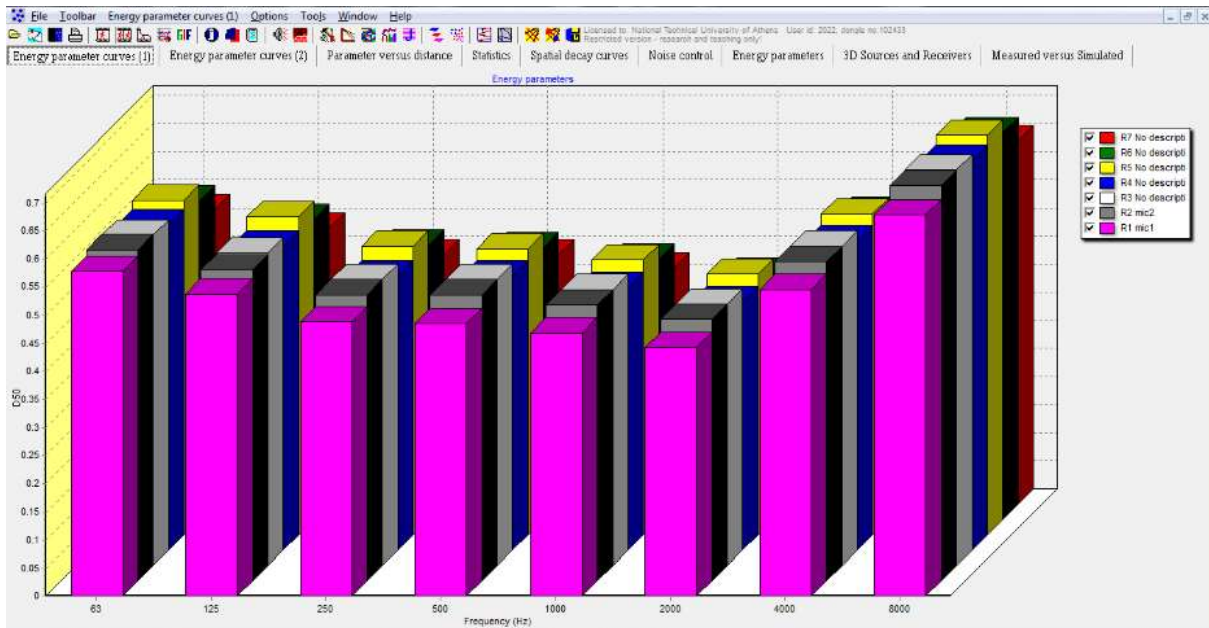
Η προσομοίωση μας δίνει τιμές για το STI κοντά στο ηχείο κοντά στο 0,7 και στις πιο μακρινές θέσεις των θεατών κοντά στο 0,58. Οι επιλεγμένες θέσεις που μελετάμε έχουν όλες την ίδια τιμή STI καθώς βρίσκονται κόντα μεταξύ τους.



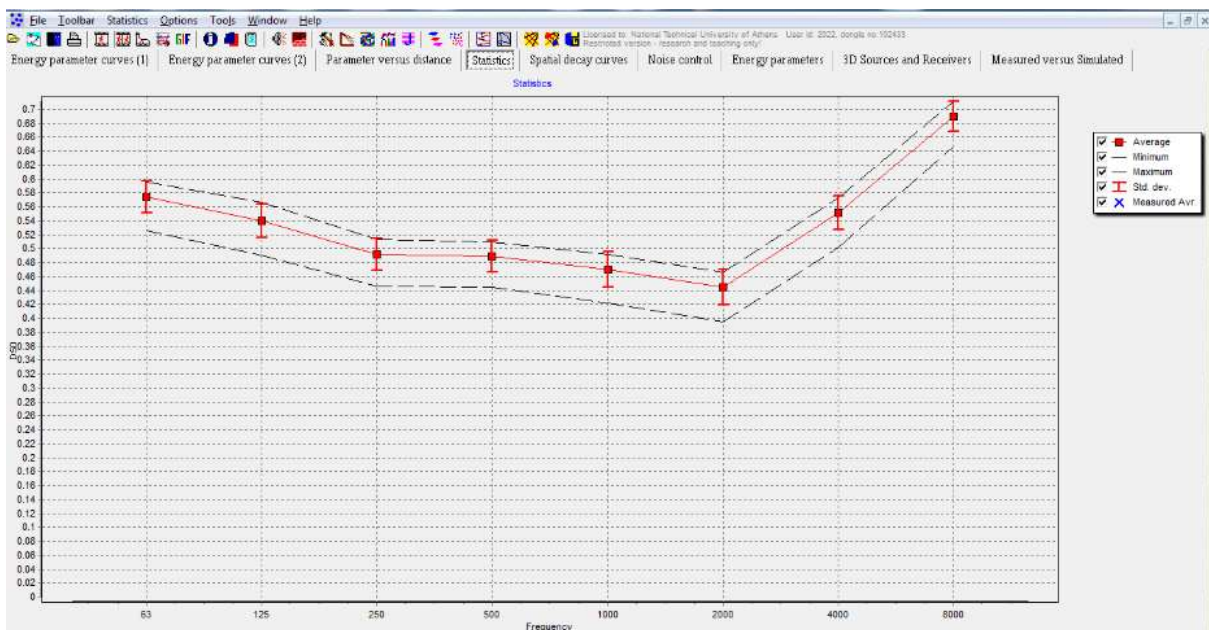
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καταληπτότητα κρίνεται ως καλή, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO.

## 2. D50, C80

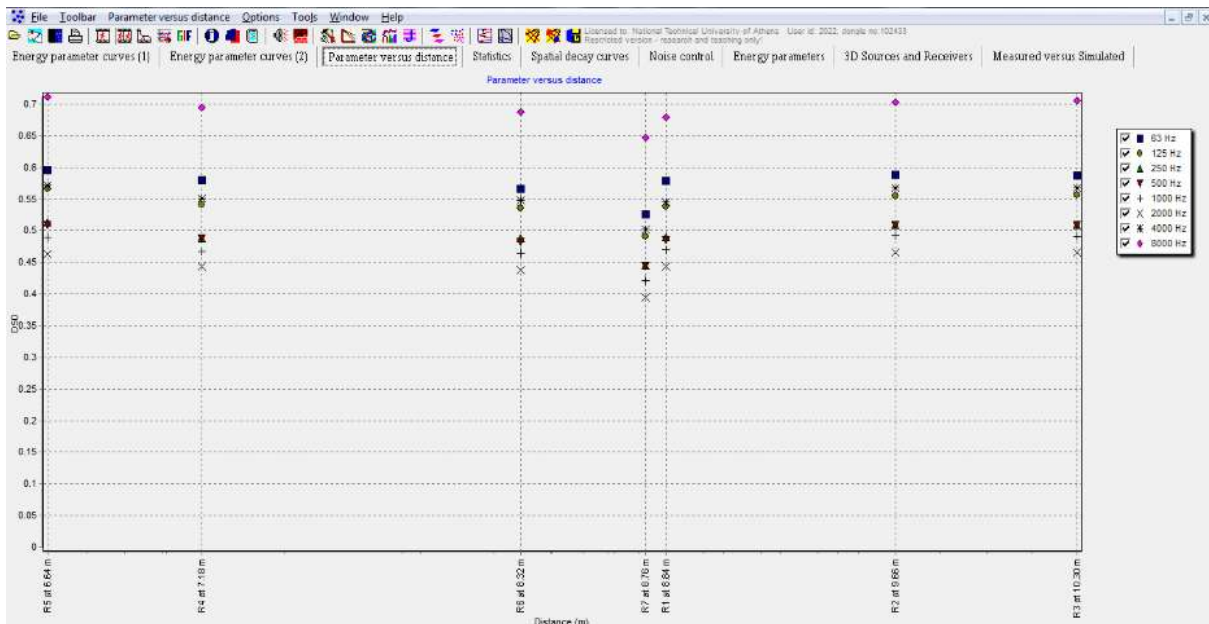
Υπολογισμός παραμέτρου D50 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.1 34: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).

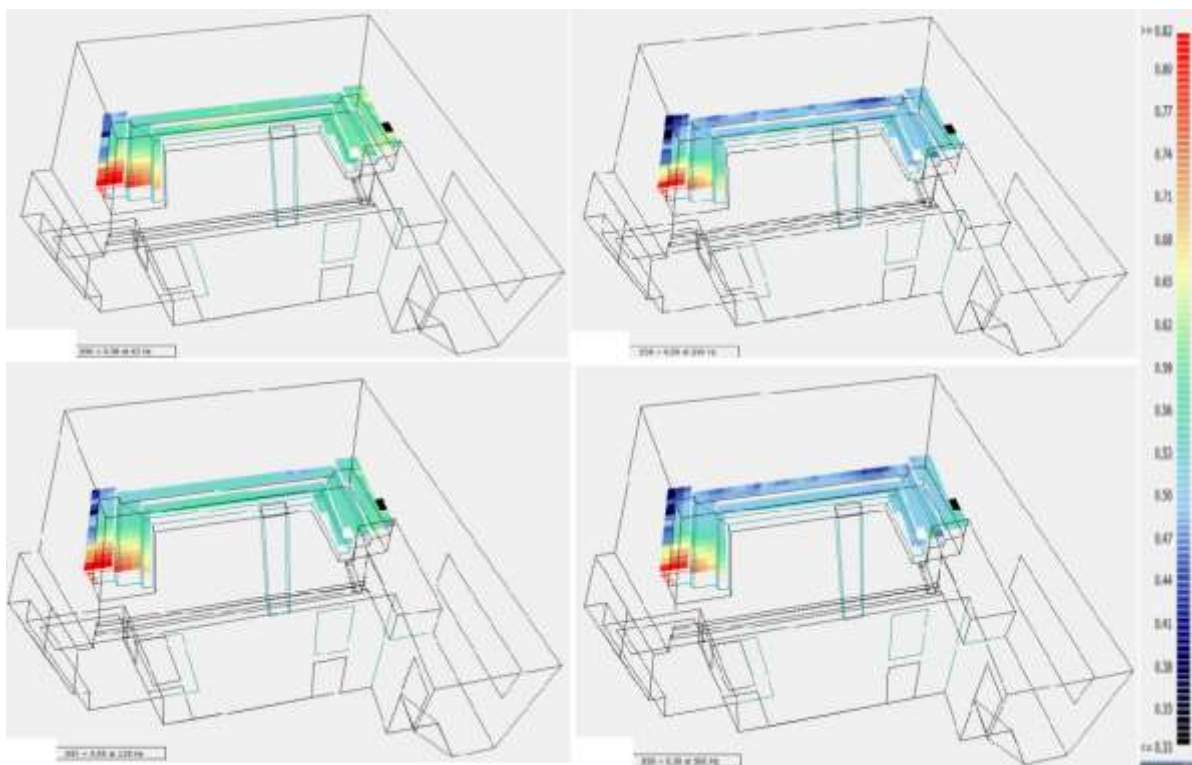


Διάγραμμα 6.1 35: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα.

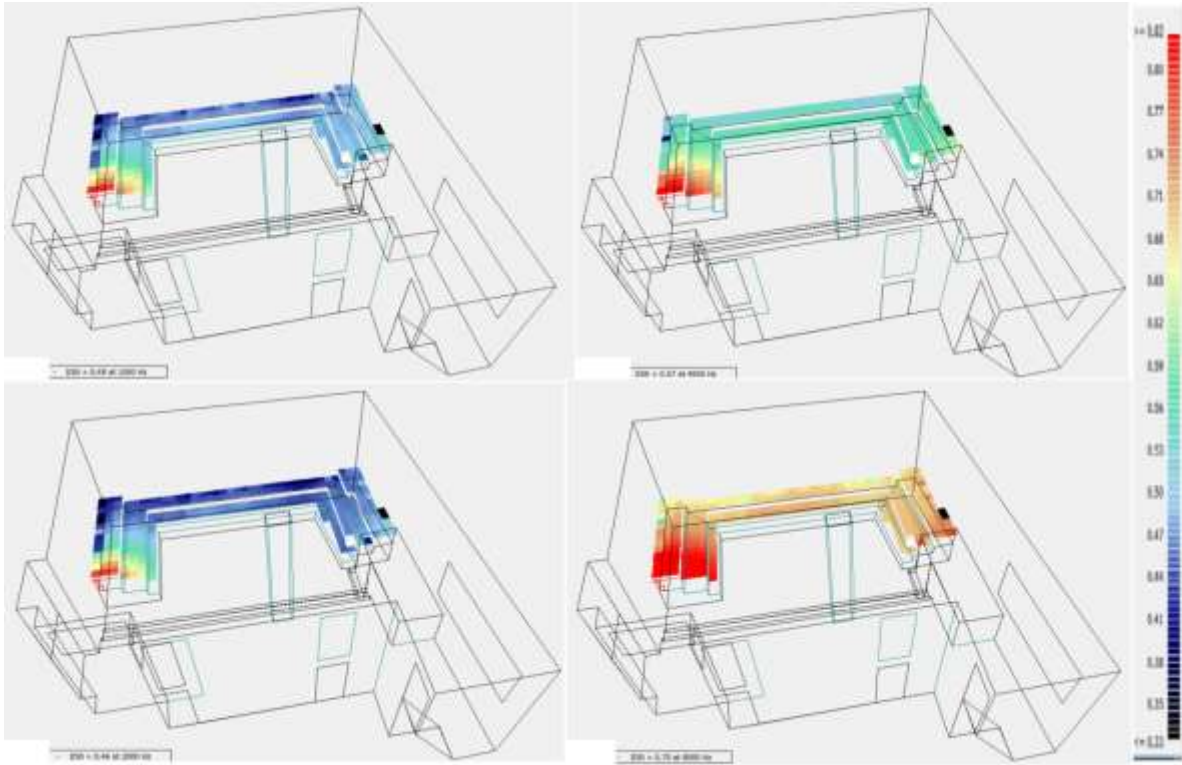


Διάγραμμα 6.1 36: Εκτίμηση του  $D_{50}$  συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

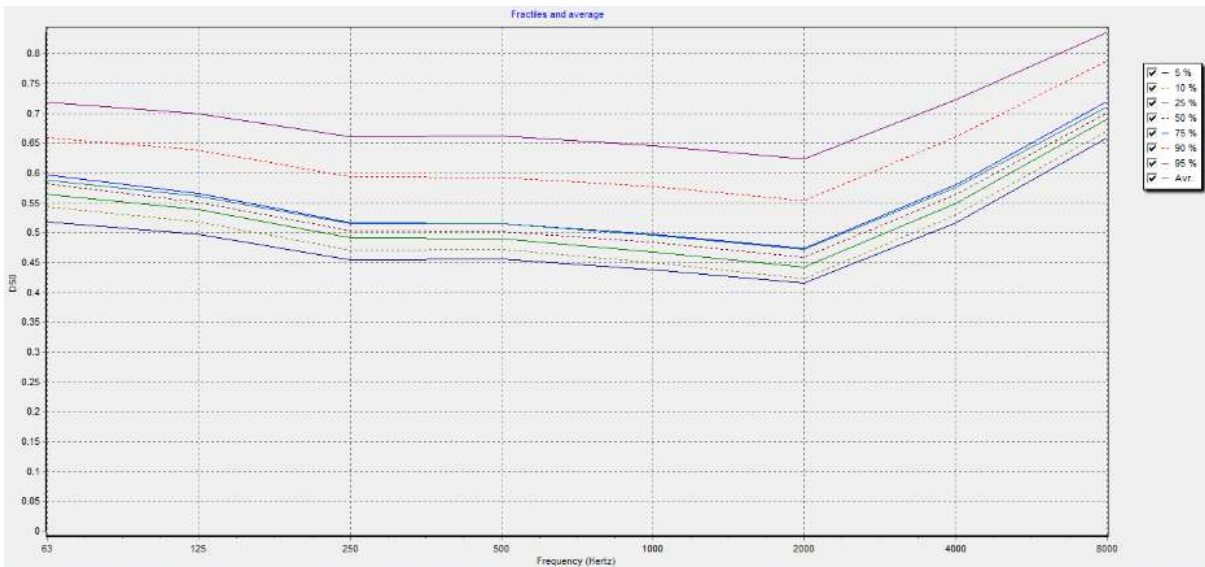
Η μέθοδος Grid για το  $D_{50}$  μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.1 37: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.1 38: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



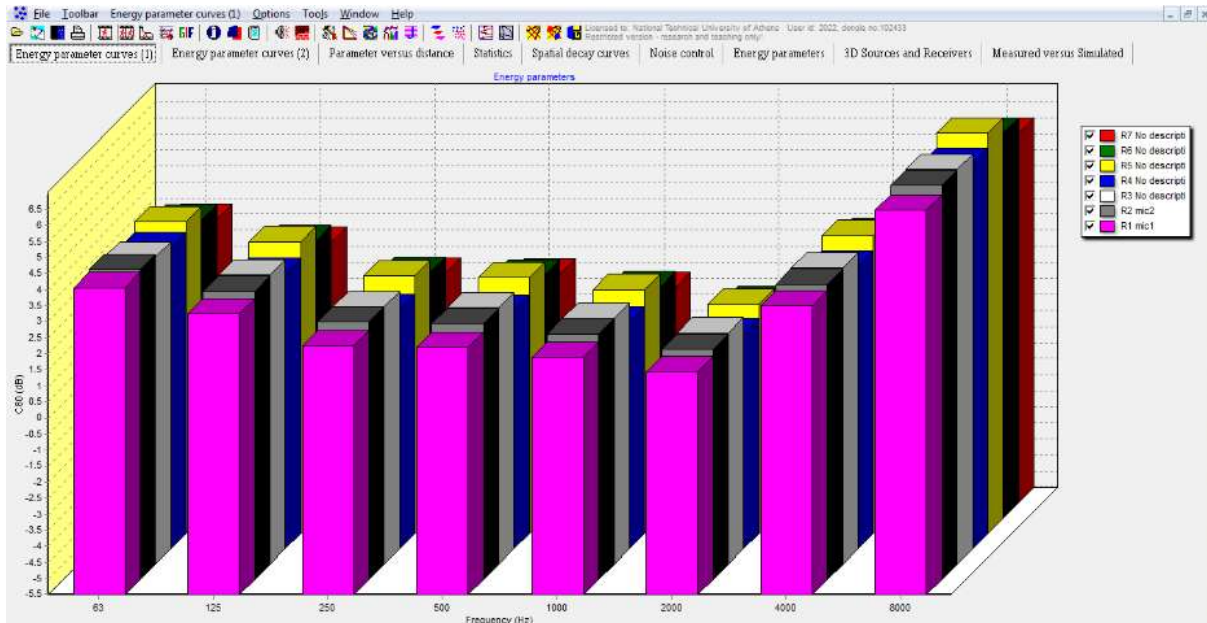
Διάγραμμα 6.1 39: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των επιλεγμένων θέσεων που μελετάμε για το μέγεθος D50 έχει ελάχιστη τιμή 0,5 στα 2000Hz και μέγιστη 0,68 στα 8000Hz. Η τιμή του D50 πέφτει όσο μεγαλώνει η συχνότητα μέχρι τα 2000Hz, ενώ μετά παρατηρείται απότομη αύξηση του μεγέθους. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα το D50 θα

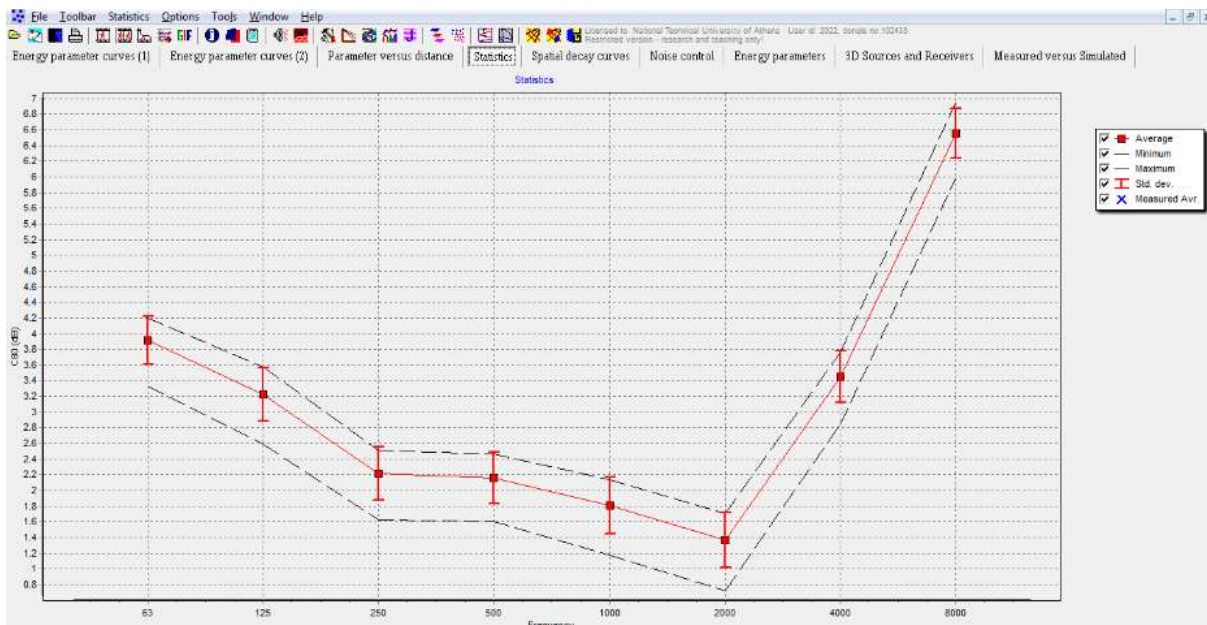


πρέπει να έχει τιμές μεγαλύτερες του 0,5, συνεπώς τα αποτελέσματά μας κρίνονται ικανοποιητικά.

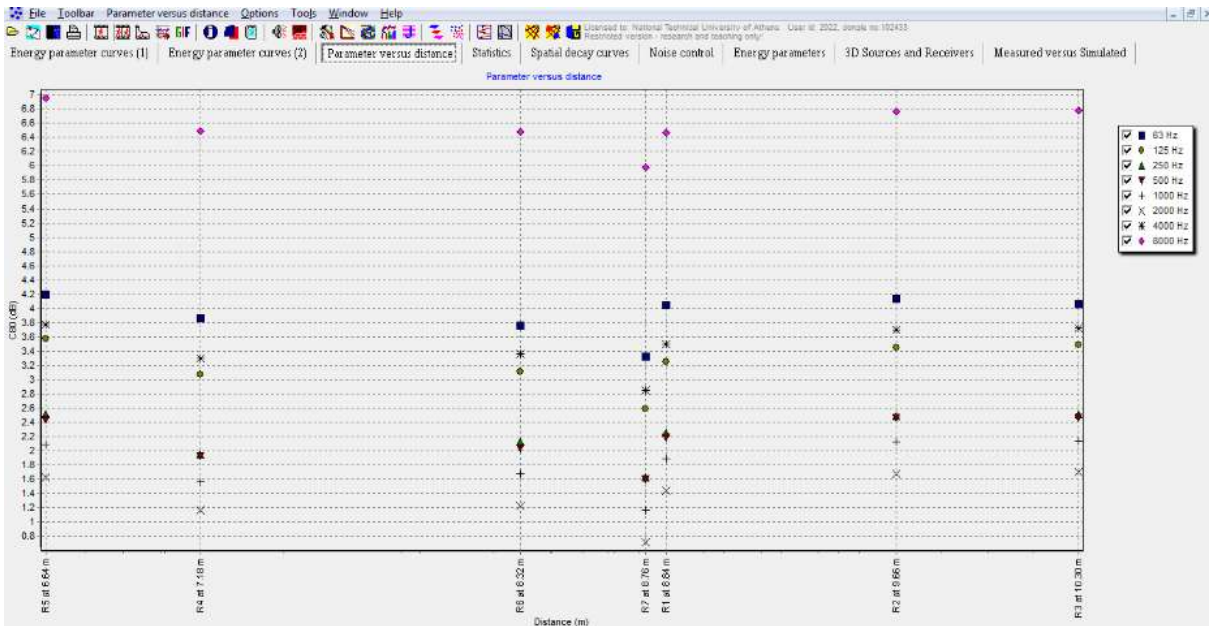
Υπολογισμός παραμέτρου C80 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.1 40: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).

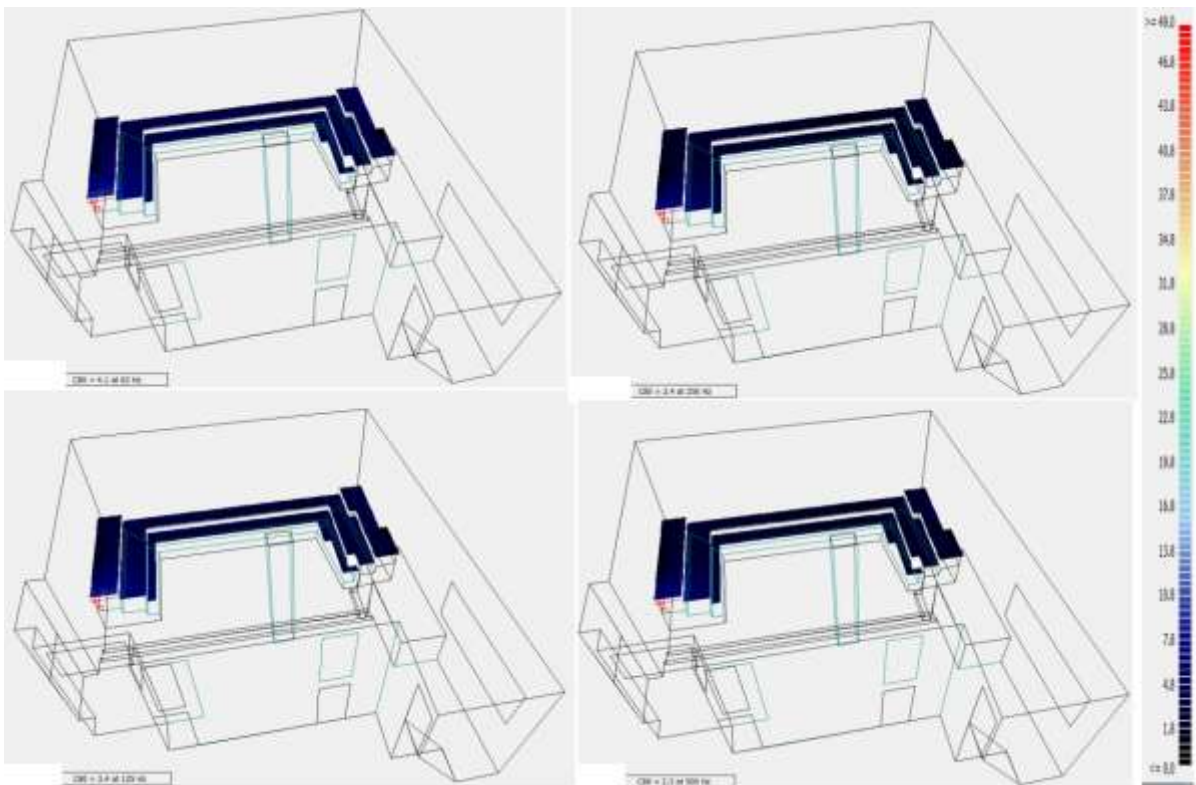


Διάγραμμα 6.1 41: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα.

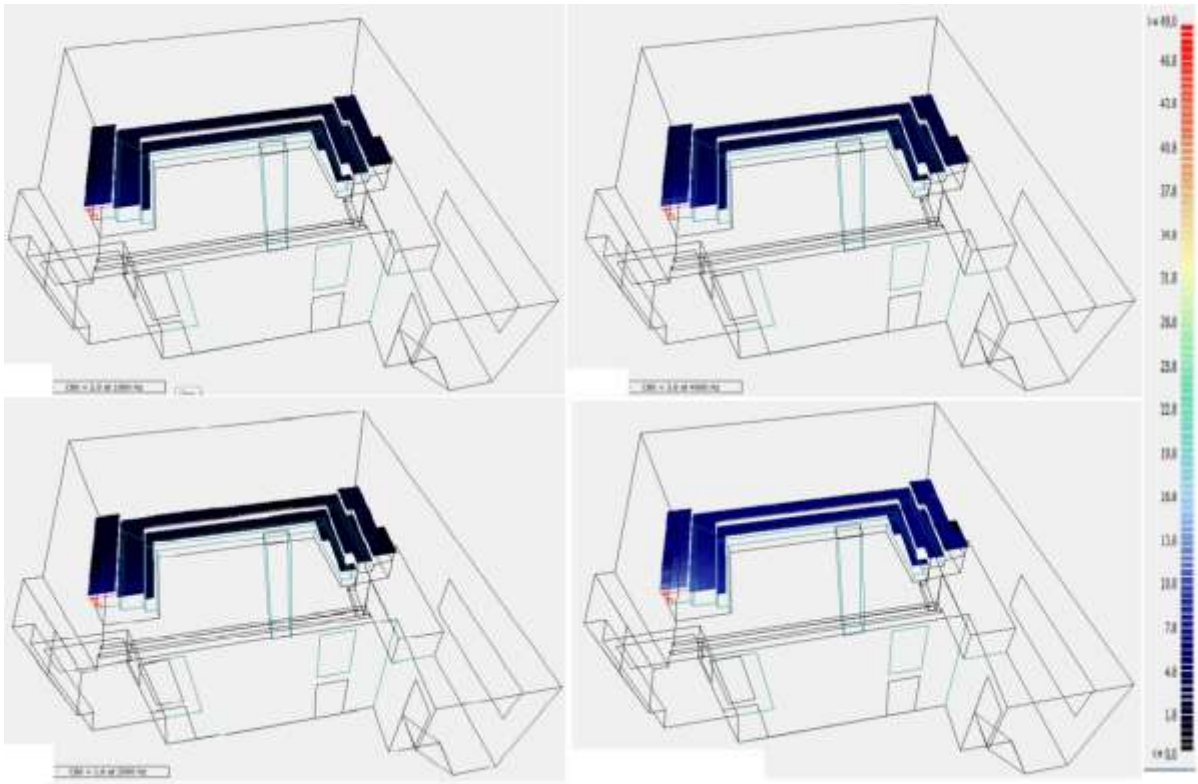


Διάγραμμα 6.142: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

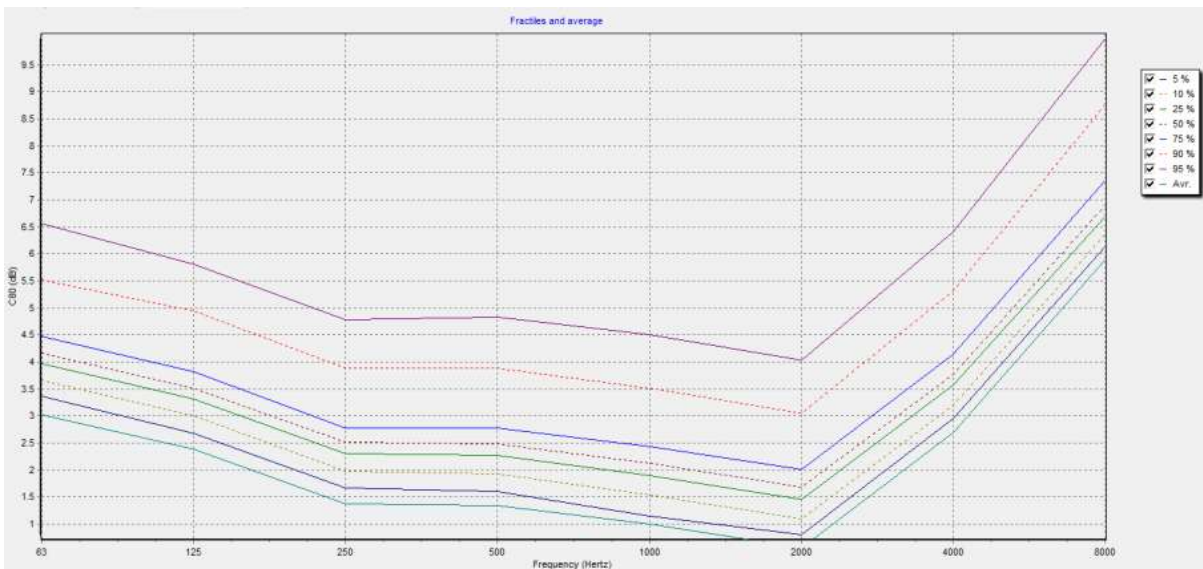
Η μέθοδος Grid για το C80 μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.143: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.1 44: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



Διάγραμμα 6.1 45: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα.

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα οι τιμές του C80 για θέατρα είναι από -1 έως 3dB.

Στα διαγράμματά μας παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των επιλεγμένων θέσεων που μελετήσαμε παρουσιάζει ελάχιστη τιμή 1,4 στα 2000 HZ και μέγιστη τιμή 6,6 στα 8000 HZ. Οι αποδεκτές τιμές είναι μεταξύ των συχνοτήτων 250 Hz και 2000 Hz ανεξαρτήτως θέσεως.



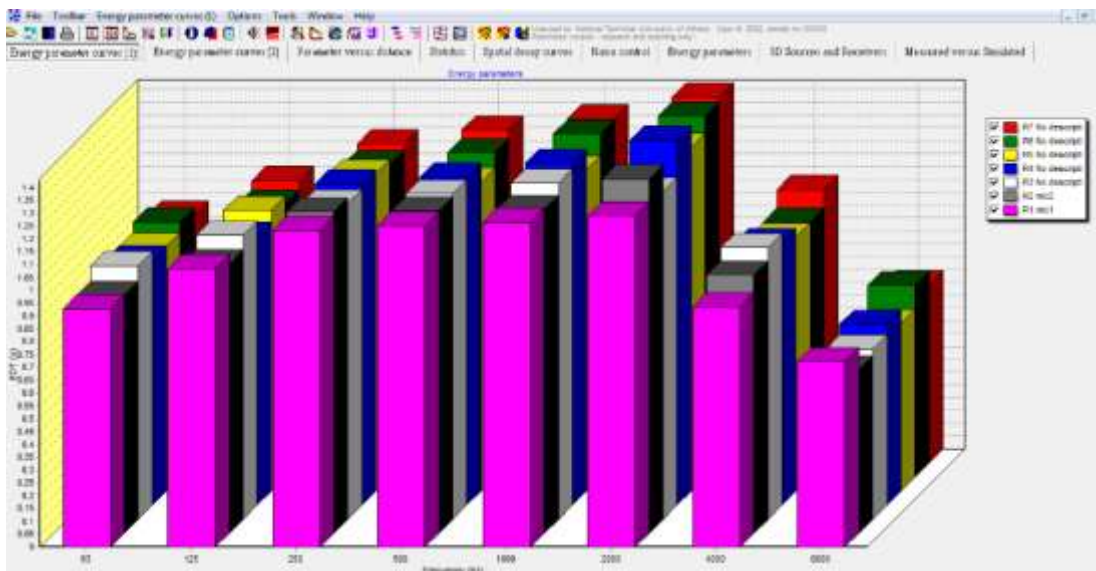
Για την συχνότητα των 125Hz μόνο οι θέσεις 1 και 7 βρίσκονται εντός των τιμών. Στα 4000Hz μόνο η θέση 7 βρίσκεται εντός ορίων.

Οι υπόλοιπες θέσεις στις συχνότητες των 125 και 4000Hz βρίσκονται πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 3dB. Για τις υπόλοιπες συχνότητες (63Hz και 8000Hz) οι τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες ανεξαρτήτως θέσης.

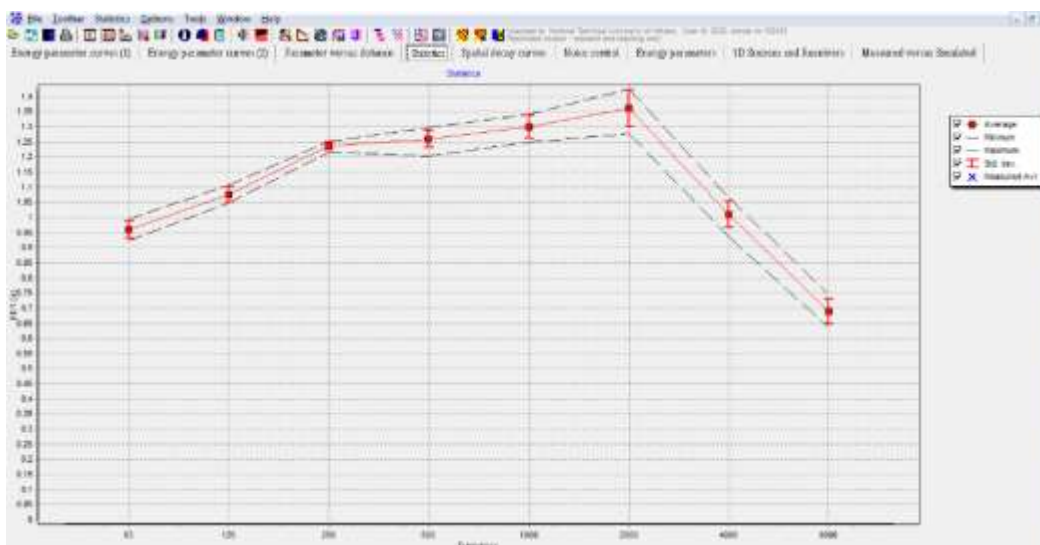
Παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες τιμές βρίσκονται στις θέσεις 6, 7 και 1.

### 3. EDT

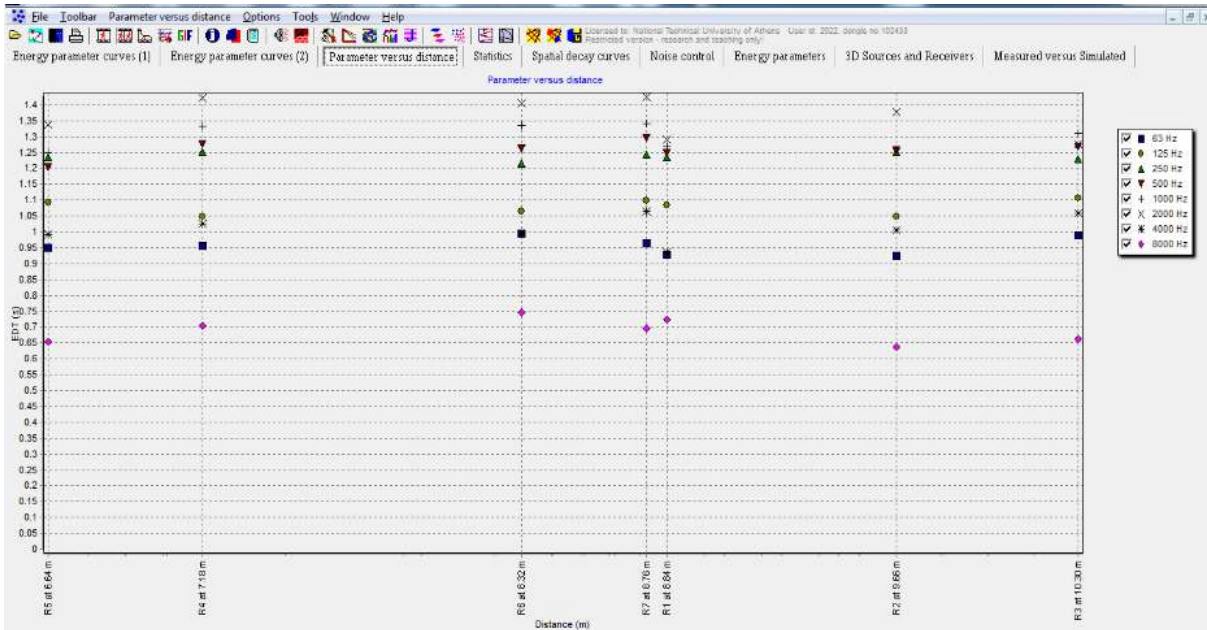
Υπολογισμός παραμέτρου EDT με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.1 46: Εκτίμηση του EDT ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).

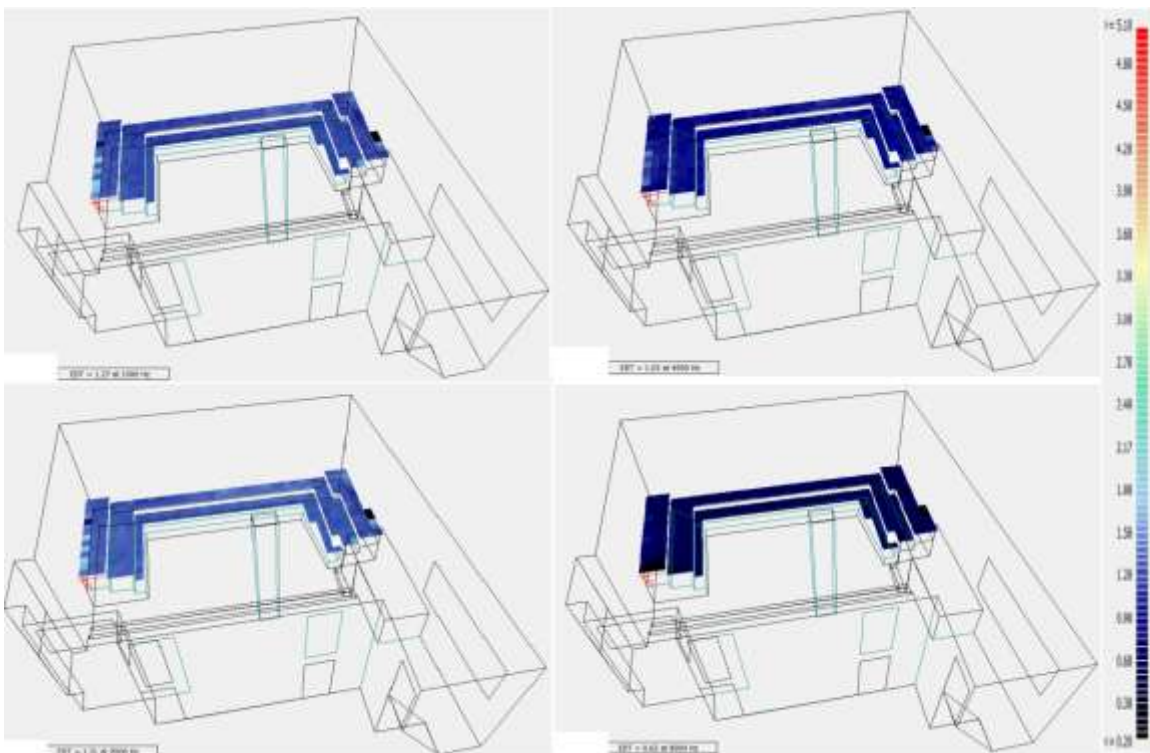


Διάγραμμα 6.1 47: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα.

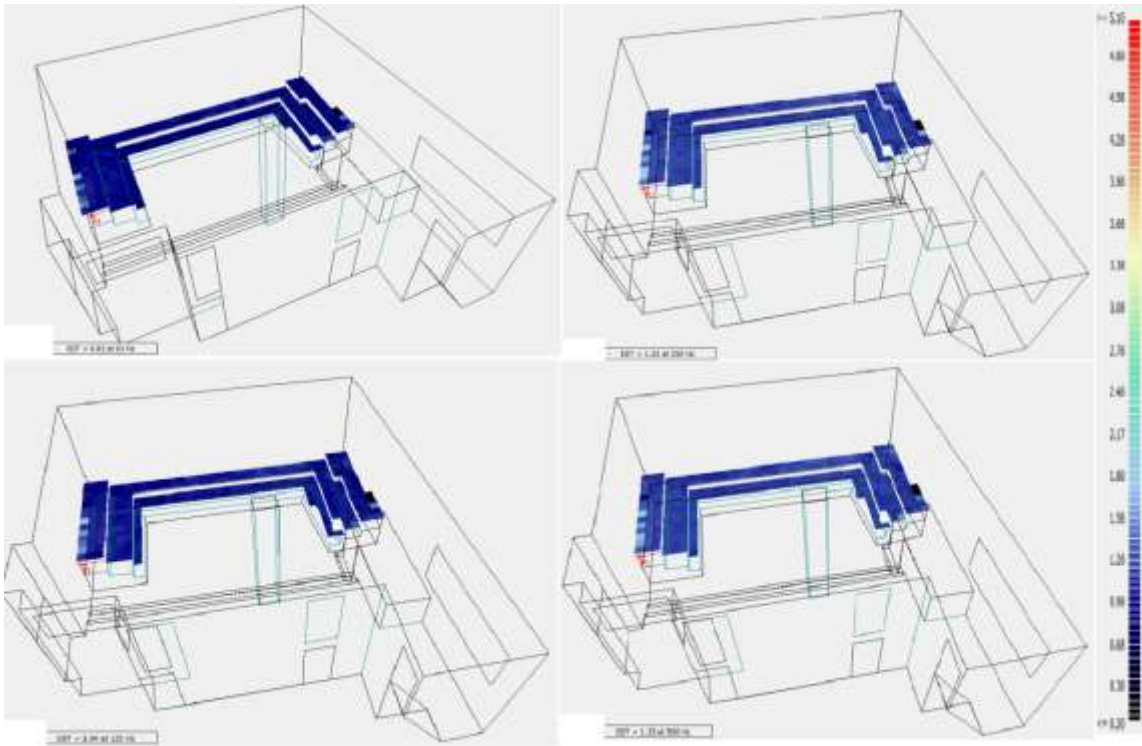


Διάγραμμα 6.1 48: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα

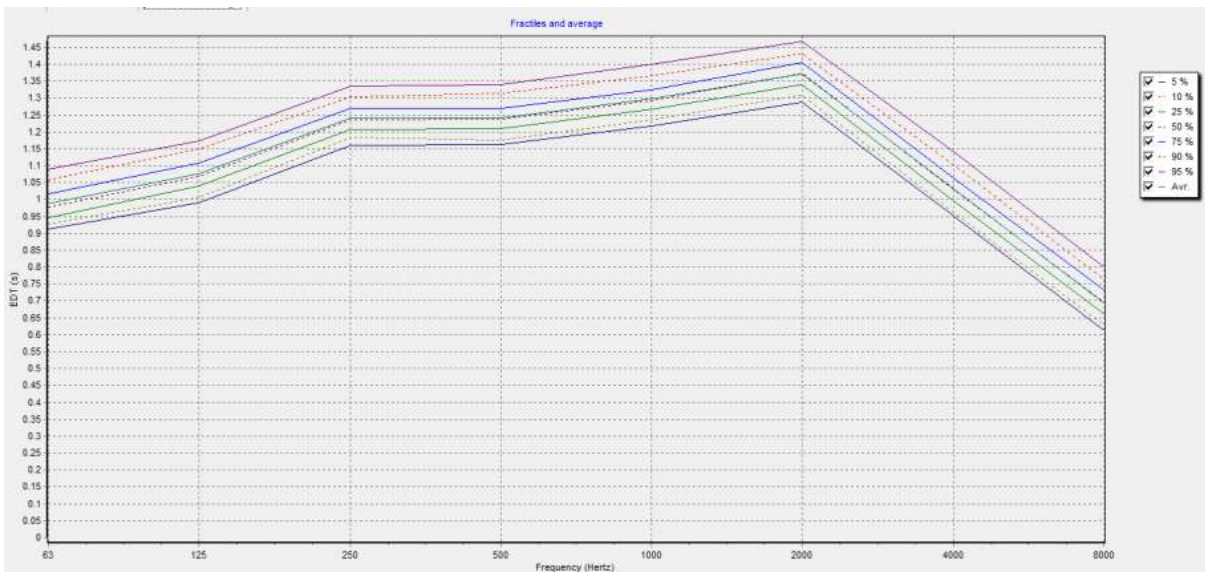
Η μέθοδος Grid για το EDT μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.1 49: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.1 50: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



Διάγραμμα 6.1 51: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα.

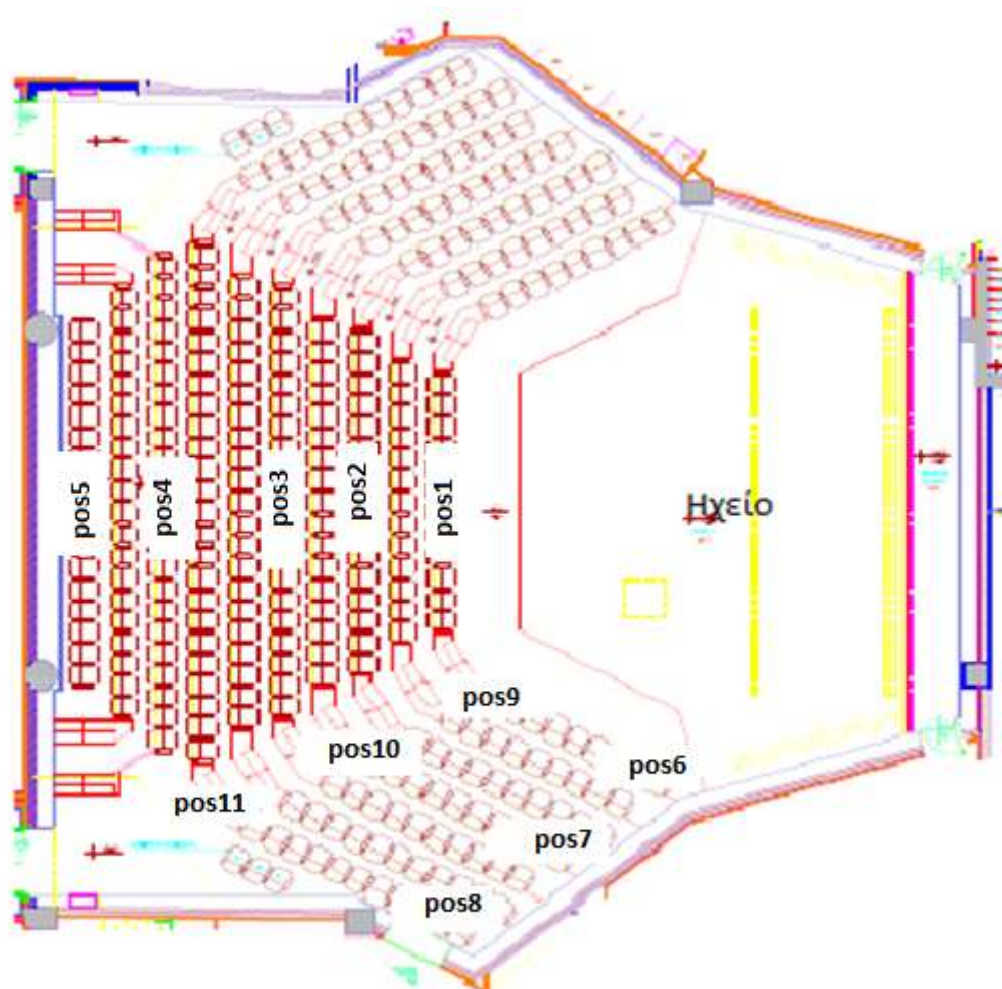
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές σε όλες τις επιλεγμένες θέσεις είναι πάνω από 1s και λίγο πιο μεγάλες από το RT. Το υψηλό EDT μας δείχνει ότι ο χώρος του Βαφείου είναι αρκετά ζωντανός και με σχετικά μεγάλη αντήχηση.



## 2. Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης

Το Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης είναι κοινωφελές ίδρυμα που στήθηκε το 2004 από τον Μιχάλη Κακογιάννη, ενώ από το 2009 λειτουργεί το πολιτιστικό κέντρο που βρίσκεται στην οδό Πειραιώς 206, Ταύρος. Η αίθουσα η οποία μελετήσαμε έχει χωρητικότητα 250 θέσεων και βρίσκεται στον 1<sup>ο</sup> όροφο μακριά από τον δρόμο.

Οι θέσεις των μικροφώνων και του ηχείου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.2.1: Κάτοψη θέσεων μικροφώνων και ηχείου στο Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης κατά τις μετρήσεις.

Οι αναλύσεις όλων των παραμέτρων έγιναν σε οκταβική ανάλυση ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του προγράμματος ODEON, το οποίο επεξεργάζεται τα σήματα σε οκταβική ανάλυση μόνο.

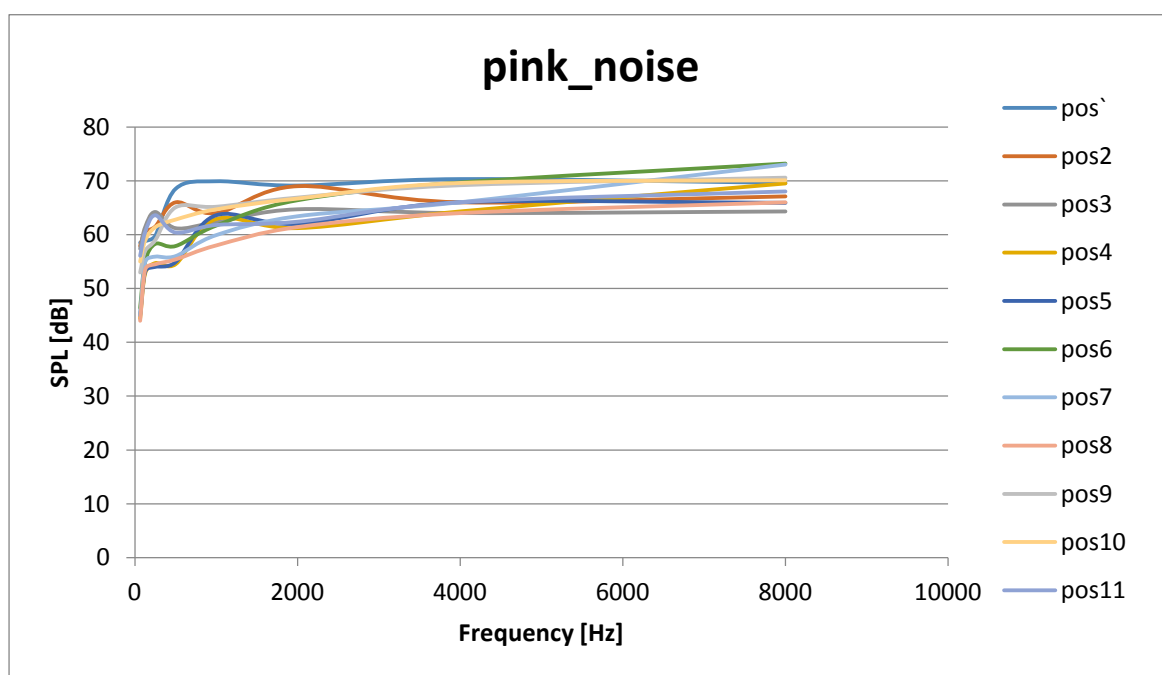
## Μετρήσεις

### 1. Φασματική κατανομή

Ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη που μελετάται σε ένα χώρο είναι η συχνοτική κατανομή του ήχου στο χώρο αυτό. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) σε dB, καθώς μας δείχνει πόσο καλά κατανέμεται ο ήχος ανά συχνότητα και το μέγεθος LAeq(dB), το οποίο μας δείχνει τη στάθμη του ισοδύναμου θορύβου ανά σημείο, κατά φίλτρο A.

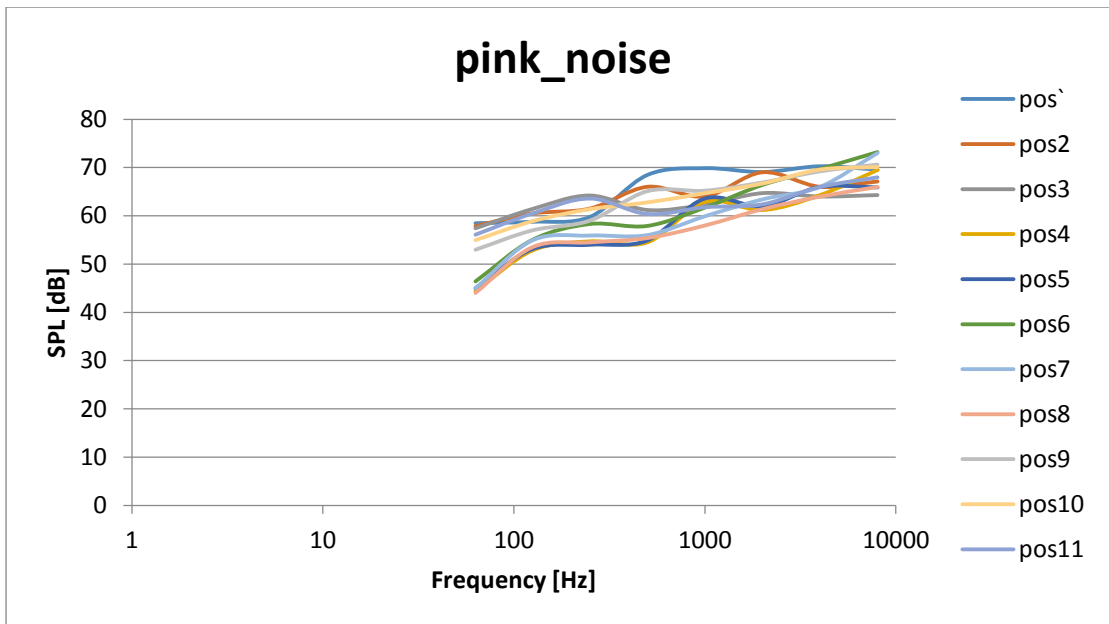
Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν μέσω δύο σημάτων εισόδου, pink noise και white noise. Τα σήματα αυτά, μετά από επεξεργασία στο πρόγραμμα Matlab μας έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Ακολουθούν οι μετρήσεις με σήματα εισόδου αρχικά Pink\_noise και στη συνέχεια White\_noise σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.



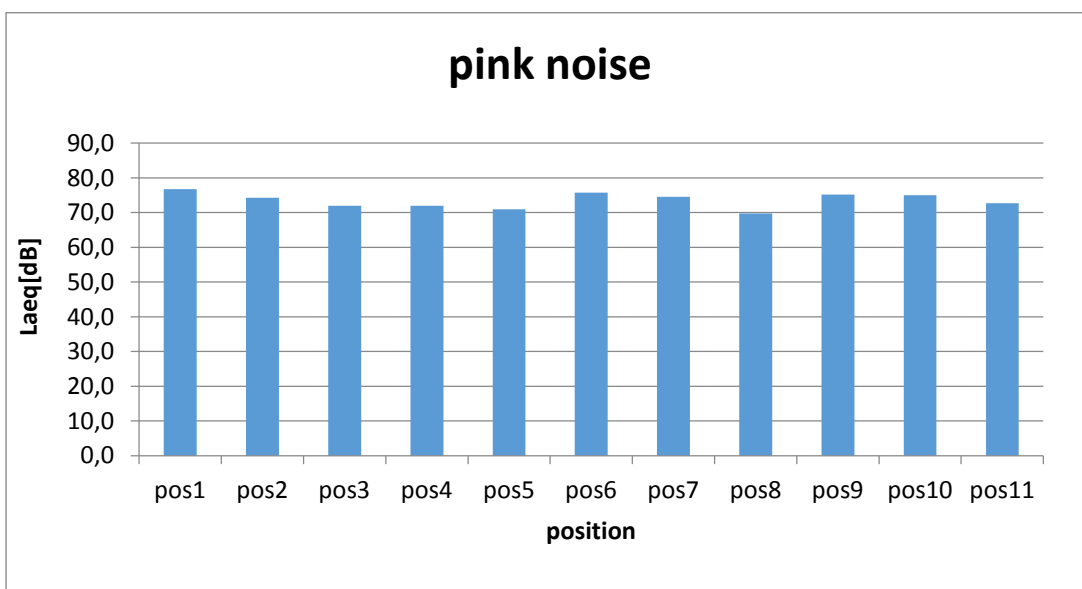
Διάγραμμα 6.2. 1 : Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη.





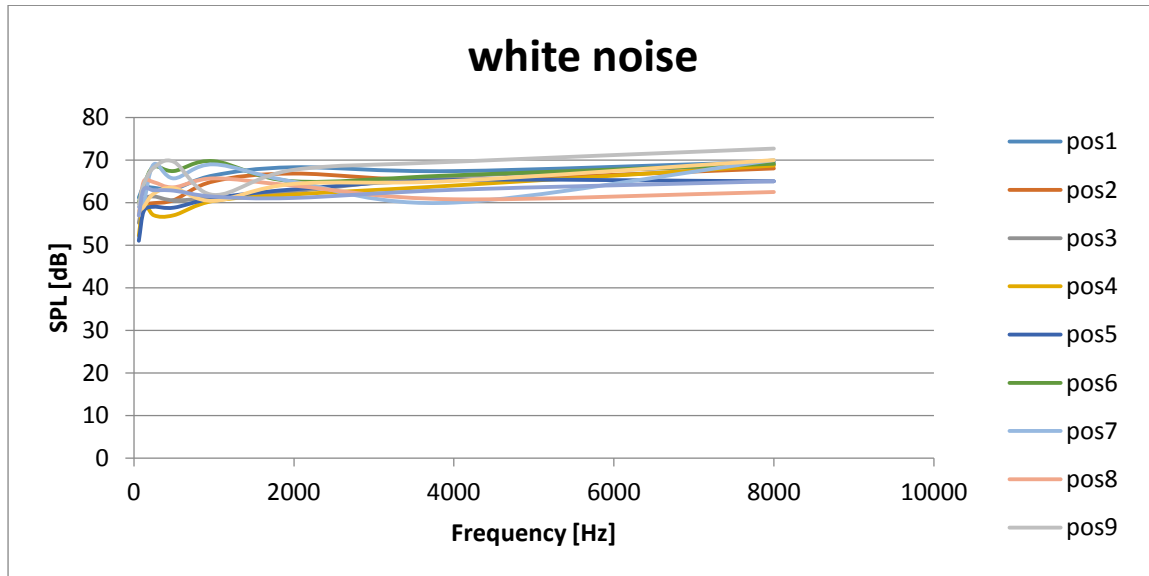
Διάγραμμα 6.2. 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι η φασματική κατανομή του ροζ θορύβου στο χώρο δεν ακολουθεί την θεωρητική καμπύλη όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Σύμφωνα με αυτή θα αναμέναμε μια συνεχή πτώση της στάθμης θορύβου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως παρατηρείται μια μικρή αύξηση των τιμών του SPL με την αύξηση της συχνότητας.

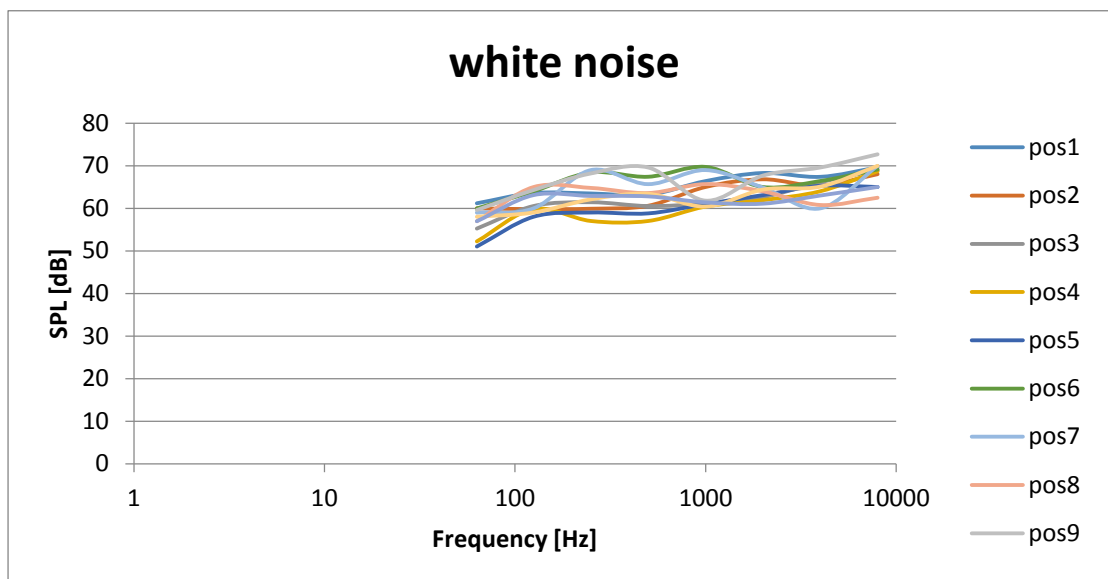


Διάγραμμα 6.2. 3: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για ροζ θόρυβο του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Από το διάγραμμα του LAeq παρατηρούμε μια σταθερή κατανομή ανά σειρά των μετρούμενων θέσεων. Παρατηρούμε ότι οι θέσεις 1, 6 και 9 έχουν την ίδια τιμή LAeq καθώς βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή. Οι υπόλοιπες θέσεις παρουσιάζουν μια συνεχή πτώση της τιμής του LAeq καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν.



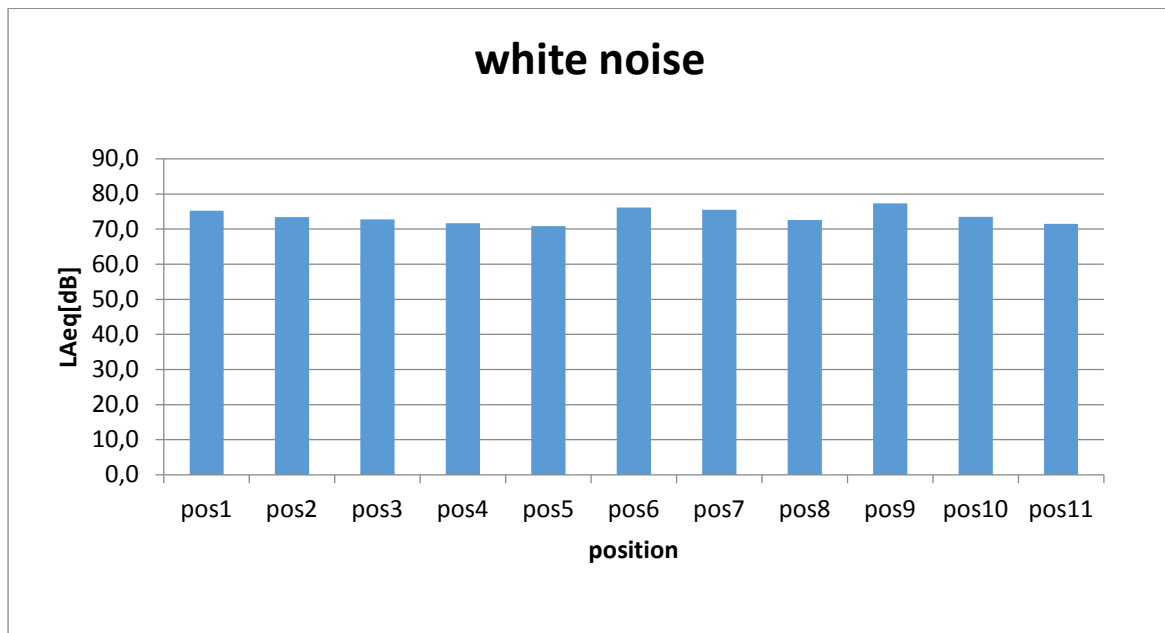
Διάγραμμα 6.2. 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Τα διαγράμματα του λευκού θορύβου θα έπρεπε να ακολουθούν την φασματική κατανομή όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 1.2.

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη λευκού θορύβου ακολουθεί αυτήν την κατανομή με κάποιες διακυμάνσεις.



Διάγραμμα 6.2. 6: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για λευκό θόρυβο του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Το διάγραμμα του LAeq είναι και αυτό ανάλογο του ροζ θορύβου πιο πάνω. Η ενεργειακή στάθμη είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και περίπου ίδια για όλες τις θέσεις. Οι θέσεις πιο κοντά στην πηγή έχουν τις μεγαλύτερες τιμές ενώ όσο απομακρυνόμαστε τόσο μικραίνουν οι τιμές του LAeq. Η μεγαλύτερη πτώση που παρατηρείται είναι 5dB.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε υψηλό SPL σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Οι τιμές αυτές είναι συνέπεια των ανακλάσεων του χώρου.

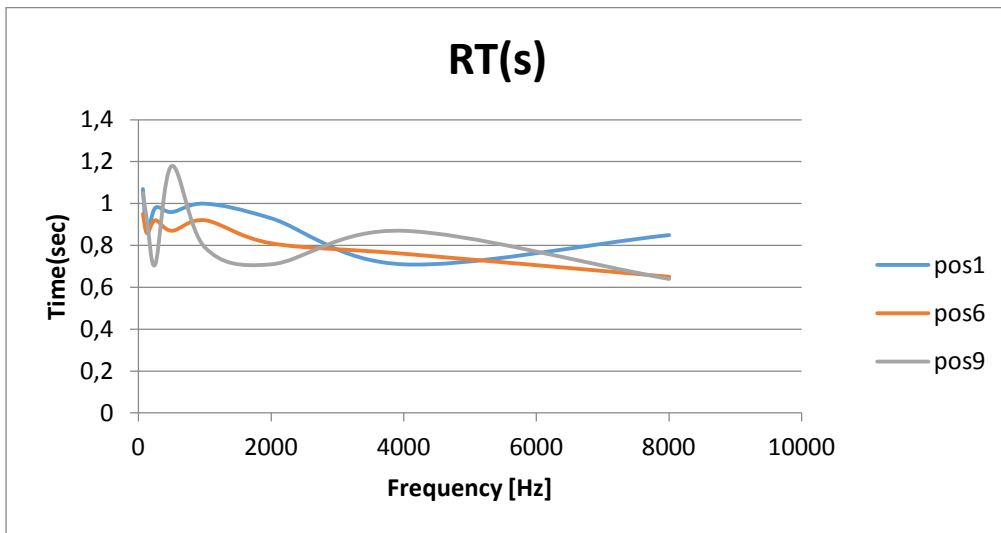
## 2. Χρόνος Αντήχησης

Το σήματα που ηχογραφήθηκε είναι κρουστικός παλμός (πιστόλι αφέτη) για την εξαγωγή του RT.

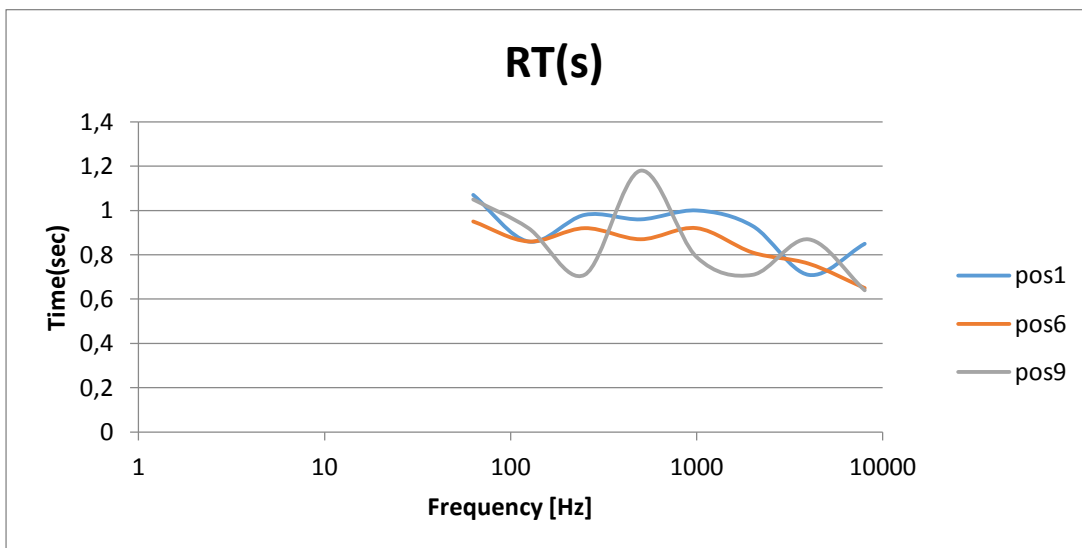
Τα σήματα αυτά ηχογραφήθηκαν από το λογισμικό Dirac και η επεξεργασία τους έγινε στο λογισμικό matlab.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για τις διάφορες θέσεις.

Τα πρώτα διαγράμματα αφορούν την σύγκριση μεταξύ των θέσεων 1, 6 και 9 τα οποία είναι τα πιο κοντινά στην πηγή.



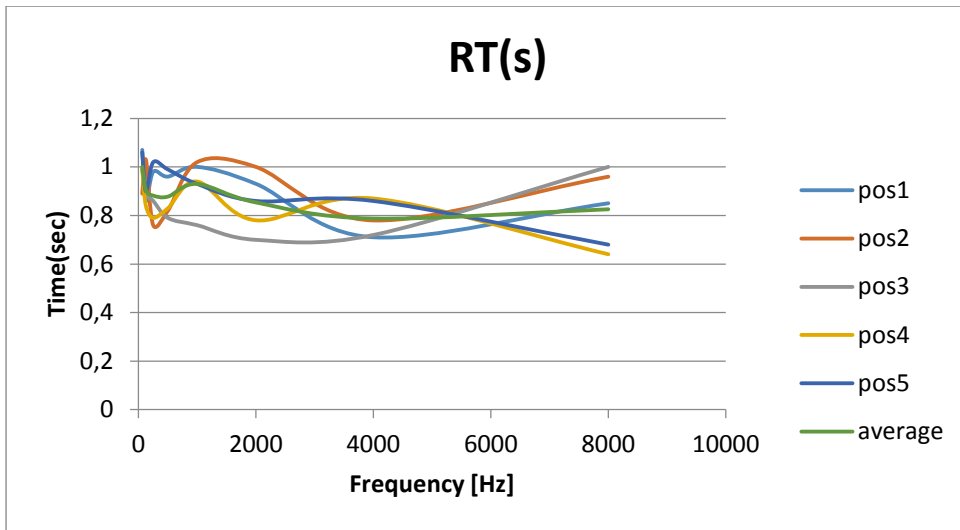
Διάγραμμα 6.2. 7: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



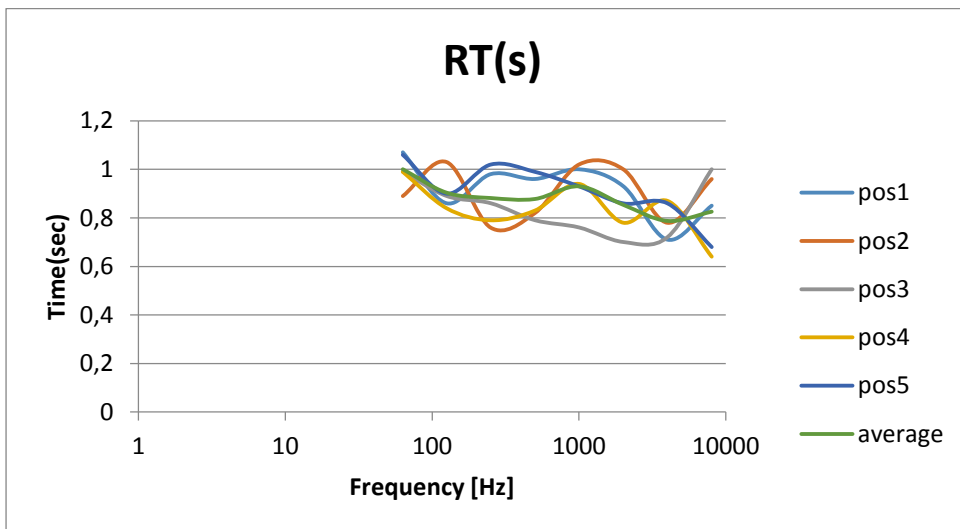
Διάγραμμα 6.2. 8: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Παρατηρούμε ότι οι θέσεις 1 και 6 ακολουθούν περίπου την ίδια καμπύλη με μικρή διαφορά στις τιμές. Η θέση 9 παρουσιάζει μεγάλη και μη αναμενόμενη τιμή στα 500Hz.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 1 ως 5



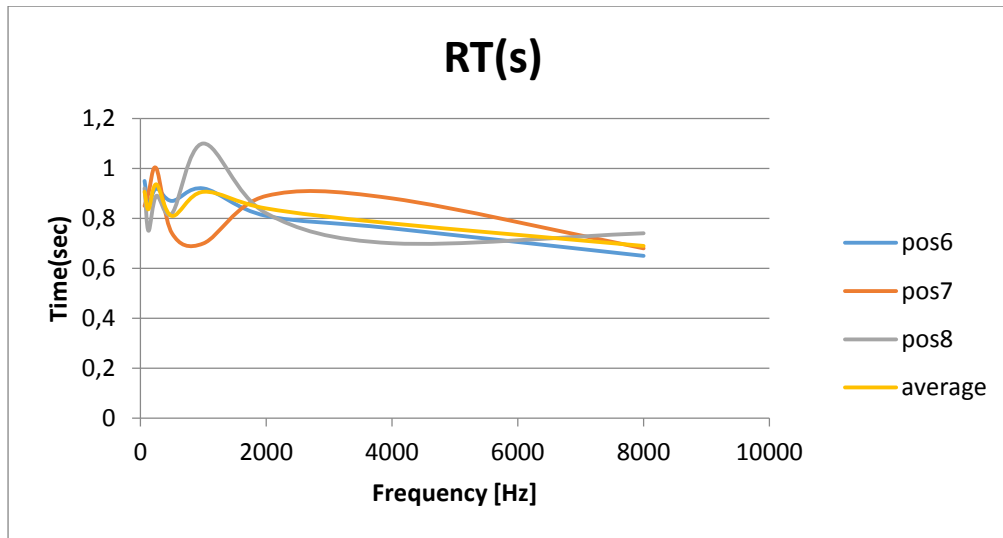
Διάγραμμα 6.2. 9: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



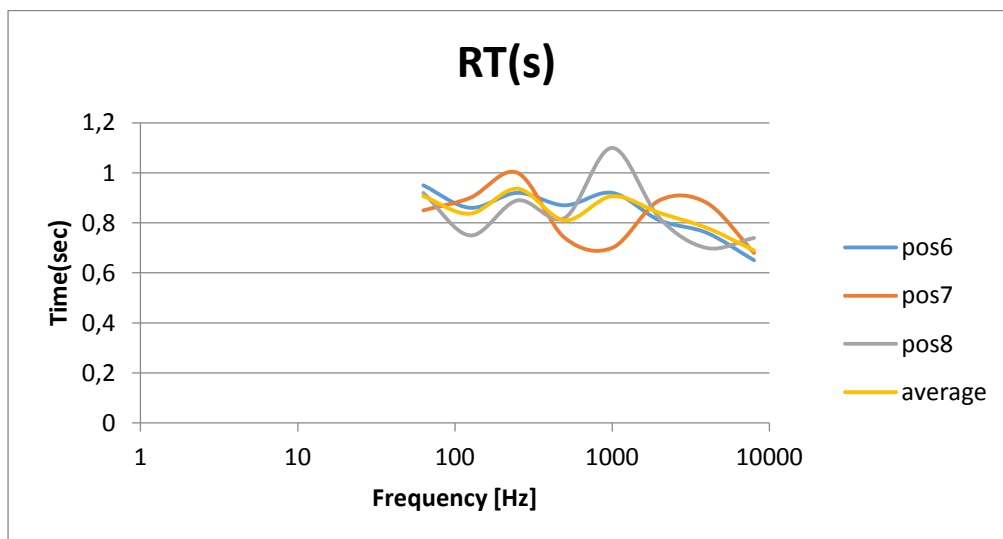
Διάγραμμα 6.2. 10: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Οι θέσεις 1 ως 5 αν και παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανά συχνότητα, παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των τιμών κυμαίνεται μεταξύ των 0,8s και 1s. Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές αν και λίγο χαμηλές για το μέγεθος του χώρου. Γεγονός που δηλώνει ότι ο χώρος ακουστικά είναι λίγο ψυχρός.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 6, 7 και 8



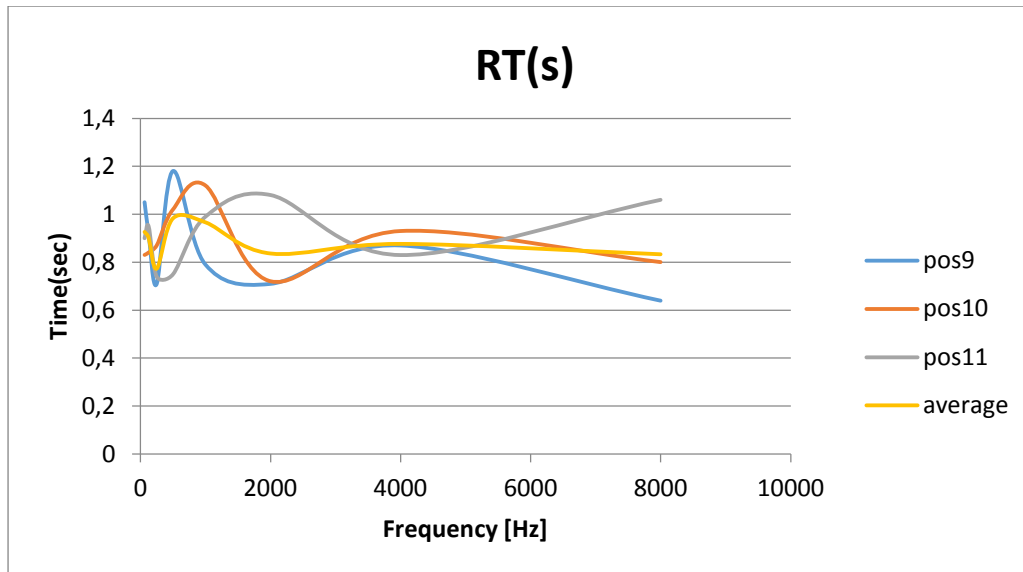
Διάγραμμα 6.2. 11: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



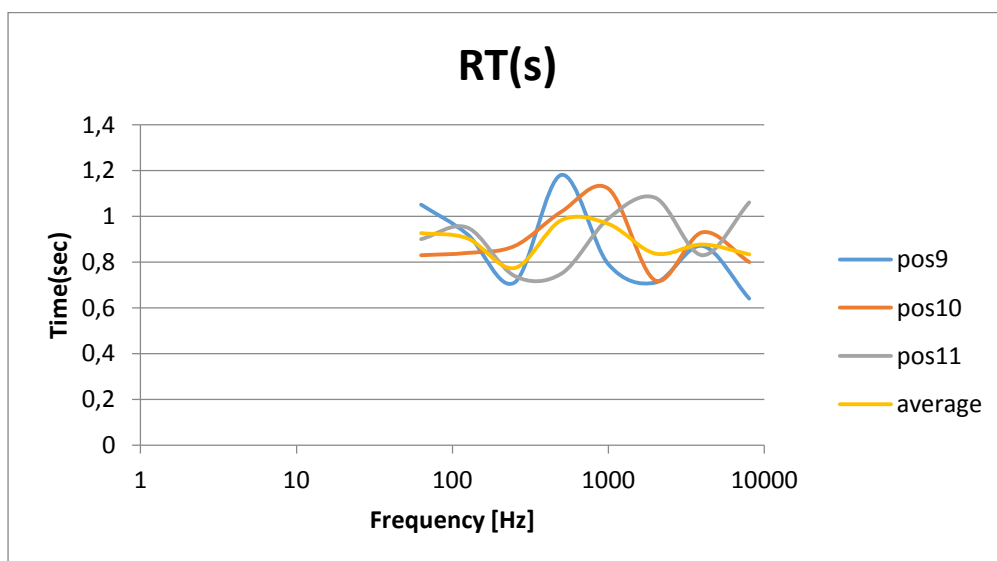
Διάγραμμα 6.2. 12: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Οι θέσεις 6 ως 8, παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανά συχνότητα, όμως ο μέσος όρος ταυτίζεται με την καμπύλη της θέσης 6. Οι τιμές της συνάρτησης του μέσου όρου κυμαίνονται από 0,8s ως 0,9s με εξαίρεση τα 8000Hz (0,7s). Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές αν και λίγο χαμηλές για τον όγκο της αίθουσας.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 9, 10 και 11.



Διάγραμμα 6.2. 13: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 14: Διάγραμμα Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

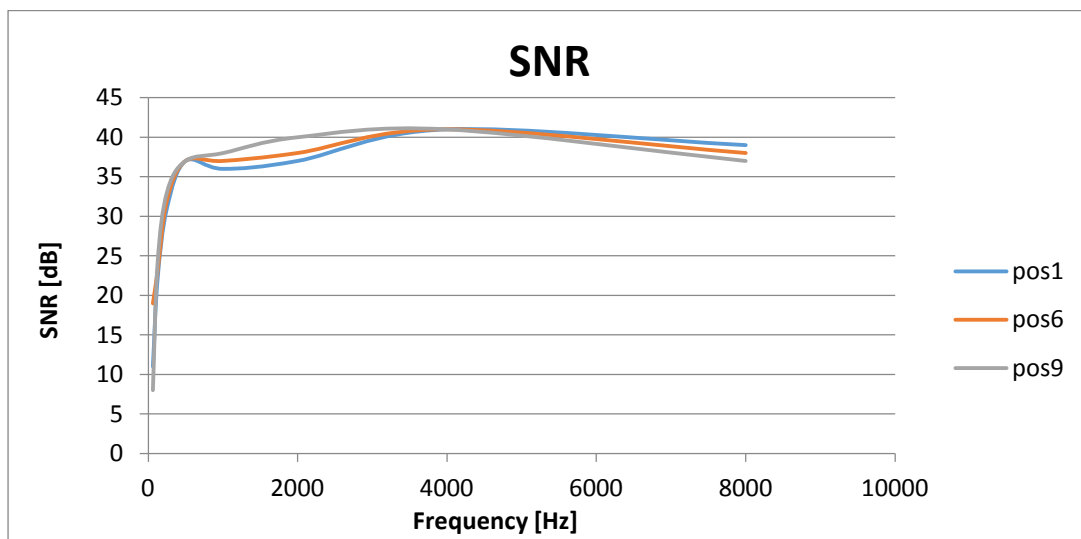
Οι θέσεις 9 ως 11 αν και παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανά συχνότητα, παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των τιμών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,8s και 1s. Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές αν και λίγο χαμηλές για το μέγεθος του χώρου.

### 3. Επιπλέον μεγέθη

Τα αποτελέσματα των υπολοίπων μεγεθών εξάχθηκαν από σήμα εισόδου ανθρώπινη ηχογραφημένη απαγγελία.

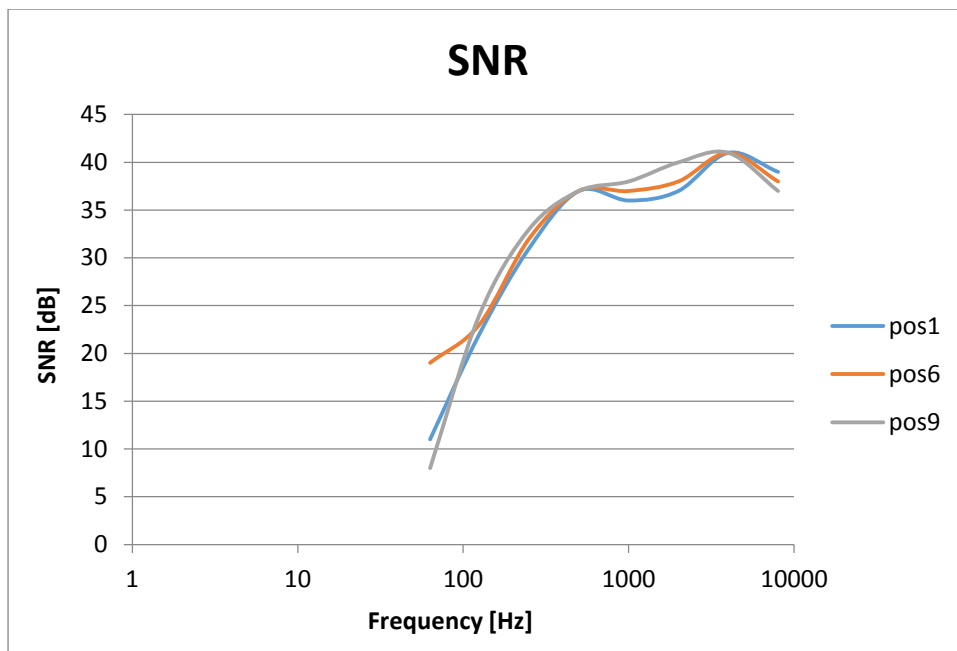
#### 1. SNR

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μεγέθους SNR σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα, για τις θέσεις 1, 6 και 9 τα οποία βρίσκονται πλησιέστερα στην πηγή αλλά σε διαφορετική γωνία.



Διάγραμμα 6.2. 15: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

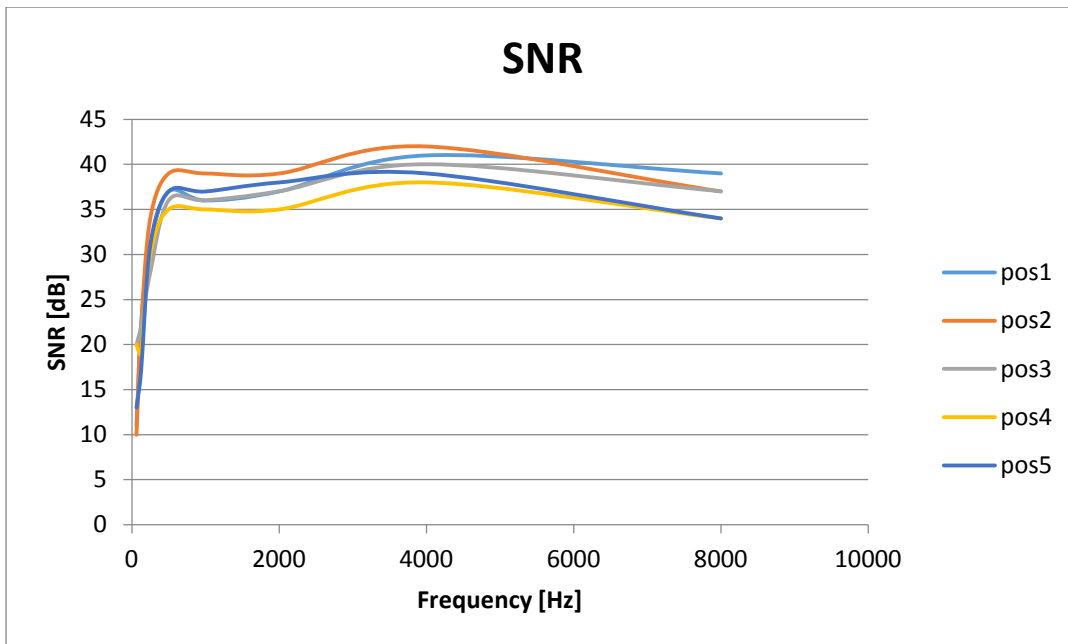




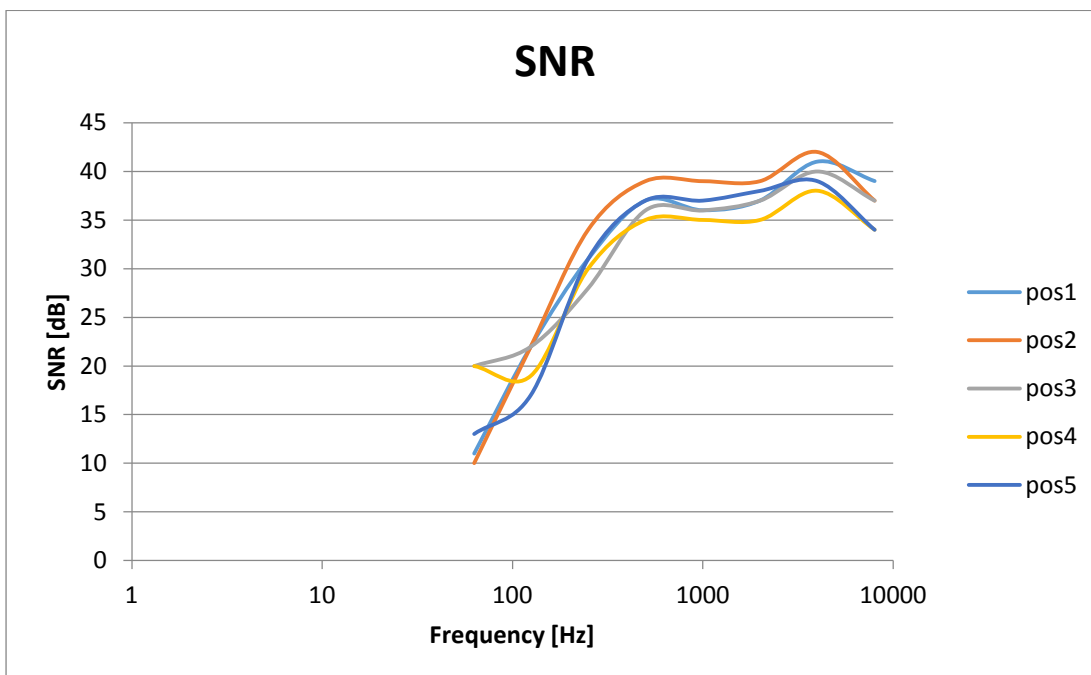
Διάγραμμα 6.2. 16: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SNR στην πρώτη σειρά του θεάτρου σε όλες τις συχνότητες είναι πάρα πολύ καλές (>18dB). Επομένως ο ήχος σε σύγκριση με τον θόρυβο είναι πολύ καθαρός. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές για τις τρεις αυτές θέσεις είναι ίδιες.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του SNR για τις θέσεις 1 ως 5 σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα. Οι θέσεις αυτές βρίσκονται στην ίδια ευθεία στο κέντρο της αίθουσας από την πρώτη σειρά προς την τελευταία.



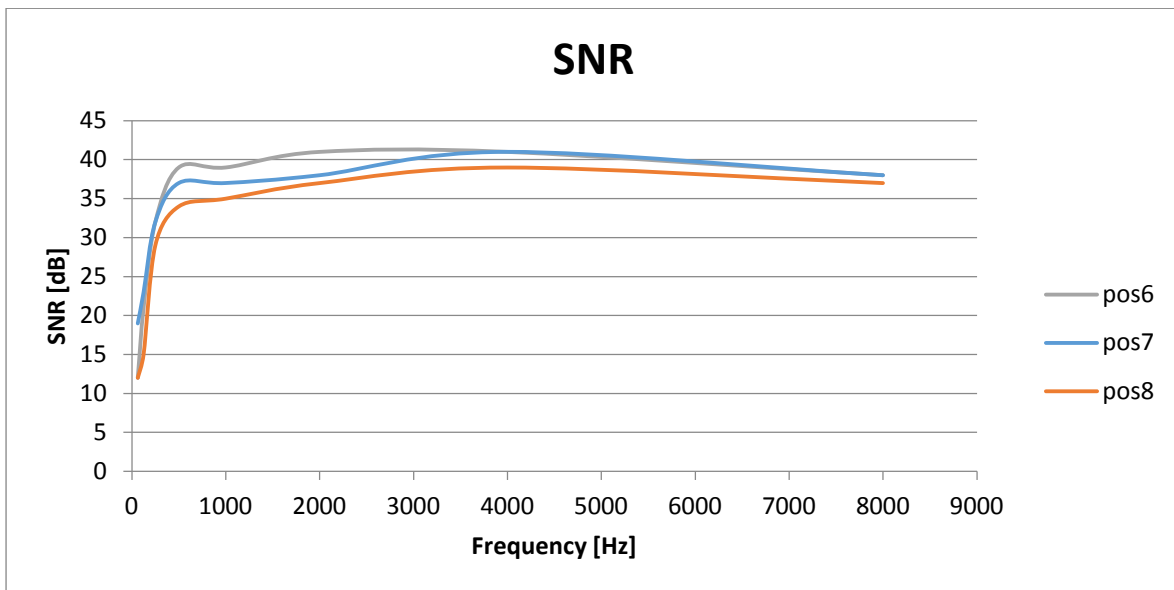
Διάγραμμα 6.2. 17: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



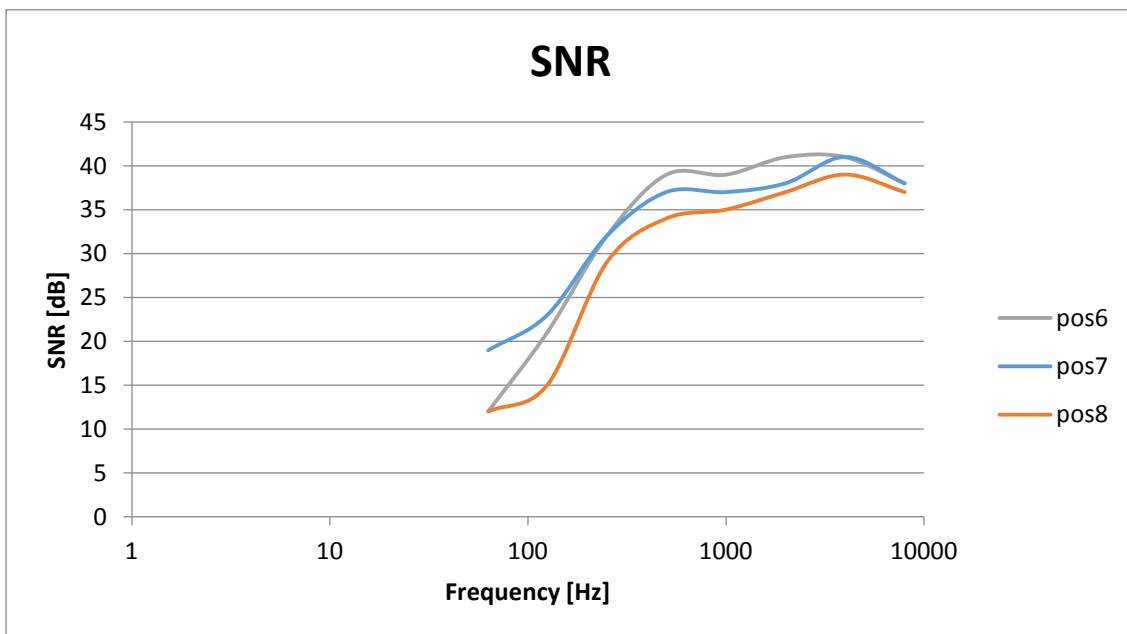
Διάγραμμα 6.2. 18: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε μια μικρή πτώση του SNR καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή. Η πτώση αυτή δεν είναι μεγάλη. Αυτό προκύπτει από την ανακλαστική ικανότητα του χώρου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι θεατές στην τελευταία σειρά του θεάτρου μπορούν να ακούν ικανοποιητικά.

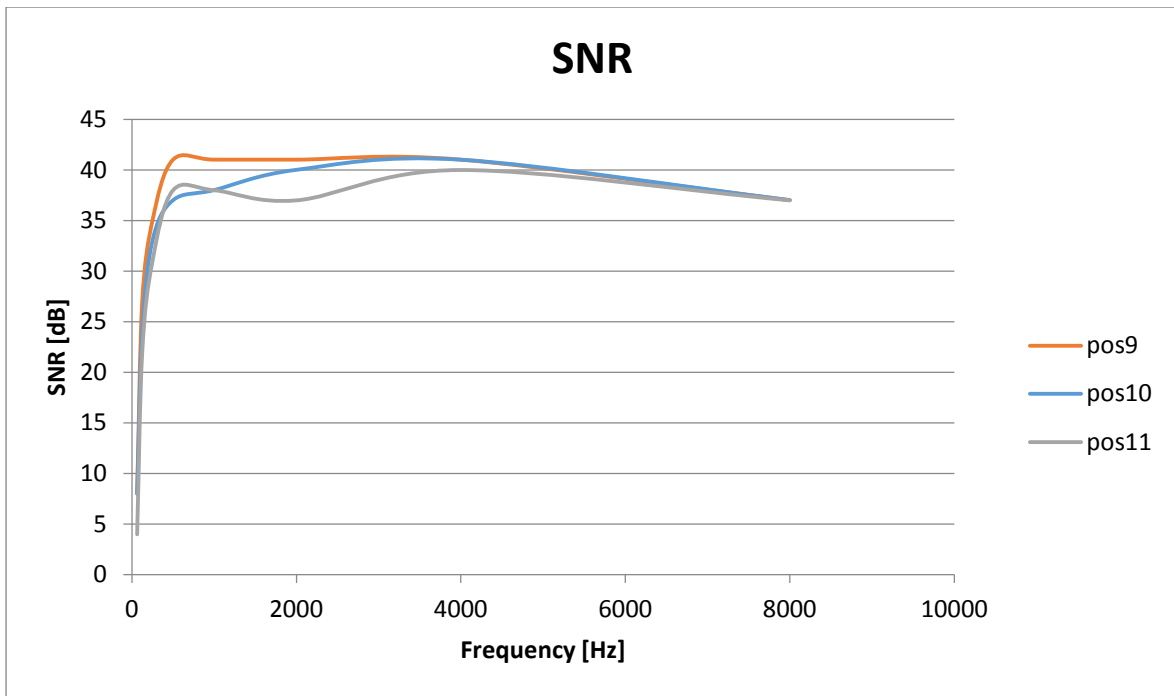
Ακολουθούν τα διαγράμματα SNR των θέσεων 6, 7 και 8 και 9, 10 και 11 σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.



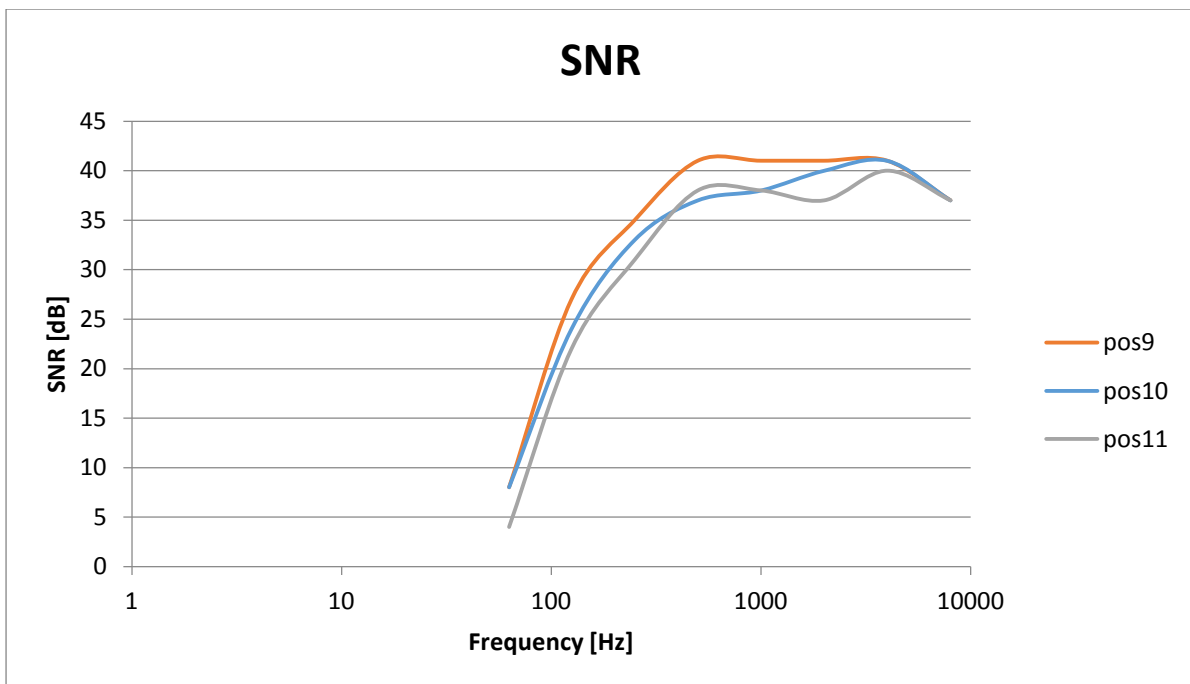
Διάγραμμα 6.2. 19: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 20: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 22: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη.

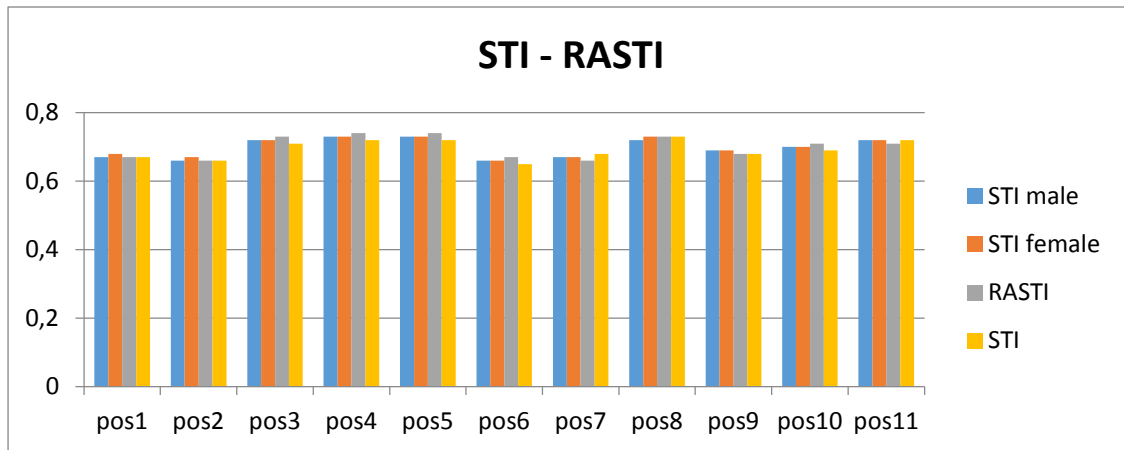
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή οι τιμές του SNR μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι μικρότερη από την μείωση που θα

βλέπαμε σε ένα ανοιχτό χώρο. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του SNR για όλα τις θέσεις ακολουθούν την ίδια καμπύλη με παρόμοιες διακυμάνσεις και τιμές.

Τέλος να σημειωθεί ότι ο χώρος είναι καλά ηχομονωμένος και γι' αυτό δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς ήχους. Βέβαια ο λειτουργικός θόρυβος του θεάτρου (σύστημα εξαερισμού, θέρμανσης ή air-conditon) και η παρουσία θεατών θα προκαλούσε μια μικρή μείωση του SNR.

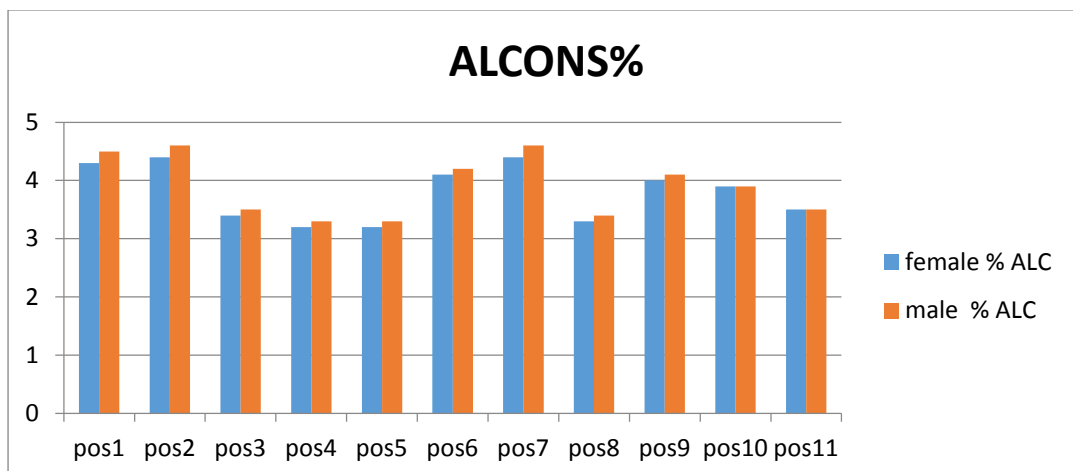
## 2.STI-RASTI

Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα του STI MALE και FEMALE, STI και RASTI.



Διάγραμμα 6.2. 23: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη.

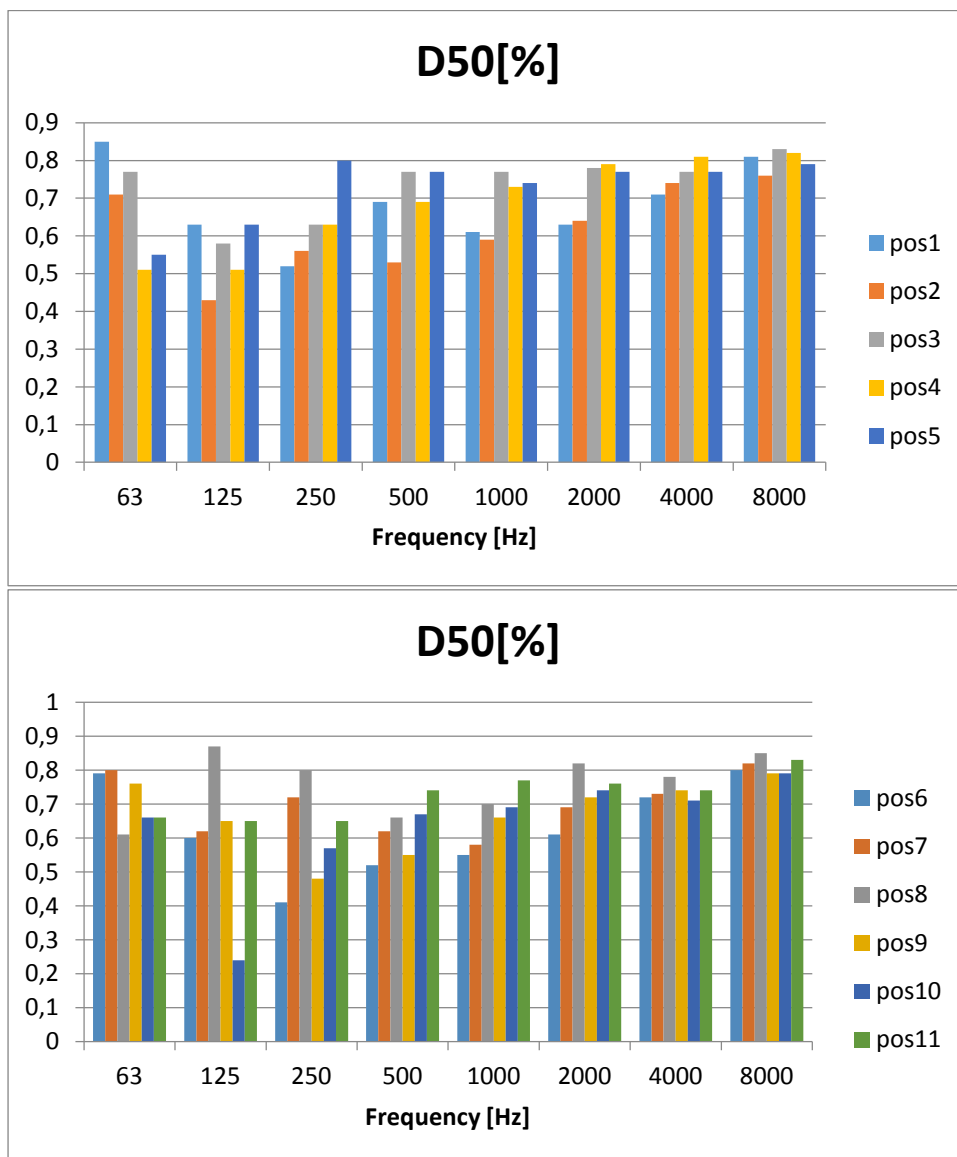
και το διάγραμμα ALcons(%).



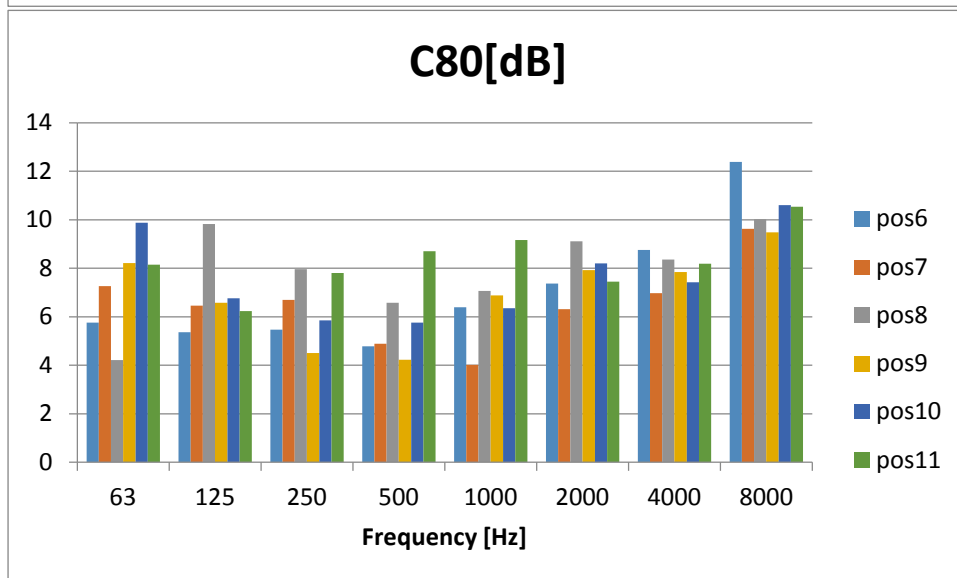
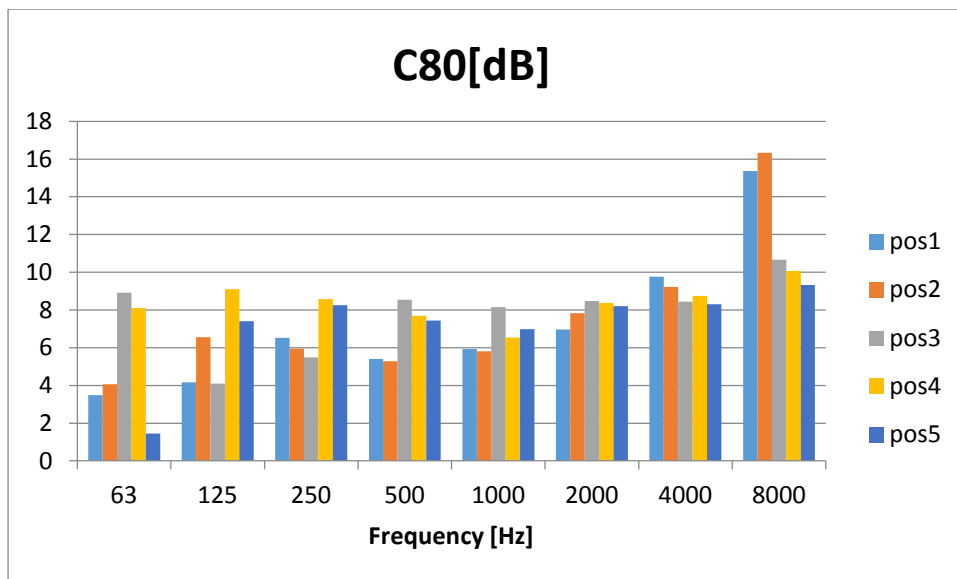
Διάγραμμα 6.2. 24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη ALcons(%) [female, male] ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η καταληπτότητα του χώρου χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή και επιπλέον η απώλεια συμφώνων τόσο στην αντρική όσο και στη γυναικεία φωνή είναι μικρή σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καλύτερες θέσεις όσον αφορά την ακουστική τους βρίσκονται στο μέσο του θεάτρου και προς τα πίσω. Αυτό πιθανότητα οφείλεται στις ανακλάσεις του ήχου στα πλάγια και στην οροφή της αίθουσας ( οι θέσεις των θεατών είναι ανυψωμένες αμφιθεατρικά). Οι πρώτες ανακλάσεις ενισχύουν τον απ' ευθείας ήχο στις πίσω θέσεις και η διάχυση του ήχου στον χώρο καθιστά τον λόγο πιο καταληπτό στις θέσεις αυτές.

### 3. C50, D80



Διάγραμμα 6.2. 25: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη.



Διάγραμμα 6.2. 261: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80(%) ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η διακριτότητα D50 του χώρου είναι πολύ καλή, καθώς το D50 βρίσκεται πάνω από το 0,5 (50%), όπως ορίζει το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Παρ' όλα αυτά κάποιες μεμονομένες τιμές ξεφεύγουν από τα όρια στα 125Hz και στα 250Hz.

Από την άλλη, η διαύγεια C80 θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -1 και 3 dB για θεατρικούς χώρους, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Στις μετρήσεις μας ο δείκτης αυτός κυμαίνεται σε μεγαλύτερες τιμές ανεξαρτήτως θέσεως και συχνότητας. Ο δείκτης C80 αφορά την δυνατότητα αντίληψης της μουσικής σε ένα χώρο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος δεν είναι κατάλληλος για ακρόαση μουσικής.

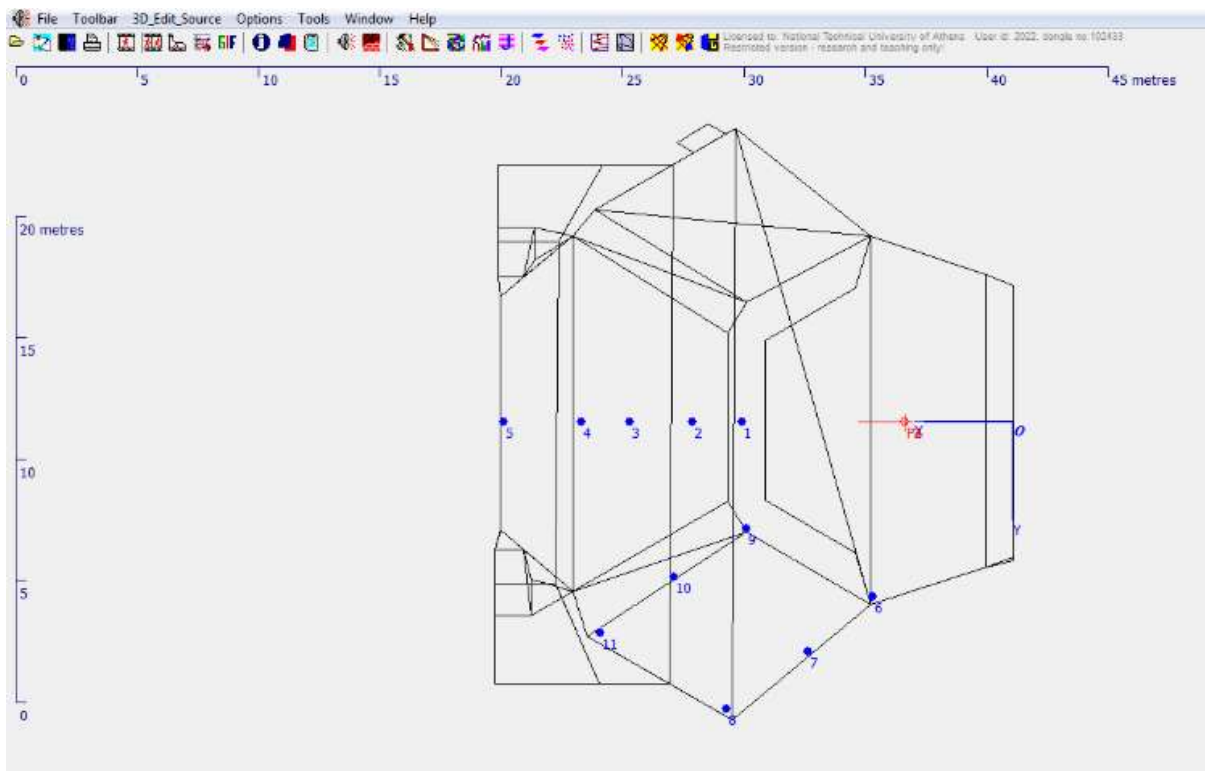
Οι τιμές του δείκτη C80 είναι εκτός των ορίων που θέτει ο Διεθνής κανονισμός για τα θέατρα. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω των καλών τιμών του δείκτη D50 καθώς είναι δύσκολο ένας χώρος με καλή διακριτότητα να παρουσιάζει ταυτόχρονα και καλή διαύγεια.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος είναι κατάλληλος για ομιλία αλλά όταν υπάρχει ανάγκη μουσικής θα πρέπει να υποβοηθείται από ηλεκτρονικά υποσυστήματα.

## Προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση στο πρόγραμμα ODEON, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου, το οποίο σχεδιάστηκε στο λογισμικό Autocad. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα μικρόφωνα και η ηχητική πηγή με βάση τις μετρήσεις που έγιναν στο θέατρο.

Οι θέσεις των θέσεων και της ηχητικής πηγής φαίνονται στις Εικόνα 6.2.2.

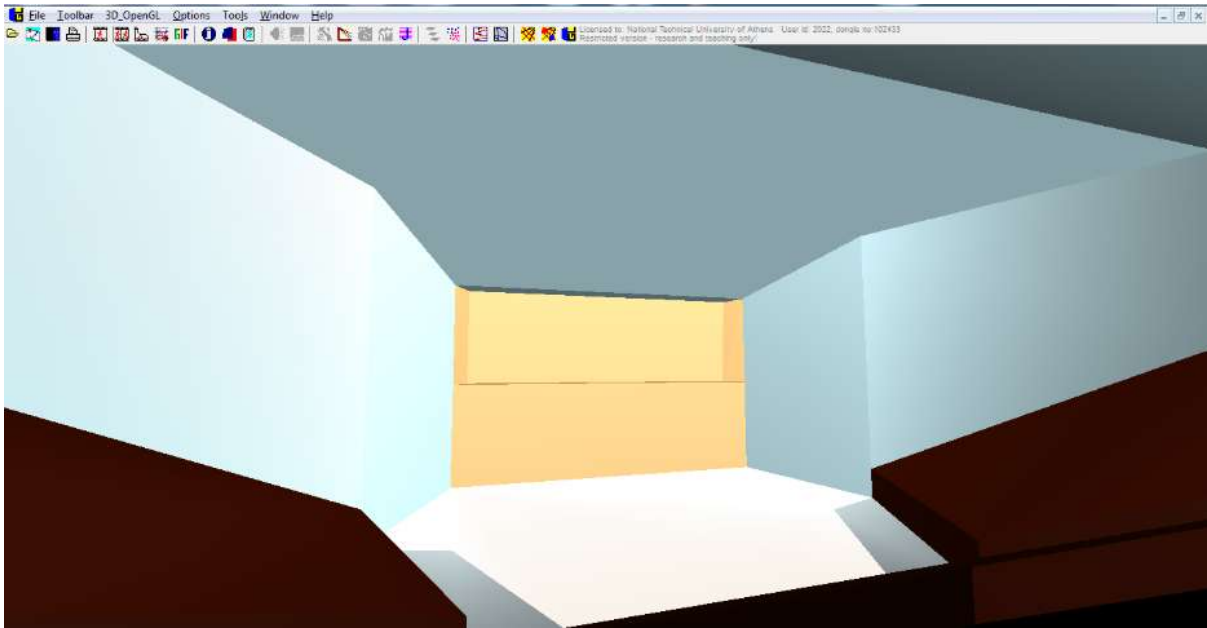


Εικόνα 6.2 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του Ιδρύματος Κακογιάννη.

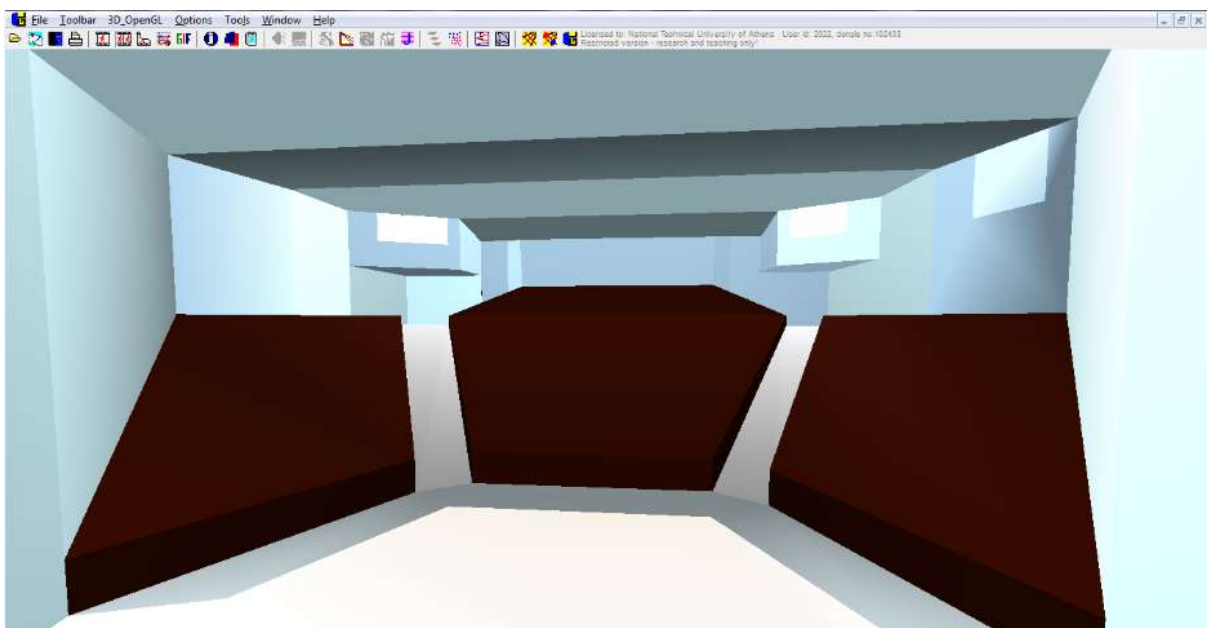
Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν τα υλικά του χώρου στις αντίστοιχες επιφάνειες.

Στις παρακάτω εικόνες, Εικόνα 6.2.3 και Εικόνα 6.2.4, φαίνονται οι 3D απεικονίσεις του χώρου της σκηνής και των θεατών αντίστοιχα. Στις εικόνες αυτές περιλαμβάνονται τα υλικά του θεάτρου με διαφορετικά χρώματα. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό υλικό με διαφορετική απορροφητική ικανότητα το καθένα.





Εικόνα 6.2 3: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του Ιδρύματος Κακογιάννη με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών



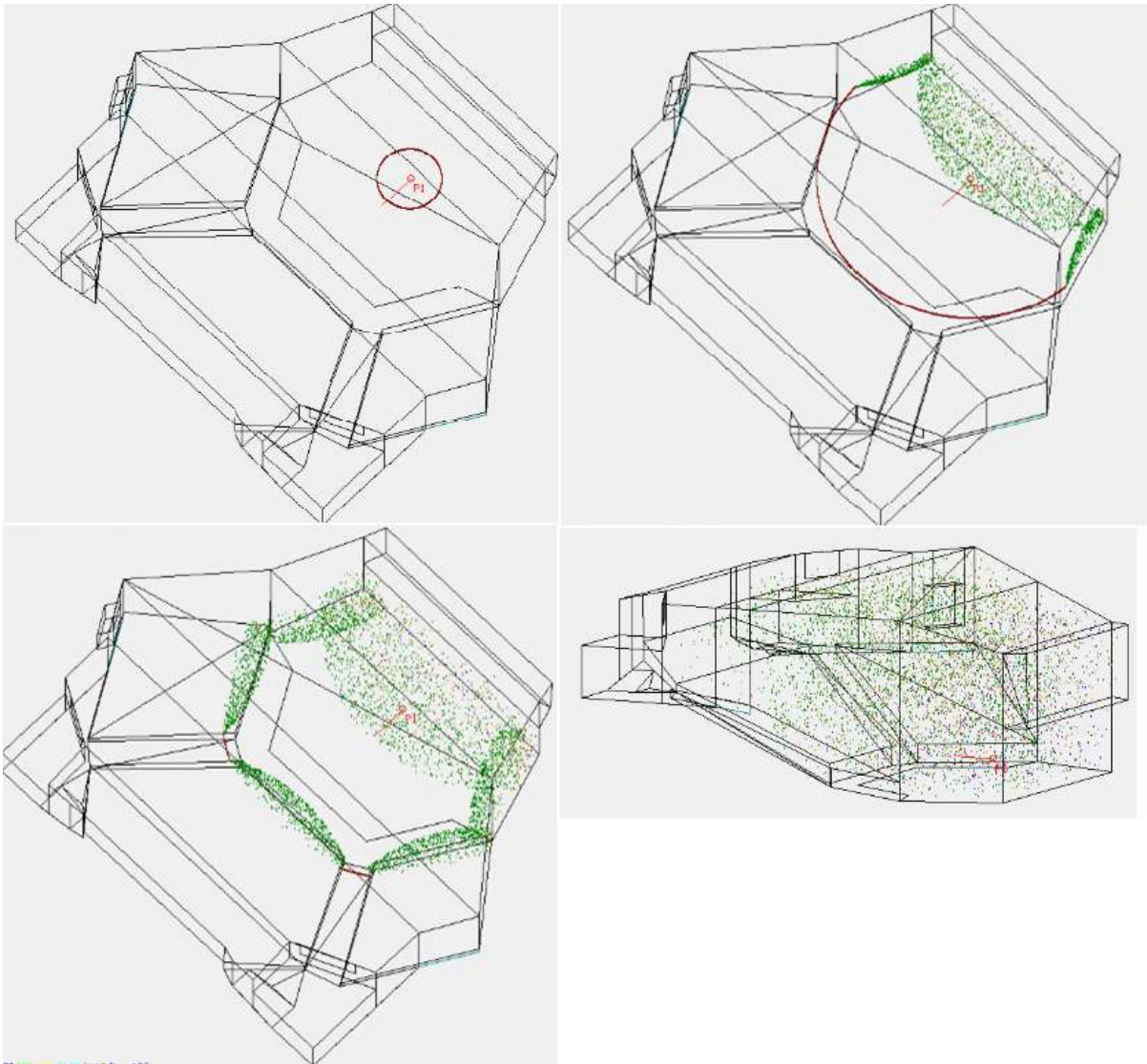
Εικόνα 6.2 4: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του Ιδρύματος Κακογιάννη με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών

Να σημειωθεί ότι το λογισμικό ODEON, χρησιμοποιεί την εξής χρωματική κλίμακα:

1. Όσο πιο ζεστό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απορροφητικό είναι στις υψηλές συχνότητες (π.χ καφέ)
2. Όσο πιο ψυχρό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απορροφητικό είναι στις χαμηλές συχνότητες (π.χ. γαλάζιο)

3. Το λευκό και γκρι χρώμα είναι ουδέτερα και έχουν την ίδια απορροφητική ικανότητα σε όλες τις συχνότητες.

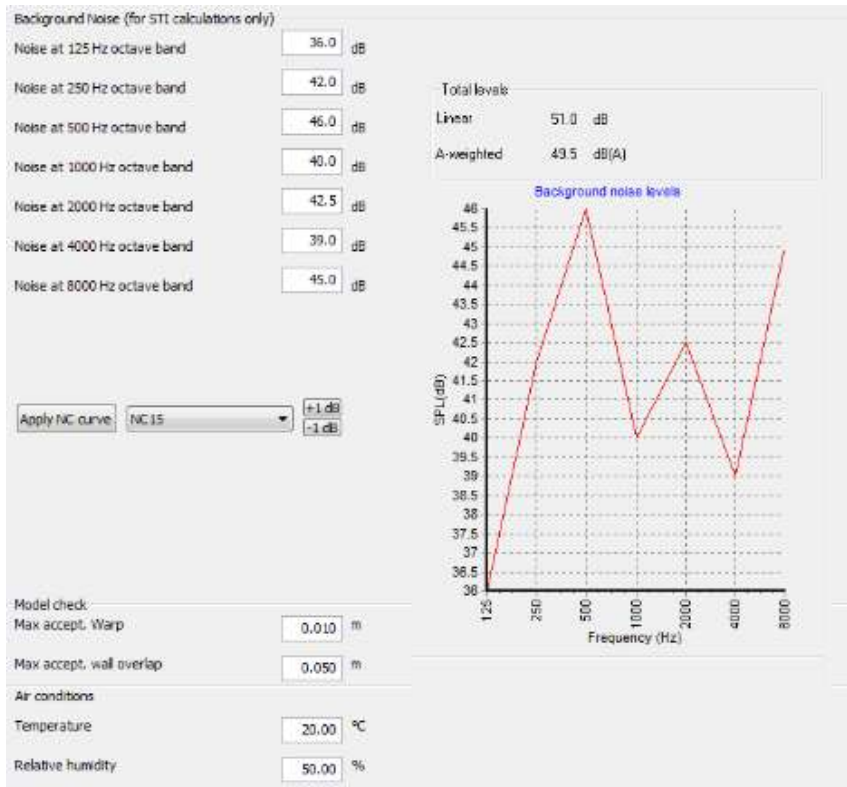
Επόμενο βήμα ήταν να ελέγξουμε την διάδοση του ήχου στο χώρο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο 3D Billard, που παρέχει το λογισμικό ODEON. Το συγκεκριμένο εργαλείο σου δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της κίνησης των "ηχητικών σωματιδίων" στο χώρο, που εκπέμπονται από σημειακή ηχητική πηγή. Στις παρακάτω εικόνα, Εικόνα 6.2.5, φαίνεται η κίνηση αυτή. Μπορούμε να διακρίνουμε με διαφορετικά χρώματα τον απ' ευθείας ήχο και τις πρώτες, δεύτερες και λοιπές ανακλάσεις.



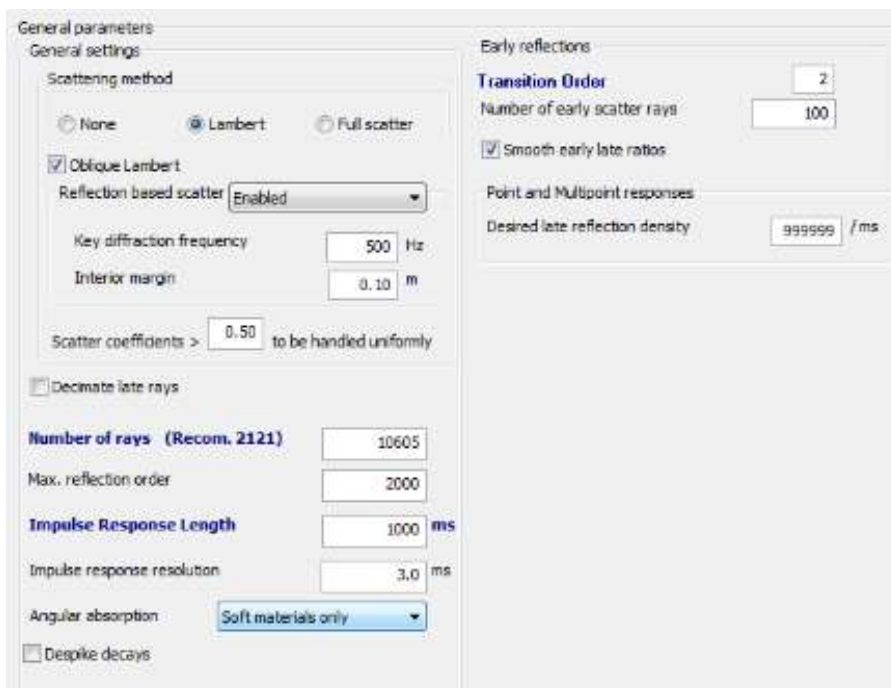
Εικόνα 6.2.5: 3D Billard.

Στη συνέχεια ρυθμίσαμε τις παραμέτρους του συστήματος. Ένας από αυτούς είναι ο θόρυβος βάθους για την εξαγωγή του μεγέθους STI. Ο προσδιορισμός του θορύβου βάθους

έγινε με την καταγραφή σήματος ησυχίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το αρχείο αυτό μας έδωσε τα dB του θορύβου ανά συχνότητα με χρήση του λογισμικού matlab. Στην Εικόνα 6.2.6, φαίνονται τα dB του θορύβου ανά συχνότητα και στην Εικόνα 6.2.7 οι παράμετροι για μέγιστη ανάλυση.



Εικόνα 6.2.6: Θόρυβος Βάθους για STI.



Εικόνα 6.2.7: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση.

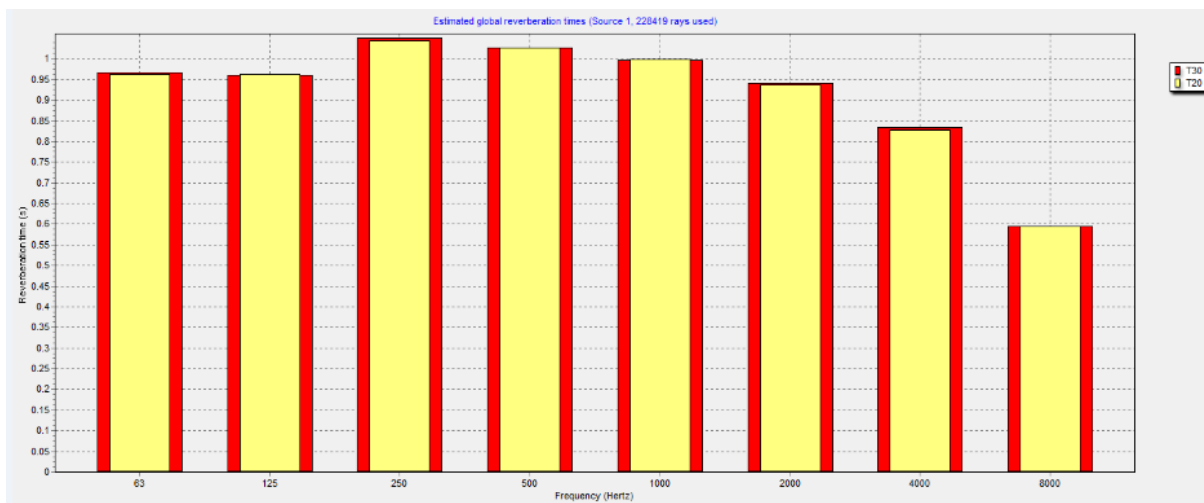
## Ανάλυση αποτελεσμάτων

Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων μέσω τριών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος είναι το Global estimate (γενική εκτίμηση βασικών παραμέτρων). Η δεύτερη μέθοδος είναι το multi-point response (προσομοίωση του χώρου ανά μετρούμενη θέση). Η μέθοδος αυτή αποτελεί το βασικό μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος η τρίτη μέθοδος είναι το Grid estimate. Σ' αυτή επιλέξαμε το χώρο των θεατών και πρακτικά απεικονίσαμε την απόκριση του χώρου ανά θεατή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δείκτες που μελετήσαμε στην προσομοίωση του χώρου, με τις τρεις παραπάνω μεθόδους

### 1. Χρόνος Αντήχησης (RT).

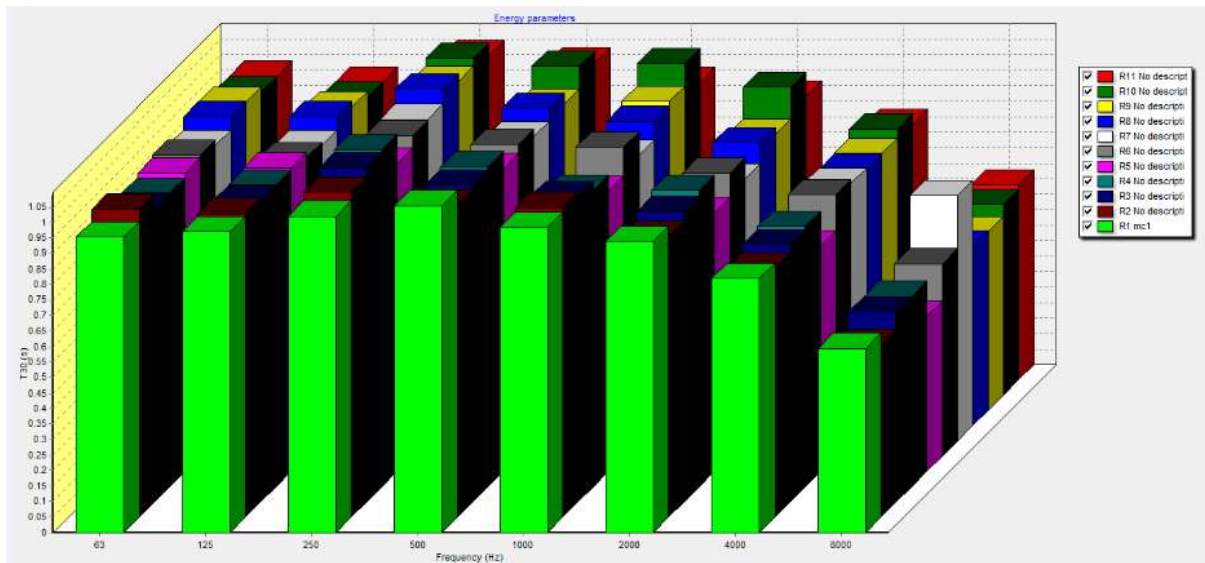
Αρχικά βλέπουμε τα αποτελέσματα από το global estimate.



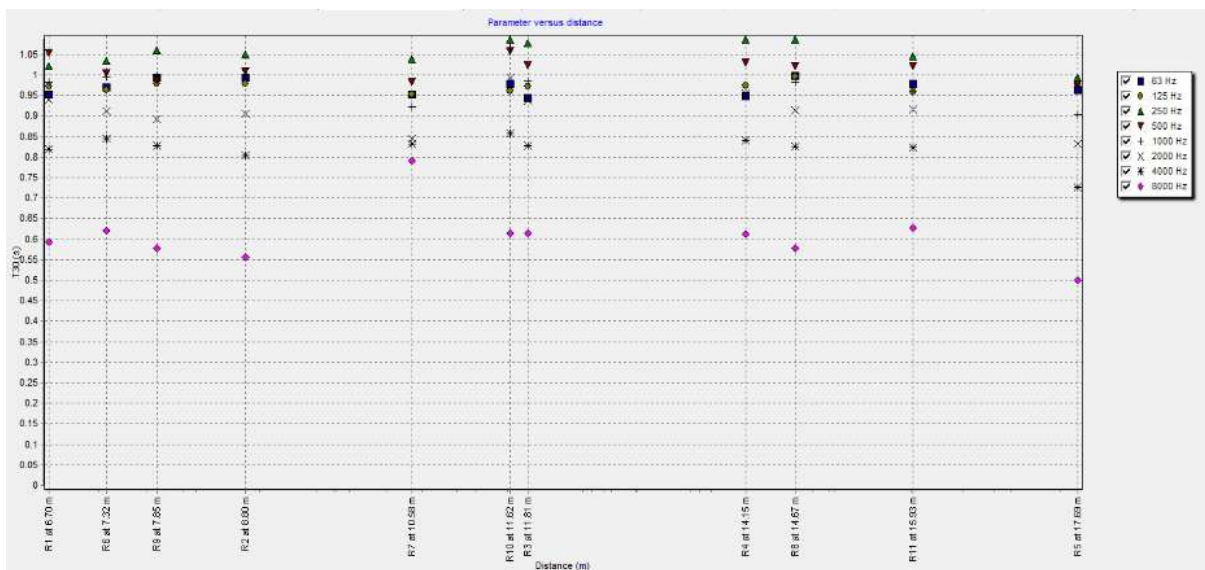
Διάγραμμα 6.2. 27: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, μέσω του global estimate

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το RT κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,85s ως 1,05s. Μονο στα 8000Hz το RT πέφτει στα 0,65s. Ο χρόνος αντήχησης για τον χώρο αυτό κρίνεται μικρός.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από το multi-point estimation.

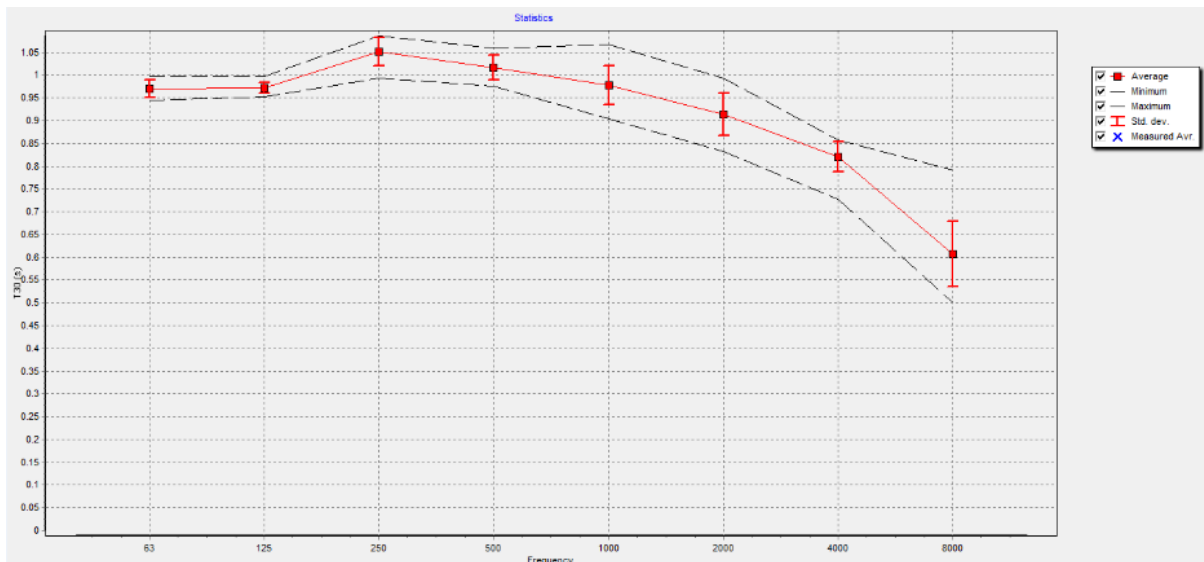


Διάγραμμα 6.2. 28: Εκτίμηση του χρόνου απήχησης ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.2. 29: Εκτίμηση του χρόνου απήχησης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.



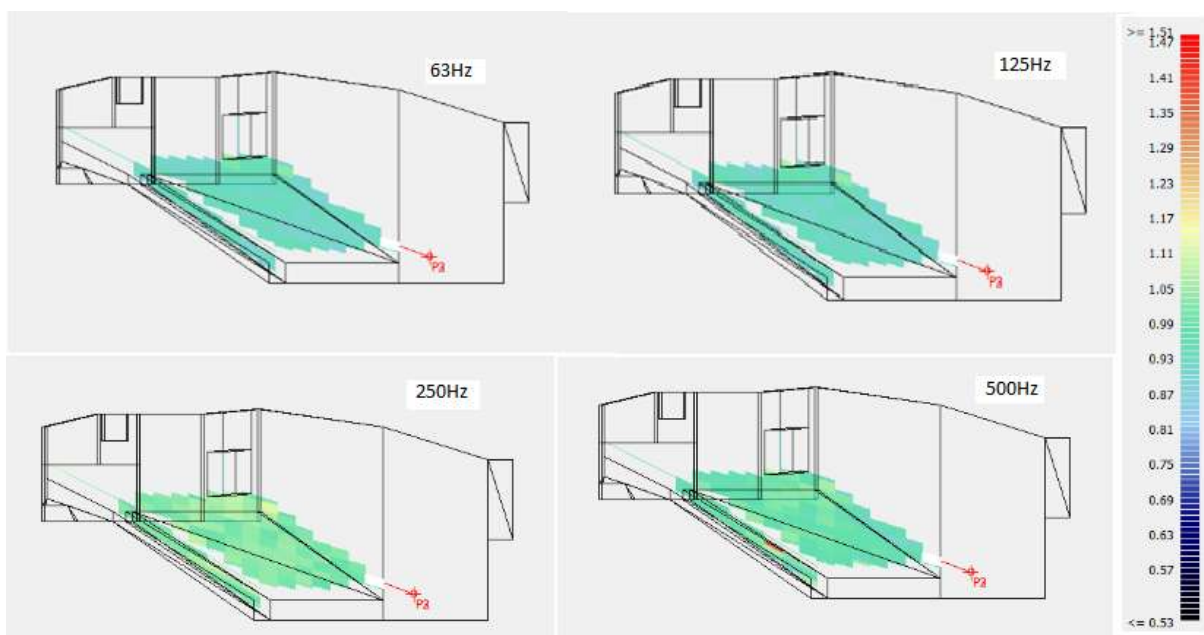


Διάγραμμα 6.2. 30: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντίληψης ανά συχνότητα.

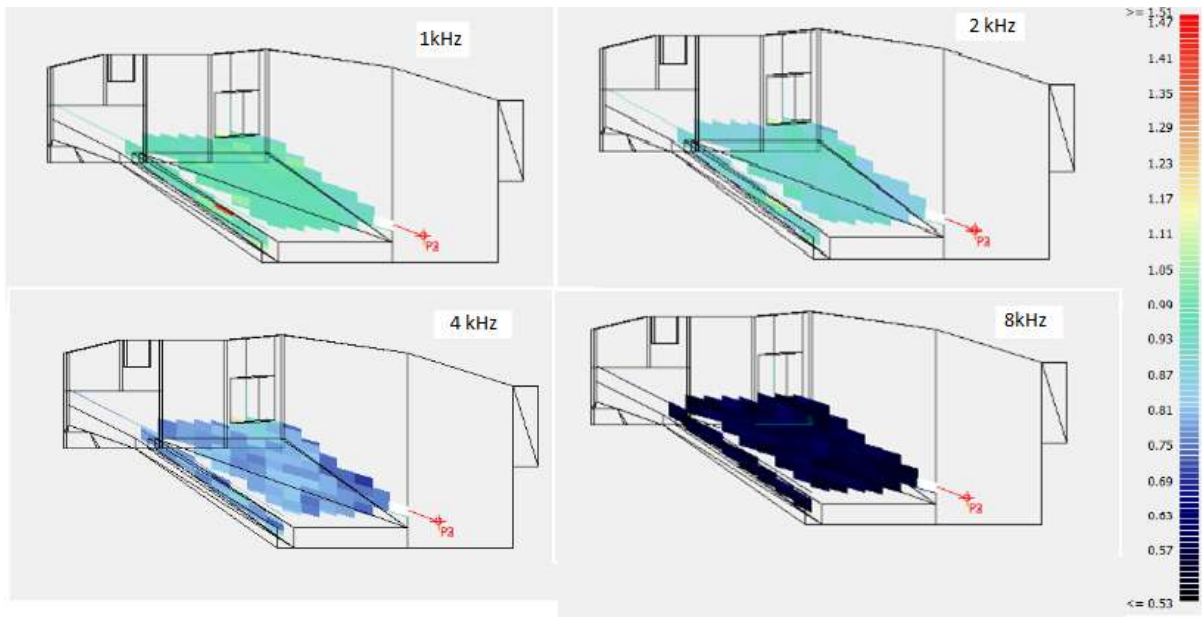
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις που μελετάμε ακολουθούν την ίδια κατανομή RT. Η μέγιστη τιμή του RT παρουσιάζεται στα 250Hz για τις θέσεις 10, 3, 4 και 8. Η ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται στα 8000Hz στη θέση 5.

Από το διάγραμμα στατιστικής ανάλυσης συμπεραίνουμε ότι ο μέσος όρος του RT κυμαίνεται από 0,96s ως 1,05s.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Grid.

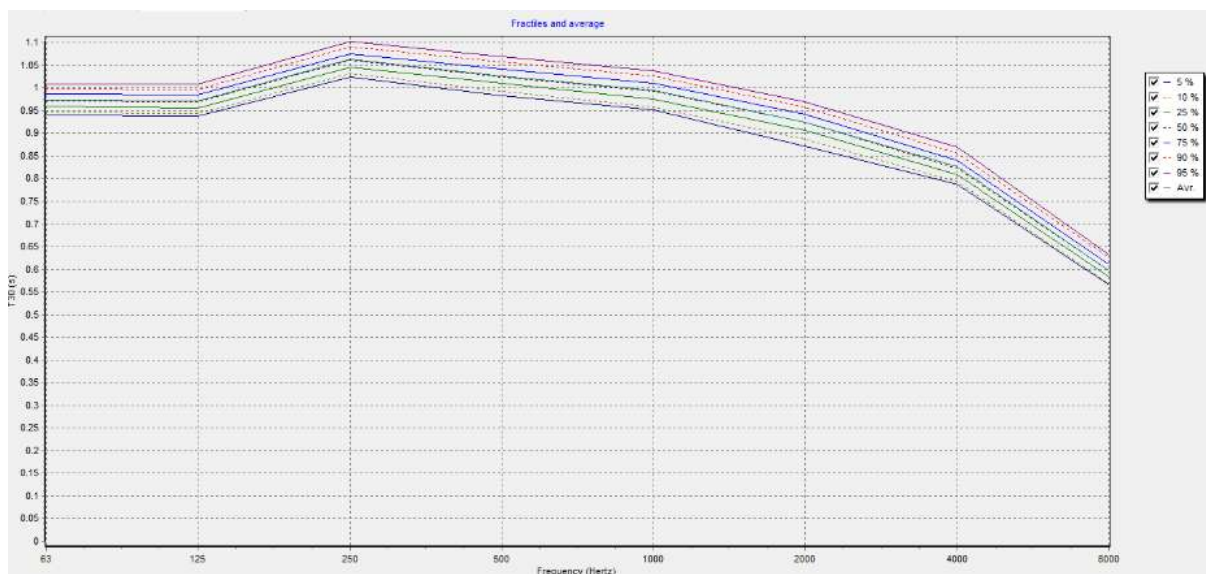


Διάγραμμα 6.2. 31: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.2. 32: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε την χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης στο χώρο των θεατών.



Διάγραμμα 6.2. 33: Επί τις εκατό στατιστική κατανομή του RT στο χώρο ανά συχνότητα.

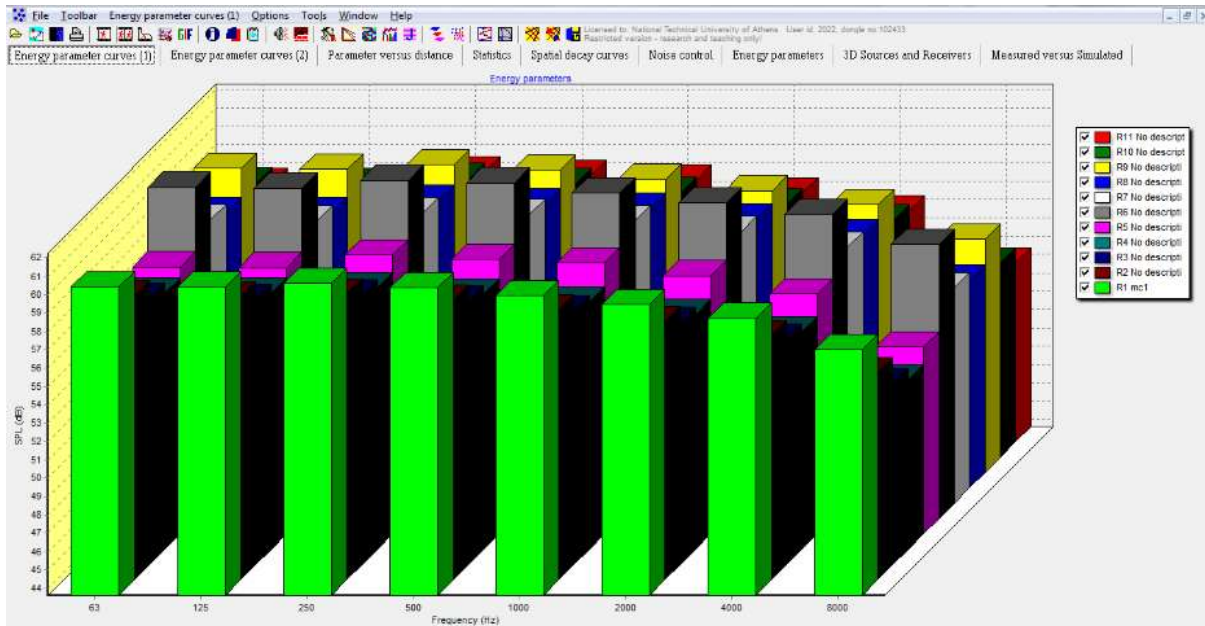
Από την μέθοδο Grid παρατηρούμε μια αύξηση του RT με μέγιστη τιμή στα 250Hz και μετά μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Ενώ από το τελευταίο διάγραμμα στατιστικής κατανομής συμπεραίνουμε ότι ο μέσος χρόνος αντήχησης του θεάτρου ανεξαρτήτως θέσεως κυμαίνεται από 0,85s ως 1,05s στα 250Hz. Το χαμηλό RT υποδεικνύει έναν ψυχρό ακουστικά χώρο που οφείλεται στα κατασκευαστικά υλικά του.

## 2. SPL

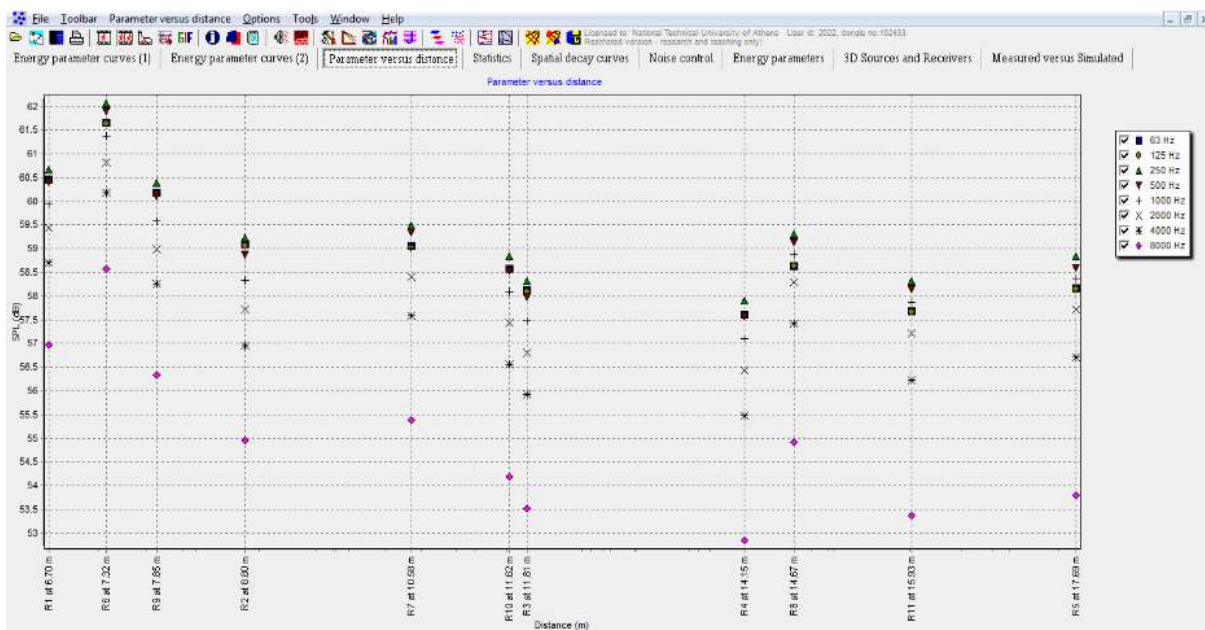
Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε πολυκατευθυντική πηγή με κέρδος 80dB, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η μέθοδος global estimate δε μας δίνει τιμές για το SPL.

Παρακάτω φαίνεται ο υπολογισμός του SPL από τη χρήση του multi-point estimation.

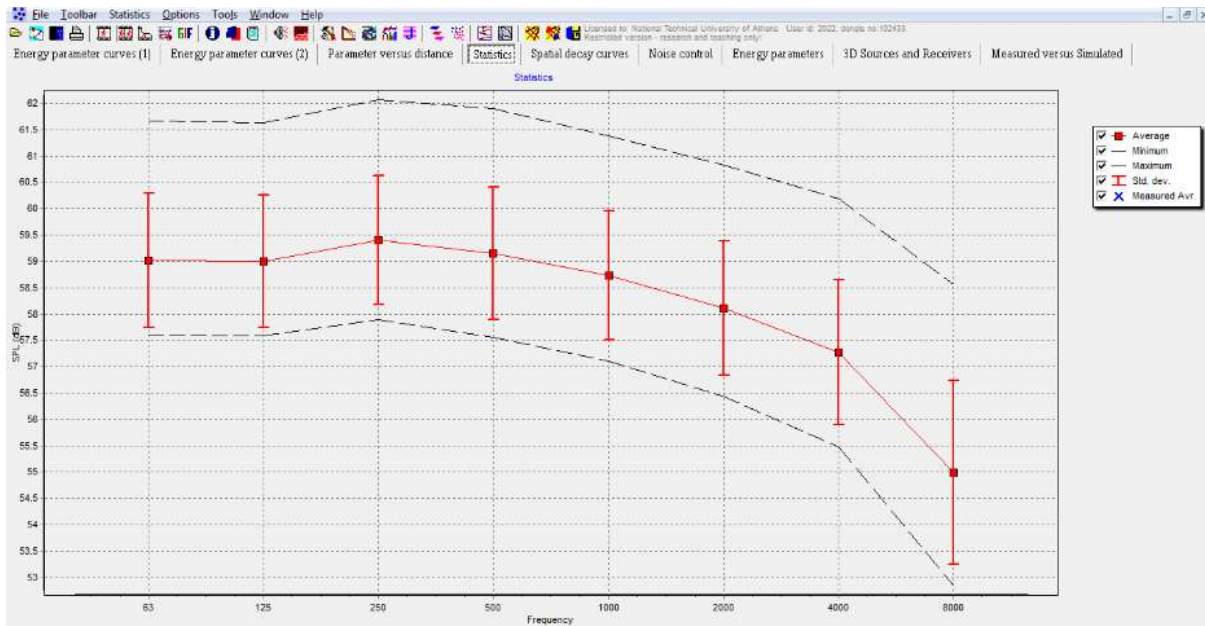


Διάγραμμα 6.2. 34: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.2. 35: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.





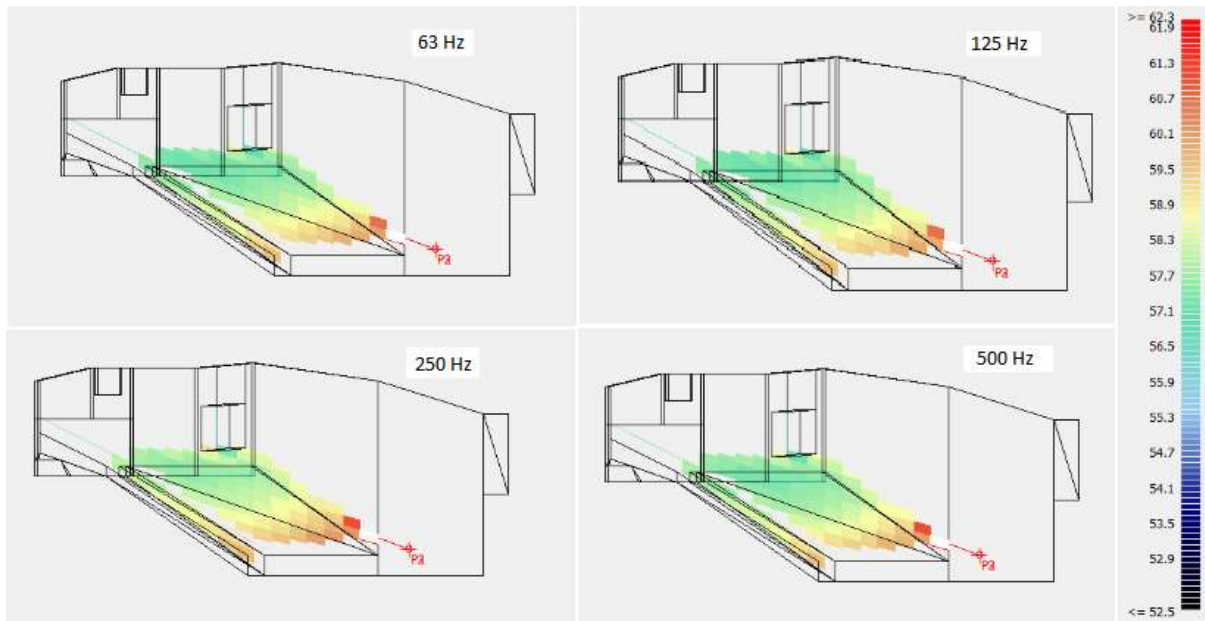
Διάγραμμα 6.2. 36: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι θέσεις 1, 6 και 9 που βρίσκονται στην πρώτη σειρά έχουν το υψηλότερο SPL. Οι υπόλοιπες θέσεις παρουσιάζουν μικρή μείωση καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή. Εξάιρεση αποτελεί η θέση 5 η οποία λόγω του γεγονότος ότι βρίσκεται μπροστά από τον τοίχο και της χαμηλής της απόστασης από το ταβάνι παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερο SPL σε σύγκριση με τις αμέσως προηγούμενες θέσεις.

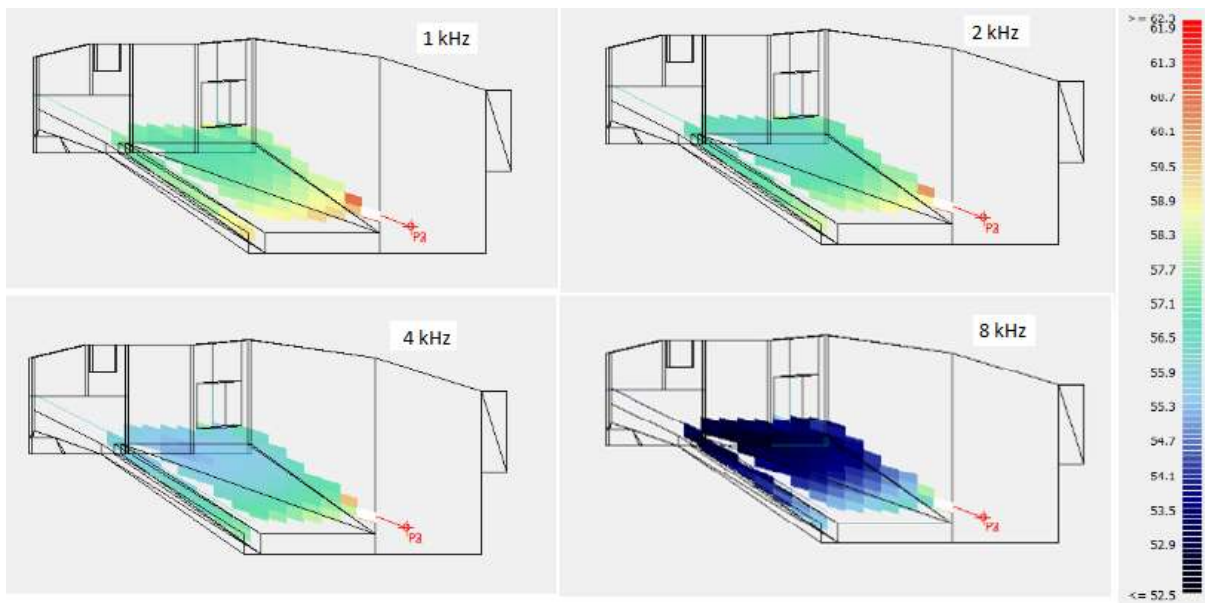
Από το διάγραμμα 6.2.60 επιβεβαιώνεται ότι οι θέσεις 1, 6 και 9 έχουν τις υψηλότερες τιμές. Βέβαια η θέση 6 έχει τις μεγαλύτερες τιμές, πιθανότητα λόγω ανακλάσεων αφού βρίσκεται δίπλα στον πλευρικό τοίχο. Οι θέσεις 6, 7 και 8 έχουν μεγαλύτερο SPL από τις αμέσως προηγούμενες θέσεις που μελετάμε, οι οποίες βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή, λόγω της εγγύτητάς τους με τον πλευρικό τοίχο. Τέλος παρατηρούμε ότι η θέση 11 έχει υψηλότερες τιμές από τις θέσεις 3 και 4 που βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή. Αυτό προκύπτει εξ' αιτίας της κοιλότητας που δημιουργείται από το ηλεκτρολογείο.

Το διάγραμμα 6.2.61 μας δίνει το μέσο SPL ανά συχνότητα. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή βρίσκεται πιο κοντά στην ελάχιστη καμπύλη του SPL από ότι στη μέγιστη. Αυτό μας δείχνει ότι οι περισσότερες θέσεις που μελετάμε πλησιάζουν την ελάχιστη τιμή. Η ένταση του ήχου είναι αρκετά ικανοποιητική.

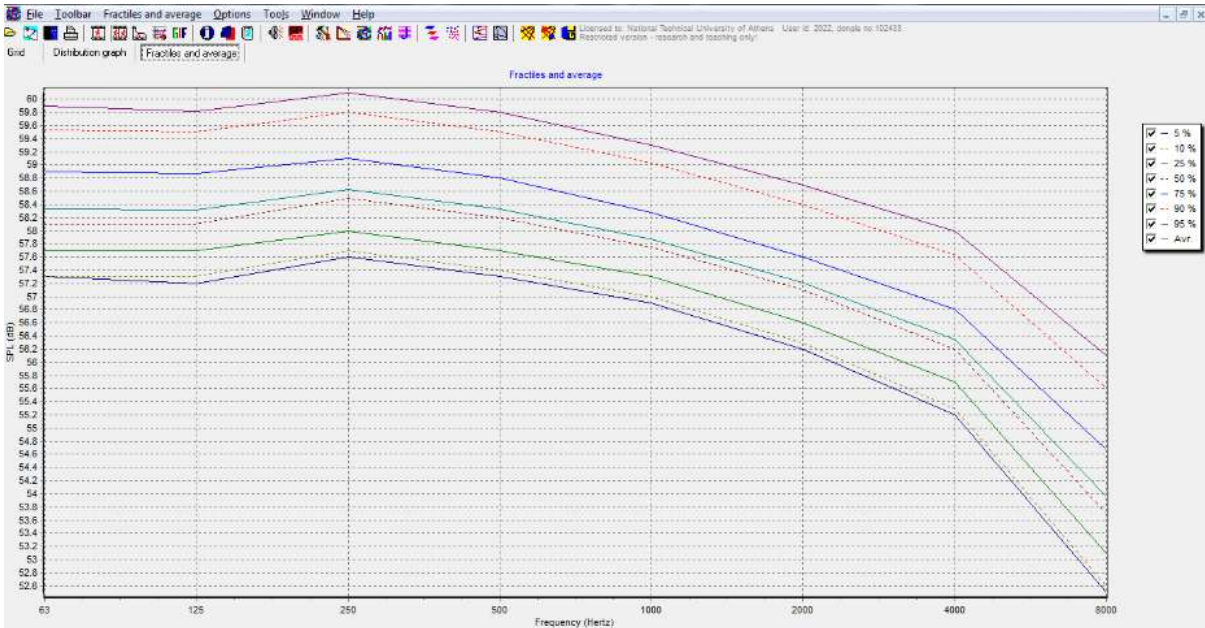
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα από την μέθοδο Grid.



Διάγραμμα 6.2. 37: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.2. 38: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

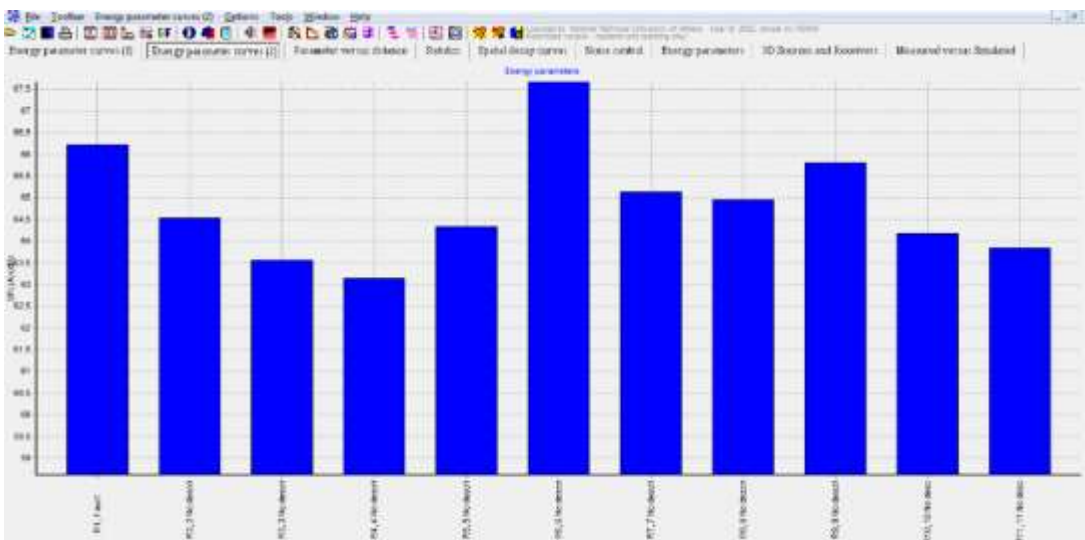


Διάγραμμα 6.2. 39: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα.

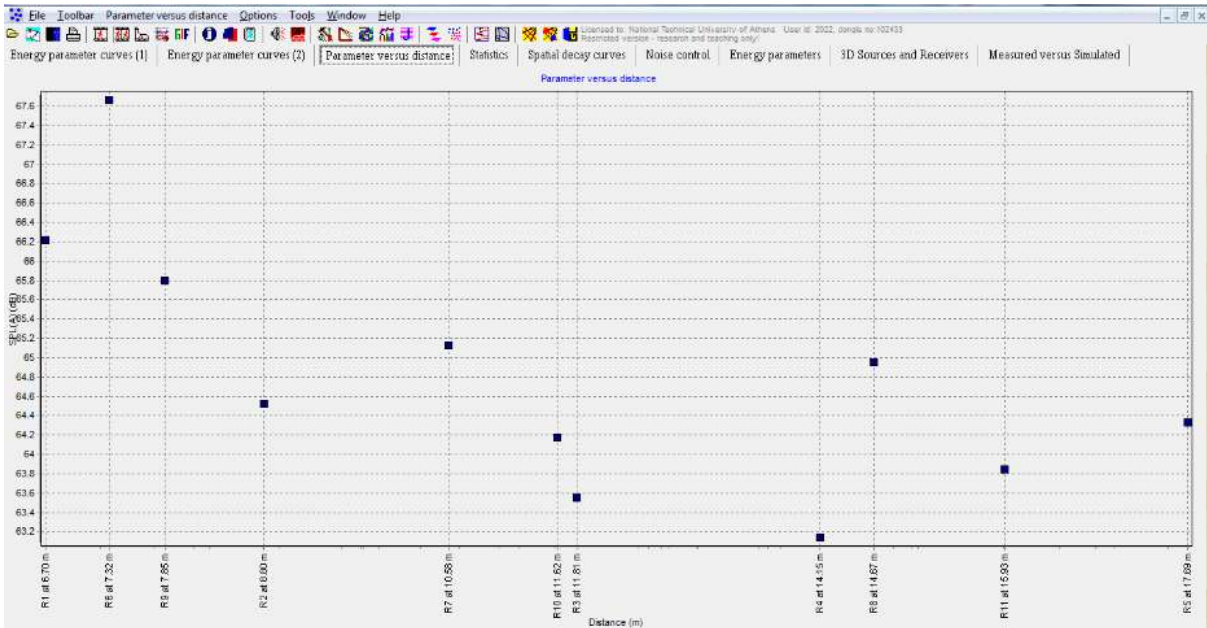
Από την μέθοδο Grid παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά στην πηγή βρισκόμαστε τόσο πιο υψηλό SPL έχουμε ανεξαρτήτως συχνότητας. Τέλος βλέπουμε ότι έχουμε παρόμοιες τιμές SPL για όλες τις συχνότητες εκτός από τις 4000Hz και 8000Hz που είναι ελαφρώς χαμηλότερες.

### 3. LAeq

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

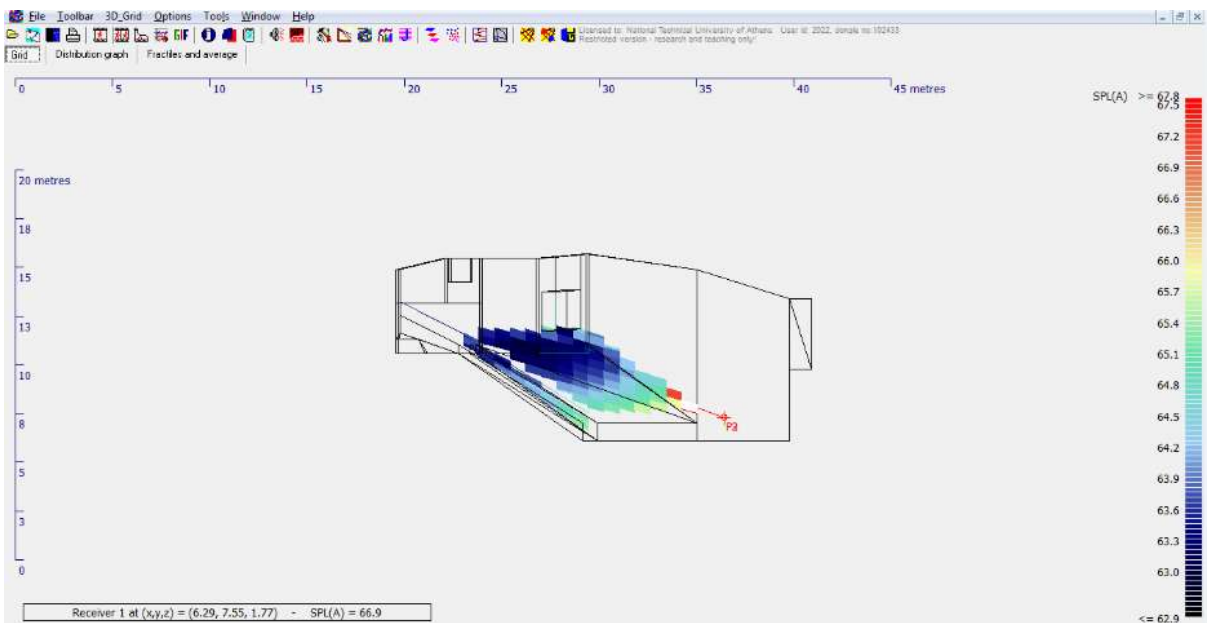


Διάγραμμα 6.2. 40: Τιμές του LAeq ανά θέση.



Διάγραμμα 6.2. 41: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.2. 42: Grid ανάλυση του LAeq.

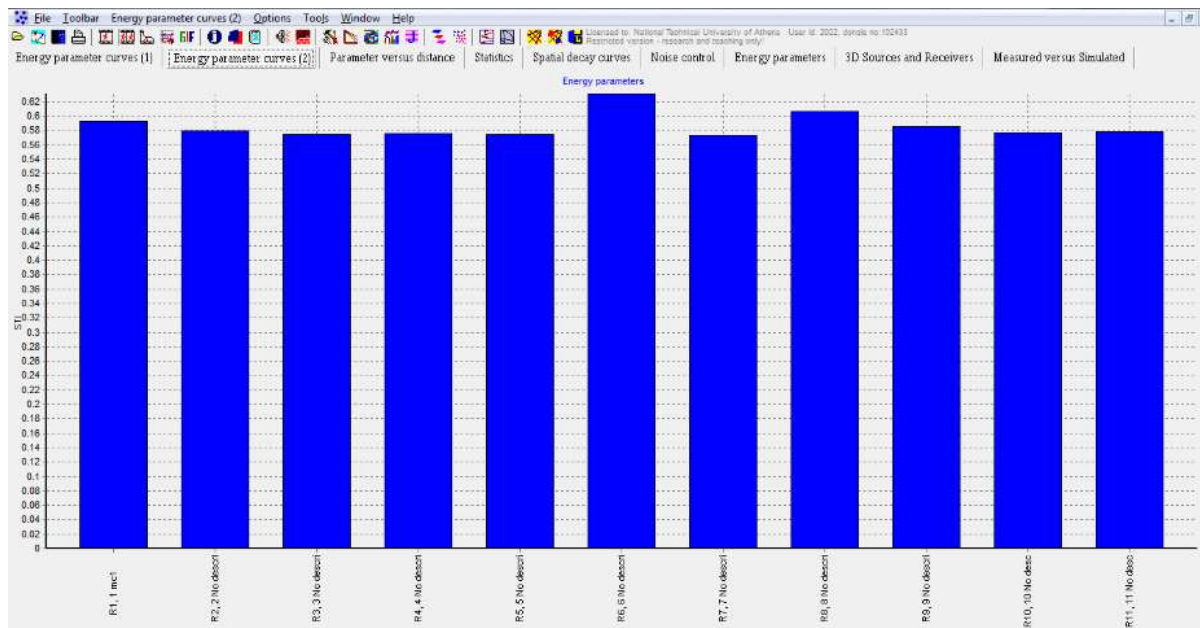
Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του LAeq είναι αντίστοιχα του SPL όπως και ήταν αναμενόμενο. Οι θέσεις κοντά στην πηγή έχουν τις μεγαλύτερες τιμές και όσο απομακρυνόμαστε από αυτή οι τιμές μειώνονται.



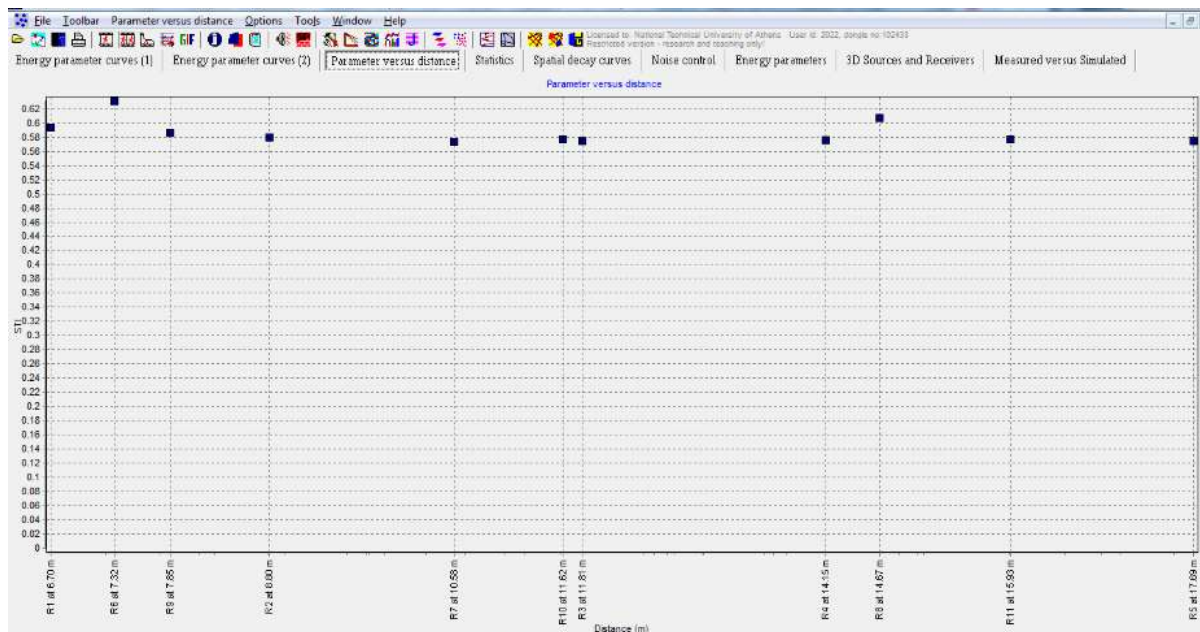
## Επιπλέον ακουστικά μεγέθη

### 1. STI

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

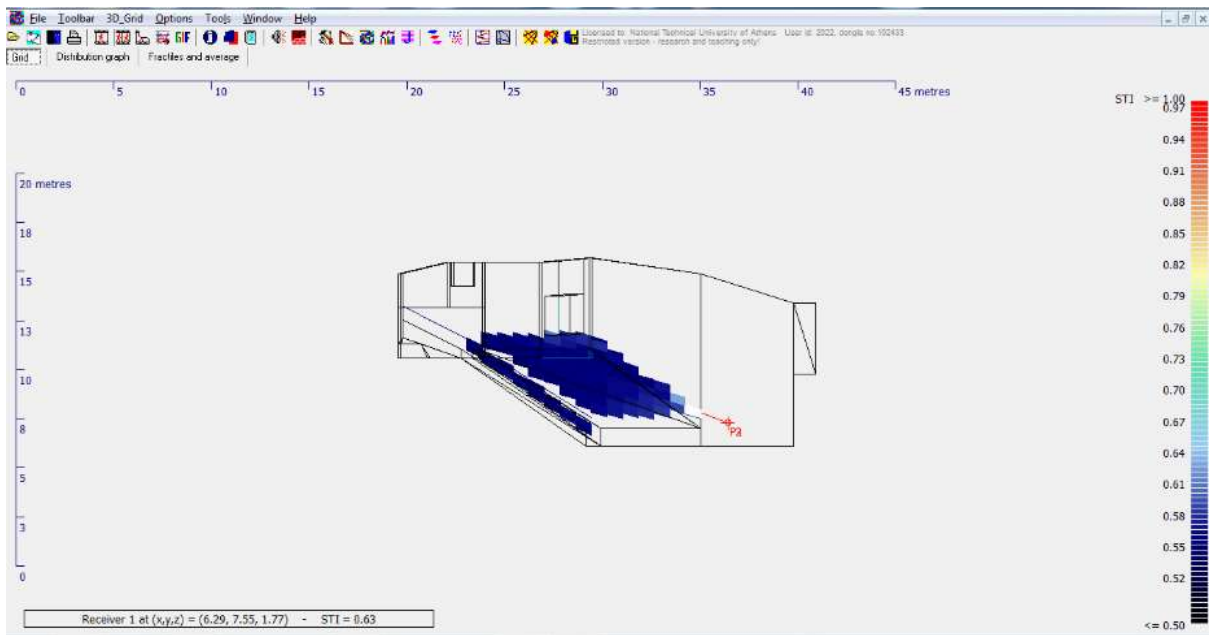


Διάγραμμα 6.2. 43: Τιμές του STI ανά θέση.



Διάγραμμα 6.2. 44: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.

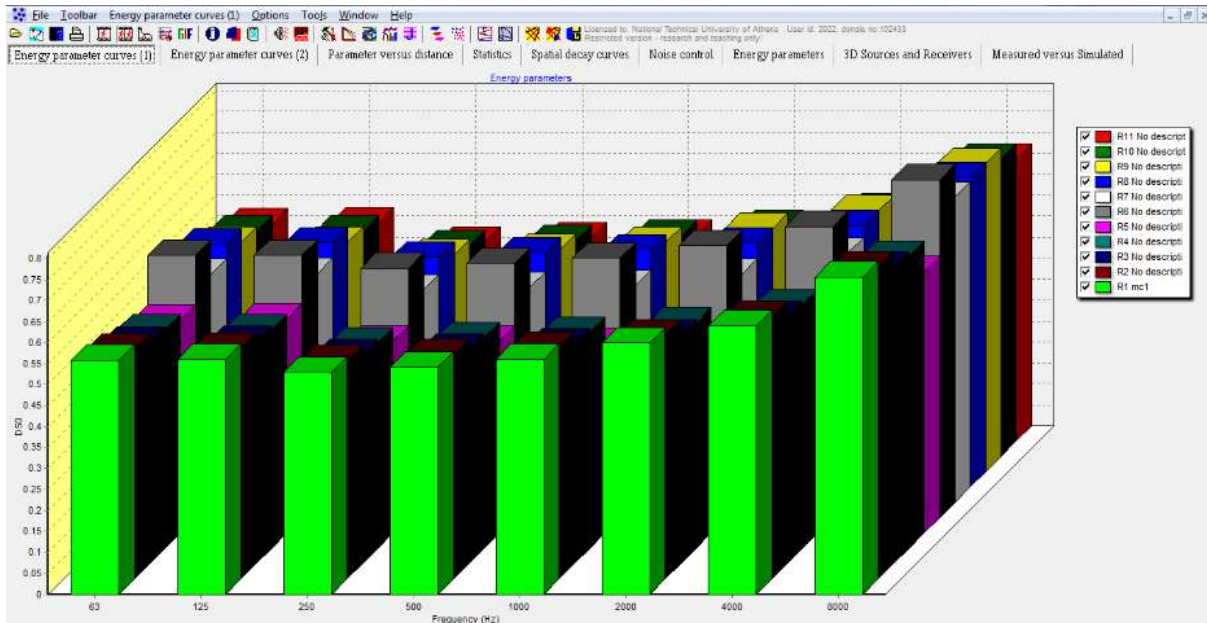


Διάγραμμα 6.2. 45: Grid ανάλυση του STI.

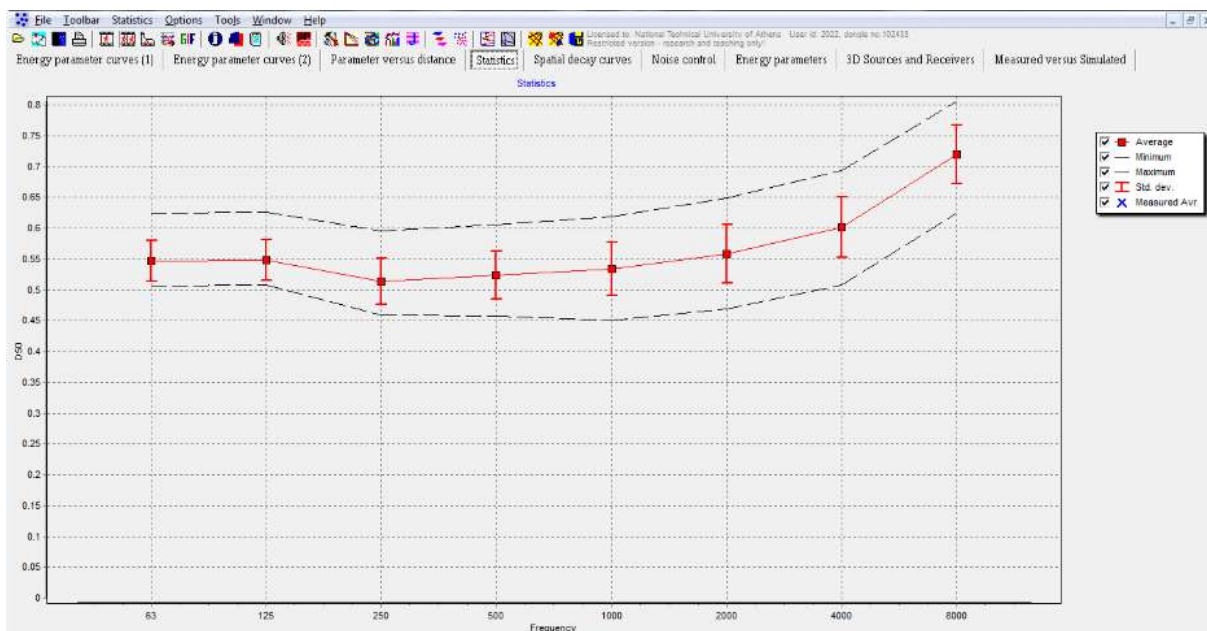
Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τα πρότυπα ISO είναι καλά. Παρατηρούμε ότι τιμές του STI για τις θέσεις που μελετάμε βρίσκονται γύρω από την τιμή 0,6. Από το διάγραμμα 6.2.69 παρατηρούμε ότι η τιμή του STI είναι ίδια ανεξαρτήτως θέσεως. Τέλος η μέθοδος Grid μας δίνει τα ίδια αποτελέσματα. Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα 6.2.70 όλες οι θέσεις έχουν την ίδια χρωματική απόχρωση πέραν κάποιων θέσεων δίπλα στον τοίχο των οποίων βέβαια η διαφορά δεν είναι σημαντική. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι οι θεατές μπορούν να ξεχωρίσουν καλά τις συλλαβές στο λόγο του ομιλητή.

## 2. D50, C80

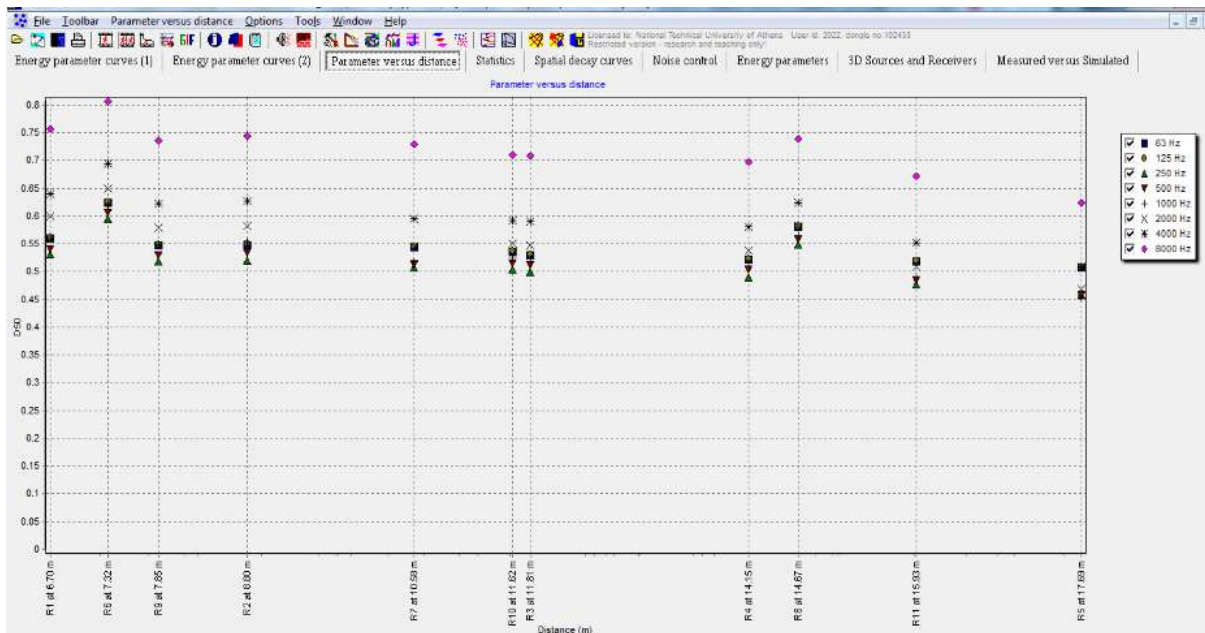
### Υπολογισμός παραμέτρου D50 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.2. 46: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).



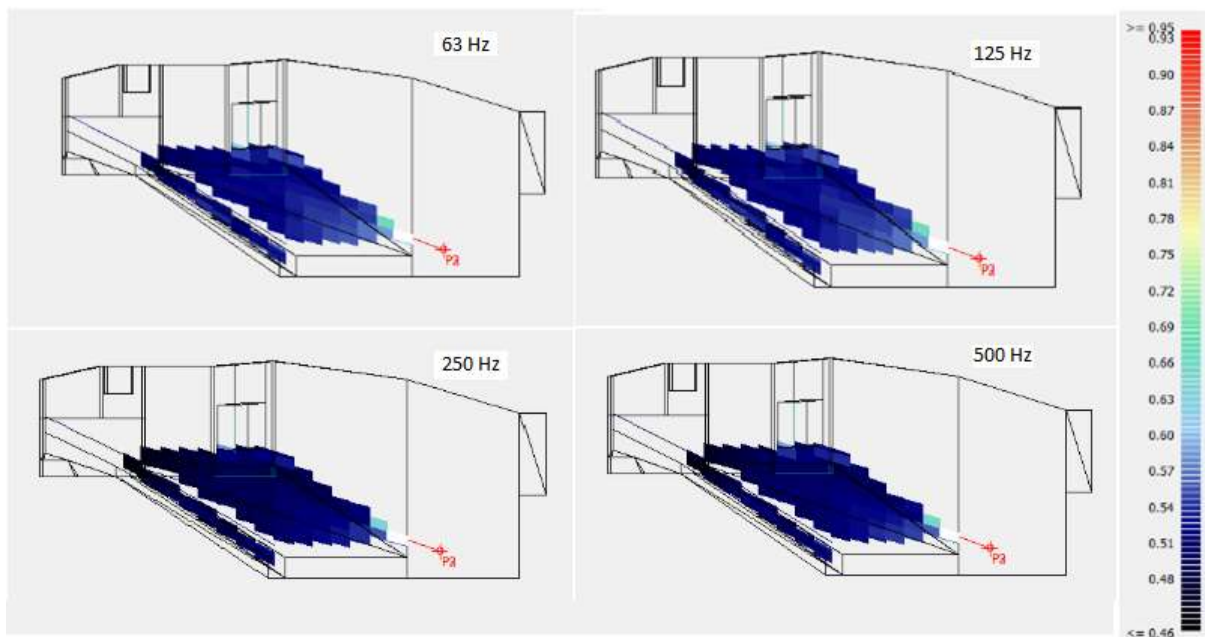
Διάγραμμα 6.2. 47: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 6.2. 48: Εκτίμηση του D50 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα

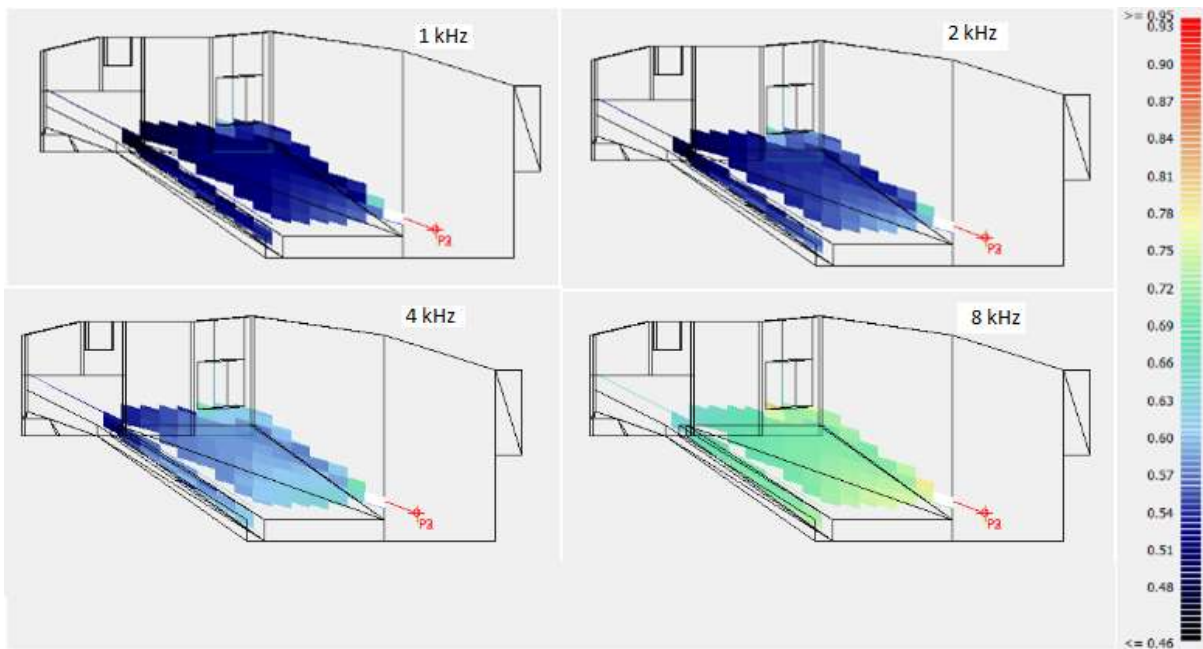
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι θέσεις 3, 4, 10 και 11 έχουν στα 250Hz οριακά μικρότερη τιμή του 0,5. Η θέση 11 έχει μικρότερη τιμή από τα 0,5 στη συχνότητα 500Hz ενώ η θέση 5 στις συχνότητες 250Hz, 500Hz και 2000Hz. Παρ'όλα αυτά από το διάγραμμα 6.2.72 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή του D50 είναι μεγαλύτερη του 0,5 για όλες τις συχνότητες.

Η μέθοδος Grid για το D50 μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.

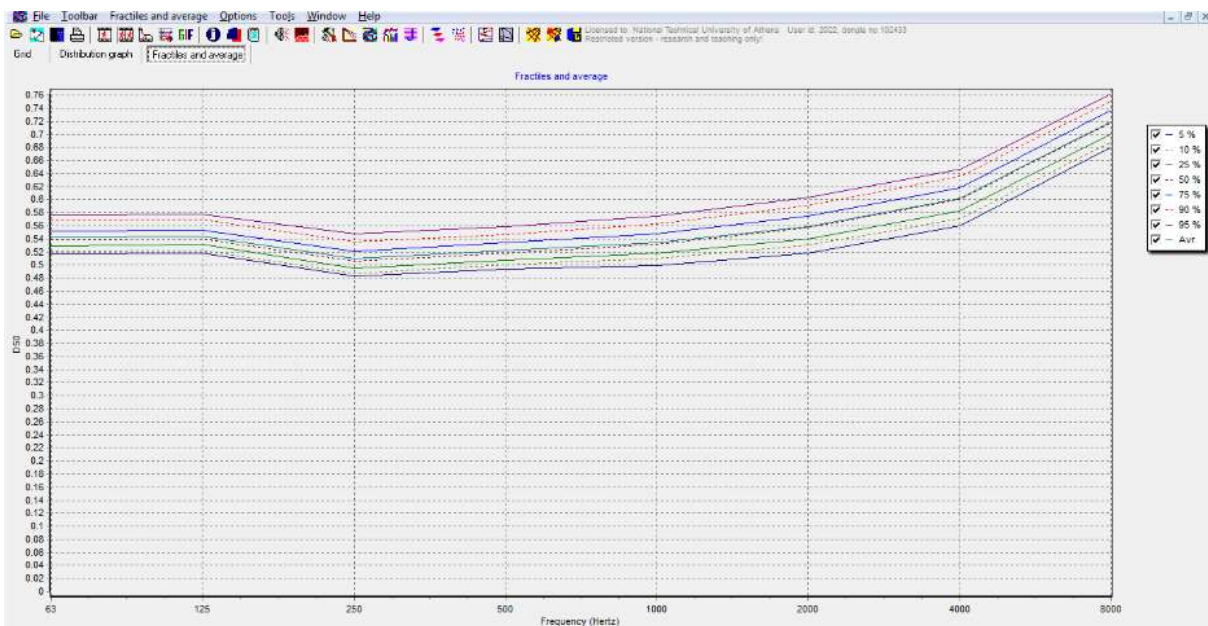


Διάγραμμα 6.2. 49: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz





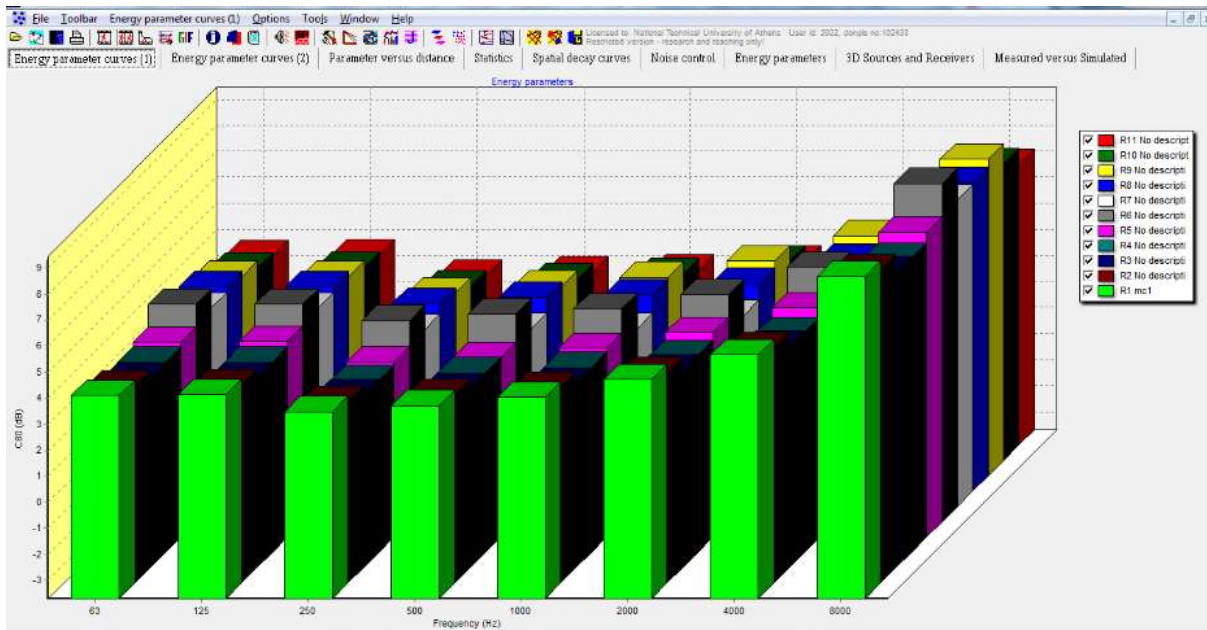
Διάγραμμα 6.2. 50: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



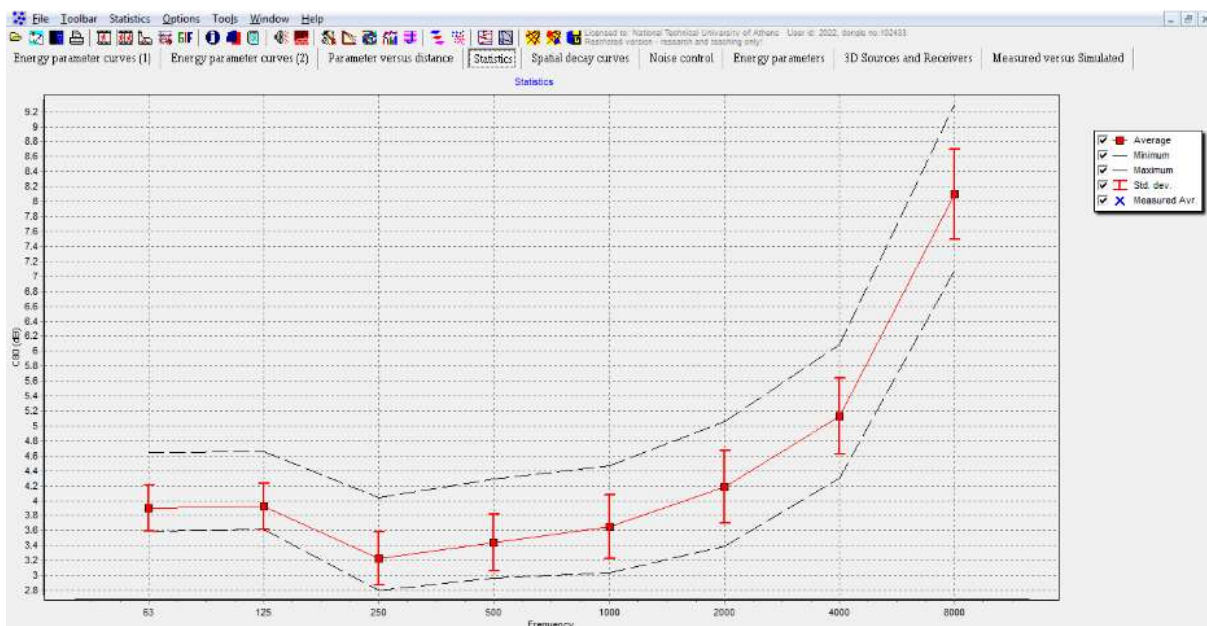
Διάγραμμα 6.2. 51: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα.

Από τη μέθοδο Grid παρατηρούμε ότι η αίθουσα σε όλο τον χώρο των θεατών έχει ικανοποιητική τιμή D50, γεγονός που την καθιστά καταληπτή όσον αφορά την ομιλία.

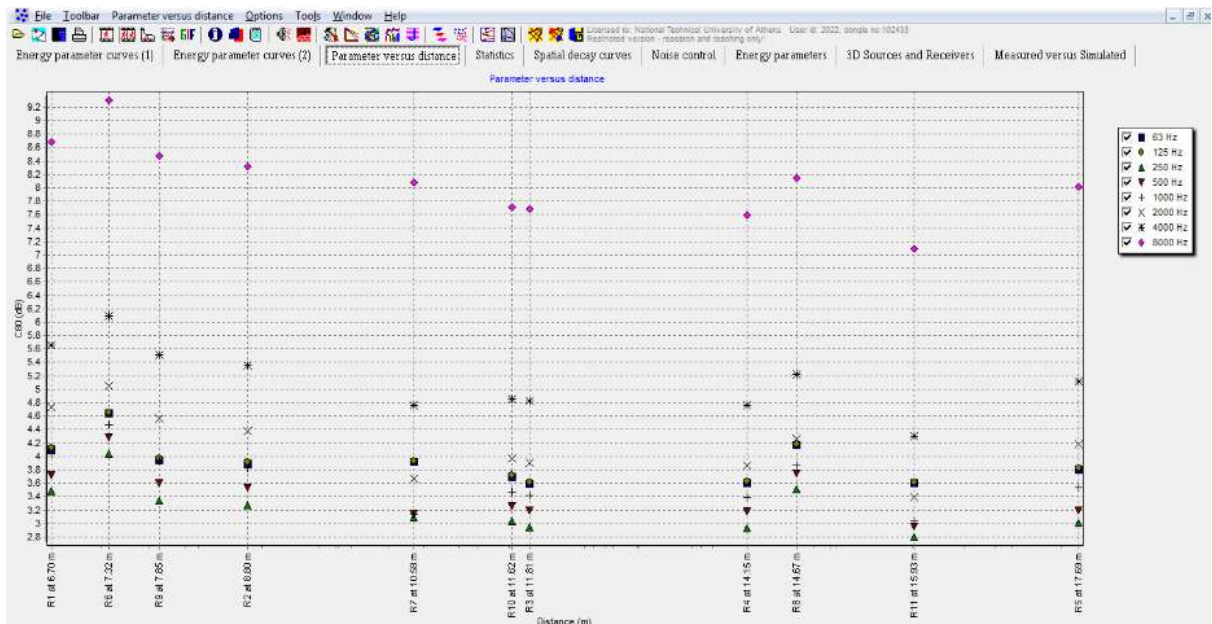
## Υπολογισμός παραμέτρου C80 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.2. 52: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.2. 53: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα.

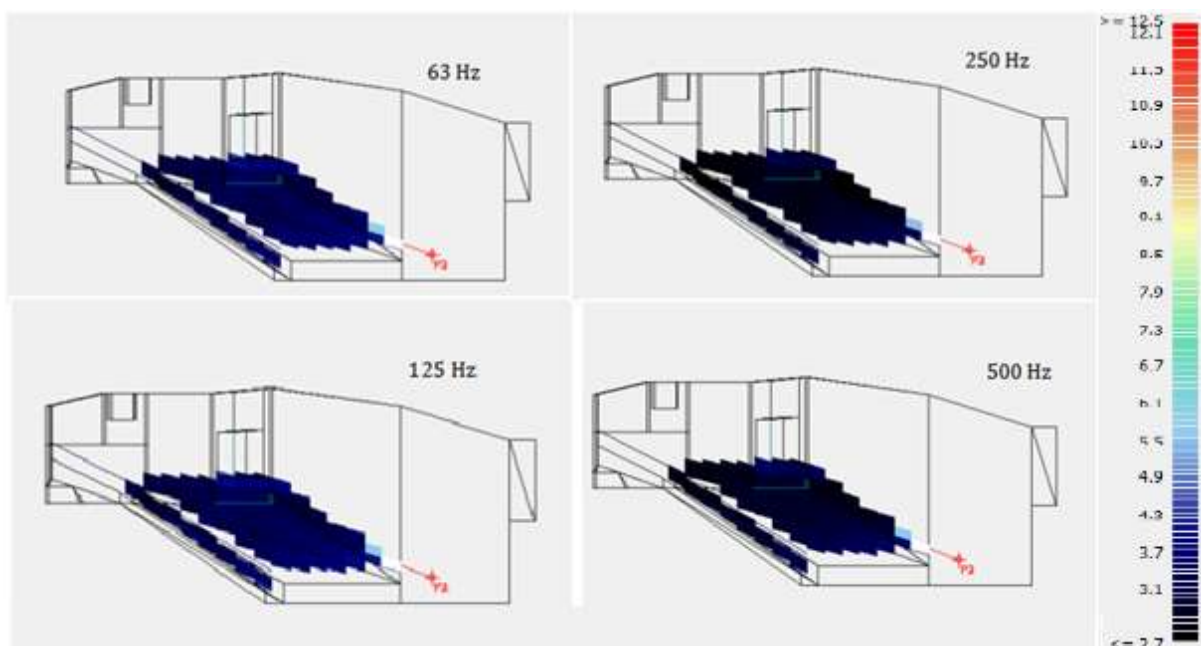


Διάγραμμα 6.2. 54: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα οι τιμές του C80 για θέατρα είναι από -1 έως 3dB.

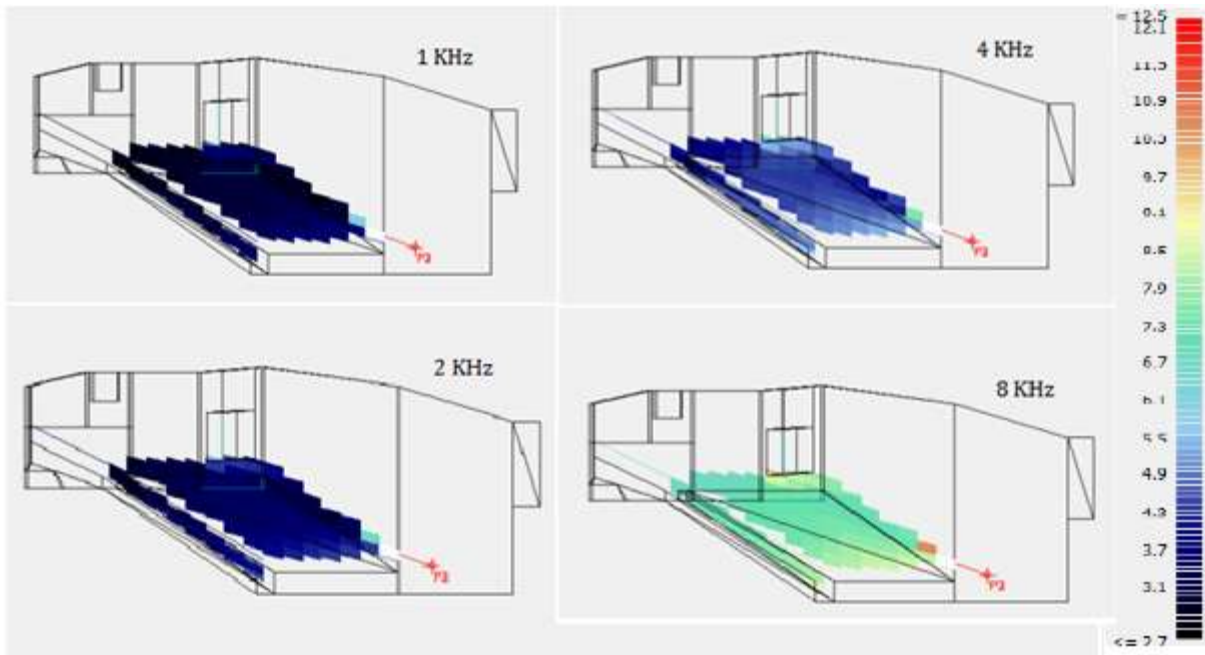
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές του μεγέθους είναι λίγο παραπάνω με τις τιμές να κυμαίνονται από 3,2dB ως 5,2dB με εξαίρεση τα 8000Hz όπου η τιμή ξεφεύγει στα 7dB με 8dB.

Η μέθοδος Grid για το C80 μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.

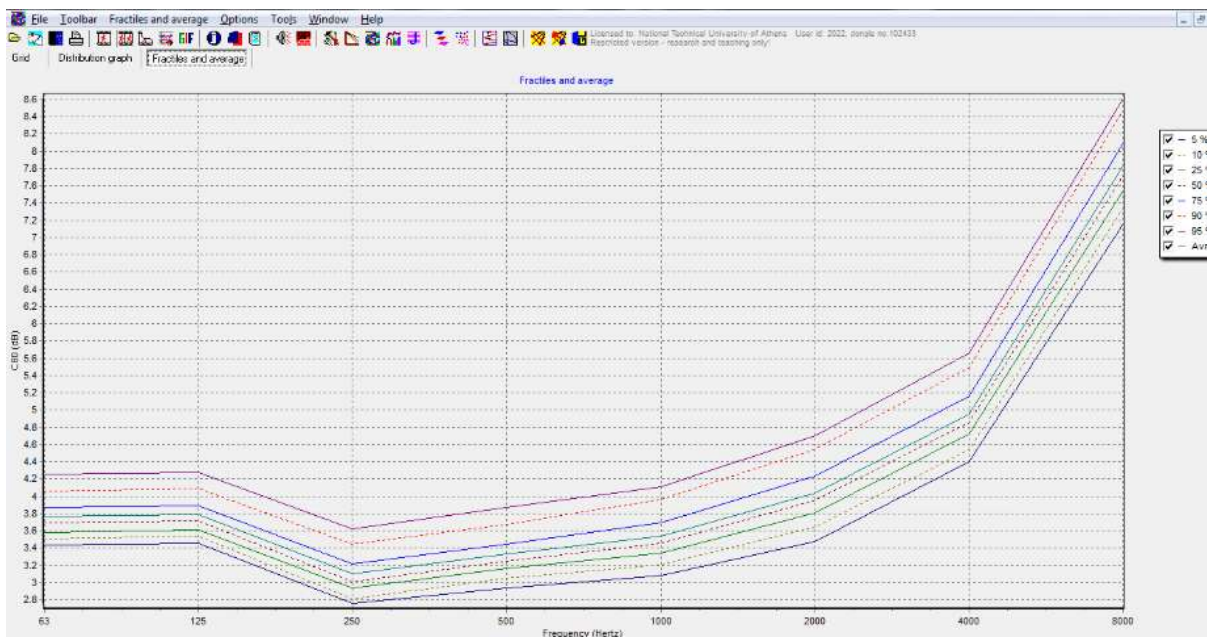


Διάγραμμα 6.2. 55: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz





Διάγραμμα 6.2. 56: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

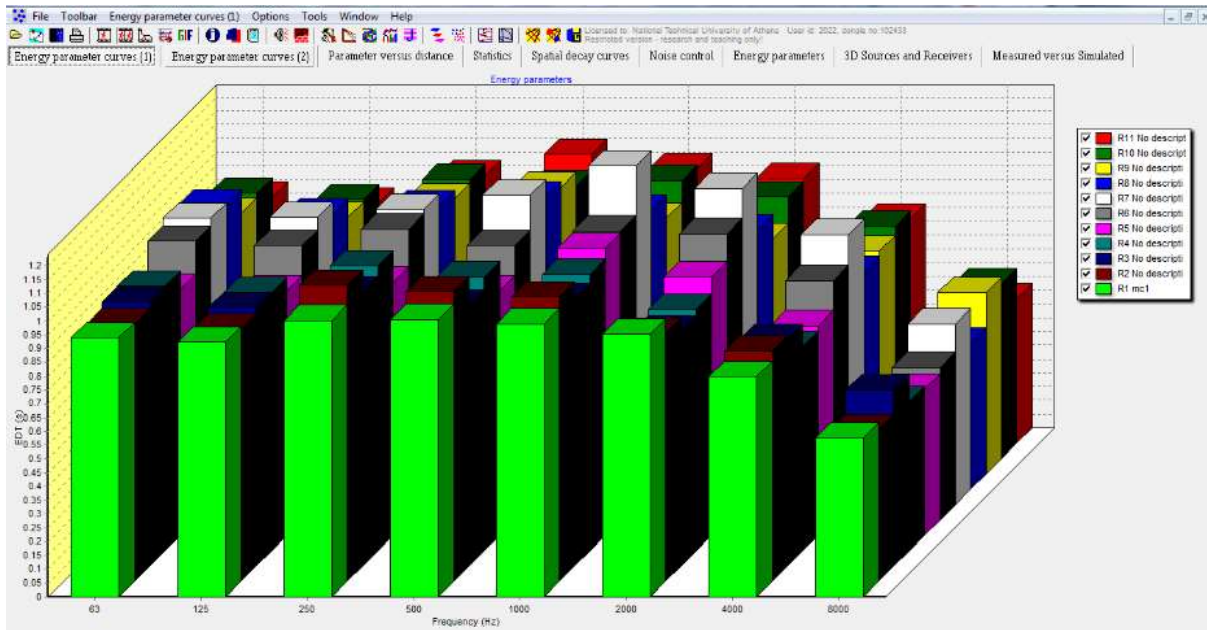


Διάγραμμα 6.2. 57: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα.

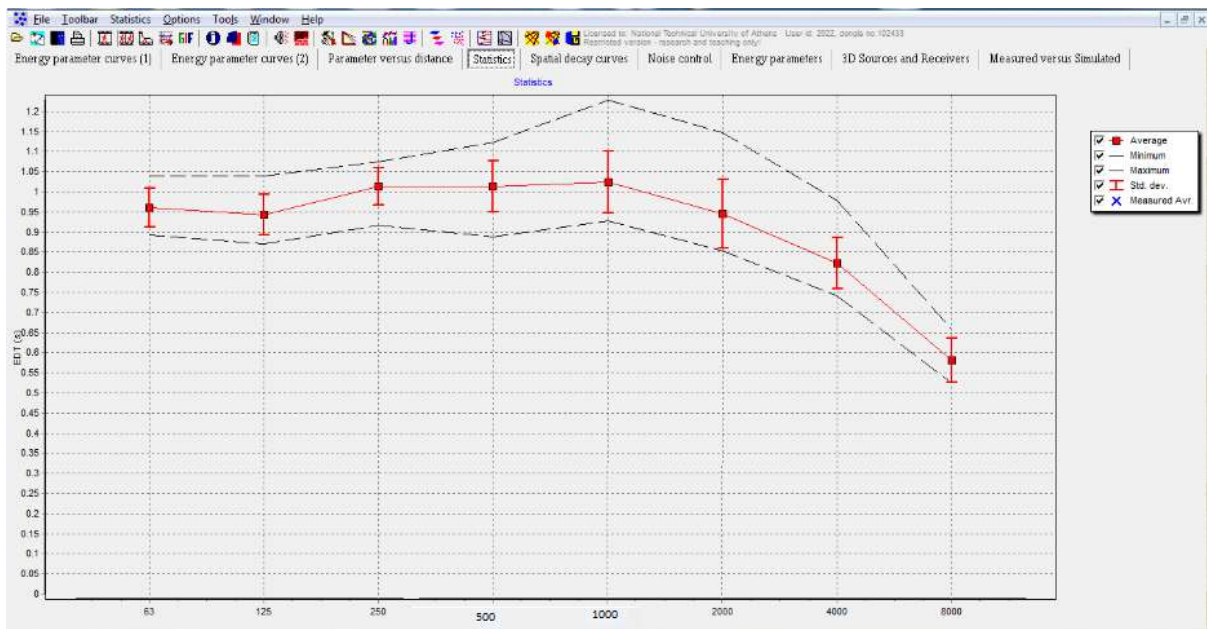
Η μέθοδος Grid μας δείχνει τα ίδια αποτελέσματα, με τις τιμές του C80 να κυμαίνονται κοντά στις επιθυμητές ιδιαίτερα στις μεσαίες συχνότητες ενώ στις υψηλές οι τιμές αυξάνονται.

### 3. EDT

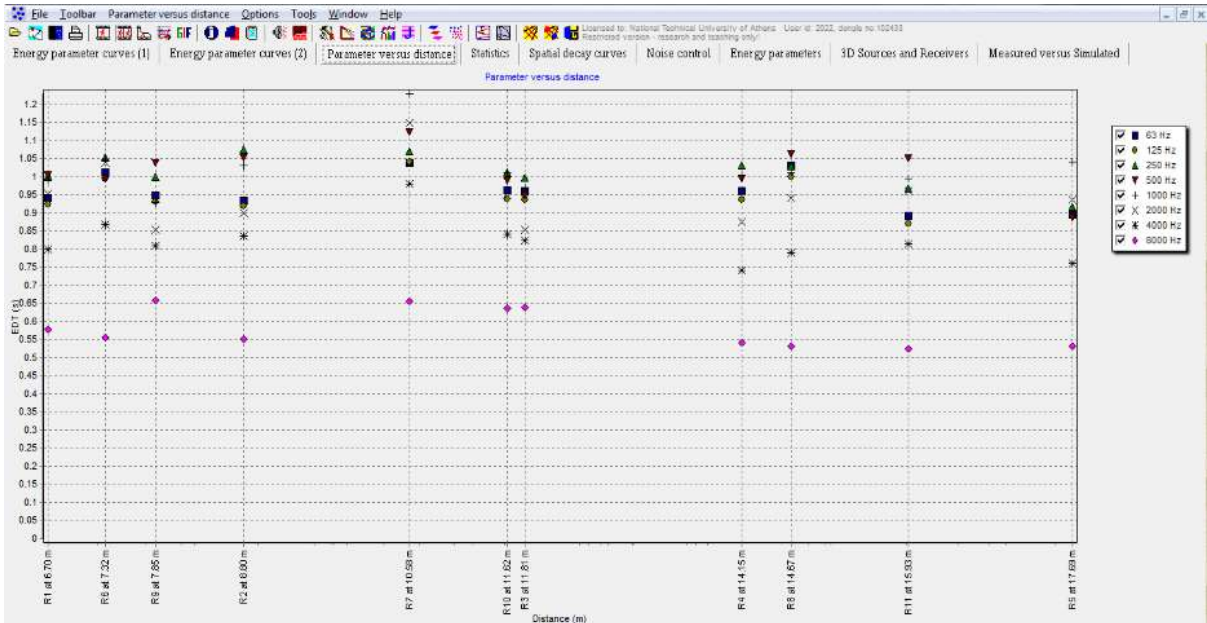
#### Υπολογισμός παραμέτρου EDT με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.2. 58: Εκτίμηση του EDT ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).

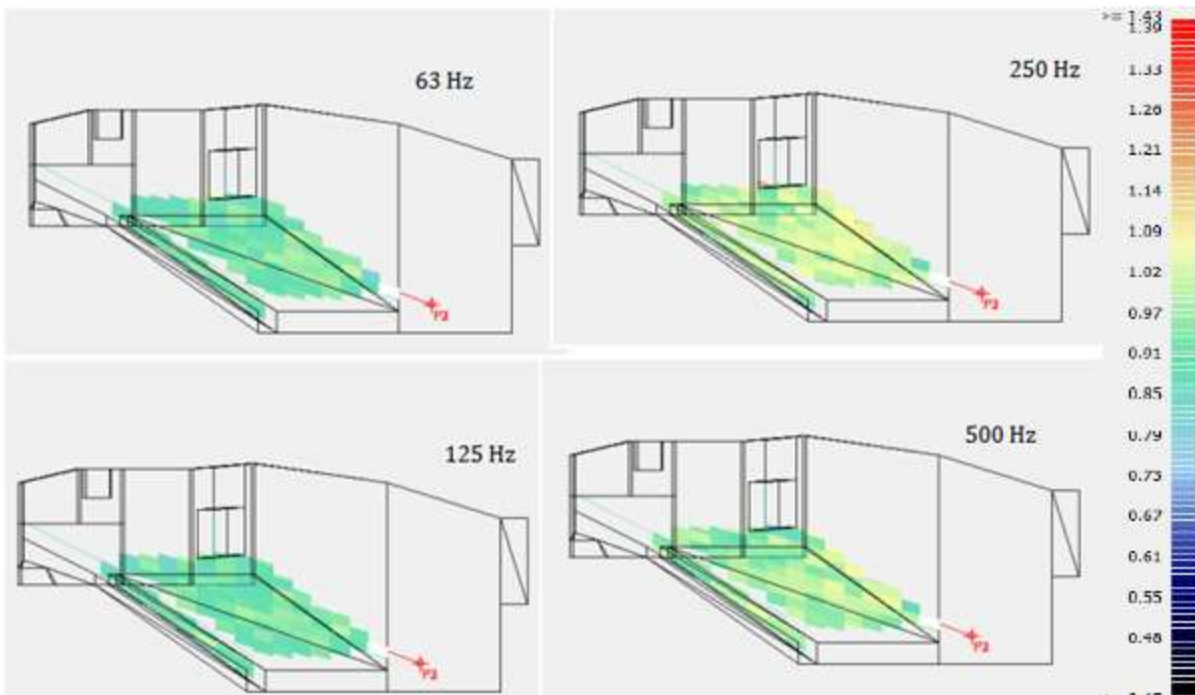


Διάγραμμα 6.2. 59: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα.



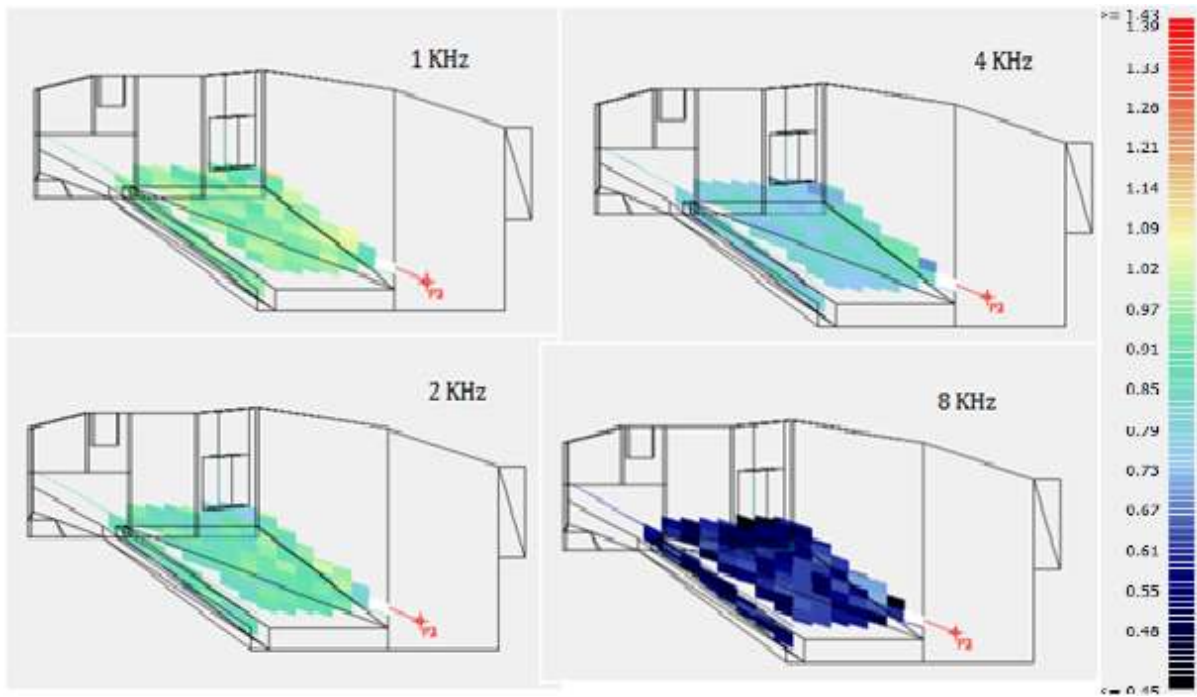
Διάγραμμα 6.2. 60: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα

Η μέθοδος Grid για το EDT μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.

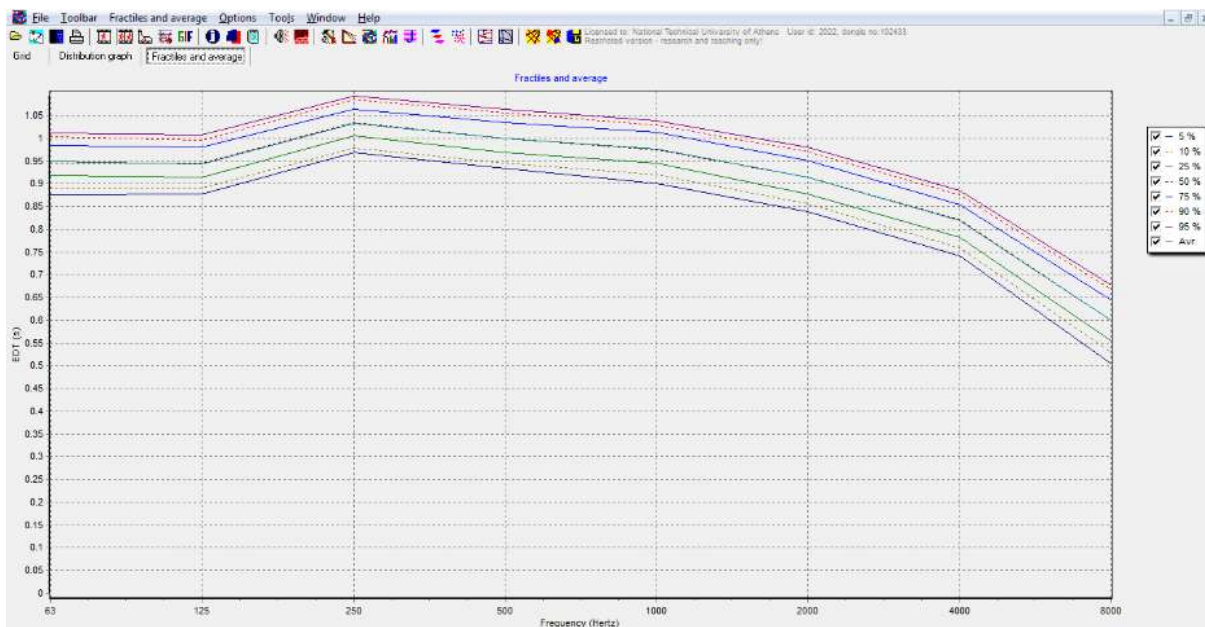


Διάγραμμα 6.2. 61: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz





Διάγραμμα 6.2. 62: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



Διάγραμμα 6.2. 63: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα.

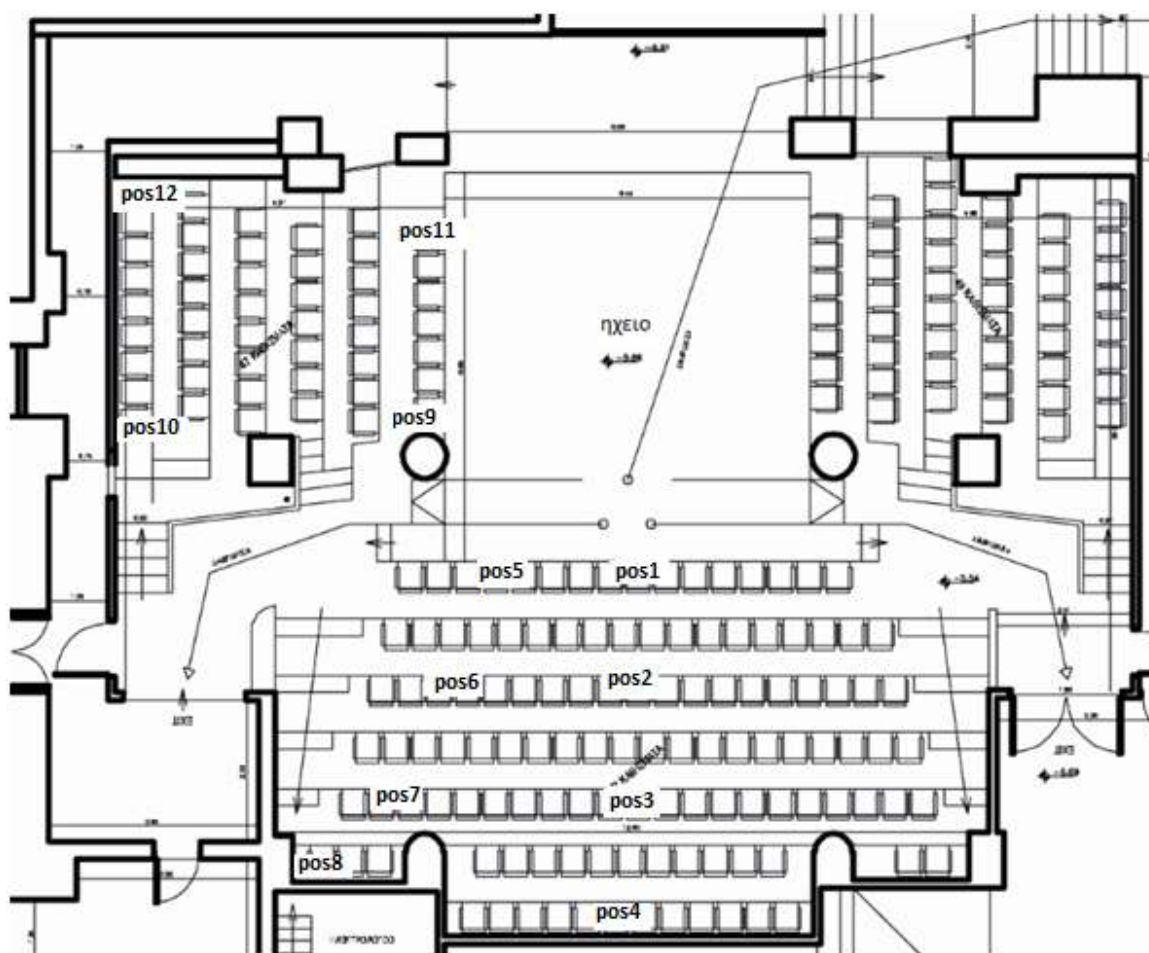
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές σε όλες τις θέσεις κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,9s και 0,95s και είναι λίγο πιο μεγάλες από τις τιμές του RT.

### 3.Θέατρο Τέχνης- Υπόγειο

Το θέατρο Τέχνης ιδρύθηκε το 1942 από τον Έλληνα σκηνοθέτη Κάρολο Κουν ενώ μόλις το 1954 στεγάστηκε μόνιμα στην οδό Πεσματζόγλου 5, 10564 Αθήνα, η σκηνή αυτή ονομάζεται Υπόγειο και έχει χωρητικότητα 220 θέσεων. Το 1985 η Πολιτεία θέλοντας να τιμήσει τον Κάρολο Κουν, βοήθησε στη δημιουργία της δεύτερης μόνιμης σκηνή 240 θέσεων στην οδό Φρυνίχου 14, στην Πλάκα.

Η αίθουσα Υπόγειο βρίσκεται στο επίπεδο μείον 1 του κτιρίου.

Οι θέσεις των μικροφώνων και της πηγής κατά την διάρκεια των μετρήσεων φαίνονται στην Εικόνα 6.3.1 παρακάτω.



Εικόνα 6.3. 1: Κάτοψη των θέσεων μικροφώνων και του ηχείου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στο θέατρο Τέχνης-Υπόγειο.



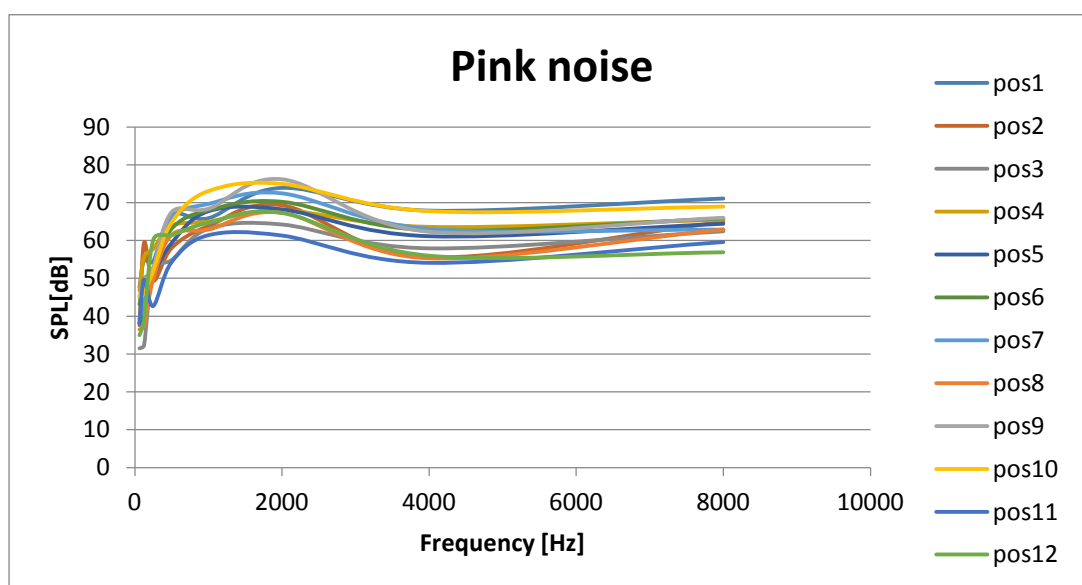
## Μετρήσεις

### 1. Φασματική κατανομή

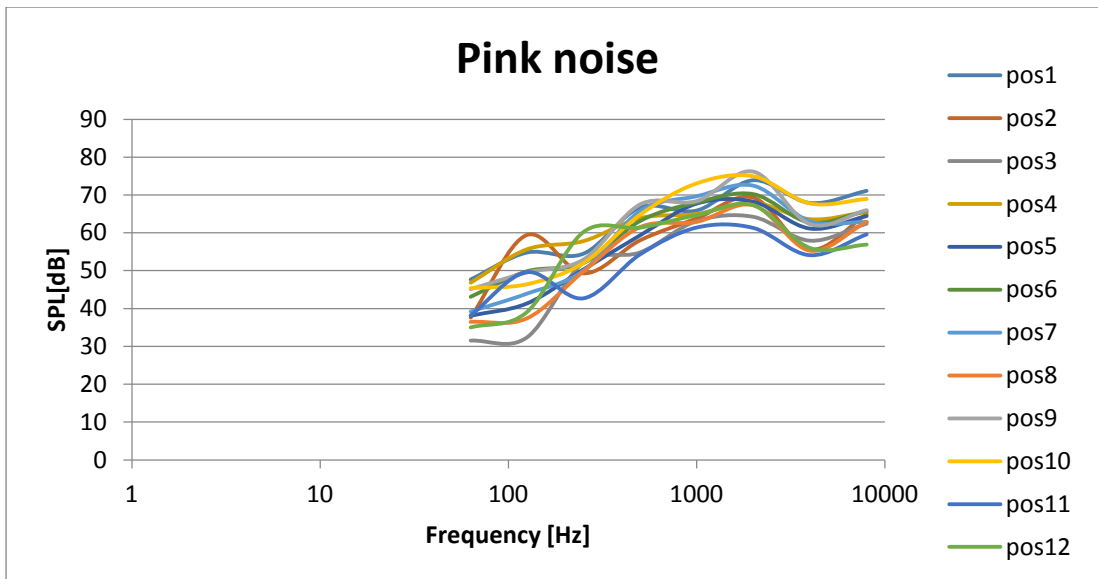
Ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη που μελετάται σε ένα χώρο είναι η συχνοτική κατανομή του ήχου στο χώρο αυτό. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) σε dB, καθώς μας δείχνει πόσο καλά κατανέμεται ο ήχος ανά συχνότητα και το μέγεθος LAeq(dB), το οποίο μας δείχνει τη στάθμη του ισοδύναμου θορύβου ανά σημείο, κατά φίλτρο A.

Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν μέσω δύο σημάτων εισόδου, pink noise και white noise. Τα σήματα αυτά, μετά από επεξεργασία στο πρόγραμμα Matlab μας έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Ακολουθούν οι μετρήσεις με σήματα εισόδου αρχικά Pink\_noise και στη συνέχεια White\_noise σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

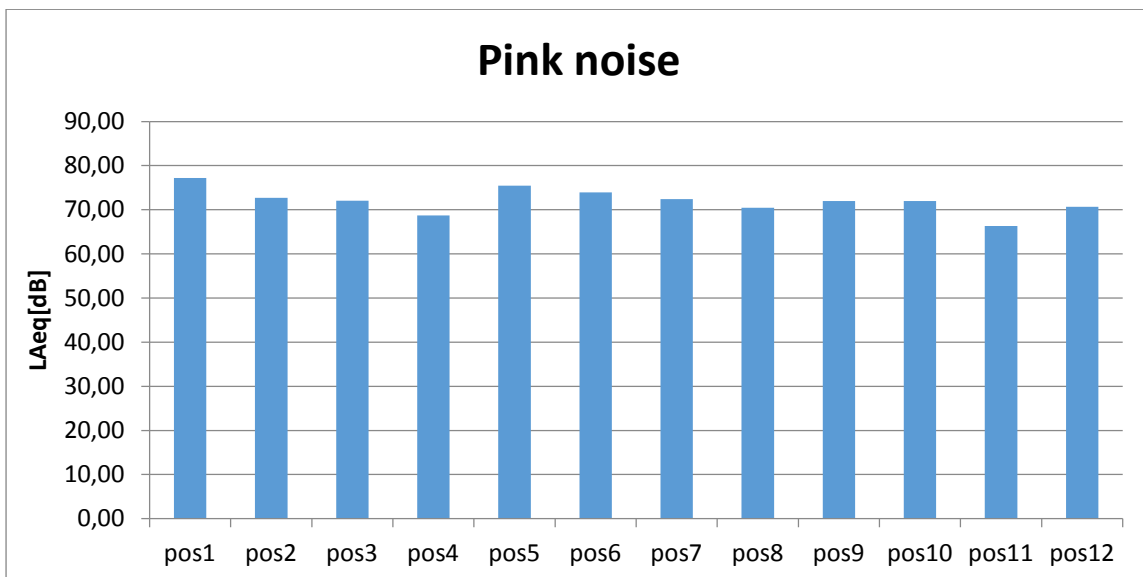


Διάγραμμα 6.3. 1: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.



Διάγραμμα 6.3. 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

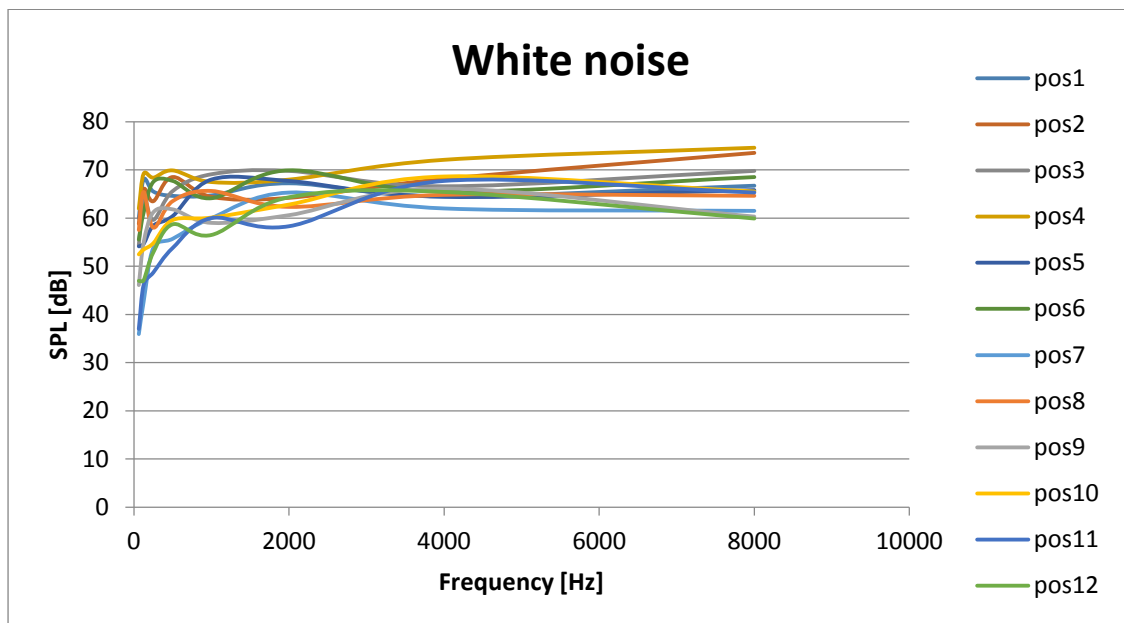
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι η φασματική κατανομή του ροζ θορύβου στο χώρο δεν ακολουθεί την θεωρητική καμπύλη όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Σύμφωνα με αυτή, θα αναμέναμε μια συνεχή πτώση της στάθμης θορύβου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, παρατηρείται μια μικρή αύξηση των τιμών του SPL με την αύξηση των τιμών της συχνότητας.



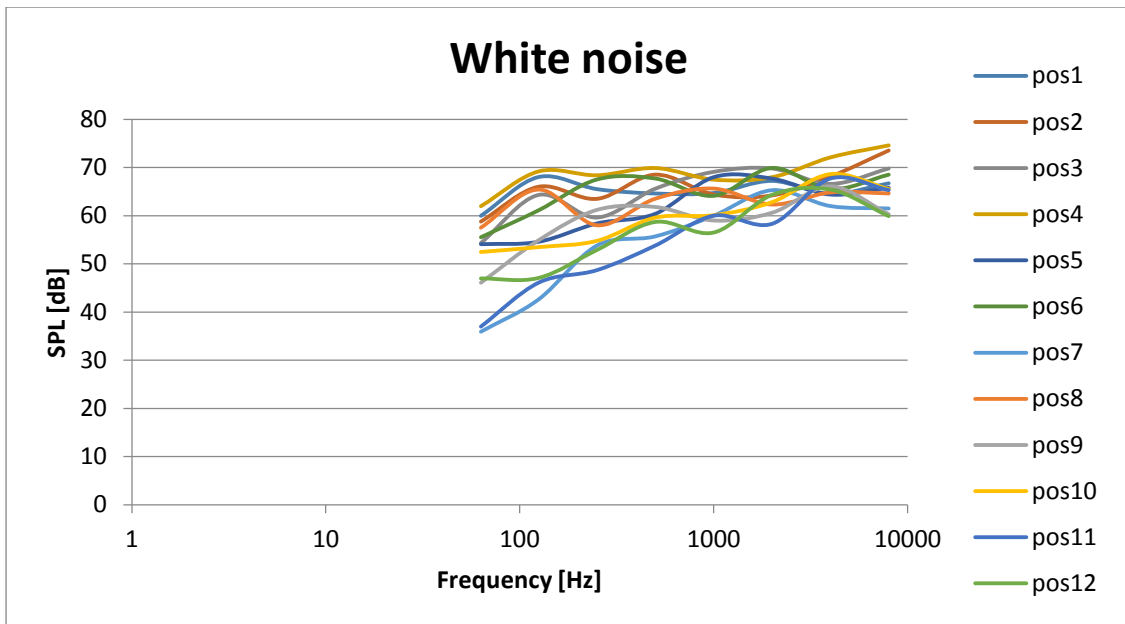
Διάγραμμα 6.3. 3: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για ροζ θόρυβο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

Από το διάγραμμα του LAeq παρατηρούμε μια σταθερή κατανομή ανά σειρά των θέσεων που μελετάμε. Παρατηρούμε ότι οι θέσεις 1 και 5 έχουν την ίδια τιμή LAeq καθώς

βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή. Οι υπόλοιπες θέσεις παρουσιάζουν μια συνεχή πτώση της τιμής του LAeq καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν. Παρατηρούμε επίσης, ότι οι θέσεις που βρίσκονται στο πλάι δεν ακολουθούν την αναμενόμενη κατανομή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή το ηχείο που είχαμε ως πηγή δεν είναι πολυκατευθυντικό και συνεπώς ο ήχος στις θέσεις που βρίσκονται στο πλάι φτάνει εξ ανακλάσεως. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι οι θέσεις 9 και 10 έχουν την ίδια τιμή. Αυτό συμβαίνει επειδή η θέση 9 βρίσκεται πίσω από κολώνα και συνεπώς δεν δέχεται τόσες ανακλάσεις όσο η θέση 10. Από την άλλη οι θέσεις 11 και 12 παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή σε αντίθεση με τις υπόλοιπες θέσεις, αυτές βρίσκονται πίσω από το ηχείο και συνεπώς δε βρίσκονται στο απ' ευθείας ηχητικό πεδίο της πηγής και ο ήχος φτάνει μόνο εξ' ανακλάσεως. Τέλος η θέση 12 έχει την μεγαλύτερη τιμή από η θέση 11 διότι βρίσκεται πιο ψηλά και δίπλα σε γωνία κι γι' αυτό δέχεται περισσότερες ανακλάσεις.

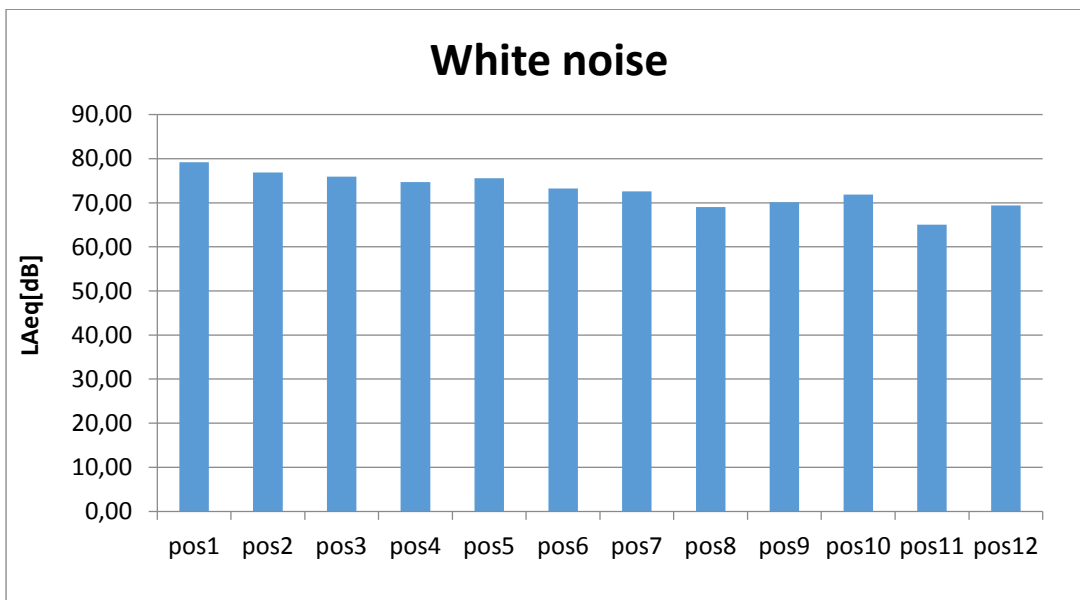


Διάγραμμα 6.3. 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.



Διάγραμμα 6.3. 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης- Υπόγειο.

Τα διαγράμματα του λευκού θορύβου θα έπρεπε να ακολουθούν την φασματική κατανομή όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 1.2. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη λευκού θορύβου ακολουθεί αυτήν την κατανομή με κάποιες διακυμάνσεις.



Διάγραμμα 6.3. 6: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για λευκό θόρυβο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

Το διάγραμμα του LAeq είναι και αυτό ανάλογο του ροζ θορύβου πιο πάνω. Η ενεργειακή στάθμη είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι θέσεις πιο κοντά στην πηγή έχουν τις

μεγαλύτερες τιμές ενώ όσο απομακρυνόμαστε τόσο μικραίνουν οι τιμές του LAeq. Η μεγαλύτερη πτώση που παρατηρείται είναι 10dB. Να σημειωθεί ότι οι θέσεις 9, 10, 11 και 12 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά που παρατηρήσαμε και στο ροζ θόρυβο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε υψηλό SPL σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Οι τιμές αυτές είναι συνέπεια των ανακλάσεων του χώρου.

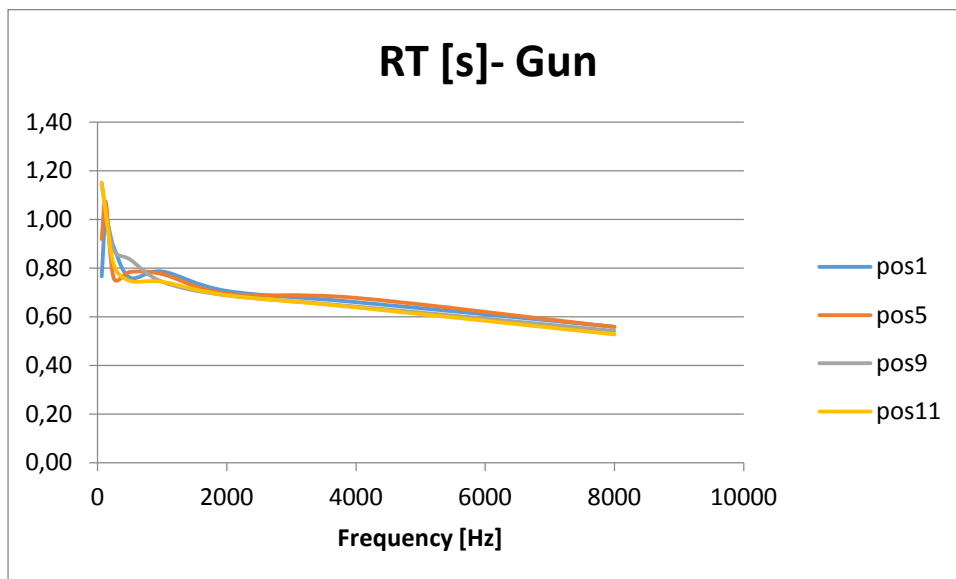
## 2. Χρόνος Αντήχησης

Το σήμα που ηχογραφήθηκε είναι κρουστικός παλμός με χρήση πιστολιού αφέτη και μπαλονιού.

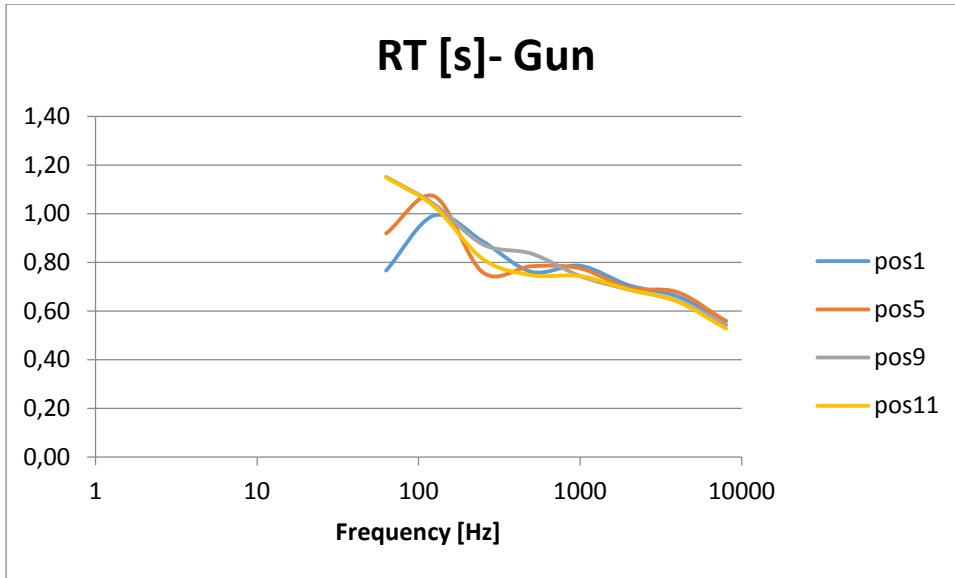
Τα σήματα αυτά ηχογραφήθηκαν από το λογισμικό Dirac και η επεξεργασία τους έγινε στο λογισμικό matlab.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για τις διάφορες θέσεις που μελετήσαμε.

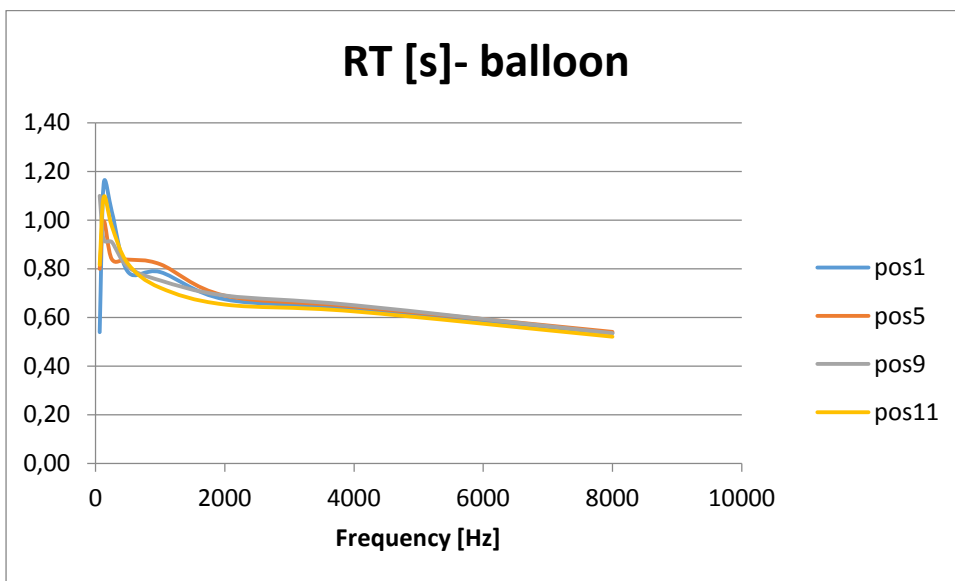
Τα πρώτα διαγράμματα αφορούν την σύγκριση μεταξύ των θέσεων 1, 5, 9 και 11 τα οποία είναι τα πιο κοντινά στην πηγή.



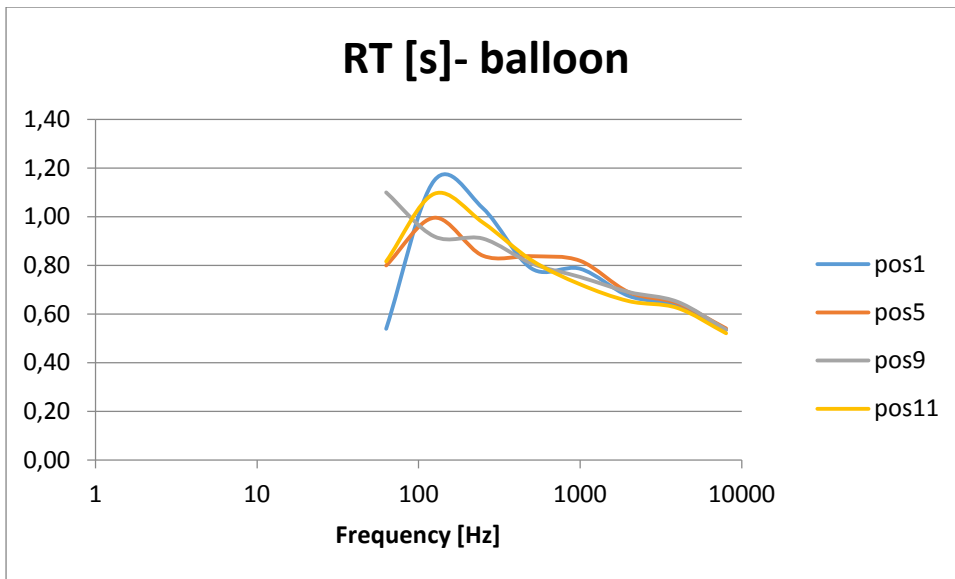
Διάγραμμα 6.3. 7: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.



Διάγραμμα 6.3. 8: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



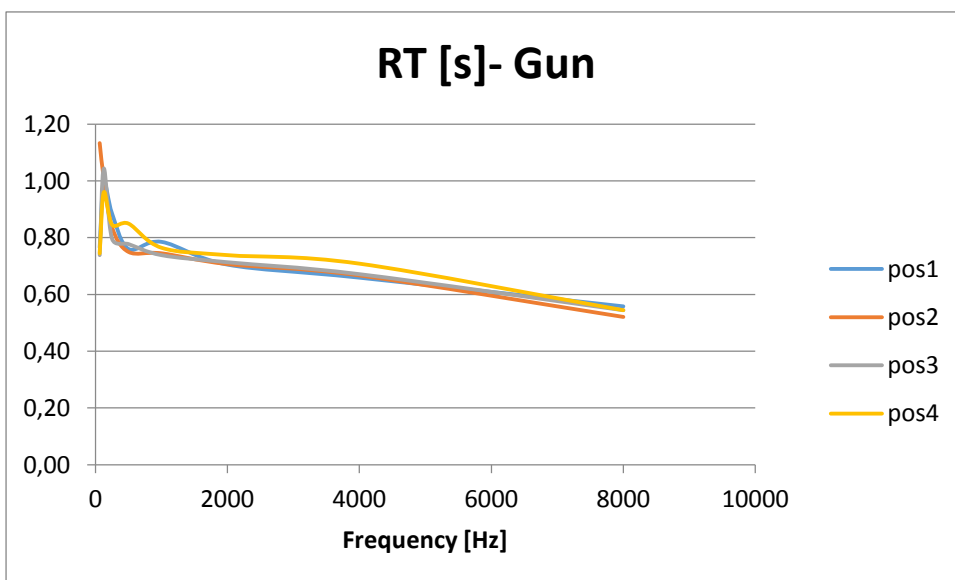
Διάγραμμα 6.3. 9: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



Διάγραμμα 6.3. 10: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

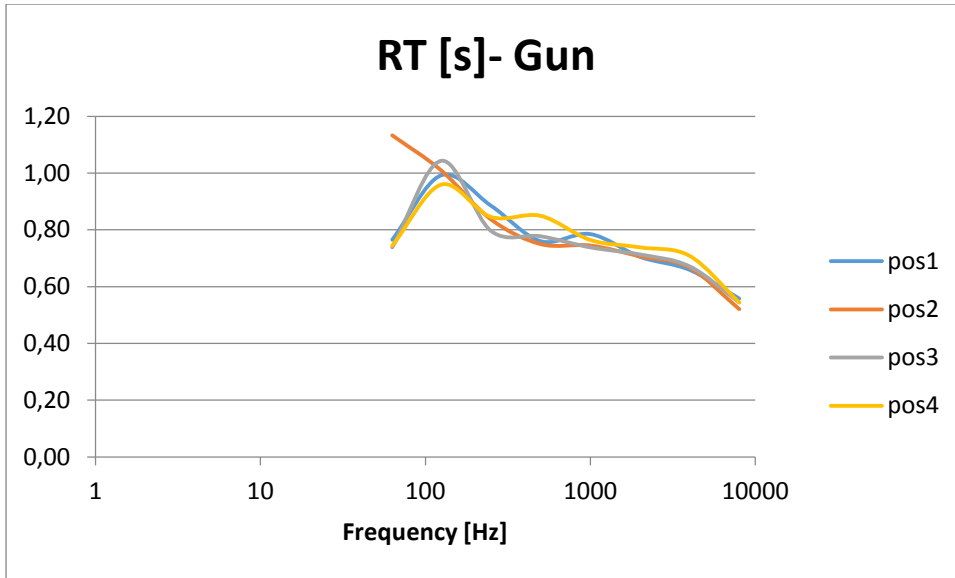
Παρατηρούμε ότι όλα τα μικρόφωνα ακολουθούν περίπου την ίδια καμπύλη με μικρή διαφορά στις τιμές, με εξαίρεση τα 63Hz. Επίσης παρατηρούμε ότι και με τις δύο μεθόδους διέγερσης του χώρου παίρνουμε παρόμοιες τιμές.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 1 ως 4.

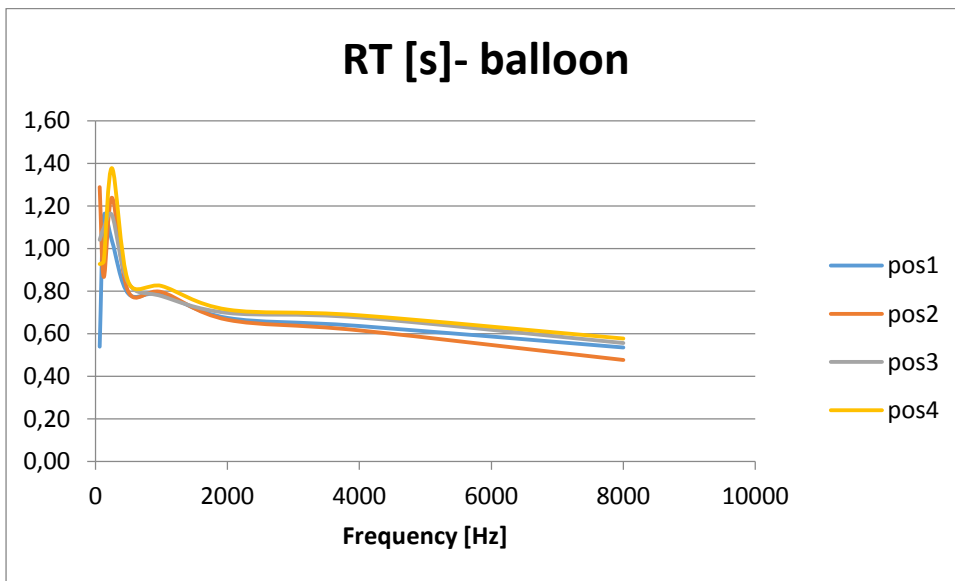


Διάγραμμα 6.3. 11: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

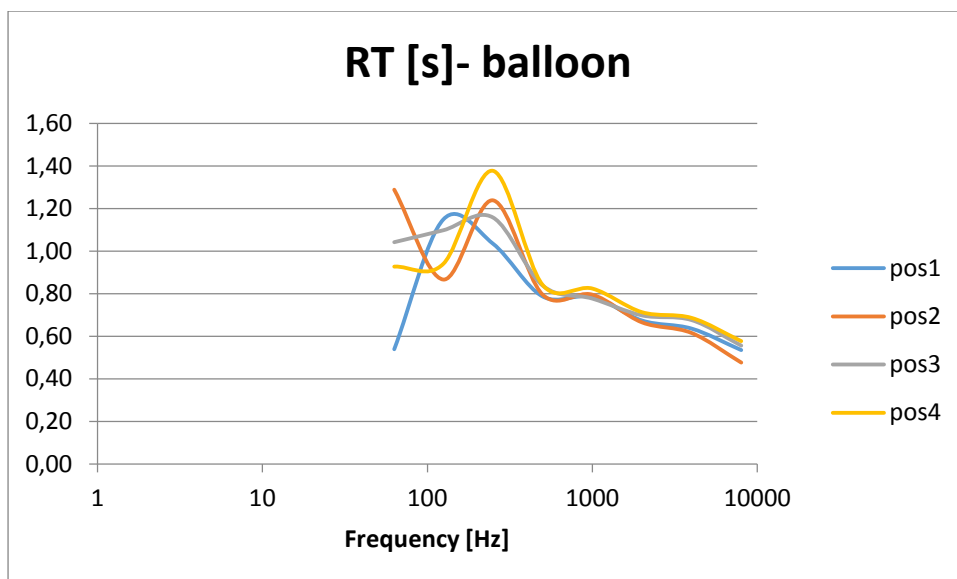




Διάγραμμα 6.3. 12: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.



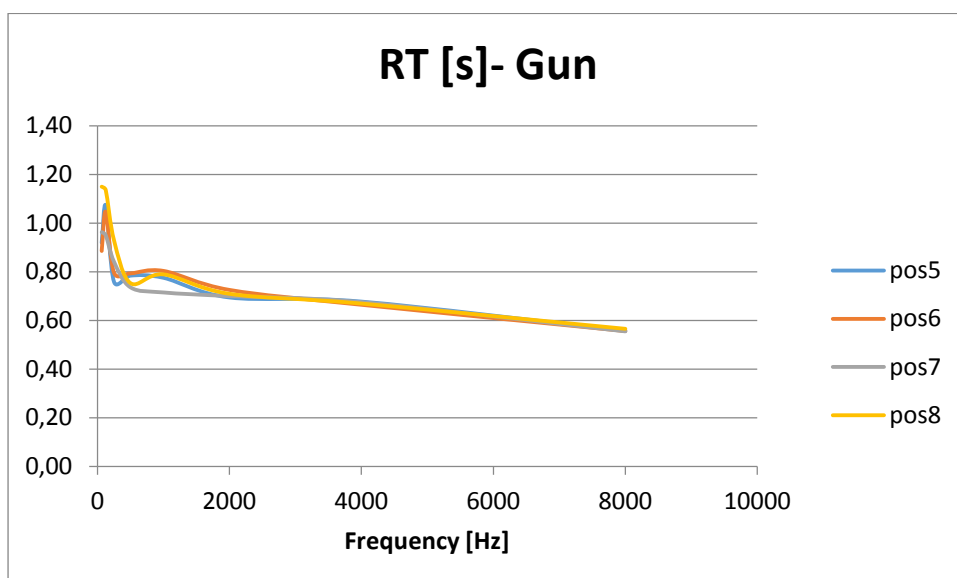
Διάγραμμα 6.3. 13: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



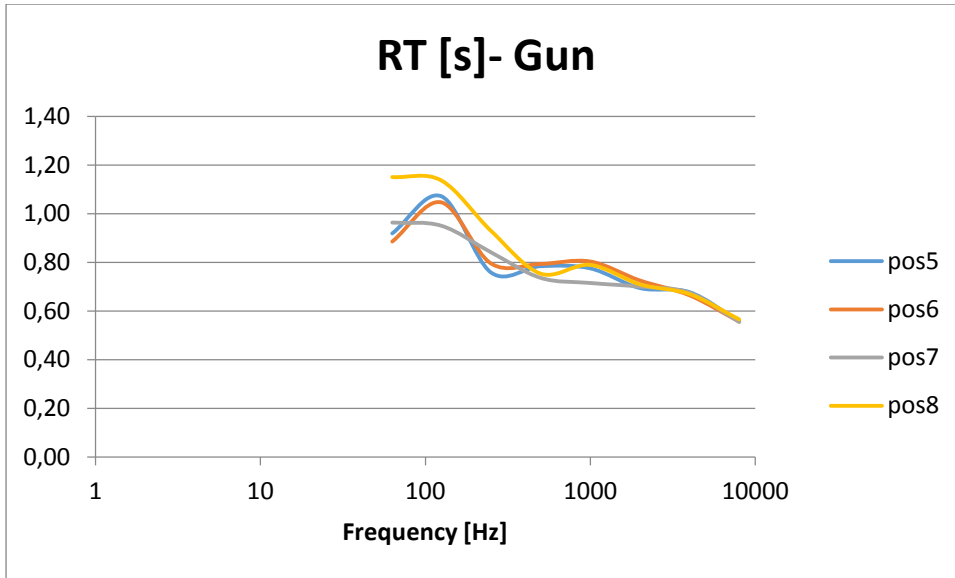
Διάγραμμα 6.3. 14: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

Παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως της θέσης έχουμε την ίδια καμπύλη RT. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του RT είναι λίγο υψηλότερες με χρήση του μπαλονιού σε σχέση με αυτές που μετράμε με την χρήση του πιστολιού.

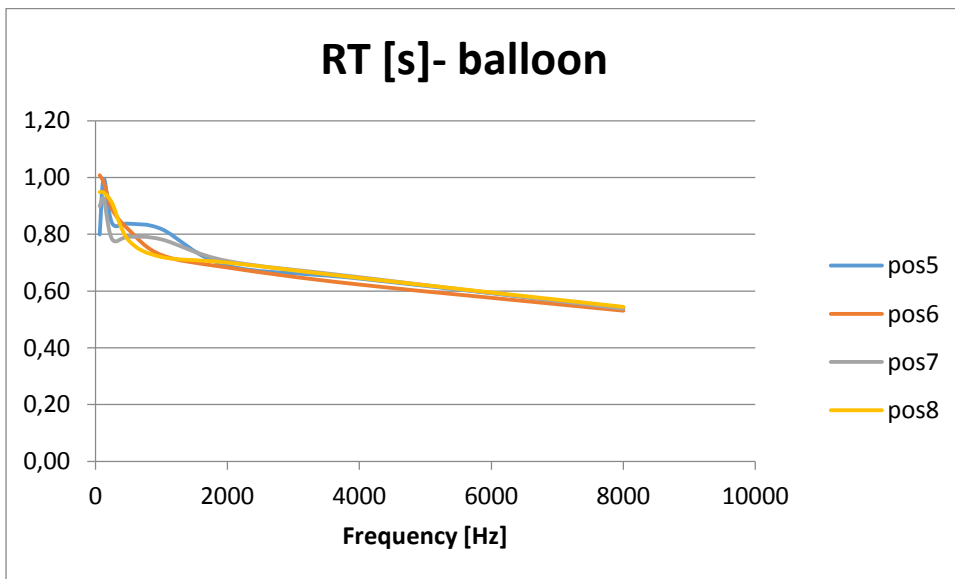
Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 5 ως 8.



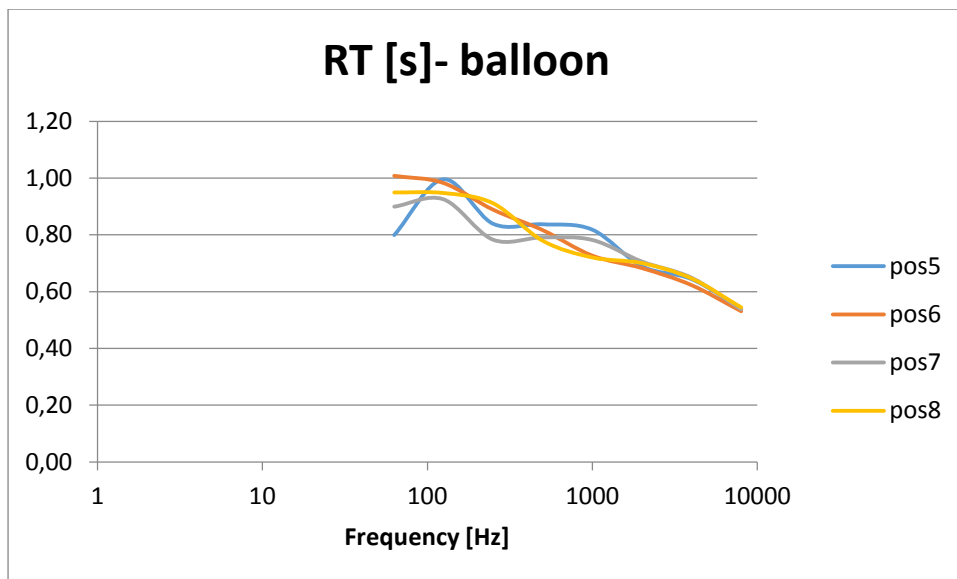
Διάγραμμα 6.3. 15: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



Διάγραμμα 6.3. 16: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



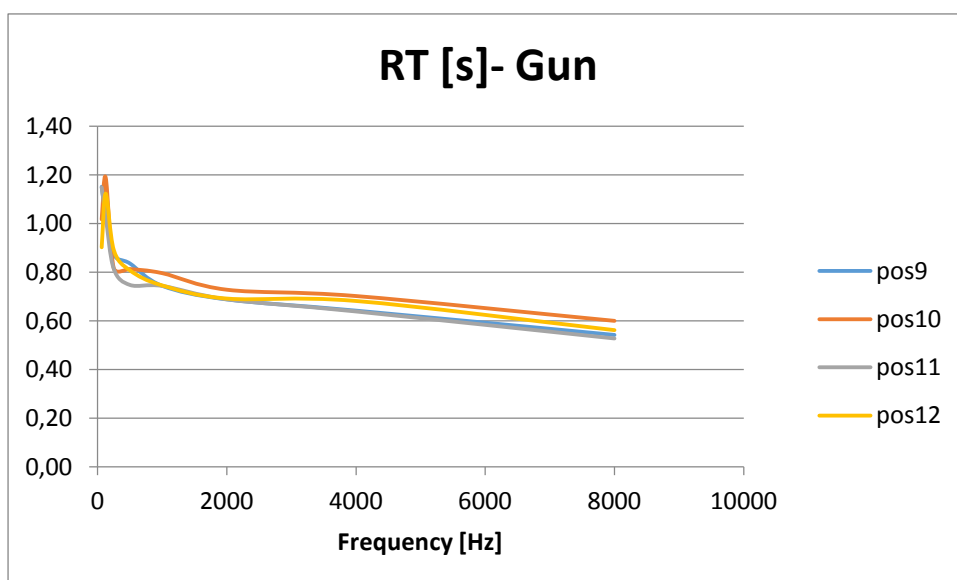
Διάγραμμα 6.3. 17: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



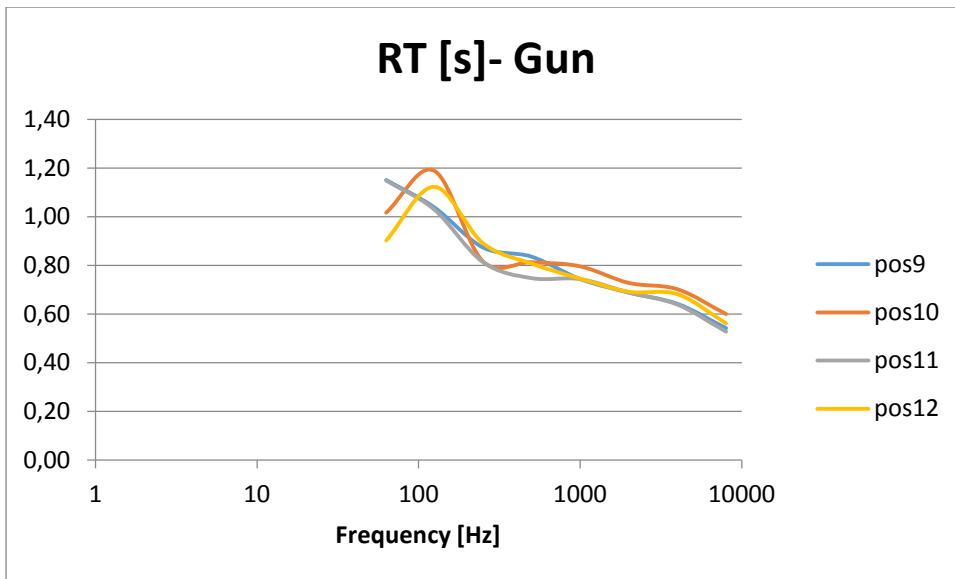
Διάγραμμα 6.3. 18: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

Παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως της θέσεως έχουμε την ίδια καμπύλη RT. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του RT είναι λίγο υψηλότερες με χρήση του πιστολιού σε σχέση με αυτές που μετράμε με την χρήση του μπαλονιού.

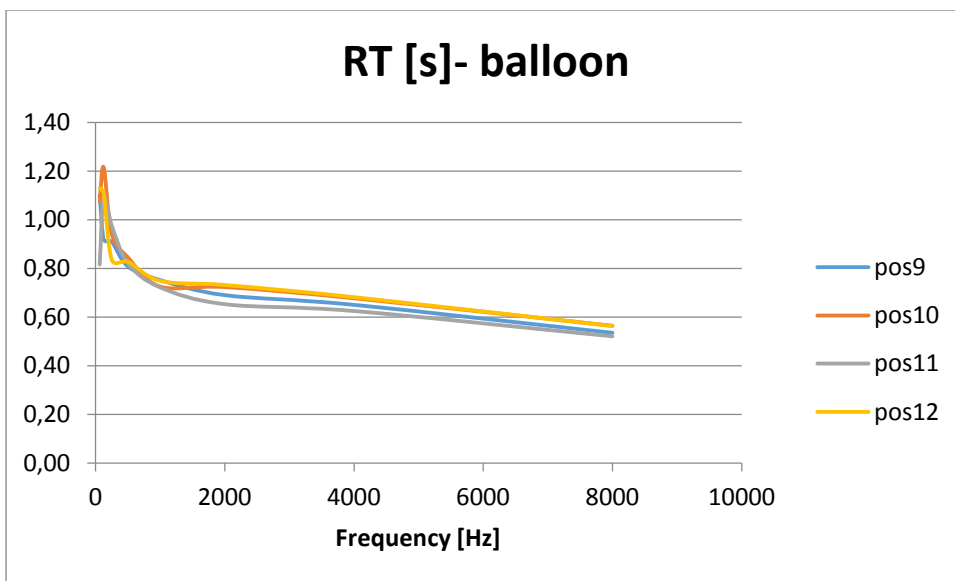
Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των θέσεων 9, 10, 11 και 12.



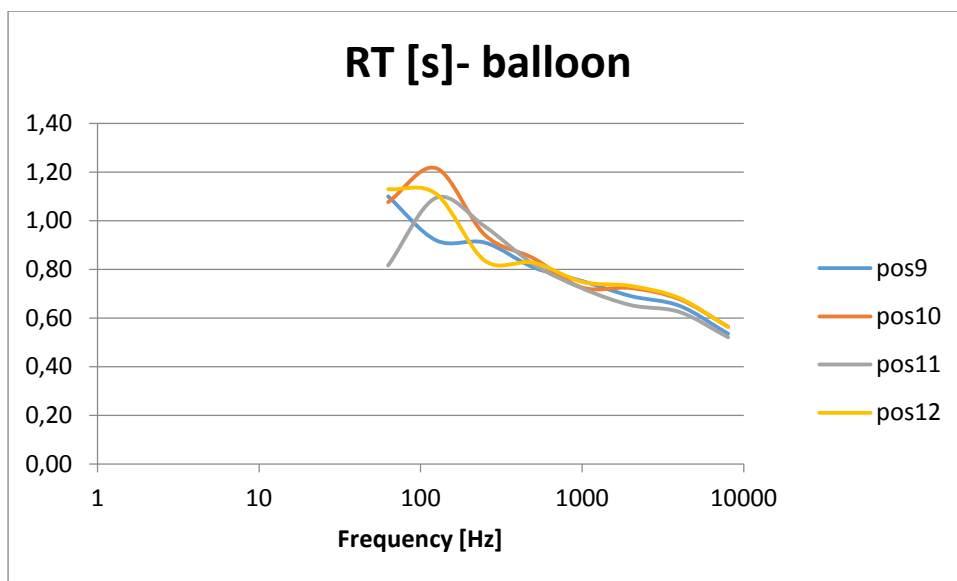
Διάγραμμα 6.3. 19: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



Διάγραμμα 6.3. 20: : Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



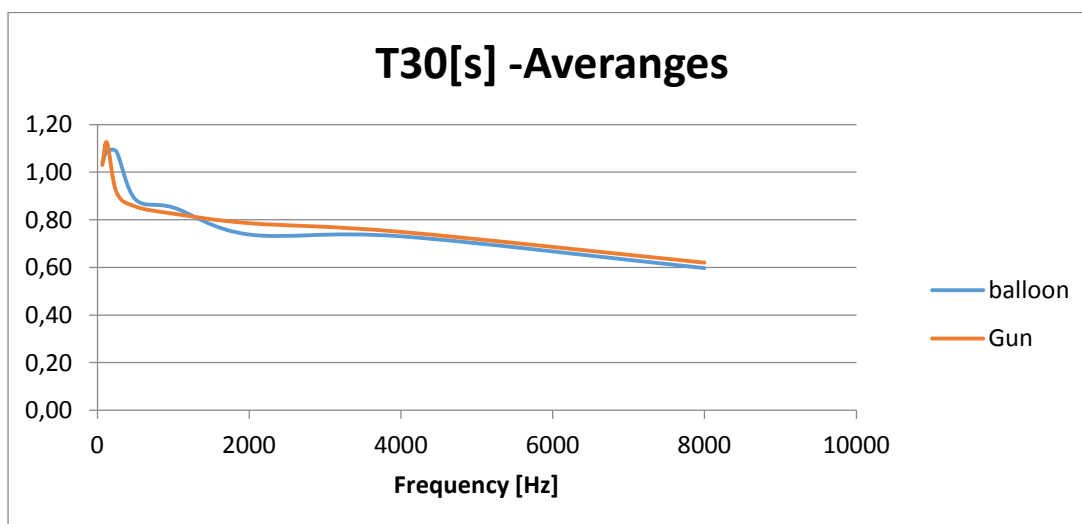
Διάγραμμα 6.3. 21: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντίληψης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- μπαλόνι για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



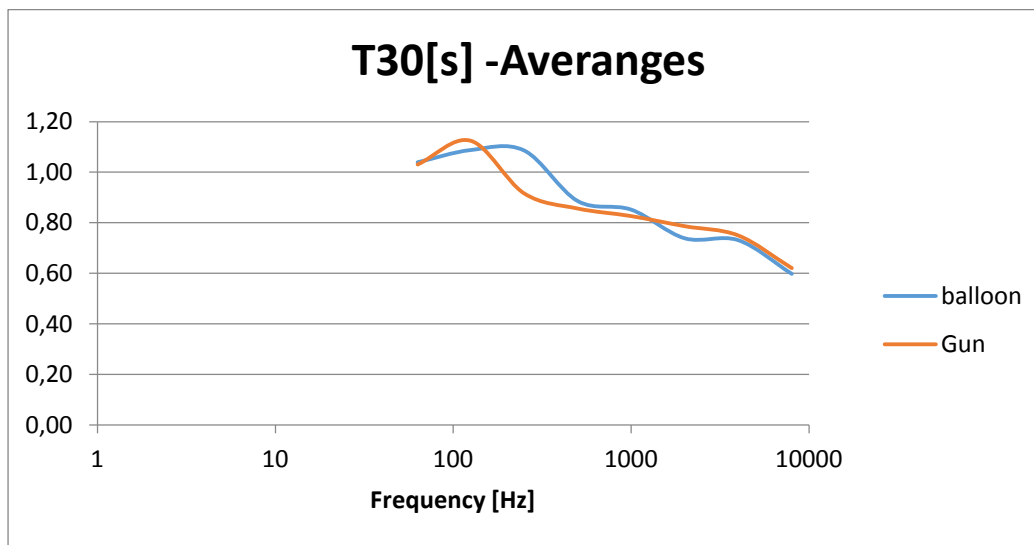
Διάγραμμα 6.3. 22: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- μπαλόνι για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

Παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως της θέσης έχουμε την ίδια καμπύλη RT. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του RT είναι ίδιες είτε με χρήση του μπαλονιού είτε με την χρήση του πιστολιού.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μέση τιμή του RT ανά συχνότητα για τα διαφορετικά σήματα εισόδου. Το διάγραμμα αυτό δείχνει την συνολική εκτίμηση του RT ανά συχνότητα και ανά σήμα εισόδου. Μ αυτό τον τρόπο προσεγγίζουμε το RT του χώρου για τα διαφορετικά σήματα εισόδου.



Διάγραμμα 6.3. 23: Διάγραμμα σύγκρισης του Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα των σημάτων κρουστικός παλμός, μπαλόνι και πιστόλι αφέτη, για το θέατρο Τέχνης-Υπόγειο.



Διάγραμμα 6.3. 24: Διάγραμμα σύγκρισης του Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα των σημάτων κρουστικός παλμός, μπαλόνι και πιστόλι αφέτη, για το θέατρο Τέχνης-Υπόγειο.

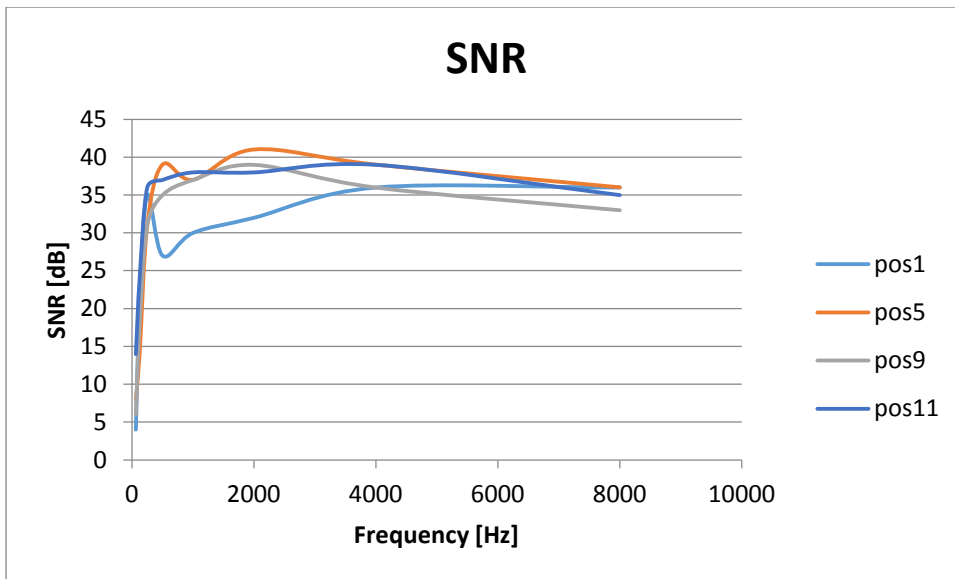
Παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές του RT για όλα τα σήματα εισόδου είναι κοντά. Τέλος, οι τιμές του μεγέθους RT είναι υψηλές για τον όγκο του χώρου στις χαμηλές συχνότητες, γεγονός που οφείλεται στο θόλο που βρίσκεται πάνω από την σκηνή. Συνεπώς ο χώρος είναι αντηχητικός στις χαμηλές συχνότητες.

### 3. Επιπλέον μεγέθη

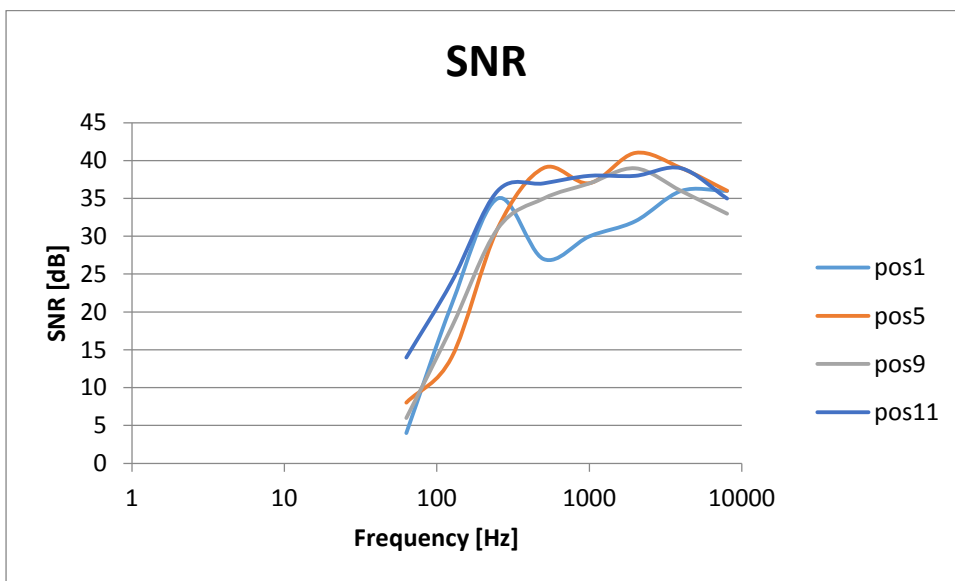
Τα αποτελέσματα των υπολοίπων μεγεθών εξάχθηκαν από σήμα εισόδου impulse διότι τα υπόλοιπα σήματα έδιναν αποτελέσματα με μη αποδεκτές τιμές.

#### 1. SNR

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μεγέθους SNR σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα, για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11, τα οποία βρίσκονται πλησιέστερα στην πηγή αλλά σε διαφορετική γωνία.



Διάγραμμα 6.3. 25: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

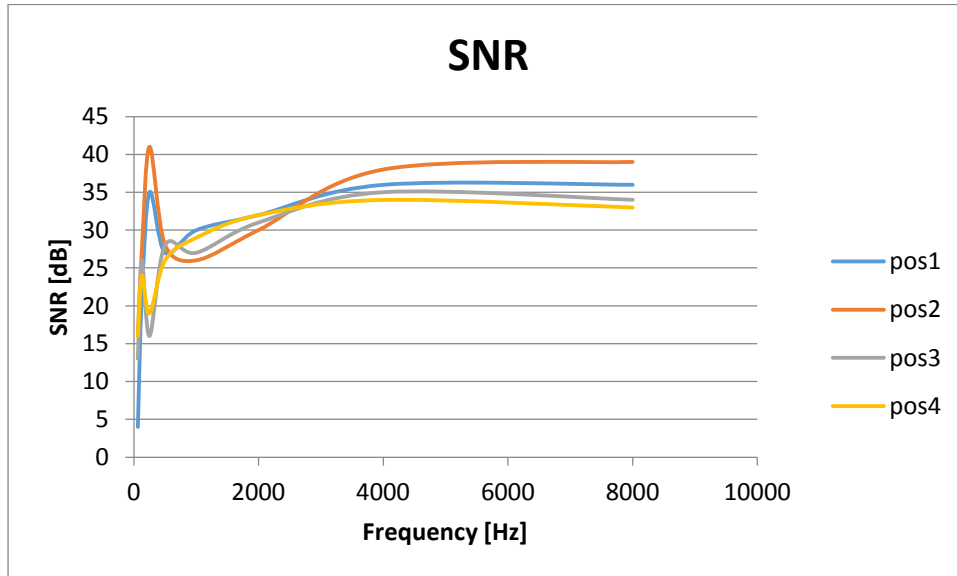


Διάγραμμα 6.3. 26: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

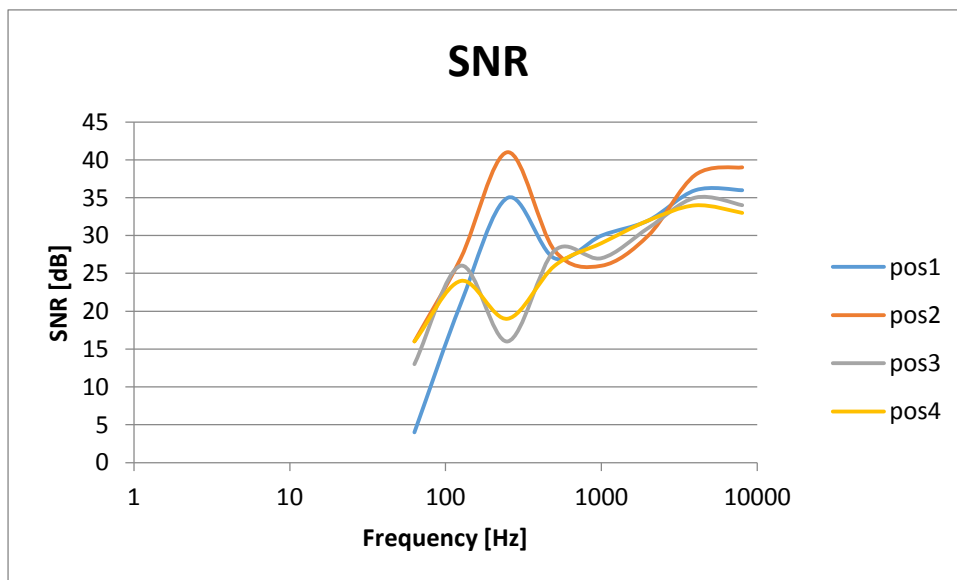
Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SNR στην πρώτη σειρά του θεάτρου σε όλες τις συχνότητες είναι πάρα πολύ καλές (>18dB). Εξαιρέση αποτελεί η συχνότητα των 63 Hz για τις θέσεις 1, 5 και 9. Επομένως ο ήχος σε σύγκριση με τον θόρυβο είναι πολύ καθαρός εκτός από τη συχνότητα 63 Hz που η γενική αίσθηση είναι ότι ο ήχος καλύπτει το θόρυβο. Αισθητή διαφορά παρατηρούμε στις τιμές του SNR της θέσεως 1 από τις τιμές των υπολοίπων θέσεων στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.



Ακολουθούν τα αποτελέσματα του SNR για τις θέσεις 1 ως 4 σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα. Οι θέσεις αυτές βρίσκονται στην ίδια ευθεία, στο κέντρο της αίθουσας από την πρώτη σειρά προς την τελευταία.



Διάγραμμα 6.3. 27: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

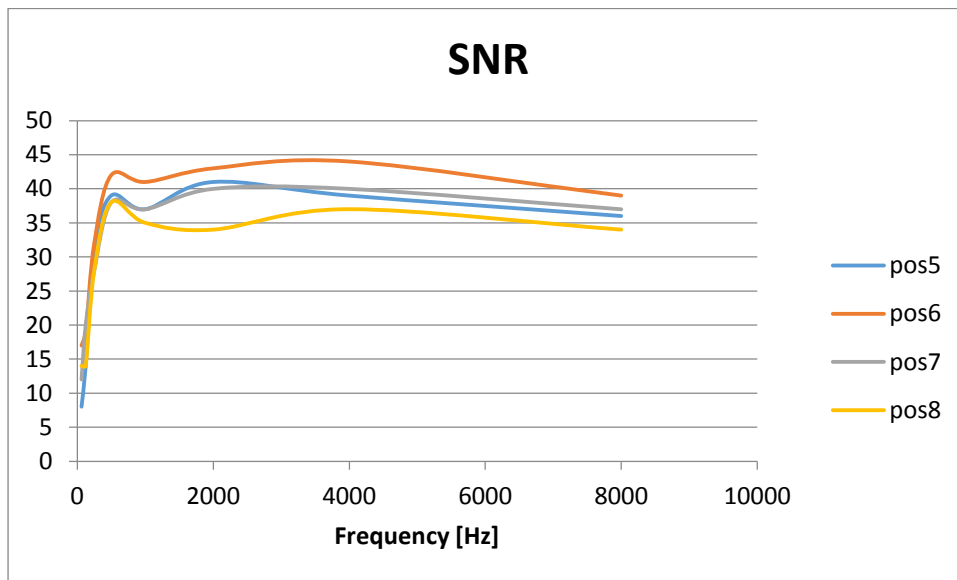


Διάγραμμα 6.3. 28: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

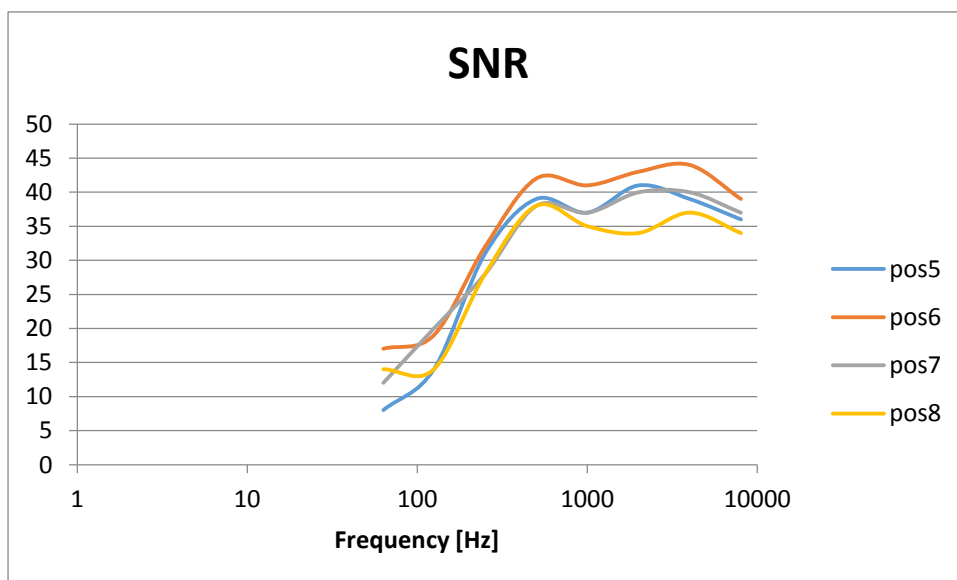
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών του SNR είναι αποδεκτή και όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή οι τιμές μειώνονται. Στις χαμηλές συχνότητες οι τιμές των θέσεων 3 και 4 ακολουθούν διαφορετική κατανομή από τις θέσεις

1 και 2. Παρά τις διαφορές συμπεραίνουμε ότι οι θεατές ακούν καλά σε όλες τις θέσεις από την πρώτη ως την τελευταία.

Ακολουθούν τα διαγράμματα SNR των θέσεων 5, 6, 7 και 8 και 9, 10, 11 και 12 σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

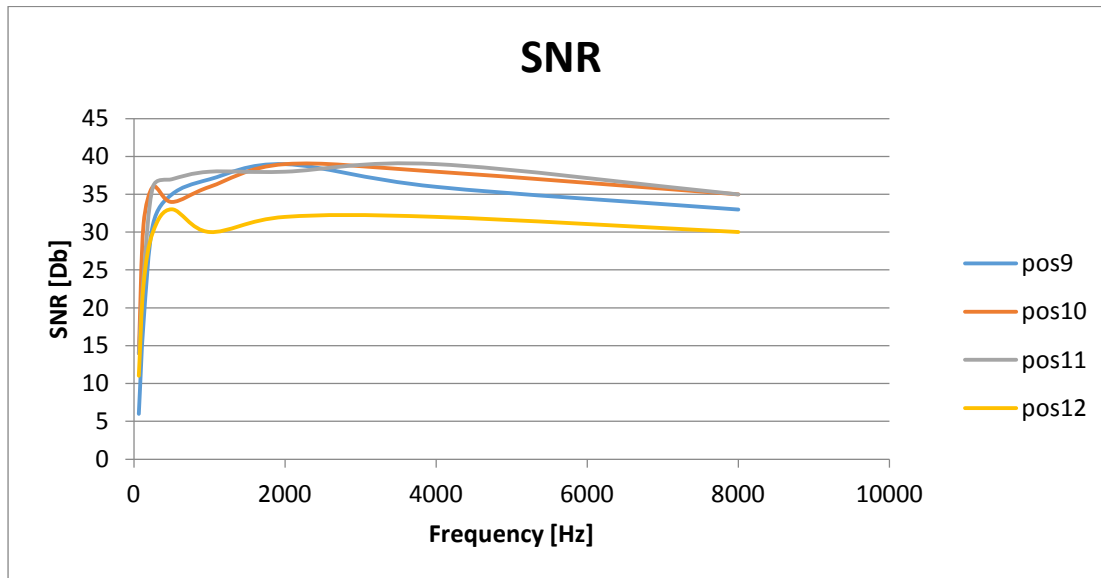


Διάγραμμα 6.3. 29: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

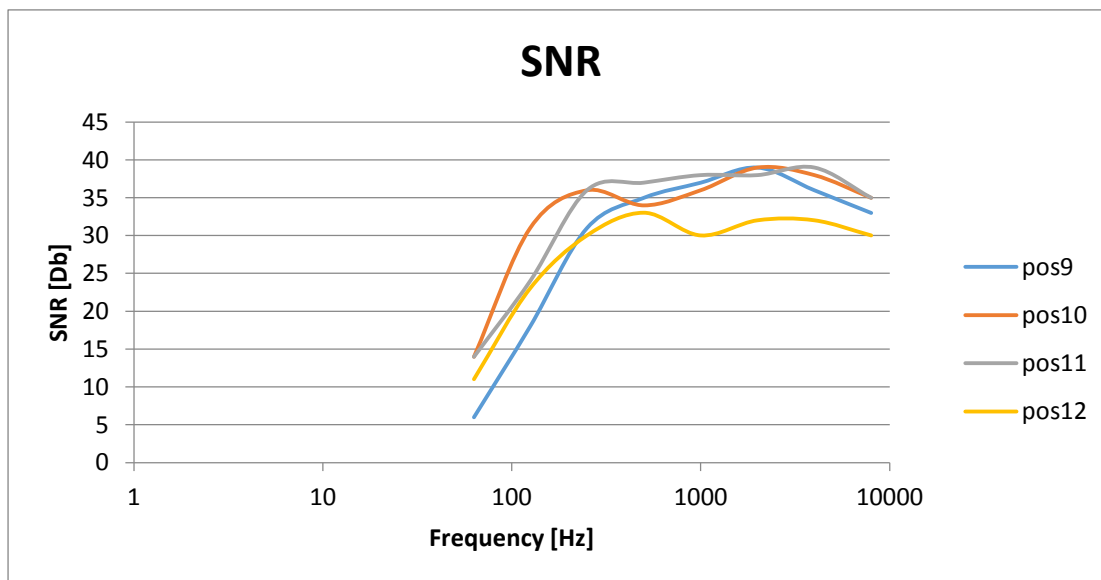


Διάγραμμα 6.3. 30: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις έχουν ικανοποιητικές τιμές SNR (>18dB). Εξάιρεση αποτελεί η θέση 5 που στη συχνότητα των 63Hz έχει μικρότερη τιμή από το όριο.



Διάγραμμα 6.3. 31: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



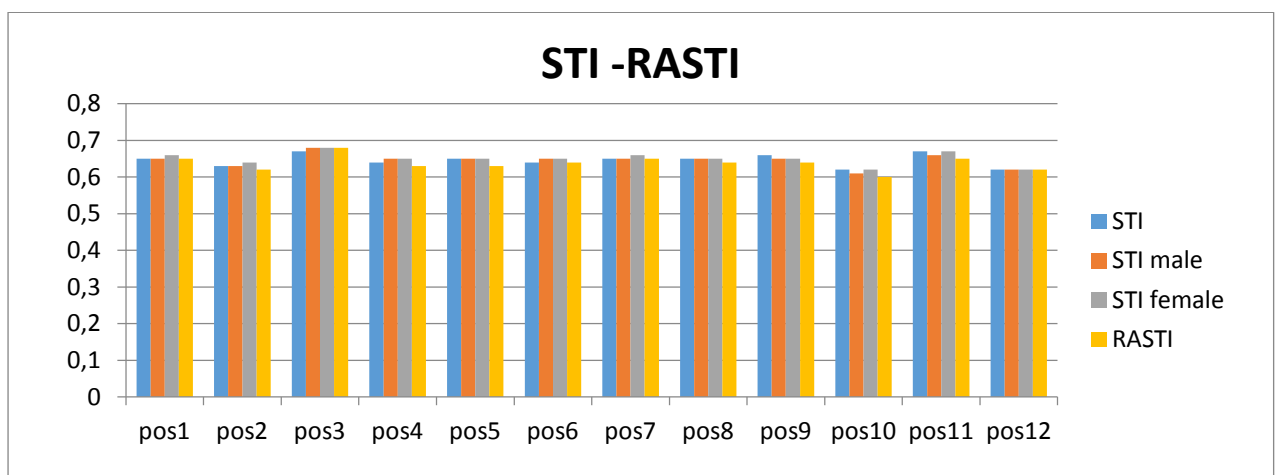
Διάγραμμα 6.3. 32: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές του μεγέθους στις διάφορες θέσεις βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Από την άλλη η θέση 9 βρίσκεται κάτω από 18dB στη συχνότητα των 63Hz.

Τέλος να σημειωθεί ότι ο χώρος είναι καλά ηχομονωμένος και γι' αυτό δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς ήχους. Βέβαια ο λειτουργικός θόρυβος του θεάτρου (σύστημα εξαερισμού, θέρμανσης ή air-conditon) και η παρουσία θεατών θα προκαλούσε μια μικρή μείωση του SNR. Ακόμα να τονιστεί ότι οι τιμές του SNR στις μπροστινές σειρές (θέση 1, 5 και 9) βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα στη συχνότητα των 63Hz. Αυτό συμβαίνει διότι το ταβάνι στο χώρο της σκηνής έχει έναν μικρό θόλο και αυτό προκαλεί επιπλέον θόρυβο σε κάποιες συχνότητες.

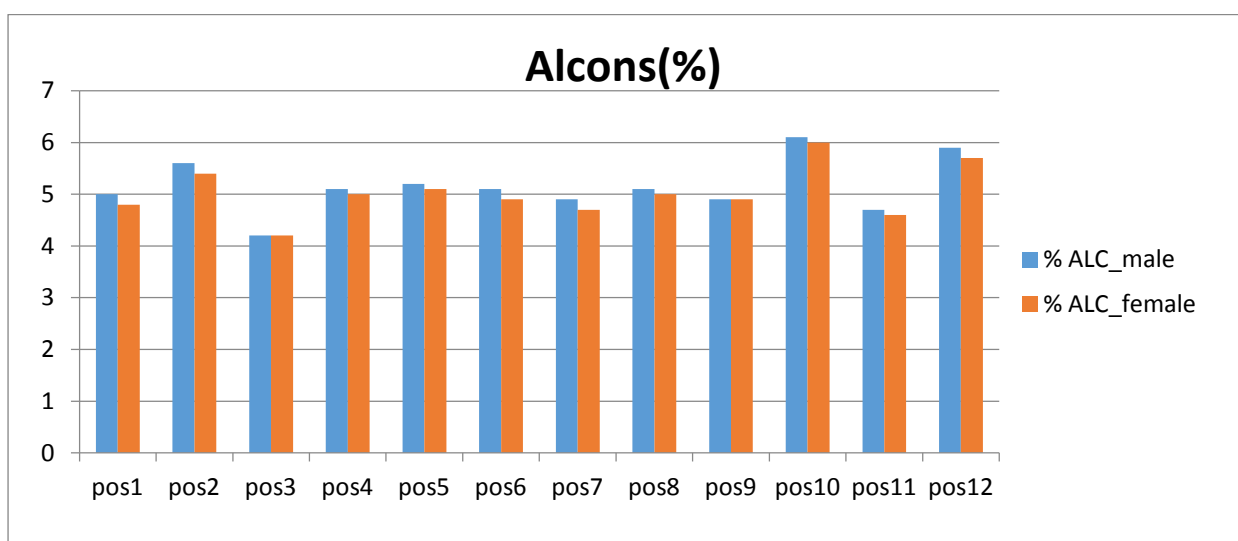
## 2.STI-RASTI

Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα του STI MALE και FEMALE, STI και RASTI.



Διάγραμμα 6.3. 33: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

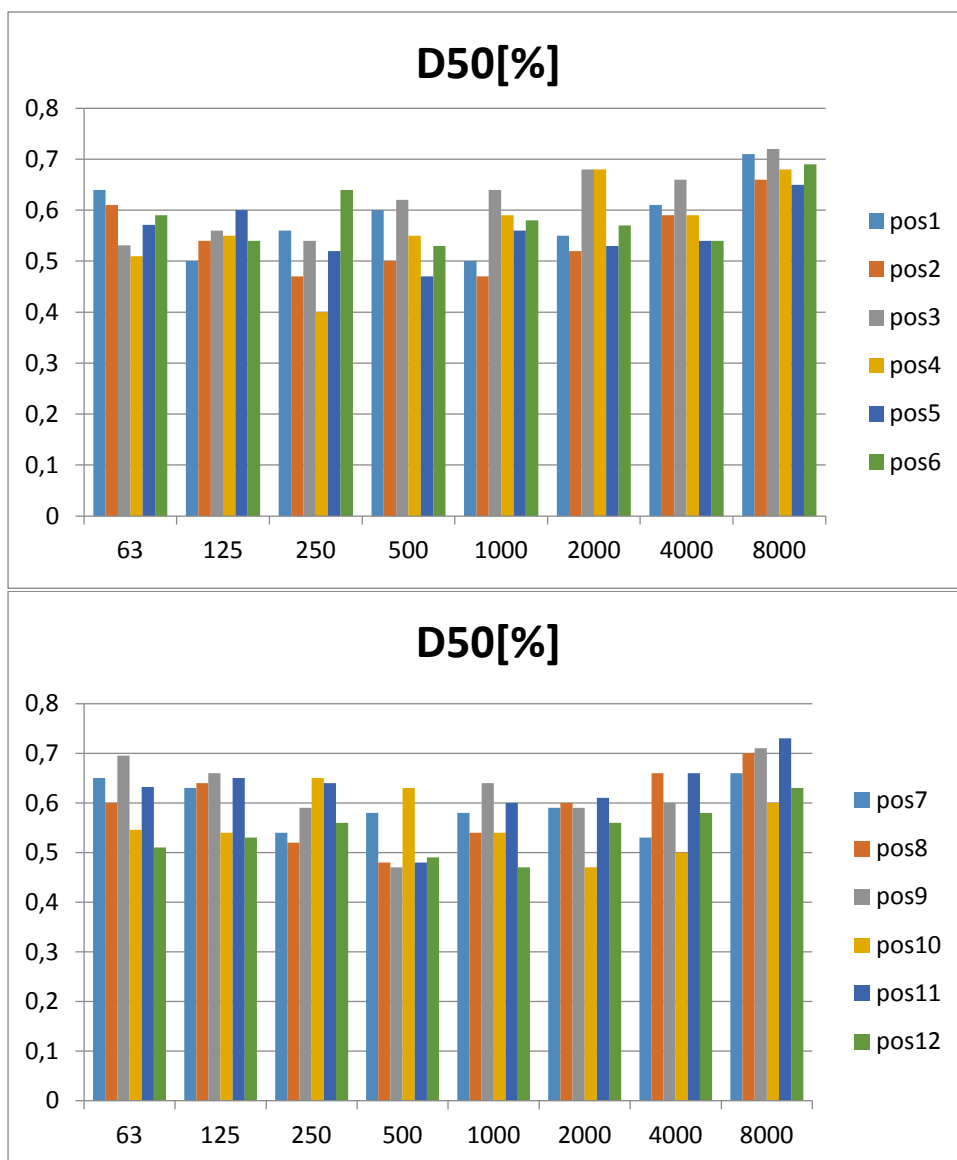
και το διάγραμμα ALcons(%).



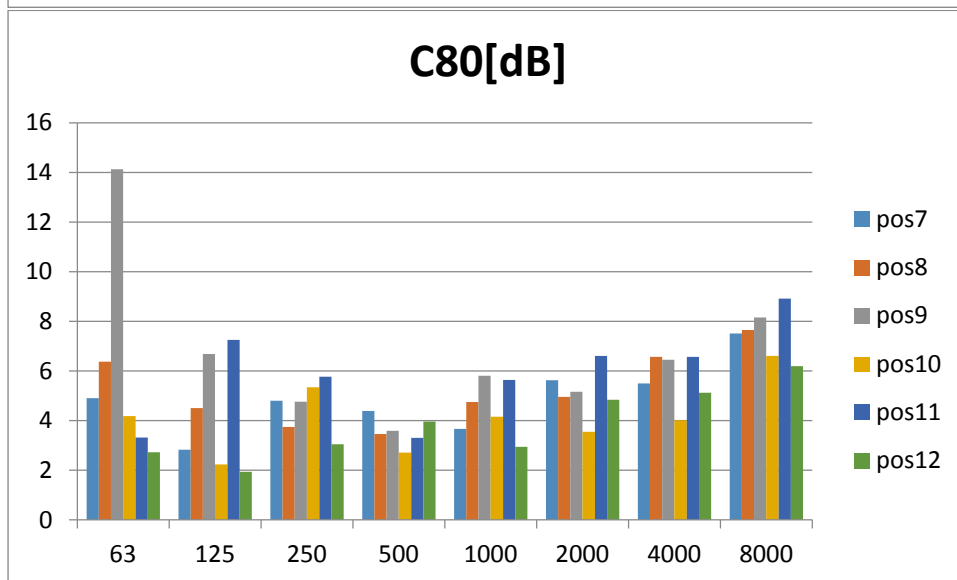
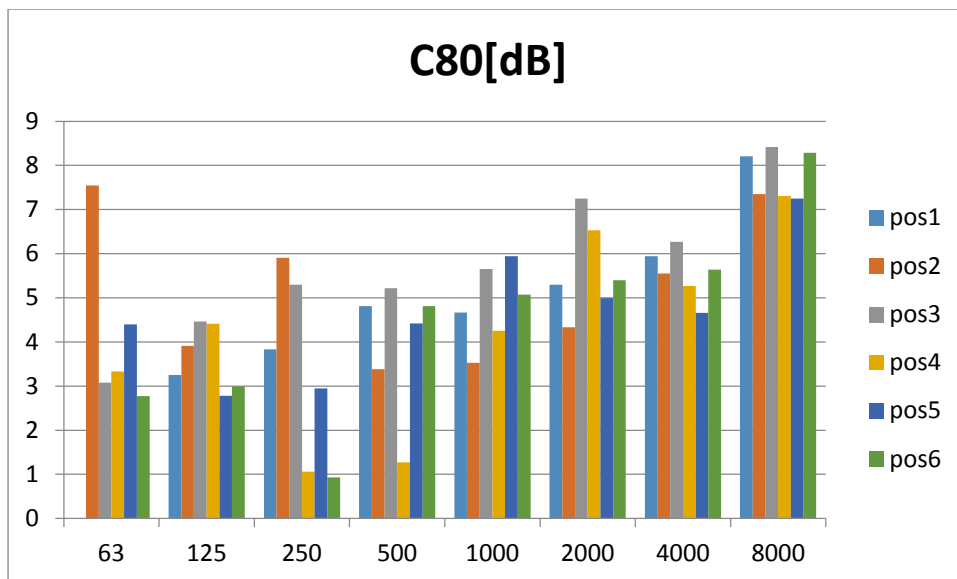
Διάγραμμα 6.3. 34: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη ALcons(%) [female, male] ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η καταληπτότητα του χώρου χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή και επιπλέον η απώλεια συμφώνων τόσο στην αντρική όσο και στη γυναικεία φωνή είναι μικρή σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Επίσης παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις του θεάτρου χαρακτηρίζονται από καλή ακουστικότητα καθώς οι τιμές των παραμέτρων καταληπτότητας είναι παρόμοιες για όλες τις θέσεις. Να σημειωθεί ότι η αίθουσα αυτή είναι χαμηλοτάβανη με αποτέλεσμα οι θέσεις προς τα πίσω να βρίσκονται πιο κοντά στο ταβάνι ανά σειρά. Με αυτό το τρόπο όσο πιο πίσω πάμε ο απ' ευθείας ήχος ενισχύεται από τις πρώτες ανακλάσεις.

### 3. C50, D80



Διάγραμμα 6.3. 35: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.



Διάγραμμα 6.3. 36: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80(%) ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

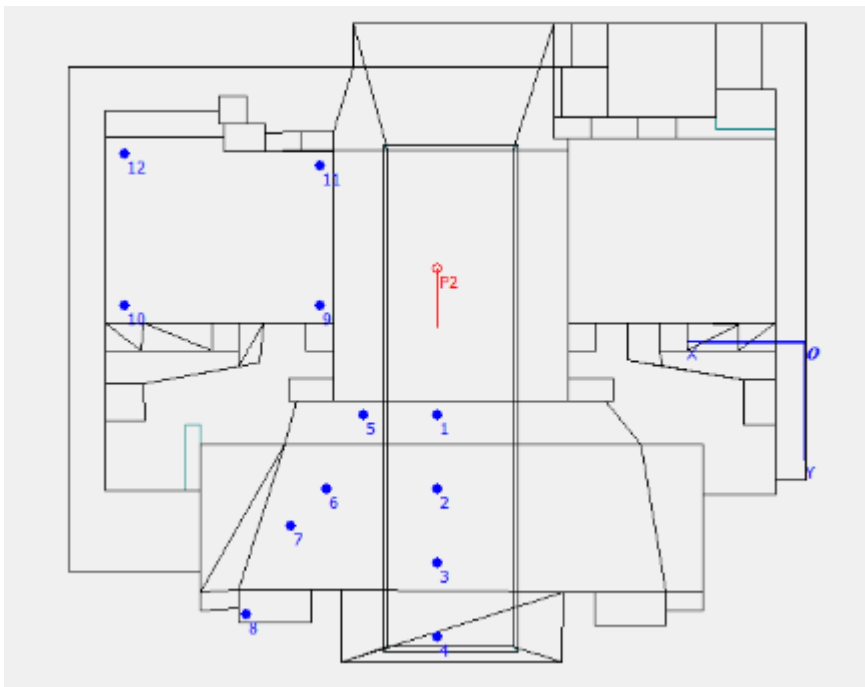
Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η διακριτότητα D50 του χώρου είναι πολύ καλή καθώς το D50 βρίσκεται πάνω από το 0,5 (50%) όπως ορίζει το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Παρ' όλα αυτά κάποιες μεμονωμένες τιμές ξεφεύγουν από τα όρια στις μεσαίες συχνότητες.

Από την άλλη, η διαύγεια C80 θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -1 και 3 dB για θεατρικούς χώρους, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382-3:2012. Στις μετρήσεις μας ο δείκτης κυμαίνεται αρκετά υψηλότερα από αυτές τις τιμές ανεξαρτήτως θέσης και συχνότητας, πέραν κάποιων μεμονωμένων τιμών. Ο δείκτης αυτός αφορά την δυνατότητα αντίληψης της μουσικής σε ένα χώρο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος δεν είναι κατάλληλος για ακρόαση μουσικής.

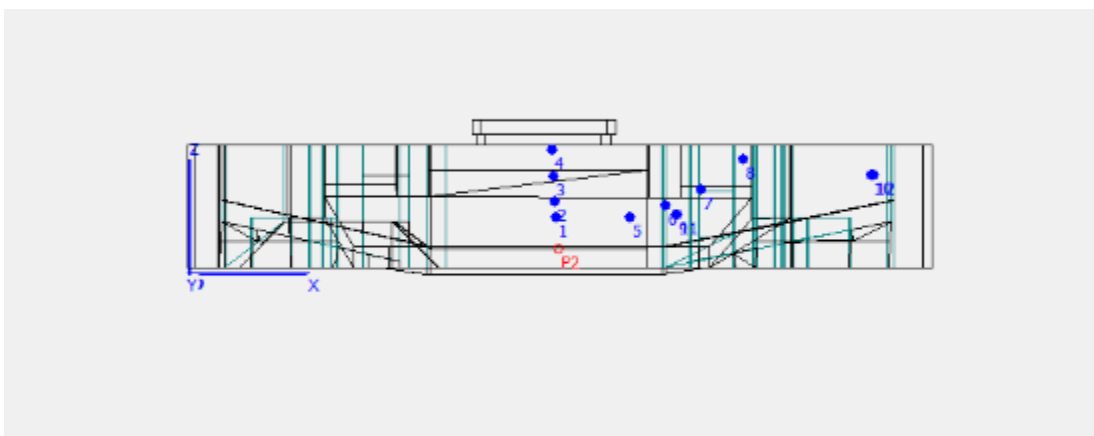
## Προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση στο πρόγραμμα ODEON, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου, το οποίο σχεδιάστηκε στο λογισμικό Autocad. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα μικρόφωνα και η ηχητική πηγή με βάση τις μετρήσεις που έγιναν στο θέατρο.

Οι θέσεις των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής φαίνονται στις Εικόνα 6.3.2 και Εικόνα 6.3.3.



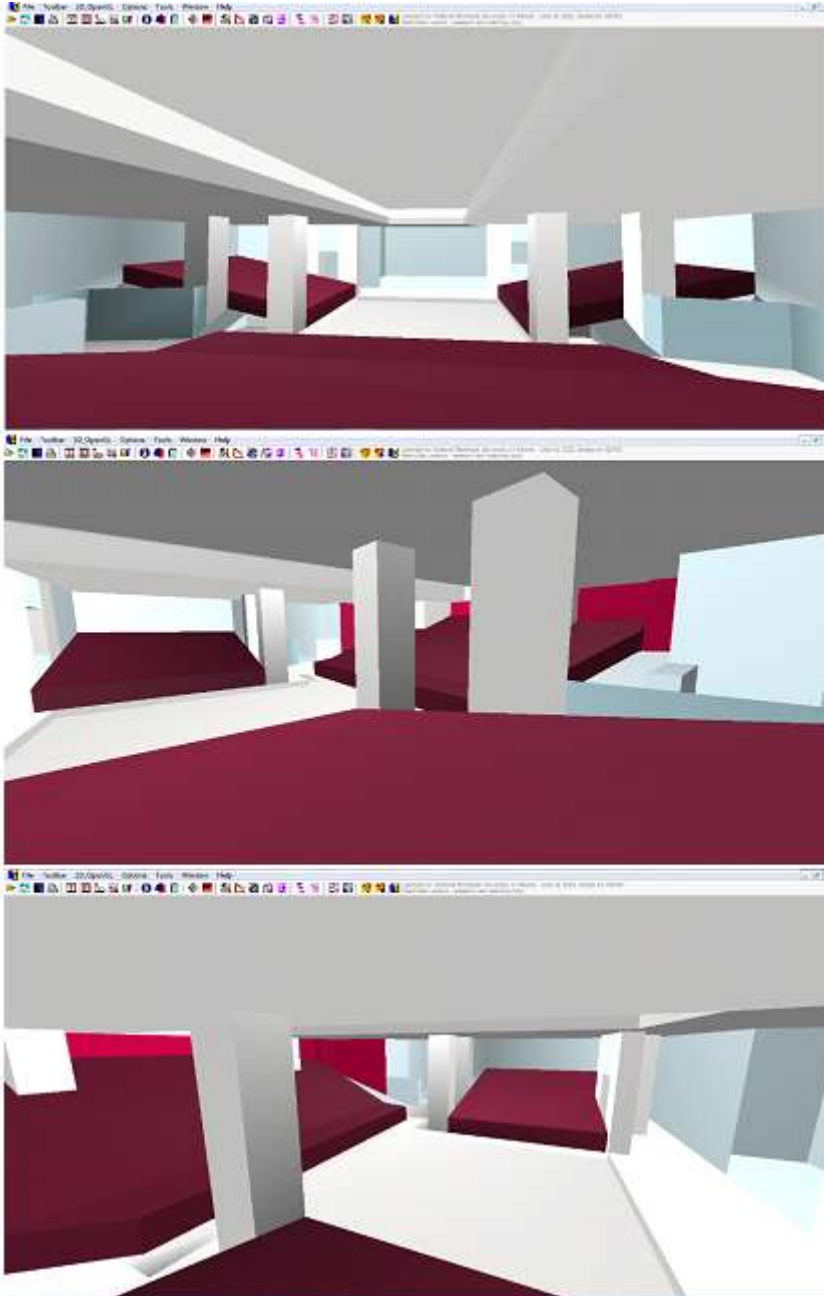
Εικόνα 6.3. 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο



Εικόνα 6.3. 3: Πλάγια όψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.

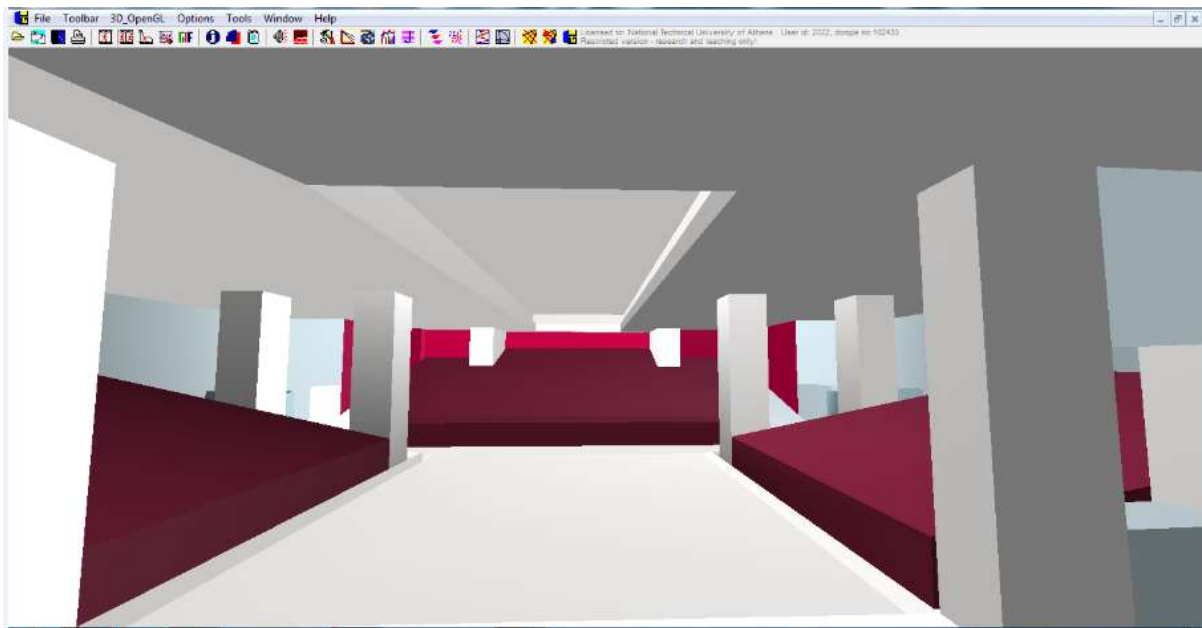
Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν τα υλικά του χώρου στις αντίστοιχες επιφάνειες.

Στις παρακάτω εικόνες, Εικόνα 6.3.4 και Εικόνα 6.3.5, φαίνονται οι 3D απεικονίσεις του χώρου της σκηνής και των θεατών αντίστοιχα. Στις εικόνες αυτές περιλαμβάνονται τα υλικά του θεάτρου με διαφορετικά χρώματα. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό υλικό με διαφορετική απορροφητική ικανότητα το καθένα.



Εικόνα 6.3. 4: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών



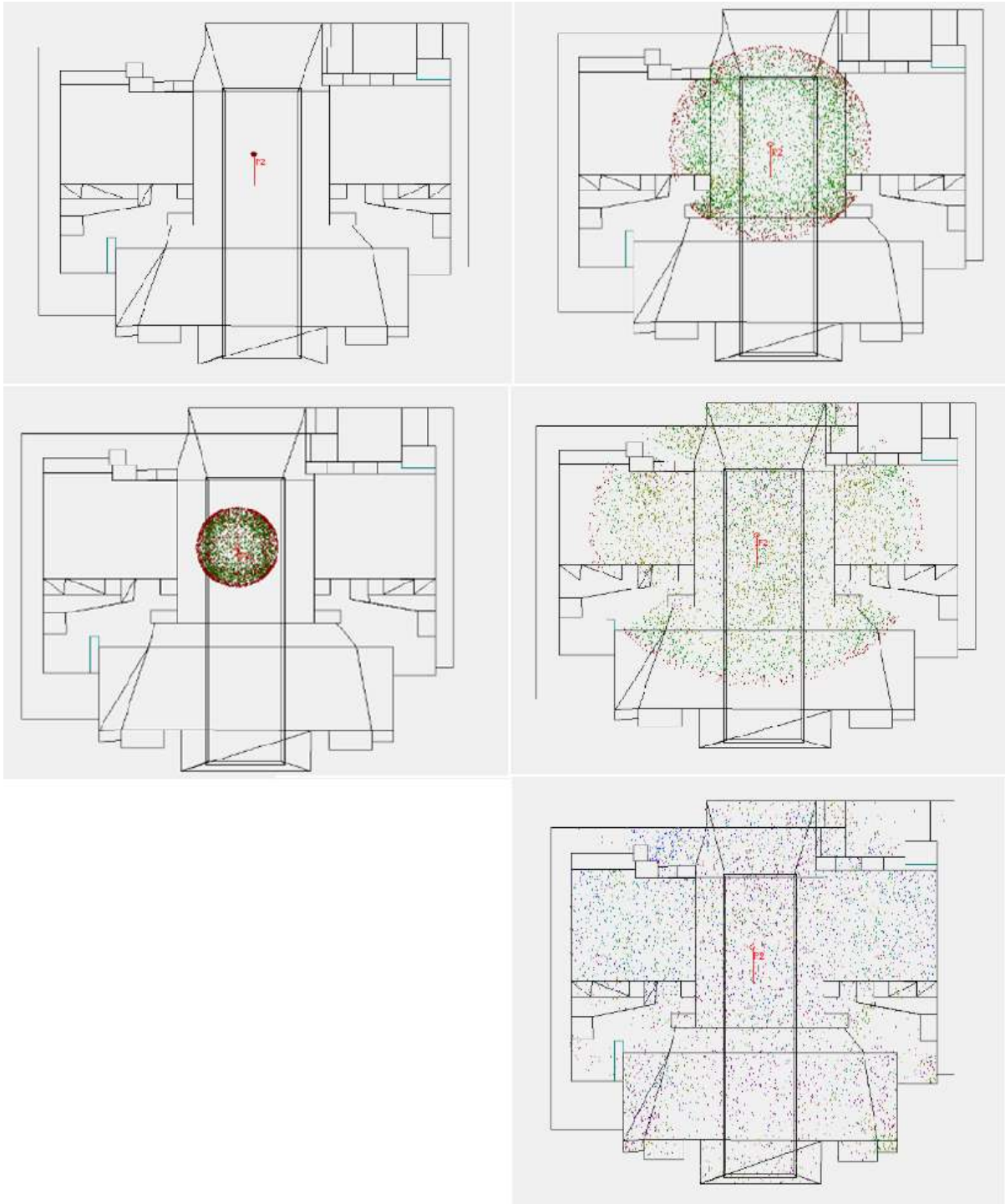


Εικόνα 6.3. 5: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών

Να σημειωθεί ότι το λογισμικό ODEON, χρησιμοποιεί την εξής χρωματική κλίμακα:

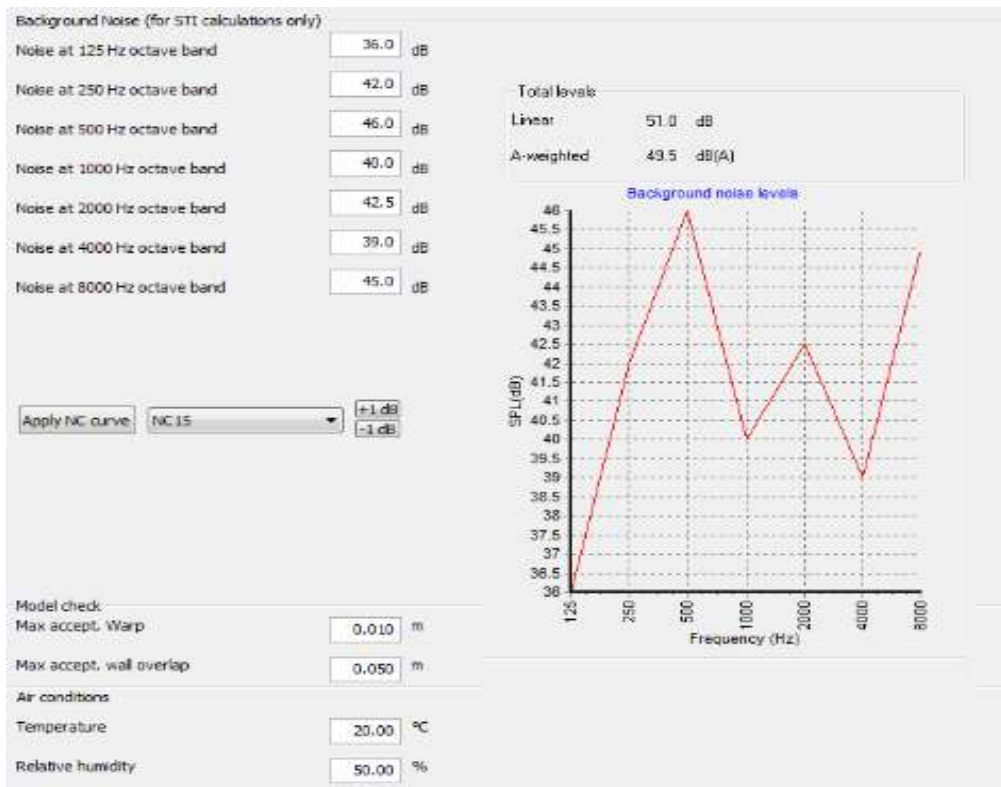
1. Όσο πιο ζεστό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απορροφητικό είναι στις υψηλές συχνότητες (π.χ καφέ)
2. Όσο πιο ψυχρό είναι ένα χρώμα τόσο πιο απορροφητικό είναι στις χαμηλές συχνότητες (π.χ. γαλάζιο)
3. Το λευκό και γκρι χρώμα είναι ουδέτερα και έχουν την ίδια απορροφητική ικανότητα σε όλες τις συχνότητες.

Επόμενο βήμα ήταν να ελέγξουμε την διάδοση του ήχου στο χώρο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο 3D Billard, που παρέχει το λογισμικό ODEON. Το συγκεκριμένο εργαλείο σου δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της κίνησης των “ηχητικών σωματιδίων” στο χώρο, που εκπέμπονται από σημειακή ηχητική πηγή. Στις παρακάτω εικόνα, Εικόνα 6.3.6, φαίνεται η κίνηση αυτή. Μπορούμε να διακρίνουμε με διαφορετικά χρώματα τον απ’ ευθείας ήχο, τις πρώτες, δεύτερες και λοιπές ανακλάσεις.

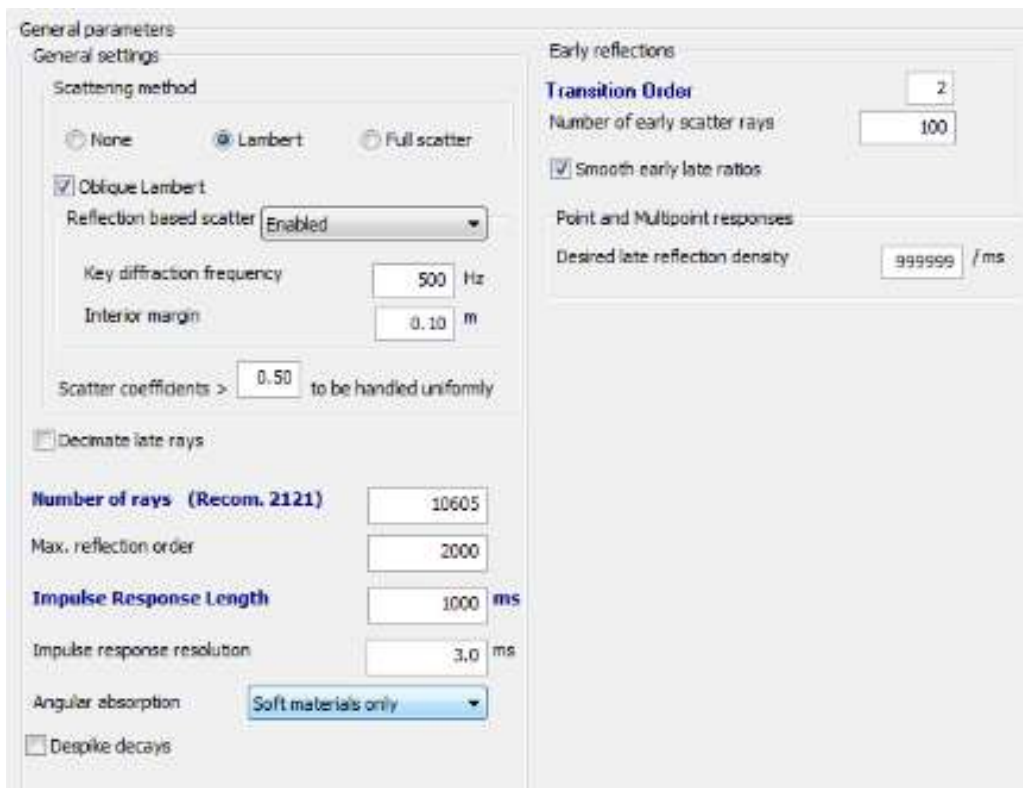


Εικόνα 6.3. 6: 3D Billard.

Στη συνέχεια ρυθμίσαμε τις παραμέτρους του συστήματος. Ένας από αυτούς είναι ο θόρυβος βάθους για την εξαγωγή του μεγέθους STI. Ο προσδιορισμός του θορύβου βάθους έγινε με την καταγραφή σήματος ησυχίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το αρχείο αυτό μας έδωσε τα dB του θορύβου ανά συχνότητα με χρήση του λογισμικού matlab. Στην Εικόνα 6.3.7, φαίνονται dB του θορύβου ανά συχνότητα και στην Εικόνα 6.3.8 οι παράμετροι για μέγιστη ανάλυση.



Εικόνα 6.3. 7: Θόρυβος Βάθους για STI.



Εικόνα 6.3. 8: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση.

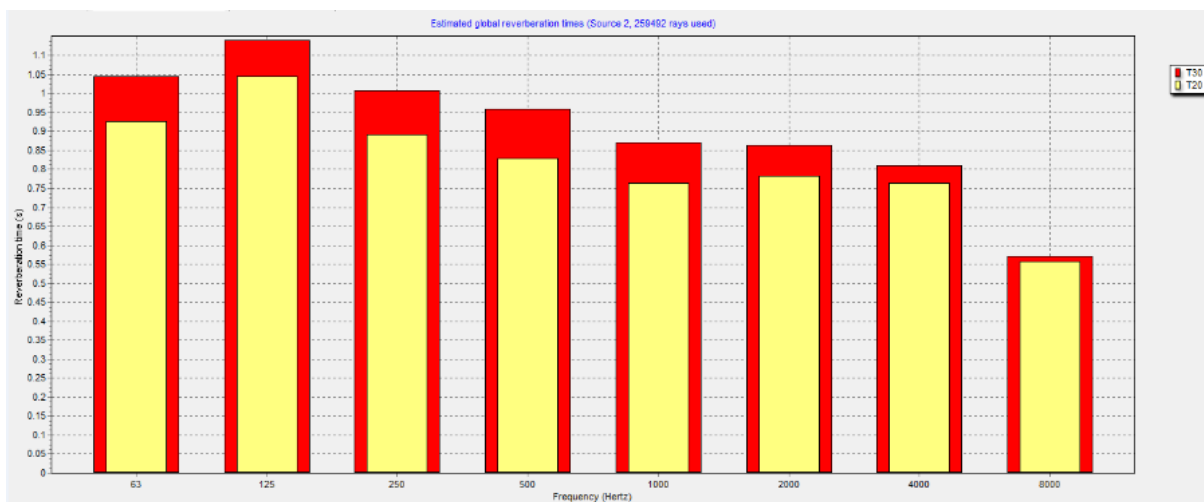
## Ανάλυση αποτελεσμάτων

Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων μέσω τριών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος είναι το Global estimate (γενική εκτίμηση βασικών παραμέτρων). Η δεύτερη μέθοδος είναι το multi-

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δείκτες που μελετήσαμε στην προσομοίωση του χώρου, με τις τρεις παραπάνω μεθόδους point response (προσομοίωση του χώρου ανά μικρόφωνο). Η μέθοδος αυτή αποτελεί το βασικό μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος η τρίτη μέθοδος είναι το Grid estimate. Σ' αυτή επιλέξαμε το χώρο των θεατών και πρακτικά απεικονίσαμε την απόκριση του χώρου ανά θεατή.

### 1. Χρόνος Αντήρησης (RT).

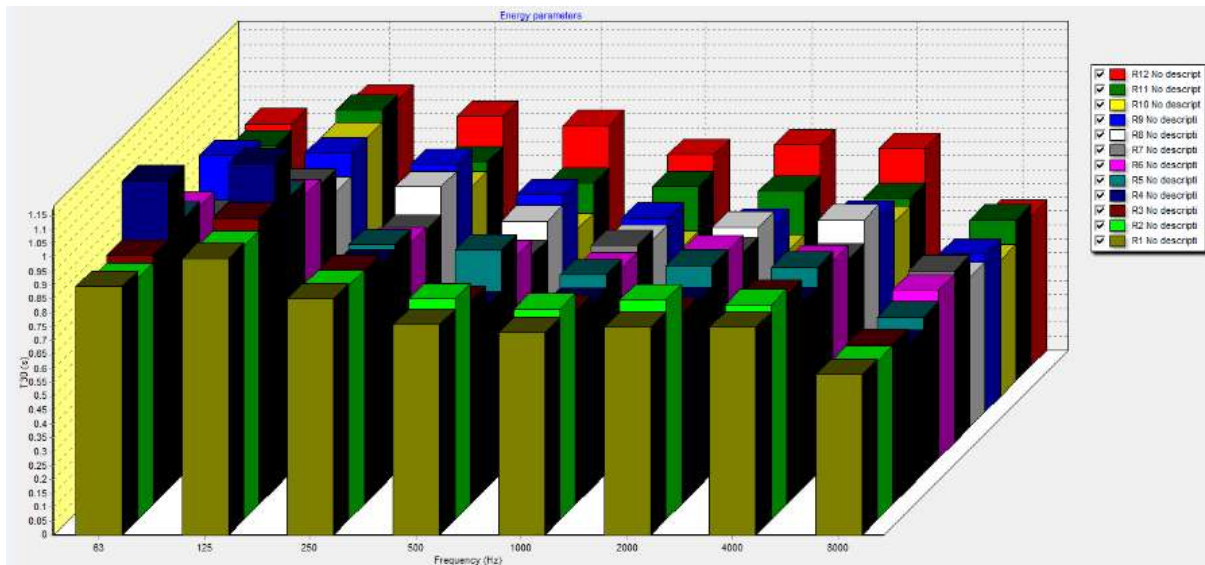
Αρχικά βλέπουμε τα αποτελέσματα από το global estimate.



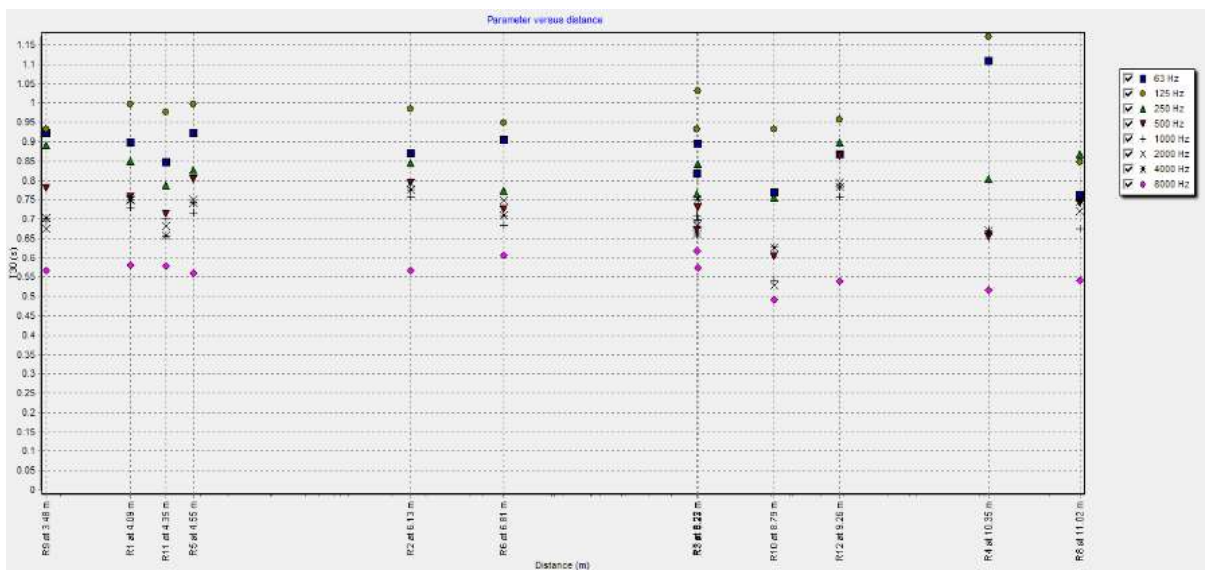
Διάγραμμα 6.3. 37: Εκτίμηση του χρόνου αντήρησης, μέσω του global estimate

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το RT κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,85s ως 1,15s. Μόνο στα 8000Hz το RT πέφτει στα 0,65s. Ο χρόνος αντήρησης για τον χώρο αυτό κρίνεται μεγάλος στις χαμηλές και ικανοποιητικός στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από το multi-point estimation.

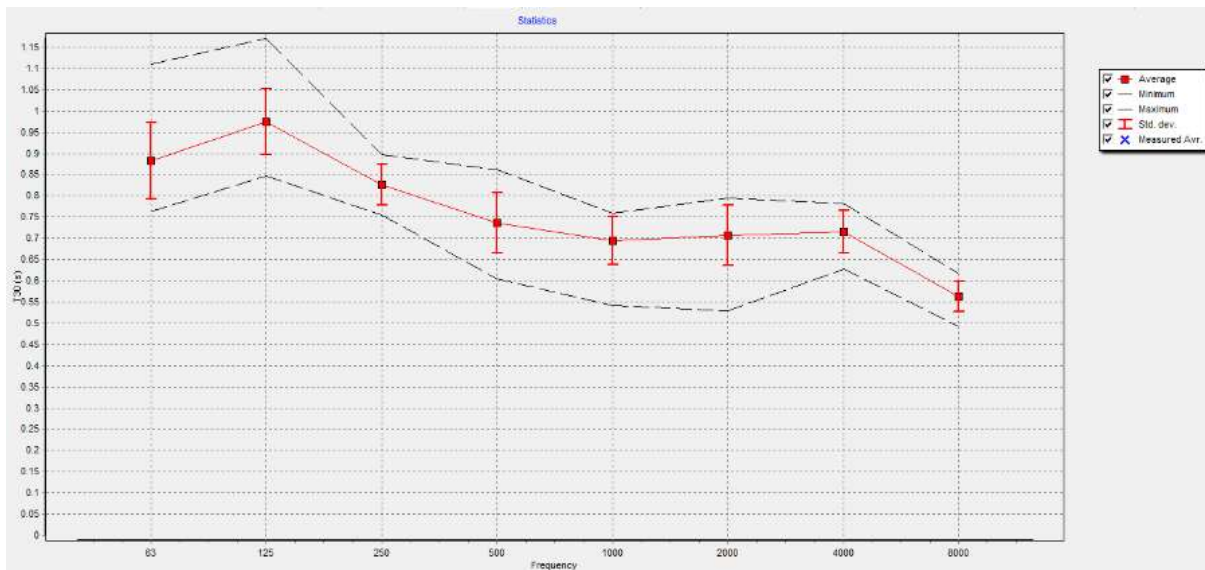


Διάγραμμα 6.3. 38: Εκτίμηση του χρόνου αντίληψης ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.3. 39: Εκτίμηση του χρόνου αντίληψης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.



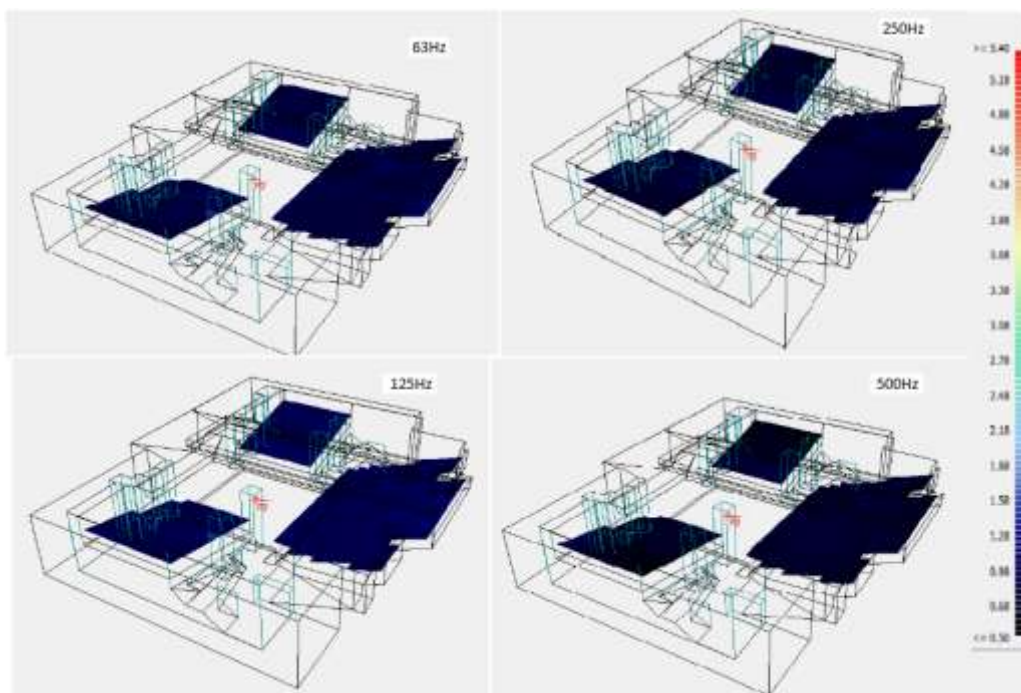


Διάγραμμα 6.3. 40: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντίληψης ανά συχνότητα.

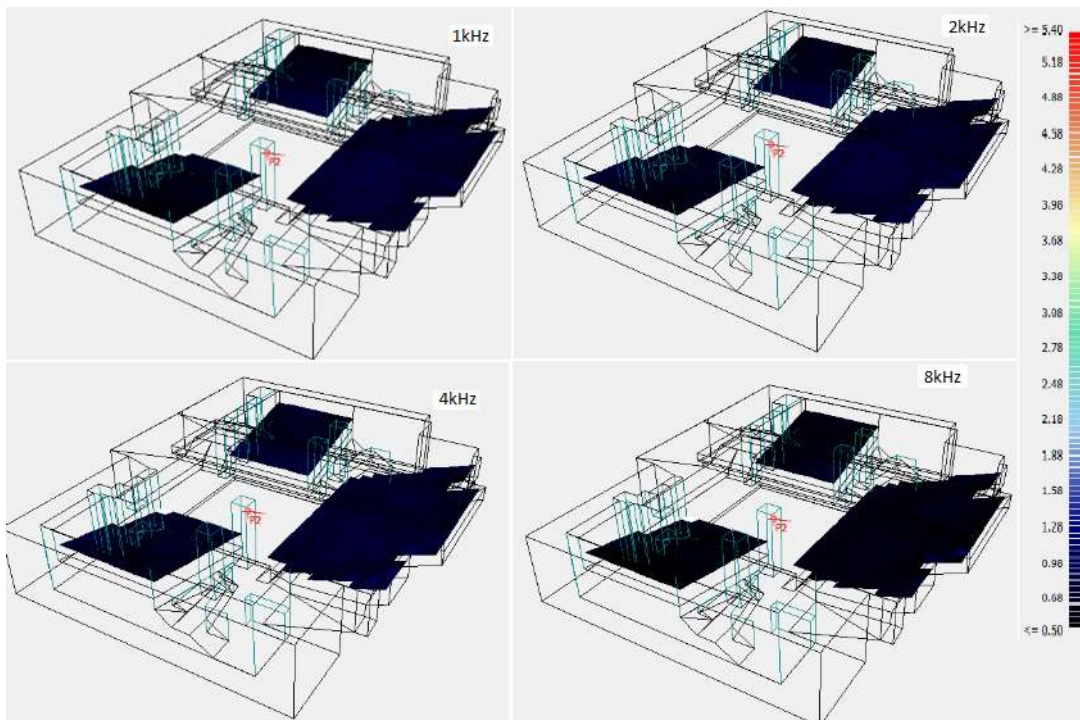
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλες οι υπό μελέτη θέσεις ακολουθούν την ίδια κατανομή RT. Η μέγιστη τιμή του RT παρουσιάζεται στα 125Hz στη θέση 4. Η ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται στα 8000Hz στη θέση 10.

Από το διάγραμμα στατιστικής ανάλυσης συμπεραίνουμε ότι ο μέσος όρος του RT κυμαίνεται από 0,55s ως 0,96s.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Grid.

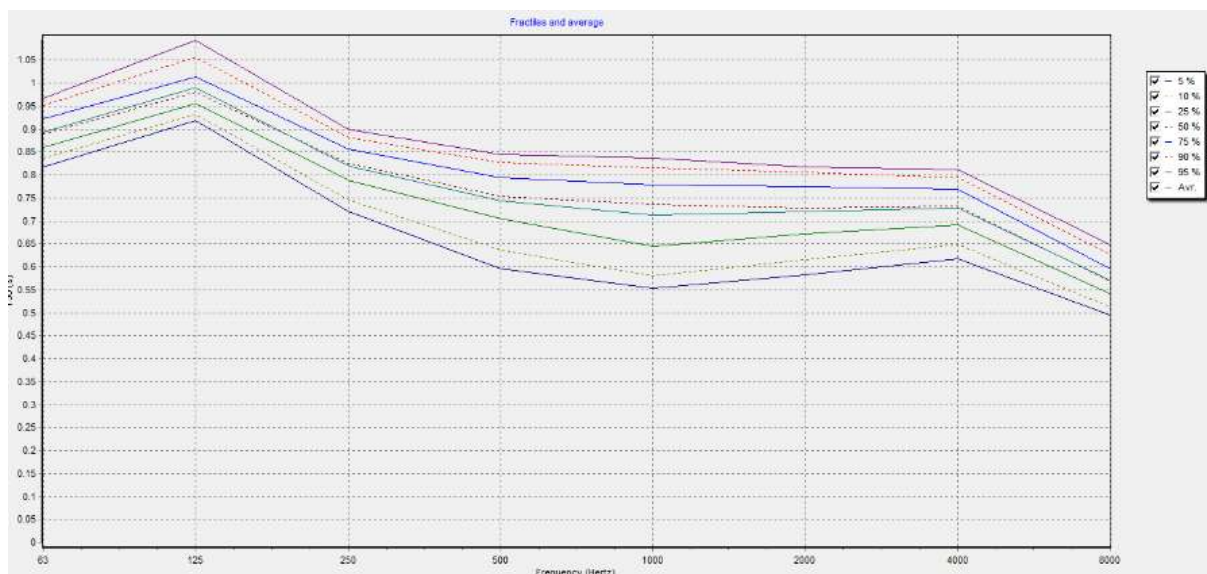


Διάγραμμα 6.3. 41: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.3. 42: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε την χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης στο χώρο των θεατών.



Διάγραμμα 6.3. 43: Επί τις εκατό στατιστική κατανομή του RT στο χώρο ανά συχνότητα.

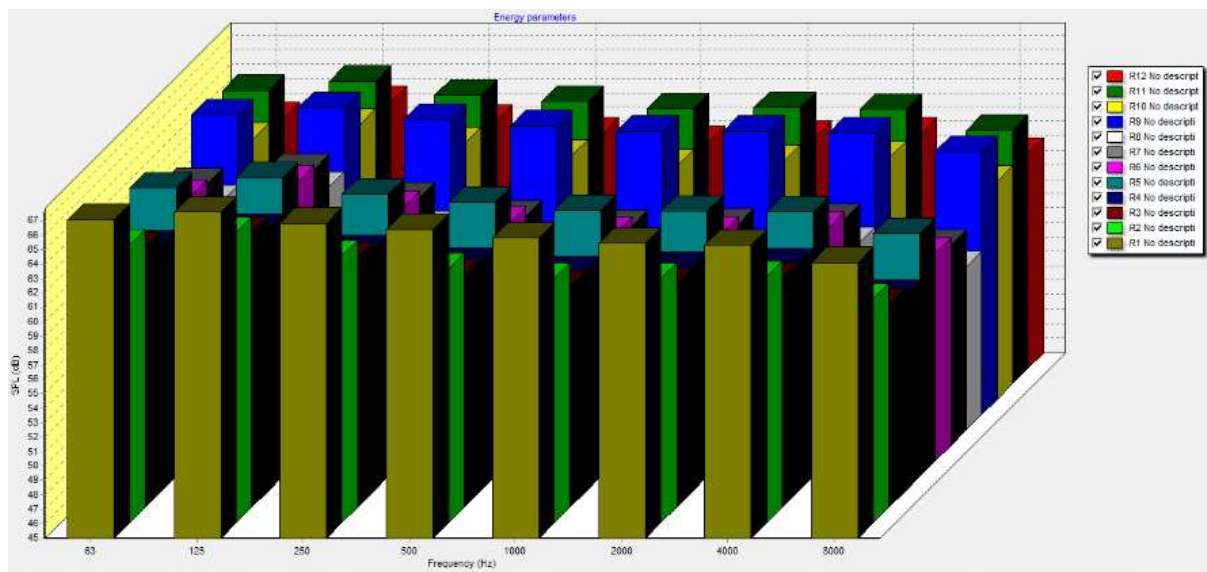
Από την μέθοδο Grid παρατηρούμε μια αύξηση του RT με μέγιστη τιμή στα 125Hz και μετά μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Ενώ από το τελευταίο διάγραμμα στατιστικής κατανομής συμπεραίνουμε ότι ο μέσος χρόνος αντήχησης του θεάτρου ανεξαρτήτως θέσεως κυμαίνεται από 0,55s ως 0,95s στα 125Hz.

## 2. SPL

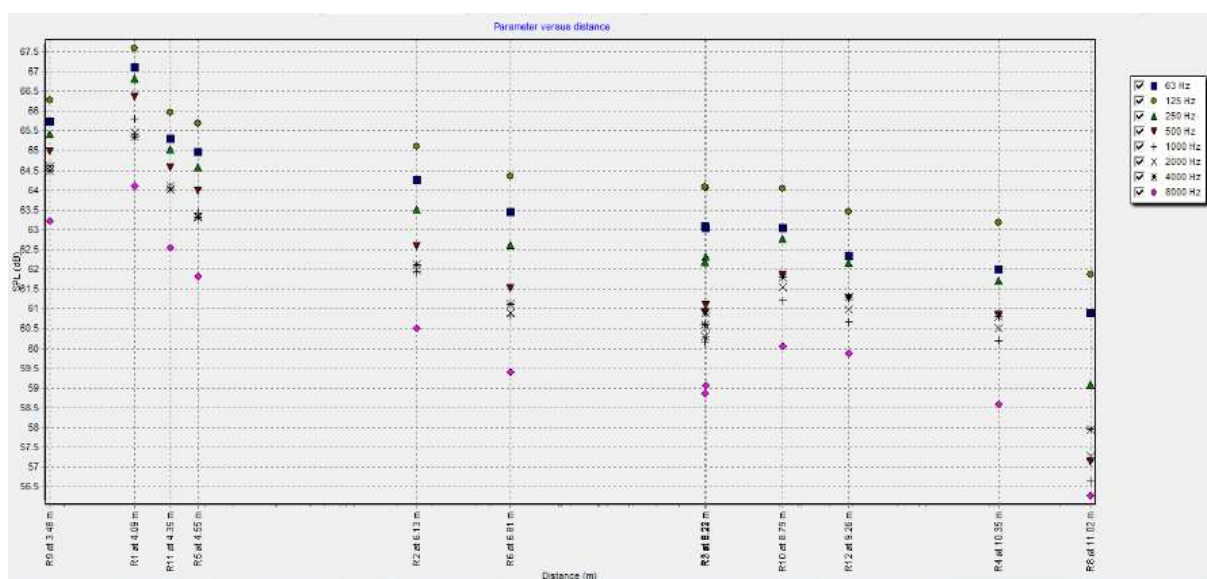
Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε πολυκατευθυντική πηγή με κέρδος 80dB, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η μέθοδος global estimate δε μας δίνει τιμές για το SPL.

Παρακάτω φαίνεται ο υπολογισμός του SPL από τη χρήση του multi-point estimation.

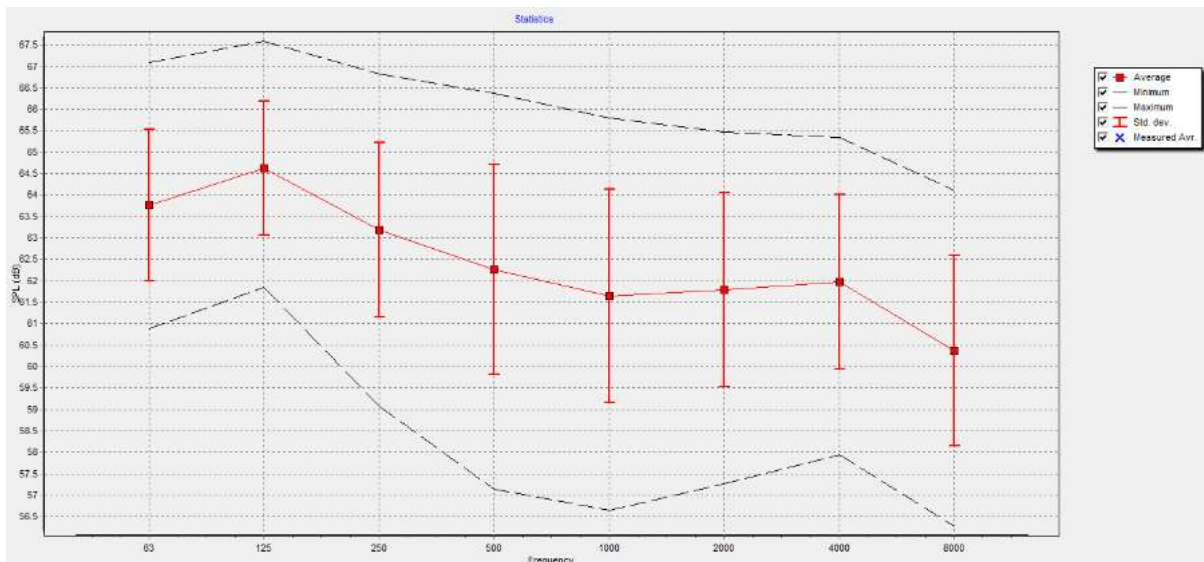


Διάγραμμα 6.3. 44: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.3. 45: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

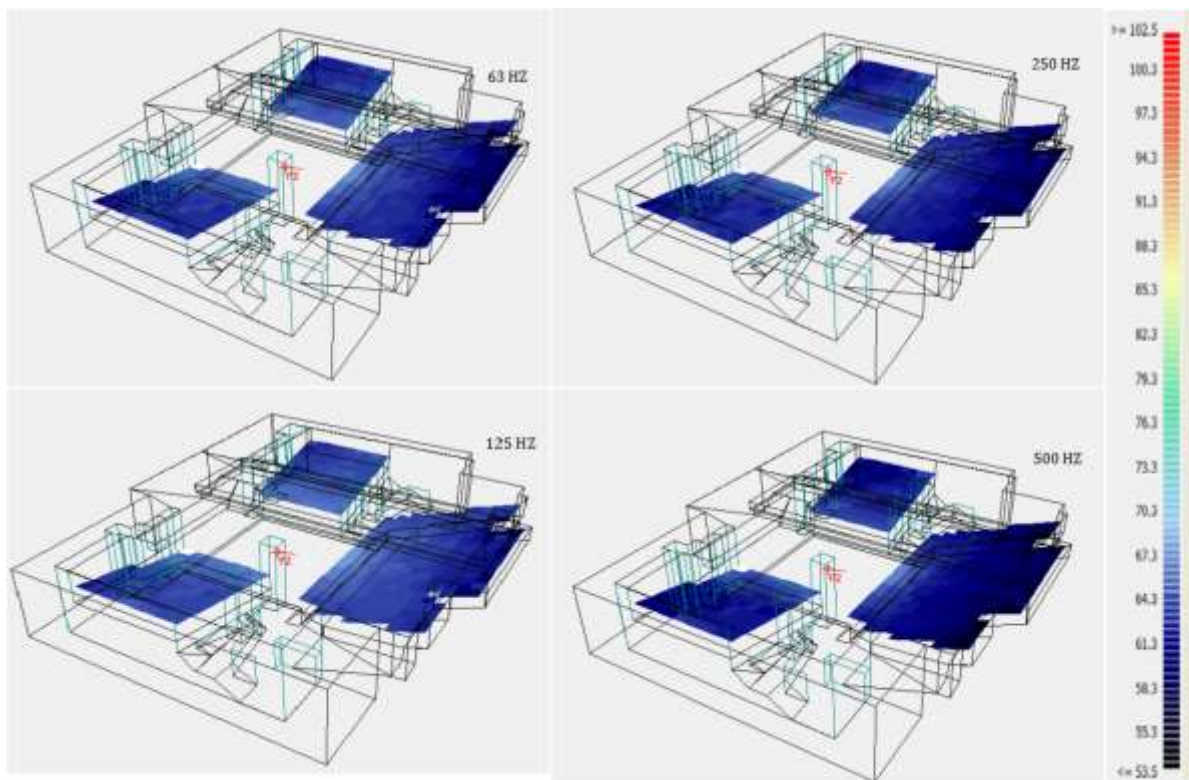




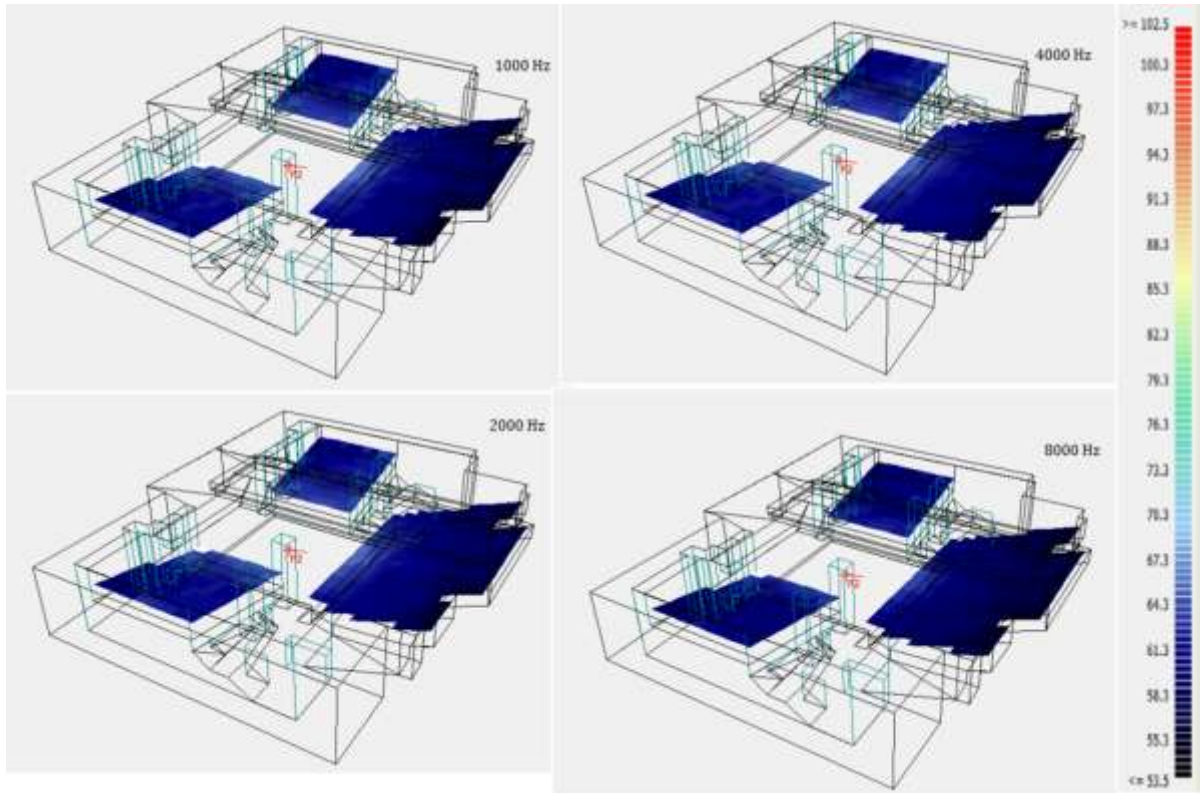
Διάγραμμα 6.3. 46: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι θέσεις 1, 5, 9 και 11 που βρίσκονται στην πρώτη σειρά έχουν το υψηλότερο SPL. Οι υπόλοιπες θέσεις παρουσιάζουν μια μικρή μείωση καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή.

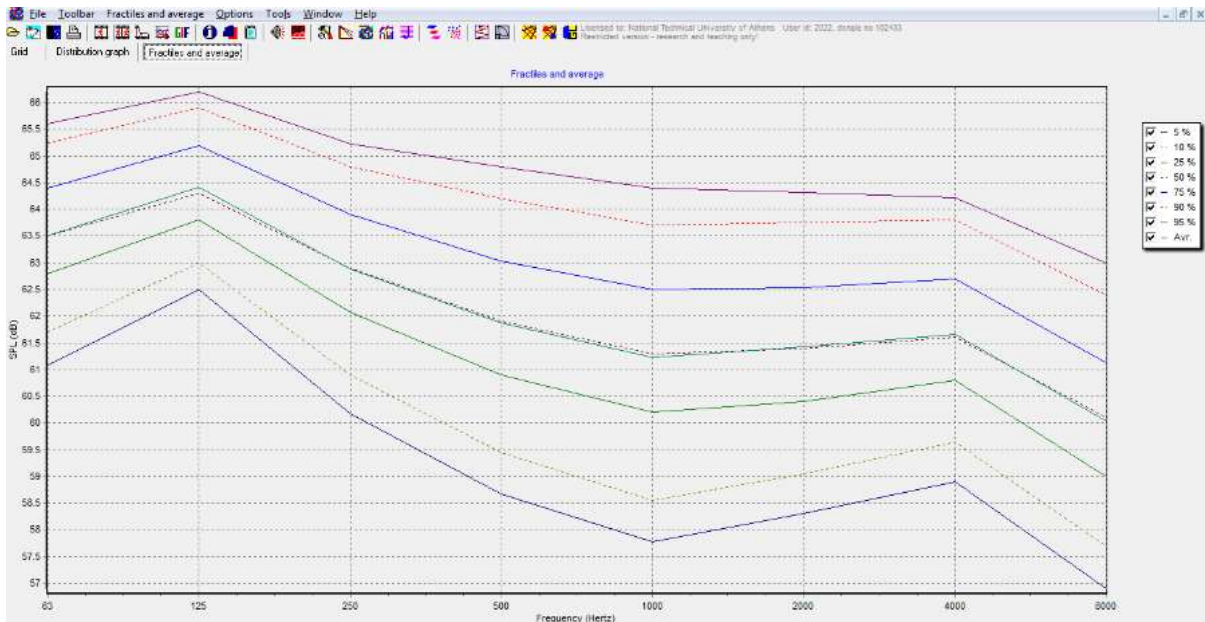
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα από την μέθοδο Grid.



Διάγραμμα 6.3. 47: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.3. 48: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

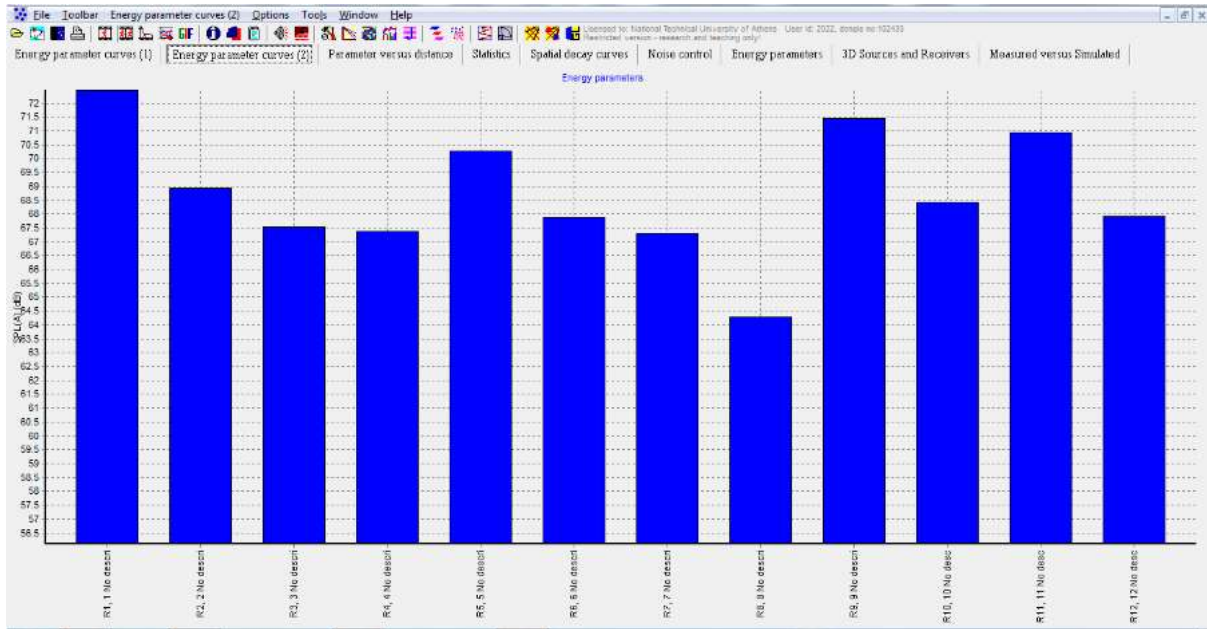


Διάγραμμα 6.3. 49: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα.

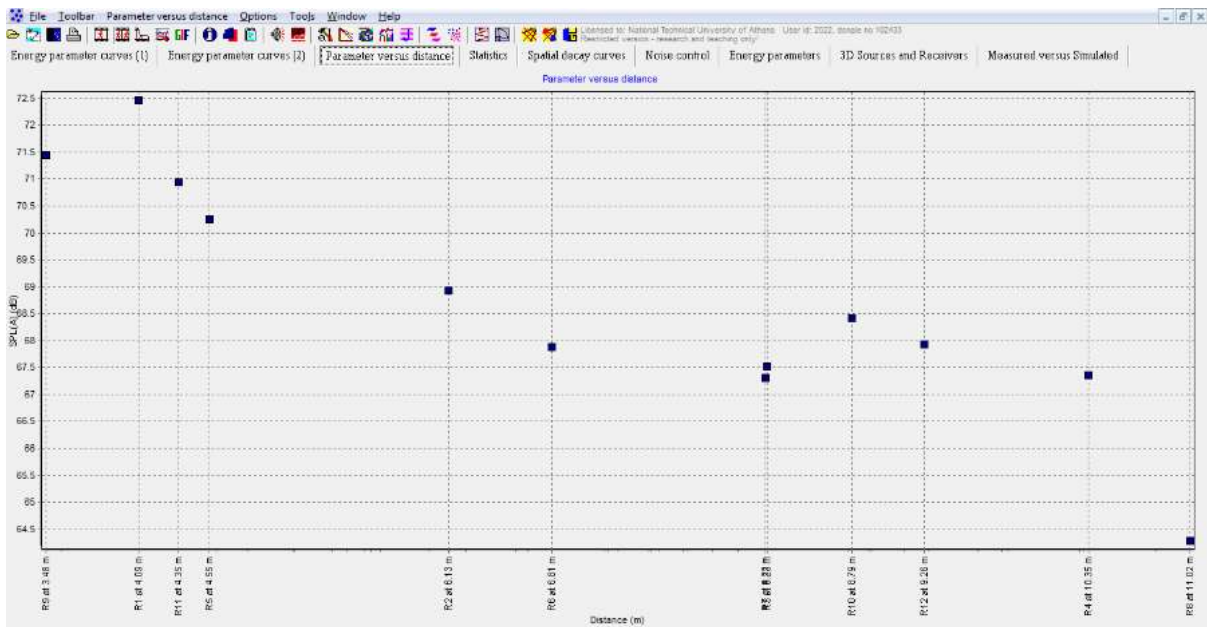
Από την μέθοδο Grid παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά στην πηγή βρισκόμαστε τόσο πιο υψηλό SPL έχουμε ανεξαρτήτως συχνότητας. Τέλος βλέπουμε ότι έχουμε παρόμοιες τιμές SPL για όλες τις συχνότητες εκτός από τις 4000Hz και 8000Hz που είναι ελαφρώς χαμηλότερες.

### 3. LAeq

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.



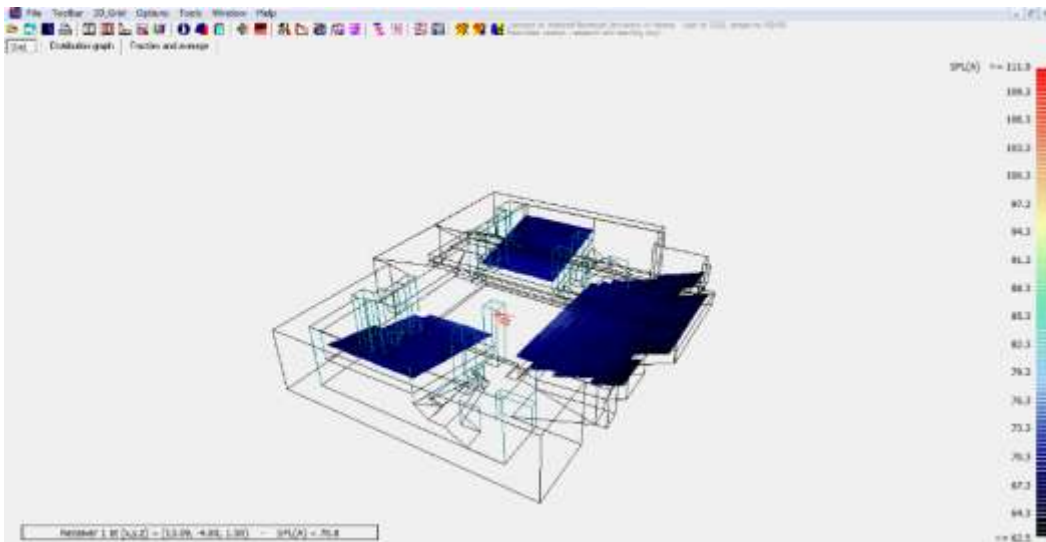
Διάγραμμα 6.3. 50: Τιμές του LAeq ανά θέση.



Διάγραμμα 6.3. 51: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.





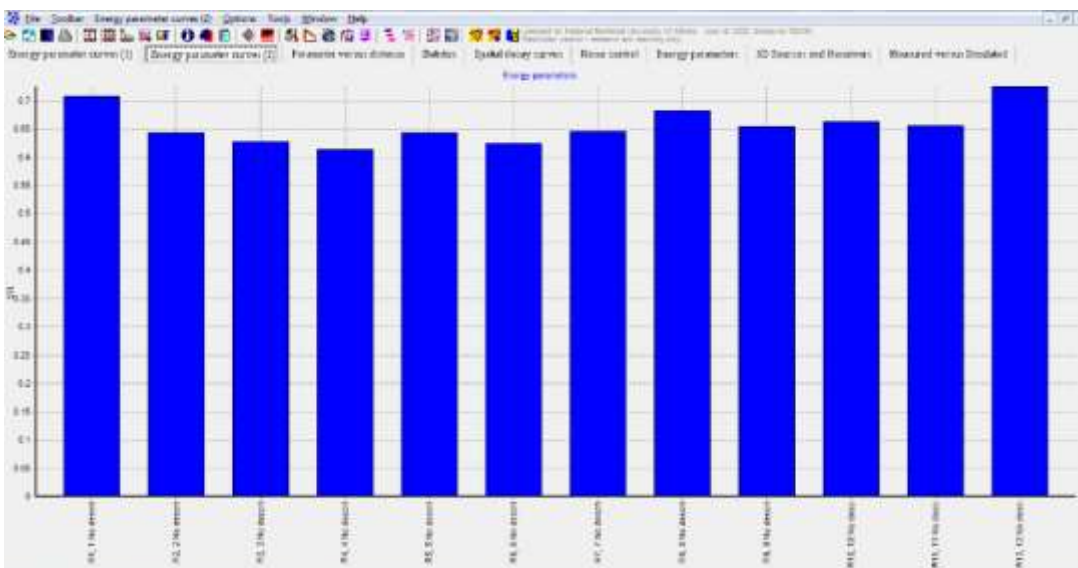
Διάγραμμα 6.3. 52: Grid ανάλυση του LAeq.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του LAeq είναι αντίστοιχα του SPL όπως και ήταν αναμενόμενο. Οι θέσεις κοντά στην πηγή έχουν τις μεγαλύτερες τιμές και όσο απομακρυνόμαστε από αυτή οι τιμές μειώνονται.

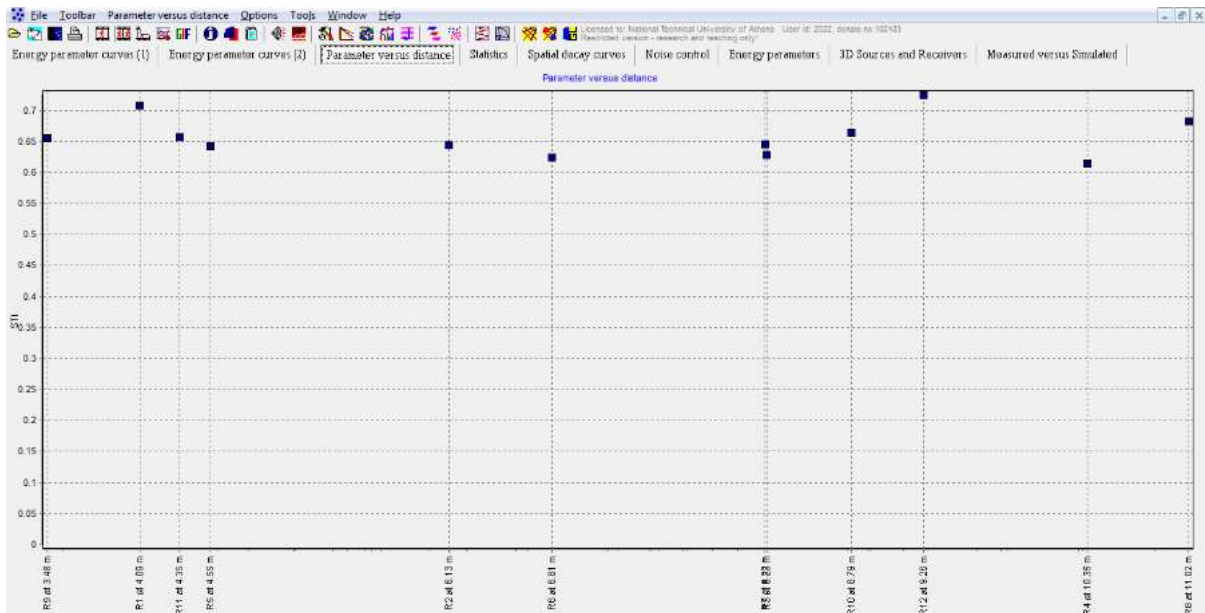
## Επιπλέον ακουστικά μεγέθη

### 1. STI

Η μέθοδος multi-point estimation μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

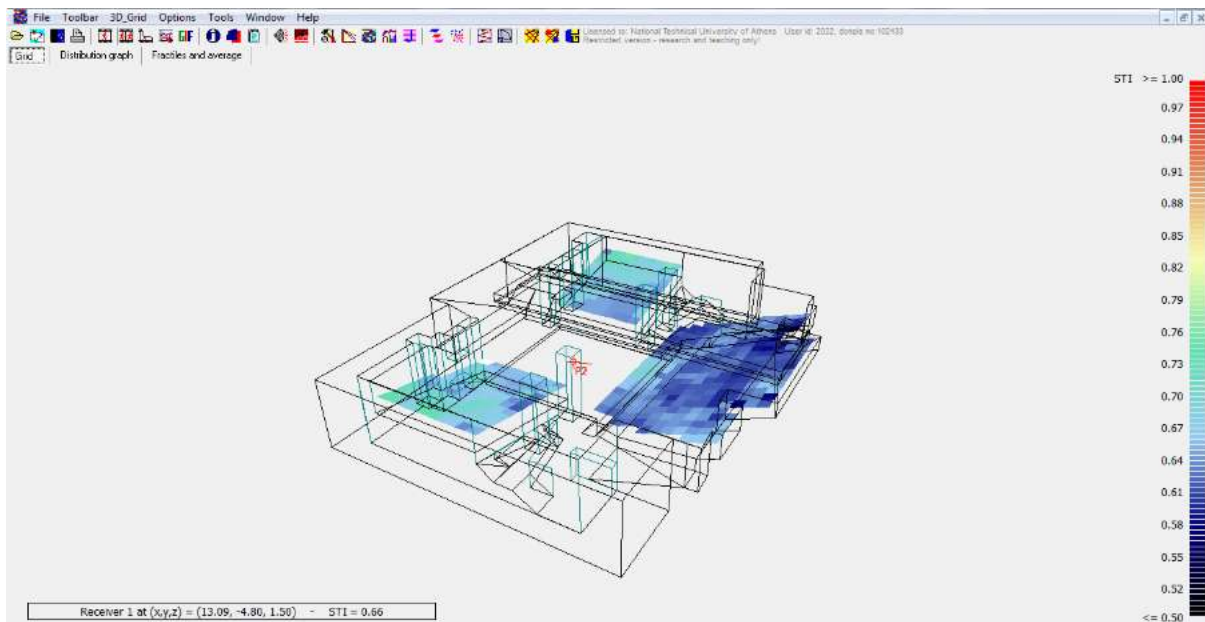


Διάγραμμα 6.3. 53: Τιμές του STI ανά θέση



Διάγραμμα 6.3. 54: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή.

Η μέθοδος Grid μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



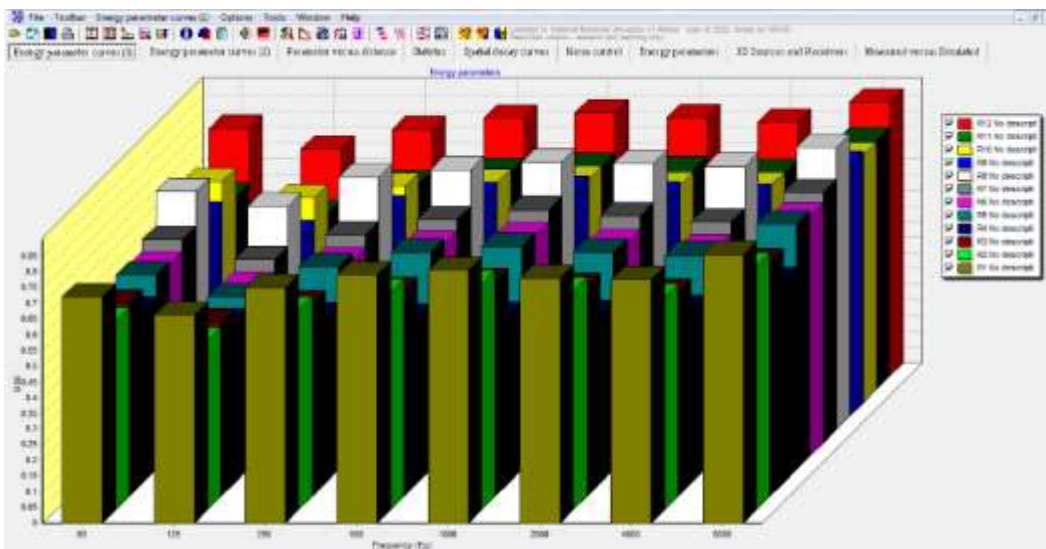
Διάγραμμα 6.3. 55: Grid ανάλυση του STI.

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τα πρότυπα ISO είναι καλά. Παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις βρίσκονται γύρω από την τιμή 0,65. Από το διάγραμμα 6.3.83 παρατηρούμε ότι η τιμή του STI είναι παρόμοια ανεξαρτήτως θέσεως. Βέβαια η μέθοδος Grid μας δίνει διαφορετικά αποτελέσματα. Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα 6.3.84 η διακύμανση του STI στο χώρο είναι μεγάλη. Συγκεκριμένα στο κεντρικό διάζωμα αν εξαιρέσουμε τις θέσεις στο κέντρο

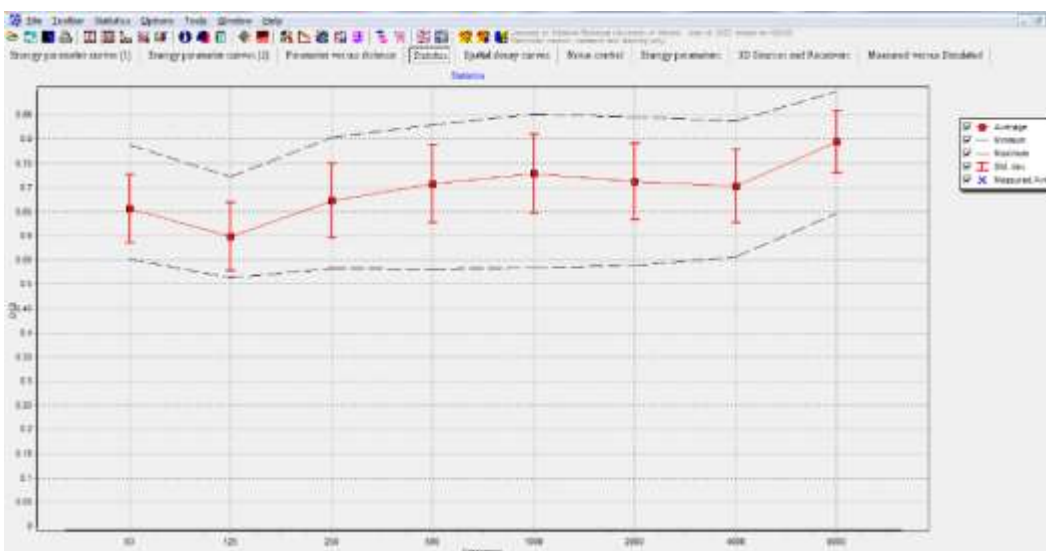
της πρώτης σειράς που έχουν αρκετά υψηλό STI, οι υπόλοιπες κυμαίνονται γύρω από την τιμή 0,60. Στο δεξί και αριστερό διάζωμα βλέπουμε αρκετά υψηλότερες τιμές STI πέραν των θέσεων κοντά στις κολώνες που μειώνονται ελαφρά. Παρατηρούμε παρ'όλα αυτά, ότι οι θεατές μπορούν να ξεχωρίσουν καλά τις συλλαβές στον λόγο του ομιλητή σε όλες τις θέσεις.

## 2. D50, C80

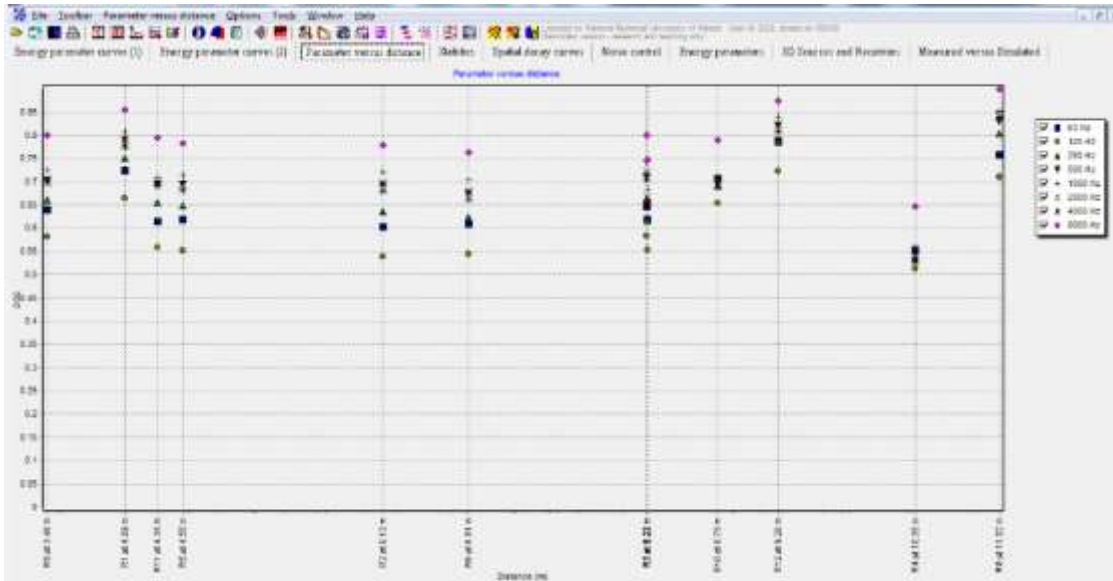
Υπολογισμός παραμέτρου D50 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.3. 56: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).



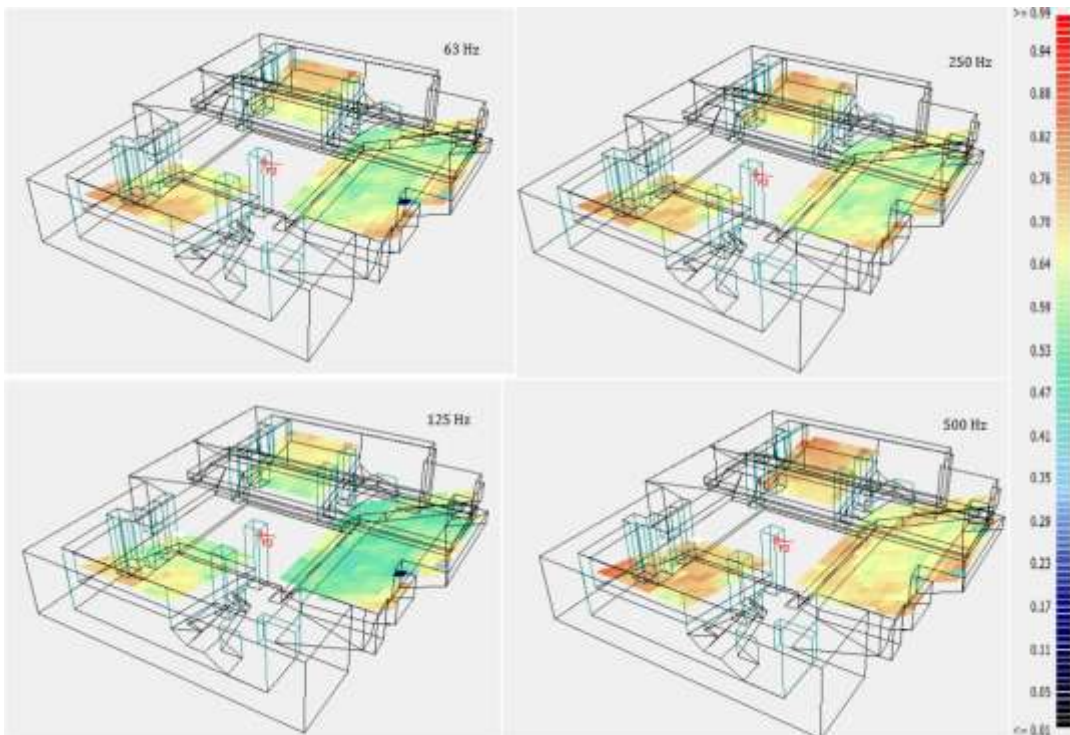
Διάγραμμα 6.3. 57: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 6.3. 58: Εκτίμηση του D50 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα

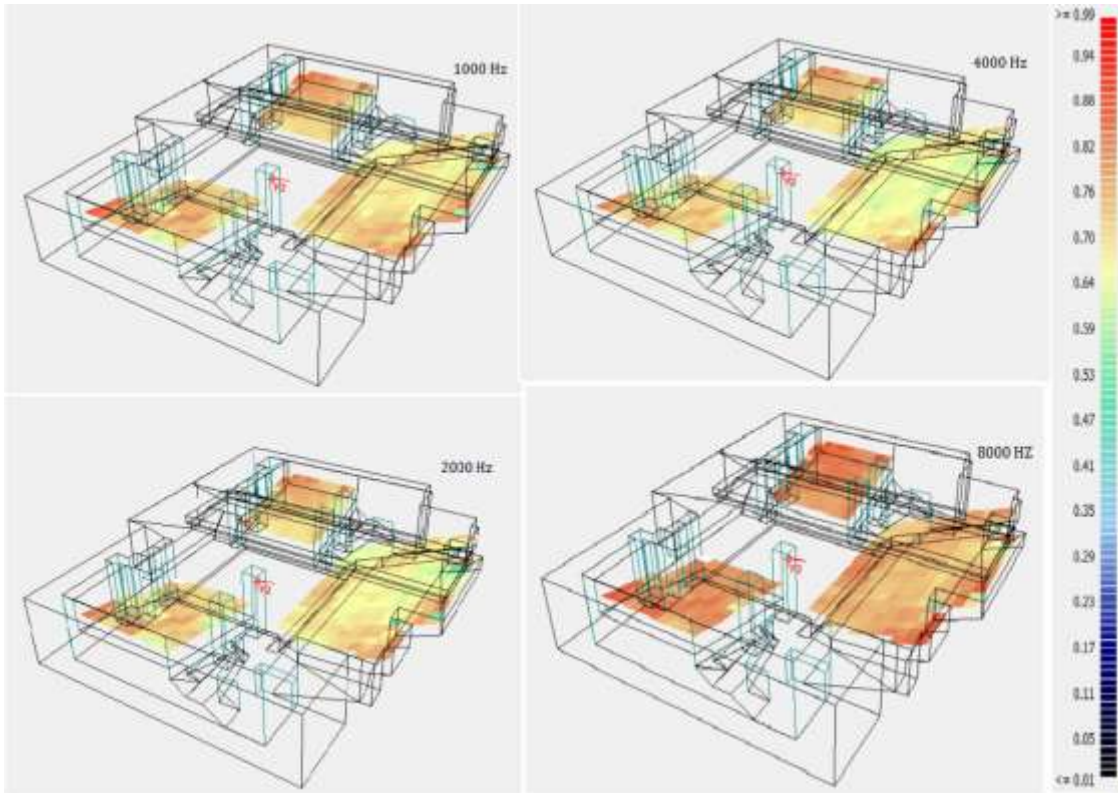
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλες οι θέσεις σε όλες τις συχνότητες έχουν μεγαλύτερες τιμές από 0,5 (50%). Παρατηρούμε ότι τις χαμηλότερες τιμές του D50 έχουμε στη συχνότητα των 125Hz και τις υψηλότερες στη συχνότητα των 8000Hz.

Η μέθοδος Grid για το D50 μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.

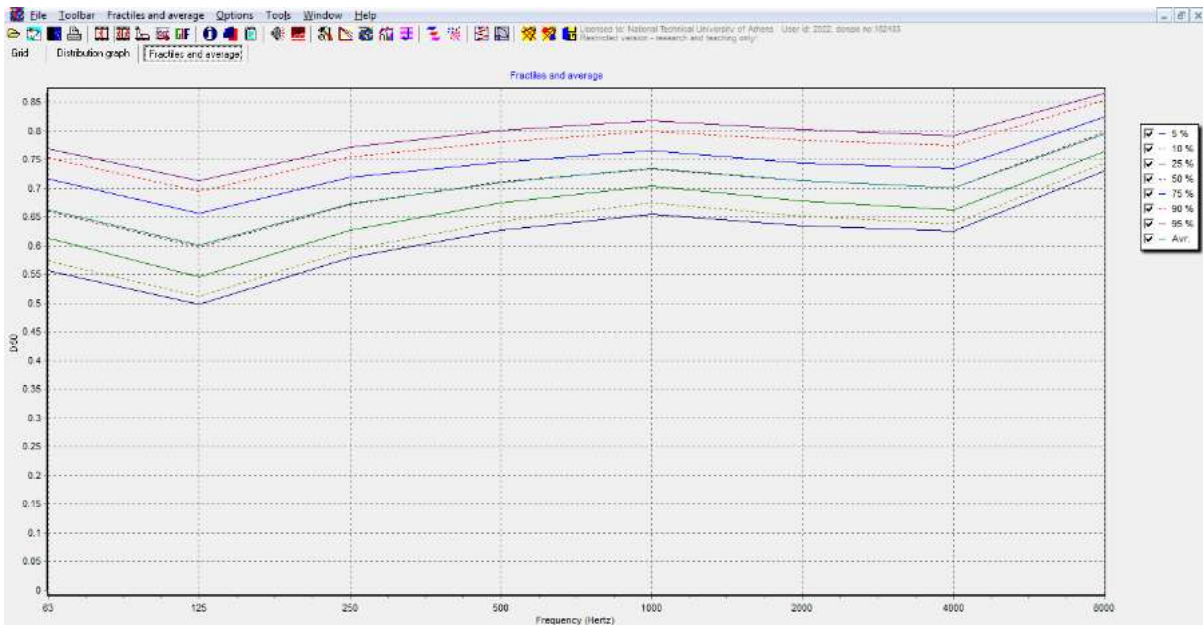


Διάγραμμα 6.3. 59: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz





Διάγραμμα 6.3. 60: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz

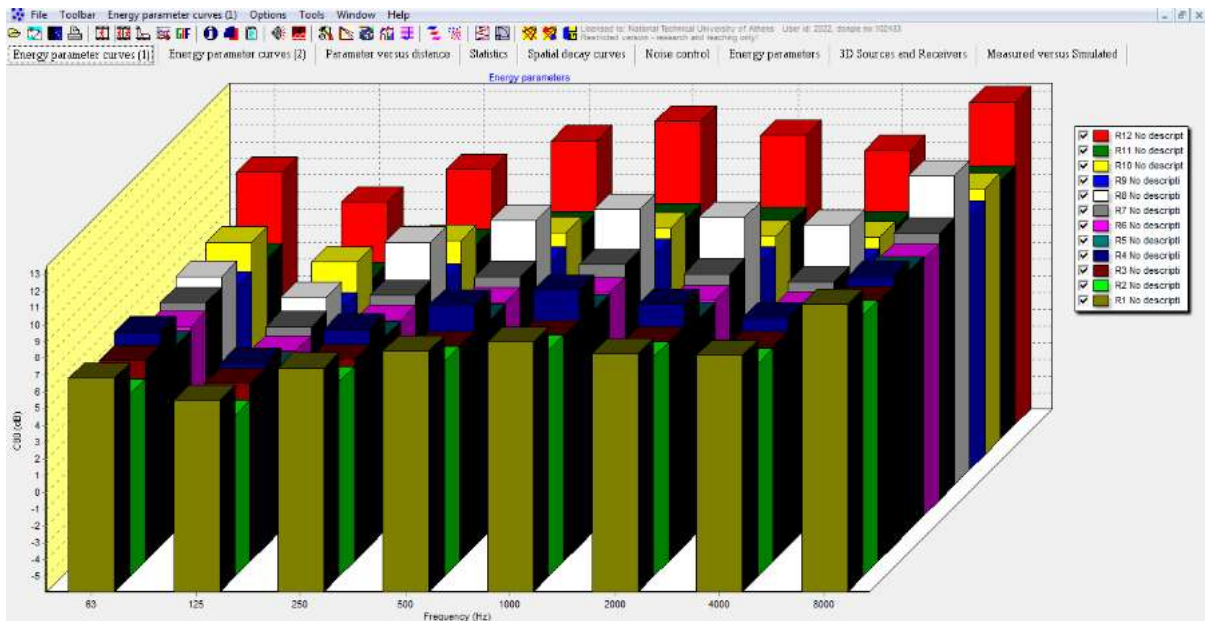


Διάγραμμα 6.3. 61: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα.

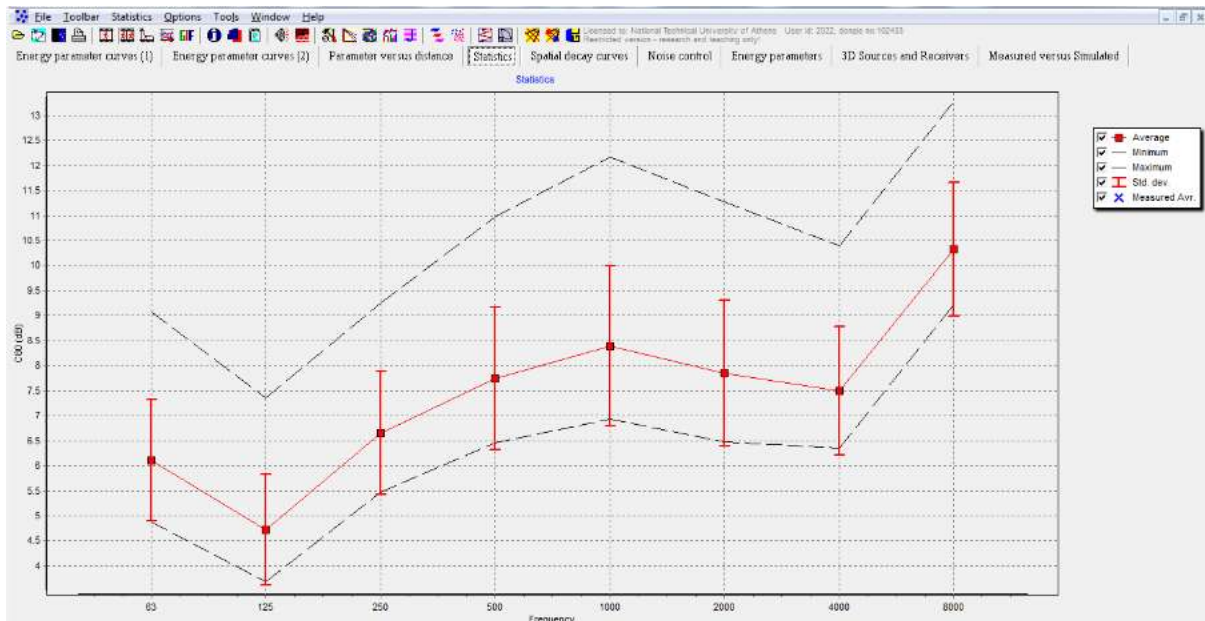
Από τη μέθοδο Grid παρατηρούμε ότι η αίθουσα σε όλο τον χώρο των θεατών έχει ικανοποιητική τιμή D50 και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο χώρος είναι καταληπτός όσον αφορά την ομιλία.



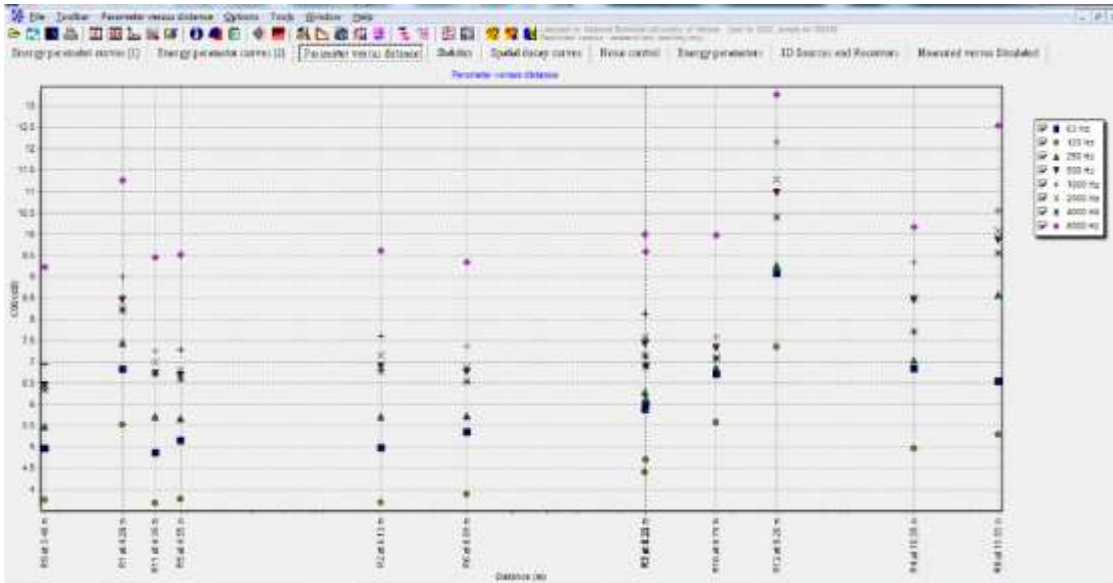
## Υπολογισμός παραμέτρου C80 με την μέθοδο multi-point estimation



Διάγραμμα 6.3. 62: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).



Διάγραμμα 6.3. 63: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα.

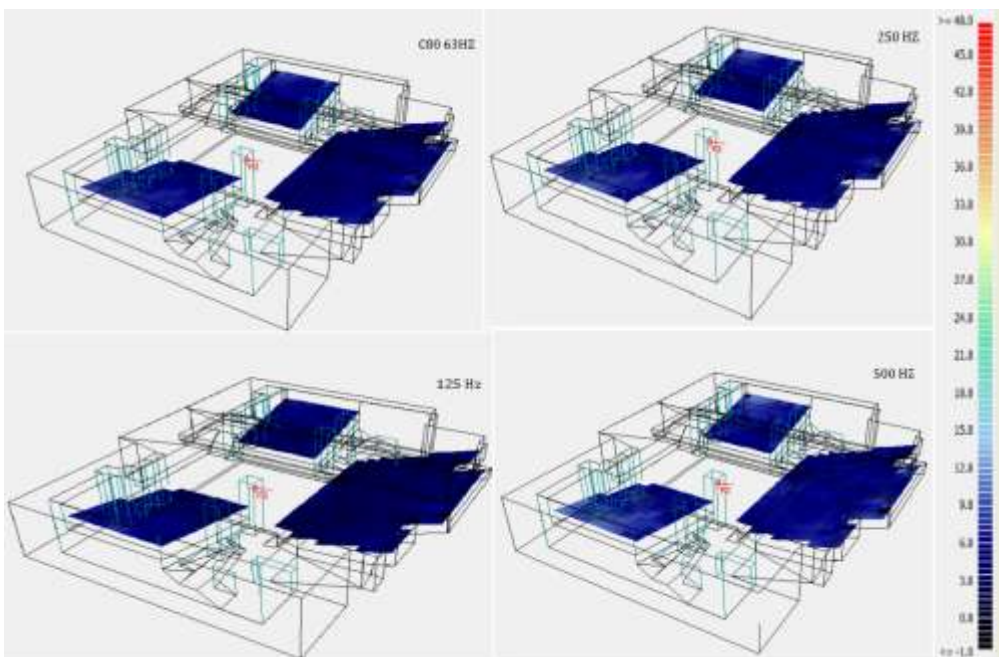


Διάγραμμα 6.3. 64: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

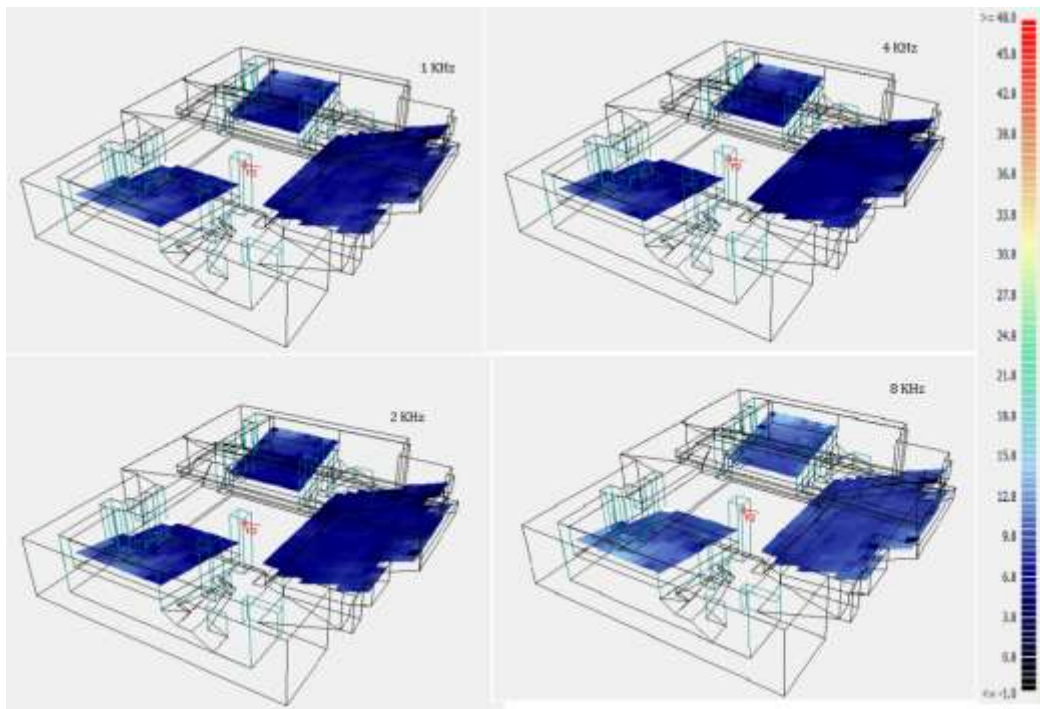
Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα οι τιμές του C80 για θέατρα είναι από -1 έως 3dB.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές του μεγέθους C80 παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Πέραν των θέσεων 1, 2, 5, 6, 9 και 11 που στη συχνότητα των 125Hz είναι κοντά στα 3dB, στις υπόλοιπες συχνότητες και υπόλοιπες θέσεις το μέγεθος C80 βρίσκεται σε αρκετά υψηλότερες τιμές. Από το Διάγραμμα 6.3.92 παρατηρούμε ότι η ελάχιστη μέση τιμή είναι 4,7 και η μέγιστη μέση τιμή είναι 10,4.

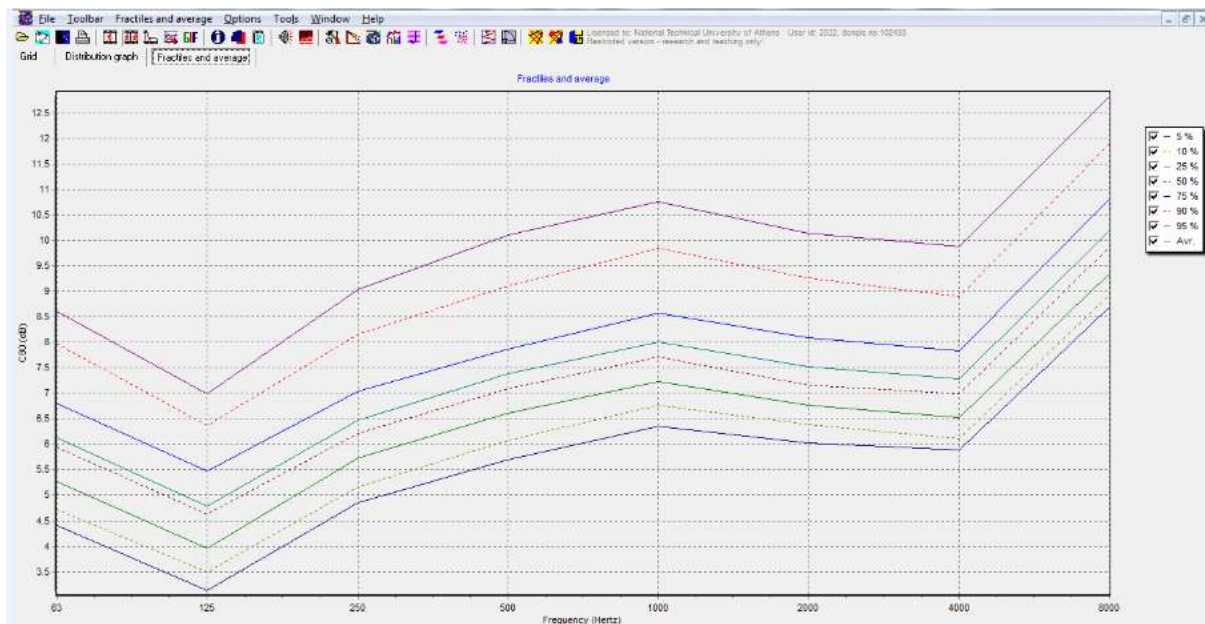
Η μέθοδος Grid για το C80 μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 6.3. 65: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.3. 66: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



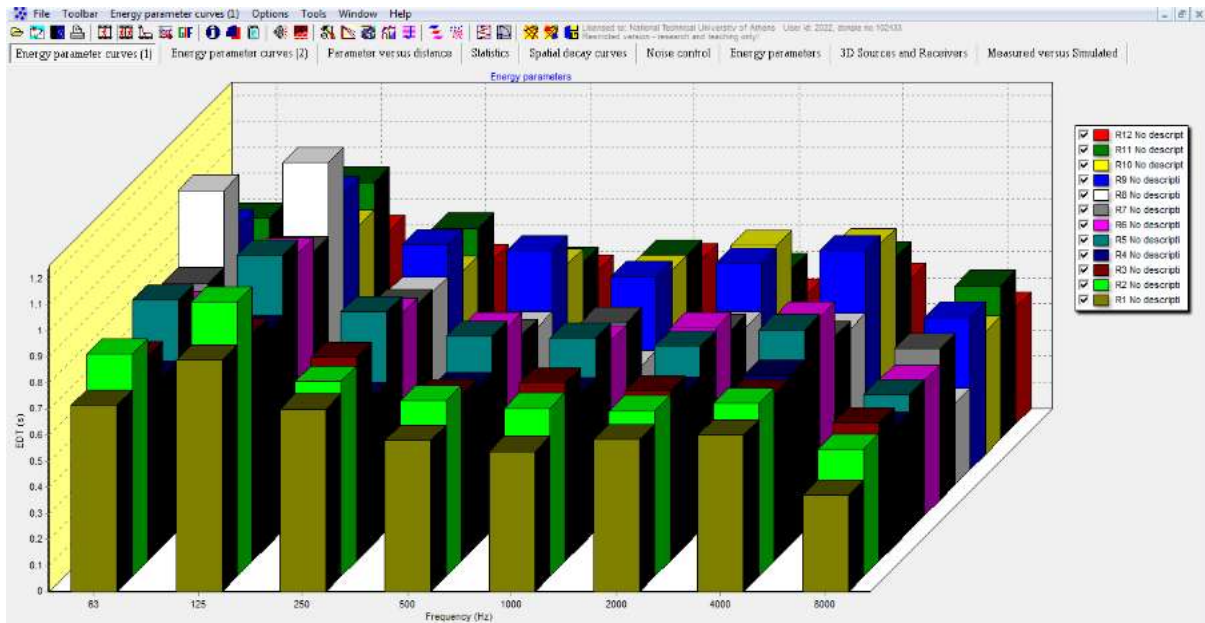
Διάγραμμα 6.3. 67: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα.

Η μέθοδος Grid μας δείχνει τα ίδια αποτελέσματα, όπου οι τιμές του μεγέθους αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας.

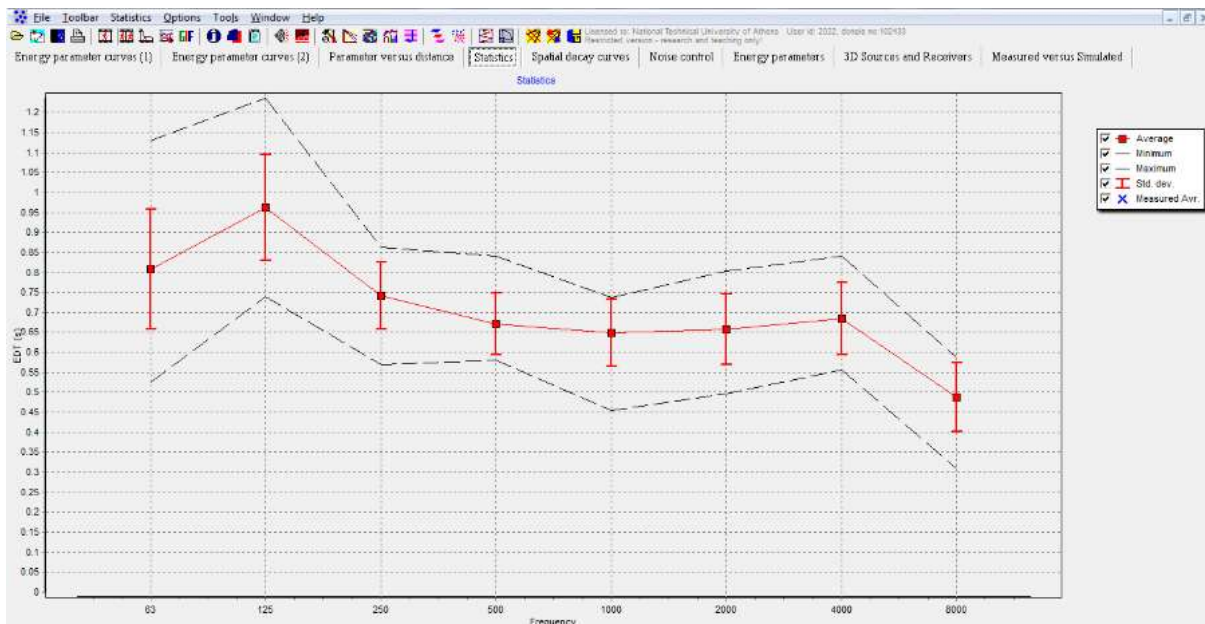


### 3. EDT

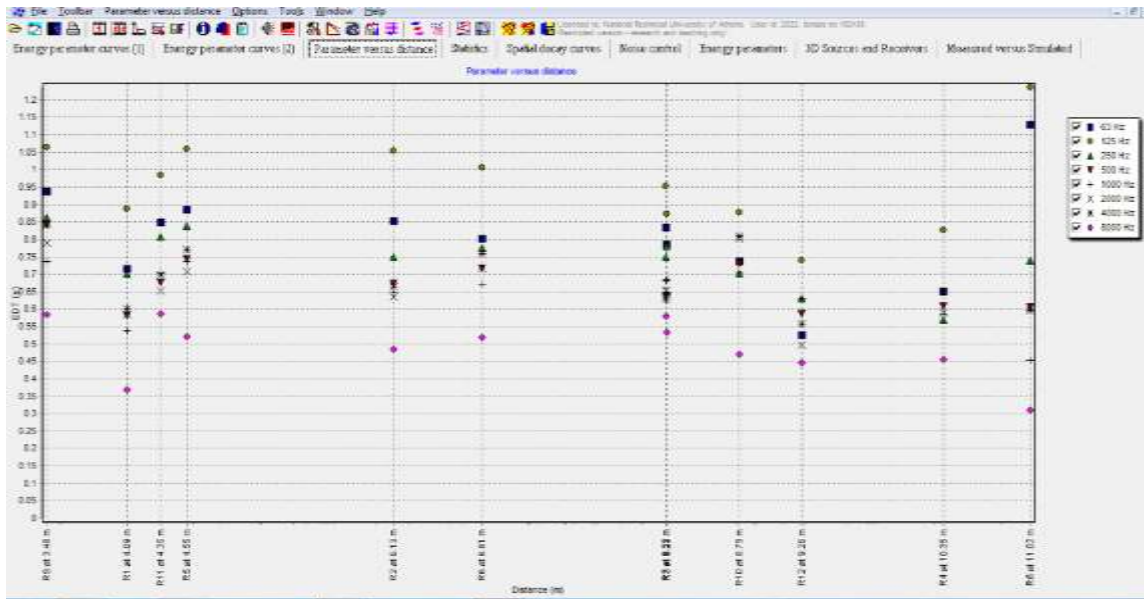
Υπολογισμός παραμέτρου EDT με την μέθοδο multi-point estimation.



Διάγραμμα 6.3. 68: Εκτίμηση του EDT ανά μικρόφωνο και συχνότητα (multi-point estimation).



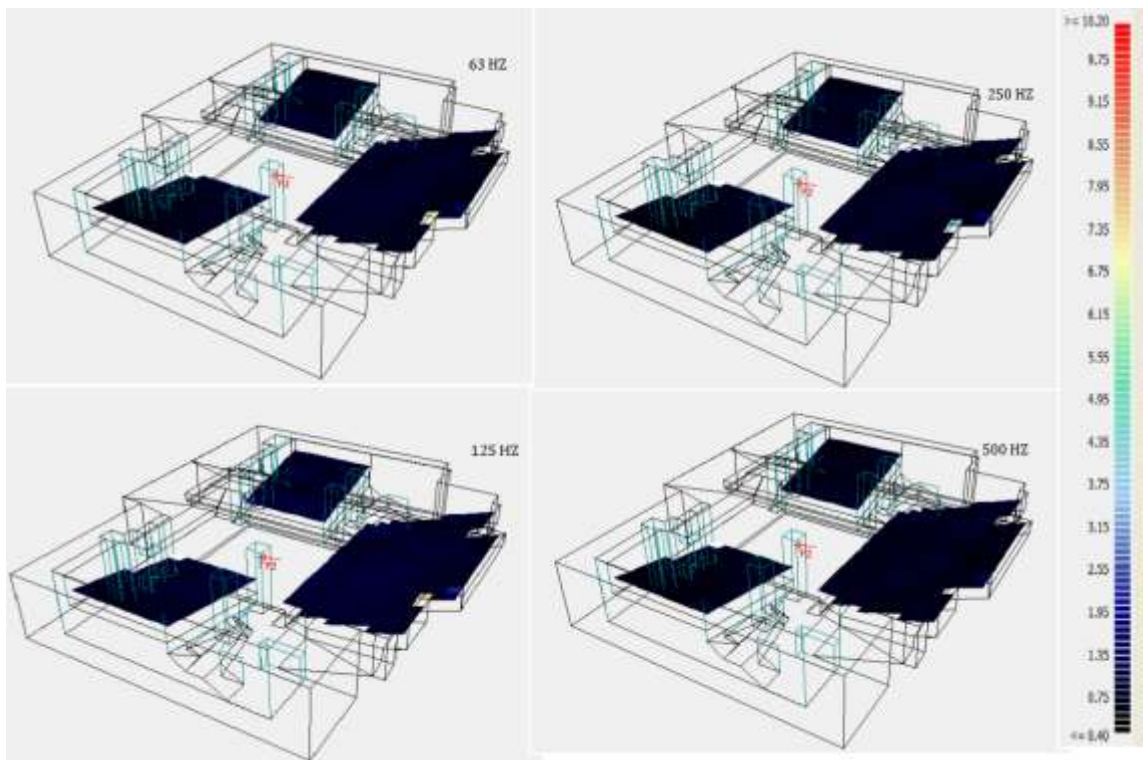
Διάγραμμα 6.3. 69: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα.



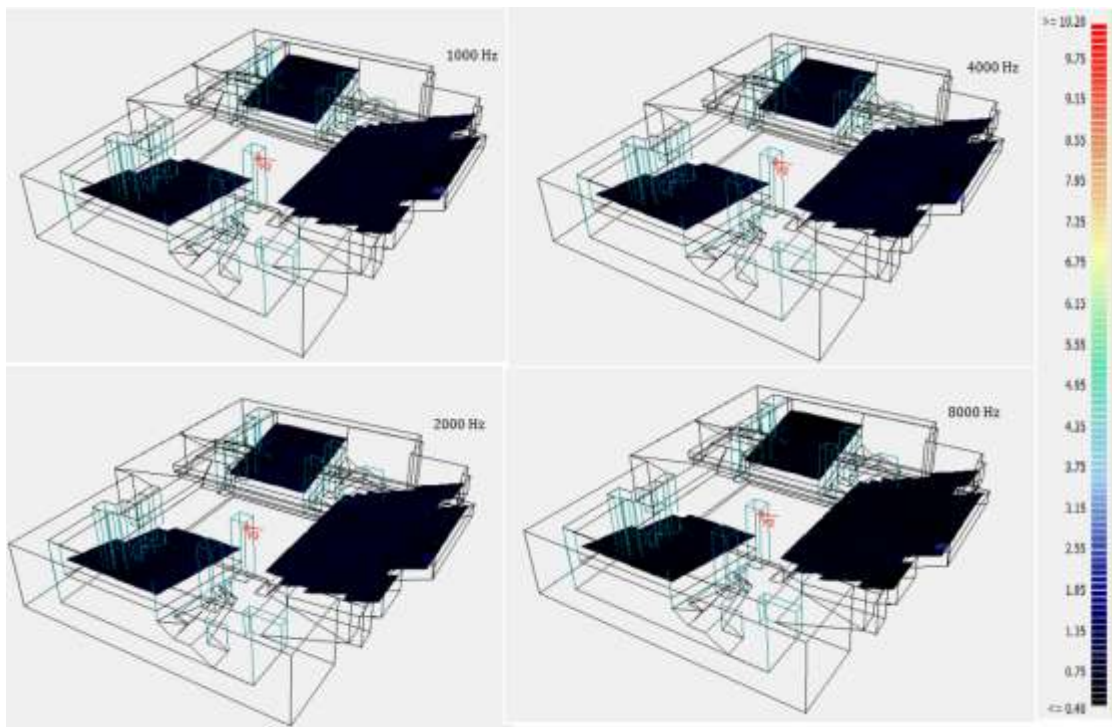
Διάγραμμα 6.3. 70: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα.

Από το Διάγραμμα 6.3.98 οι μέσες τιμές του EDT κυμαίνονται από 0,95s στη συχνότητα των 125Hz ως 0,5s στη συχνότητα 8000Hz.

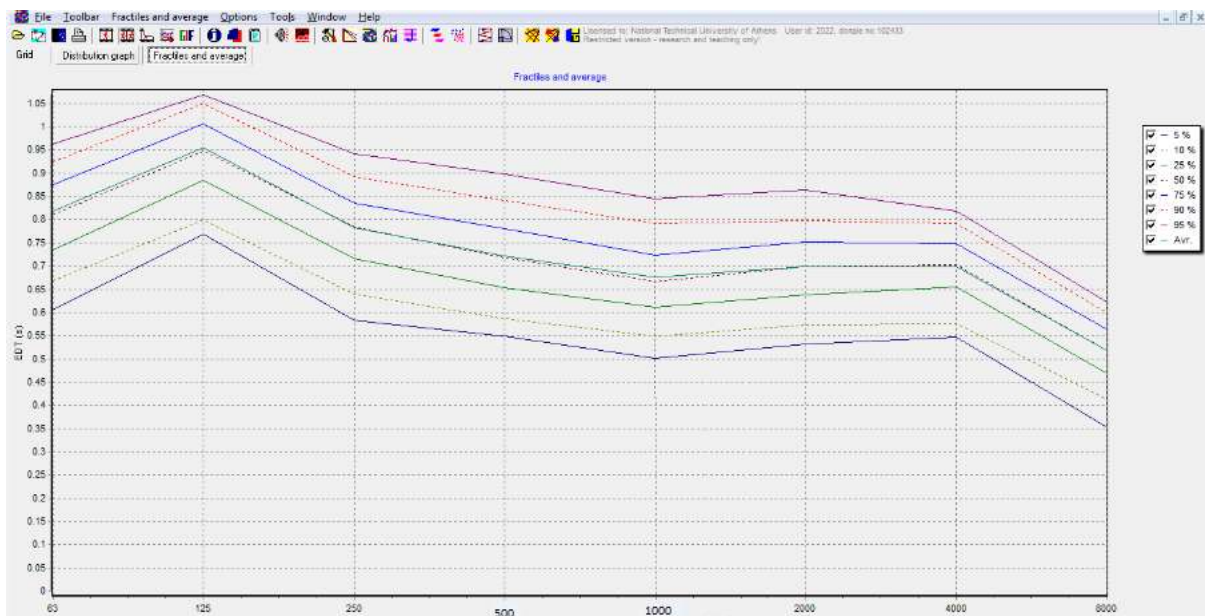
Η μέθοδος Grid για το EDT μας έδωσε το παρακάτω διάγραμμα



Διάγραμμα 6.3. 71: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz



Διάγραμμα 6.3. 72: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz



Διάγραμμα 6.3. 73: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές σε όλες τις υπό μελέτη θέσεις κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,47s και 0,87s και είναι πιο χαμηλές από τις τιμές του RT.



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στο χώρο των θεάτρων και τα αποτελέσματα από το μοντέλο προσομοίωσης ODEON, για κάθε ένα θέατρο ξεχωριστά. Στο τέλος εξάγονται κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με την ακουστικότητα κάθε χώρου.

#### 1. Θέατρο Βαφείο.

Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων μας έδειξε ότι τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στο χώρο είναι αρκετά κοντά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη διακύμανση σε σύγκριση με αυτά της προσομοίωσης καθώς κατά την διάρκεια της διαδικασίας των μετρήσεων υπάρχουν αστάθμητοι παράγοντες που δε μπορούσαμε να ελέγξουμε. Μερικοί από αυτούς είναι η κατεύθυνση και οι ιδιότητες της ηχητικής πηγής και η ηχομόνωση του θεάτρου. Επίσης διαφορές στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων προέκυψαν από τυχόν ατέλειες της αίθουσας του θεάτρου που δεν ήταν δυνατόν να προσομοιωθούν.

Στην προσομοίωση επιλέξαμε την πηγή μας κατάλληλα ούτως ώστε το SPL να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τα αποτελέσματα που πήραμε από την φασματική κατανομή του white και pink noise. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε μια πολυκατευθυντική πηγή, τέτοια ώστε το φάσμα την να είναι παρόμοιο με εκείνο του ηχείου του θεάτρου και επιλέξαμε κέρδος 80dB που ήταν και η ένταση της πηγής που χρησιμοποιήσαμε στο θέατρο. Στην προσομοίωση παρατηρούμε μείωση της ηχητικής πίεσης όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή με εξαίρεση τα μικρόφωνα που βρίσκονται κοντά σε τοίχους. Οι τιμές του SPL κυμαίνονται από 62dB ως 67dB. Κατά την προσομοίωση μελετήσαμε περισσότερες θέσεις από ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας των μετρήσεων, ώστε να έχουμε πιο σαφή εικόνα για τον χώρο. Μέσω της μεθόδου Grid μας δίνεται η συνολική εικόνα για τον χώρο των θεατών.

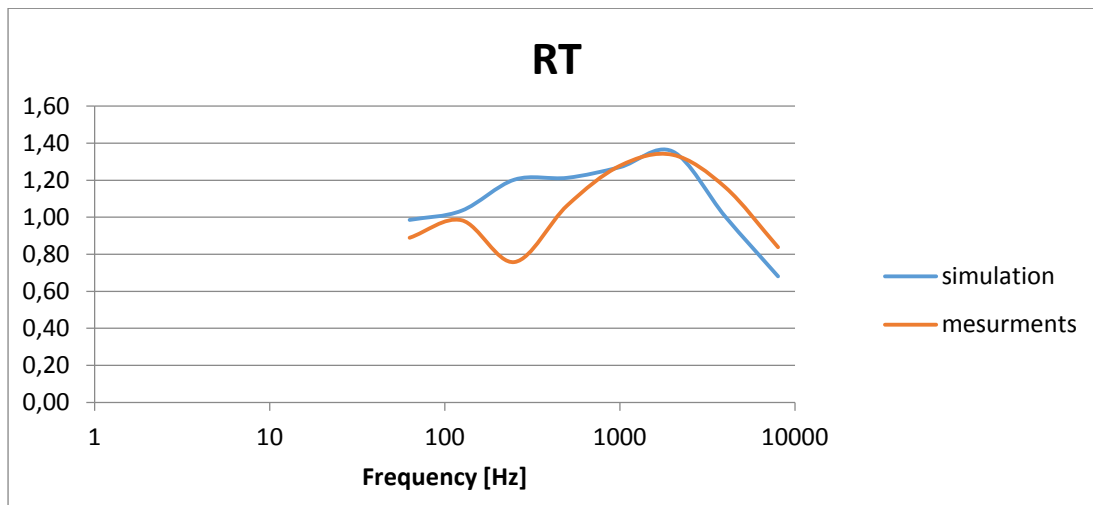
Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και από τις μετρήσεις με τα επίπεδα των τιμών να κυμαίνονται από 60dB με 70dB.

Τα επίπεδα της ηχητικής πίεσης που φτάνουν στους θεατές κρίνονται ικανοποιητικά. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόρροια του μικρού όγκου του θεάτρου και του χαμηλού ύψους του ταβανιού, τα οποία δημιουργούν καλές ακουστικές συνθήκες, παρά των ελαττωμάτων της αίθουσας.

Παρόμοια αποτελέσματα με το SPL εξάγονται και από το μέγεθος LAeq μέσω της προσομοίωσης και των μετρήσεων.



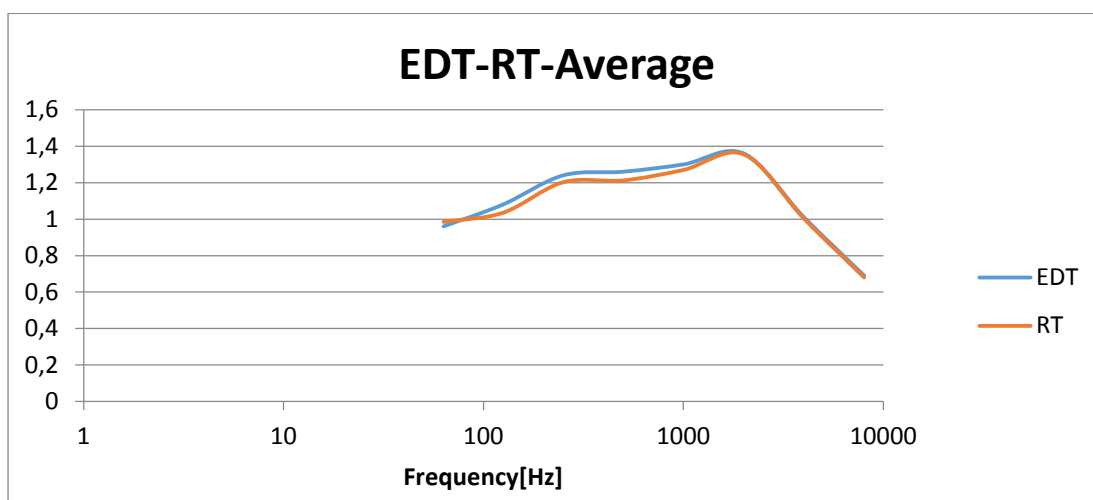
Στο παρακάτω διάγραμμα 7.1.1 παρατηρούμε την σύγκριση της μέσης τιμής του RT μεταξύ των μετρήσεων και της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.1. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.

Από το παραπάνω διάγραμμα 7.1.1 βλέπουμε ότι το RT και στις δύο περιπτώσεις ακολουθεί παρόμοια καμπύλη, με τις τιμές να κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή στη συχνότητα των 250Hz με την διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων στα 0,4s. Η διαφορά αυτή οφείλεται, είτε σε λάθος στην μέτρηση, είτε σε ατέλειες του χώρου. Οι τιμές του RT κρίνονται ικανοποιητικές αν και λίγο υψηλές για τον όγκο του θεάτρου.

Επιπλέον υπολογίστηκε το μέγεθος EDT μόνο μέσω της προσομοίωσης. Στο διάγραμμα 7.1.2 παρακάτω, φαίνεται η σύγκριση της μέσης τιμής του EDT με αυτή του RT ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 7.1. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα.

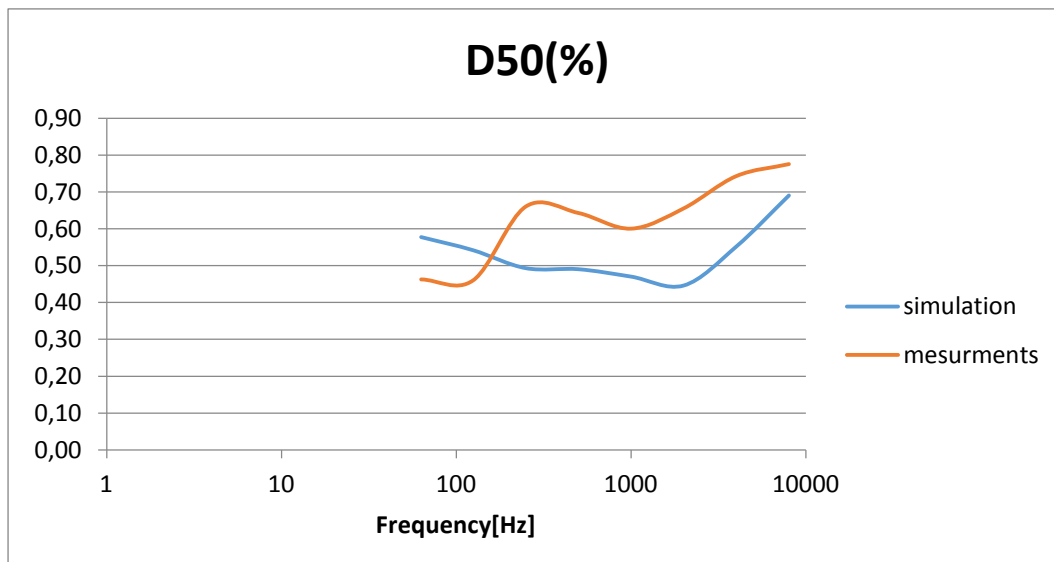
Παρατηρούμε ότι παρ'ότι στις μεσαίες συχνότητες οι τιμές του EDT είναι ελάχιστα υψηλότερες από αυτές του RT, εν γένει τα δύο μεγέθη έχουν τις ίδιες τιμές. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι ο χώρος έχει μεγάλη αντήχηση και είναι πολύ ζωντανός με μεγάλο βάθος. Επίσης η ενέργεια που μεταφέρουν οι πρώτες ανακλάσεις είναι μεγάλη σε σύγκριση με τις επόμενες.

Ο δείκτης SNR προέκυψε μόνο μέσω της διαδικασίας των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά σε όλες τις συχνότητες (>18dB), και δείχνει ότι η ηχητική πηγή υπερκαλύπτει το θόρυβο του χώρου.

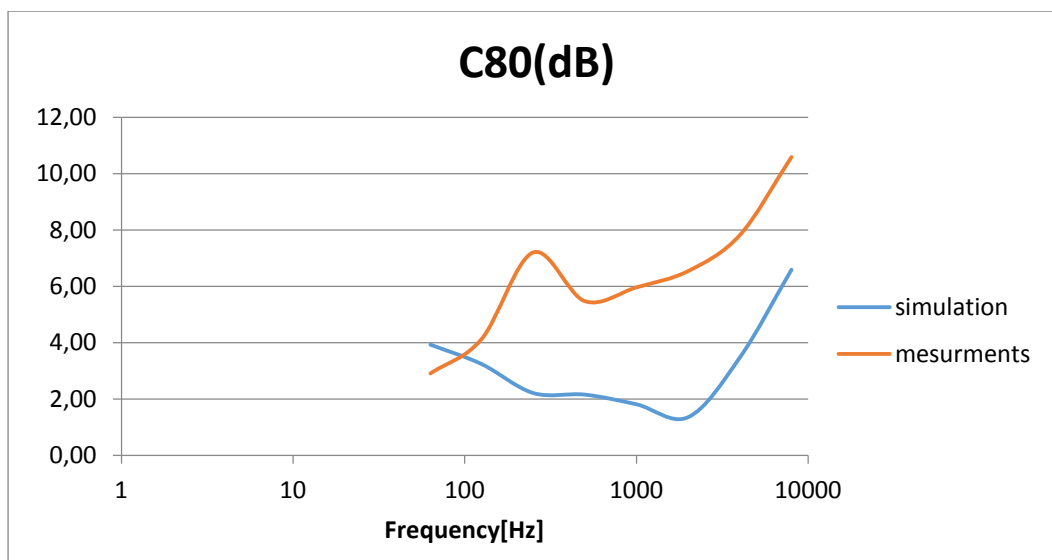
Από τους δείκτες καταληπτότητας συμπεραίνουμε ότι ο χώρος κρίνεται ικανοποιητικά καταληπτός.

Τα αποτελέσματα των μεγεθών καταληπτότητας από την προσομοίωση παρουσιάζουν διαφορές με αυτά από τη διαδικασία των μετρήσεων. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε κάποιο σφάλμα κατά τη μέτρηση, είτε στο γεγονός ότι το μοντέλο προσομοίωσης είναι ιδανικό και κάποιες ατέλειες και ιδιαιτερότητες του χώρου δε μπορούν να προσομοιωθούν απόλυτα. Συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις τα αποτελέσματα του STI κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,65 και 0,79 με μέση τιμή 0,71, παρουσιάζοντας μεγάλη διασπορά. Ενώ από την προσομοίωση η μέση τιμή των αποτελεσμάτων είναι 0,58 και τα αποτελέσματα είναι αρκετά σταθερά γύρω από αυτή την τιμή.

Στα διαγράμματα 7.1.3 και 7.1.4, παρατηρούμε την σύγκριση των μέσων τιμών των αποτελεσμάτων των μεγεθών D50 και C80 αντίστοιχα, μεταξύ των μεθόδων των μετρήσεων και της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.1. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.1. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.

Η προσομοίωση μας δείχνει ότι ο χώρος είναι οριακά κατάλληλος για μουσική καθώς οι τιμές του C80 στις μεσαίες συχνότητες βρίσκεται κάτω από 3dB και ικανοποιητικά καταληπτός όσον αφορά στο λόγο καθώς οι τιμές του μεγέθους D50 βρίσκονται στις μεσαίες συχνότητες οριακά υπό της τιμής 0,5. Το STI μας δείχνει καλή καταληπτότητα του λόγου.

Όσον αφορά στις μετρήσεις συμπεραίνουμε ότι, ο χώρος είναι ακατάλληλος για μουσική με μεγάλες τιμές του C80, ενώ από το D50 βλέπουμε ότι ο λόγος είναι καταληπτός για τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Συνολικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι, στο χώρο ο λόγος είναι καταληπτός και ότι ο ήχος φτάνει ικανοποιητικά στα αφτιά των θεατών. Από την άλλη η μουσική είναι οριακά καταληπτή. Η χρήση λόγου και μουσικής ταυτόχρονα θα είναι ακουστικά δύσκολο για τους θεατές.

Πρέπει να τονιστεί ότι η αίθουσα αυτή, δεν ήταν προορισμένη για θεατρικές παραστάσεις εξ' αρχής και γι αυτό, μερικά προβλήματα είναι αναμενόμενα. Βέβαια, τα προβλήματα αυτά μπορούν να βελτιωθούν είτε αν χρησιμοποιηθούν διάφορα απορροφητικά υλικά που θα μειώσουν το RT και παράλληλα ανακλαστήρες που θα βελτιώσουν την διάδοση του ήχου στον χώρο είτε με την χρήση ηλεκτροακουστικών μέσων. Τα υπάρχοντα υλικά είναι κυρίως ξύλο και τσιμέντο, τα οποία είναι φθαρμένα και δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς η συμπεριφορά τους.

## 2. Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννη.

Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων μας έδειξε ότι τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στο χώρο είναι αρκετά κοντά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη διακύμανση σε σύγκριση με αυτά της προσομοίωσης, καθώς κατά την διάρκεια της διαδικασίας των μετρήσεων υπάρχουν αστάθμητοι παράγοντες που δε μπορούσαμε να ελέγξουμε. Μερικοί από αυτούς είναι η κατεύθυνση και οι ιδιότητες της ηχητικής πηγής και οι ιδιαιτερότητες του χώρου του θεάτρου.

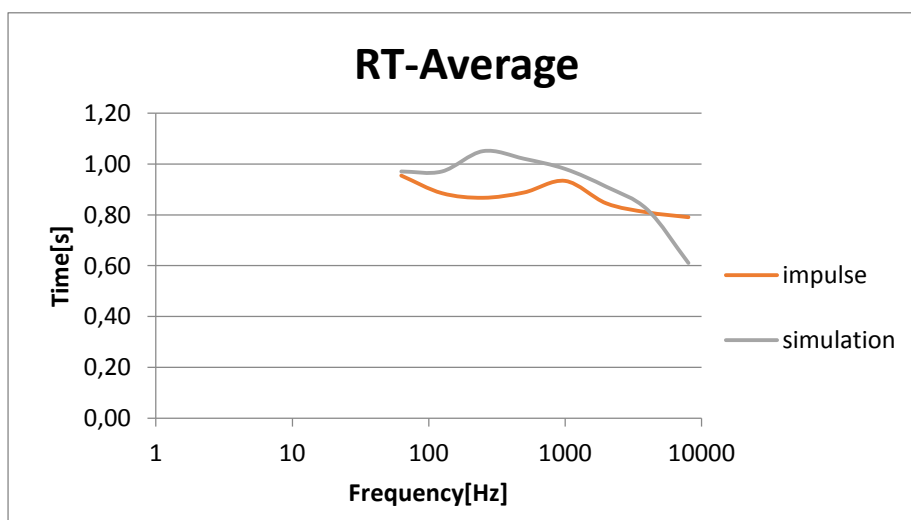
Στην προσομοίωση επιλέξαμε την πηγή μας κατάλληλα ούτως ώστε το SPL, να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τα αποτελέσματα που πήραμε από την φασματική κατανομή του white και pink noise. Για το λόγο αυτό, επιλέξαμε μια πολυκατευθυντική πηγή, τέτοια ώστε το φάσμα την να είναι παρόμοιο με εκείνο του ηχείου του θεάτρου και επιλέξαμε κέρδος 80dB που ήταν και η ένταση της πηγής που χρησιμοποιήσαμε στο θέατρο.

Τα αποτελέσματα του SPL από τη μέθοδο της προσομοίωσης κυμαίνονται από 55dB με 60dB. Ενώ όσο πάμε προς τα πίσω η ένταση πέφτει, για τις θέσεις στα πλάγια παρατηρούμε μια άνοδο λόγω των πλαινών ανακλάσεων.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρούμε μεγαλύτερη διασπορά των τιμών από τα 55dB ως 70dB στη συχνότητα των 8000Hz.

Από το μέγεθος LAeq παρατηρούμε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα από τη μέθοδο των μετρήσεων και από τη μέθοδο της προσομοίωσης, καθώς έχουμε πτώση προς το πίσω μέρος του θεάτρου και μόνο στις θέσεις που βρίσκονται δίπλα σε τοίχο έχουμε μια αύξηση των τιμών.

Στο διάγραμμα 7.2.1 παρακάτω, παρατηρούμε τη σύγκριση της μέσης τιμής του RT μεταξύ των μετρήσεων και της προσομοίωσης.

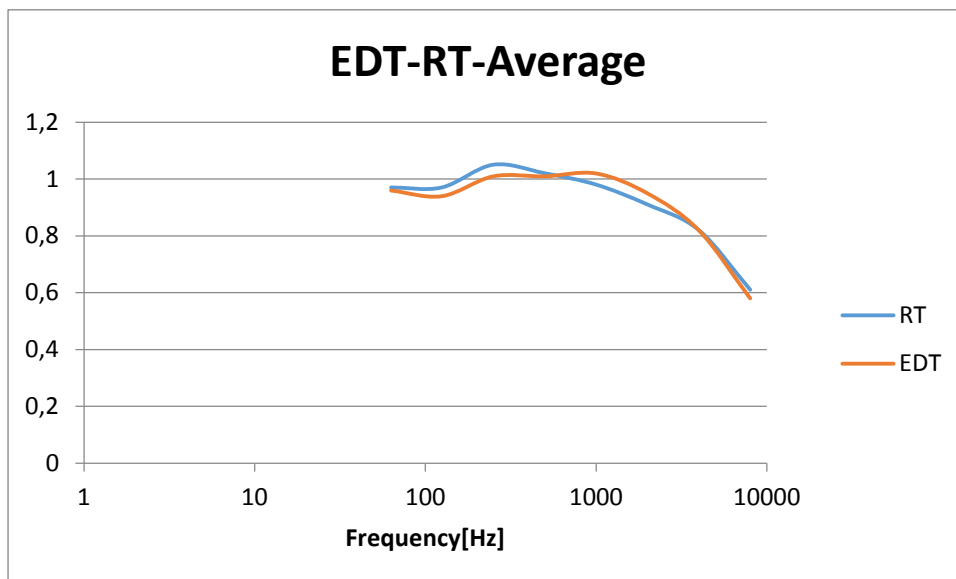


Διάγραμμα 7.2. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά με μέγιστη απόκλιση τα 0,2s στα 250Hz.

Οι τιμές του RT κρίνονται ικανοποιητικές για την χρήση που προορίζεται η αίθουσα αν και λίγο χαμηλές για τον όγκο του θεάτρου.

Επιπλέον υπολογίστηκε το μέγεθος EDT μόνο μέσω της προσομοίωσης. Στο διάγραμμα 7.2.2 παρακάτω φαίνεται η σύγκριση της μέσης τιμής του EDT με αυτή του RT ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 7.2. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα.

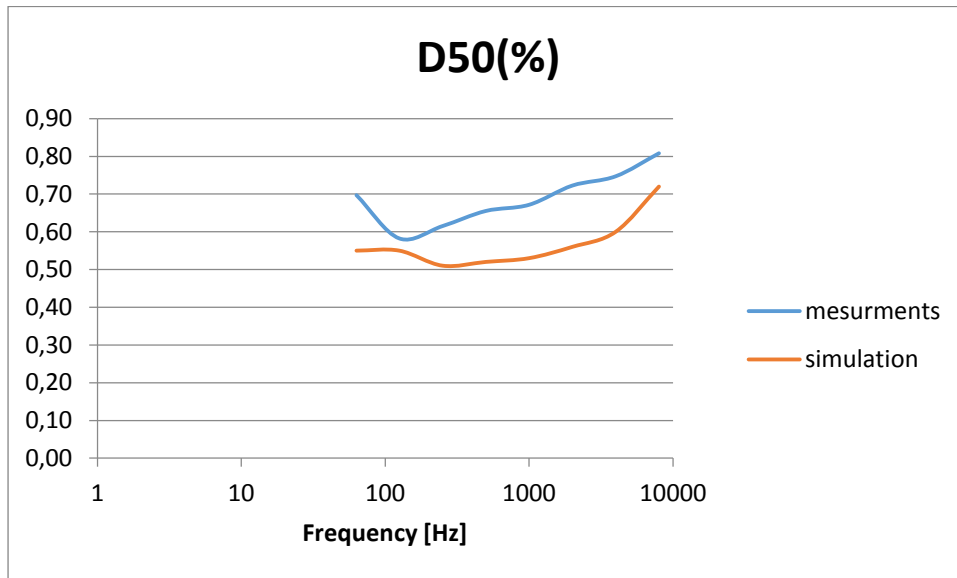
Από το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι οι καμπύλες του EDT και RT είναι παρόμοιες. Αυτό μας δείχνει ότι ο χώρος είναι αρκετά ανακλαστικός στην αρχή ενώ μετά τις πρώτες ανακλάσεις ο χώρος λειτουργεί αρκετά απορροφητικά.

Ο δείκτης SNR προέκυψε μόνο μέσω της διαδικασίας των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά σε όλες τις συχνότητες (>18dB), και δείχνει ότι η ηχητική πηγή υπερκαλύπτει το θόρυβο του χώρου.

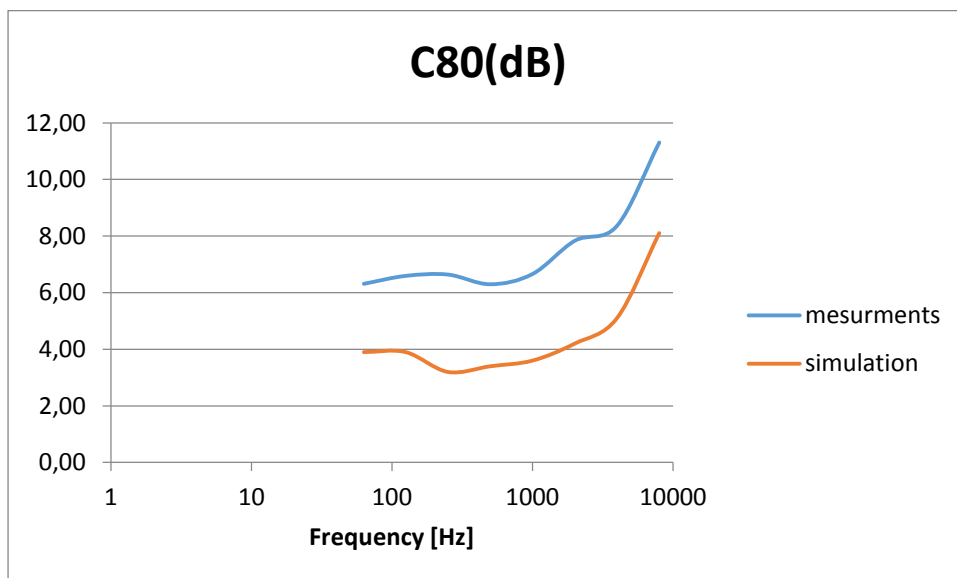
Από τους δείκτες καταληπτότητας συμπεραίνουμε ότι ο χώρος κρίνεται καλός όσον αφορά στην καταληπτότητα.

Τα αποτελέσματα των μεγεθών καταληπτότητας από την προσομοίωση παρουσιάζουν διαφορές με αυτά από τη διαδικασία των μετρήσεων. Αν και τα μεγέθη ακολουθούν την ίδια καμπύλη, έχουμε υψηλότερες τιμές στην καμπύλη των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις τα αποτελέσματα του STI κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,65 και 0,71 με μέση τιμή 0,69, ενώ από την προσομοίωση η μέση τιμή των αποτελεσμάτων είναι 0,6 και τα αποτελέσματα είναι αρκετά σταθερά γύρω από τη μέση τιμή αυτή.

Στα διαγράμματα 7.2.3 και 7.2.4, παρατηρούμε την σύγκριση των μέσων τιμών των αποτελεσμάτων των μεγεθών D50 και C80 αντίστοιχα, μεταξύ των μεθόδων των μετρήσεων και της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.2. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.2. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.

Η προσομοίωση μας δείχνει ότι ο χώρος παρουσιάζει καλή καταληπτά του λόγου. Οι τιμές του μεγέθους D50 σε όλες τις συχνότητες βρίσκονται πάνω από την τιμή 0,5. Αντίστοιχα οι τιμές του C80 στις μεσαίες συχνότητες βρίσκονται αρκετά κοντά στα 3dB.

Από την άλλη οι μετρήσεις μας δείχνουν έναν χώρο με πολύ καλή καταληπτότητα του λόγου, καθώς το D50 είναι αρκετά υψηλότερο του 0,5. Αυτό επιφέρει υψηλό C80, όπως και το βλέπουμε από το διάγραμμα. Αυτό συμβαίνει διότι, ένας καλός χώρος για ομιλία δε μπορεί να είναι ταυτόχρονα κατάλληλος για μουσική.

Συνολικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι, στο χώρο ο λόγος είναι καταληπτός και παράλληλα κατάλληλος για μουσική αν χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα βοηθητικά μέσα (ανακλαστήρες, ηχοσύστημα). Το χαμηλό RT μας δείχνει έναν ψυχρό ακουστικά χώρο γεγονός που προκύπτει και από τα αποτελέσματα των δεικτών καταληπτότητας, στα οποία έχουμε έναν καλό χώρο για ομιλία αλλά όχι τόσο καλό για μουσική. Η ανάγκη για μουσική μπορεί να καλυφθεί είτε με τη χρήση διαχυτικών μέσων είτε με τη χρήση ηλεκτρονικών ηχοσυστημάτων.



### 3. Θέατρο Τέχνης-Υπόγειο.

Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων μας έδειξε ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο χώρο είναι αρκετά κοντά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση σε σύγκριση με αυτά της προσομοίωσης, καθώς κατά την διάρκεια της διαδικασίας των μετρήσεων υπάρχουν αστάθμητοι παράγοντες που δε μπορούσαμε να ελέγξουμε. Μερικοί από αυτούς είναι η κατεύθυνση και οι ιδιότητες της ηχητικής πηγής και οι ιδιαιτερότητες του χώρου του θεάτρου.

Στην προσομοιωσή επιλέξαμε την πηγή μας κατάλληλα, ούτως ώστε το SPL να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τα αποτελέσματα που πήραμε από την φασματική κατανομή του white και pink noise. Επιλέξαμε μια πολυκατευθυντική πηγή, με κέρδος 80dB που ήταν και η ένταση της πηγής που χρησιμοποιήσαμε στο θέατρο.

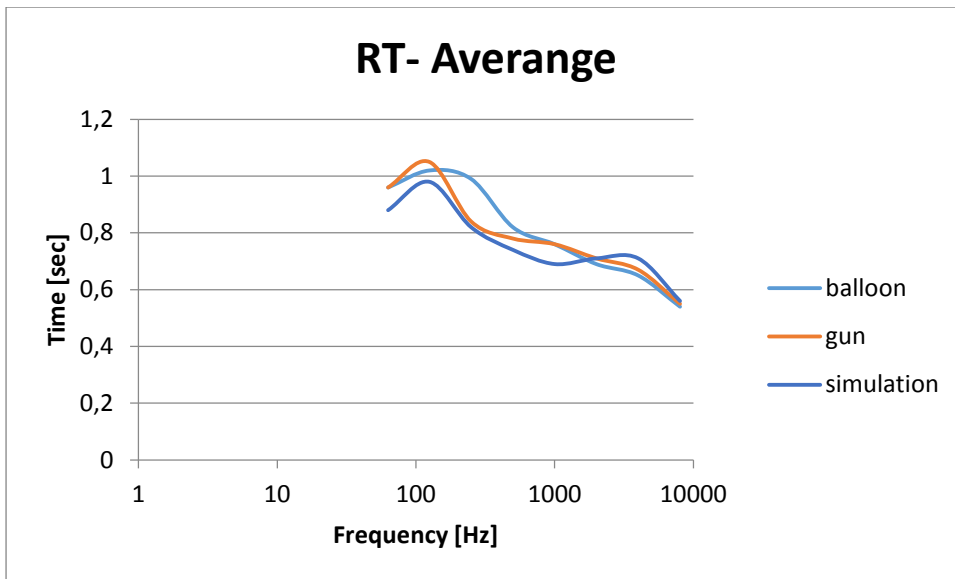
Τα αποτελέσματα του SPL από τη μέθοδο της προσομοίωσης κυμαίνονται από 58dB με 67dB, και όσο πάμε προς τα πίσω η ένταση πέφτει.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρούμε μεγαλύτερη διασπορά των τιμών από τα 38dB στις χαμηλές συχνότητες ως 70dB στις μεσαίες και υψηλές.

Από το μέγεθος LAeq παρατηρούμε περίπου τα ίδια αποτελέσματα από τη μέθοδο των μετρήσεων και από τη μέθοδο της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πτώση του μεγέθους προς τις πίσω θέσεις, με ίδιο ρυθμό πτώσης ανά σειρά και ίδια επίπεδα dB για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11, τα οποία βρίσκονται στις πρώτες σειρές των θεατών

Από την άλλη τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζουν την ίδια πτώση με αυτή των προσομοιώσεων για τις θέσεις 1 ως 8. Από την άλλη η διαφορά των θέσεων, 9 με 10 και 11 με 12, δεν είναι ίδια με την προσομοίωση, ούτε συμβαδίζει με τον ρυθμό πτώσης των υπολοίπων θέσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διαδικασία των μετρήσεων η κατεύθυνση του ηχείου (ημικατευθυντική πηγή) ήταν προς τις θέσεις 1 ως 4. Συνεπώς, οι θέσεις 9 και 10 αν και βρίσκονταν μπροστά από το ηχείο και εντός του απ' ευθείας ηχητικού πεδίου της πηγής, ο ήχος έφτανε κυρίως μέσω των ανακλάσεων. Ιδιαίτερα η θέση 9 επειδή βρίσκεται πίσω από κολώνα υπόκειται στο φαινόμενο της ηχητικής σκίασης, γι' αυτό οι δύο αυτές θέσεις έχουν τα ίδια dB. Από την άλλη οι θέσεις 11 και 12 βρίσκονταν πίσω από την πηγή και συνεπώς ο ήχος έφτανε μόνο μέσω ανακλάσεων. Γι' αυτό το λόγο οι θέσεις αυτές έχουν τις μικρότερες τιμές και διαφορά 5dB. Η μεγαλύτερη τιμή συναντάται στη θέση 12 και όχι στο 11 που βρίσκεται στην πρώτη σειρά. Αυτή η ανωμαλία οφείλεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο γεγονός ότι το σημείο 12 βρίσκεται πιο ψηλά από το σημείο 11. Η θέση 12 βρίσκεται στην τελευταία σειρά, δίπλα σε γωνία και γι' αυτό οι ανακλάσεις είναι εντονότερες. Από την άλλη η θέση 11 βρίσκεται στην πρώτη σειρά, πίσω από το μικρόφωνο με λιγότερες ανακλάσεις να συμβαίνουν γύρω του.

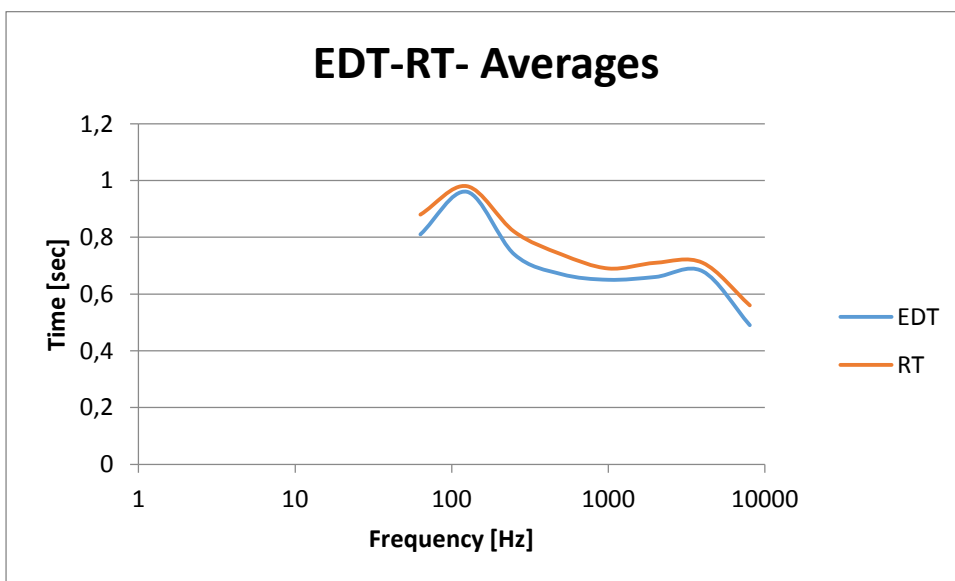
Στο διάγραμμα 7.3.1 παρακάτω, παρατηρούμε τη σύγκριση της μέσης τιμής του RT μεταξύ των μετρήσεων και της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.3. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά. Οι τιμές του RT κρίνονται ικανοποιητικές, για την χρήση που προορίζεται η αίθουσα αν και λίγο υψηλές στις χαμηλές συχνότητες, για τον όγκο του θεάτρου. Αυτό οφείλεται στον θόλο που βρίσκεται πάνω από τον χώρο της σκηνής.

Επιπλέον υπολογίστηκε το μέγεθος EDT μόνο μέσω της προσομοίωσης. Στο διάγραμμα 7.3.2 παρακάτω, φαίνεται η σύγκριση της μέσης τιμής του EDT με αυτή του RT ανά συχνότητα.



Διάγραμμα 7.3. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα.

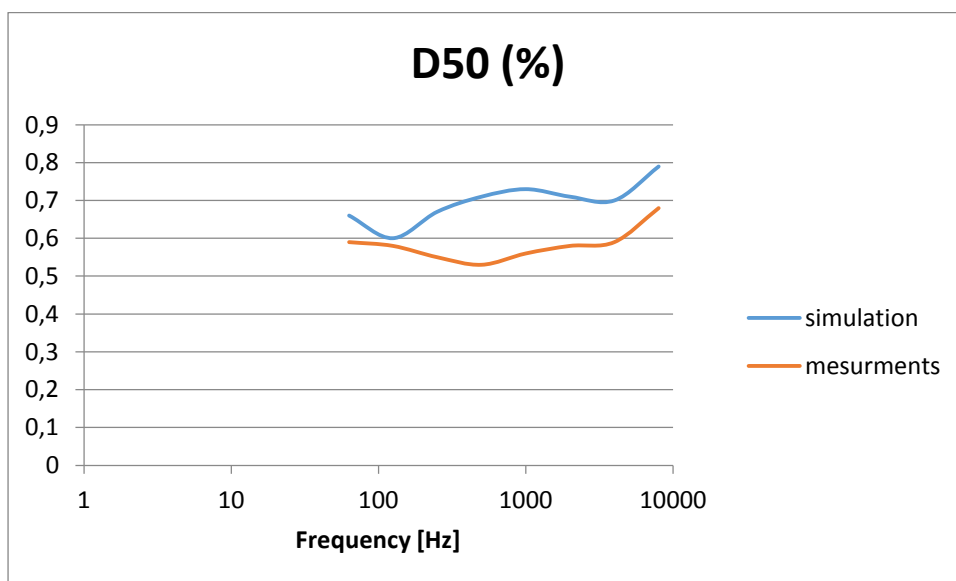
Από το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι οι κμπύλες του EDT και RT είναι παρόμοιες.

Ο δείκτης SNR προέκυψε μόνο μέσω της διαδικασίας των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά σε όλες τις συχνότητες (>18dB), εκτός από την συχνότητα των 63Hz και δείχνει ότι η ηχητική πηγή υπερκαλύπτει το θόρυβο του χώρου.

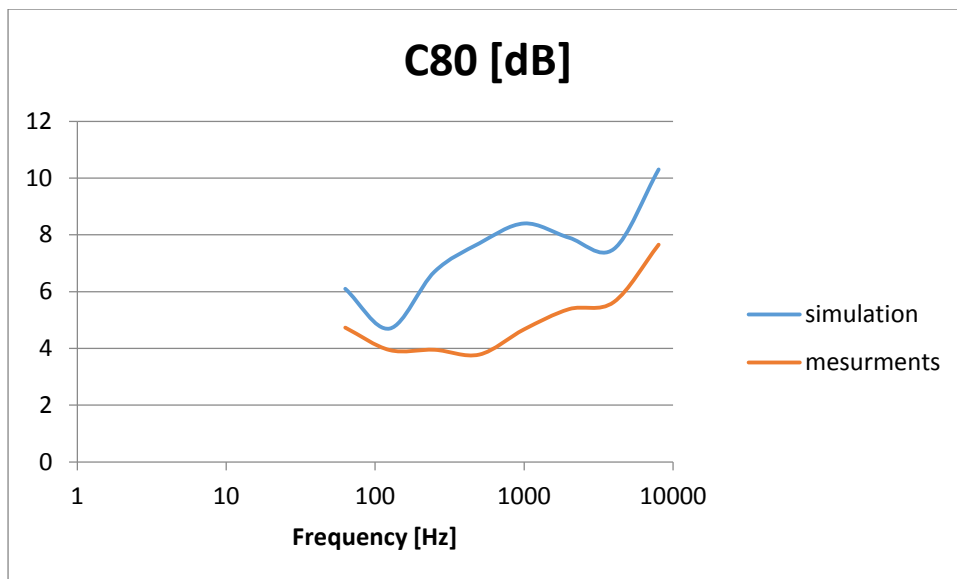
Από τους δείκτες καταληπτότητας συμπεραίνουμε ότι ο χώρος κρίνεται καλός όσον αφορά στην καταληπτότητα. Αν και τα μεγέθη ακολουθούν την ίδια καμπύλη αλλά με υψηλότερες τιμές στην προσομοίωση.

Συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις τα αποτελέσματα του STI κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,62 και 0,67 με μέση τιμή 0,65, ενώ από την προσομοίωση η μέση τιμή των αποτελεσμάτων είναι 0,66 και οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,61 ως 0,72.

Στα διαγράμματα 7.3.3 και 7.3.4, παρατηρούμε την σύγκριση των μέσων τιμών των αποτελεσμάτων των μεγεθών D50 και C80 αντίστοιχα, μεταξύ των μεθόδων των μετρήσεων και της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.3. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7.3. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.

Η προσομοίωση μας δείχνει ότι, ο χώρος παρουσιάζει καλή καταληπτά του λόγου. Οι τιμές του μεγέθους D50 σε όλες τις συχνότητες βρίσκονται αρκετά υψηλότερα από την τιμή 0,5. Αντίθετα, οι τιμές του C80 βρίσκονται αρκετά υψηλότερα από τα 3dB.

Από την άλλη οι μετρήσεις, μας δείχνουν έναν χώρο με πολύ καλή καταληπτότητα του λόγου, καθώς το D50 είναι πάνω από την τιμή 0,5. Αυτό επιφέρει υψηλό C80, όπως το βλέπουμε και από το διάγραμμα.

Συνολικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι, στο χώρο ο λόγος είναι καταληπτός και παράλληλα κατάλληλος για μουσική αν χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα βοηθητικά μέσα (ανακλαστήρες, ηχοσύστημα). Η ανάγκη για μουσική μπορεί να καλυφθεί είτε με τη χρήση διαχυτικών μέσων είτε με τη χρήση ηλεκτρονικών ηχοσυστημάτων.

## Παράρτημα 1

### Κώδικας Matlab

Οι κώδικες matlab βασίστηκαν σε ήδη υπάρχον κώδικες από το mathworks με κάποιες τροποποιήσεις. Οι κώδικες αυτοί αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

Παρακάτω φαίνονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του SPL και του RT.

```
function [B,A] = adsgn(Fs);
% ADSSGN Design of a A-weighting filter.
% [B,A] = ADSSGN(Fs) designs a digital A-weighting filter for
% sampling frequency Fs. Usage: Y = FILTER(B,A,X).
% Warning: Fs should normally be higher than 20 kHz. For example,
% Fs = 48000 yields a class 1-compliant filter.
%
% Requires the Signal Processing Toolbox.
%
% See also ASPEC, CDSGN, CSPEC.
% Author: Christophe Couvreur, Faculte Polytechnique de Mons (Belgium)
% couvreur@thor.fpms.ac.be
% Last modification: Aug. 20, 1997, 10:00am.
% References:
% [1]IEC/CD 1672: Electroacoustics-Sound Level Meters, Nov. 1996.
% Definition of analog A-weighting filter according to IEC/CD 1672.
f1 = 20.598997;
f2 = 107.65265;
f3 = 737.86223;
f4 = 12194.217;
A1000 = 1.9997;
pi = 3.14159265358979;
NUMs = [ (2*pi*f4)^2*(10^(A1000/20)) 0 0 0 0 ];
DENs = conv([1 +4*pi*f4 (2*pi*f4)^2],[1 +4*pi*f1 (2*pi*f1)^2]);
DENs = conv(conv(DENs,[1 2*pi*f3]),[1 2*pi*f2]);
% Use the bilinear transformation to get the digital filter.
[B,A] = bilinear(NUMs,DENs,Fs);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [X,Leq,L10,L95,s] = levelAEstimation(x,Fs,Int,C)
% levelEstimation Estimates a recorded signal level.
% Author: George Cambourakis, 11/11/07
% if omitted C=160 dB, Int=500 mS, Fs=44100 samples/sec
%
if nargin < 4, C=115;end
if nargin < 3, Int=500;end
if nargin < 2, Fs=44100;end
tin=Int*Fs/1000; % Integration time tin mS
if Fs==44100
    B=[0.2563 -0.5126 -0.2563 1.0252 -0.2563 -0.5126 0.2563];
    A=[1.0000 -4.0172 6.1803 -4.4398 1.4119 -0.1393 0.0042];
else
    [B,A]=adsgn1(Fs);
end
len=length(x);
% Squaring the original signal
s=x.*x+1e-17;
% Time integration tin mS46
X=filter(1/tin,[1 (1-tin)/tin],s);
% Converting to dB
```

```

X=10*log10(X)+C;
s=std(X);
% Plot estimated signal level.
figure(1); clf;
plot(X,'LineWidth',2);
title('Signal Level');
xlabel('Elapsed Time (sec.)');
ylabel('Signal Level (dB)');
xlim([1 len]);
grid on;
% Statistics
% Cumulative
p=[];
for i=20:0.5:110
    p=[p;sum(X > i)];
end
L10=20+(181-sum(p<len/10))/2;
L95=20+(181-sum(p<len*0.95))/2;
dp=[];lp=length(p);
% Percentiles
for i=1:180
    dp=[dp;p(i)-p(i+1)];
end
dp=[dp;p(181)];
114
ax=20:0.5:110;mx=max(dp);
Leq=10*log10(sum(x.*x)/len)+C
% plot statistics
l10=ones(lp,1)*sum(dp)/10;
figure(2); clf;
plot(ax,p,ax,l10,ax,l10*9.5,'LineWidth',2);
text(ax(2),l10(2)*1.4,'L10');
text(ax(2),l10(2)*9.8,'L95');
title('Cumulative distribution of Levels');
xlabel('Signal levels dB');
ylabel('population of levels (samples)');
xlim([20 110]);
grid on;
figure(3); clf;
plot(ax,dp,'r','LineWidth',2);
line(ones(mx,1)*Leq,1:mx);
text(Leq+1,mx/20,'Leq');
title('Percentiles of levels');
xlabel('Signal levels dB');
ylabel('population of levels (samples)');
xlim([20 110]);
grid on;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

### Τροποποιήθηκαν ως εξής:

```

function [X,Leq,ln] = asdasd(x,Fs)
C=126.2; Int=500;
tin=Int*Fs/1000; % Integration time
tin mS
[B,A]=adsgn(Fs);
len=length(x);47
% Squaring the original signal
s=x.*x+1e-17;
% Time integration tin mS

```

```

X=filter(1/tin,[1 (1-tin)/tin],s);
% Converting to dBA
X=10*log10(X)+C;
% Statistics
% Cumulative
a=floor(min(X)); b=ceil(max(X))+1; c=(b-a)*2+1;
p=[];
for i=a:0.5:b
    p=[p;sum(X > i)];
end
L1=a+(c-sum(p<len*0.005))/2;
L99=a+(c-sum(p<len*0.995))/2;
dp=[];lp=length(p);
ind=find((X<L1)&(X>L99));
X=X(ind);
x=x(ind);
ln=length(X);
Leq=10*log10(sum(x.*x)/len)+C;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[x,Fs,nBits]=audioread(filename);
C=126.2; Int=500;
tin=Int*Fs/1000; % Integration time tin mS
[B,A]=adsgn(Fs);
len=length(x);
x=filter(B,A,x); % Apply A weighting
% Squaring the original signal
s=x.*x+1e-17;
% Time integration in mS
X=filter(1/tin,[1 (1-tin)/tin],s);
% Converting to dBA
X=10*log10(X)+C;
clear A; clear B; clear s; clear tin; clear C; clear Int;
% extracting extreme values
a=floor(min(X)); b=ceil(max(X))+1; c=(b-a)*2+1;
p=[];
for i=a:0.5:b
    p=[p;sum(X > i)];
end
L01=a+(c-sum(p<len/100))/2;
L99=a+(c-sum(p<len*0.99))/2;
ind=find((X<L01)&(X>L99));
clear a; clear b; clear c; clear p; clear X; clear i;
x=x(ind)
clear ind;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dividing the signal for memory reasons
m = length(x);
z=floor(m/10);48
x1=x(1:z); x2=x((z+1):2*z); x3=x((2*z+1):3*z); x4=x((3*z+1):4*z);
x5=x((4*z+1):5*z);
x6=x((5*z+1):6*z); x7=x((6*z+1):7*z); x8=x((7*z+1):8*z); x9=x((8*z+1):9*z);
x10=x((9*z+1):m);
[X1,Leq1,len1] = asdasd(x1,Fs);
[X2,Leq2,len2] = asdasd(x2,Fs);
[X3,Leq3,len3] = asdasd(x3,Fs);
[X4,Leq4,len4] = asdasd(x4,Fs);
[X5,Leq5,len5] = asdasd(x5,Fs);
[X6,Leq6,len6] = asdasd(x6,Fs);
[X7,Leq7,len7] = asdasd(x7,Fs);
[X8,Leq8,len8] = asdasd(x8,Fs);

```



```

[X9,Leq9,len9] = asdasd(x9,Fs);
[X10,Leq10,len10] = asdasd(x10,Fs);
d=len1+len2+len3+len4+len5+len6+len7+len8+len9+len10;
max_t=(d-1)/Fs;
% calculating the Leq and converting it for a 10min equivalent
Leq=10*log10((10^(Leq1/10)+10^(Leq2/10)+10^(Leq3/10)+10^(Leq4/10)+10^(Leq5/10)+10^(Leq6/10)+10^(Leq7/10)+10^(Leq8/10)+10^(Leq9/10)+10^(Leq10/10))/10);
Leq10min=Leq+10*log10(10/(max_t/60));
clear x; clear x1; clear x2; clear x3; clear x4; clear x5; clear x6; clear x7; clear x8; clear x9; clear x10; clear max_t; clear Leq; clear m; clear z; clear d;
ln=[len1 len2 len3 len4 len5 len6 len7 len8 len9 len10];
p=[]; p(1)=ln(1);
for i=2:10
    p(i)=p(i-1)+ln(i);
end
clear ln; clear len1; clear len2; clear len3; clear len4; clear len5; clear len6; clear len7; clear len8; clear len9; clear len10; clear i; clear Leq1; clear Leq2; clear Leq3; clear Leq4; clear Leq5; clear Leq6; clear Leq7; clear Leq8; clear Leq9; clear Leq10;
% assembling the logarithmically converted signal
X(1:p(1))=X1; clear X1; X((p(1)+1):p(2))=X2; clear X2; X((p(2)+1):p(3))=X3; clear X3;
X((p(3)+1):p(4))=X4; clear X4; X((p(4)+1):p(5))=X5; clear X5;
X((p(5)+1):p(6))=X6; clear X6; X((p(6)+1):p(7))=X7; clear X7;
X((p(7)+1):p(8))=X8; clear X8; X((p(8)+1):p(9))=X9; clear X9;
X((p(9)+1):p(10))=X10; clear X10;
len=length(X);
% Statistics
% Cumulative
a=floor(min(X)); b=ceil(max(X))+1; c=(b-a)*2+1;
p=[];
for i=a:0.5:b
    p=[p;sum(X > i)];
end
len=length(X);
% percentile levels
L05=a+(c-sum(p<len*0.05))/2;
L10=a+(c-sum(p<len*0.10))/2;
L50=a+(c-sum(p<len*0.50))/2;
L90=a+(c-sum(p<len*0.90))/2;
L95=a+(c-sum(p<len*0.95))/2;
Ln=[L01 L05 L10 L50 L90 L95 L99];
clear a; clear b; clear c; clear p; clear X; clear i; clear len; clear Fs;

```

**Για τη φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικά τα αρχεία:**

```

function [B,A] = oct3dsgn(Fc,Fs,N);
% OCT3DSGN Design of a one-third-octave filter.
% [B,A] = OCT3DSGN(Fc,Fs,N) designs a digital 1/3-octave filter with
% center frequency Fc for sampling frequency Fs.
% The filter is designed according to the Order-N specification
% of the ANSI S1.1-1986 standard. Default value for N is 3.
% Warning: for meaningful design results, center frequency used
% should preferably be in range Fs/200 < Fc < Fs/5.
% Usage of the filter: Y = FILTER(B,A,X).
%
% Requires the Signal Processing Toolbox.
%
% See also OCT3SPEC, OCTDSGN, OCTSPEC.
% Author: Christophe Couvreur, Faculte Polytechnique de Mons (Belgium)
% couvreur@thor.fpms.ac.be

```

```

% Last modification: Aug. 25, 1997, 2:00pm.
% References:
% [1]ANSI S1.1-1986 (ASA 65-1986): Specifications for
% Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and
% Digital Filters, 1993.
if (nargin > 3) | (nargin < 2)
    error('Invalid number of arguments.');
```

```

end
if (nargin == 2)
    N = 3;
end
if (Fc > 0.88*(Fs/2))
    error('Design not possible. Check frequencies.');
```

```

end
% Design Butterworth 2Nth-order one-third-octave filter
% Note: BUTTER is based on a bilinear transformation, as suggested in [1].
pi = 3.14159265358979;
f1 = Fc/(2^(1/6));
f2 = Fc*(2^(1/6));
Qr = Fc/(f2-f1);
Qd = (pi/2/N)/(sin(pi/2/N))*Qr;
alpha = (1 + sqrt(1+4*Qd^2))/2/Qd;
W1 = Fc/(Fs/2)/alpha;
W2 = Fc/(Fs/2)*alpha;
[B,A] = butter(N,[W1,W2]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [p,f] = oct3bank(x);
% OCT3BANK Simple one-third-octave filter bank.
% OCT3BANK(X) plots one-third-octave power spectra of signal vector X.
% Implementation based on ANSI S1.11-1986 Order-3 filters.
% Sampling frequency Fs = 44100 Hz. Restricted one-third-octave-band
% range (from 100 Hz to 5000 Hz). RMS power is computed in each band
% and expressed in dB with 1 as reference level.
%
% [P,F] = OCT3BANK(X) returns two length-18 row-vectors with
% the RMS power (in dB) in P and the corresponding preferred labeling
% frequencies (ANSI S1.6-1984) in F.
%
% See also OCT3DSGN, OCT3SPEC, OCTDSGN, OCTSPEC.
% Author: Christophe Couvreur, Faculte Polytechnique de Mons (Belgium)
% couvreur@thor.fpms.ac.be
% Last modification: Aug. 23, 1997, 10:30pm.
% References:
% [1] ANSI S1.1-1986 (ASA 65-1986): Specifications for
% Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and
% Digital Filters, 1993.
% [2] S. J. Orfanidis, Introduction to Signal Processing,
% Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.
pi = 3.14159265358979;
Fs = 44100; % Sampling Frequency
N = 3; % Order of analysis filters.
F = [ 100 125 160, 200 250 315, 400 500 630, 800 1000 1250, ...
    1600 2000 2500, 3150 4000 5000 ]; % Preferred labeling freq.
ff = (1000).*((2^(1/3)).^[-10:7]); % Exact center freq.
P = zeros(1,18);
m = length(x);
% Design filters and compute RMS powers in 1/3-oct. bands
% 5000 Hz band to 1600 Hz band, direct implementation of filters.
for i = 18:-1:13
    [B,A] = oct3dsgn(ff(i),Fs,N);

```

```

y = filter(B,A,x);
P(i) = sum(y.^2)/m;
end
% 1250 Hz to 100 Hz, multirate filter implementation (see [2]).
[Bu,Au] = oct3dsgn(ff(15),Fs,N); % Upper 1/3-oct. band in last octave.
[Bc,Ac] = oct3dsgn(ff(14),Fs,N); % Center 1/3-oct. band in last octave.
Bl,Al] = oct3dsgn(ff(13),Fs,N); % Lower 1/3-oct. band in last octave.
for j = 3:-1:0
    x = decimate(x,2);
    m = length(x);
    y = filter(Bu,Au,x);
    P(j*3+3) = sum(y.^2)/m;
    y = filter(Bc,Ac,x);
    P(j*3+2) = sum(y.^2)/m;
    y = filter(Bl,Al,x); 51
    P(j*3+1) = sum(y.^2)/m;
end
% Convert to decibels.
Pref = 1; % Reference level for dB scale.
idx = (P>0);
P(idx) = 10*log10(P(idx)/Pref);
P(~idx) = NaN*ones(sum(~idx),1);
% Generate the plot
if (nargout == 0)
    bar(P);
    ax = axis;
    axis([0 19 ax(3) ax(4)])
    set(gca,'XTick',[2:3:18]); % Label frequency axis on octaves.
    set(gca,'XTickLabels',F(2:3:length(F))); % MATLAB 4.1c
    % set(gca,'XTickLabel',F(2:3:length(F))); % MATLAB 5.1
    xlabel('Frequency band [Hz]'); ylabel('Power [dB]');
    title('One-third-octave spectrum')
    % Set up output parameters
elseif (nargout == 1)
    p = P;
elseif (nargout == 2)
    p = P;
    f = F;
End

```

**τα παραπάνω αρχεία τροποποιήθηκαν ως εξής:**

```

function [p,f] = oct3bankMINE(x);
pi = 3.14159265358979;
Fs=44100;
N = 3; % Order of analysis filters.
F = [ 100 125 160, 200 250 315, 400 500 630, 800 1000 1250, ...
    1600 2000 2500, 3150 4000 5000, 6300 8000 10000 ]; % Preferred labeling
freq.
ff = (1000).*((2^(1/3)).^[-10:13]); % Exact center freq.
P = zeros(1,21);
m = length(x);
% Design filters and compute RMS powers in 1/3-oct. bands
% 20000 Hz band to 1600 Hz band, direct implementation of filters.
for i = 21:-1:13
    [B,A] = oct3dsgn(ff(i),Fs,N);
    y = filter(B,A,x);
    P(i) = sum(y.^2)/m;
end
% 1250 Hz to 100 Hz, multirate filter implementation
[Bu,Au] = oct3dsgn(ff(15),Fs,N); % Upper 1/3-oct. band in last octave.
[Bc,Ac] = oct3dsgn(ff(14),Fs,N); % Center 1/3-oct. band in last octave.

```

```

[B1,A1] = oct3dsgn(ff(13),Fs,N); % Lower 1/3-oct. band in last octave.
for j = 3:-1:0
    x = decimate(x,2);
    m = length(x);
    y = filter(Bu,Au,x);
    P(j*3+3) = sum(y.^2)/m;
    y = filter(Bc,Ac,x);
    P(j*3+2) = sum(y.^2)/m;
    y = filter(B1,A1,x);
    P(j*3+1) = sum(y.^2)/m;
end
% Convert to decibels.
idx = (P>0);
P(idx) = 10*log10(P(idx))+126;
P(~idx) = NaN*ones(sum(~idx),1);
p=P;
f=F;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[x,Fs,nBits]=audioread(filename);
F = [ 100 125 160, 200 250 315, 400 500 630, 800 1000 1250, ...
    1600 2000 2500, 3150 4000 5000, 6300 8000 10000 ]; % Preferred labeling
freq.
m = length(x);
z=floor(m/10);
x1=x(1:z); x2=x((z+1):2*z); x3=x((2*z+1):3*z); x4=x((3*z+1):4*z);
x5=x((4*z+1):5*z);
x6=x((5*z+1):6*z); x7=x((6*z+1):7*z); x8=x((7*z+1):8*z); x9=x((8*z+1):9*z);
x10=x((9*z+1):m);
[p1,f] = oct3bankMINE(x1);
[p2,f] = oct3bankMINE(x2);
[p3,f] = oct3bankMINE(x3);
[p4,f] = oct3bankMINE(x4);
[p5,f] = oct3bankMINE(x5);
[p6,f] = oct3bankMINE(x6);
[p7,f] = oct3bankMINE(x7);
[p8,f] = oct3bankMINE(x8);
[p9,f] = oct3bankMINE(x9);
[p10,f] = oct3bankMINE(x10);
for i=1:21
p(i)=(p1(i)+p2(i)+p3(i)+p4(i)+p5(i)+p6(i)+p7(i)+p8(i)+p9(i)+p10(i))/10;
end
bar(p);
ax = axis;
axis([0 22 ax(3) ax(4)])
set(gca,'XTick',[2:3:24]); % Label frequency axis on octaves.
set(gca,'XTickLabels',F(2:3:length(F))); % MATLAB 4.1c
% set(gca,'XTickLabel',F(2:3:length(F))); % MATLAB 5.1
xlabel('Frequency band [Hz]'); ylabel('Power [dB]');
title('One-third-octave spectrum')

```

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1. 1: Διεθνή Πρότυπα φίλτρων A,B,C— καμπύλες ηχομέτρων σε τριοκταβική ανάλυση. ....	12
Σχήμα 2. 1: Διάδοση του ήχου από σημειακή πηγή.....	17
Σχήμα 2. 2: Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους: 1) απ' ευθείας ήχος 2) ηχοανάκλαση 3) ηχοαπορρόφηση 4) ηχοδιάχυση 5) ηχοπερίθλαση 6) ηχοδιάδοση-διάθλαση 7) διασπορά του ήχου μέσα στη κατασκευή 8) ηχοδιάδοση μέσα στη κατασκευή. ....	18
Σχήμα 2. 3: Απ' ευθείας ήχος.....	19
Σχήμα 2. 4: Ανάκλαση ήχου (α) πρώτες ανακλάσεις ως προς ένα σημείο (b) αντήχηση ως προς ένα σημείο	19
Σχήμα 2. 5: Απ' ευθείας ήχος (κόκκινο), οι πρώτες ανακλάσεις (πράσινο) και οι καθυστερημένες ανακλάσεις (μπλε) ως προς το χρόνο. ....	20
Σχήμα 2. 6: Ανακλώμενος- Περιθλώμενος ήχος καθώς προσπίπτει σε τοίχο.....	21
Σχήμα 2. 7: Αξονικός τρόπος διάδοσης.....	23
Σχήμα 2. 8: Εφαπτομενικός τρόπος διάδοσης.....	23
Σχήμα 2. 9: Πλάγιοι τρόποι διάδοσης.....	23
Σχήμα 2. 10: Αλληλεπίδραση ακουστικού κύματος με μια επιφάνεια.....	24
Σχήμα 2. 11: Χρονική εξέλιξη του πλάτους του αντηχητικού ήχου σε ένα δωμάτιο.....	27
Σχήμα 2. 12: Μέση αντηχητική ένταση σε dB σε σχέση με την απόσταση.....	28
Σχήμα 2. 13: Ακουστική περιοχή μεταξύ ησυχίας και ακουστικού πόνου.....	29
Σχήμα 2. 14: Σχηματικό διάγραμμα των τριών περιοχών του ανθρώπινου αυτιού.....	29
Σχήμα 2. 15: Προτεινόμενος χρόνος αντήχησης RT σε σχέση με τον όγκο του χώρου για συχνότητα από 500Hz-1000Hz.....	32
Σχήμα 2. 16: Αποδεκτές τιμές συχνότητας – χρόνου αντήχησης σε σχέση με τον προτεινόμενο χρόνο αντήχησης για Α)Ομιλία και Β) Μουσική.....	32
Σχήμα 5. 1: Συχνοτική απόκριση και φασματική απόκριση του μικροφώνου BehringerECM8000.....	60

## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1. 1: Σταθμη έντασης χαρακτηριστικών ήχων.....	7
Πίνακας 1. 2: Τυπικές εντάσεις ήχου.....	8
Πίνακας 1. 3: Διορθώσεις κατά φίλτρο-A (dBA).....	12
Πίνακας 1. 4: Παράδειγμα μέτρησης κατά φίλτρο –A.....	13
Πίνακας 1. 5: Σύγκριση τιμών Θορύβου Περιβάλλοντος μεταξύ φίλτρου A και καμπυλών κατάταξης θορύβου.....	14
Πίνακας 1. 6: Προτεινόμενα συχνοτικά εύρη (Hz).....	16
Πίνακας 2. 1: Ενδεικνυόμενες τιμές συντελεστή ακουστικής απορρόφησης α διαφόρων υλικών. ....	26
Πίνακας 2. 2: Αποδεκτές τιμές χρόνου αντήχησης ανάλογα τη χρήση της αίθουσας. ....	33
Πίνακας 2. 3: Αντιληπτότητα ομιλίας σύμφωνα με τον Δείκτη SNR, σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 9921-1.....	34
Πίνακας 2. 4: Δείκτης (RA)STI.....	35
Πίνακας 2. 5: Δείκτης Alcons.....	36
Πίνακας 4. 1: Όγκος θέσεων ακροατηρίου σε σχέση με την χρήση της αίθουσας. ....	53

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1. 1: Προτεινόμενα επίπεδα Θορύβου Περιβάλλοντος για διαφορετικούς χώρους σε κτήρια .....	2
Εικόνα 1. 2: Φασματικές κατανομές Ροζ Θορύβου (αριστερά) – Λευκού θορύβου (δεξιά) .....	5
Εικόνα 1. 3: Ακουστικά πεδία σε ένα χώρο. ....	10
Εικόνα 3. 1: Τα μέρη του Αρχαίου Θεάτρου .....	40
Εικόνα 3. 2: Αναπαράσταση του μουσικού διαγράμματος του Αριστόξενου για την θέση των αντηχούντων αγγείων με βάση την περιγραφή του Βιτρούβιου.....	42
Εικόνα 3. 3: Κάτοψη και πλάγια όψη Ρωμαϊκού Θεάτρου .....	43
Εικόνα 3. 4: Αντήχηση του ήχου από τον ηθοποιό στα Ελληνικά θέατρα(αριστερά) σε σχέση με τα Ρωμαϊκά (δεξιά) .....	44
Εικόνα 4. 1: Ακουστικά αρχιτεκτονικά λάθη σε μια αίθουσα. ....	50
Εικόνα 4. 2: Φαινόμενο Haas (προβαδίσματος) στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα.....	51
Εικόνα 4. 3: Σχεδιασμός τοίχων προσκηνίου. ....	52
Εικόνα 4. 4: Σχέδιο Μπαλκονιού με ανυψωτική κλίση στο μπροστινό μέρος.....	55
Εικόνα 4. 5: Σχέδιο “ιπτάμενου” εξώστη.....	55
Εικόνα 6.1 1: Θέσεις μικροφώνων και ηχείου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στο θέατρο Βαφείο. ....	62
Εικόνα 6.1 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ΟΔΕΟΝ του θεάτρου Βαφείου.....	72
Εικόνα 6.1 3: 3D απεικόνιση των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ΟΔΕΟΝ του θεάτρου Βαφείου. ....	73
Εικόνα 6.1 4: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του θεάτρου Βαφείου με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών. ....	73
Εικόνα 6.1 5: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του θεάτρου Βαφείου με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών. ....	74
Εικόνα 6.1 6: 3D Billard εργαλείο. ....	75
Εικόνα 6.1 7: Θόρυβος βάθους για STI. ....	76
Εικόνα 6.1 8: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση αποτελεσμάτων. ....	76
Εικόνα 6.2 1: Κάτοψη θέσεων μικροφώνων και ηχείου στο Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης κατά τις μετρήσεις. ....	97
Εικόνα 6.2 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ΟΔΕΟΝ του Ιδρύματος Κακογιάννη.....	114
Εικόνα 6.2 3: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του Ιδρύματος Κακογιάννη με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών .....	115
Εικόνα 6.2 4: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του Ιδρύματος Κακογιάννη με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών .....	115
Εικόνα 6.2 5: 3D Billard.....	116
Εικόνα 6.2 6: Θόρυβος Βάθους για STI. ....	117
Εικόνα 6.2 7: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση.....	117

Εικόνα 6.3. 1: Κάτοψη των θέσεων μικροφώνων και του ηχείου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων στο θέατρο Τέχνης-Υπόγειο. ....	138
Εικόνα 6.3. 2: Κάτοψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	160
Εικόνα 6.3. 3: Πλάγια όψη των θέσεων των μικροφώνων και της ηχητικής πηγής κατά την προσομοίωση στο ODEON του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	160
Εικόνα 6.3. 4: 3D απεικόνιση του χώρου της σκηνής του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών .....	161
Εικόνα 6.3. 5: 3D απεικόνιση του χώρου των θεατών του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο με απεικόνιση των διαφορετικών απορροφητικών υλικών .....	162
Εικόνα 6.3. 6: 3D Billard.....	163
Εικόνα 6.3. 7: Θόρυβος Βάθους για STI. ....	164
Εικόνα 6.3. 8: Ρύθμιση παραμέτρων για μέγιστη ανάλυση. ....	164

## Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6.1 1: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.....	63
Διάγραμμα 6.1 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	64
Διάγραμμα 6.1 3: Μέγεθος LAeq (dB) ανά σημείο για ροζ θόρυβο στο θέατρο Βαφείο.....	64
Διάγραμμα 6.1 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	65
Διάγραμμα 6.1 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	65
Διάγραμμα 6.1 6: Μέγεθος LAeq (dB) ανά σημείο για λευκό θόρυβο στο θέατρο Βαφείο.....	66
Διάγραμμα 6.1 7: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου.....	67
Διάγραμμα 6.1 8: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	67
Διάγραμμα 6.1 9: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	68
Διάγραμμα 6.1 10: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	68
Διάγραμμα 6.1 11: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	69
Διάγραμμα 6.1 12: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος ALcons(%) [female-male] για τις θέσεις 1,2,3 και 4 του θεάτρου Βαφείου. ....	70
Διάγραμμα 6.1 13: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο για το θέατρο Βαφείο.....	70
Διάγραμμα 6.1 14: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80[dB] ανά σημείο για το θέατρο Βαφείο. ....	71
Διάγραμμα 6.1 15: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, μέσω του global estimate .....	77
Διάγραμμα 6.1 16: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ανά θέση (multi-point estimation). ....	78
Διάγραμμα 6.1 17: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	78
Διάγραμμα 6.1 18: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα. ....	79
Διάγραμμα 6.1 19: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz.....	79
Διάγραμμα 6.1 20: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	80
Διάγραμμα 6.1 21: Επι τοις εκατό στατιστική κατανομή του χρόνου αντήχησης στο χώρο ανά συχνότητα. ....	80
Διάγραμμα 6.1 22: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation). ....	81



Διάγραμμα 6.1 23: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. .	82
Διάγραμμα 6.1 24: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα.....	82
Διάγραμμα 6.1 25: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	83
Διάγραμμα 6.1 26: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	83
Διάγραμμα 6.1 27: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα. ....	84
Διάγραμμα 6.1 28: Τιμές του LAeq ανά θέση.....	85
Διάγραμμα 6.1 29: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή.....	85
Διάγραμμα 6.1 30: : Grid ανάλυση του LAeq. ....	86
Διάγραμμα 6.1 31: Τιμές του STI ανά θέση.....	86
Διάγραμμα 6.1 32: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή. ....	87
Διάγραμμα 6.1 33: Grid ανάλυση του STI. ....	87
Διάγραμμα 6.1 34: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation). ....	88
Διάγραμμα 6.1 35: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα. ....	88
Διάγραμμα 6.1 36: Εκτίμηση του D50 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	89
Διάγραμμα 6.1 37: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	89
Διάγραμμα 6.1 38: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz .....	90
Διάγραμμα 6.1 39: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	90
Διάγραμμα 6.1 40: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation). ....	91
Διάγραμμα 6.1 41: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα. ....	91
Διάγραμμα 6.1 42: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	92
Διάγραμμα 6.1 43: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	92
Διάγραμμα 6.1 44: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	93
Διάγραμμα 6.1 45: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	93
Διάγραμμα 6.1 46: Εκτίμηση του EDT ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).....	94
Διάγραμμα 6.1 47: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα. ....	94
Διάγραμμα 6.1 48: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	95
Διάγραμμα 6.1 49: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	95
Διάγραμμα 6.1 50: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	96
Διάγραμμα 6.1 51: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα. ....	96
Διάγραμμα 6.2. 1 : Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	98
Διάγραμμα 6.2. 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	99
Διάγραμμα 6.2. 3: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για ροζ θόρυβο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	99
Διάγραμμα 6.2. 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	100
Διάγραμμα 6.2. 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	100
Διάγραμμα 6.2. 6: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για λευκό θόρυβο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	101
Διάγραμμα 6.2. 7: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	102
Διάγραμμα 6.2. 8: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	102
Διάγραμμα 6.2. 9: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	103
Διάγραμμα 6.2. 10: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	103
Διάγραμμα 6.2. 11: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	104

Διάγραμμα 6.2. 12: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	104
Διάγραμμα 6.2. 13: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	105
Διάγραμμα 6.2. 14: Διάγραμμα Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	105
Διάγραμμα 6.2. 15: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	106
Διάγραμμα 6.2. 16: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 6 και 9 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	107
Διάγραμμα 6.2. 17: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	108
Διάγραμμα 6.2. 18: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	108
Διάγραμμα 6.2. 19: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	109
Διάγραμμα 6.2. 20: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 6, 7 και 8 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	109
Διάγραμμα 6.2. 21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	110
Διάγραμμα 6.2. 22: Διάγραμμα αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10 και 11 του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	110
Διάγραμμα 6.2. 23: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	111
Διάγραμμα 6.2. 24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη ALcons(%) [female, male] ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	111
Διάγραμμα 6.2. 25: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	112
Διάγραμμα 6.2. 26: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80(%) ανά σημείο του Ιδρύματος Κακογιάννη. ....	113
Διάγραμμα 6.2. 27: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, μέσω του global estimate .....	118
Διάγραμμα 6.2. 28: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ανά θέση (multi-point estimation). ....	119
Διάγραμμα 6.2. 29: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	119
Διάγραμμα 6.2. 30: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα. ....	120
Διάγραμμα 6.2. 31: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	120
Διάγραμμα 6.2. 32: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz. ....	121
Διάγραμμα 6.2. 33: Επί τις εκατό στατιστική κατανομή του RT στο χώρο ανά συχνότητα. ....	121
Διάγραμμα 6.2. 34: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation). ....	122
Διάγραμμα 6.2. 35: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	122
Διάγραμμα 6.2. 36: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα. ....	123
Διάγραμμα 6.2. 37: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	124
Διάγραμμα 6.2. 38: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz. ....	124
Διάγραμμα 6.2. 39: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα. ....	125
Διάγραμμα 6.2. 40: Τιμές του LAeq ανά θέση. ....	125
Διάγραμμα 6.2. 41: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή. ....	126
Διάγραμμα 6.2. 42: Grid ανάλυση του LAeq. ....	126
Διάγραμμα 6.2. 43: Τιμές του STI ανά θέση. ....	127
Διάγραμμα 6.2. 44: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή. ....	127
Διάγραμμα 6.2. 45: Grid ανάλυση του STI. ....	128
Διάγραμμα 6.2. 46: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation). ....	129
Διάγραμμα 6.2. 47: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα. ....	129

Διάγραμμα 6.2. 48: Εκτίμηση του D50 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα .....	130
Διάγραμμα 6.2. 49: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	130
Διάγραμμα 6.2. 50: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	131
Διάγραμμα 6.2. 51: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	131
Διάγραμμα 6.2. 52: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).....	132
Διάγραμμα 6.2. 53: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα. ....	132
Διάγραμμα 6.2. 54: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	133
Διάγραμμα 6.2. 55: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	133
Διάγραμμα 6.2. 56: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	134
Διάγραμμα 6.2. 57: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	134
Διάγραμμα 6.2. 58: Εκτίμηση του EDT ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).....	135
Διάγραμμα 6.2. 59: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα. ....	135
Διάγραμμα 6.2. 60: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα .....	136
Διάγραμμα 6.2. 61: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	136
Διάγραμμα 6.2. 62: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	137
Διάγραμμα 6.2. 63: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα. ....	137
Διάγραμμα 6.3. 1: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	139
Διάγραμμα 6.3. 2: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης- Υπόγειο. ....	140
Διάγραμμα 6.3. 3: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για ροζ θόρυβο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. .	140
Διάγραμμα 6.3. 4: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε γραμμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης- Υπόγειο. ....	141
Διάγραμμα 6.3. 5: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις θέσεις του θεάτρου Τέχνης- Υπόγειο. ....	142
Διάγραμμα 6.3. 6: Μέγεθος LAeq (dB) όλων των θέσεων για λευκό θόρυβο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. .....	142
Διάγραμμα 6.3. 7: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	143
Διάγραμμα 6.3. 8: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	144
Διάγραμμα 6.3. 9: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	144
Διάγραμμα 6.3. 10: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	145
Διάγραμμα 6.3. 11: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	145
Διάγραμμα 6.3. 12: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	146
Διάγραμμα 6.3. 13: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	146
Διάγραμμα 6.3. 14: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	147
Διάγραμμα 6.3. 15: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	147
Διάγραμμα 6.3. 16: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	148

Διάγραμμα 6.3. 17: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	148
Διάγραμμα 6.3. 18: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-μπαλόνι για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	149
Διάγραμμα 6.3. 19: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	149
Διάγραμμα 6.3. 20: : Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό-πιστόλι αφέτη για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	150
Διάγραμμα 6.3. 21: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- μπαλόνι για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	150
Διάγραμμα 6.3. 22: Διάγραμμα σύγκρισης Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα με είσοδο κρουστικό παλμό- μπαλόνι για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	151
Διάγραμμα 6.3. 23: Διάγραμμα σύγκρισης του Χρόνου αντήχησης σε γραμμική κλίμακα των σημάτων κρουστικός παλμός, μπαλόνι και πιστόλι αφέτη, για το θέατρο Τέχνης-Υπόγειο.....	151
Διάγραμμα 6.3. 24: Διάγραμμα σύγκρισης του Χρόνου αντήχησης σε λογαριθμική κλίμακα των σημάτων κρουστικός παλμός, μπαλόνι και πιστόλι αφέτη, για το θέατρο Τέχνης-Υπόγειο. ....	152
Διάγραμμα 6.3. 25: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	153
Διάγραμμα 6.3. 26: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 5, 9 και 11 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	153
Διάγραμμα 6.3. 27: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	154
Διάγραμμα 6.3. 28: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 1, 2, 3 και 4 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	154
Διάγραμμα 6.3. 29: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	155
Διάγραμμα 6.3. 30: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 5, 6, 7 και 8 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	155
Διάγραμμα 6.3. 31: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε γραμμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	156
Διάγραμμα 6.3. 32: Διάγραμμα σύγκρισης αποτελεσμάτων του μεγέθους SNR σε λογαριθμική κλίμακα για τις θέσεις 9, 10, 11 και 12 του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο .....	156
Διάγραμμα 6.3. 33: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη STI, STI FEMALE, STI MALE και RASTI ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο.....	157
Διάγραμμα 6.3. 34: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για τα μεγέθη ALcons(%) [female, male] ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	157
Διάγραμμα 6.3. 35: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος D50(%) ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	158
Διάγραμμα 6.3. 36: Διάγραμμα αποτελεσμάτων για το μέγεθος C80(%) ανά σημείο του θεάτρου Τέχνης-Υπόγειο. ....	159
Διάγραμμα 6.3. 37: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, μέσω του global estimate .....	165
Διάγραμμα 6.3. 38: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ανά θέση (multi-point estimation).....	166
Διάγραμμα 6.3. 39: Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	166
Διάγραμμα 6.3. 40: Στατιστική ανάλυση του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα. ....	167
Διάγραμμα 6.3. 41: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	167
Διάγραμμα 6.3. 42: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	168
Διάγραμμα 6.3. 43: Επί τις εκατό στατιστική κατανομή του RT στο χώρο ανά συχνότητα. ....	168
Διάγραμμα 6.3. 44: Εκτίμηση του SPL ανά θέση (multi-point estimation).....	169
Διάγραμμα 6.3. 45: Εκτίμηση του SPL συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. ....	169
Διάγραμμα 6.3. 46: Στατιστική ανάλυση του SPL ανά συχνότητα.....	170
Διάγραμμα 6.3. 47: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz .....	170

Διάγραμμα 6.3. 48: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	171
Διάγραμμα 6.3. 49: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του SPL στο χώρο ανά συχνότητα. ....	171
Διάγραμμα 6.3. 50: Τιμές του LAeq ανά θέση.....	172
Διάγραμμα 6.3. 51: Τιμές του LAeq ανά απόσταση από την πηγή.....	172
Διάγραμμα 6.3. 52: Grid ανάλυση του LAeq.....	173
Διάγραμμα 6.3. 53: Τιμές του STI ανά θέση.....	173
Διάγραμμα 6.3. 54: Τιμές του STI ανά απόσταση από την πηγή. ....	174
Διάγραμμα 6.3. 55: Grid ανάλυση του STI. ....	174
Διάγραμμα 6.3. 56: Εκτίμηση του D50 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation). ....	175
Διάγραμμα 6.3. 57: Στατιστική ανάλυση του D50 ανά συχνότητα.....	175
Διάγραμμα 6.3. 58: Εκτίμηση του D50 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα .....	176
Διάγραμμα 6.3. 59: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz.....	176
Διάγραμμα 6.3. 60: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	177
Διάγραμμα 6.3. 61: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του D50 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	177
Διάγραμμα 6.3. 62: Εκτίμηση του C80 ανά θέση και συχνότητα (multi-point estimation).....	178
Διάγραμμα 6.3. 63: Στατιστική ανάλυση του C80 ανά συχνότητα. ....	178
Διάγραμμα 6.3. 64: Εκτίμηση του C80 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. .....	179
Διάγραμμα 6.3. 65: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz.....	179
Διάγραμμα 6.3. 66: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	180
Διάγραμμα 6.3. 67: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του C80 στο χώρο ανά συχνότητα. ....	180
Διάγραμμα 6.3. 68: Εκτίμηση του EDT ανά μικρόφωνο και συχνότητα (multi-point estimation). ....	181
Διάγραμμα 6.3. 69: Στατιστική ανάλυση του EDT ανά συχνότητα.....	181
Διάγραμμα 6.3. 70: Εκτίμηση του EDT συναρτήσει της απόστασης από την πηγή ανά θέση και συχνότητα. .....	182
Διάγραμμα 6.3. 71: Grid ανάλυση στις συχνότητες 63, 125, 250 και 500 Hz.....	182
Διάγραμμα 6.3. 72: Grid ανάλυση στις συχνότητες 1, 2, 4 και 8 kHz.....	183
Διάγραμμα 6.3. 73: Επί τοις εκατό στατιστική κατανομή του EDT στο χώρο ανά συχνότητα. ....	183
Διάγραμμα 7.1. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.....	185
Διάγραμμα 7.1. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα. ....	185
Διάγραμμα 7.1. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	186
Διάγραμμα 7.1. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	187
Διάγραμμα 7.2. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.....	188
Διάγραμμα 7.2. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα. ....	189
Διάγραμμα 7.2. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	190
Διάγραμμα 7.2. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	190
Διάγραμμα 7.3. 1: Σύγκριση RT μετρήσεων και προσομοίωσης.....	193
Διάγραμμα 7.3. 2: Σύγκριση μέσου όρου EDT-RT ανά συχνότητα. ....	193
Διάγραμμα 7.3. 3: Σύγκριση D50 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	194
Διάγραμμα 7.3. 4: Σύγκριση C80 μετρήσεων και προσομοίωσης.....	195

## Βιβλιογραφία

- [1] « [el.wikipedia.org/wiki/Ηχος](http://el.wikipedia.org/wiki/Ηχος),» [Ηλεκτρονικό].
- [2] D.A.BIES and C.H.HANSEN, Engineering Noise Control-Theory and Practice, Fourth edition, Spon Press, 2009.
- [3] «[users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_acoustics\\_lesson03.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_acoustics_lesson03.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [4] spectrum, «[https://en.wikipedia.org/wiki/Colors\\_of\\_noise](https://en.wikipedia.org/wiki/Colors_of_noise)».
- [5] «[http://physiclessons.blogspot.ch/2012/04/blog-post\\_24.html#.WFEReblrLmE](http://physiclessons.blogspot.ch/2012/04/blog-post_24.html#.WFEReblrLmE),» [Ηλεκτρονικό].
- [6] «<http://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-fields.htm>,» [Ηλεκτρονικό].
- [7] Δ. Σκαρλάτος, Εφαρμοσμένη Ακουστική.
- [8] «[http://iekdeltalive.gr/sound-music/MOYSIKI\\_ME\\_TEXNOLOGIA/b04c96333e0e8bc05b51b4398757ce9b/ff8ba162234dfa3a0ad9d41700d9bc1a/%CE%91%CE%9A%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3.pdf](http://iekdeltalive.gr/sound-music/MOYSIKI_ME_TEXNOLOGIA/b04c96333e0e8bc05b51b4398757ce9b/ff8ba162234dfa3a0ad9d41700d9bc1a/%CE%91%CE%9A%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [9] T.D.Rossing, Springer Handbook of Acoustics.
- [10] «<http://www.amds.gr/a4.aspx>,» Ακουστικές Μελέτες. [Ηλεκτρονικό].
- [11] A. Everest και K. C. Pohlmann, Master Handbook of acoustics, Fifth edition, 2009.
- [12] H. Fastl και E. Zwicker, Psychoacoustics- Facts and Models, Springer, 2007.
- [13] A. Φλώρος, «[http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_acoustics\\_lesson11.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_acoustics_lesson11.pdf),» Ακουστική και Ψυχοακουστική. [Ηλεκτρονικό].
- [14] Χ. Μωρίτης, «[https://www.iema.gr/data/lectures/KDA8\\_Studio\\_Design\\_Moraitis.pdf](https://www.iema.gr/data/lectures/KDA8_Studio_Design_Moraitis.pdf),» Αρχές Μελέτης Ακουστικής Δωματίου, Φεβρουάριος 2010. [Ηλεκτρονικό].
- [15] «[http://www.acoustic.ua/st/web\\_absorption\\_data\\_eng.pdf](http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [16] «<http://soundproofyourhome.com/absorption-coefficient-chart/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [17] «[http://www.acousticalsurfaces.com/acoustic\\_IOI/101\\_13.htm](http://www.acousticalsurfaces.com/acoustic_IOI/101_13.htm),» [Ηλεκτρονικό].
- [18] «[https://courses.physics.illinois.edu/phys193/fa2013/Student\\_Reports/Fall02/Alan\\_Truesdale/Alan\\_Truesdale\\_Absorbtion\\_Coefficients.pdf](https://courses.physics.illinois.edu/phys193/fa2013/Student_Reports/Fall02/Alan_Truesdale/Alan_Truesdale_Absorbtion_Coefficients.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [19] «[http://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9\\_BookBackMatter.pdf](http://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf),» [Ηλεκτρονικό].

- [20] «<http://netacoustics.sch.gr/presentations/hatziantoniou.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [21] D. M. Howard και J. Angus, Acoustics and Psychoacoustic, third edition.
- [22] «<http://renkusheinz-sound.ru/easera/EASERAAppendixUSPV.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [23] «<https://infoacoustics.blogspot.ch/2013/09/blog-post.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [24] «[https://www.iema.gr/data/lectures/KDMA1\\_Schubert\\_Introduction.pdf](https://www.iema.gr/data/lectures/KDMA1_Schubert_Introduction.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [25] «[http://thesecretrealtruth.blogspot.com/2015/03/blog-post\\_3774.html](http://thesecretrealtruth.blogspot.com/2015/03/blog-post_3774.html),» [Ηλεκτρονικό].
- [26] «<http://www.tovima.gr/science/article/?aid=405805>,» [Ηλεκτρονικό].
- [27] «[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B1%CE%AF%CE%BF\\_%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B8%CE%AD%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%BF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B1%CE%AF%CE%BF_%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B8%CE%AD%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%BF),» [Ηλεκτρονικό].
- [28] M. Long, Architectural Acoustics.
- [29] «<http://www.diazoma.gr/200-Stuff-03-Diazoma/TheatroPedia-003.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [30] «[http://www.fireservice.gr/pyr\\_cms\\_files/dynamic/c296924/doc.file/bd15-17-1956\\_el\\_GR](http://www.fireservice.gr/pyr_cms_files/dynamic/c296924/doc.file/bd15-17-1956_el_GR),» [Ηλεκτρονικό].
- [31] «<https://www.digigram.com/sound-cards/uax220v2-stereo-usb-sound-card/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [32] «[http://downloads.music-group.com/software/behringer/ECM8000/ECM8000\\_C\\_Specs.pdf](http://downloads.music-group.com/software/behringer/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf),» [Ηλεκτρονικό].
- [33] H. KUTTRUFF, Room Acoustics, Fifth edition, Spoon Press, 2009.
- [34] C. Hummersone, «IR\_stats».