



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

## **Ακουστική Μελέτη Αρχαίου Θεάτρου Άργους**

### **Διπλωματική Εργασία**

ΤΟΥ

**Μιχαήλ-Παναγιώτη Κουκούτα**

Επιβλέπων: Γεώργιος Καμπουράκης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Ακουστική Μελέτη Αρχαίου Θεάτρου Άργους

### Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Μιχαήλ-Παναγιώτη Κουκούτα

Επιβλέπων: Γεώργιος Καμπουράκης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την ....<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2016 :

Γεώργιος Καμπουράκης

Ηλίας Κουκούτσης

Βασίλειος Λούμος

.....

.....

.....

.....

Μιχαήλ-Παναγιώτης Κουκούτας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μιχαήλ Παναγιώτης Κουκούτας, 2016.

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.





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ψυχαγωγία κατείχε ιδιαίτερα σημαντική θέση στην Αρχαία Ελληνική κοινωνία και ζωή. Σχεδόν κάθε μεγάλη πόλη είχε το δικό της ανοιχτό θέατρο, στο οποίο αρχικά γίνονταν αγώνες και με την πάροδο των χρόνων κυρίως παραστάσεις. Μέχρι και σήμερα τα αρχαία θέατρα αποτελούν κέντρα πολιτισμού, με χιλιάδες επισκέπτες να τα κατακλύζουν είτε για να παρακολουθήσουν κάποιο δρώμενο, είτε για να θαυμάσουν την σπουδαία αρχιτεκτονική τους. Εκτός από την αρχιτεκτονική, τα αρχαία θέατρα είναι ξακουστά για την εξαιρετική ακουστική τους, που επιτρέπει στον θεατή να ακούει καθαρά σε όποιο σχεδόν μέρος του θεάτρου και να επιλέξει να καθίσει. Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι ακουστικές ιδιότητες του αρχαίου θεάτρου του Άργους. Αρχικά έγιναν κάποιες επιτόπιες μετρήσεις, οι οποίες επεξεργάστηκαν ύστερα με τα λογισμικά Dirac και Matlab, για να εξαχθούν δείκτες που αφορούν τη φασματική συμπεριφορά, το χρόνο αντήχησης και κάποιες παραμέτρους καταληπτότητας της ομιλίας. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το ηλεκτρονικό μοντέλο του θεάτρου και έγιναν προσομοιώσεις στο λογισμικό EASE με σκοπό να διαπιστώσουμε εάν ταυτίζονται με τις επιτόπιες μετρήσεις και ως εκ τούτου κατά πόσο μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ψηφιακά την ακουστική ενός αρχαίου θεάτρου.

λέξεις κλειδιά: *αρχαίο θέατρο, ακουστική, χρόνος αντήχησης, φασματική κατανομή, καταληπτότητα ομιλίας, σηματοθορυβικός λόγος.*





## ABSTRACT

Entertainment was considered a very serious side of Ancient Greek societies. Almost every city had its own open theater, where in the beginning athletic games were held. As the years went by, theatrical performances were being hosted. Until this day, they are considered as Cultural Centers and thousands of people visit them either to watch a performance, or to admire their great architectural design. Apart from this aspect, Ancient Greek theaters are famous for their outstanding acoustical design, that enables the spectator to hear clearly, in almost every place of the theater. In the current thesis, we examine the acoustical properties of Argos' Ancient Theater. At first, we took some measurements on the spot, which were then imported into Dirac and Matlab Software in order to extract some information regarding the reverberation time, spectrum properties and speech intelligibility. Moreover, we constructed a digital model of the theater which was imported into EASE Software where simulation took place, in order to determine if the first measurements match to the simulation results and so if the Acoustical properties of Ancient Theaters can be digitally modeled.

*key words: ancient theater, acoustics, reverberation time, spectrum analysis, speech intelligibility, sound to noise ratio*

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καμπουράκη για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής , αλλά και όλα τα χρόνια φοίτησης στη σχολή. Τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Κωνσταντίνο Μπακογιάννη για την καθοδήγηση και τη βοήθεια, τον συνάδελφο Πέτρο Δαγκρέ, την Ανθούλα Νικολάκη. Τον κ. Moretti και το Γαλλικό Ινστιτούτο για την ευγενική παραχώρηση των σχεδίων του θεάτρου του Άργους, καθώς και την εφορία αρχαιτήτων Αργολίδος για την παραχώρηση του θεάτρου για τις μετρήσεις. Τον Κώστα και τον Άγη για τα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί και τέλος τους γονείς μου για τη στήριξη όλων αυτών τον καιρό.

# Περιεχόμενα

1.Εισαγωγικά Θεωρητικά Στοιχεία	
1.1 Βασικά Μεγέθη Ακουστικής.....	7
1.2 Είδη Σημάτων και Μέτρηση Συστήματος.....	13
1.3 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής Ακουστικής.....	16
2.Ιστορικά Στοιχεία	
2.1 Αρχιτεκτονική και Ακουστική Αρχαιοελληνικού Θεάτρου.....	25
2.2 Ιστορικά στοιχεία για την πόλη και το αρχαίο θέατρο του Άργους.....	28
3.Διαδικασία Μετρήσεων	
3.1 Όργανα Μέτρησης και Μεθοδολογία.....	33
3.2 Βαθμονόμηση.....	36
3.3 Μετρήσεις στο Θέατρο.....	37
3.4 Επεξεργασία Μετρήσεων	
3.4.1 Φασματική Κατανομή.....	38
3.4.2 Χρόνος Αντήχησης.....	55
3.4.3 Παιρετέρω Δείκτες/Κριτήρια Ακουστικής.....	66
4.Προσομοίωση	
4.1 Το μοντέλο.....	72
4.2 Κενό Θέατρο	
4.2.1 Χρόνος Αντήχησης.....	75
4.2.2 Sound Pressure Level.....	77
4.2.3 Δείκτες Ομιλίας.....	84
4.3 Γεμάτο Θέατρο	
4.3.1 Χρόνος Αντήχησης.....	93
4.3.2 Sound Pressure Level.....	95
4.3.3 Δείκτες Ομιλίας.....	98
4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	
4.4.1 Επιτόπιες Μετρήσεις-Προσομοίωση.....	107
4.4.2 Προσομοίωση με άδειο-προσομοίωση με γεμάτο θέατρο.....	108
5. Συμπεράσματα και προτάσεις για τη συνέχιση της μελέτης.....	109
Παράρτημα.....	111
Βιβλιογραφία.....	121

"Ο ήχος, όπως και το φώς, αποκτούν μία ποιότητα στη σιωπή. Όσο πιά βαθιά είναι η σιωπή, τόσο περισσότερο ακούγεται η ομορφιά του ήχου."

Jiddhu Krishnamurti, 1954

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

## 1.1 Βασικά Μεγέθη Ακουστικής

Ως **ήχο** ορίζουμε οποιαδήποτε μεταβολή πίεσης σε κάποιο μέσο διάδοσης (αέρας, νερό, στερεό) που μπορεί να ανιχνεύσει το ανθρώπινο αυτί [1]. Διάδοση του ήχου στο κενό δεν υπάρχει.

Για να περιγραφεί ο ήχος χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι παράμετροι :

Η **ταχύτητα του ήχου** (συνήθως συμβολίζεται με  $U$  και μετρείται σε  $m/s$ ), εκφράζει το πόσο γρήγορα διαδίδεται το ηχητικό κύμα. Εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τα χαρακτηριστικά ελαστικότητας και αδράνειας του μέσου διάδοσης και όχι τα χαρακτηριστικά του κύματος (συχνότητα, πλάτος κλπ). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τιμές για διάφορα μέσα διάδοσης.

Αέρια		Υγρά ( 25 °C)		Στερεά	
Υλικό	Ταχύτητα (m/s)	Υλικό	Ταχύτητα (m/s)	Υλικό	Ταχύτητα (m/s)
Υδρογόνο (0 °C)	1286	Γλυκερόλη	1904	Διαμάντι	12000
Ήλιο (0 °C)	972	Θαλασσινό Νερό	1533	Σίδηρος	5130
Αέρας (20 °C)	343	Νερό	1493	Αλουμίνιο	5100
Αέρας (0 °C)	331	Κηροζίνη	1324	Χρυσός	3240
		Μεθυλική αλκοόλη	1143	Μόλυβδος	1322
		Υδράργυρος	1450	Χαλκός	4700

Πίνακας 1: Ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε διάφορα μέσα.<sup>1</sup>

Η **συχνότητα** (συνήθως συμβολίζεται με  $f$ ), εκφράζει το πόσο συχνά συμβαίνει μία πλήρης ταλάντωση του ηχητικού κύματος στη διάρκεια ενός δευτερολέπτου και μετρείται σε  $Hz$ . Η **περίοδος** ( $T=1/f$ , μετρείται σε δευτερόλεπτα) είναι το αντίστροφο της συχνότητας και εκφράζει το πόσος χρόνος απαιτείται για να ολοκληρωθεί μία πλήρης ταλάντωση του κύματος. Ως **μήκος κύματος** ( $\lambda$ , μετρείται

<sup>1</sup> Πηγή: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

σε μέτρα) ορίζεται η απόσταση που διανύει το ηχητικό κύμα μέχρι να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος του.

Η συχνότητα χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το τονικό ύψος κάθε ήχου και έτσι προκύπτει ο διαχωρισμός των περιοχών συχνοτήτων σε "χαμηλές", "μεσαίες" και "ψηλές". Στη φύση σπάνια συναντώνται ήχοι που αποτελούνται από μόνο μία συχνότητα. Οι περισσότεροι είναι σύνθεση κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων. Το ανθρώπινο ακουστικό όργανο, το αυτί δηλαδή, μπορεί να αντιληφθεί συχνότητες στο διάστημα 20Hz-20kHz. [2] Αυτό είναι μία γενική και ιδανική θεώρηση, καθώς το διάστημα αυτό επηρεάζεται από παράγοντες όπως το ηχητικό περιβάλλον που ζει κανείς και κυρίως η ηλικία. Όσο μεγαλώνει ο άνθρωπος τόσο μειώνεται το άνω όριο.

Το ανθρώπινο αυτί διακρίνει μία πολύ ιδιαίτερη σχέση μεταξύ των ήχων που οι συχνότητες τους έχουν σχέση 2/1. Αυτό το συχνοτικό διάστημα ονομάζεται **οκτάβα**.

Η ταχύτητα του ήχου συνδέεται με το μήκος κύματος, την περίοδο και τη συχνότητα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U}{\lambda}$$

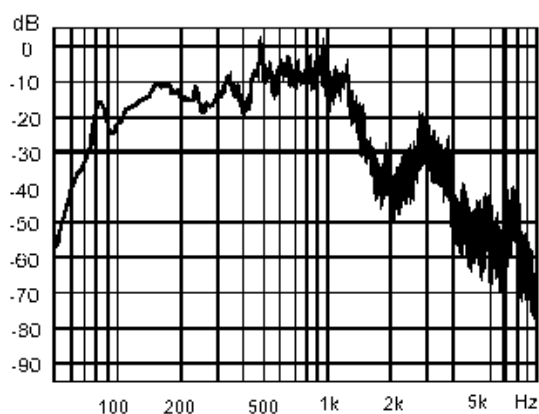
Για να περιγράψουμε την ένταση του ήχου που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος χρησιμοποιούμε την **Ηχητική στάθμη πίεσης - Sound Pressure Level - SPL**. Αυτό αποτελεί ένα σχετικό μέγεθος που ορίζεται ως  $20 \log P/P_{ref}$ , όπου P η τιμή της προς μέτρηση ακουστικής πίεσης και  $P_{ref}$  η τιμή ακουστικής πίεσης αναφοράς. Από πειράματα που έγιναν στα εργαστήρια της Bell στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα σε νεαρά παιδιά χωρίς ακουστικούς τραυματισμούς για ήχο ημιτονοειδούς κύματος 1kHz, βρέθηκε ότι η ελάχιστη τιμή που μπορεί να ανιχνευθεί είναι τα 20 μPascals. Έτσι αυτό θεωρείται το κάτω όριο ακοής και χρησιμοποιείται ως  $P_{ref}$ . Το άνω όριο, δηλαδή η μεγαλύτερη ένταση που μπορεί να αντέξει κάποιος πριν χάσει την ακοή του είναι 200 Pa. Έτσι, καθώς η κλίμακα της έντασης της ανθρώπινης ακοής είναι πάρα πολύ μεγάλη για να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς, μετρήσεις και γραφήματα γραμμικά, χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα όπως φαίνεται και από τον ορισμό της ηχητικής στάθμης πίεσης. Αυτή εκφράζει την ένταση του ήχου σε **decibels**, έναν καθαρό αριθμό που χρησιμοποιείται για να εκφράσει λόγο μεταξύ δύο τιμών. Για παράδειγμα όταν λέμε "η στάθμη ηχητικής πίεσης κατά την εκτόξευση ενός αεροπλάνου είναι 140 dbSPL" εννοούμε ότι είναι 140 φορές πιό δυνατή από την χαμηλότερη ένταση που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί.

Ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές τιμές στάθμης ηχητικής πίεσης για διάφορες πηγές:

Ηχητική Πηγή	Στάθμη Ηχητικής Πίεσης (dbSPL)	Ηχητική Πίεση (Pa)
Αερπλάνο Jet (σε απόσταση 50 μέτρων)	140	200
Όριο Πόνου	130	63.2
Όριο Δυσφορίας	120	20
Αλυσοπρίονο (σε απόσταση 1 μέτρο)	110	6.3
Νυχτερινό Μαγαζί (σε απόσταση 1 μέτρο)	100	2
Φορτηγό (σε απόσταση 1 μέτρο)	90	0.63
Δρόμος μετρίας κίνησης (σε απόσταση 1 μέτρο)	80	0.2
Ηλεκτρική Σκούπα (σε απόσταση 1 μέτρο)	70	0.063
Συζήτηση μεταξύ δύο ατόμων (σε απόσταση 1 μέτρο)	60	0.02
Οικιακό περιβάλλον	50	0.0063
Περιβάλλον βιβλιοθήκης	40	0.002
Υπνοδωμάτιο τη νύχτα	30	0.00063
Μουσικό στούντιο	20	0.0002
Θρόισμα φύλλων	10	0.000063
Όριο ακοής	0	0.00002

Πίνακας 2 : Στάθμη Ηχητικής Πίεσης για διάφορες ηχητικές πηγές <sup>2</sup>

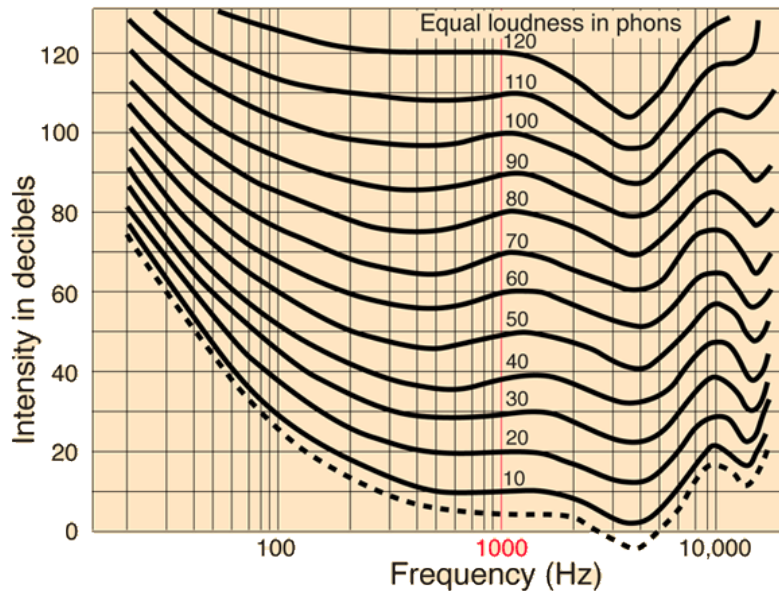
Με τον όρο **φάσμα** εννοούμε τη συχνοτική κατανομή ενός ήχου. Παρακάτω φαίνεται σε ημιλογαριθμική κλίμακα το πού εντοπίζεται συχνοτική η φωνή ενός άντρα.



Εικόνα 1: Τυπικό φάσμα αντρικής φωνής

<sup>2</sup> πηγή: shure.com

Το ανθρώπινο αυτί δεν έχει την ίδια ευαισθησία σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, δηλαδή δεν ακούει το ίδιο εύκολα όλες τις συχνότητες και ισοδύναμα κάποιες συχνότητες θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη ένταση από κάποιες άλλες για να δώσουν την αίσθηση ότι ακούγονται το ίδιο δυνατά. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία των **καμπυλών ισοδύναμης ακουστότητας**. Οι συγκεκριμένες καμπύλες είναι γνωστές και ως "καμπύλες Fletcher- Munson" προς τιμήν των δύο επιστημόνων που ασχολήθηκαν πρώτοι εκτενώς με το θέμα.



Εικόνα 2 : Καμπύλες ισοδύναμης ακουστότητας

Από το διάγραμμα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι ο άνθρωπος είναι αρκετά ευαίσθητος στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων. Για παράδειγμα, ένας ήχος με συχνότητα 20Hz θα πρέπει να έχει περίπου 70dB περισσότερη ένταση απ' ότι ένας ήχος 1kHz για να ακουστεί το ίδιο δυνατός με αυτόν. [3]

Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ανάγκη που υπάρχει κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων να παίρνουμε τιμές που να έχουν σχέση με το πώς αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος τα ηχητικά φαινόμενα, οδήγησε στη χρήση διαφόρων **διορθωτικών φίλτρων μέτρησης**, καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί και μία διαφορετική καμπύλη ζύγισης. Τα πιο γνωστά είναι τα φίλτρα "A", "B", "C" που είναι βασισμένα στις καμπύλες ισοδύναμης ακουστότητας. Η "A" αντιστοιχεί στην καμπύλη των 40Phon και χρησιμοποιείται για μετρήσεις ήχων χαμηλής στάθμης (20- 55dB SPL), αν και στην πραγματικότητα είναι αυτή με την πιο ευρεία χρήση λόγω της κοντινότητας της στην υποκειμενική αντίληψη του ανθρώπου για την ηχητική ένταση. [4] Όταν η ένταση ενός ήχου έχει φιλτραριστεί από A συνάρτηση βάρους, η τιμή της αναφέρεται ως dB A. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για να γίνει η διόρθωση είναι ο ακόλουθος :

$$W_A = 10 \text{Log} \left[ \frac{1.562339 f^4}{(f^2 + 107.65265^2)(f^2 + 737.86223^2)} \right] + 10 \text{Log} \left[ \frac{2.242881 * 10^{16} * f^4}{(f^2 + 20.598997^2)^2 (f^2 + 12194.22^2)^2} \right]$$

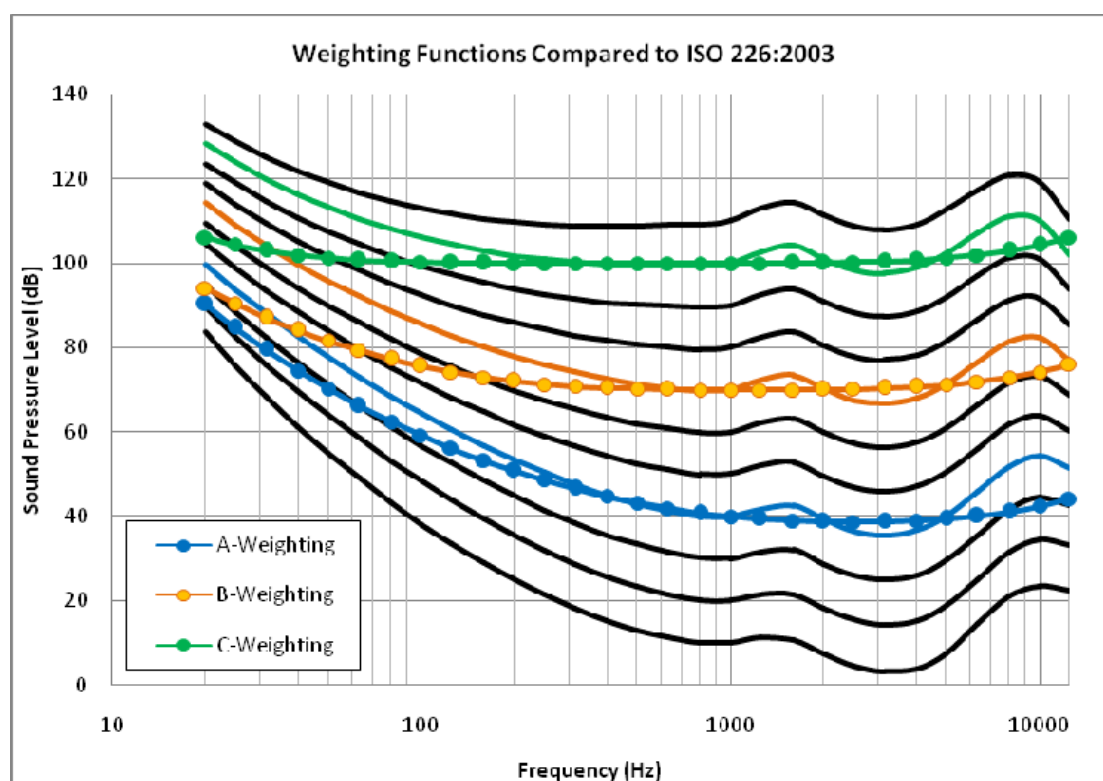


Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες διορθωτικές τιμές ανά συχνότητα [5]:

Frequency (Hz)	A Weighting (dB)	Frequency (Hz)	A Weighting (dB)
20	-50.5	800	-0.8
25	-44.7	1000	0
31.5	-39.4	1250	0.6
40	-34.6	1600	1
50	-30.2	2000	1.2
63	-26.2	2500	1.3
80	-22.5	3150	1.2
100	-19.1	4000	1
125	-16.1	5000	0.5
160	-13.4	6300	-0.1
200	-10.9	8000	-1.1
250	-8.6	10000	-2.5
315	-6.6	12500	-4.3
400	-4.8	16000	-6.6
500	-3.2	20000	-9.3
630	-1.9		

Πίνακας 3 : Διορθωτικές τιμές ζυγίσματος κατά A, ανά τριτοκτάβα

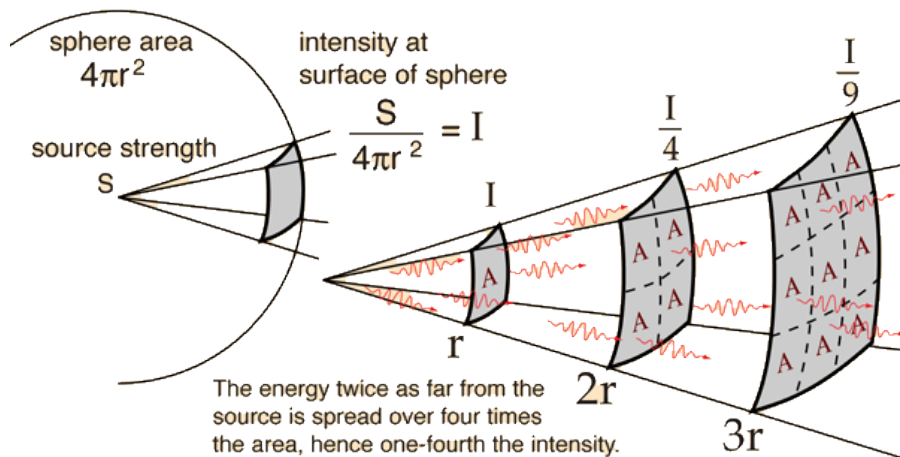
Η "B" αντιστοιχεί στην καμπύλη των 70Phon και χρησιμοποιείται για ήχους στάθμης 55-85dB SPL, ενώ η "C" είναι σχεδόν επίπεδη και η χρήση της ενδείκνυται μόνο για περιπτώσεις εξαιρετικά δυνατών ήχων, καθώς και σε ειδικές εφαρμογές όπως τα στούντιο ηχογράφησης.



Εικόνα 3: Διορθωτικά Φίλτρα Μέτρησης Ηχητικής Στάθμης

Επειδή η ένταση του ήχου, στις περισσότερες των περιπτώσεων ποικίλει με το χρόνο, έχει οριστεί το **Equivalent Continuous Sound level ( $L_{eq}$ )**. Το μέγεθος αυτό είναι σταθερό με το χρόνο και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το κανονικό σήμα το οποίο διαφοροποιείται με το χρόνο, επομένως προκαλεί τις ίδιες συνέπειες με το κανονικό σήμα. Πολλές φορές το μέγεθος αυτό καταγράφεται ως  $L_{Aeq,T}$ , όπου το "A" ανφέρεται στη ζύγιση κατά A, ενώ το "T" στο χρόνο μέτρησης.

Σε έναν ελεύθερο χώρο (δηλαδή χωρίς φυσικά εμπόδια) και στην περίπτωση σφαιρικών κυμάτων, όπου η ενέργεια που δίνει η ηχητική πηγή είναι ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια του μετώπου του κύματος, ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου. Αν παραβλέψουμε τις απώλειες, τότε σε μια επόμενη θέση η ίδια ενέργεια θα κατανεμηθεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια (το πρόβλημα είναι κυρίως γεωμετρικό). Επειδή η επιφάνεια της σφαίρας αυξάνει ανάλογα με το τετράγωνο της ακτίνας ( $S=4*\pi*r^2$ ), η ποσότητα ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε μονάδα επιφάνειας μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από τη πηγή. Έτσι, αν διπλασιαστεί η απόσταση ( $r_2=2*r_1$ ), η επιφάνεια θα είναι 4 φορές μεγαλύτερη  $S_2=4*\pi*(2*R_1)^2 \Rightarrow S_2=4*S_1$ , ενώ η ενέργεια και η ένταση του ήχου θα είναι 4 φορές μικρότερη. Η ένταση όμως είναι μία παράμετρος που μετριέται στην πράξη πολύ δύσκολα, γι' αυτό και χρησιμοποιείται η ακουστική πίεση, για την οποία παίρνουμε  $dB_{SPL}^{-1} = -6 dB_{SPL}$ . Το "-" δηλώνει τη μείωση της ακουστικής πίεσης. Δηλαδή για κάθε διπλασιασμό της απόστασης, θα έχουμε μείωση της ακουστικής πίεσης κατά 6 dB SPL. Αυτή η θεωρία ονομάζεται **νόμος αντίστροφου τετραγώνου**.



Εικόνα 4: Νόμος αντίστροφου τετραγώνου<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Πηγή: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

## 1.2 Είδη σημάτων και μέτρηση συστήματος

Η λέξη **θόρυβος** καλύπτει ένα ευρύ πεδίο επιστημονικών εννοιών. Για παράδειγμα στην ηλεκτρονική, ο θόρυβος αποτελεί ένα σήμα που αλλοιώνει το σήμα το οποίο αναμένουμε. Εμάς θα μας απασχολήσει ο ακουστικός θόρυβος, ο οποίος ορίζεται ως "κάθε ανεπιθύμητος ήχος" [6]. Ο ακουστικός θόρυβος διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

Στον **θόρυβο περιβάλλοντος** (ambient noise), ο οποίος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές που δεν μας ενδιαφέρουν κατά τη στιγμή της μέτρησης ή της παρατήρησης.

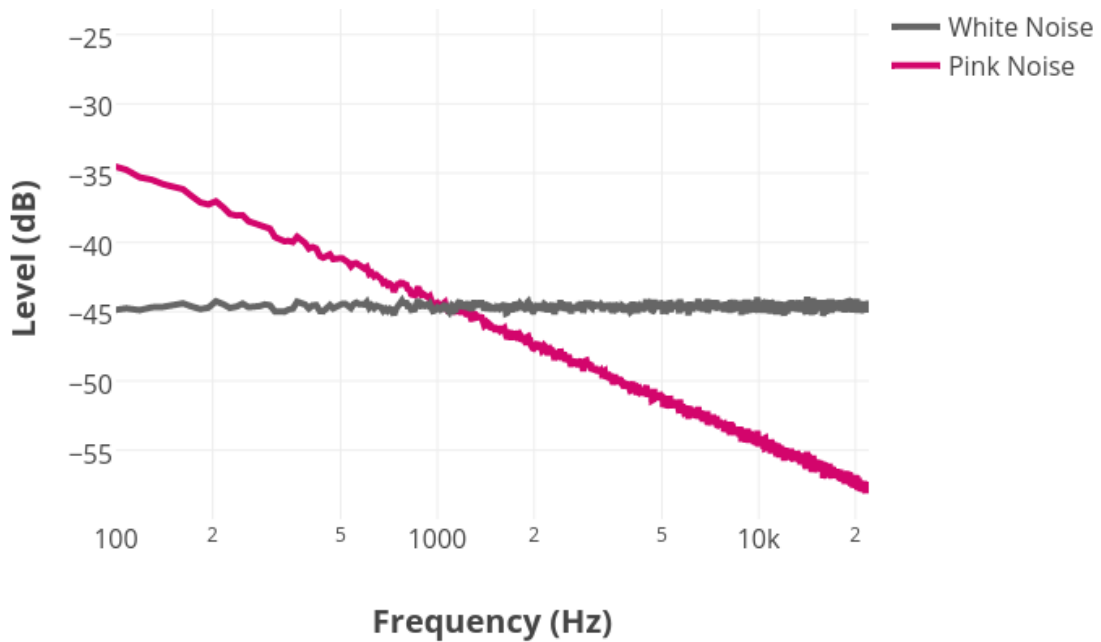
Στον **θόρυβο βάθους** (background noise), ο οποίος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από όλες τις πηγές που βρίσκονται στο περιβάλλον και δεν μας ενδιαφέρουν. [7]

Καθώς η μέτρηση της στιγμιαίας ηχητικής στάθμης του θορύβου είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, χρησιμοποιείται και σε αυτήν την περίπτωση το μέγεθος **ισοδύναμη στάθμη θορύβου**  $L_{eq}$  (Equivalent Continuous Sound Level) (dB) που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0(t)} \right)^2 dt \right]$$

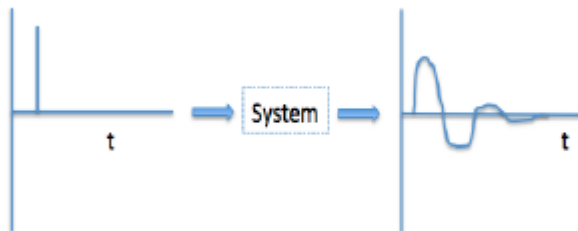
Η ισοδύναμη στάθμη θορύβου είναι ο χρονικός μέσος όρος της στάθμης του θορύβου ή διαφορετικά είναι η ισοδύναμη στάθμη του σταθερού θορύβου. Το μέγεθος αυτό είναι σταθερό με το χρόνο και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το κανονικό σήμα το οποίο διαφοροποιείται με το χρόνο, επομένως προκαλεί τις ίδιες συνέπειες με το κανονικό σήμα. [8]

Στις ακουστικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε κυρίως δύο είδη θορύβων, τον λευκό και τον ροζ θόρυβο. Ο λευκός περιέχει όλες τις συχνότητες του ακουστικού φάσματος (κατ' αναλογία του λευκού φωτός που περιέχει όλα τα χρώματα) και η ενέργειά του είναι κατανομημένη ομοιόμορφα σε αυτό, με ίση ενέργεια ανά Hertz. Αντίθετα, ο ροζ θόρυβος έχει σταθερή ενέργεια ανα οκτάβα. Και οι δύο θόρυβοι χρησιμοποιούνται σε ακουστικές μετρήσεις, στην ισοστάθμιση χώρων κλπ., ακριβώς για το γεγονός ότι περιέχουν όλο το όλο το ηχητικό φάσμα.



Εικόνα 5: Λευκός και Ροζ θόρυβος σε ημολογαριθμική κλίμακα

Μία απλή μέθοδος για να μετρήσουμε οποιοδήποτε σύστημα αποτελεί η εφαρμογή ενός κρουστικού παλμού και η παρακολούθηση της εξόδου του συστήματος. Όσο πιο ιδανικό είναι το σήμα εισόδου, τόσο πιο ακριβής θα είναι η κρουστική απόκρισή του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



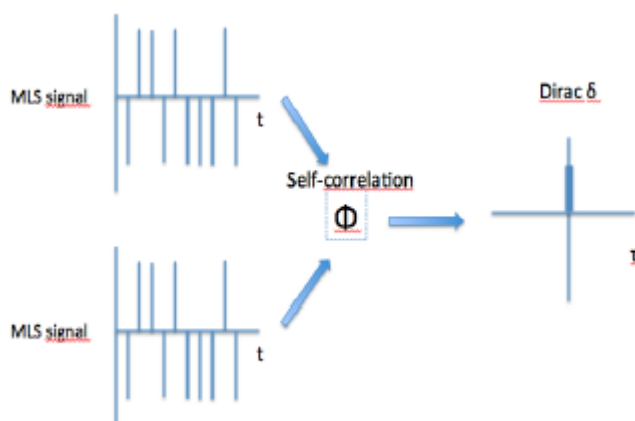
Εικόνα 6: Η συνάρτηση  $\delta$ , το προς μέτρηση σύστημα και η κρουστική απόκρισή του

Αυτή η μέθοδος είναι ακριβής, αλλά για να δώσει σωστά αποτελέσματα, θα πρέπει η είσοδος μας (το σήμα που διεγείρει το χώρο) να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρουστικό παλμό. Σε πραγματικές συνθήκες η συνάρτηση  $\delta$  είναι πολύ σύντομη για να περιέχει ικανό ποσό ενέργειας και είναι δύσκολο να αναπαραχθεί σωστά από κάποιο μεγάφωνο, σε στάθμη 60dB πάνω από το θόρυβο βάθους. Ακόμα και αν αυτό ήταν δυνατό, κάθε μικρή μή-γραμμικότητα θα επηρέαζε σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Παγκοσμίως έχουν προταθεί διάφορες ηχητικές πηγές οι οποίες πλησιάζουν τον παλμό Dirac όπως το σκάσιμο μπαλονιού, ο πυροβολισμός, το χτύπημα δύο σανίδων ξύλου μεταξύ τους κλπ. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι, αν και είναι ευρέως

διαδεδομένες, υστερούν στο ότι το αρμονικό τους περιεχόμενο δεν είναι τόσο ευρύ όσο στα ακόλουθα σήματα.

Ένας άλλος τύπος σήματος που χρησιμοποιείται στη διαδικασία των μετρήσεων είναι το σήμα **MLS** (Maximum Length Sequence). Η τεχνική MLS η οποία θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη μέτρηση της απόκρισης ενός συστήματος βασίζεται στη διέγερση του χώρου με ένα περιοδικό ψευδοτυχαίο σήμα, το οποίο έχει παρόμοιες στοχαστικές ιδιότητες με τον λευκό θόρυβο. Στην αρχή, περί το 1965, το σήμα MLS παραγόταν από πρωτογενή πολυώνυμο και στη συνέχεια από την ψηφιακή ολίσθηση ψηφίων. Στην πράξη, το σήμα αποτελείται από μία ακολουθία παλμών, τυχαία κατανομημένη, με κοινό πλάτος και πλήθος αρνητικών και θετικών παλμών, με τέτοιο τρόπο, ώστε η ακολουθία να είναι συμμετρική γύρω από το 0. Έτσι περιέχονται το λιγότερο  $10^4$  παλμοί ανά ακολουθία, με αποτέλεσμα να έχει υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από μία συνάρτηση  $\delta$  (η οποία περιέχει 1 παλμό ανά ακολουθία). Ο αριθμός δειγμάτων μία περιόδου ενός MLS σήματος  $m$  τάξης είναι:  $L = 2m - 1$ . [9] και επιπρόσθετα μία πολύ σημαντική ιδιότητα του είναι ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτησής του δίνει έναν τέλειο παλμό Dirac.



Εικόνα 7: Η αυτοσυσχέτιση του σήματος MLS δίνει μία τέλεια συνάρτηση  $\delta$ .

Τα γενικότερα πλεονεκτήματα του MLS, είναι:

- Το πλήρες συχνοτικό του φάσμα
- Δεδομένης της ακολουθίας, είναι εύκολο να υπολογίσουμε μαθηματικά το σήμα  $MLS^{-1}$
- Καθώς το σήμα είναι μία δυαδική ακολουθία, το συνελκτικό γινόμενο απλοποιείται σημαντικά και γίνεται άθροισμα
- έχει επίπεδο φάσμα και έτσι είναι εύκολο να υπολογιστεί η κρουστική απόκριση του συστήματος

Επομένως, μέσω του Μετασχηματισμού Fourier εξάγεται μία πληθώρα πληροφοριών για το σύστημά μας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση μας, δηλαδή των ακουστικών μετρήσεων, η διάρκεια του σήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το χρόνο αντήχησης του χώρου προκειμένου να "επιτραπεί" στο ηχητικό πεδίο να φτάσει σε μία κατάσταση ηρεμίας και να έχουμε σωστά αποτελέσματα.

Με την πάροδο των χρόνων εμφανίστηκαν και άλλες μέθοδοι ακουστικών μετρήσεων. Μία από αυτές είναι και η μέθοδος **Γραμμικής Ημιτονικής Σάρωσης** (Linear Sine-Sweep), που προτάθηκε το 1967 από τον Heyser. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί συχνότητες αυξανόμενες γραμμικά με το χρόνο για να σαρώσουν ένα χώρο. Αυτόματα δημιουργούνται συνειρμοί με τα πρώτα πειράματα του Sabine, ο οποίος πραγματοποιούσε ακουστικές μετρήσεις με χρήση 5 σωλήνων που παρήγαγαν διαφορετικές συχνότητες. [10] Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο ότι είναι δυνατό να αναγνωριστούν παραμορφώσεις του σήματος ακόμα και αν το όλο σύστημα δεν είναι Χρονικά Γραμμικά Αναλλοίωτο. Αυτό συμβαίνει καθώς εαν συνελίξουμε το σήμα εξόδου με το αντίστροφο του σήματος εισόδου, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις παραμορφώσεις μεγαλύτερης τάξης από την πραγματική κρουστική απόκριση. Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέθοδος πάσχει από το ίδιο θέμα με την MLS όσον αφορά τη διάρκειά του σήματος σε σχέση με το χρόνο αντήχησης του χώρου, κάνοντας τη χρήση της σε ακουστικές μετρήσεις σπάνια.

Προσπαθώντας να δοθεί λύση στις προβληματικές που εμφάνιζε η LSS προτάθηκε η μέθοδος **Λογαριθμικής Ημιτονικής Σάρωσης** (Exponential Sine-Sweep) όπου (κατ' αναλογία με τη γραμμική σάρωση) οι συχνότητες αυξάνονται λογαριθμικά με το χρόνο, γεγονός που τη φέρνει αρκετά κοντά στη συμπεριφορά του ανθρώπινου αυτιού. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι συχνά χρησιμοποιούμενη στις ακουστικές μετρήσεις, καθώς μέσω διάφορων φίλτρων έγινε δυνατό να εξαχθεί η κρουστική απόκριση του συστήματος χωρίς παραμορφώσεις, αλλά και να απαλειφθεί η μη-γραμμική συμπεριφορά του συστήματος.

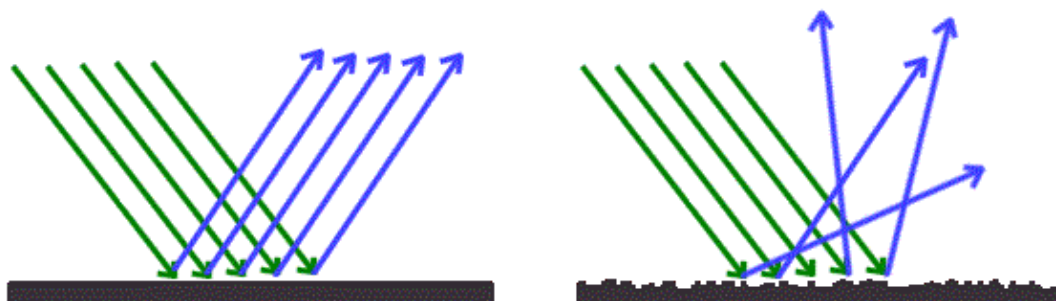
### 1.3 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής Ακουστικής

Τα κύματα μίας ηχητικής πηγής, τα οποία μεταδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο, προκαλούν ταλαντώσεις των μορίων του και δημιουργούν ένα πεδίο το οποίο ονομάζουμε **ακουστικό πεδίο**.

Όταν το ακουστικό πεδίο δεν είναι κλειστό ή οι επιφάνειες που το περιβάλλουν είναι ιδανικά απορροφητικές, υπάρχουν μόνο κύματα που φεύγουν από την ηχητική πηγή. Το είδος αυτό του ακουστικού πεδίου ονομάζεται **ελεύθερο πεδίο** (free field).

Όταν σε ένα πεδίο που μεταδίδονται ηχητικά κύματα βρεθεί ένα εμπόδιο του οποίου οι διαστάσεις είναι μεγάλες σε σύγκριση με το μήκος κύματος, η κίνηση του ήχου αρχίζει να αλλοιώνεται. Συγκεκριμένα υπάρχει **ανάκλαση** πάνω στο εμπόδιο, σύμφωνα με την αρχή του Huygens. [12] Εάν η επιφάνεια είναι λεία, δηλαδή οι όποιες ανωμαλίες της είναι ασήμαντες σε σχέση με το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων, τότε συμβαίνει **κανονική ανάκλαση**. Σε αυτήν την περίπτωση η γωνία πρόσπτωσης του κύματος είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Επίσης, το ηχητικό κύμα δεν ανακλάται στο ακέραιο, αλλά ένα μέρος του μετατρέπεται σε θερμότητα και έτσι η ενέργεια του κύματος μειώνεται μετά από κάθε ανάκλαση. Το ποσοστό που

μετατρέπεται σε θερμότητα εξαρτάται από τη φύση του υλικού στο οποίο προσπίπτει το κύμα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η επιφάνεια είναι τραχεία, τα ηχητικά κύματα **διαχέονται**, δηλαδή σκεδανύονται σε ασθενέστερες ακτίνες τυχαίας κατανομής.

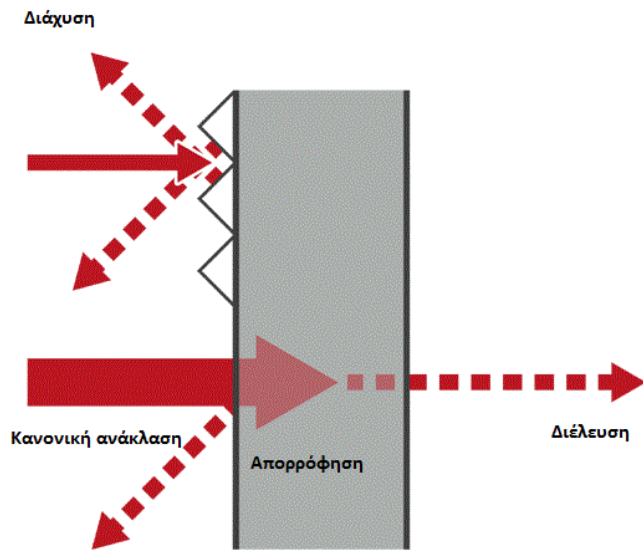


Εικόνα 8: Κανονική ανάκλαση και διάχυση

**Απορρόφηση του ήχου** είναι η διαδικασία κατά την οποία η ακουστική ενέργεια ελαττώνεται, όταν ο ήχος περνά μέσα από ένα υλικό (ηχομόνωση) ή όταν προσπίπτει και ανακλάται σε μία επιφάνεια (ηχοαπορρόφηση). Στην απορρόφηση του ήχου συνήθως η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και ταυτόχρονα εξασθενεί και η ένταση του ηχητικού κύματος. Η απώλεια της ηχητικής ενέργειας μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους: Σε απώλεια εντός του μέσου μετάβασης (ηχομονωτική ικανότητα υλικού) ή σε απώλεια που συνδέεται με τις συνθήκες στα όρια του μέσου (ηχοαπορροφητική ικανότητα υλικού). [12]

Γενικά, Η διάχυση του ήχου επιβάλλεται στις αίθουσες μουσικής, για να έχει το ακροατήριο την αίσθηση ότι ο ήχος έρχεται από όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ένταση. Αντίθετα, ένα πολύ μικρό ποσοστό διάχυσης ήχου επαρκεί σε χώρους ακρόασης ομιλίας και μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και με τη χρήση εναλλάξ απορροφητικού και ανακλαστικού υλικού.

Τέλος, υπάρχει περίπτωση εκτός από το ανακλώμενο και το απορροφώμενο κύμα να υπάρχει και ένα μέρος του αρχικού ηχητικού κύματος που θα "περάσει μέσα" από το εμπόδιο και να συνεχίσει τη διάδοσή του. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε **διέλευση**.



Εικόνα 9: Φαινόμενα κατά την ύπαρξη εμποδίου

Όταν νωρίτερα περιγράφηκε ο νόμος αντίστροφου τετραγώνου, θεωρήθηκε διάδοση χωρίς απώλειες. Σε περίπτωση που υπάρχουν φυσικά εμπόδια στο χώρο που βρίσκεται η πηγή (π.χ. τοίχοι, παράθυρα, έπιπλα, ή στην περίπτωση των αρχαίων θεάτρων το κοίλο), τότε ένα ποσοστό του κύματος ανακλάται, ένα ποσοστό απορροφάται από το εμπόδιο και ένα άλλο προσπερνάει το εμπόδιο και συνεχίζει τη διάδοσή του πίσω από αυτό, όπως προαναφέρθηκε.

Η απορρόφηση σχετίζεται άμεσα με την ανάκλαση. Όταν το 100% του κύματος απορροφάται, ανακλάται το 0%, δηλαδή όλος ο προσπίπτων ήχος απορροφήθηκε. Προκειμένου να υπάρχει μια εικόνα για τη συμπεριφορά κάθε υλικού όταν προσπίπτει σε αυτό ένα ηχητικό κύμα, ορίστηκε ο **συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$**  για  $1 \text{ m}^2$  επιφάνειας. Παίρνει τιμές από 0 (100% ανάκλαση) έως 1 (100% απορρόφηση). Καθώς ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου, είναι συνηθισμένο να δίνονται τιμές του σε 6 περιοχές συχνοτήτων και συγκεκριμένα στα 125,250,500,1000,2000,4000 Hz (οκταβική ανάλυση). Η μονάδα μέτρησής του είναι το Sabine, προς τιμήν του φυσικού Wallace Sabine, ο οποίος διεξήγαγε πειράματα σχετικά με την επίδραση της απορρόφησης στο χρόνο αντήχησης ενός χώρου.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με ενδεικτικές τιμές του συντελεστή απορρόφησης για διάφορα υλικά :



Υλικό	Συχνότητα					
	125	250	500	1000	2000	4000
Τούβλο	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Γυψοσανίδα	0.3	0.1	0.05	0.04	0.07	0.1
Ακουστικός Γύψος	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.7
Τσιμέντο βαμμένο	0.1	0.05	0.06	0.07	0.1	0.1
Ξύλινο Πάτωμα	0.4	0.3	0.2	0.2	0.15	0.1
Γυάλινη Πλάκα	0.2	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Χαλί	0.02	0.06	0.15	0.4	0.6	0.6
Πλακάκι	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Πετροβάμβακας	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8
MDF	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11
Μάρμαρο	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές δείκτη απορρόφησης για διάφορα υλικά [4]

Ως **χρόνο αντήχησης** ορίζουμε το χρόνο που περνάει από τη στιγμή που σταματήσει να εκπέμπει η ακουστική πηγή σε ένα χώρο, μέχρι η ηχητική πίεση να πάρει το 1/1.000 της αρχικής τιμής, δηλαδή να μειωθεί κατά 60 dB.

Ο χρόνος αντήχησης σε ένα χώρο μπορεί να βρεθεί με χρήση του τύπου του Sabine (που αποτελεί απλοποίηση του τύπου του Eyring) ο οποίος είναι [13] :

$$RT = 0.163 * \frac{V}{A_{tot} + 4 * m * V} \quad , \quad \text{όπου}$$

RT : Χρόνος αντήχησης σε seconds

V : Όγκος του χώρου σε m<sup>3</sup>

A<sub>tot</sub> : Συνολική απορροφητικότητα των επιφανειών του χώρου

m : απορροφητικότητα του αέρα, αν αυτή αλλάζει από τις μέσες συνθήκες (συνήθως ο δεύτερος όρος του παρονομαστή παραλείπεται).

Από τον ορισμό του χρόνου αντήχησης, διαπιστώνουμε ότι ο χώρος τον οποίο θέλουμε να μετρήσουμε θα πρέπει να έχει δυναμική περιοχή τουλάχιστον 60 dB , έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η αντήχηση από το θόρυβο. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, έχουν οριστεί και άλλοι χρόνοι αντήχησης όπως T<sub>30</sub> ( για εύρος του σήματος από τα -5 μέχρι τα -35 dB), ο αρχικός χρόνος αντήχησης (Initial Reverberation Time/IRT ή T<sub>15</sub>, από τα -5 μέχρι τα -20 dB) και τέλος ο πρώιμος χρόνος απόσβεσης (Early Decay Time/EDT ή T<sub>10</sub>, από τα 0 μέχρι τα -10 dB). [5]

Όταν ένας χώρος έχει πολύ μεγάλο χρόνο αντήχησης, αναφέρεται με τον όρο "ζωντανός" (live), ενώ στην αντίθετη περίπτωση καλείται "νεκρός" (dead). Η ακραία περίπτωση "νεκρού" χώρου είναι ο ανηχοϊκός θάλαμος, που χρησιμοποιείται

κυρίως για μετρήσεις μικροφώνων, ηχείων κλπ. Στον αντίποδα , οι ιδιαίτερα "ζωντανοί" χώροι, θολώνουν τους ήχους , καταστρέφουν τις χροιές, τις μουσικές φράσεις και το ρυθμό κάνοντας δύσκολη την κατανόηση του μουσικού έργου ή της ομιλίας.

Όταν σε έναν χώρο εκπέμπει μία ηχητική πηγή, θα έχουμε τη συνύπαρξη του απευθείας και του ήχου λόγω αντήχησης. Σε κάθε σημείο του χώρου , το τελικό αποτέλεσμα που θα λαμβάνει ο δέκτης θα είναι το άθροισμα των εντάσεων των δύο αυτών ήχων. Ο απευθείας ήχος, θα ακολουθεί τη γνωστή πτώση της έντασης κατά 6dB ανα διπλασιασμό της απόστασης καθώς θα πηγαίνουμε από την πηγή προς τον δέκτη. Η αντήχηση από την άλλη , θα έχει αποκτήσει μετά από λίγο χρόνο (λίγα ms) μία μέση, σταθερή για όλον το χώρο τιμή.

Η τιμή αυτή της αντήχησης, δίνεται από τη σχέση:

$$L_R = L_w + 10 \log \frac{4}{S * a}$$

όπου  $L_w$  ένταση της πηγής (Watt) στο 1 m

Είναι φανερό , ότι όσο πιο κοντά προχωρούμε προς την πηγή, τόσο θα υπερτερεί ο απευθείας ήχος ( $L_d$ -Level Direct), ενώ όσο απομακρυνόμαστε, τόσο θα υπερτερεί ο ανακλώμενος ( $L_r$ -Level Reflected). Θα υπάρχει λοιπόν κάποιο σημείο στο χώρο μία απόσταση από την πηγή, που οι τιμές απευθείας και ανακλώμενου ήχου θα είναι ίσες. Η απόσταση αυτή ονομάζεται κρίσιμη απόσταση ( $D_c$ -Distance Critical). [15]

Ακολουθεί ένας πίνακας με τις ενδεικνύμενες τιμές χρόνου αντήχησης για διάφορους χώρους :

Χώρος	Ελάχιστες και μέγιστες τιμές RT (sec)
Αμφιθέατρο	1.2-2.2
Εκκλησία	1-2
Κλειστό θέατρο	1-1.6
Σινεμά	1-1.4
Αίθουσα Συνεδριάσεων	0.6-1.2
Σχολική τάξη	0.6-1.2
Home Cinema	0.4-1.2
Στούντιο Ηχογράφησης	0.2-1

Πίνακας 5: Ενδεικτικοί χρόνοι αντήχησης για διάφορους χώρους<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Πηγή: <http://www.primacoustic.com>

Γενικότερα, η κατανομή των ανακλάσεων διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ακουστική ενός χώρου. Για αυτό το λόγο εκτός από τους δείκτες που αφορούν το χρόνο αντήχησης, θα γίνει λόγος και για κάποιους άλλους δείκτες στη διάρκεια αυτής της εργασίας.

Σε έναν χώρο (η αντίστοιχα και σε κάποια ηχητική συσκευή) για να ακουστεί ένας ήχος, η στάθμη του θα πρέπει να υπερβαίνει τη στάθμη του θορύβου. Ο λόγος αυτός δηλαδή η στάθμη του σήματος προς τη στάθμη του θορύβου ορίζεται ως **σηματοθορυβικός λόγος/Signal-to-Noise Ratio/SNR**. Για να βρούμε την τιμή του, αφαιρούμε της δύο τιμές αν χρησιμοποιούμε dB's ή παίρνουμε το λόγο των τιμών αν χρησιμοποιούμε Pa's ως μονάδα μέτρησης.

SNR (dB)	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 6: Αντιληπτότητα ομιλίας σε σχέση με SNR κατά ISO 9921-1

Ο δείκτης  $AI_{cons}$ /Articulation Loss of Consonants/ **Δείκτης απώλειας συμφώνων**, αφορά μία αντικειμενική εκτίμηση για την καταληπτότητα του λόγου και μετράει το ποσοστό επί τοις εκατό των συμφώνων που δεν αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής σε ένα χώρο. Εξάρταται κυρίως από τον χρόνο αντήχησης και το SNR του χώρου, και δευτερευόντως από την απόσταση από την πηγή.

$AI_{cons}$ (%)	Καταληπτότητα λόγου
<3	Εξαιρετική
3-7	Καλή
7-15	Ανεκτή
15-33	Φτωχή
>33	Ακατάληπτος Λόγος

Πίνακας 7 : Αξιολόγηση καταληπτότητας λόγου συναρτήση του δείκτη  $AI_{cons}$  [15]

Ο STI/Speech Transmission Index/**Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας** αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, αφορά την καταληπτότητα του λόγου και παίρνει τιμές στο διάστημα 0-1. Εκφράζει τη συμπεριφορά του υπό μελέτη χώρου σε ακουστικά τμήματα διαμορφωμένα κατά πλάτος, που μεταδίδονται στο χώρο. Για παράδειγμα, ένα σήμα ομιλίας χάνει ένα ποσοστό του βάθους διαμόρφωσης λόγω αντήχησης και έτσι μειώνεται η καταληπτότητά του.

STI	Καταληπτότητα λόγου
0.00-0.30	Κακή
0.30-0.45	Φτωχή
0.45-0.60	Ανεκτή
0.60-0.75	Καλή
0.75-1.00	Εξαιρετική

Πίνακας 8: Αξιολόγηση καταληπτότητας λόγου συναρτήσει του STI [7]

Συναφής του STI είναι ο RASTI/Room Acoustics Speech Transmission Index/ **Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας Ακουστικής Δωματίου**. Ο σκοπός του είναι να πλησιάσει τον STI, σε συνθήκες που αφορούν την ακουστική κλειστών χώρων. Ο συγκεκριμένος δείκτης αρχικά αναπτύχθηκε προκειμένου να ελαττώσει τον χρόνο επεξεργασίας και έκδοσης του τελικού αποτελέσματος. Η καταληπτότητα της ομιλίας σε έναν κλειστό χώρο μπορεί να υπολογιστεί από την κρουστική απόκριση, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Όπως έχει αποδείξει ο Schroeder, το αποτέλεσμα της παραμέτρου MTF (Modulation Transfer Function), υπολογισμένο για τη συνολική απόκριση, δίνει την καταληπτότητα ομιλίας κατά RASTI. Η παράμετρος MTF δίνεται από την ακόλουθη σχέση [16]:

$$MTF = \frac{\sum_{n=0}^M h(n)^2 e^{-j2\pi f n T}}{\sum_{n=0}^M h(n)^2}$$

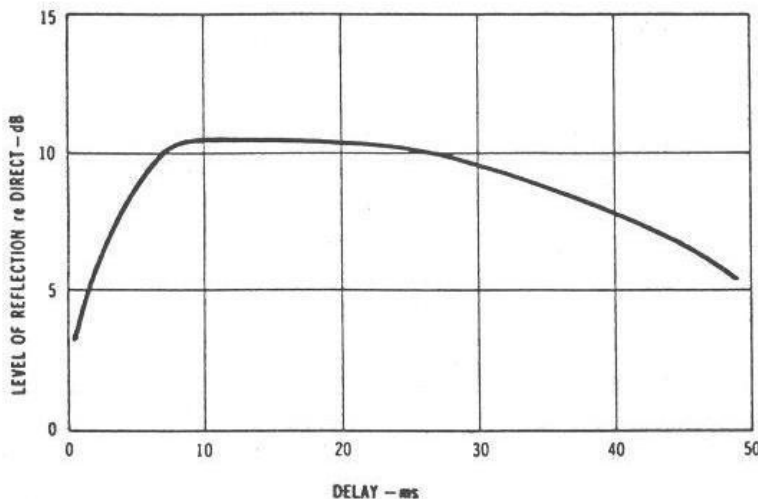
Η **ευκρίνεια**, που μετράται σε decibels, ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ηχητικής ενέργειας στα πρώτα 80 msec και της ενέργειας της μετέπειτα ανάκλασης που καταφθάνει μετά τα πρώτα 80 msec. Συνήθως αυτός ο δείκτης αναφέρεται ως  $C_{80}$ . [18] και αφορά κυρίως την ακρόασης μουσικής. Ως κριτήριο για την ομιλία υπάρχει ο δείκτης  $C_{50}$ , που αναφέρεται στη διαφορά ενέργειας μετά τα πρώτα 50 msec. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα 50 msec επιλέχθηκαν καθώς έχουν να κάνουν με την θετική επίδραση των πρώτων ανακλάσεων (φαινόμενο Haas).

Κάποια συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί για την ευκρίνεια είναι :

- Οι πολλές λεγόμενες "πρώτες ανακαλάσεις" επιδρούν αρνητικά στην ευκρίνεια
- Όσο πιο νωρίς έρχεται μία ανάκλαση (>10 msec) τόσο πιο καταστρεπτική είναι
- Όταν σε ένα χώρο έχουμε κακή ευκρίνεια, το να απορροφήσουμε ή να στρέψουμε μακριά από τον ακροατή τις δυνατές πρώτες ανακλάσεις έχει πολύ θετικά αποτελέσματα.
- Παρομοίως, το να προσθέσουμε απορροφητές στην περιοχή της σκηνής σε ένα θέατρο, βοηθάει στην αύξηση της ευκρίνειας στο ακροατήριο. [19]

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η διάγυγεια δεν είναι το ίδιο με την καταληπτότητα. Όταν ο ήχος δεν είναι διαγυγής, οι λέξεις μπορεί να είναι αναγνωρίσιμες, αλλά πιθανόν να μη μπορεί το ακροατήριο να συγκρατήσει το τί ακούει.

Από πειράματα που πραγματοποίησε ο Helmut Haas, αποδείχθηκε ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των χρονικών διαφορών των αφίξεων των ήχων και των σχετικών τους εντάσεων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο προβαδίσματος, ή **φαινόμενο Haas**. Τα πειράματα (που περιλάμβαναν ακροατήριο το οποίο καθόταν ανάμεσα σε 2 μεγάφωνα και κατέγραφε τα αποτελέσματα που έφταναν στα αυτιά του) έδειξαν το κατά πόσο ο δεύτερος (ανακλώμενος) ήχος θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ένταση από τον πρώτο (απευθείας), για να έχουν οι δύο αφίξεις την ίδια ακουστότητα. Σαν αποτέλεσμα, κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 10: Το φαινόμενο Haas. Στον κάθετο άξονα έχουμε τη στάθμη της διαφοράς απευθείας/ανακλώμενου ήχου και στον οριζόντιο την καθυστέρηση<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Πηγή: <http://jac.michaeldrolet.net/acoustics>

Για μικρές καθυστερήσεις (μέχρι 30 msec), η ακοή αναγνωρίζει με δυσκολία την ύπαρξη του καθυστερημένου ήχου, δίνοντας την εντύπωση ότι ο πρώτος ήχος διαρκεί περισσότερο (όσο περίπου και η διαφορά). Με την αύξηση αυτού του χρόνου (πάνω από 50 msec) , ο δεύτερος ήχος γίνεται πιά καθαρά αντιληπτός και χρειάζεται να μειωθεί αισθητά η έντασή του, ώστε να μη γίνεται σύγχυση με τον πρώτο (fusion zone). [20] Αυτή η ιδιότητα της ακοής , προφανώς διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ακουστική είτε κλειστών ,είτε ανοιχτών χώρων.

## 2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

### 2.1 Αρχιτεκτονική και Ακουστική Αρχαιοελληνικού Θεάτρου

Το αρχαιοελληνικό θέατρο είχε πολύ μοναδικό σχεδιασμό, σε βαθμό που να μη μοιάζει με κανένα άλλο αρχαίο θέατρο παγκοσμίως. Αρχικά, χτίζονταν προκειμένου να πραγματοποιούνται θρησκευτικές τελετές και στη συνέχεια άρχισαν να φιλοξενούν παραστάσεις.

Συνήθως βρίσκονταν κοντά στα κέντρα της κοινωνικής ζωής, την ακρόπολη (Αθήνα, Λάρισα, Άργος), την αγορά (Μαντίνεια, Κόρινθος, Μεσσήνη, Σίδη), το στάδιο (Δελφοί, Ρόδος) το βουλευτήριο (Μεγαλόπολη, Δωδώνη), τα ιερά (Επίδαυρος, Δελφοί, Ωρωπός). Κοντά βρίσκεται και το ρωμαϊκό ωδείο (Αθήνα, Άργος, Κόρινθος, Νικόπολη). Συχνά σχετίζονται με την οχύρωση (Δωδώνη) και με οχυρωματικού χαρακτήρα αναλήμματα (Ν. Πλευρώννα). Φιλοξενούσαν και άλλες λειτουργίες όπως συνεδριάσεις, μουσικούς αγώνες, χορούς. [21]

Το θέατρο αποτελούνταν από τρία βασικά μέρη:

- Το κοίλον
- Την ορχήστρα
- Τη σκηνή

Το **κοίλο** προορίζεται για το κοινό και συχνά έχει μεγάλη χωρητικότητα (έως και 25.000). Διαμορφώνεται συνήθως με τμήμα κώνου, που υπερβαίνει το ημικύκλιο. Αυτό απαιτεί ψηλά αναλήμματα στο άκρο του, που αντιστηρίζουν σωρευμένους όγκους χωμάτων, είτε μεγάλες τομές εδάφους. Σε βραχώδεις λόφους, συχνά οι επάνω απολήξεις του είναι ανισοϋψείς (όπως στην περίπτωση του Άργους). Το κοίλο διαιρείται συνήθως σε τμήματα με τα διαζώματα, διαδρόμους οριζόντιους, παρεμβαλλόμενους στις σειρές των εδωλίων. Το κάτω τμήμα ονομάζεται θέατρο και το επάνω επιθέατρο. Άλλοτε συναντάμε ένα επιθέατρο και άλλοτε δύο. Συχνά αυτά είναι προσθήκες. Ακτινωτά από την ορχήστρα, οι κλίμακες διατρέχουν το κοίλο καθ' όλο του το ύψος, διαιρώντας το σε τομείς, τις κερκίδες. Πολλά επιθέατρα έχουν πρόσθετες ενδιάμεσες κλίμακες. Η δημιουργία μεγαλύτερων των 180° κοίλων και η διεύρυνση της καμπυλότητας εξυπηρετούν την αναβάθμιση του ρόλου της σκηνής, αλλά και ακουστικές ανάγκες. Την κυκλική ορχήστρα περιβάλλει συνήθως κυκλικής χάραξης κοίλο. Οι δύο κύκλοι είτε είναι ομόκεντροι, είτε όχι. Στη δεύτερη περίπτωση το κέντρο του κύκλου του κοίλου μετατοπίζεται αξονικά προς τη σκηνή και μεγαλώνει προς την πλευρά αυτή η απόσταση ορχήστρας- εδωλίων. Οι προσβάσεις στο κοίλο γίνονται από τις παρόδους ή τα διαζώματα. Οι πάροδοι μεταξύ κοίλου και σκηνής, οδηγούν στην ορχήστρα. Από αυτές εισέρχεται ο χορός

(το τραγούδι που τραγουδά κατά της διάρκειας της εισόδου ονομάζεται πάροδος). Τα διαζώματα , όπου υπάρχουν, εξυπηρετούν την κίνηση των θεατών. Στην περίπτωση του Άργους συναντάμε τρία διαζώματα. Τα καθίσματα (εδώλια) είναι μαρμάρινα ή λίθινα. Συχνά το κοίλο λαξεύεται στο βράχο είτε σε μικρό, είτε σε μεγαλύτερο βαθμό. Ορισμένα θέατρα πιθανόν να έφεραν και ξύλινα εδώλια. Η πρώτη σειρά εδωλίων ονομάζεται προεδρία.

Η **ορχήστρα** κατασκευάζεται ως ένας πλήρης κύκλος. Σε αυτή υπήρχε βωμός για θυσίες, η θυμέλη, στην οποία αργότερα ανέβαινε ο Κορυφαίος του Χορού . Σε πολλά θέατρα στο κέντρο της ορχήστρας υπήρχε η Χαρώνειος κλίμακα , η οποία επικοινωνούσε με υπόγειο διάδρομο με τη σκηνή ή το προσκήνιο. Χρησίμευε για την εμφάνιση χθόνιων θεοτήτων ή για την κάθοδο των νεκρών στον κάτω κόσμο. Το δάπεδο της ορχήστρας διαμορφώνεται με πατημένη γη ή πλακόστρωση με κανονικές ή ακανόνιστες πλάκες. Ορθογώνιοι αγωγοί γύρω από την ορχήστρα αποχετεύουν τα νερά , είτε ανοιχτοί, είτε σκεπαστοί, είτε με μερική κάλυψη. Γύρω απ την ορχήστρα υπάρχει διάδρομος, για την κίνηση θεατών, συχνά διευρυνόμενος προς τις παρόδους. Άλλοτε τοποθετείται μεταξύ ορχήστρας και προεδρίας ή εδωλίων και άλλοτε μεταξύ προεδρίας και εδωλίων.

Η **σκηνή** είναι χαμηλό ορθογωνικό κτίριο, ανεξάρτητο, στο πίσω μέρος της ορχήστρας. Το αρχικό θέατρο δεν είχε ανάγκη σκηνής. Την επέβαλε η πρόοδος του δράματος. Στην αρχαϊκή περίοδο υπήρχε ένας ηθοποιός (υποκριτής), ο οποίος συνδεόταν με το Χορό ή ανταποκρινόταν. Ο Αισχύλος αύξησε τους ηθοποιούς σε δύο και ο Σοφοκλής σε τρεις. Βαθμιαία ο λόγος σε βάρος του λυρικού μέρους και οι ρόλοι αυξάνονται, απαιτούνται πλέον κοστούμια, προσωπεία, κ.λ.π. και μία εγκατάσταση δίπλα στην ορχήστρα.

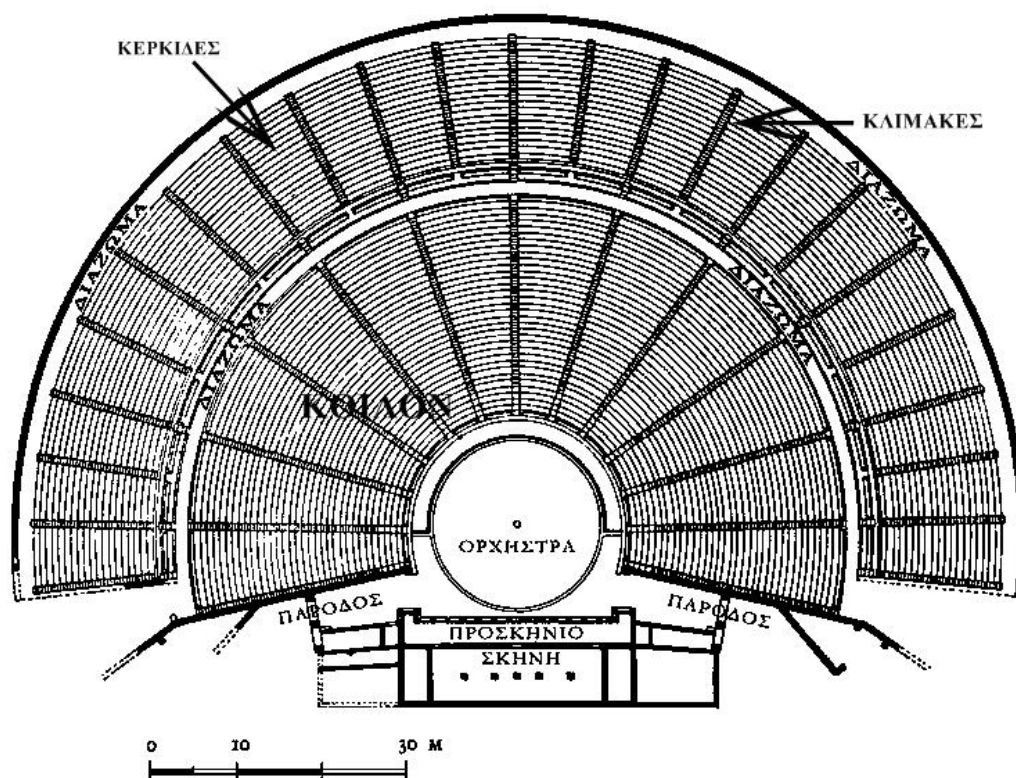
Κατ' αρχήν ξύλινες, αντικαταστάθηκαν αργότερα, κυρίως τον 3ο και 2ο αιώνα κατά το πλείστον με λίθινες. Τα ερείπια δείχνουν ποικιλία σκηνών, με δύο επικρατέστερους τύπους. Ένας, παλαιότερος, με συνήθως ελαφρά υπερυψωμένη εξέδρα και παραπλεύρως παρασκήνια. Δεύτερος αυτός με προσκήνιο, ορθογωνική εξέδρα προς την ορχήστρα, στο επάνω επίπεδο της οποίας ανέβαιναν οι ηθοποιοί. Στους κλασικούς χρόνους οι υποκριτές έπαιζαν στην ορχήστρα μαζί με το χορό. Καθιερώνεται από την σταδιακή υποβάθμιση του χορού, μέχρι και την απουσία του με τη νέα κωμωδία. Μετά το 350 π.Χ. επιβάλλεται για καλύτερη προβολή των ηθοποιών. Επιπλέον των παραστάσεων της νέας κωμωδίας, πολλές κλασικές τραγωδίες αναβίωσαν. Έτσι η Ελληνιστική σκηνή πρέπει να παρέχει πολλές δυνατότητες.

Η όψη της σκηνής προς το προσκήνιο ονομάζεται και αυτή σκηνή. Το ισόγειο έχει τρεις πόρτες, που δεν χρησιμοποιούνται πάντα. Ο όροφος ονομάζεται λογειόν, η όψη του έχει μία ή τρεις πόρτες ή διαμορφώνεται με πεσσούς ή κίονες (θυρώματα), επί των οποίων στερεώνονται σκηνικά. Ορισμένες φορές υπάρχει και 3ος όροφος, το θεολογείο. Ο Ευριπίδης απ' αυτό, εμφάνιζε τους θεούς, που παρενέβαιναν στην υπόθεση. Ο Αισχύλος παρουσίαζε ηθοποιούς από επίπεδη οροφή της ξύλινης σκηνής.



Η σκηνή φέρει δίπλα της παρασκήνια, χώρους αποθήκευσης και εξυπηρέτησης των ηθοποιών. Η διώροφη σκηνή προς την ορχήστρα φέρει στενό ορθογωνικό προσκήνιο, μήκους περίπου όσο η διάμετρός της, ύψους όσο ο πρώτος όροφος. Αυτό φέρει προς την ορχήστρα κιονοστοιχία. Αρχικά ξύλινο, που κατά ορισμένους στους κλασικούς χρόνους αφαιρείτο κατά τη διδασκαλία της τραγωδίας. Από τον 3ο αιώνα καθιερώνεται και στην τραγωδία. Στα Ελληνιστικά χρόνια ήταν λίθινο. Με κιονοστοιχία στην όψη, συνήθως με ημικίονες σε ορθογωνικούς πεσσούς στα ανοίγματα της οποίας τοποθετούνται πίνακες.

Φέρει επιστήλιο και ζωφόρο, συχνά με επιγραφές. Ο αριθμός των μετακινίων ήταν μονός. Το κεντρικό και δύο ακραία έμεναν ανοικτά. Στο θριγκό εδράζονταν ξύλινες ή λίθινες δοκοί, που έφεραν το δάπεδο του προσκηνίου, όπου η πρόσβαση ηθοποιών γίνεται συχνά από τα πλάγια, με κεκλιμένα επίπεδα. Επίστε πίσω απ' τη σκηνή υπάρχει στοά. [22]



Εικόνα 11: Κάτοψη αρχαίου θεάτρου

Η ακουστική των αρχαίων ελληνικών θεάτρων θεωρείται μέχρι τις μέρες μας πρωτοφανής και εξαιρετική. Ένα στοιχείο που συμβάλλει σε αυτό είναι η κυκλική διαμόρφωση και η κλίση του κοίλου. [23] Η θεωρία περί ομοιόμορφης διάδοσης του ήχου και η παρατήρηση ότι κυκλική διάταξη είναι που αυτή που υποχρεώνει το κοινό σε μία συγκέντρωση στα δρώμενα του κέντρου, διαμόρφωσε το σχεδιασμό του κυκλικού κοίλου, που αντικατέστησε τις πρώιμες δομές των ευθύγραμμων βαθμίδων. Η δε κλίση του κοίλου είναι βασισμένη στη θεωρία περί καθ' ύψους διάδοσης του ήχου, όσο και στην παρατήρηση ότι η μη οτική επαφή οδηγούσε σε

κακή ακρόαση. Ακόμα, η εκμετάλλευση των ευεργετικών στοιχείων που προσφέρουν στον ήχο οι ανακλάσεις είναι χαρακτηριστικό της ακουστικής των αρχαίων θεάτρων. Όταν ο ηθοποιός βρίσκεται στο μπροστινό μέρος της ορχήστρας κοντά δηλαδή στους θεατές, ο ήχος που εκπέμπεται φτάνει σε αυτούς απ' ευθείας, χωρίς ανακλάσεις. Αν μετακινηθεί προς το κέντρο της ορχήστρας, τότε εκτός από τον απευθείας ήχο, φθάνει σε πολύ σύντομο διάστημα και ο ήχος από ανάκλαση στο δάπεδο της ορχήστρας και εμπλουτίζει τον απευθείας ήχο. Αν ο ηθοποιός μετακινηθεί ακόμα πιο πίσω, προστίθεται και η ανάκλαση της φωνής από τη σκηνή, με όλες τις ανακλάσεις να φτάνουν σε διάστημα μικρότερο των 20ms, οπότε είναι ευεργετικές (μελέτη Haas). Εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η διάχυση του ήχου στο χώρο από τα ίδια τα καθίσματα, αλλά και από τους θεατές, όταν το θέατρο είναι γεμάτο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα θέατρα, παρόλο που όπως προαναφέρθηκε ήταν χτισμένα κοντά στα κέντρα κοινωνικής ζωής, βρίσκονταν σε τέτοια απόσταση, ώστε να διασφαλίζεται η ησυχία του χώρου, καθώς και η προστασία του από ισχυρούς ανέμους και από φαινόμενα ηχούς (μακριά από ογκώδεις επιφάνειες).

## 2.2 Ιστορικά στοιχεία για την πόλη και το αρχαίο θέατρο του Άργους

Το Άργος βρίσκεται στην Πελοπόννησο και πιο συγκεκριμένα στο βορειοδυτικό τμήμα της. Ανήκει στο νομό Αργολίδας, του οποίου έχει υπάρξει και πρωτεύουσα και μάλιστα θεωρείται από τις αρχαιότερες πόλεις της Ευρώπης, γεγονός που πιστοποιούν τα πολλά αρχαιολογικά ευρήματα που χρονολογούνται από την Ύστερη εποχή του Χαλκού. Το όνομά της εικάζεται ότι προήλθε από τον βασιλιά Άργο που αντικατέστησε την προηγούμενη ονομασία "Φορωνικόν Άστυ" αλλά μία θεωρία προτείνει την αντιστοιχία με τη λέξη "άργος" που σήμαινε "λευκός" και σχετίζεται με την οπτική εντύπωση που δημιουργούσε το ανρίκρισμα της αργολικής πεδιάδας.

Στην ευρύτερη περιοχή της σημερινής πόλης, συναντούμε την πρώτη ανθρώπινη παρουσία στο τέλος της 3<sup>ης</sup> π.Χ χιλιετίας, στη νεολιθική εποχή. Από τότε κατοικείται αδιάλειπτα κτιζόμενη ξανά και ξανά στην ίδια γεωγραφική θέση που κατέχει μέχρι σήμερα, με πρώτους κατοίκους της να θεωρούνται οι Πελασγοί. Μεγάλη σημασία στην ανάπτυξη του Άργους έπαιξε η κομβική του θέση ανάμεσα στη Νεμέα, την Κορινθία και την Αρκαδική ενδοχώρα, ενώ ευνοήθηκε επίσης και από τη λίμνη της Λέρνας, η οποία έφτανε την τότε εποχή σε απόσταση ενός χιλιομέτρου νότια της πόλης.

Οι Πελασγοί κληροδότησαν στην πόλη πολλές ονομασίες όπως προαναφέρθηκε, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη λέξη "Λάρισα", το όνομα του κάστρου που δεσπόζει στον ομώνυμο λόφο της πόλης, που σημαίνει "ακρόπολη", περιοχή στην οποία υπήρχε και το ιερό της θεάς Ήρας της Ακραιάς. Στη Μυκηναϊκή εποχή, το Άργος αποτέλεσε μαζί με τις Μυκήνες και την Τίρυνθα σημαντική εγκατάσταση με στρατηγική θέση στην εύφορη Αργολική πεδιάδα. Η πόλη διέθετε το δικό της

νόμισμα και έφτασε στο απόγειο της ισχύος της κατά τον 7ο αιώνα π.Χ. υπό την τυραννία του Φεΐδωνα, οπότε και υπερείχε των άλλων Πελοποννησιακών πόλεων, κυρίως δε της Σπάρτης. Κατά την περίοδο αυτή, στην πόλη λειτούργησε σχολή γλυπτικής και χαλκοπλαστικής ενώ αξιόλογα ήταν και τα κεραμοποιεία, τα βυρσοδεψεία αλλά και οι βιοτεχνίες ετοιμών ενδυμάτων που έφτιαχναν ρούχα σε πλούσια ποικιλία σχεδίων και χρωμάτων. Χαρακτηριστικό δε είναι ότι κατά τακτά διαστήματα, διοργανωνόταν έκθεση με τα προϊόντα της αργολικής γης. Στο αρχαίο Άργος υπήρχε επίσης πλήθος εορτασμών, κρίνοντας από τις τουλάχιστον 25 γιορτές που έχουν καταγραφεί.

Η αποδυνάμωση και η απώλεια του γοήτρου του Άργους επήλθε αργότερα, αφενός με την άρνησή του να παρέχει προμήθειες και να συμμετάσχει στους Ελληνο-Περσικούς πολέμους και αφετέρου, με την ουδέτερη στάση που διατήρησε αργότερα, κατά τον Πελοποννησιακό Πόλεμο. Στη χρονική περίοδο αυτή αρχίζει η παρακμή και του εμπορικού χαρακτήρα της πόλης και η αλλαγή του πολεοδομικού ιστού της, ιδίως λόγω της επιδρομής των Γόθων το 396, με την αρχαία αγορά να παύει να αποτελεί σημείο συνάντησης και την κίνηση της πόλης να μεταφέρεται στην ανατολική συνοικία.

Επί τουρκοκρατίας και πριν την επανάσταση, η πόλη του Άργους ήταν χωρισμένη σε τέσσερις μαχαλάδες. Την περίοδο αυτή αρχίζει να διαμορφώνεται το παζάρι, βόρεια από τους στρατώνες του Καποδίστρια, στο σημείο όπου πραγματοποιείται ακόμα και σήμερα. Σύμφωνα, μάλιστα, με την πολεοδομία των οθωμανικών πόλεων, στο χώρο αυτό βρισκόταν και το κεντρικό τζαμί.

Η δόμηση του Άργους είναι την εποχή αυτή άναρχη, με τα σπίτια να κατασκευάζονται, όπως παρατηρεί και ο περιηγητής Φρανσουά Πουκεβίλ, "χωρίς ευθυγραμμία, χωρίς τάξη, πεταμένα εδώ και εκεί, χωρισμένα από αυλές και ακαλλιέργητες εκτάσεις". Ο Λιεπούρ μαχαλάς παρουσιάζει μεγαλύτερη κανονικότητα, με την ύπαρξη μεγαλύτερων δρόμων και οικοδομικών νησίδων, αντίθετα από τη δαιδαλώδη μορφή των μαχαλάδων Μπεκήρ Εφέντη και Καραμουτζά. Και στις τέσσερις γειτονιές, ωστόσο, παρατηρούνταν τρεις μορφές δρόμων. Αυτές περιλάμβαναν τους κύριους δρόμους, με καθαρά δημόσιο χαρακτήρα, που εξασφάλιζαν επικοινωνία μεταξύ των συνοικιών (όπως κατά προσέγγιση οι σημερινές οδοί Κορίνθου, Ναυπλίου και Τριπόλεως), τους δευτερεύοντες δρόμους που οδηγούσαν στο εσωτερικό των μαχαλάδων, με ημιδημόσιο χαρακτήρα, και την τρίτη κατηγορία δρόμων, δηλαδή τα αδιέξοδα δρομάκια πρόσβασης στο εσωτερικό οικοδομικών νησίδων με ιδιωτικό χαρακτήρα, που εξυπηρετούσαν κατοικίες μιας ευρείας οικογένειας. Κατάλοιπα της διαρρύθμισης αυτής είναι φανερά ακόμα και σήμερα στη δομή του Άργους, αφού χαρακτηρίζεται από λαβυρινθώδεις δρόμους, σοκάκια και πυκνοδομημένα σπίτια.

Η πόλη παρέμεινε υπό οθωμανικό έλεγχο (με εξαίρεση τη ενετοκρατία του 1687–1715) μέχρι την Επανάσταση του '21. Μετά την κήρυξη της επανάστασης, οι πλούσιες οθωμανικές οικογένειες μετακόμισαν στο Ναύπλιο, θεωρώντας τα τείχη του ασφαλέστερα. Ύστερα από μια βραχεία περίοδο αυτοδιοίκησης του από το

Σταματέλλο Αντωνόπουλο, αποτέλεσε την έδρα της Α΄ Εθνοσυνέλευσης της Επιδαύρου και αργότερα εντάχθηκε στο Βασίλειο της Ελλάδας.

Με την άφιξη του Καποδίστρια, γίνονται προσπάθειες ώστε το Άργος, ένα μικρό, αγροτικό χωριό, να εκσυγχρονιστεί και έτσι, ανατίθεται το 1828 στο μηχανικό και αξιωματικό του γαλλικού στρατού Σταμάτη Βούλγαρη η εκπόνηση ενός πολεοδομικού σχεδίου της πόλης, που περιλάμβανε τη δημιουργία πλατειών και τη χάραξη δρόμων. Εντούτοις, τόσο αυτό το σχέδιο όσο και το επόμενο, από το Γερμανό στρατιωτικό ντε Μποροζίν, δε χαίρουν ιδιαίτερης εκτίμησης από τους κατοίκους και υπόκεινται σε αναθεωρήσεις, μέχρι που η εκδοχή του αρχιτέκτονα Λάμπρου Ζαβού εφαρμόζεται μερικώς, χωρίς ωστόσο ιδιαίτερες παρεκκλίσεις από τον προεπαναστατικό ιστό.

Λίγο μετά την ανακοίνωση της μεταφοράς της ελληνικής πρωτεύουσας από το Ναύπλιο, μεγάλη έκταση απέκτησε το ενδεχόμενο να γίνει το Άργος πρωτεύουσα αντί της επίσης υποψήφιας Αθήνας. Μάλιστα, οι κάτοικοι του Ναυπλίου υποστήριζαν την πρόταση αυτή, θεωρώντας το Άργος πόλη ασφαλέστερη και πιο προνομιούχα, με φυσική φρούρηση και κοντινό λιμάνι που λειτουργούσε ως φυσικό οχύρωμα. Επίσης, επικαλούνταν ως λόγο και το γεγονός ότι στην Αθήνα, η πλειοψηφία της κρατικής γης ανήκε στην Εκκλησία, άρα η ανέγερση οποιουδήποτε κρατικού κτιρίου θα απαιτούσε απαλλοτριώσεις, κάτι που δεν ίσχυε στο Άργος που κατείχε άφθονες διαθέσιμες εκτάσεις. Ωστόσο, η ιδέα του Άργους ως πρωτεύουσα απορρίφθηκε από τον πατέρα του Όθωνα, Λουδοβίκο, που επέμενε στην πρόταση του που χάριζε τον τίτλο στην Αθήνα.

Η σπουδαιότητα του πολιτισμού του Άργους φαίνεται και από τα έπη του Ομήρου στα οποία όλοι οι Έλληνες (ακόμα και η Ωραία Ελένη) αποκαλούνται "Αργείοι" . Ίσως διότι όλοι οι βασιλικοί οίκοι της Ελλάδος προέρχονται από το Άργος συμπεριλαμβανομένων και των οίκων των Μακεδόνων. Επίσης η σημαντική θέση του Αργειακού πολιτισμού φαίνεται και από τους τραγικούς ποιητές των οποίων πολλές τραγωδίες αναφέρονται στο Άργος· τα εφάμιλλα της Ιλιάδας χαμένα έπη "Θηβαΐς" και "Επίγονοι", ίσως του Ομήρου, κάνουν επιπλέον μνεία για το κλέος του αρχαίου Άργους. Από το Άργος κατάγονται δύο από τους μεγαλύτερους ήρωες της ελληνικής μυθολογίας, ο Περσέας και ο Ηρακλής. Η τραγωδία του Ευριπίδη "Ηρακλής" αρχίζει επίσης με αναφορά στην εξ Άργους καταγωγή του ήρωα.

Τέλος ακολουθούν κάποια στοιχεία για τα πολιτιστικά μνημεία του Άργους και φυσικά για το αρχαίο θέατρο του.

Το κάστρο της Λάρισας, οικοδομημένο κατά τους προϊστορικούς χρόνους, το οποίο επισκευάστηκε και επεκτάθηκε αρκετές φορές από την αρχαιότητα και έπαιξε σημαντικό ιστορικό ρόλο κατά την Ενετοκρατία και την Ελληνική Επανάσταση του 1821. Βρίσκεται στην κορυφή του φερώνυμου λόφου, που αποτελεί και το ψηλότερο σημείο της πόλης (289 μ.). Στην αρχαιότητα υπήρχε κάστρο και στο γειτονικό λόφο της Ασπίδος, το οποίο ωστόσο δε διασώζεται. Συνδεόμενα με τείχη, τα δύο αυτά κάστρα οχύρωναν την πόλη και την προστάτευαν από εχθρικές επιδρομές.

Η Αρχαία Αγορά, πλησίον του Αρχαίου Θεάτρου, διαμορφώθηκε τον 6ο αιώνα π.Χ. σε κεντρικό σημείο όπου κατέληγαν οδοί από την Κόρινθο, το Ηραίο και την Τεγέα. Στο χώρο έχουν εκσκαφεί Βουλευτήριο, που κατασκευάστηκε το 460 π.Χ. όταν το Άργος υιοθέτησε το δημοκρατικό πολίτευμα, Ιερό του Λυκείου Απόλλωνα και παλαίστρα, μεταξύ άλλων. Το "Κριτήριο"-Νυμφαίο του Άργους, ένα αρχαίο μνημείο στη νοτιοδυτική μεριά της πόλης, στους πρόποδες της Λάρισας, το οποίο πήρε τη σημερινή του μορφή από τον 6ο ως τον 3ο αιώνα π.Χ. Χρησίμευσε αρχικά ως δικαστήριο του αρχαίου Άργους, παρόμοιο με τον Άρειο Πάγο της Αθήνας. Εκεί, κατά τη μυθολογία, δικάστηκε η Υπερμνήστρα, μία από τις 50 κόρες του Δαναού, του πρώτου βασιλιά του Άργους. Αργότερα, επί βασιλείας του Αδριανού, δημιουργήθηκε στο χώρο κρήνη για την περισυλλογή και διοχέτευση νερού από το Αδριάνειο Υδραγωγείο που βρισκόταν βόρεια της πόλης. Ο χώρος συνδέεται με πλακόστρωτο μονοπάτι με το αρχαίο Θέατρο<sup>6</sup>.

Το **αρχαίο θέατρο του Άργους**, χωρητικότητας περίπου 20.000 θεατών, συγκαταλέγεται στα μεγαλύτερα αρχαία θέατρα στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τις αρχαιολογικές έρευνες, κατασκευάστηκε έτσι ώστε να φιλοξενήσει τους αγώνες μουσικής και δράματος των πανελλήνιων αγώνων των Νεμέων. Βρίσκεται στους πρόποδες της νοτιοανατολικής πλευράς του λόφου του κάστρου, σε σημείο που συνδεόταν με την αγορά, δέσποζε πάνω από την αρχαία πόλη και ήταν ορατό από τον Αργολικό κόλπο. Το θέατρο οικοδομήθηκε κατά την ελληνιστική εποχή, στις αρχές του 3ου αι. π.Χ. και αντικατέστησε το παλαιότερο της πόλης, που βρισκόταν περίπου 100 μ. νοτιότερα και είχε κτιστεί τον 5ο αι. π.Χ. από τον Πολύκλειτο.

Το κοίλο του θεάτρου είναι στο μεγαλύτερο μέρος του λαξευμένο στο βράχο και χωριζόταν με δύο διαζώματα σε τρία οριζόντια τμήματα και με κλίμακες σε τέσσερις κερκίδες, που αντιστοιχούσαν στις φυλές του Άργους. Στο κεντρικό τμήμα του, είναι λαξευμένες στο βράχο 83 σειρές εδωλίων, ενώ περίπου στο μέσο του συμπληρώνεται και στις δύο πλευρές με πρόσθετες σειρές εδωλίων. Η ορχήστρα ήταν επίσης στο μεγαλύτερο μέρος της λαξευμένη στο βράχο. Αρχικά ήταν κυκλική, με διάμετρο 26 μ. και στο κέντρο της δημιουργήθηκαν δύο ανάγλυφες κατασκευές, ένας κύκλος και δύο εφαπτόμενες γραμμές για την καθοδήγηση των μετακινήσεων των χορών: κυκλικών στους διθυράμβους και ευθύγραμμων στις τραγωδίες και κωμωδίες. Το σκηνικό οικοδόμημα στην αρχική του μορφή ήταν κτισμένο με καλά επεξεργασμένους ασβεστόλιθους. Περιλάμβανε το προσκήνιο, τη σκηνή πάνω από τα αποδυτήρια στο ισόγειο και μία στοά στην πρόσοψη.

Στα ρωμαϊκά χρόνια, κυρίως το 2ο αι. μ.Χ., την εποχή του αυτοκράτορα Αδριανού, το μνημείο επαναδιαμορφώθηκε. Πλέον φιλοξενούνταν διάφοροι εορτασμοί καθώς και θεάματα, όπως κυνήγι θηρίων ή μονομαχίες, που είχαν ως αποτέλεσμα την αλλαγή τόσο της ορχήστρας όσο και της σκηνής. Στο πρώτο μισό του 2ου αι. μ.Χ. το σκηνικό οικοδόμημα, επεκτάθηκε προς τα δυτικά, καλύπτοντας μέρος της ορχήστρας, ενώ το προσκήνιο μετατράπηκε σε διώροφο λογείο. Για την προστασία των θεατών από τον ήλιο τοποθετήθηκε ένα ύφασμα πάνω από τμήμα του κοίλου και για την ασφάλειά τους κατά τα θεάματα, ένα δίκτυ μπροστά στην προεδρία, και τα δύο στηριγμένα σε εσοχές λαξευμένες στο βράχο. Τον 3ο αι. μ.Χ. προστέθηκε μία

---

<sup>6</sup> Πηγή: wikipedia.com



εξέδρα με τρία μαρμάρινα καθίσματα για τους επισημότερους θεατές, όπως τον αντιπρόσωπο του αυτοκράτορα ή τους οργανωτές των θεαμάτων, και τον 4ο αι. μ.Χ. κατασκευάστηκε στην ορχήστρα μία τεχνητή λίμνη για αθλοπαιδιές στο νερό και παραστάσεις ναυμαχιών. Το θέατρο εγκαταλείφθηκε οριστικά στο τέλος του 4ου αι. μ.Χ.

Το μνημείο παρέμεινε ορατό στους επόμενους αιώνες και σχεδόν όλοι οι περιηγητές το αναφέρουν στις αφηγήσεις τους, ενώ πολλοί το σχεδίασαν. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι, όταν στις 15 Ιουλίου 1829 πραγματοποιήθηκε σε αυτό η 4η Εθνοσυνέλευση του νέου ελληνικού κράτους, που οργάνωσε ο Ι. Καποδίστριας. Η ανασκαφική έρευνα του θεάτρου πραγματοποιήθηκε από τη Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή Αθηνών κατά τα έτη 1890, 1930, 1954-56, 1981-82 και 1986-8, ενώ το 2004 ολοκληρώθηκε το έργο για τη στερέωση, αναστήλωση και αποκατάστασή του. Σήμερα ο χώρος του θεάτρου χρησιμοποιείται περιστασιακά για διάφορες πολιτιστικές εκδηλώσεις. [24]



Εικόνα 12: Άποψη του αρχαίου θεάτρου σήμερα<sup>7</sup>

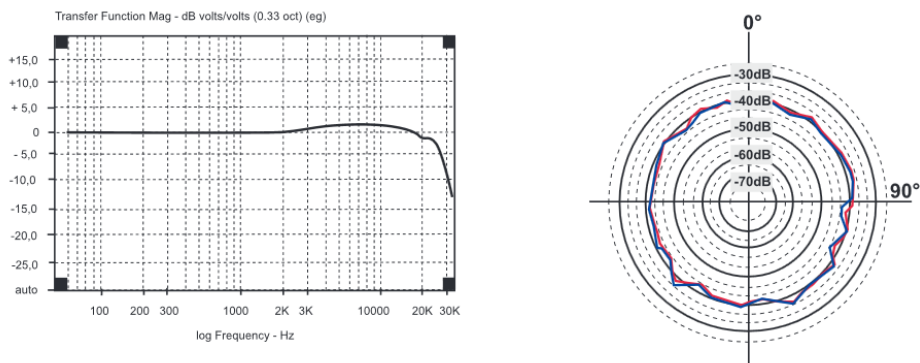
<sup>7</sup> Πηγή: [www.2steps.gr](http://www.2steps.gr)

# 3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## 3.1 Όργανα Μέτρησης & Μεθοδολογία

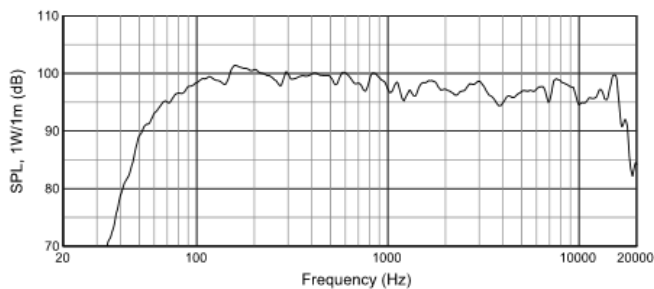
Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι τα ακόλουθα:

- Κάρτες ήχου : 1 της εταιρίας PreSonus και μοντέλο Audio Box USB , 2 της εταιρίας Steinberg και μοντέλα UR22, 2 της εταιρίας Digigram και μοντέλα UAX22.
- Μικρόφωνα Behringer ECM8000 με απόκριση συχνότητας και πολικό διάγραμμα που φαίνονται παρακάτω
- Ηχόμετρο Bruel and Kjaer τύπου 2270 για μετρήσεις αλλά και ως αναφορά.
- Ηχείο της εταιρίας JBL και μοντέλο EON 15
- Όπλο Olympic .380 Blank Firing Revolver - 9mm.
- Λογισμικό Dirac της εταιρίας Bruel & Kjaer.
- Λογισμικό Matlab



Εικόνα 13: Απόκριση Συχνότητας και Πολικό Διάγραμμα του μικροφώνου ECM 8000

### On Axis Frequency Response



Εικόνα 14: Απόκριση συχνότητας ηχείου EON 15P

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των οργάνων:

### Sound level meter

Bruel & Kjaer, Hand-held Analyzer Type 2270, with Sound Level Meter Software BZ-7222, Frequency Analysis Software BZ-7223, Logging Software BZ-7224, Enhanced Logging Software BZ-7225 and Sound Recording Option BZ-7226

Supplied Microphone : Type 4189: Prepolarized Free-field ½" Microphone Nominal Open-circuit Sensitivity: 50 mV/Pa (corresponding to -26 dB re 1 V/Pa) ± 1.5 dB Capacitance: 14 pF (at 250 Hz)

Microphone Preamplifier : ZC-0032

Nominal Preamplifier Attenuation: 0.25 dB

Connector: 10-pin LEMO

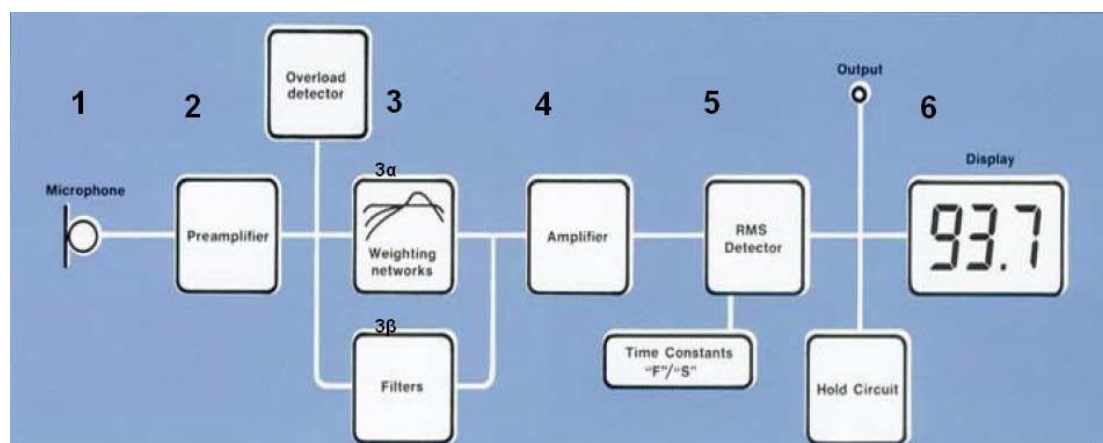
Το sound level meter τύπου 2270 προσέφερε τη δυνατότητα να γίνει και απευθείας φασματική ανάλυση.

Ως κρουστικός παλμός χρησιμοποιήθηκε πιστόλι αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιούν οι αφέτες κριτές στον στίβο.

Χαρακτηριστικά: Μήκος: 7.25", Βάρος: 1.5 lbs, Barrel: 2.5"

Τα ηχόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν υπακούουν στα αντίστοιχα ISO πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων των ISO140, ISO3382 και ISO354.

Τα ηχόμετρα λειτουργούν βασισμένα στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 15: Διάγραμμα λειτουργίας ηχομέτρου

Ο ήχος που φτάνει στο μικρόφωνο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα (1). Το σήμα αυτό όμως είναι μικρό και για να αξιοποιηθεί προενισχύεται (2). Έπειτα, περνά από ένα δίκτυο φίλτρων A ή C (A/C weighting) τα οποία του δίνει συγκεκριμένη ευαισθησία σε κάθε συχνότητα (3α). Στο στάδιο 3β το σήμα φιλτράρεται ώστε να παραμείνουν μόνο οι ακουστές συχνότητες (20Hz – 20kHz). Σε περίπτωση που επιθυμούμε να γίνει φασματική ανάλυση, το σήμα διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων, σε οκταβική ή 1/3οκταβική ανάλυση. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται (4). Στο βήμα



(5) υπολογίζεται η ενεργός (rms) τιμή του σήματος. Στο στάδιο αυτό, προσδιορίζεται και ο επιθυμητός χρόνος αντίδρασης του ηχομέτρου. Για πολύ ταχείες αλλαγές του αναλογικού σήματος επιλέγεται η γρήγορη αντίδραση (Fast ("F") ), με χρόνο αντίδρασης 25ms, ενώ για πιο ομαλή η αργή (Slow ("S") ), με χρόνο αντίδρασης 1sec. Υπάρχει και η επιλογή «I» (Impulse), με χρόνο αντίδρασης 35ms, για περιπτώσεις που ο μετρούμενος ήχος αποτελείται από μεμονωμένους χτύπους, η οποία όμως δε χρησιμοποιείται πολύ. Στο τελευταίο στάδιο έχουμε την απεικόνιση του μετρούμενου μεγέθους σε dB. Η απεικόνιση αυτή γίνεται απευθείας μετά τον υπολογισμό της ενεργούς τιμής του σήματος. Σε περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε τις μέγιστες τιμές που έγιναν κατά την καταγραφή μας έχουμε δύο επιλογές, την max ή την peak, μέσω του Hold Circuit. Η peak είναι η μέγιστη απόλυτη τιμή που καταγράφηκε σε μία μεμονωμένη χρονική στιγμή. Η max είναι η μέγιστη ενεργός τιμή που υπολογίστηκε σε κάποιο μεμονωμένο χρονικό διάστημα. [1]

Τα αρχεία αποθηκεύτηκαν υπό τη μορφή .wav ώστε να είναι δυνατόν να αναλυθούν από το λογισμικό Dirac όσο και από το Matlab με χρήση της εντολής audioread.

Το λογισμικό DIRAC (έκδοση 3.0) που χρησιμοποιήθηκε για την ηχογράφιση και επεξεργασία των ηχητικών αρχείων είναι της εταιρίας Bruel and Kjaer και υπακούει στα αντίστοιχα πρότυπα με τα ηχόμετρα της ίδιας εταιρίας. Χρησιμοποιείται εκτενώς σε ακουστικές μετρήσεις , καθώς δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής μίας πληθώρας μετρητικών σημάτων (white/pink noise, MLS, E/Linear Sine Sweep) σε διάκριση που καθορίζει ο χρήστης, την ηχογράφιση είτε σε ένα είτε σε δύο κανάλια, καθώς και διωτικών (binaural) εφαρμογών. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, σε συμφωνία με τα αντίστοιχα πρότυπα ISO, είναι εφικτό να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι που αφορούν ακουστικές μετρήσεις , να εξαχθούν πίνακες , αλλά και διαγράμματα για τα αποτελέσματα.

Το λογισμικό **Matlab** (έκδοση 2015) που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί υπολογιστικό περιβάλλον και γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς. Αναπτύχθηκε από τη MathWorks και επιτρέπει πολλαπλασιασμό πινάκων, σχεδιασμό γραφικών παραστάσεων, εκτέλεση αλγορίθμων, δημιουργίων διεπαφών, αλλά και διεπαφή με προγράμματα γραμμένα σε άλλες γλώσσες, όπως C, C++, Java, Fortran και Python. Παρόλο που ο αρχικός σκοπός του λογισμικού ήταν να πραγματοποιεί αριθμητικούς υπολογισμούς, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές που έχουν να κάνουν με τον προγραμματισμό, την επεξεργασία σήματος, την προσομοίωση (μέσω της εφαρμογής Simulink κλπ.

Η ανάλυση στο Matlab βασίστηκε σε αρχεία που έχουν συνταχθεί από τους **Christophe Couvreur** και **Γεώργιο Καμπουράκη**, ενώ έγιναν οι κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε οι τελικοί κώδικες να εξάγουν πληροφορίες σχετικά με τα εξής μεγέθη  $L_{Aeq,10min}$  , ποσοστομοριακά επίπεδα, τριτοκταβική φασματική ανάλυση. Οι τροποποιήσεις αφορούσαν τόσο το μαθηματικό σκέλος όσο και την εναρμόνιση των σταθερών με το υπάρχον λογισμικό.

## 3.2 Βαθμονόμηση (Calibration)

Με τον όρο "βαθμονόμηση" , γνωστό και ως "καλιμπράρισμα", εννοούμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε έτσι ώστε το σύστημα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε να είναι αξιόπιστο, δηλαδή να μας δίνει σωστά αποτελέσματα, με βάση κάποιο όργανο αναφοράς. Ως αναφορά τέθηκε το ηχόμετρο **2270** της εταιρείας **Bruel & Kjaer**. Η κοινή διαδικασία που ακολουθήθηκε και για τους τέσσερις μετρητικούς υπολογιστές ( δύο κανάλια-μικρόφωνα για τον καθένα) , περιγράφεται στη συνέχεια:

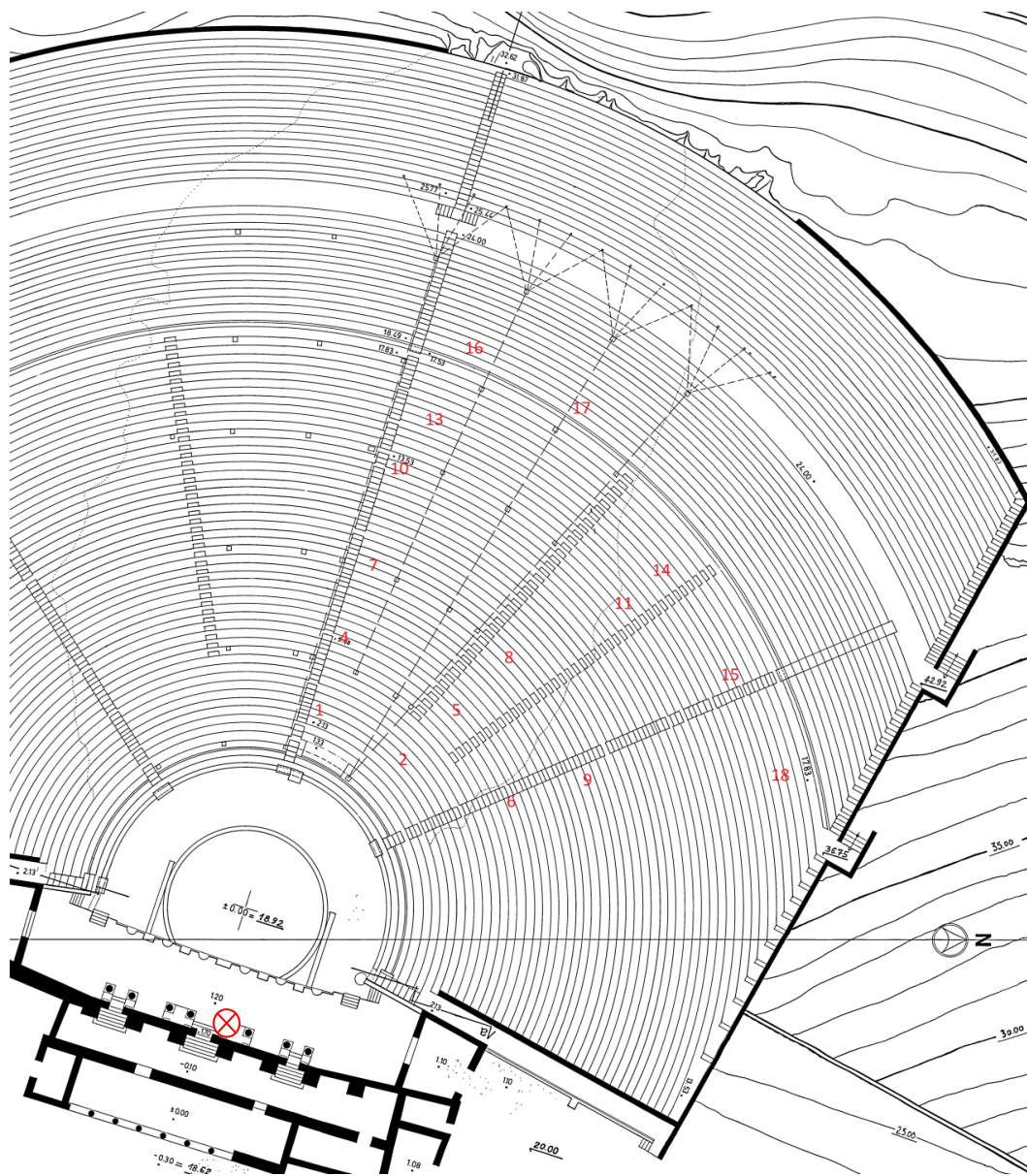
Μέσω του προγράμματος Dirac οδηγήσαμε στο ηχείο διαδοχικά 3 σήματα (MLS , White Noise, Pink Noise) και τα καταγράψαμε τόσο μέσω του συστήματος μικρόφωνο ECM- κάρτα ήχου - λογισμικό Dirac, όσο και με το ηχόμετρο. Έτσι διαπιστώσαμε και καταγράψαμε τις διαφορές στο Sound Pressure Level ανά τριτοκτάβα μεταξύ του δικού μας συστήματος μέτρησης και του ηχομέτρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε υπολογιστή οι διαφορές τιμών βρίσκονταν αρκετά κοντά μεταξύ τους.

Στη συνέχεια για να καταγράψουμε τυχόν διαφορές στον χρόνο αντήχησης που υπολογίζει το Dirac σε σχέση με το ηχόμετρο , χρησιμοποιήσαμε το όπλο ως προσομοίωση παλμού impulse. Ηχογραφήσαμε και με το σύστημά μας και με το ηχόμετρο και για να έχουμε μία γενικότερη εικόνα του χρόνου επιλέξαμε την παράμετρο  $T_{20}$ . Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι για κάθε υπολογιστή η διαφορά είναι ιδιαίτερα χαμηλή μεταξύ των δύο συστημάτων μέτρησης και πολύ μικρή μεταξύ των διαφορετικών περιοχών συχνότητας.

Για τη βαθμονόμηση του λογισμικού Matlab ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία καθώς "τρέξαμε" τον κώδικα και φτιάξαμε πίνακες με τους κατάλληλους συντελεστές ώστε να ταυτίζονται τα αποτελέσματα.

### 3.3 Μετρήσεις στο Θέατρο

Η ομάδα μας αποτελούνταν από τον γράφοντα, τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών **Κωνσταντίνο Μπακογιάννη** και τη φοιτήτρια του Μουσικού Τμήματος του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου **Ανθούλα Νικολάκη**. Την Παρασκευή 13/5/'16 μεταβήκαμε στο Άργος για να πραγματοποιήσουμε τις επιτόπιες μετρήσεις. Επιλέξαμε να μετρήσουμε το δεξί μισό του αρχαίου θεάτρου και αφιερώσαμε περίπου μιάμιση ώρα για να σχεδιάσουμε τη θέση των υπολογιστών και τα ποιά καλώδια (μικροφώνου και τροφοδοσίας) θα καταλήξουν σε ποιούς υπολογιστές, έτσι ώστε να εκμεταλλευτούμε όσο το δυνατόν καλύτερα τα μήκη των καλωδίων και να αποφύγουμε τις πολλαπλές μετακινήσεις του εξοπλισμού. Οι θέσεις που τοποθετήθηκαν τα μικρόφωνα φαίνονται κατά προσέγγιση παρακάτω. Το x συμβολίζει τη θέση του ηχείου.



Εικόνα 16. Κάτοψη του Αρχαίου Θεάτρου με επισημάνσεις των σημείων μέτρησης

Σε κάθε σειρά μετρήθηκε πρώτα απόλα ο θόρυβος βάθους. Στη συνέχεια για όσα σημεία ήταν "ενεργά" κάθε φορά, καταγράφονταν τα σήματα που εξέπεμπε το ηχείο. Ηχογραφήθηκε επίσης μία ομιλία από παράσταση αρχαίας τραγωδίας, καθώς και μία σειρά από φωνήεντα.

Ως αποτίμηση της διαδικασίας των μετρήσεων, στα θετικά στοιχεία προσμετρώνται τα εξής :

- Πρώτα απόλα, η άριστη συνεργασία της ομάδας
- Η σωστή επιλογή των καλωδίων αλλά και των θέσεων των μετρητικών οργάνων, ώστε να καλύψουμε το μεγαλύτερο μέρος του θεάτρου χωρίς πολλές μετακινήσεις του εξοπλισμού.
- Το ότι προτιμήσαμε μέρα που δεν είχε μεγάλη επισκεψιμότητα το θέατρο
- Η βοήθεια από τους αρμόδιους αρχαιοφύλακες

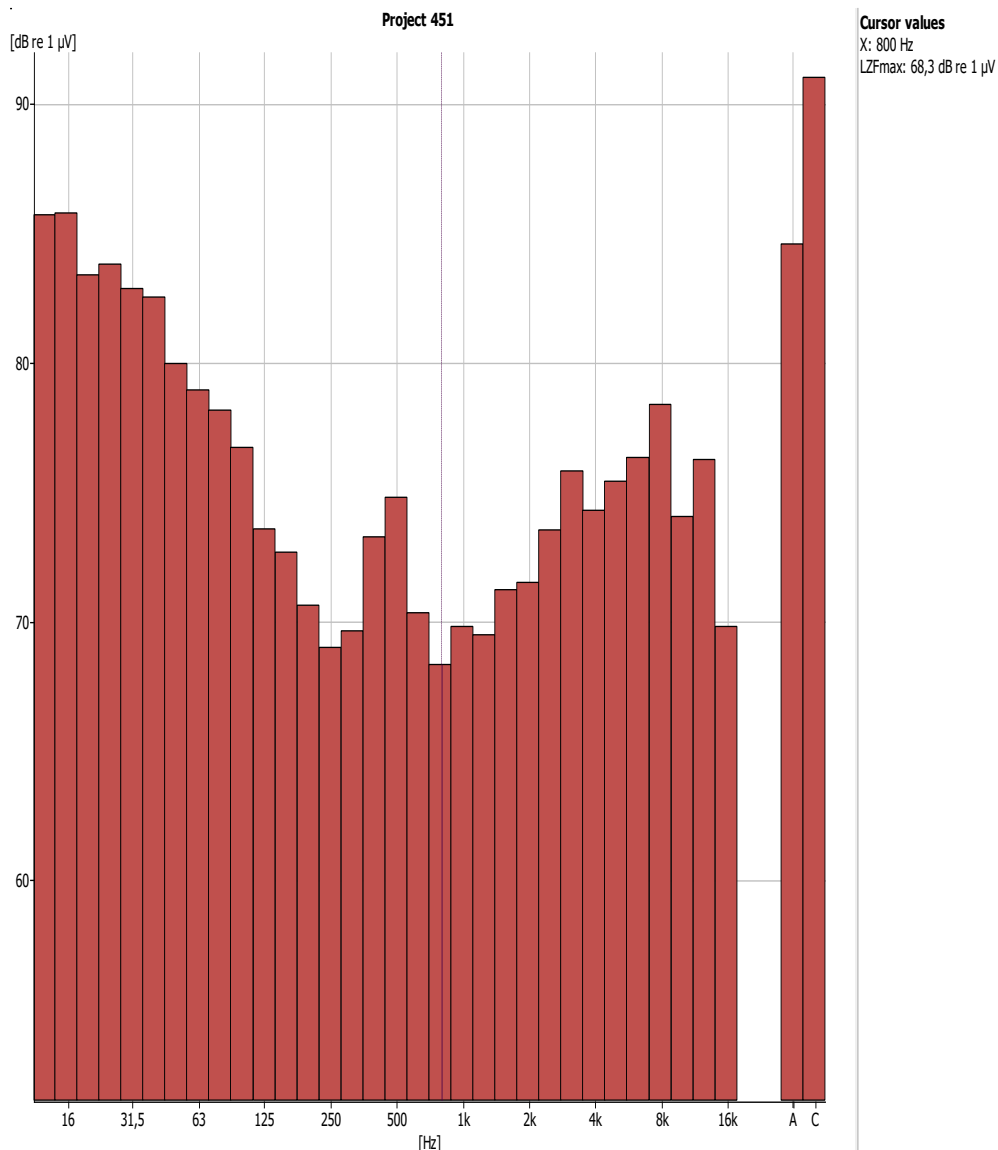
Ως αρνητική κριτική στην "αποστολή" μας θα πρέπει να σημειωθεί ότι ίσως θα έπρεπε να είμαστε στο θέατρο ακόμα πιο νωρίς από τις 9 η ώρα που φτάσαμε. Η αυξημένη ηλιοφάνεια και υψηλή θερμοκρασία οδήγησε πρώτα απόλα σε μεγαλύτερη προσωπική κόπωση της ομάδας, αλλά και στο να σβήσουν 2 φορές οι μετρητικοί υπολογιστές λόγω υπερθέρμανσης . Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιου είδους σκίαστρο (ομπρέλες, μικρές τέντες κλπ) προκειμένου να προστατευτεί ο εξοπλισμός και να μην αναγκαστούμε να κάνουμε ολιγόλεπτες διακοπές , αλλά ίσως και να συνεχίσουμε τις μετρήσεις για περισσότερα ηχητικά δείγματα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιες από τις μετρήσεις χρειάστηκε να επαναληφθούν , καθώς το θέατρο βρίσκεται ακριβώς δίπλα στην επαρχιακή οδό Άργους-Ναυπλίου και κάποια αυτοκίνητα επηρέασαν το τί λάμβαναν τα μικρόφωνα.

## 3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

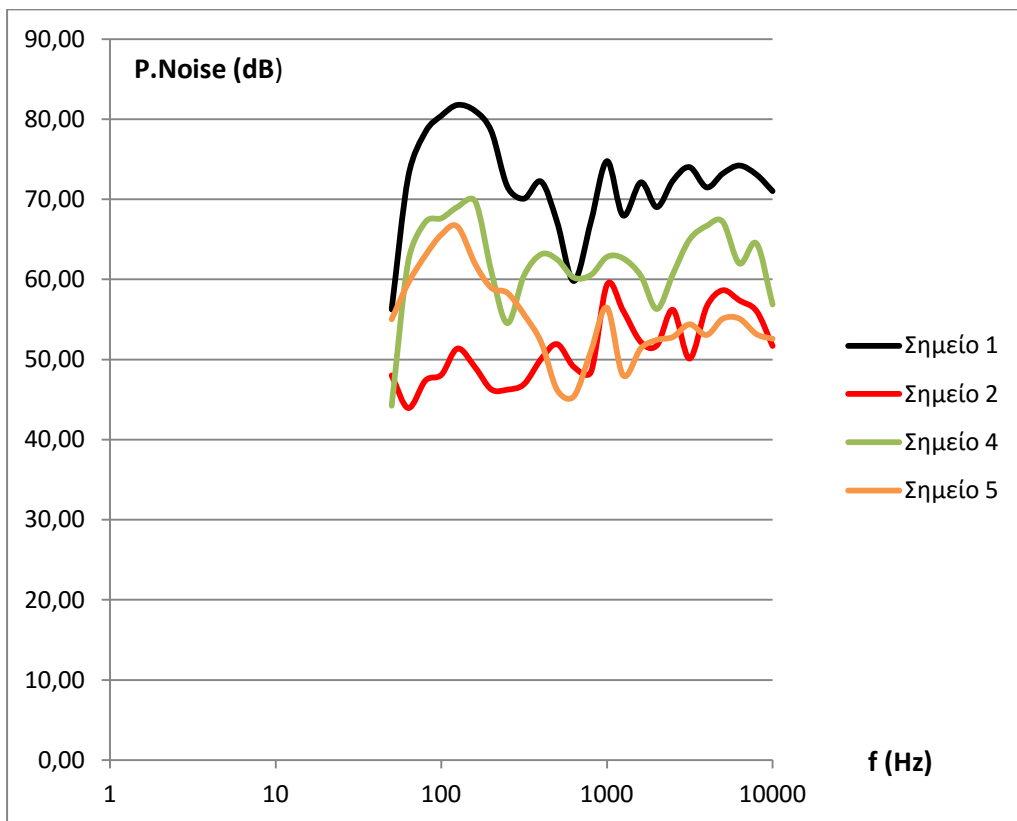
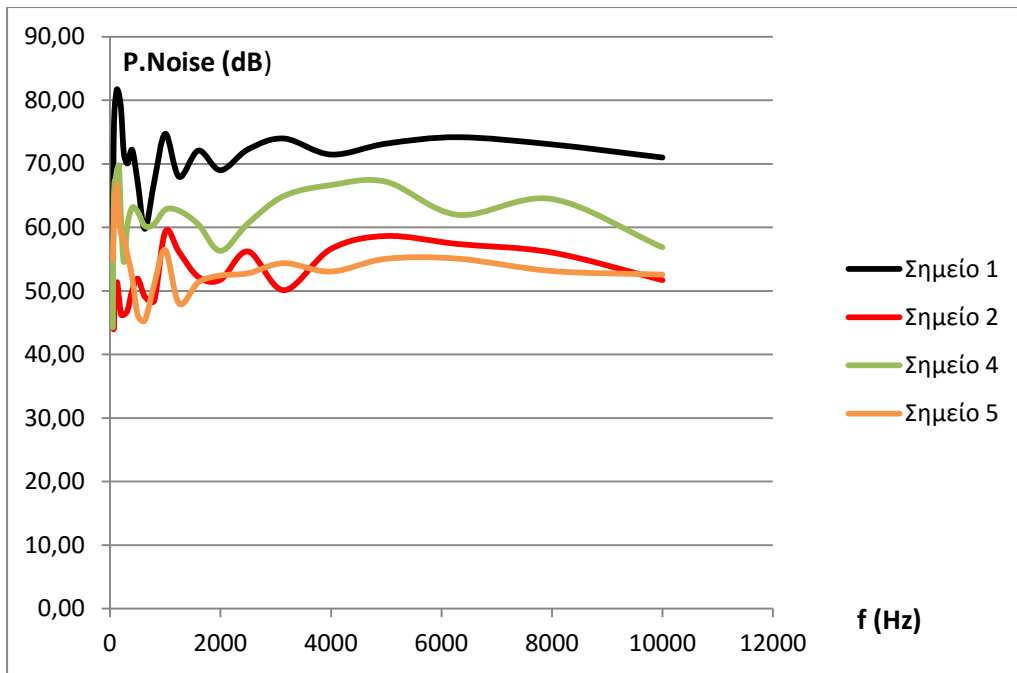
### 3.4.1 Φασματική Κατανομή

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους του θεάτρου που θέλαμε να εξετάσουμε είναι η απόκριση του , δηλαδή το πώς επιδρά ο χώρος σε ένα σήμα που εκπέμπεται σε αυτόν, όπως η ανθρώπινη φωνή ή τα διάφορα σήματα που εξέπεμπε το ηχείο μας. Μετρώντας την απόκριση του, μπορούμε να λάβουμε πληροφορίες για το ποιές συχνότητες ενισχύονται και ποιές όχι-άρα και τη χρήση του θεάτρου ( κατά πόσο δηλαδή θα ενισχύονται εντονότερα οι συχνότητες που εντοπίζεται η ανθρώπινη φωνή). Επιπρόσθετα, φτιάχνουμε ένα "χάρτη" του θεάτρου, μελετώντας το πώς αυτό λειτουργεί σε κάθε σημείο, αν για παράδειγμα υπάρχουν σημεία που "κάποιος ακούει πιο καλά" από κάποιον που βρίσκεται σε άλλο σημείο του θεάτρου.

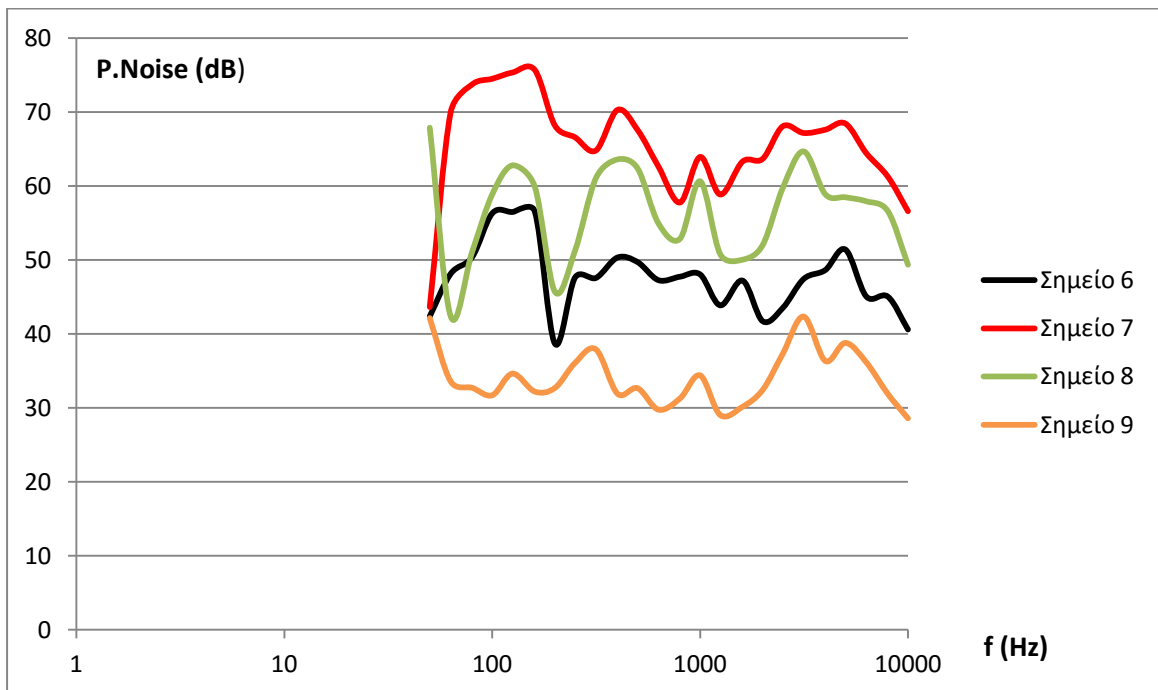
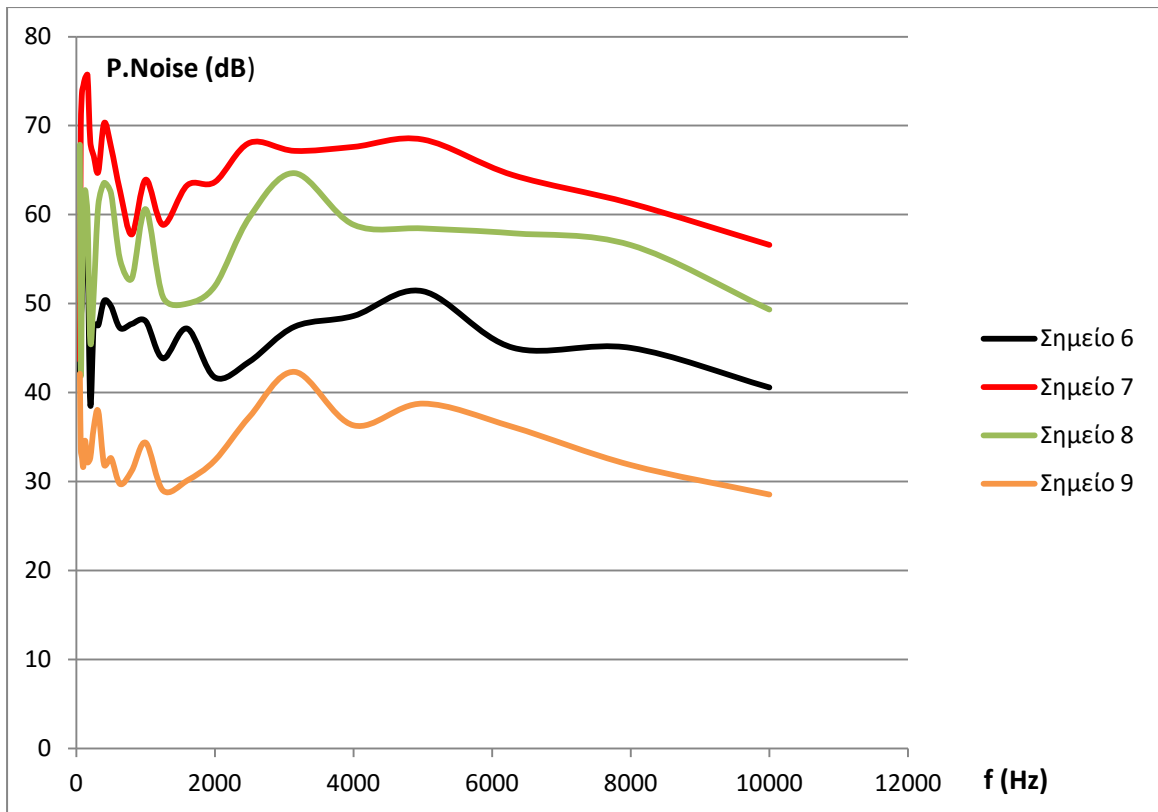
Ως πηγή όπως προαναφέρθηκε λειτούργησε το ηχείο, στο οποίο οδηγήθηκαν κάποια μετρητικά σήματα (Λευκός/Ροζ θόρυβος, MLS, Linear/E Sine Sweep) τα οποία ηχογραφήθηκαν με το λογισμικό Dirac και επεξεργάστηκαν με τα λογισμικά Dirac και Matlab για να εξάγουμε το πώς μεταβάλλεται το μέγεθος SPL συχνοτικά ανα σημείο, αλλά και να υπολογίσουμε το  $LA_{eq}$  σε κάθε σημείο. Αρχικά ακολουθεί διάγραμμα μίας μέτρησης που πήραμε με το ηχόμετρο για να έχουμε μία γενική εικόνα. Στη συνέχεια, ακολουθούν διαγράμματα για σήμα εισόδου **ρόζ θόρυβο** με την κατανομή ανα σημείο.



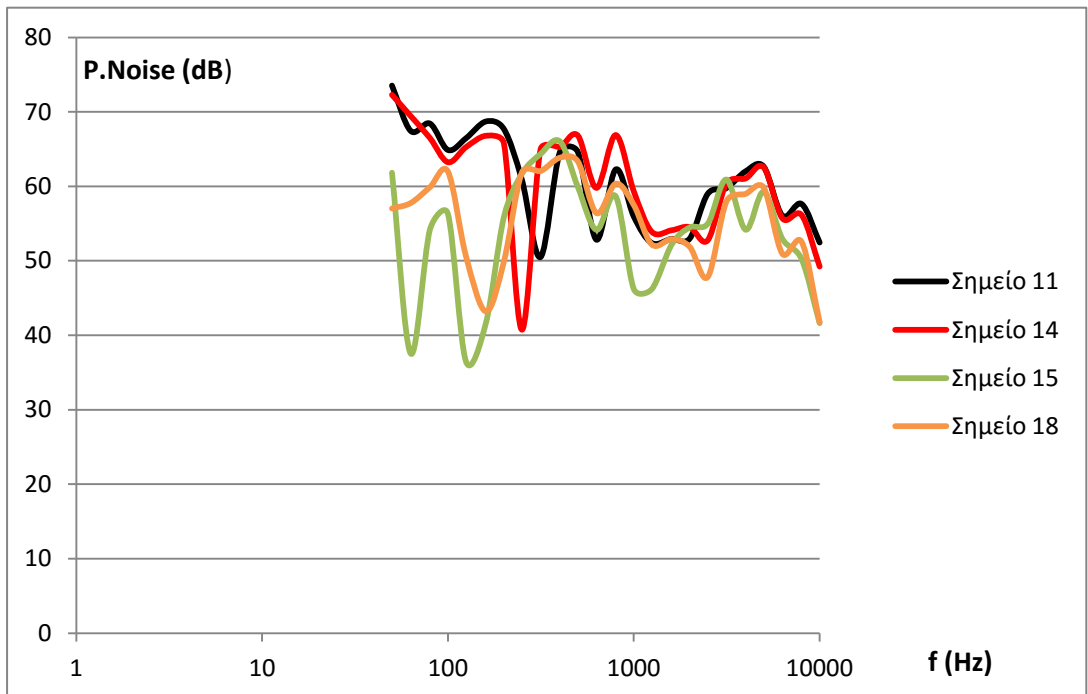
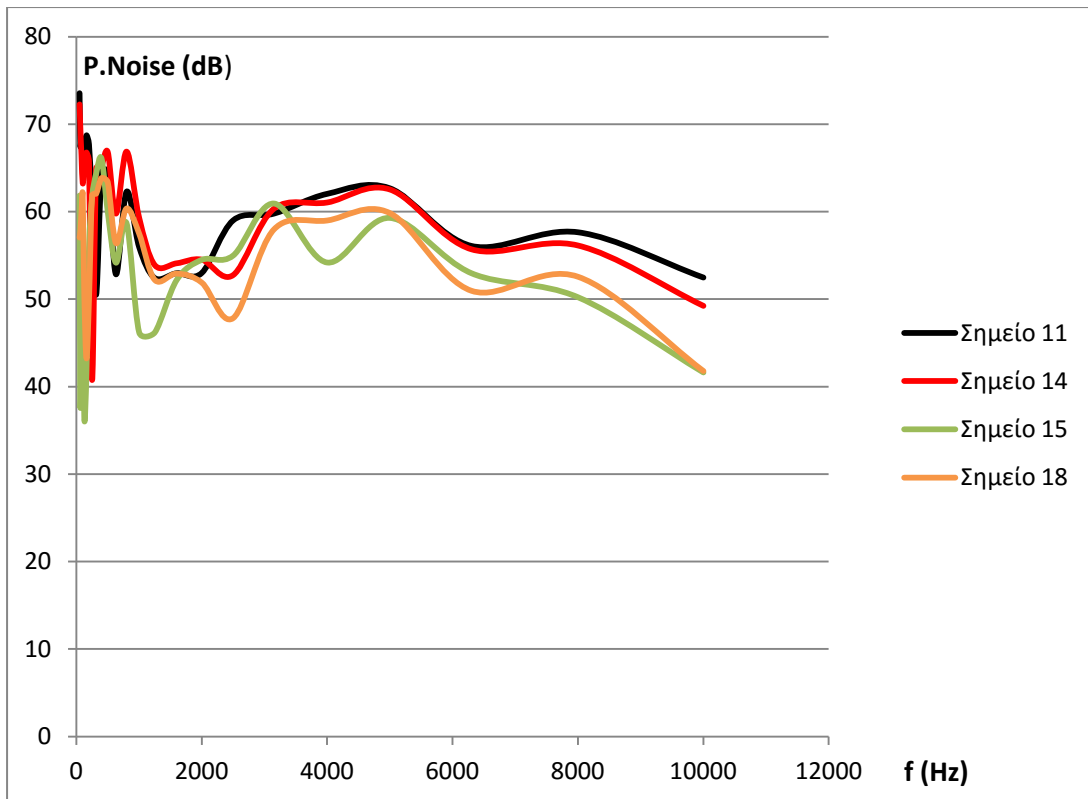
Διάγραμμα 1 : Φασματική ανάλυση από το B&K 2270 για είσοδο ρόζ θόρυβο στο σημείο 1



Διάγραμμα 2 : Φασματική κατανομή ροξ θορύβου για τα σημεία 1,2,4,5 σε γραμμική και ημilogαριθμική κλίμακα

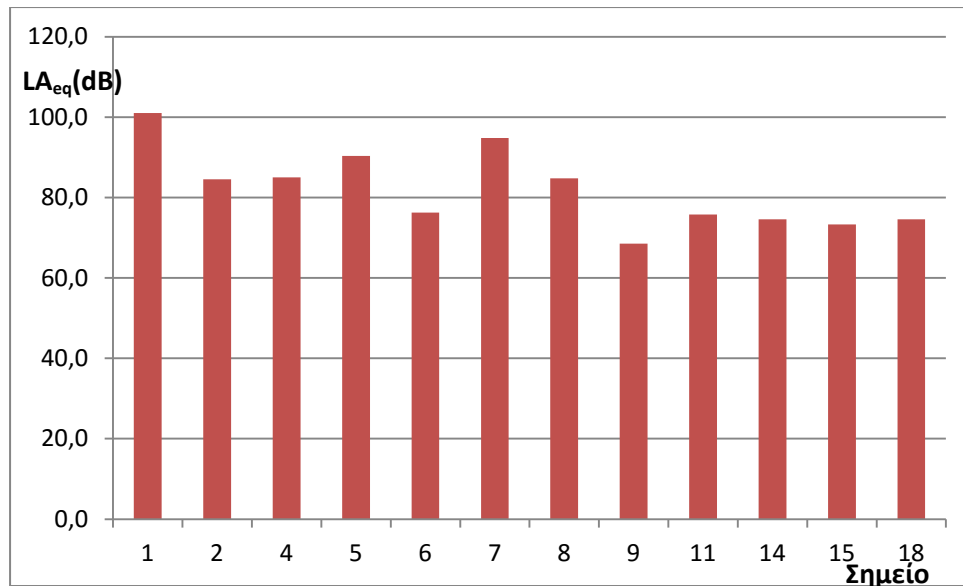


Διάγραμμα 3 : Φασματική κατανομή ροξ θορύβου για τα σημεία 6,7,8,9 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 4 : Φασματική κατανομή ροζ θορύβου για τα σημεία 11,14,15,18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



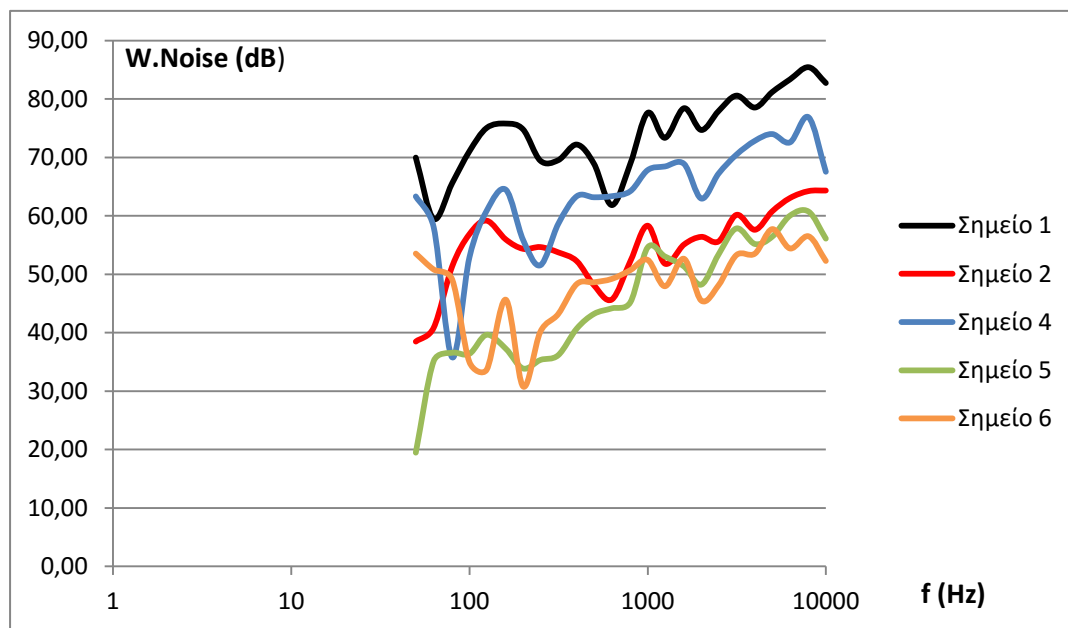
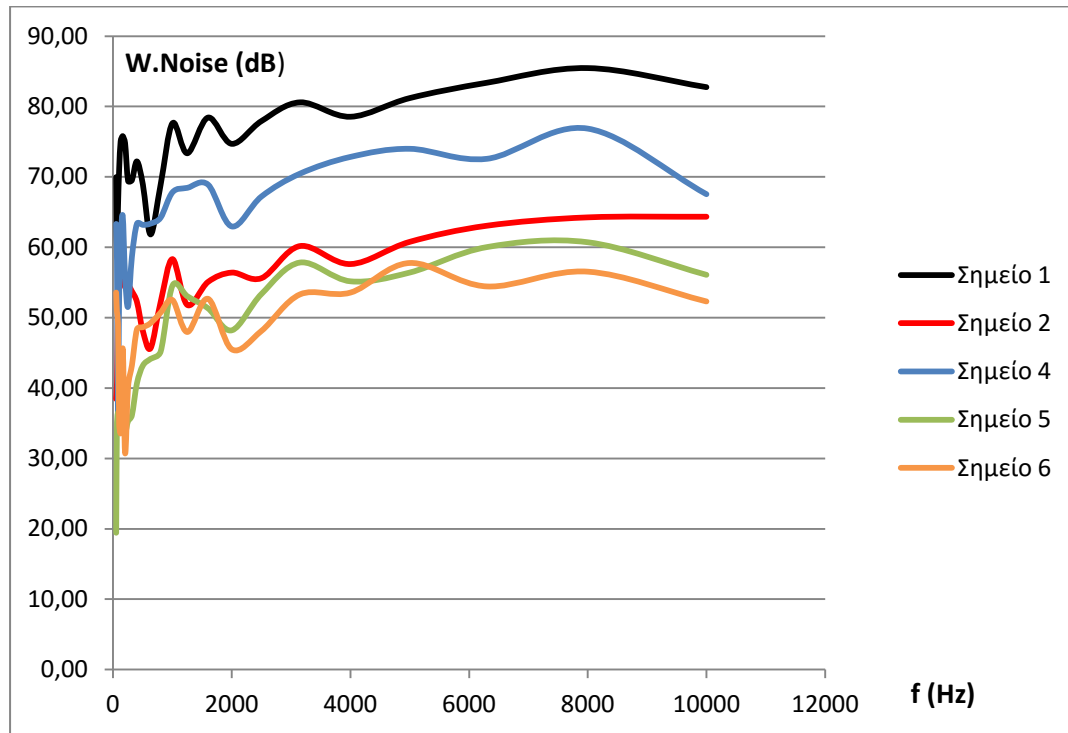


Διάγραμμα 5: Το μέγεθος LA<sub>eq</sub> για ροζ θόρυβο ανα σημείο

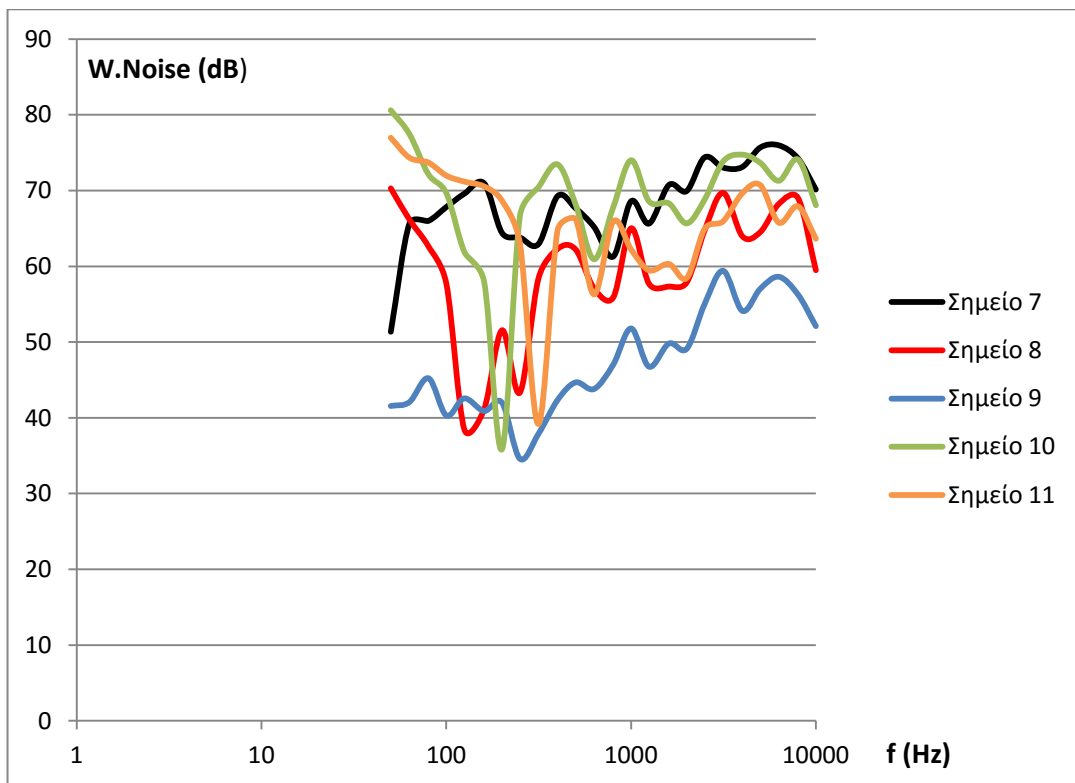
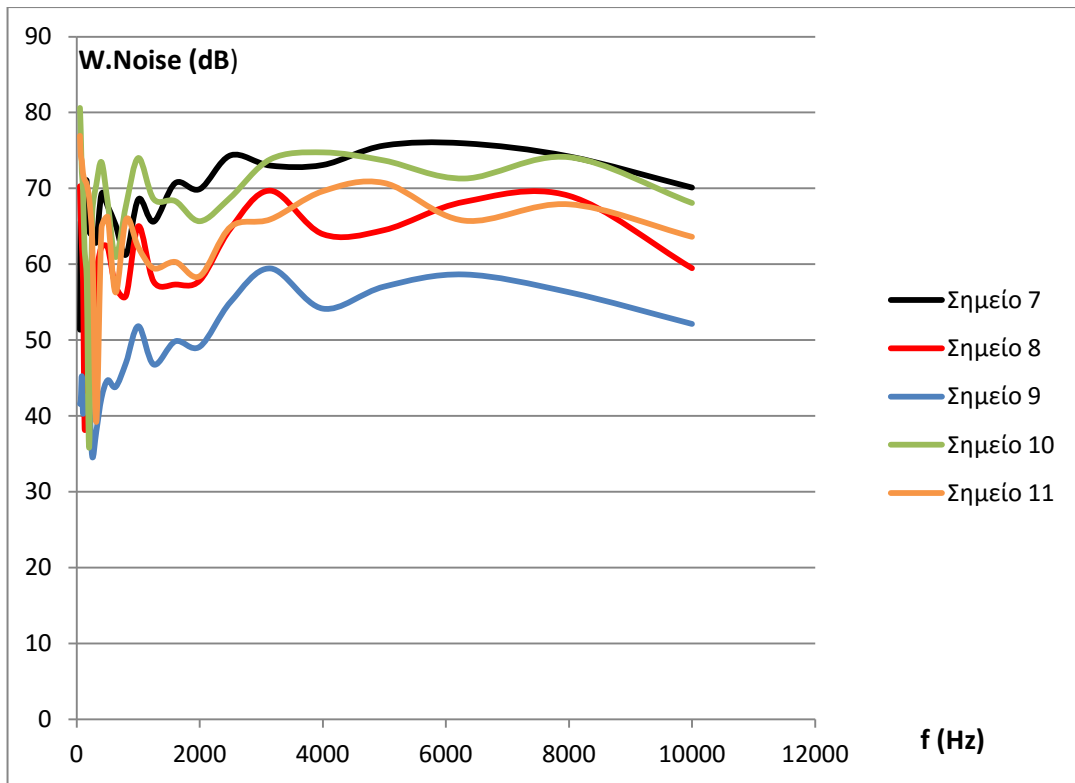
Παρατηρώντας τα διαγράμματα της φασματικής απόκρισης του θεάτρου με σήμα εισόδου το ροζ θόρυβο, παρατηρούμε -όπως ήταν αναμενόμενο- κάποιες αποκλίσεις από το πραγματικό σήμα του ροζ θορύβου (βλ.ενότητα 1). Πιο συγκεκριμένα οι χαμηλομεσαίες συχνότητες (περίπου από τα 200 μέχρι τα 4000 ) δείχνουν σταθερότητα σε σχέση με το υπολοιπό φάσμα, το οποίο σε κάποια σημεία ακολουθεί το ροζ θόρυβο αλλά σε κάποια άλλα όχι. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο βαθμό στον μετρητικό εξοπλισμό και κυρίως στα μικρόφωνα και στο ηχείο. Αν ανατρέξουμε στο πολικό διάγραμμα του μικροφώνου θα διαπιστώσουμε ότι υστερεί τόσο στις υψηλές , όσο και στις χαμηλές συχνότητες. Ο πιο βασικός παράγοντας που προφανώς επηρέασε τα αποτελέσματα, είναι το ηχείο το οποίο εκ των πραγμάτων αδυνατεί να αναπαράγει σωστά το σήμα του ροζ θορύβου στις χαμηλές και τις υψηλές συχνότητες. Βέβαια, τα "γειτονικά" σημεία στο θέατρο όπως διαπιστώνουμε από τα διαγράμματα παρουσιάζουν παραπλήσια συμπεριφορά, με μία πτώση στη στάθμη , που οφείλεται στην περιοχή κάλυψης του ηχείου. Δηλαδή όσο προχωρούμε από τον κεντρικό άξονα προς τα πλάγια και πίσω του θεάτρου έχουμε πτώση της έντασης , αλλά παρόμοια φασματική κατανομή. Βέβαια ας σημειώσουμε ότι στο φάσμα που βρίσκεται η ανθρώπινη φωνή, οι μετρήσεις μας δίνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ας μας επιτραπεί η έκφραση ότι το θέατρο "ενισχύει και ανταποκρίνεται στις συχνότητες που το ενδιαφέρουν".

Εξετάζοντας στη συνέχεια το διάγραμμα για το μέγεθος LA<sub>eq</sub> που όπως προαναφέρθηκε μας δίνει μία συνολικότερη εικόνα, διαπιστώνουμε ότι η ένταση του ήχου πέφτει απομακρυνόμενοι από τον κεντρικό άξονα και πηγαίνοντας προς τα τελευταία διαζώματα του θεάτρου. Η πτώση αυτή φαίνεται να είναι σταθερή σε ένα πλαίσιο μέχρι 10 dB. Όταν δε φτάσουμε προς το τέλος του θεάτρου, οι τιμές φαίνονται να σταθεροποιούνται.

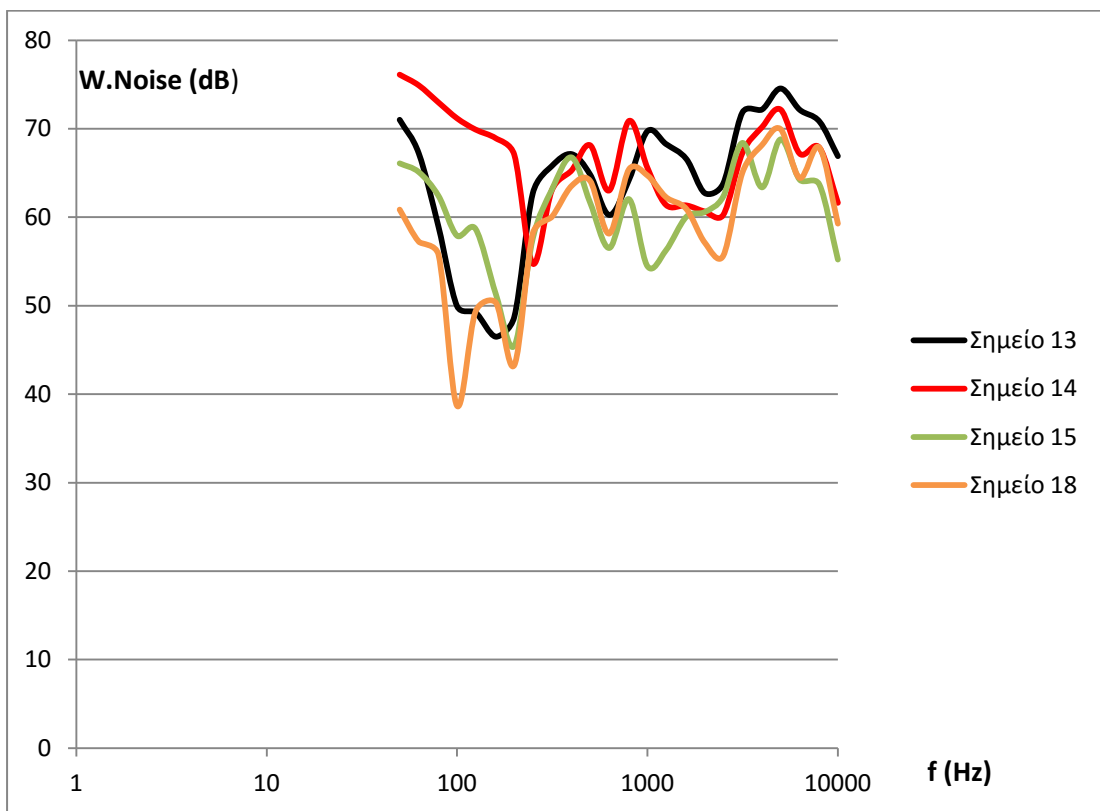
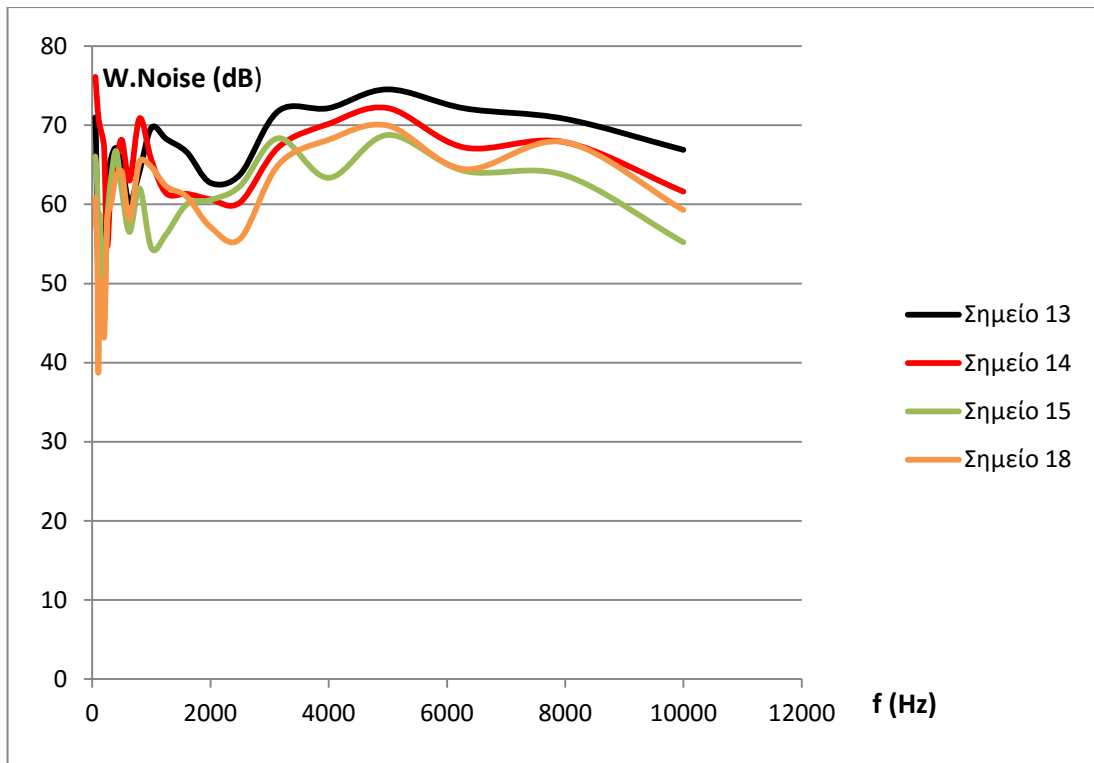
Ακολουθούν τα αποτελέσματα για το σήμα εισόδου **λευκός θόρυβος**:



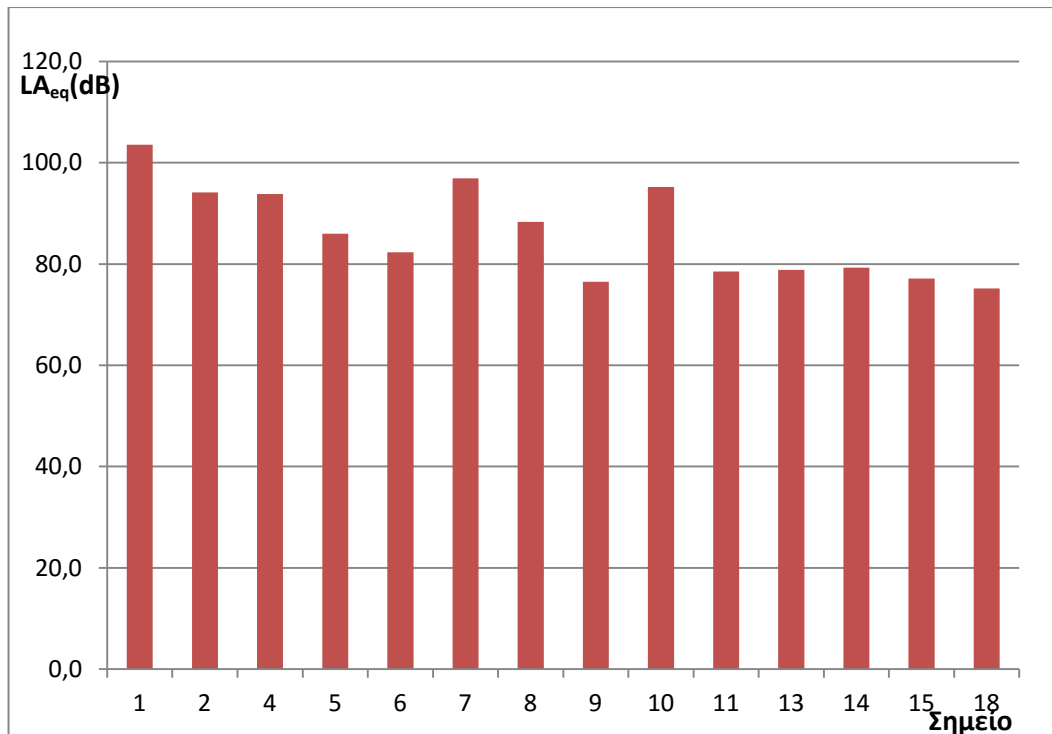
Διάγραμμα 6: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 1,2,4,6 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 7: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 7,8,9,10,11 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 8: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 13,14,15,18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

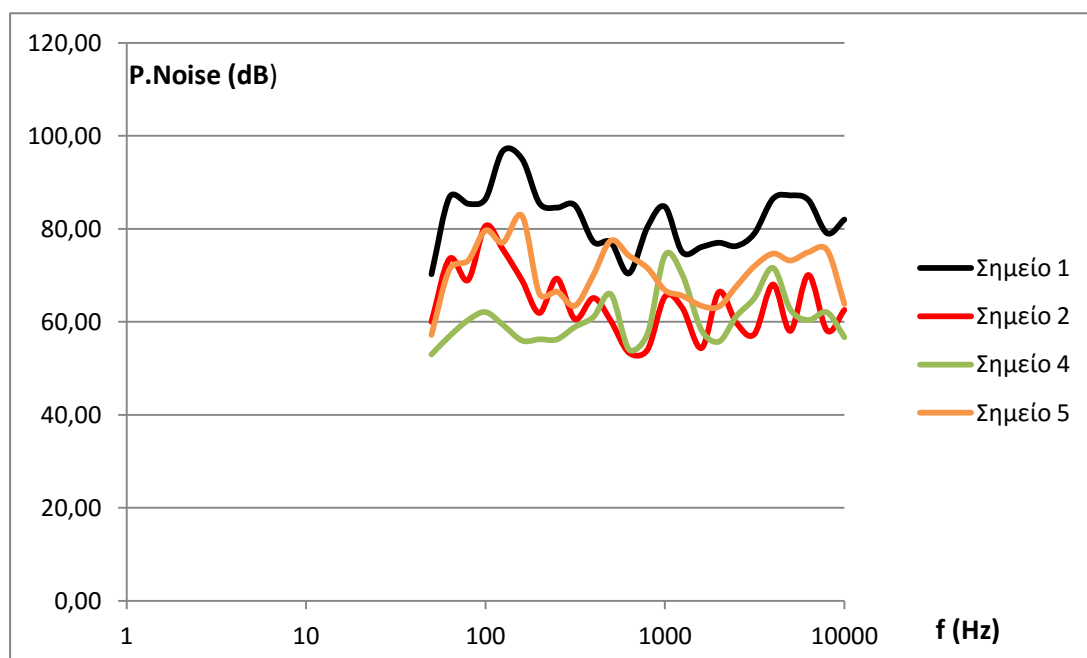
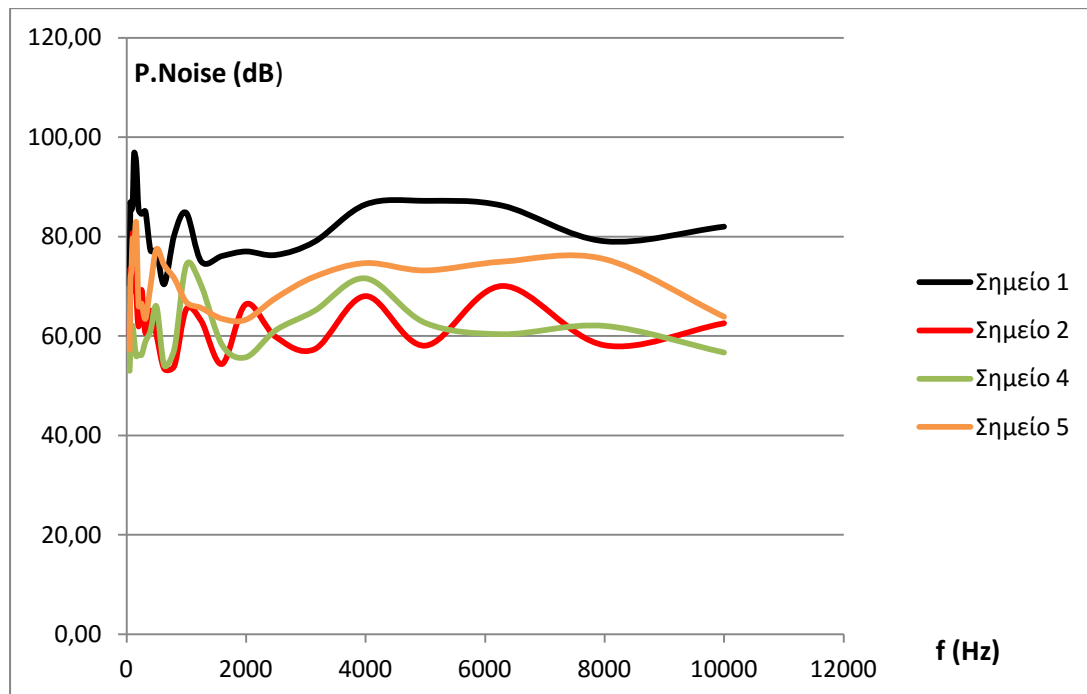


Διάγραμμα 9: Το μέγεθος LA<sub>eq</sub> για λευκό θόρυβο ανα σημείο

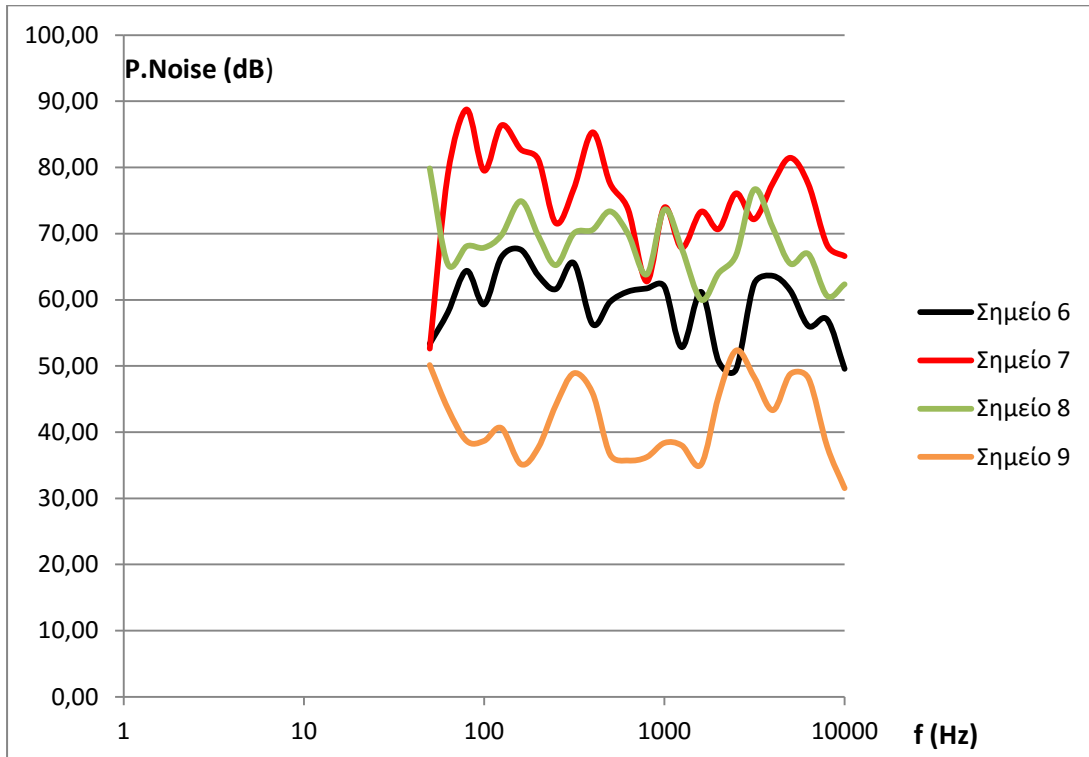
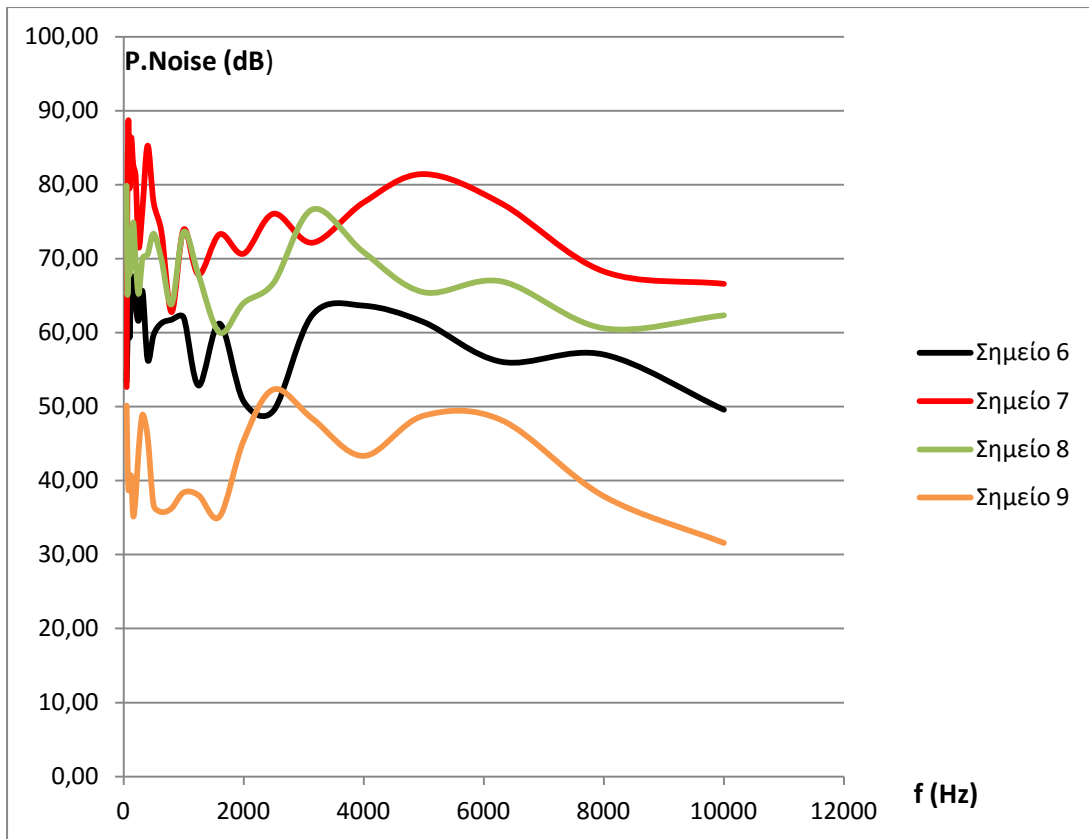
Εξετάζοντας τις μετρήσεις που αφορούν το λευκό θόρυβο, καταλήγουμε περίπου στα ίδια συμπεράσματα με τον ρόζ. Και σε αυτήν την περίπτωση το σήμα που ηχογραφήθηκε δεν είναι ακριβώς λευκός θόρυβος, κάτι που επαναλαμβάνουμε συμβαίνει πρωτίστως λόγω του εξοπλισμού, αλλά φυσικά και της ακουστικής συμπεριφοράς του θεάτρου. Το πρόβλημα αυτή τη φορά εντοπίζεται κυρίως στις χαμηλές συχνότητες, με κάποιες απρόσμενες "πτώσεις" σε δύο σημεία και στις μεσαίες. Στις υψηλές συχνότητες παρατηρείται μία άνοδος σε σχέση με τον ρόζ θόρυβο, γεγονός αναμενόμενο λόγω της φασματικής κατανομής του λευκού θορύβου. Παρόλαυτα και πάλι η συμπεριφορά είναι παραπλήσια στα γειτονικά σημεία και το φάσμα που αφορά τη χρήση του θεάτρου και επιπρόσθετα παρουσιάζεται μείωση της έντασης όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα εκπομπής της πηγής, κάτι που λογικό αφού χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα ηχείο.

Παρατηρώντας το διάγραμμα που για το μέγεθος LA<sub>eq</sub>, διαπιστώνουμε την ίδια σχεδόν διακύμανση του μεγέθους σε σχέση με το ρόζ. Τα μικρόφωνα μας λαμβάνουν δυνατό ήχο στον κεντρικό άξονα της πηγής και ασθενέστερο όσο απομακρυνόμαστε προς τα πλάγια και πίσω. Η διακύμανση είναι στα πλαίσια του σταθερού και όσο φτάνουμε προς το τέλος του θεάτρου η τιμή του LA<sub>eq</sub> σταθεροποιείται.

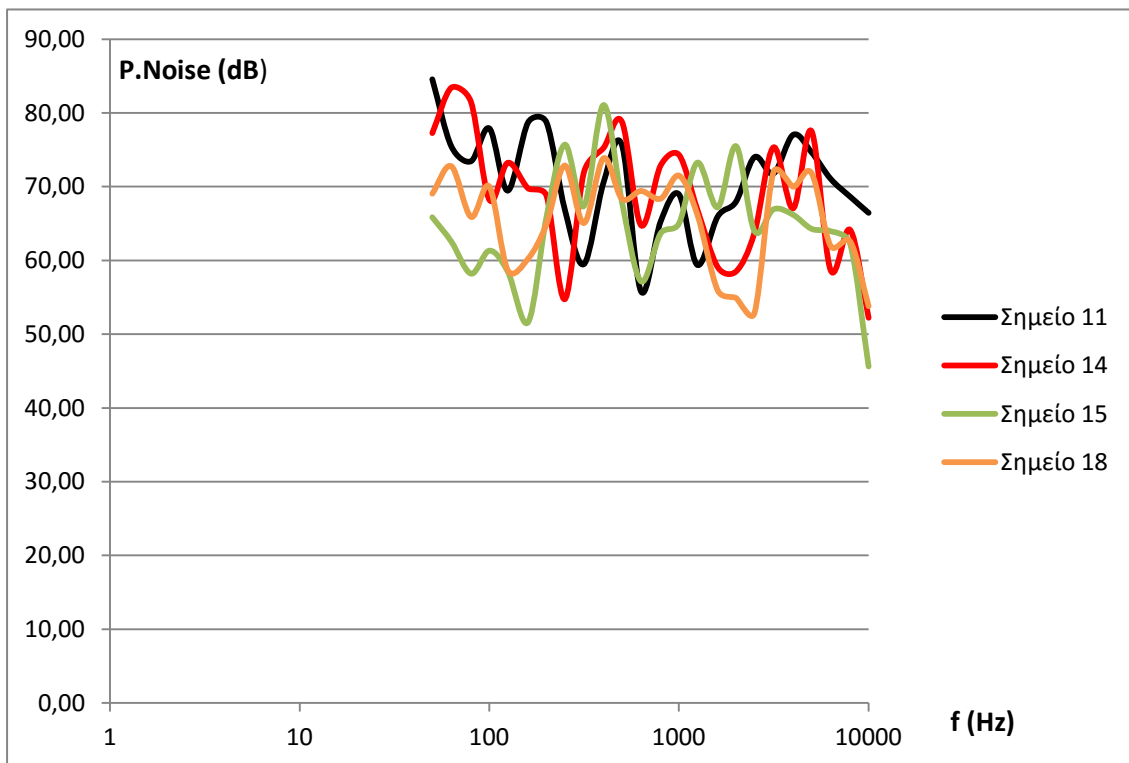
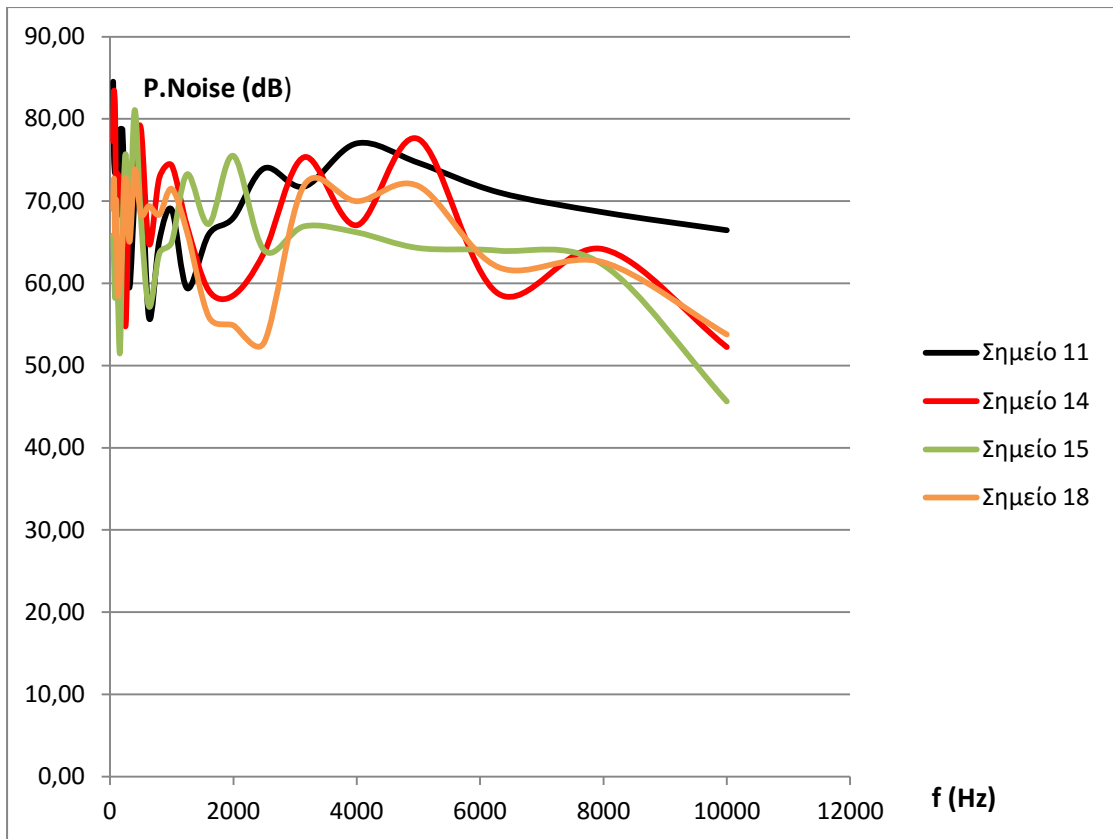
Στη συνέχεια, τα ηχητικά αρχεία εισήχθησαν στο λογισμικό Matlab για να γίνει τριτοκταβική φασματική ανάλυση. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για σήμα εισόδου ροζ θόρυβο.



Διάγραμμα 10: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου για τα σημεία 1,2,4,5 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

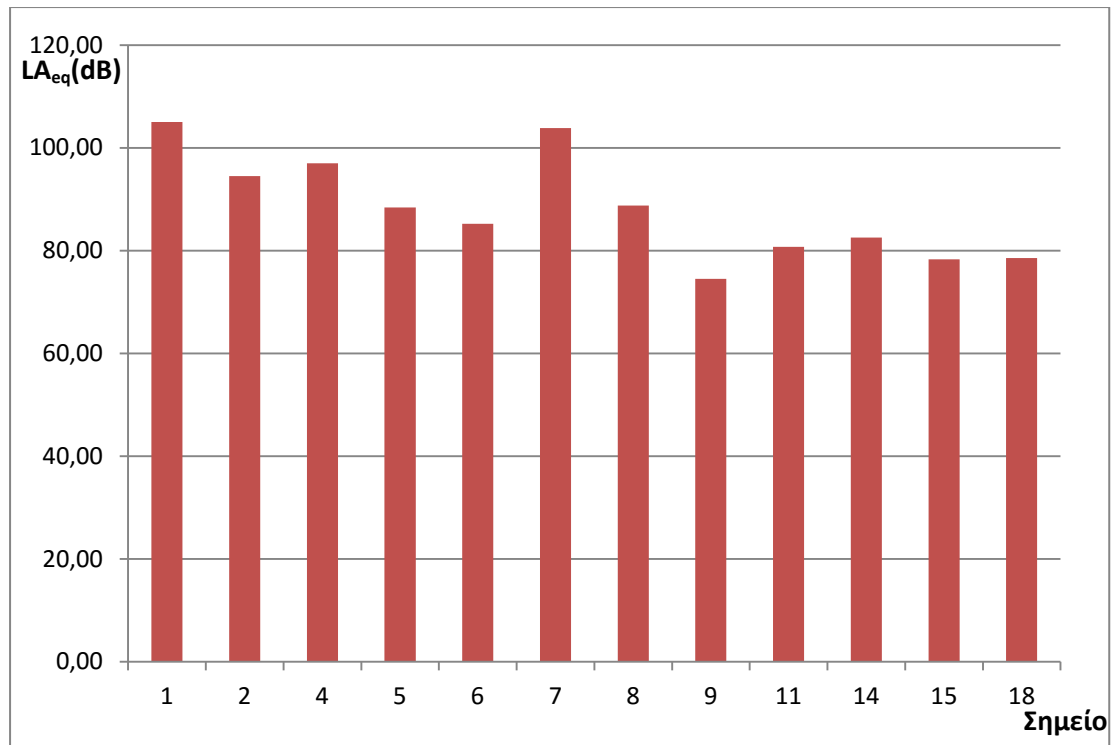


Διάγραμμα 11: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου για τα σημεία 6,7,8,9 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



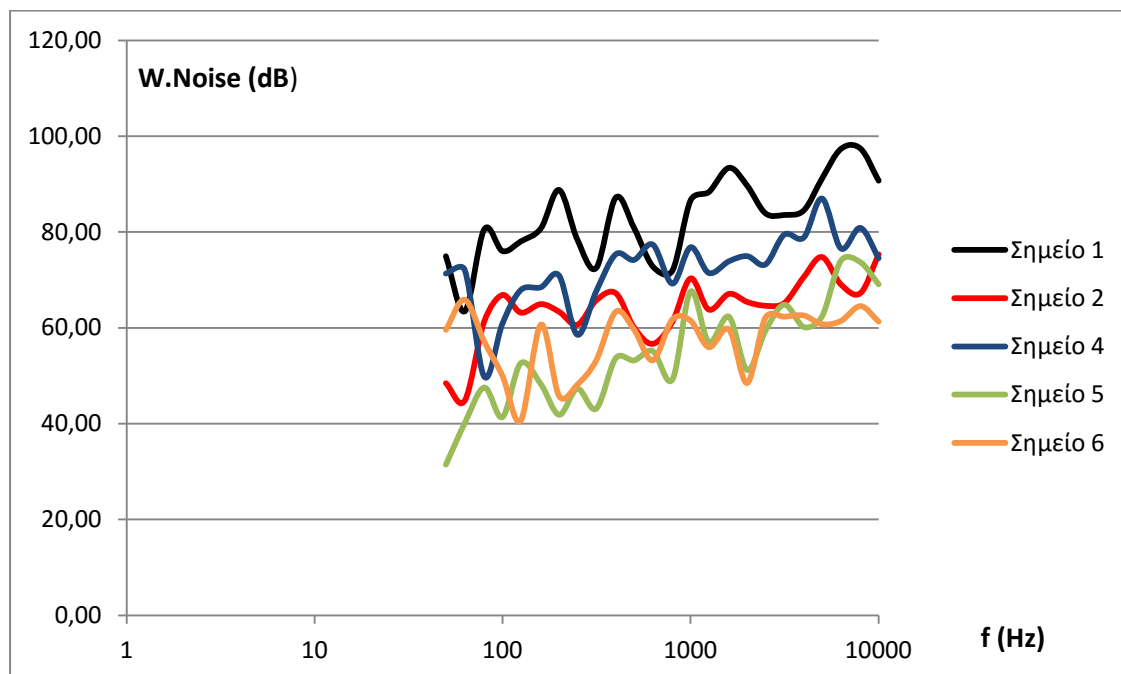
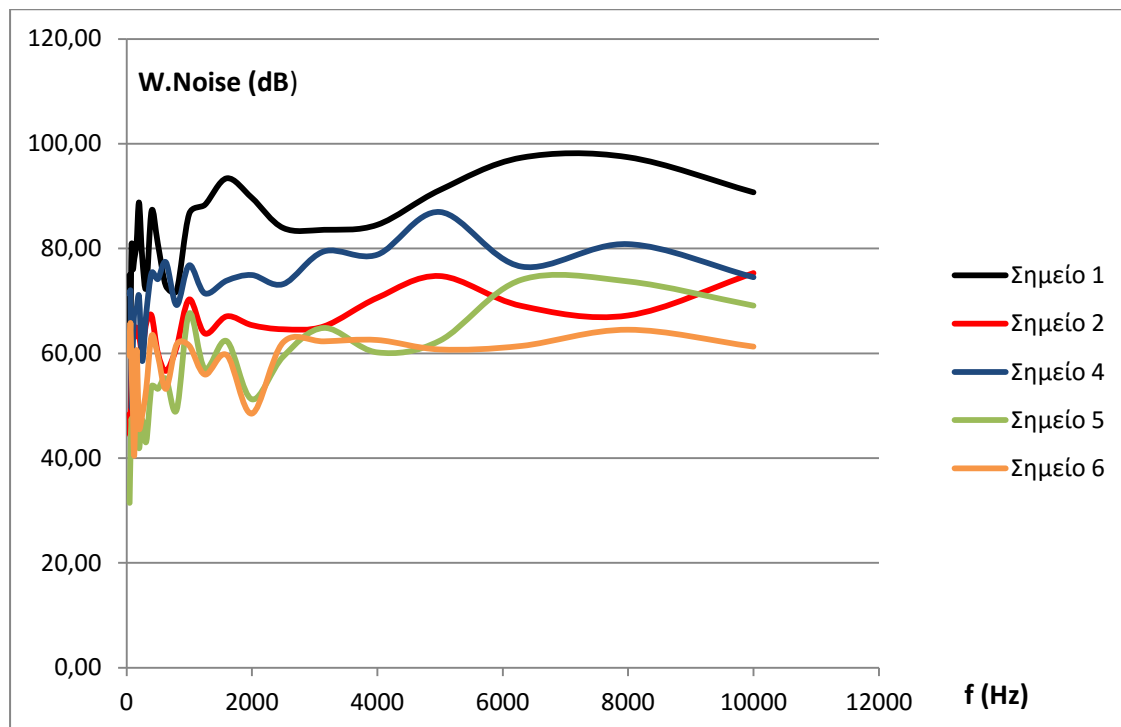
Διάγραμμα 12: Φασματική κατανομή ροζ θορύβου για τα σημεία 11,14,15,18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



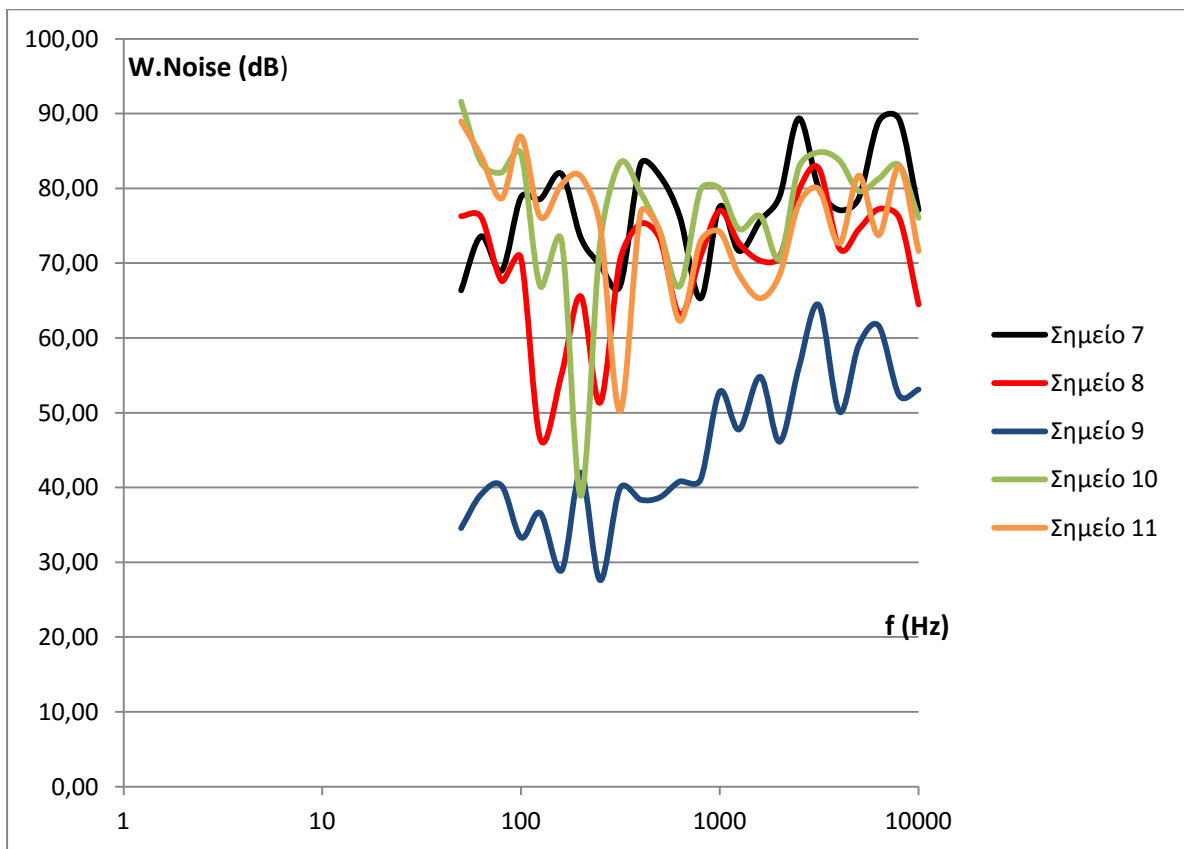
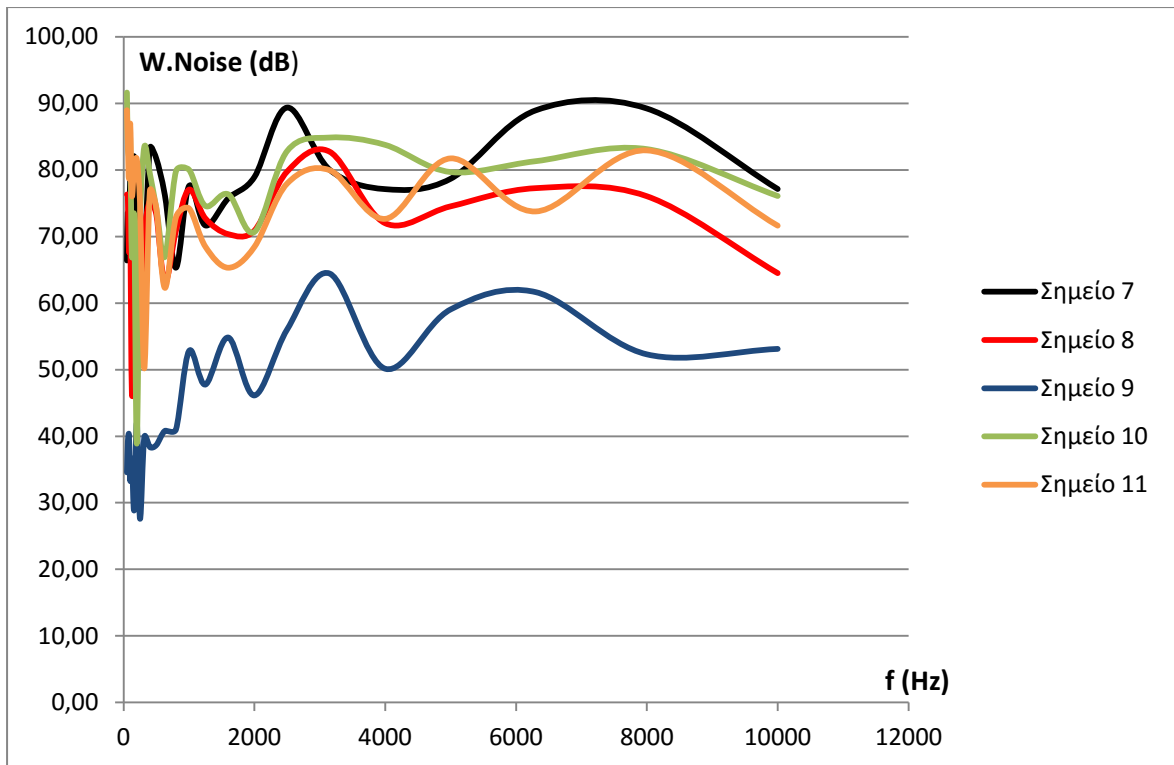


Διάγραμμα 13: Το μέγεθος LAeq για ροζ θόρυβο ανα σημείο

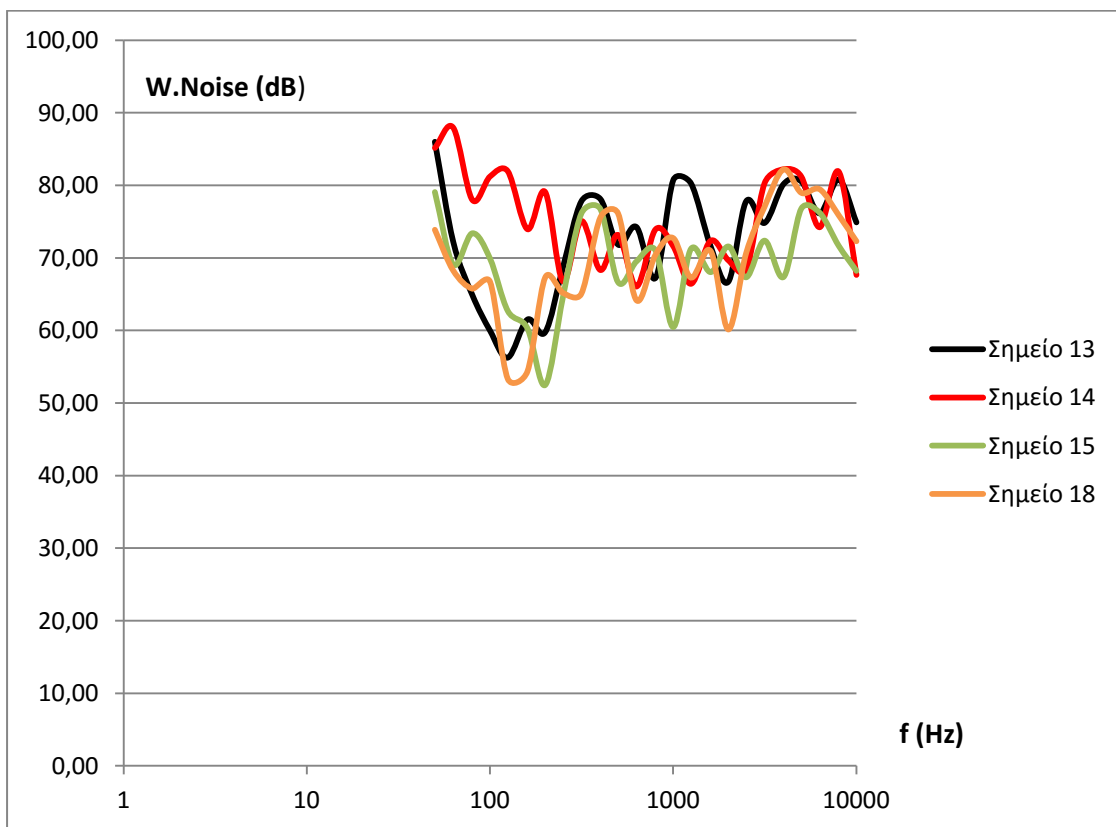
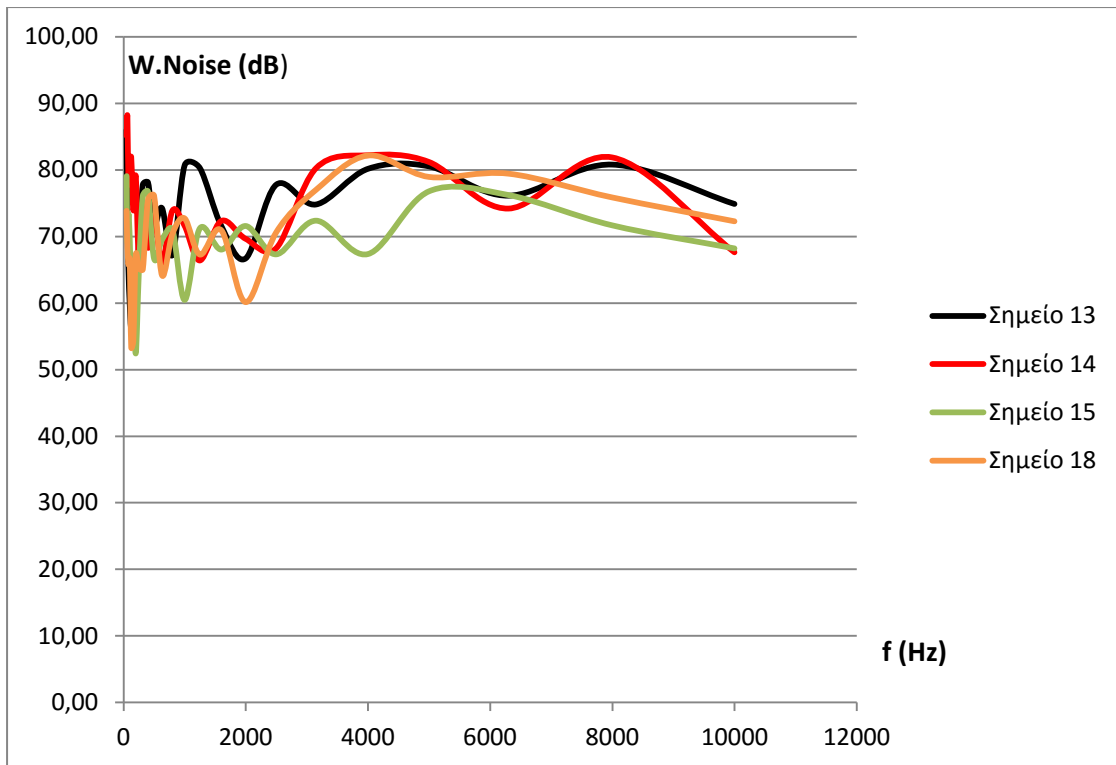
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λογισμικού Matlab για σήμα εισόδου **λευκό θόρυβο**.



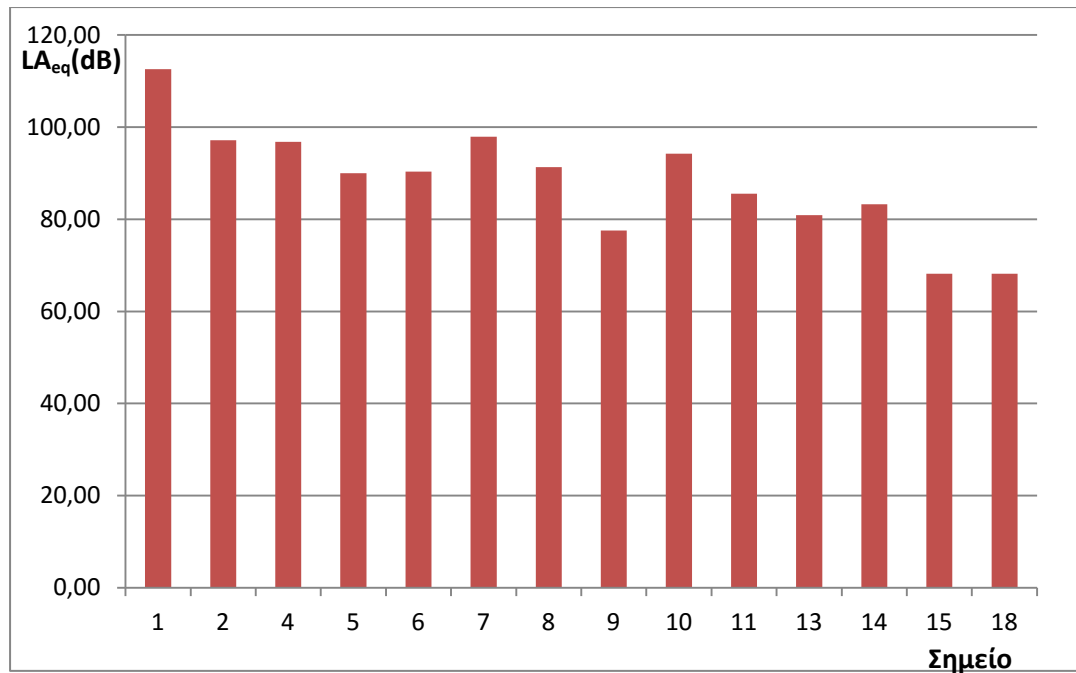
Διάγραμμα 14: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 1,2,4,5,6 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 15 : Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 7,8,9,10,11 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 16: Φασματική κατανομή λευκού θορύβου για τα σημεία 13,14,15,18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 17: Το μέγεθος LAeq για λευκό θόρυβο ανα σημείο

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το λογισμικό Matlab διαπιστώνουμε ότι βρισκόμαστε αρκετά κοντά στις τιμές του λογισμικού Dirac, με κάποιες αποκλίσεις, που πιθανότατα οφείλονται στις τροποποιήσεις που έγιναν στους κώδικες. Παρολαυτά στο φάσμα που μας αφορά, τα αποτελέσματα συγκλίνουν ικανοποιητικά.

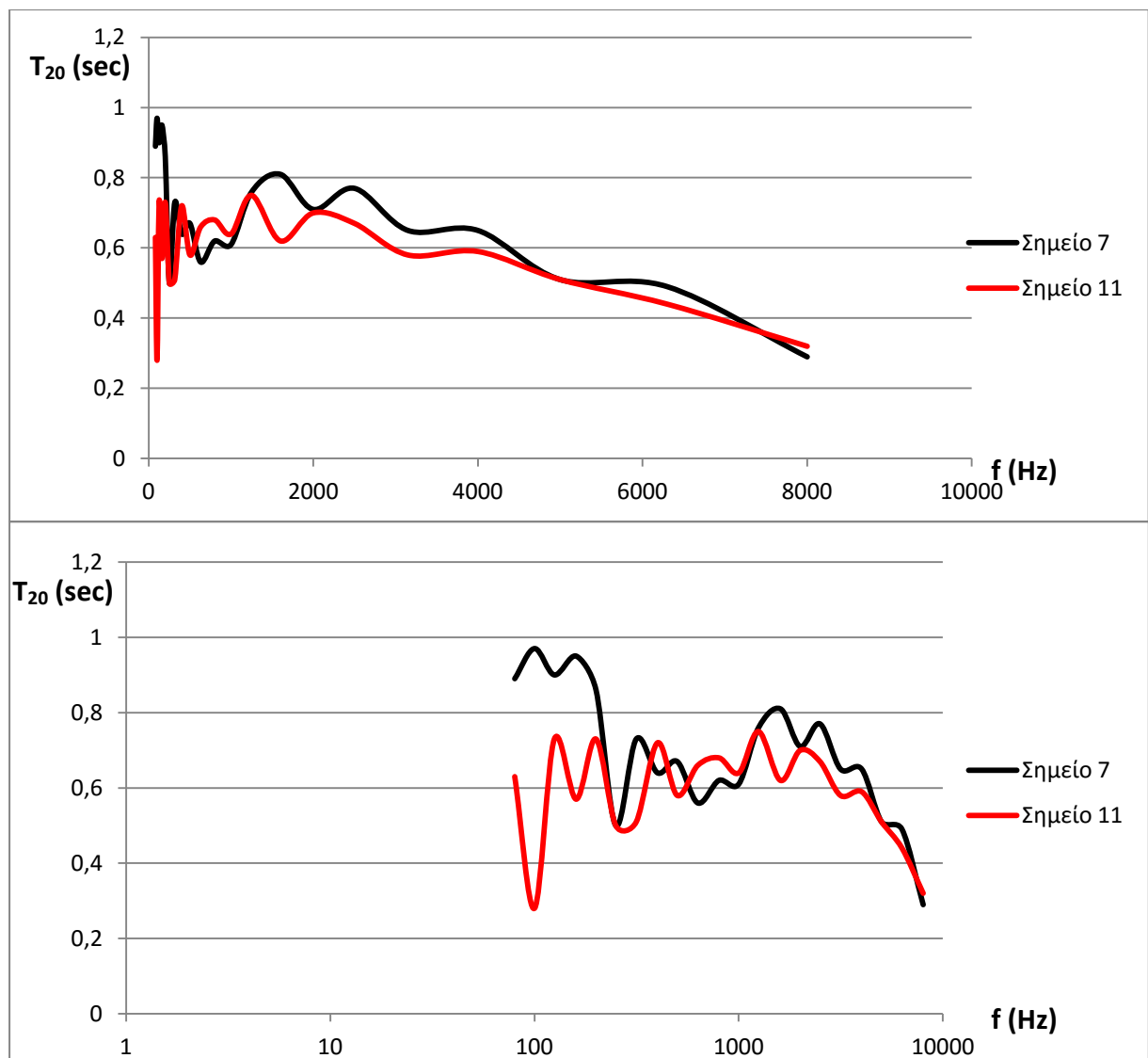
### 3.4.2 Χρόνος Αντήρησης

Για τη μέτρηση του χρόνου αντήρησης έχουν προταθεί διάφορα τρόποι παγκοσμίως. Αυτές περιλαμβάνουν τη διέγερση του χώρου με διαφορετικά σήματα προκειμένου να ηχογραφήσουμε την απόκριση του και στη συνέχεια μέσω κάποιου λογισμικού να υπολογίσουμε το χρόνο αντήρησης. Εμείς ηχογραφήσαμε 4 (MLS, E-Sweep, Linear Sweep, Πυροβολισμό) και τα επεξεργαστήκαμε με τα λογισμικά Dirac και Matlab για να λάβουμε τις τιμές του  $T_{20}$ . Τα τρία πρώτα σήματα αφορούν την τεχνική "integrated impulse response", όπου μέσω του ηχείου διεγείρουμε το χώρο, ηχογραφούμε την απόκριση του, και με τη μέθοδο της ανάποδης ολοκλήρωσης υπολογίζεται από το Dirac ο χρόνος αντήρησης. Στην περίπτωση του πυροβολισμού, ο οποίος προσομοιάζει τον κρουστικό παλμό (δηλ. πολύ μικρή διάρκεια και

"άπειρη" ενέργεια) ο χώρος διεγέρθηκε μέσω του όπλου, ηχογραφήθηκε η απόκρισή του και το λογισμικό Dirac υπολόγισε το χρόνο αντήχησης. [25]

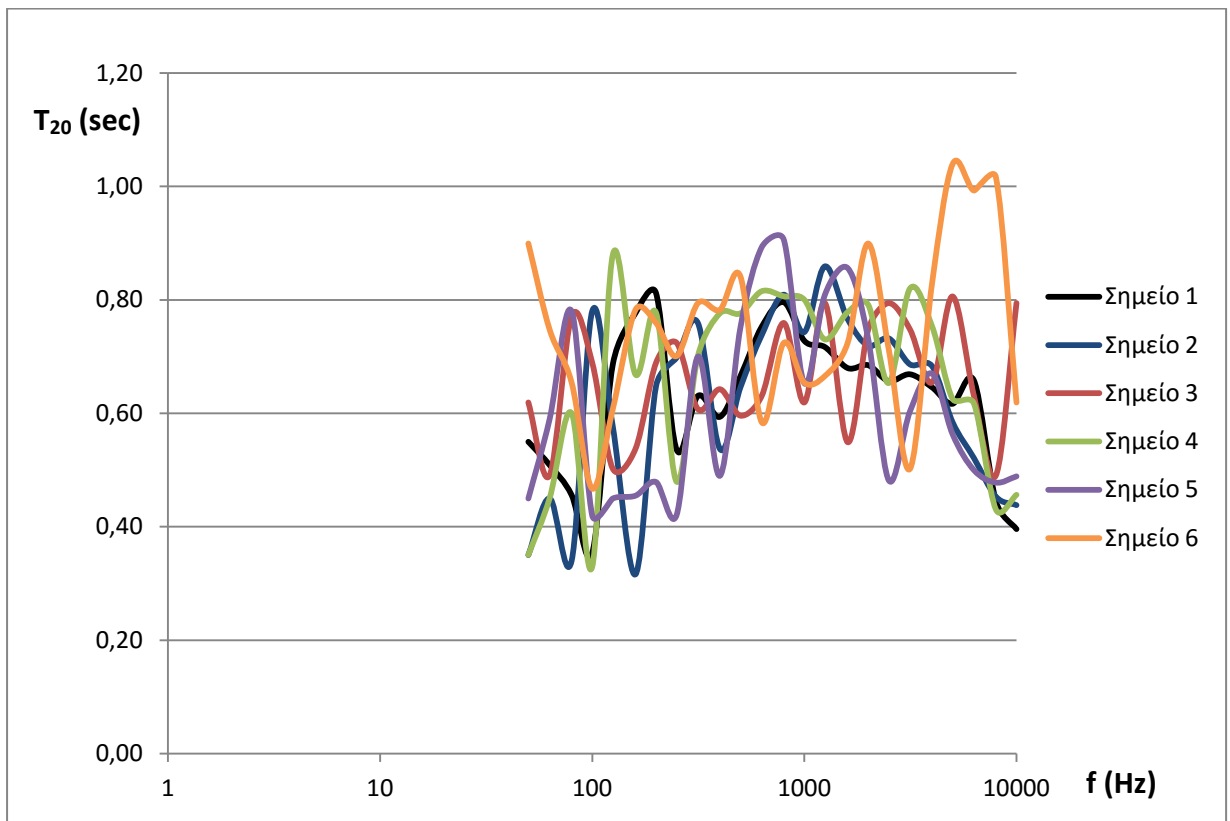
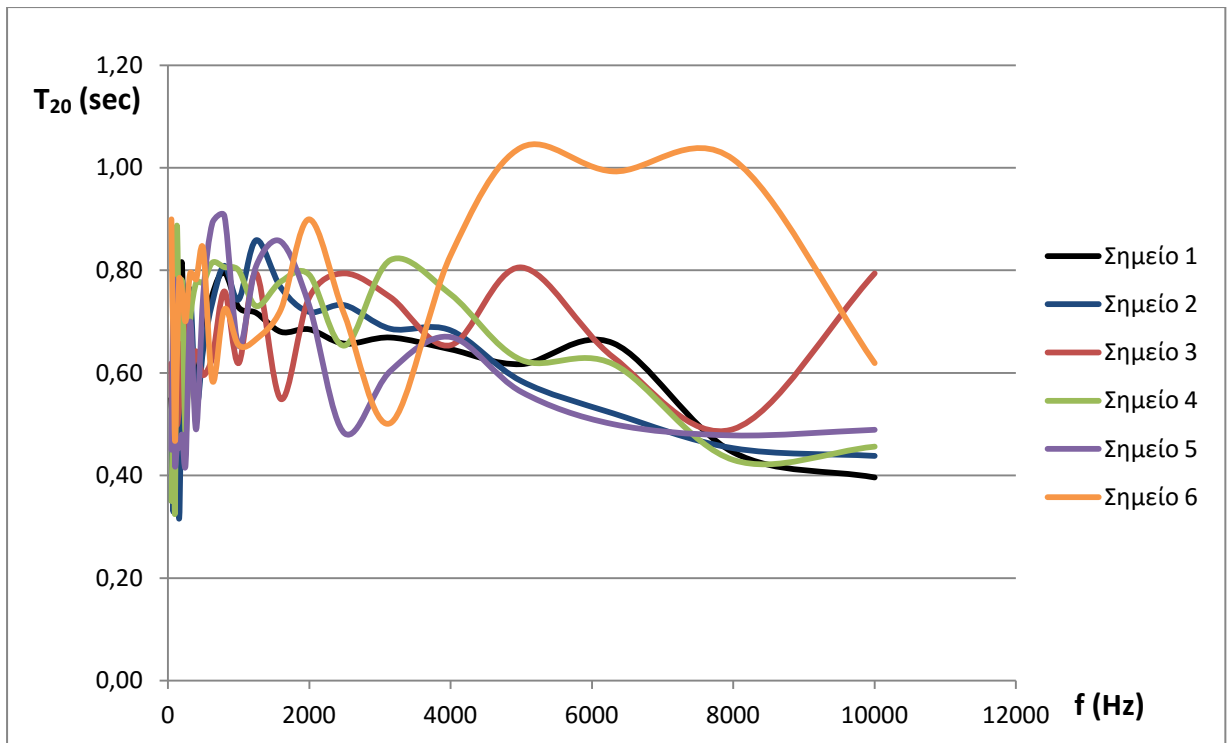
Τα πιο έγκυρα αποτελέσματα με βάση το όργανο αναφοράς, αλλά και το λογικό πλαίσιο του χρόνου αντήχησης ενός ανοιχτού θεάτρου, τα έδωσε το όπλο ως πηγή.

Το πρότυπο όργανο μέτρησης B&K 2270 με σήμα εισόδου τον πυροβολισμό, έδωσε το παρακάτω διάγραμμα για τα σημεία 7, 11 :

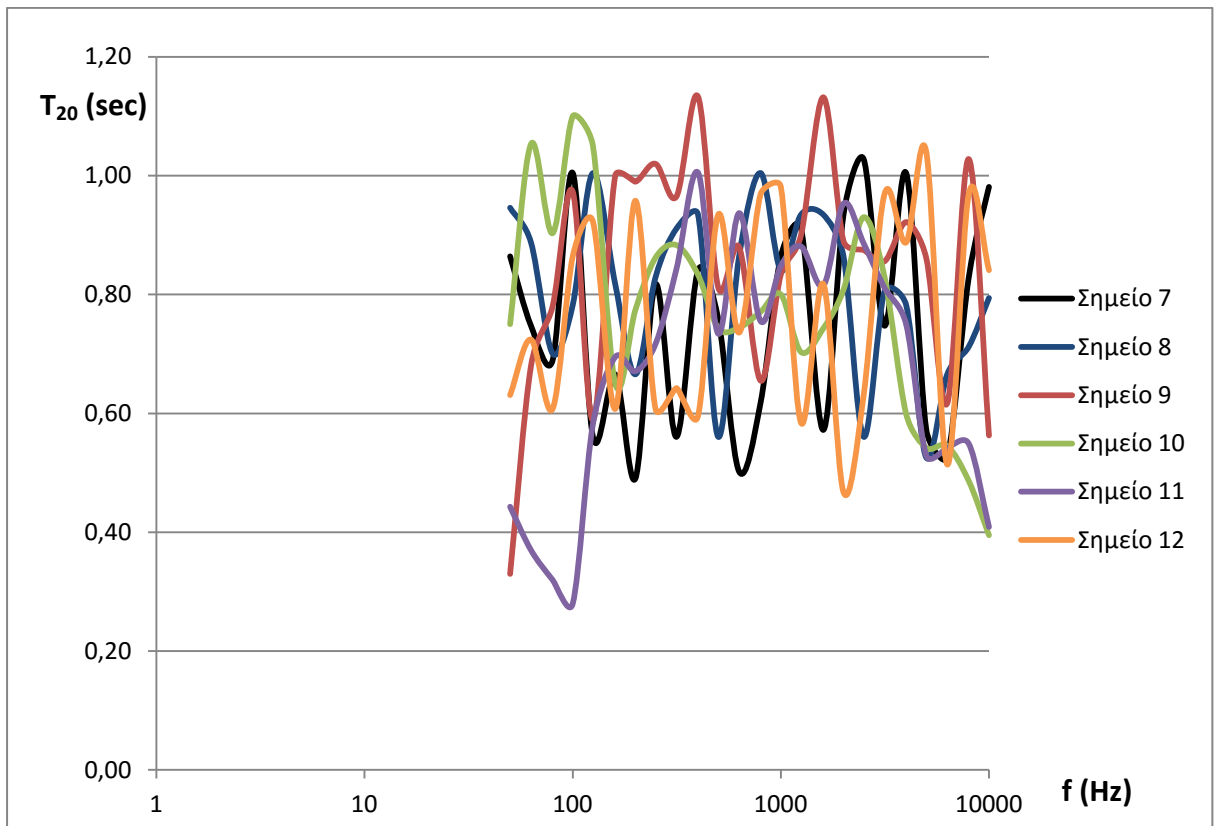
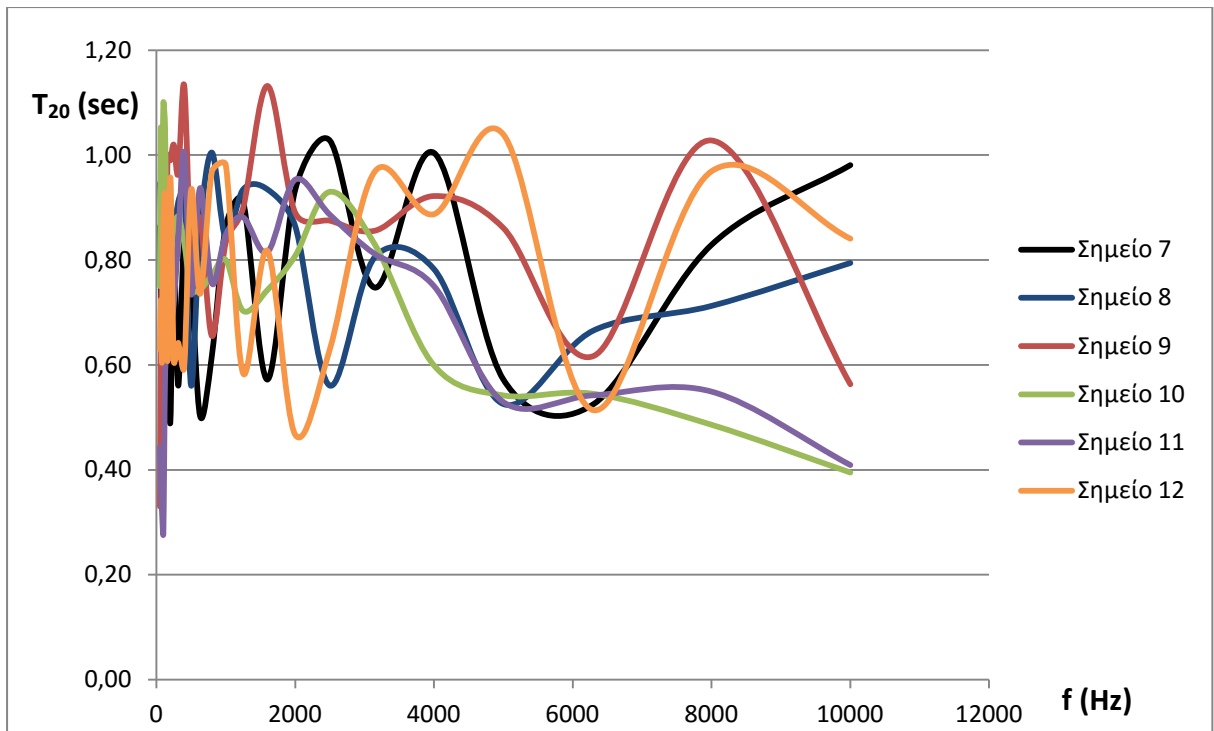


Διάγραμμα 18: Διάγραμμα αποτελεσμάτων B&K 2270 για τα σημεία 7,11 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

Το λογισμικό Dirac έδωσε τα εξής αποτελέσματα με σήμα εισόδου τον πυροβολισμό :

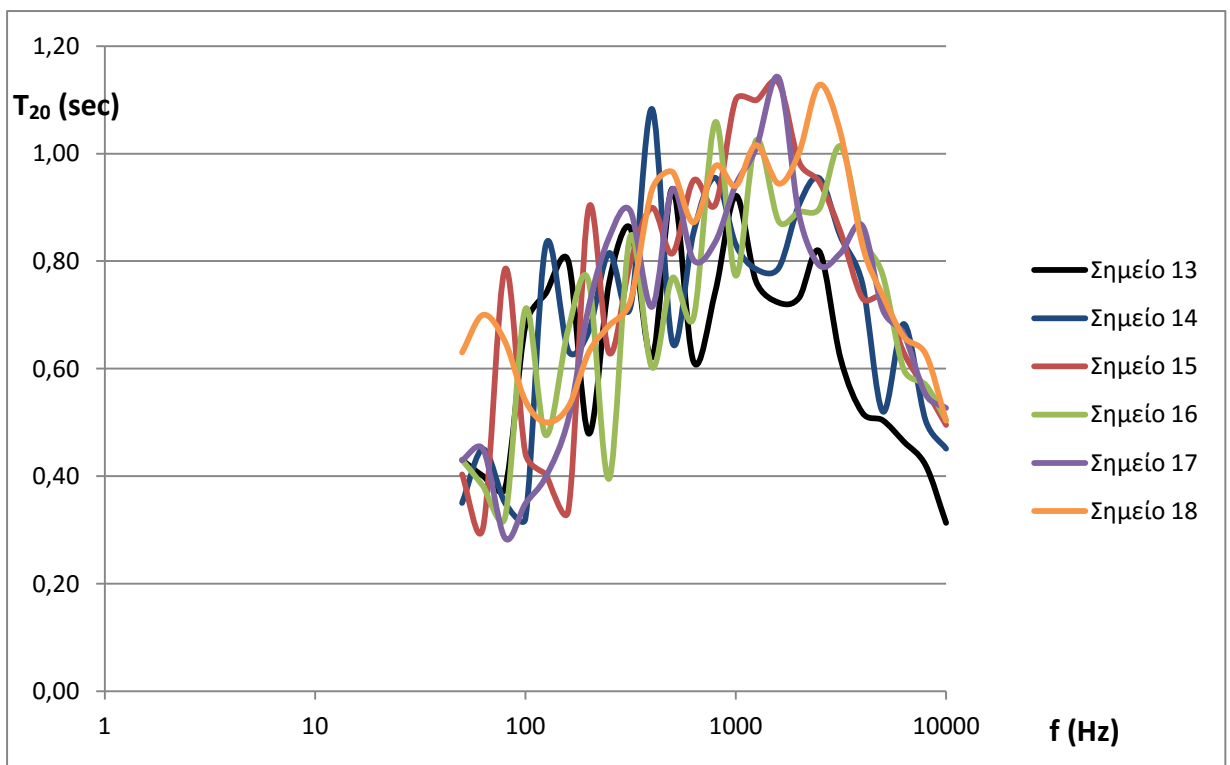
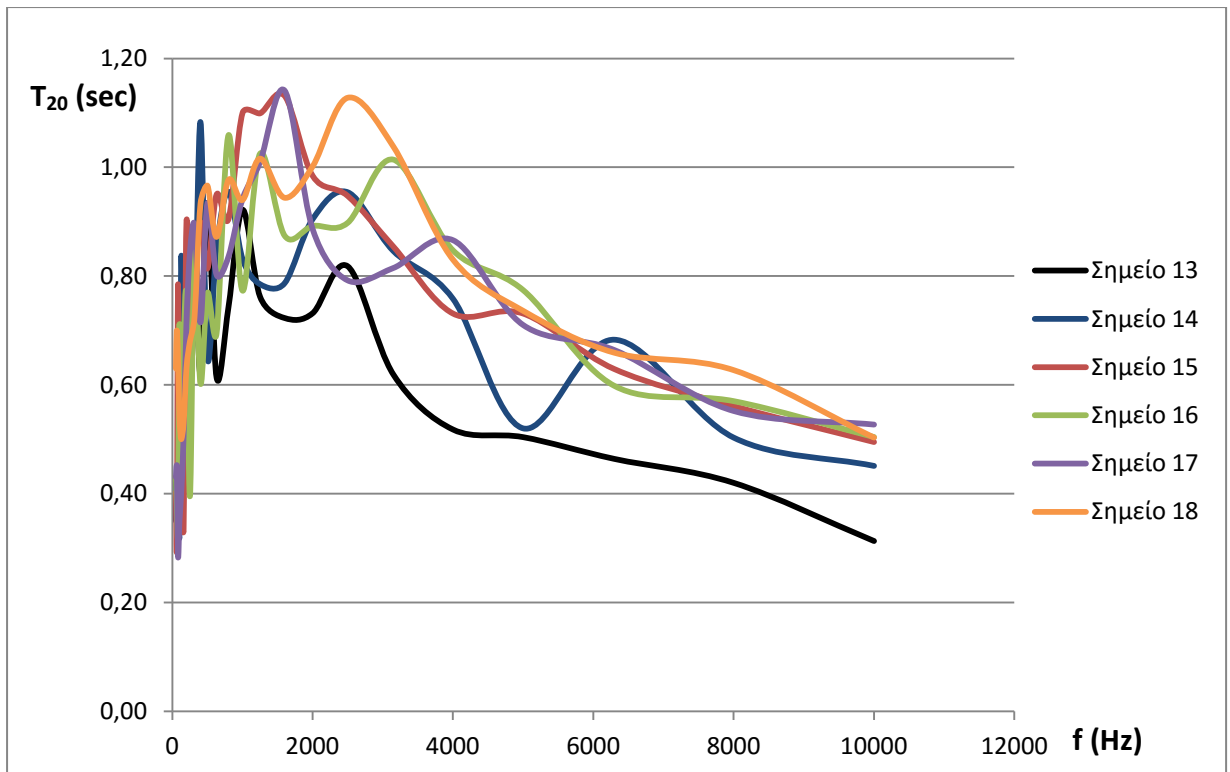


Διάγραμμα 19: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Dirac για τα σημεία 1-6 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



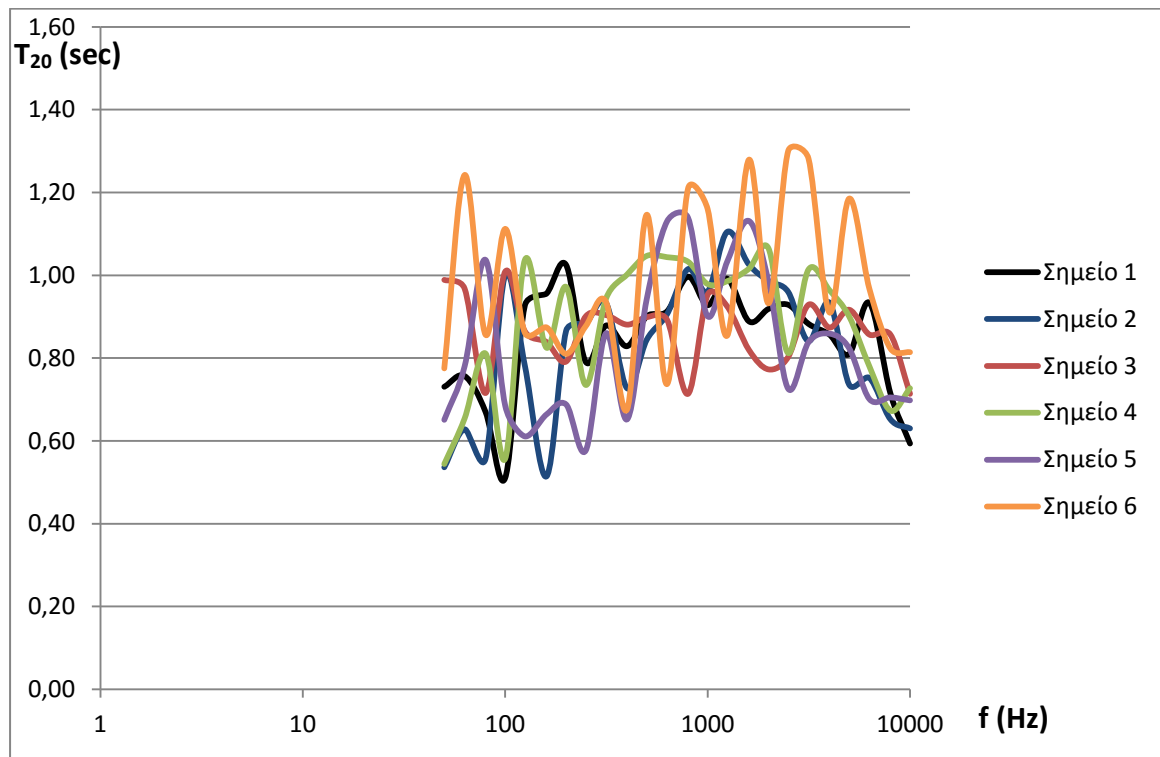
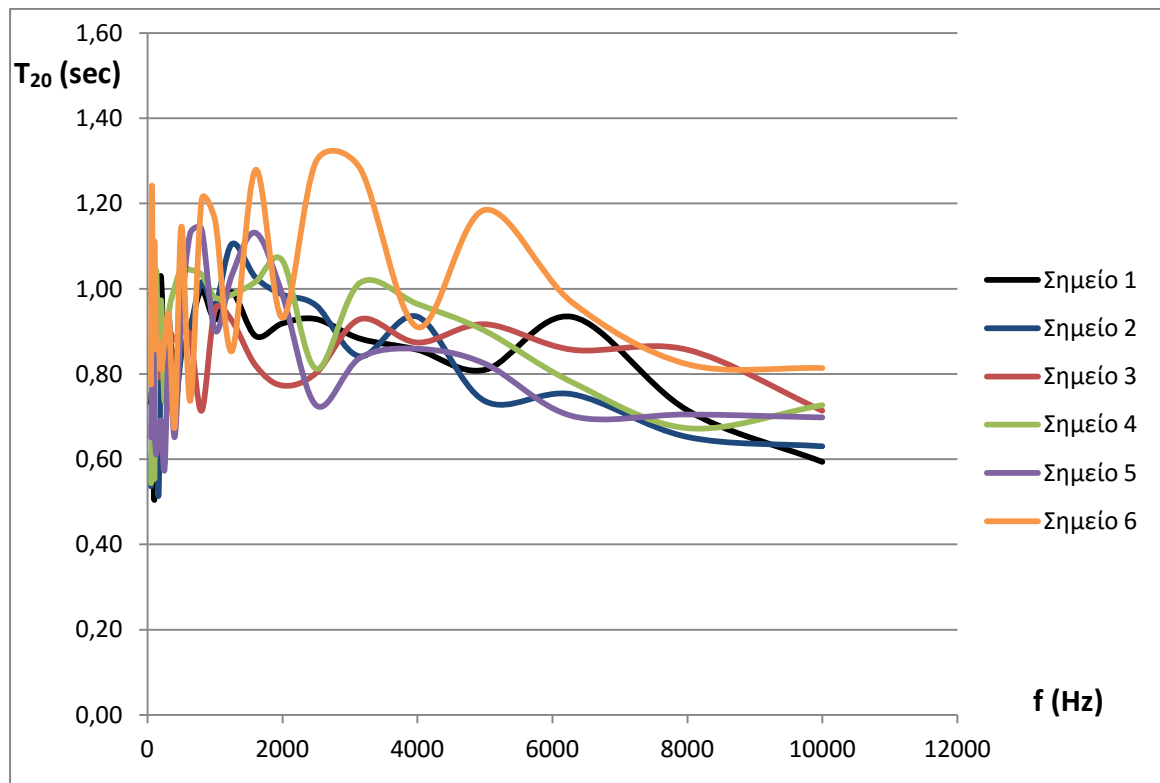
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Dirac για τα σημεία 7-11 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



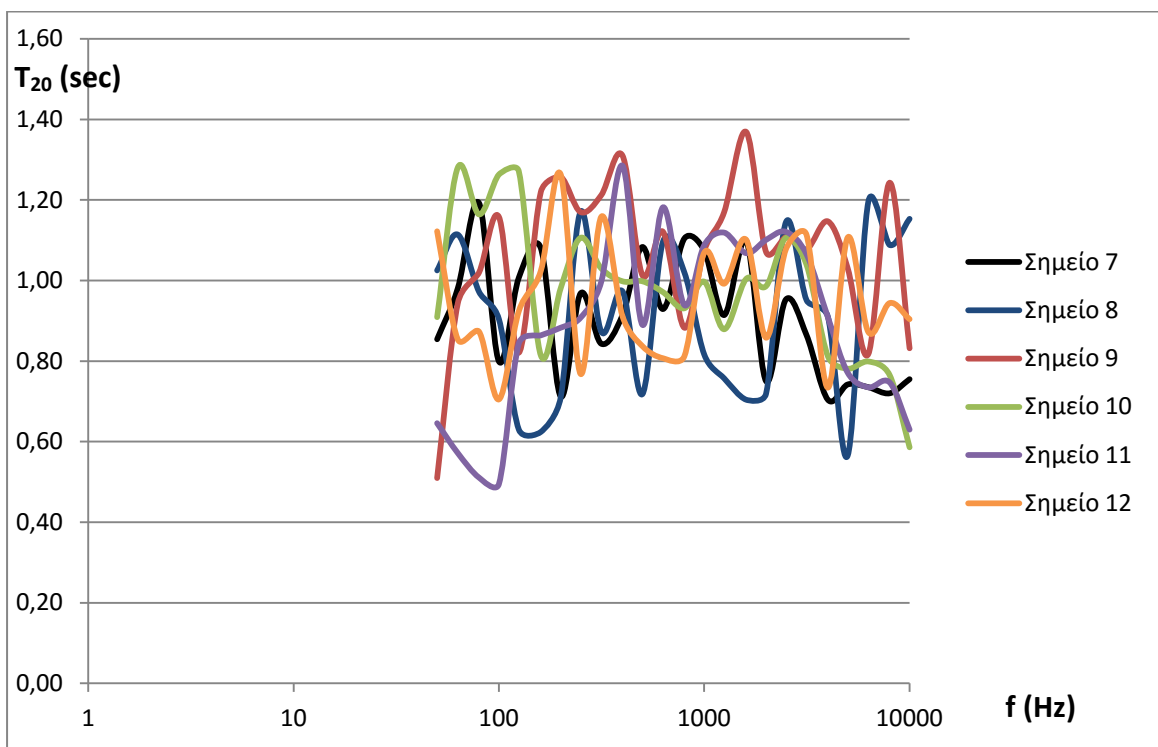
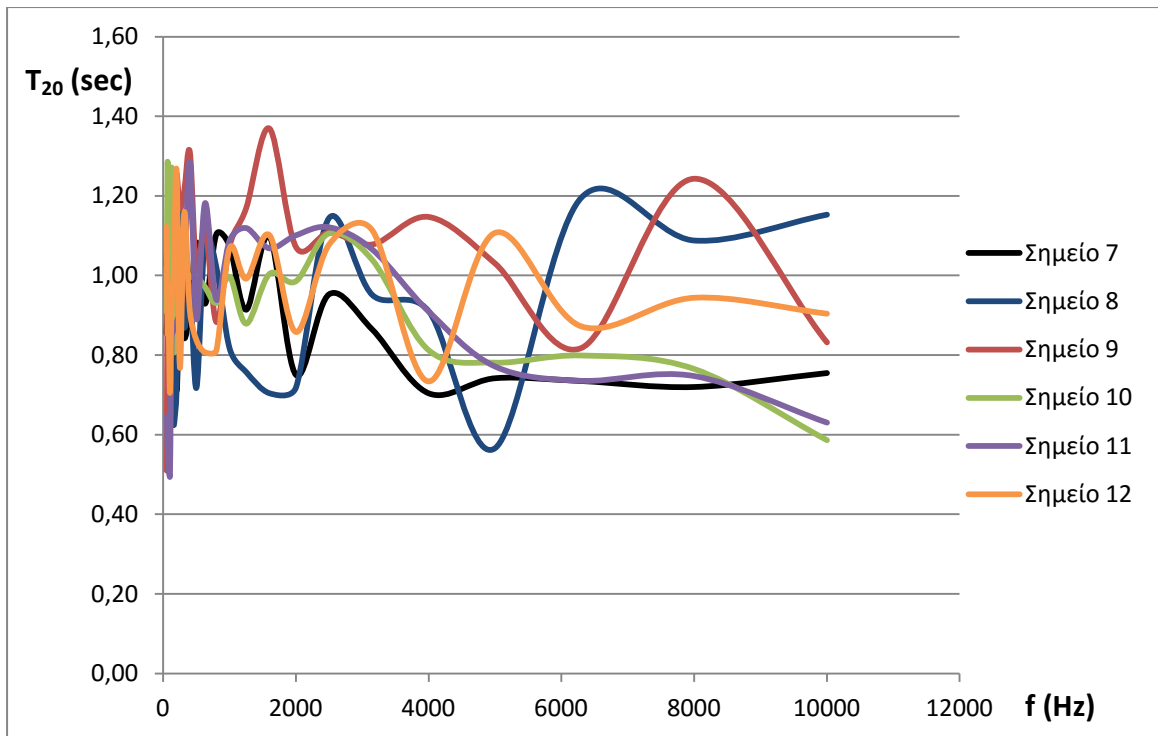


Διάγραμμα 21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Dirac για τα σημεία 13-18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

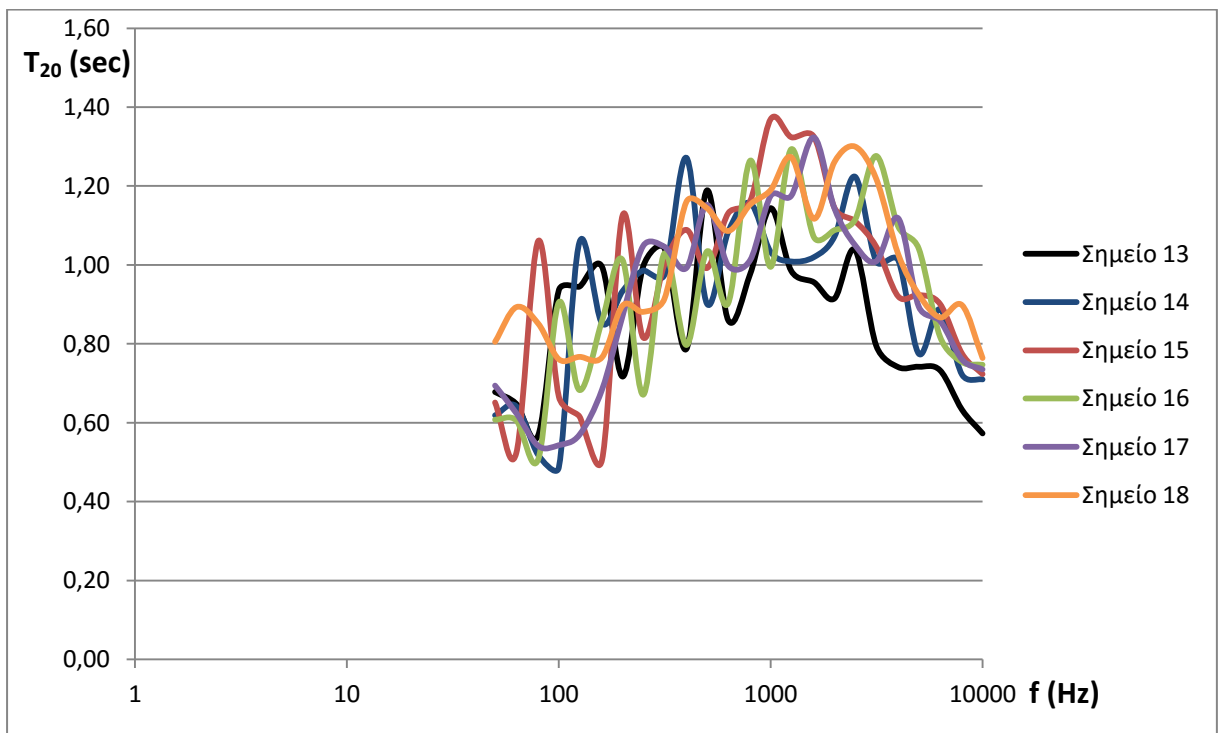
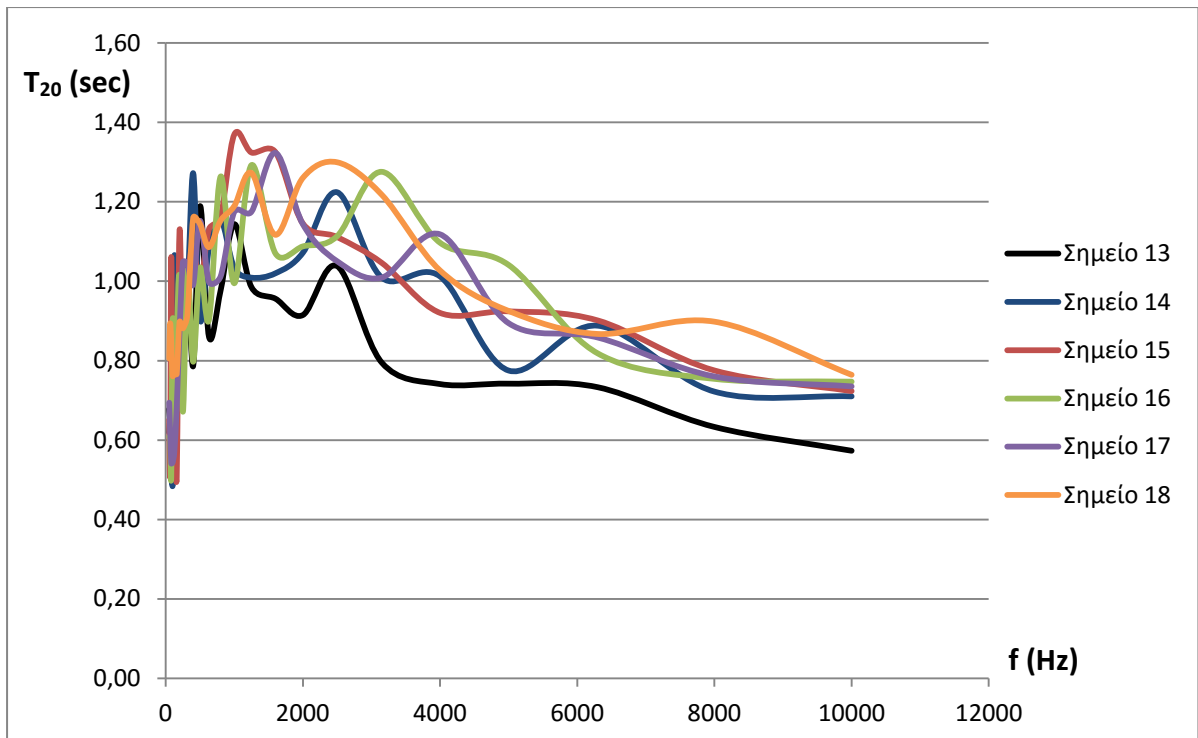
Το λογισμικό Matlab έδωσε τα εξής αποτελέσματα με σήμα εισόδου τον πυροβολισμό:



Διάγραμμα 22: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Matlab για τα σημεία 1-6 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



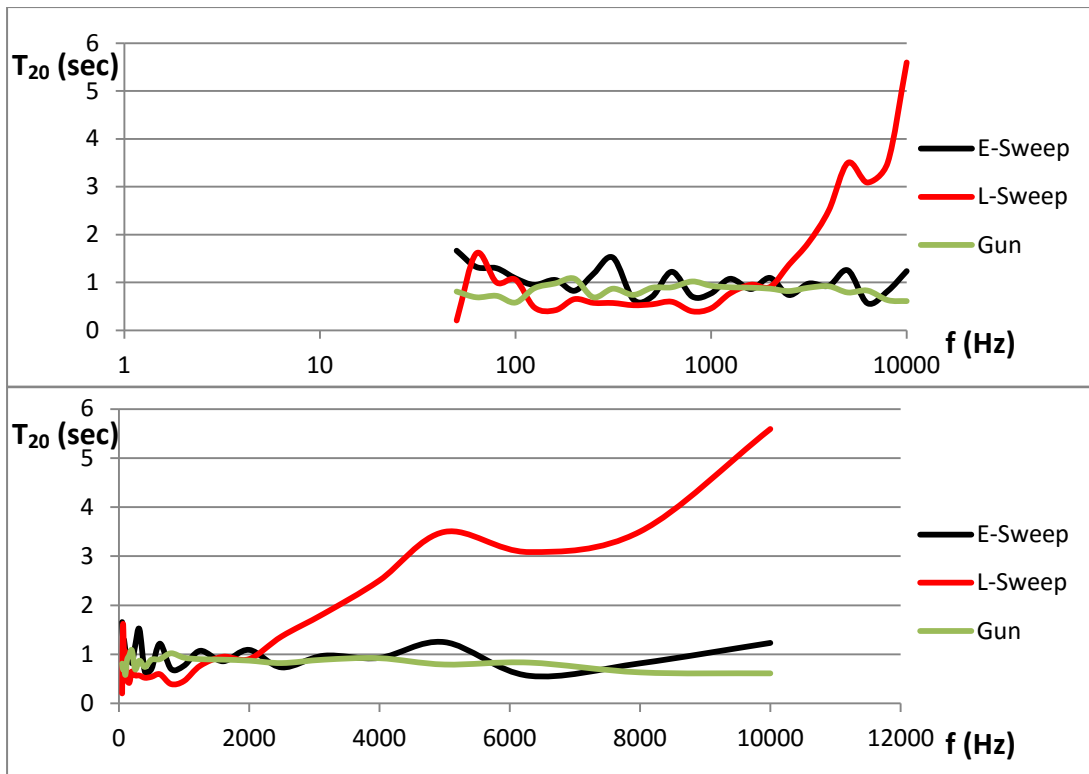
Διάγραμμα 23: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Matlab για τα σημεία 7-12 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



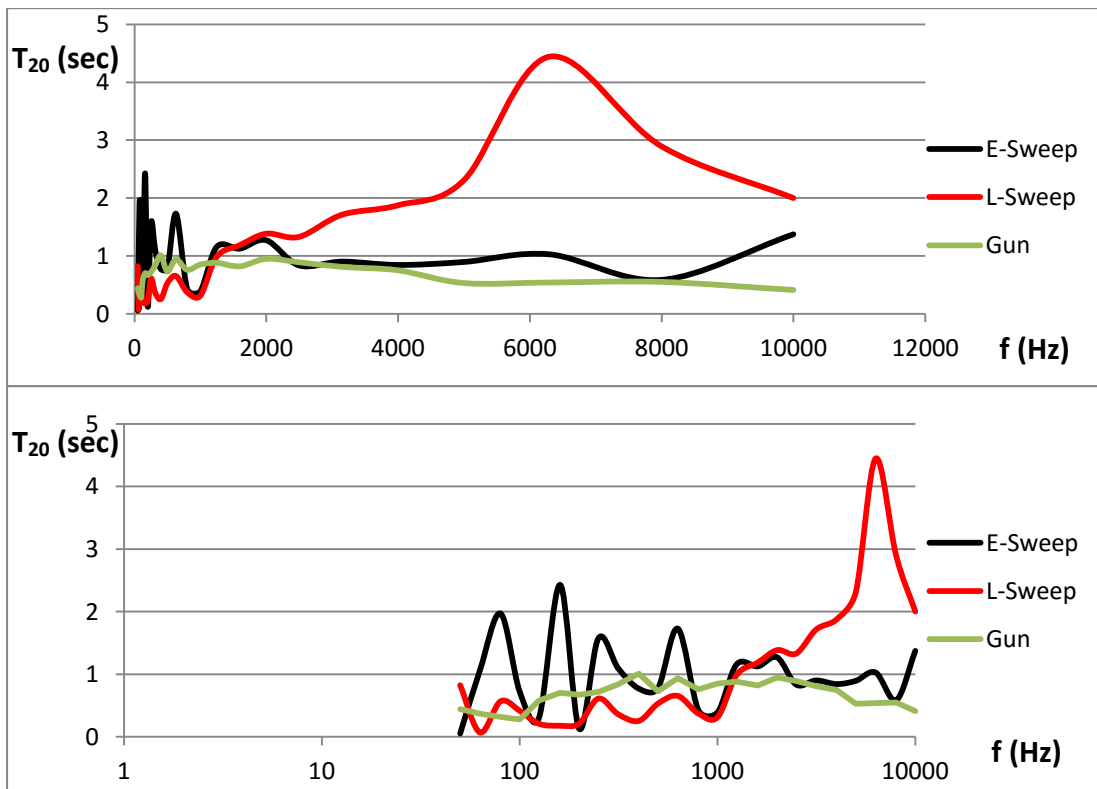
Διάγραμμα 24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Matlab για τα σημεία 13-18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

Πριν αρχίσουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων πρέπει να έχουμε κατά νου τόσο από τη θεωρία των μετρήσεων , όσο και από τις αρχές της ακουστικής ότι σε ένα τόσο μεγάλο θέατρο είναι σχεδόν αδύνατον να επιτύχουμε τα ίδια αποτελέσματα σε κάθε σημείο του. Προφανώς επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τον μετρητικό εξοπλισμό καθώς και από το σημείο του θεάτρου που βρίσκεται αυτός. Έτσι στο σχολιασμό μας θα αναζητήσουμε ποιοτικές διαφορές και θα εξετάσουμε τη συνολική εικόνα.

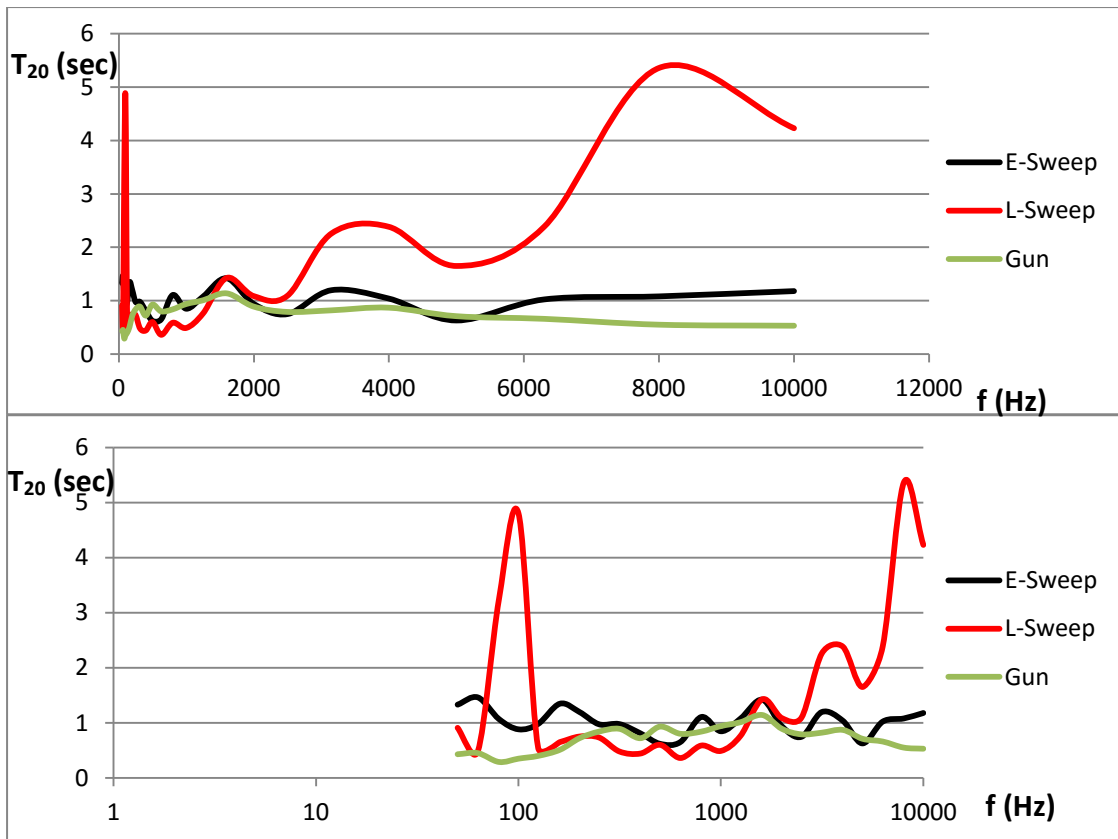
Γενικώς, παρατηρούμε ότι το μετρητικό σύστημα μικρόφωνα-υπολογιστές έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στις μεσαίες συχνότητες (όπου βρίσκεται και το φάσμα της ανθρώπινης φωνής) ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται από **0.5-1 seconds** (αφήνουμε εκτός κάποιες μεμονωμένες τιμές που βρίσκονται εκτός των συγκεκριμένων ορίων), γεγονός που επιβεβαιώνει και το πρότυπο μετρητικό όργανο. Όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της ορχήστρας (όπου εκपुरσοκροτούσε το όπλο) διαπιστώνουμε ότι ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζει μία μικρή άνοδο, γεγονός που πιθανόν να εξηγείται από το ότι τα μικρόφωνα αργούν να λάβουν τον απευθείας ήχο και έτσι οι υπολογισμοί επηρεάζονται. Επιπρόσθετα , παρατηρούμε μία μικρή αστάθεια τόσο στις χαμηλές όσο και στις υψηλές συχνότητες. Η συχνοτική απόκριση των μικροφώνων αλλά και το ότι το όπλο ως ηχητική πηγή δεν έχει υψηλό φασματικό περιεχόμενο σε αυτές τις συχνότητες, αποτελούν τις βασικότερες αιτίες. Τέλος, η σύγκριση ανάμεσα στον πυροβολισμό και τη λογαριθμική και γραμμική ημιτονική σάρωση δείχνει σε κάποιες περιπτώσεις σύγκλιση αποτελεσμάτων στις μεσαίες συχνότητες, αλλά σε χαμηλές και υψηλές, αποκλίσεις. Μεταξύ όπλου και λογαριθμικής ημιτονικής σάρωσης παρατηρούμε αρκετές ομοιότητες, σε βαθμό που σε κάποια σημεία του θεάτρου να μπορούμε να θεωρήσουμε έγκυρα τα αποτελέσματα της μεθόδου ESS. Μερικές από τις τιμές που δίνει η μέθοδος LSS είναι εντός λογικών πλαισίων (περίπου μέχρι τα 2000 Hz) αλλά στο υπόλοιπο φάσμα είναι υπερβολικές (π.χ. 5 δευτερόλεπτα), αλλά παρουσιάζουν και έντονες διακυμάνσεις ανά τριτοκτάβα οπότε δε μας επιτρέπεται να θεωρήσουμε τη μέθοδο αξιόπιστη στη συγκεκριμένη περίπτωση. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές είναι μεν υπερβολικές ,αλλά σχεδόν σταθερές ανά σημείο. Ενδεικτικά, ακολουθούν συγκριτικά αποτελέσματα για το χρόνο αντήχησης στα σημεία **1 ,11,17,18** για τα σήματα "Gun","E-Sweep","L-Sweep".



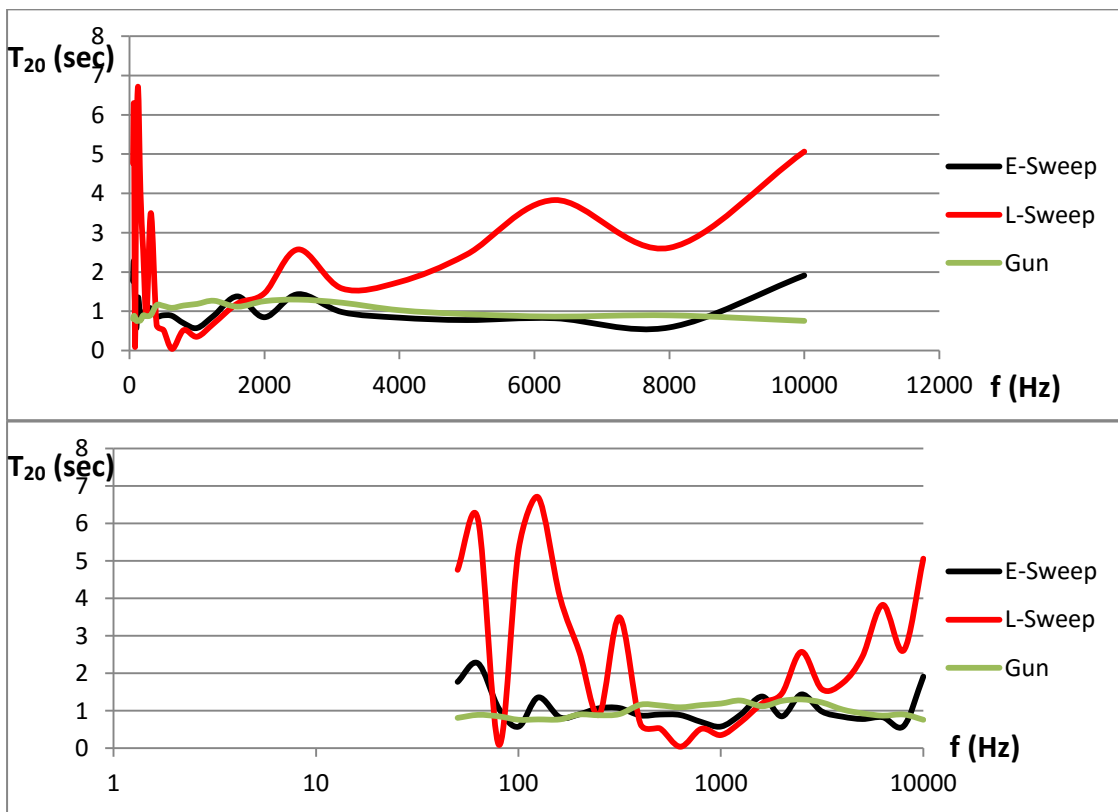
Διάγραμμα 25: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για το σημείο 1 σε γραμμική και ημilogαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 26: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για το σημείο 11 σε γραμμική και ημilogαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 27: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για το σημείο 17 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 28: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων για το σημείο 18 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

Τόσο το σήμα MLS όσο και οι θόρυβοι έδωσαν αποτελέσματα που δεν ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα (μέσος χρόνος αντήχησης περίπου 4,5 sec), οπότε αφήνονται εκτός μελέτης.

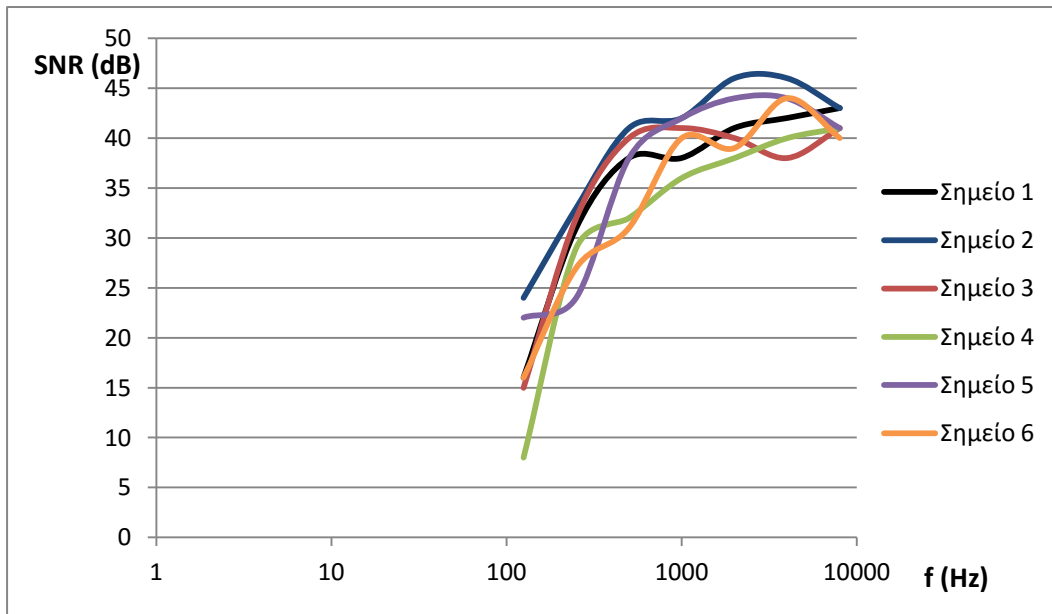
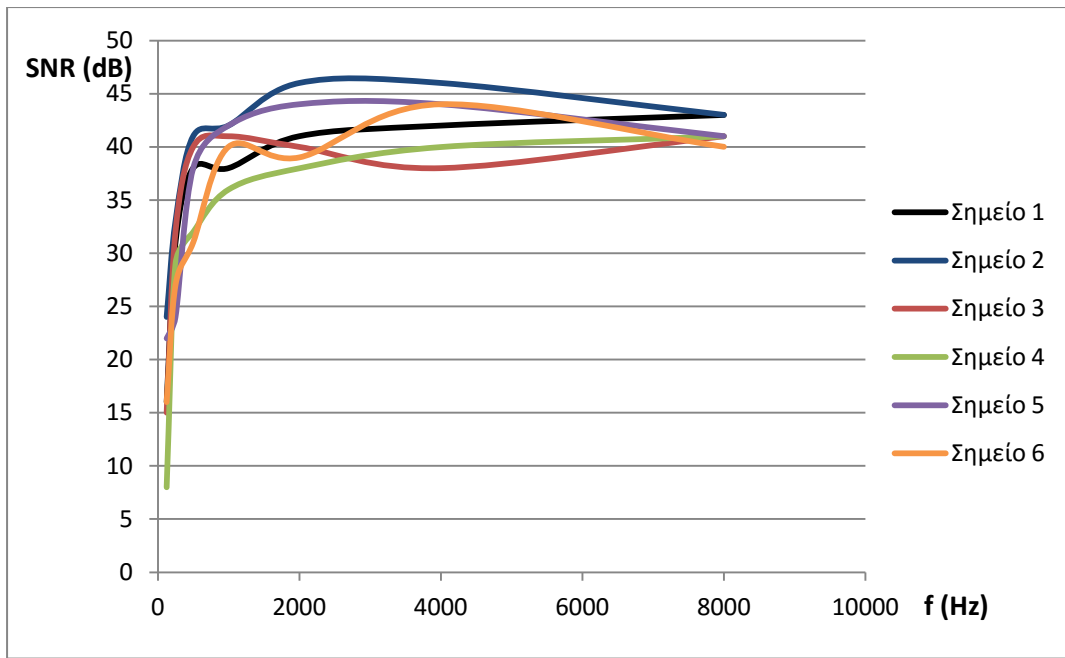
Όλα τα παραπάνω συντελούν στο γεγονός ότι η χρήση όπλου ως κρουστική πηγή για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα , δεδομένου και του κόστους όλου του συστήματος μέτρησης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του λογισμικού Matlab με αυτά του Dirac, παρατηρούμε ότι στις περισσότερες μετρήσεις, το Matlab δίνει μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης σε σχέση με το Dirac, αλλά πάντα μέσα στα λογικά πλαίσια που αναμένουμε να κυμαίνεται ο χρόνος αντήχησης ενός ανοιχτού θεάτρου. Συγκεκριμένα οι τιμές βρίσκονται στο διάστημα **0,6-1,3**. Η μικρή αυτή απόκλιση από το Dirac αλλά και το πρότυπο όργανο μέτρησης, πιθανώς έγκειται στους διαφορετικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιεί κάθε σύστημα για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο το Dirac όσο και το B&K 2270 είναι προϊόντα της εταιρίας Bruel and Kjaer, οπότε είναι λογικό να χρησιμοποιούν παραπλήσιους αλγόριθμους για τους διάφορους υπολογισμούς που πραγματοποιούν.

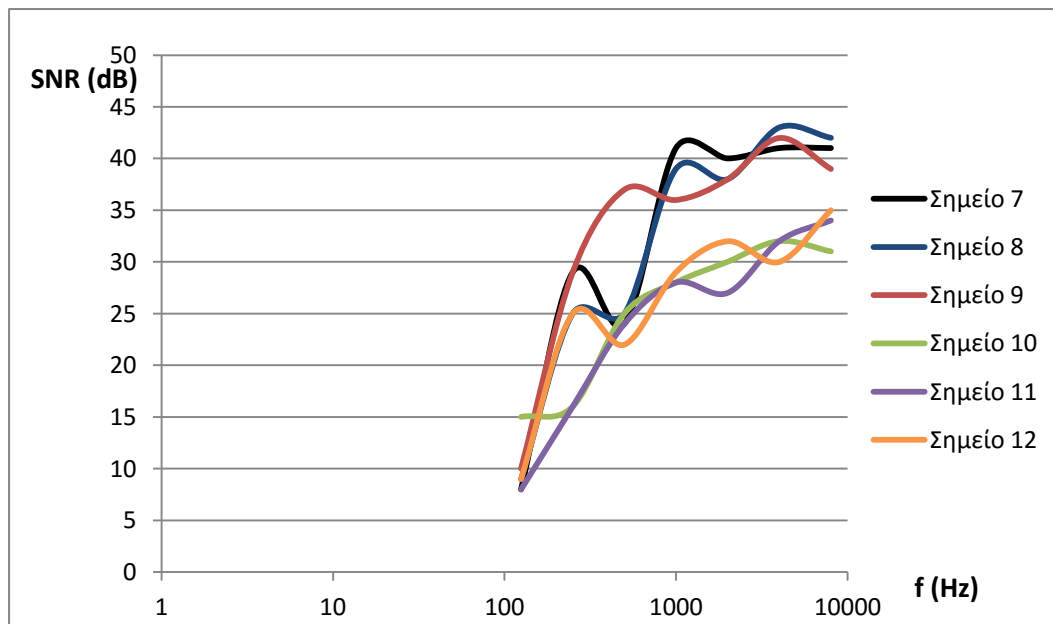
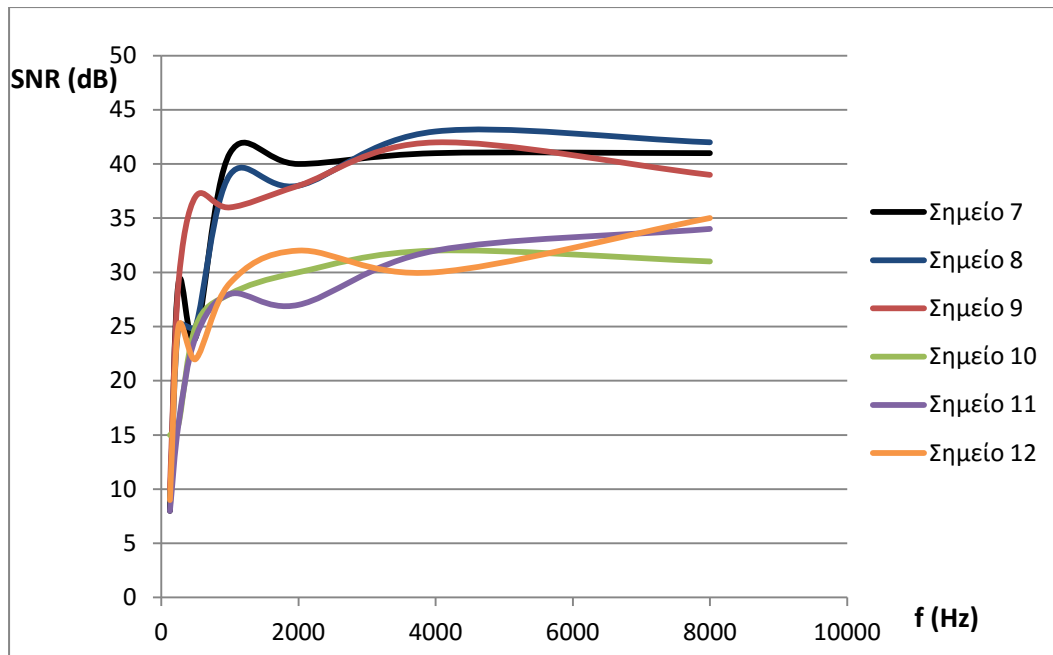
### 3.4.3 Περαιτέρω δείκτες/κριτήρια ακουστικής

Το τρίτο και τελευταίο σκέλος της επεξεργασίας των μετρήσεων αφορά την εξαγωγή δεικτών για την ακουστική του θεάτρου , όπως αυτοί περιγράφηκαν στο κεφάλαιο "Αρχιτεκτονική Ακουστική" της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, εισήχθησαν στο λογισμικό Dirac τα αρχεία με τους κρουστικούς παλμούς και λάβαμε τις τιμές για τις παραμέτρους SNR, STI female και male, Alcons % και RASTI. Παρακάτω ακολουθούν οι αντίστοιχοι πίνακες και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή του μεγέθους SNR , το Dirac δίνει μόνο τη δυνατότητα ανάλυσης ανά οκτάβα.

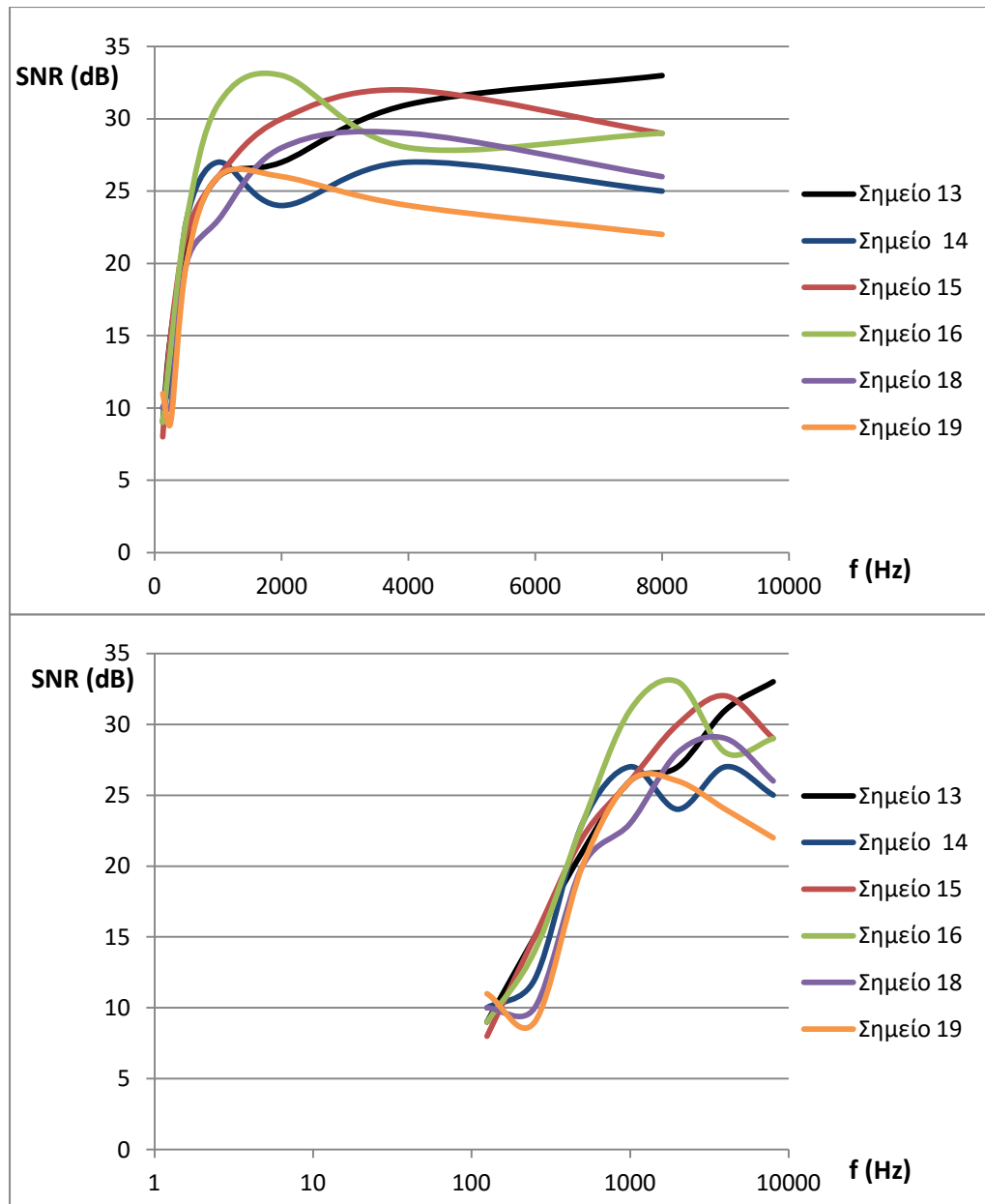




Διάγραμμα 29: Αποτελέσματα SNR για τα σημεία 1-6 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

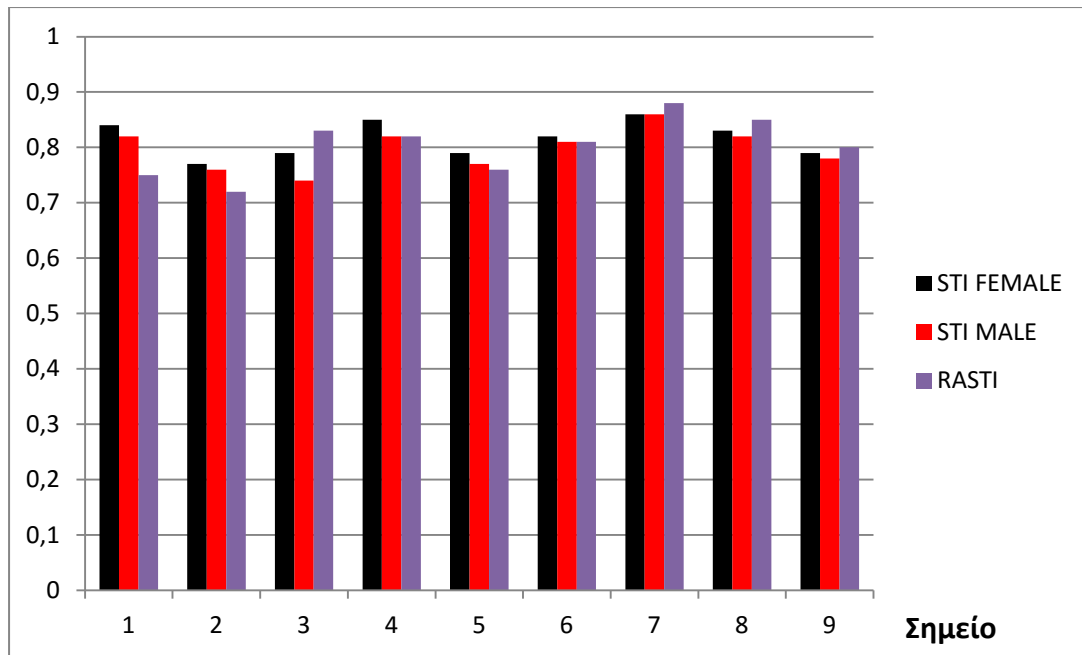


Διάγραμμα 30: Αποτελέσματα SNR για τα σημεία 7-12 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

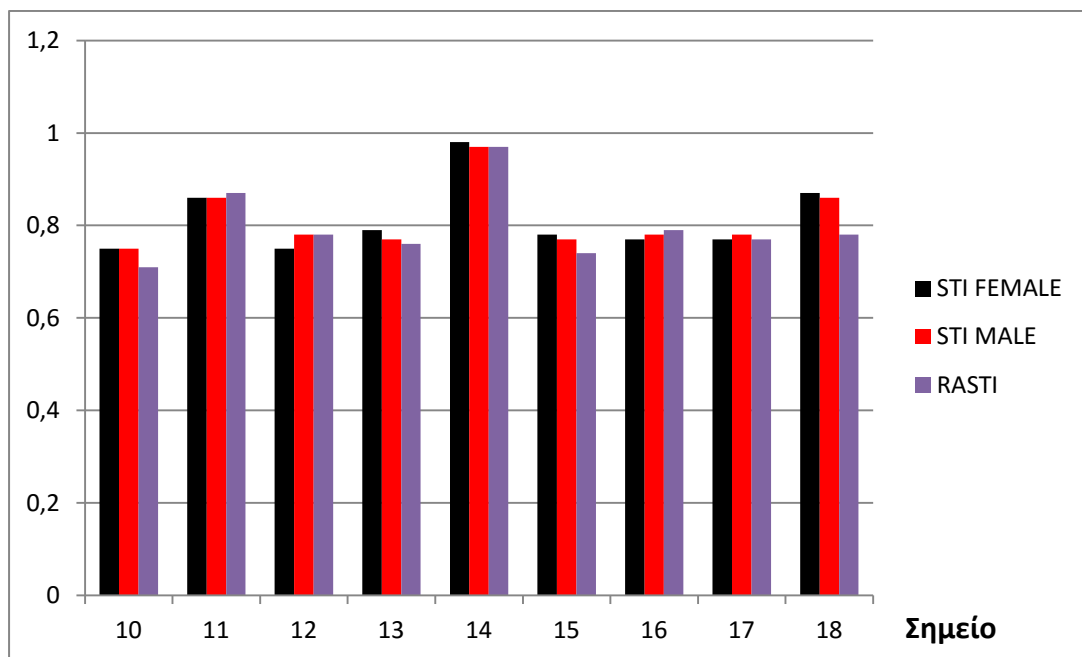


Διάγραμμα 31: Αποτελέσματα SNR για τα σημεία 13-19 σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα , διαπιστώνουμε όχι μόνο πως είμαστε εντός των ορίων που ορίζει το ISO 3382-3:2012 σχετικά με την ακουστική ενός χώρου (βλ. πίνακες στο πρώτο κεφάλαιο 1.1.3 ) , αλλά βρισκόμαστε σε εξαιρετικά επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου σε όλο το θέατρο. Αυτό σημαίνει ότι ένας ήχος θα ακούγεται εξαιρετικά μέσα στο χώρο , χωρίς να υπερκαλύπτεται από τον θόρυβο. Βέβαια στις χαμηλές συχνότητες παρατηρείται μία πτώση του SNR ( εντός ορίων παρόλαυτά ) , αλλά ας μη λησμονείται το γεγονός ότι η χρήση του θεάτρου ήταν για την πραγματοποίηση παραστάσεων, άρα ανθρώπινης ομιλίας, η οποία δεν έχει υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο σε αυτήν την περιοχή.

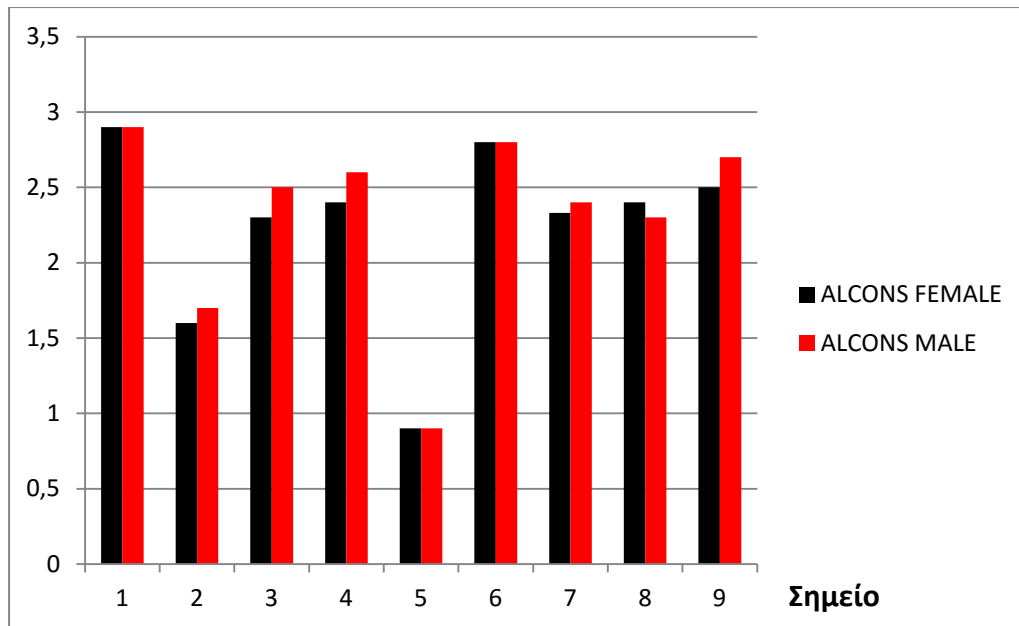


Διάγραμμα 32: Αποτελέσματα STI Female, STI Male, RASTI για τα σημεία 1-9

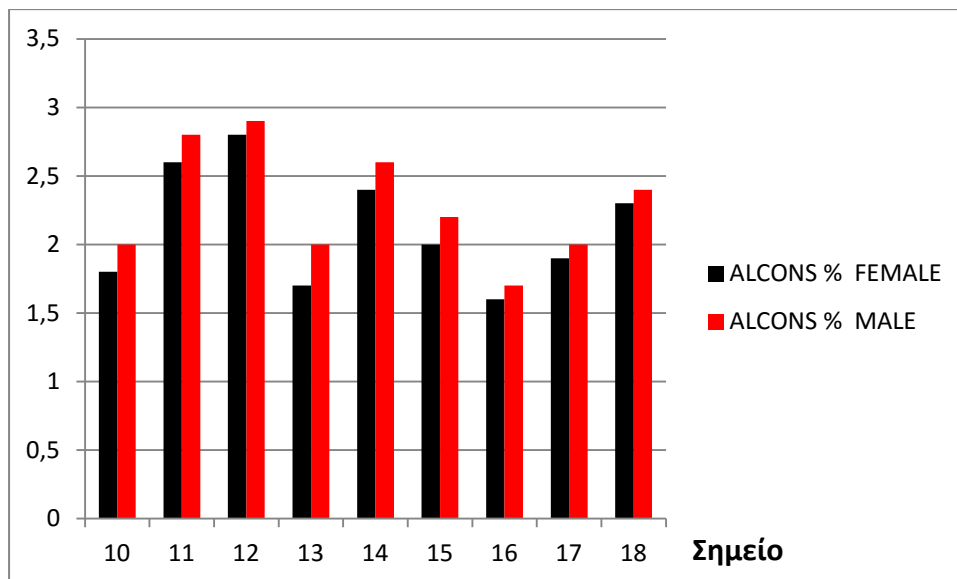


Διάγραμμα 33: Αποτελέσματα STI Female, STI Male, RASTI για τα σημεία 10-18

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε πώς μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την καταληπτικότητα λόγου στο θέατρο κατά ISO 3382-3:2012 ως **εξαιρετική**.



Διάγραμμα 34: Αποτελέσματα Alcons % Male/Female για τα σημεία 1-9



Διάγραμμα 35: Αποτελέσματα Alcons % Male/Female για τα σημεία 10-18

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε πώς μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την καταληπτότητα λόγου στο θέατρο κατά ISO 3382-3:2012 ως **εξαιρετική**. Η απώλεια συμφώνων τόσο για αντρική όσο και για γυναικεία φωνή είναι ελάχιστη ( σε όλο το θέατρο κάτω από 2.8 % ).

## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

---

Το επόμενο βήμα ήταν η προσπάθεια μοντελοποίησης της ακουστικής του θεάτρου ηλεκτρονικά.

Αφού ανεκτήθησαν τα σχέδια από το Γαλλικό Ινστιτούτο , το οποίο είχε αναλάβει τις αρχαιολογικές ανασκαφές στο θέατρο, έγινε σχεδιασμός του θεάτρου στο πρόγραμμα **AutoCAD**. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το ηλεκτρονικό μοντέλο του θεάτρου στο πρόγραμμα ακουστικής προσομοίωσης **EASE** στο οποίο πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από προσομοιώσεις για να διαπιστώσουμε κατά πόσο συμπίπτουν τα αποτελέσματα με αυτά των επιτόπιων μετρήσεων, αλλά και να κάνουμε και κάποιους επιπλέον "πειραματισμούς".

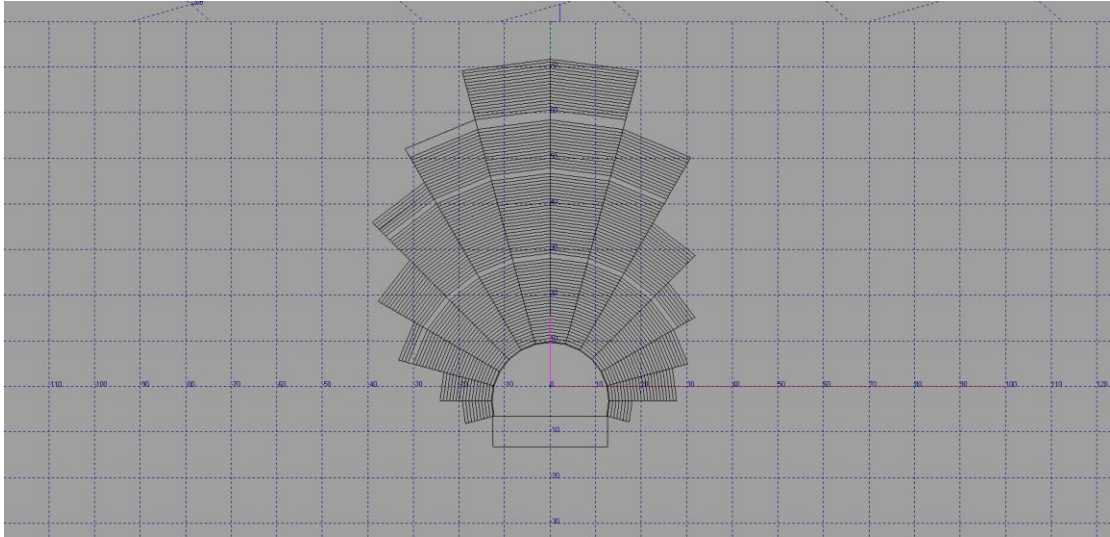
### 4.1 Το μοντέλο

Το λογισμικό Ease (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) αναπτύχθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του '90 με σκοπό να δώσει τη δυνατότητα ακουστικών προσομοιώσεων τόσο ανοιχτών όσο και κλειστών χώρων. Αποτελεί πρότυπο λογισμικό για την αγορά και χρησιμοποιείται εκτενώς σε πληθώρα εφαρμογών που έχουν σχέση με τον ήχο.

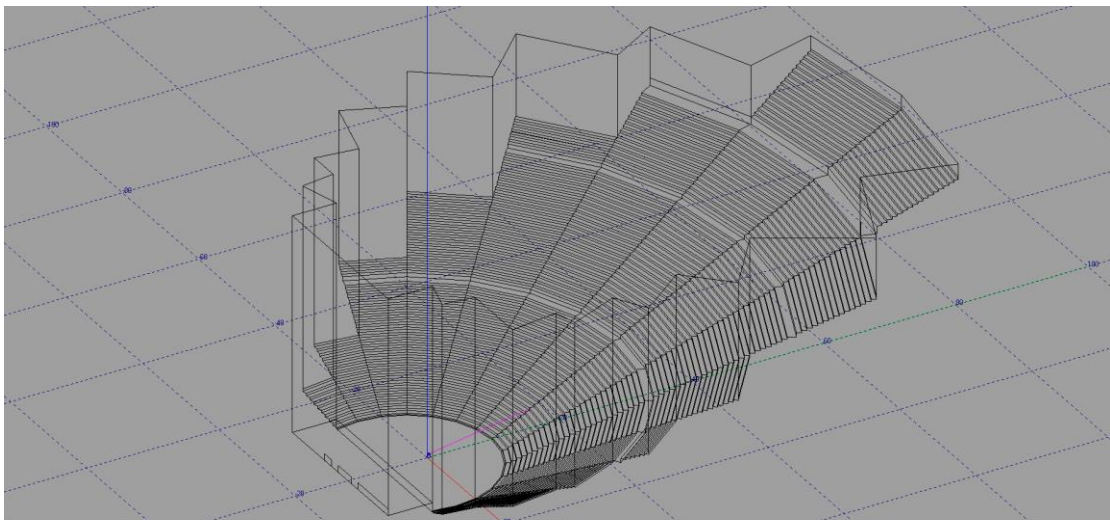
Στην πραγματικότητα , το λογισμικό αποτελείται από μικρότερα ανεξάρτητα προγράμματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, ενώ κάποια λειτουργούν μόνα τους. Για παράδειγμα η εφαρμογή σχεδίασης ηχείων ή ανάλυσης μίας συστάδας ηχείων δε συνδέεται καθόλου με ένα project ακουστικής μελέτης χώρου. Η βασική ιδέα πίσω από το EASE αφορά την εισαγωγή (αφού έχει σχεδιαστεί στο AutoCAD) ή τη σχεδίαση ενός τρισδιάστατου σχεδίου του προς μελέτη χώρου και στη συνέχεια την πραγματοποίηση κάθε είδους ακουστικών μετρήσεων σε αυτών μέσω προσομοίωσης. Είναι δυνατόν να εξαχθεί κάθε ακουστική παράμετρος για το χώρο (RT,STI, Alcons ,Clarity κόκ.) με βάση το πρότυπο ISO 3382 καθώς και τις μελέτες των Sabine, Schroeder και Eyring. Εκτός έχει πολλές επιπλέον δυνατότητες όπως εικονική αναπαραγωγή μουσικής ή ομιλίας στον προς μελέτη χώρο, εξαγωγή χαρτών και διαγραμμάτων, λειτουργία παρακολούθησης ακτίνας (Ray Tracing), καθώς και σχεδίαση ηχείων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.3, η οποία αναπτύχθηκε το 2009.

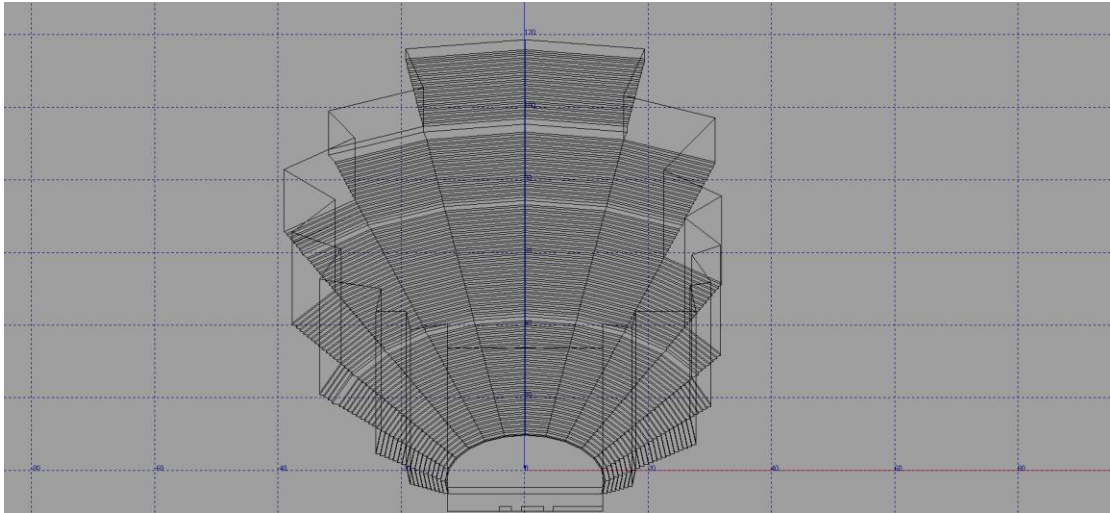
Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά εισάγαμε το αρχείο .dxf στο EASE. Στη συνέχεια, καθώς για να πραγματοποιήσει το λογισμικό τους υπολογισμούς πρέπει ο χώρος να είναι "κλειστός", έπρεπε να "χτιστεί" το θέατρο στις πλαϊνές όψεις, στην πρόσοψη και στην οροφή του, με επιφάνειες που έχουν απορροφητικότητα "1".



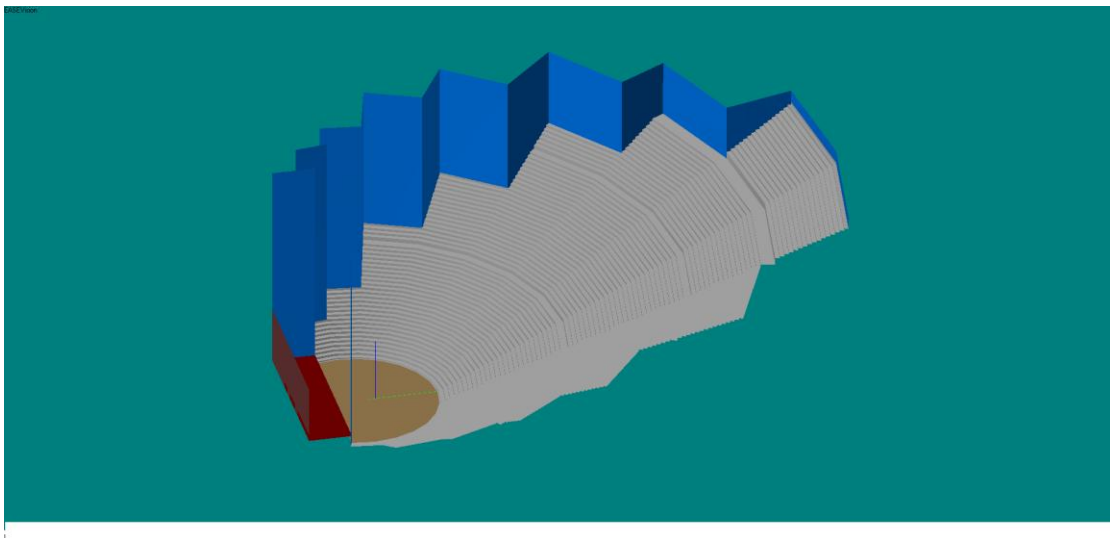
Εικόνα 17: Κάτοψη του ηλεκτρονικού μοντέλου του θεάτρου στον editor του EASE



Εικόνα 18: Πλάγια όψη του ηλεκτρονικού μοντέλου του θεάτρου στον editor του EASE



Εικόνα 19: Πρόοψη του ηλεκτρονικού μοντέλου του θεάτρου στον editor του EASE



Εικόνα 20 : Μία όψη του θεάτρου από το υποπρόγραμμα "Architectural View" του EASE. Το σκούρο μπλέ είναι η πλήρως απορροφητική επιφάνεια

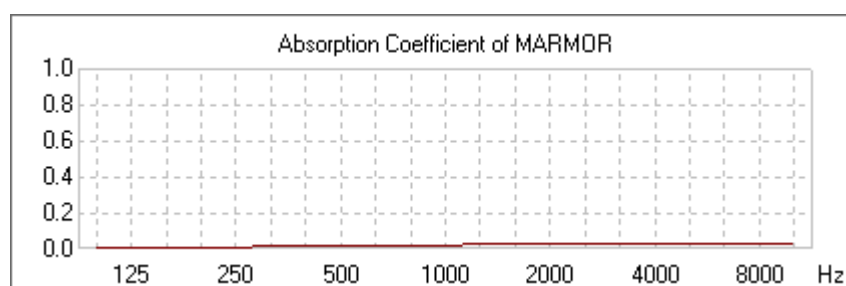
Στη συνέχεια ακολουθούν περιγραφές των διάφορων προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε, τα αναλυτικά αποτελέσματα, τα αντίστοιχα διαγράμματα, καθώς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.



## 4.2 Κένο Θέατρο

Η πρώτη σειρά προσομοιώσεων μοιάζει με τις επιτόπιες μετρήσεις, καθώς το θέατρο θα μοντελοποιηθεί ως κενό (χωρίς θεατές). Αυτό ουσιαστικά στο EASE σημαίνει ότι όλες οι επιφάνειες (εκτός των πλήρως απορροφητικών, του σκηνικού οικοδομήματος και της ορχήστρας) θα οριστούν ως πετρώδη υλικά.

Έτσι ως υλικό που να πλησιάζει πιο πολύ αυτό του θεάτρου, επιλέχτηκε από τη βάση δεδομένων του λογισμικού EASE το υλικό **MARMOR**, του οποίου ο συντελεστής απορρόφησης φαίνεται παρακάτω.

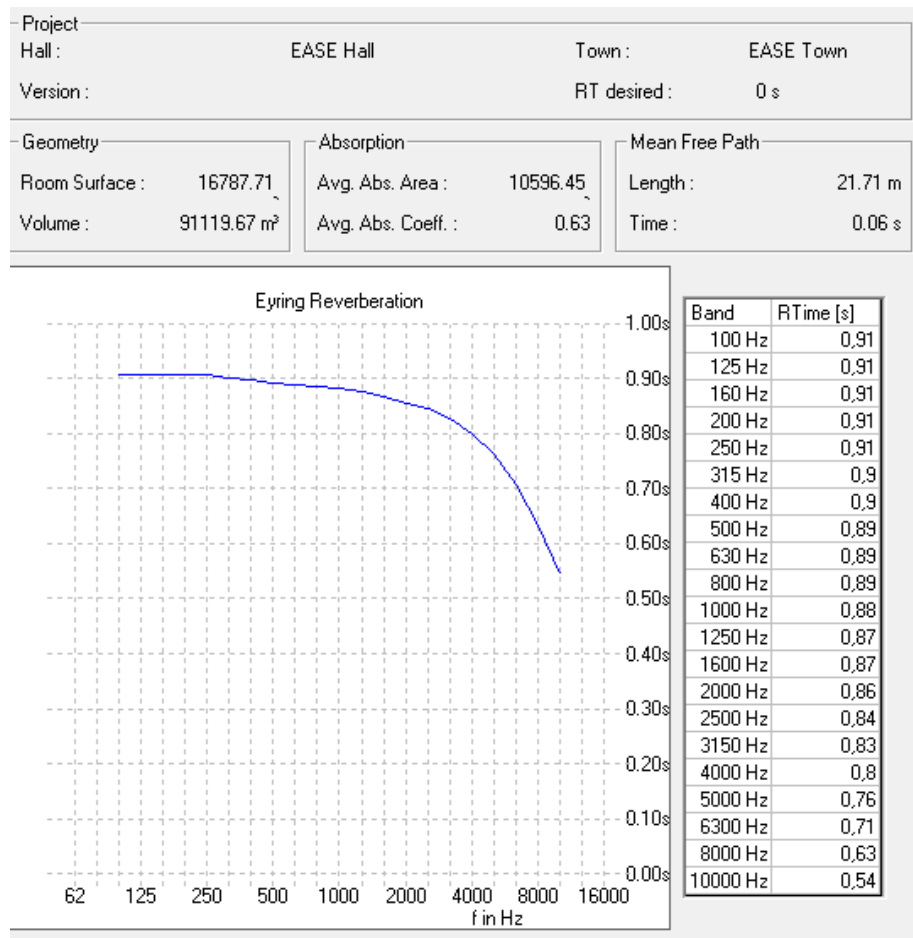


Εικόνα 21: Συντελεστής απορρόφησης υλικού "MARMOR"

### 4.2.1 Χρόνος Αντήχησης

Καθώς, για την εξαγωγή των υπόλοιπων παραμέτρων του θεάτρου θα πειραματιστούμε με διάφορους τύπους πηγών-ομιλητών ξεκινάμε με το χρόνο αντήχησης του θεάτρου που υπολογίζεται από το EASE επιλέγοντας "**Room RT**".

Παρακάτω φαίνονται τόσο οι τιμές για το χρόνο αντήχησης, όσο και το αντίστοιχο διάγραμμα:

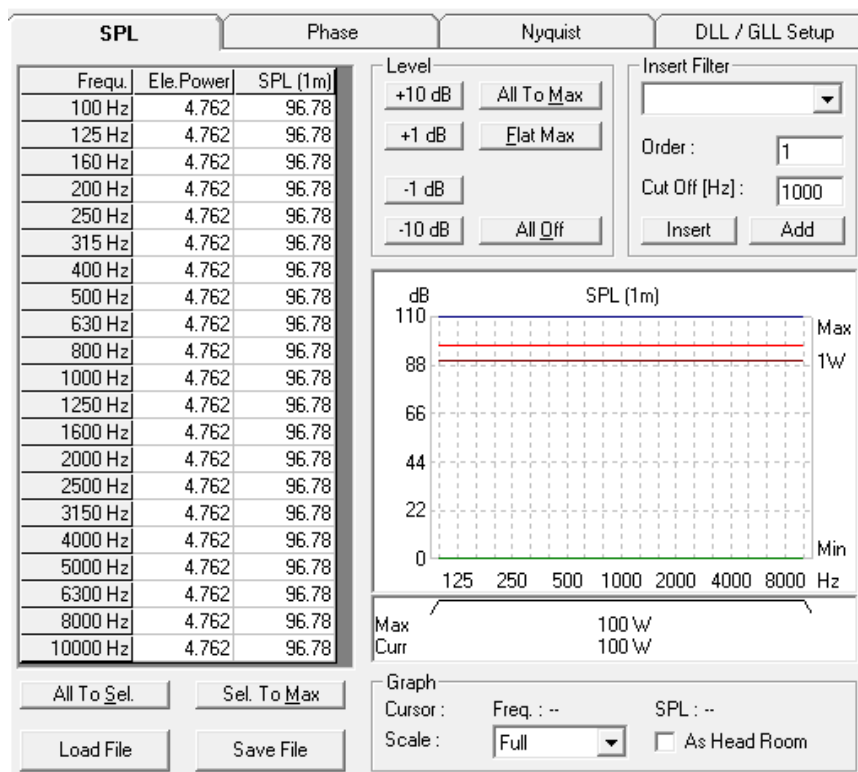


Εικόνα 22: Χρόνος αντήχησης για άδειο θέατρο

Όπως είναι λογικό , η προσομοίωση έδωσε πολύ σταθερότερα αποτελέσματα από τις μετρήσεις, καθώς πραγματοποιείται σε ένα ιδανικό περιβάλλον, χωρίς τις επιδράσεις των εξωτερικών στοιχείων που είχαμε στις επιτόπιες μετρήσεις στο θέατρο (παρόλο που ρυθμίστηκαν τα επίπεδα θορύβου, η θερμοκρασία κλπ). Παρόλαυτά, αν παρατηρήσουμε τις καμπύλες του χρόνου αντήχησης για κάθε σημείο στις επιτόπιες μετρήσεις, συμπεραίνουμε ότι ακολουθούν αυτήν την προσομοίωση. Ναι μεν δεν είναι τόσο σταθερές, αλλά οι τιμές του χρόνου αντήχησης βρίσκονται στα ίδια επίπεδα ανα συχνοτική περιοχή, με ελάχιστες διαφορές από την προσομοίωση, η οποία σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των λογισμικών Dirac και Matlab δίνει χρόνο αντήχησης που κυμένεται από **0.55** μέχρι **0.9 δευτερόλεπτα**.

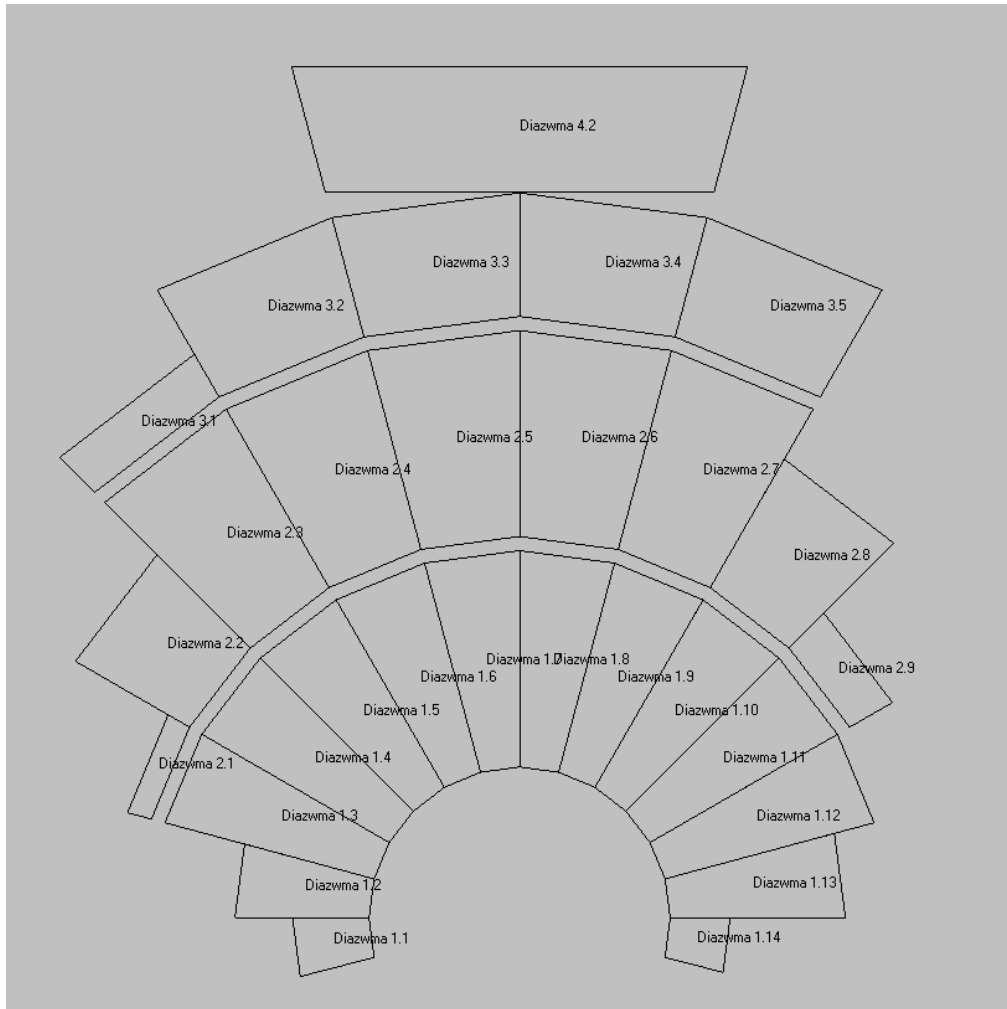
## 4.2.2 Sound Pressure level

Στη συνέχεια, τοποθετήσαμε μία ιδανική παντοκατευθυντική πηγή (**SPHERE**) στο κέντρο της ορχήστρας με χαρακτηριστικά που φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 23: Χαρακτηριστικά πηγής Sphere

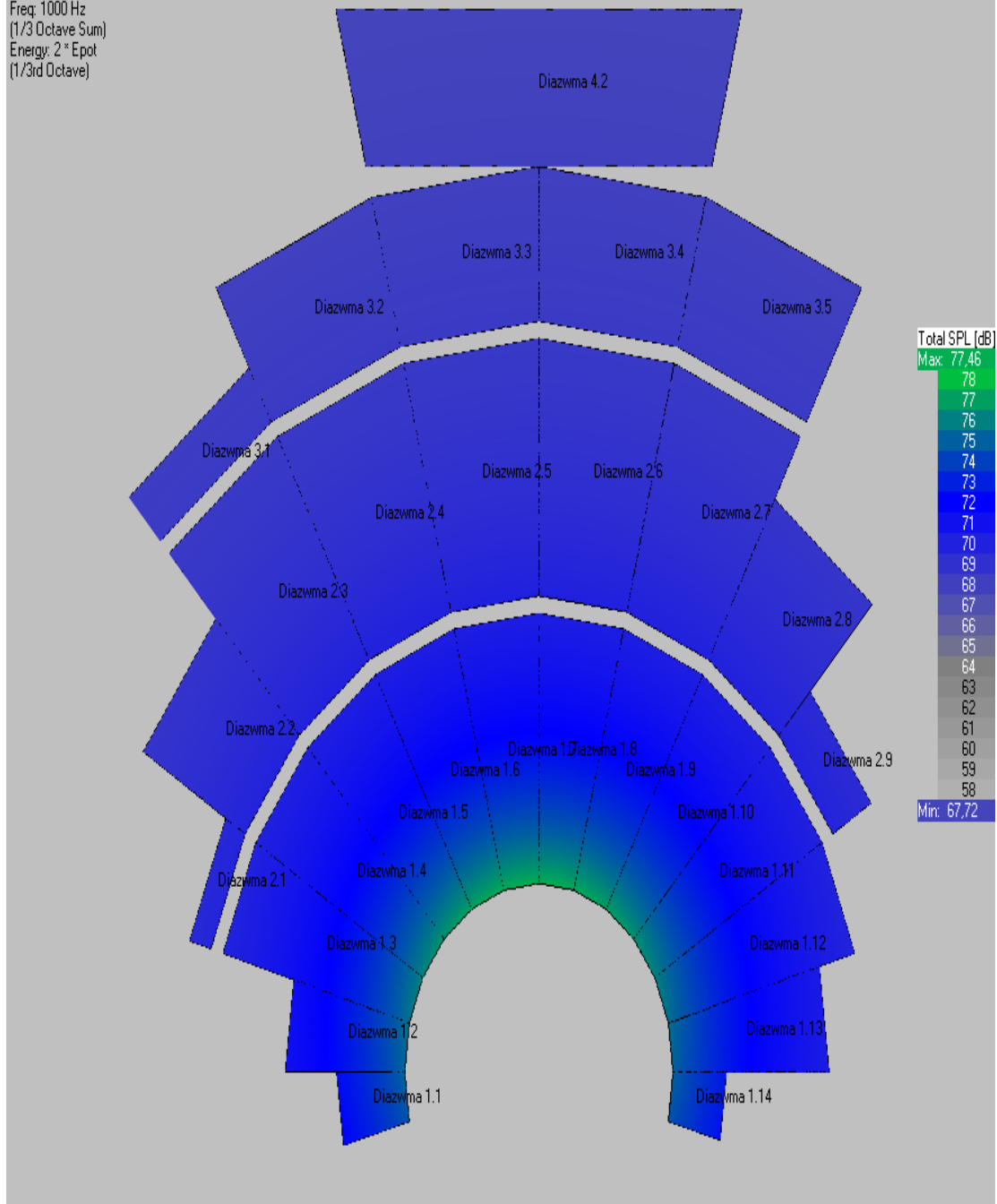
Το θέατρο χωρίστηκε σε περιοχές ακροατών (**Audience Areas**) οι οποίες βρίσκονται 1.20m από τα καθίσματα (περίπου στο ύψος των ανθρώπινων αυτιών) ανάλογα με το κάθε διάζωμα/κερκίδα, όπως φαίνεται στη συνέχεια :



Εικόνα 24: Οι περιοχές ακροατών (audience areas) στα διαζώματα/κερκίδες του θεάτρου

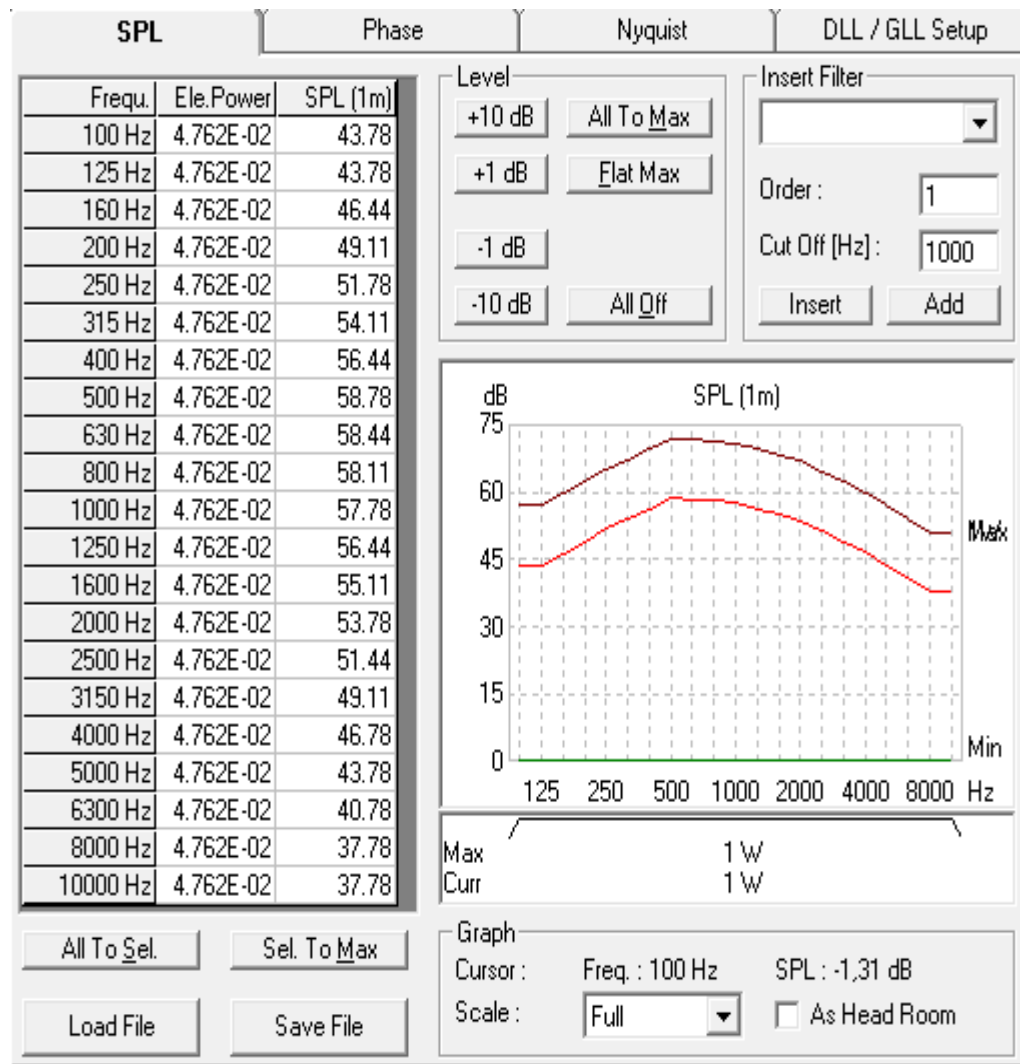
Έτσι, με το υποπρόγραμμα του EASE **Area Mapping** επιλέξαμε να εμφανιστούν τα αποτελέσματα για την παράμετρο **Total SPL**.

EASE Hall  
Used:  
Lspk: 52  
- Speaker Data Not Authorized -  
Map: Total SPL [Z]  
Freq: 1000 Hz  
(1/3 Octave Sum)  
Energy: 2 \* Epot  
(1/3rd Octave)



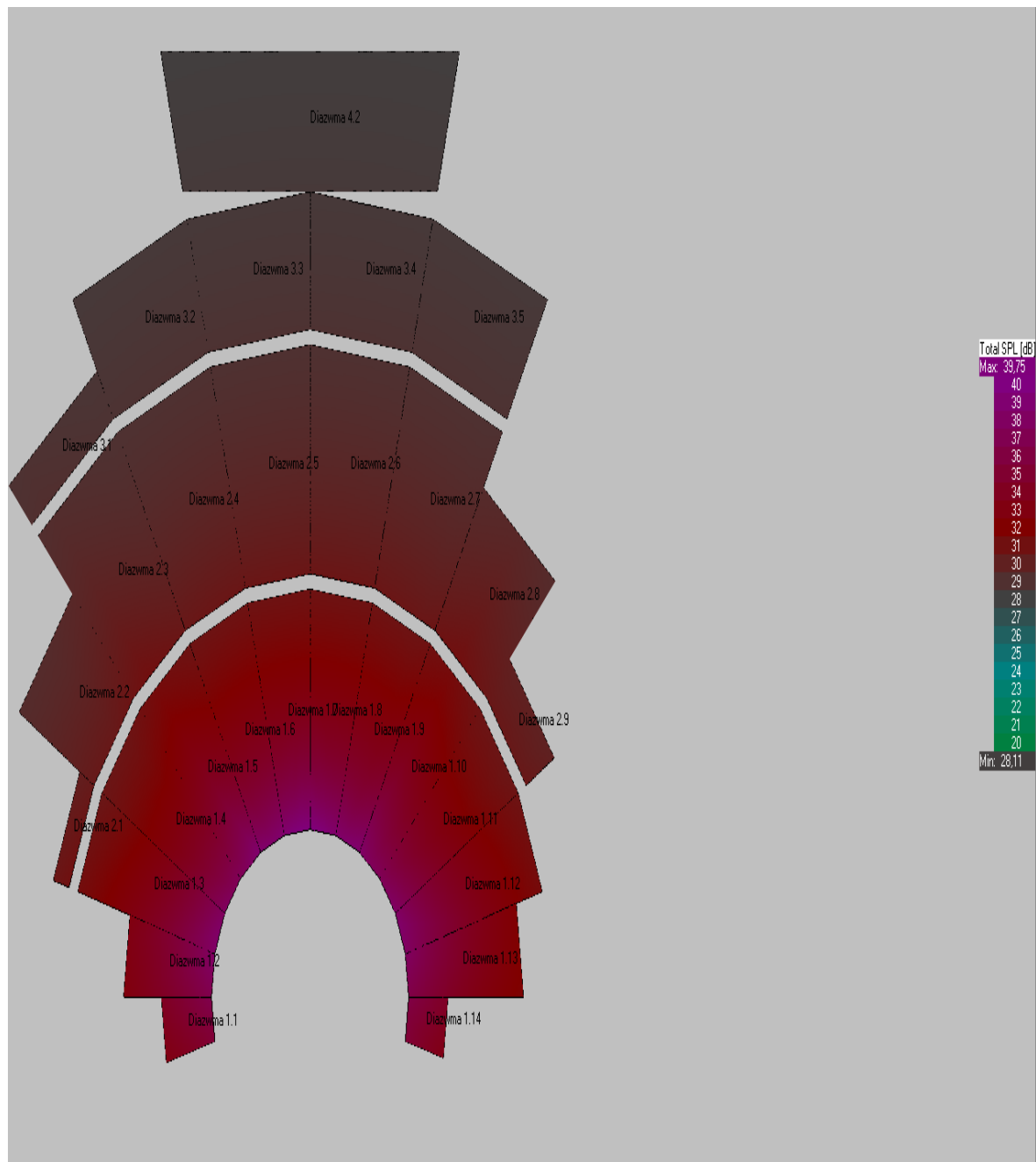
Εικόνα 25: Αποτελέσματα Total SPL για ομοκατευθυντική πηγή

Στη συνέχεια, στη θέση της ομοιοκατευθυντικής πηγής βάλαμε έναν άντρα ομιλητή (δηλαδή το ηχείο **MANLOUD**) με χαρακτηριστικά που φαίνονται παρακάτω:



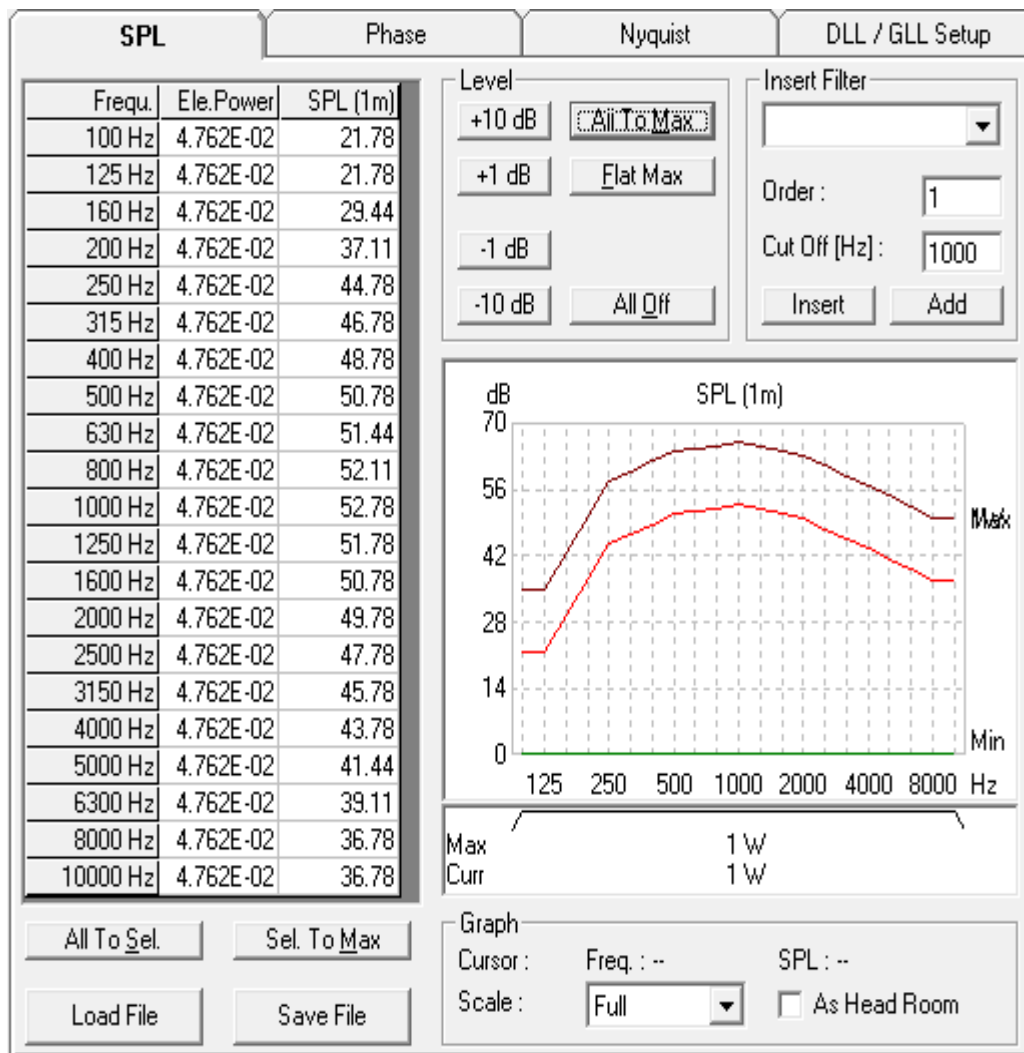
Εικόνα 26: Χαρακτηριστικά πηγής "Man Loud"

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν τα εξής:



Εικόνα 27: Αποτελέσματα Total SPL για την πηγή "ManLoud"

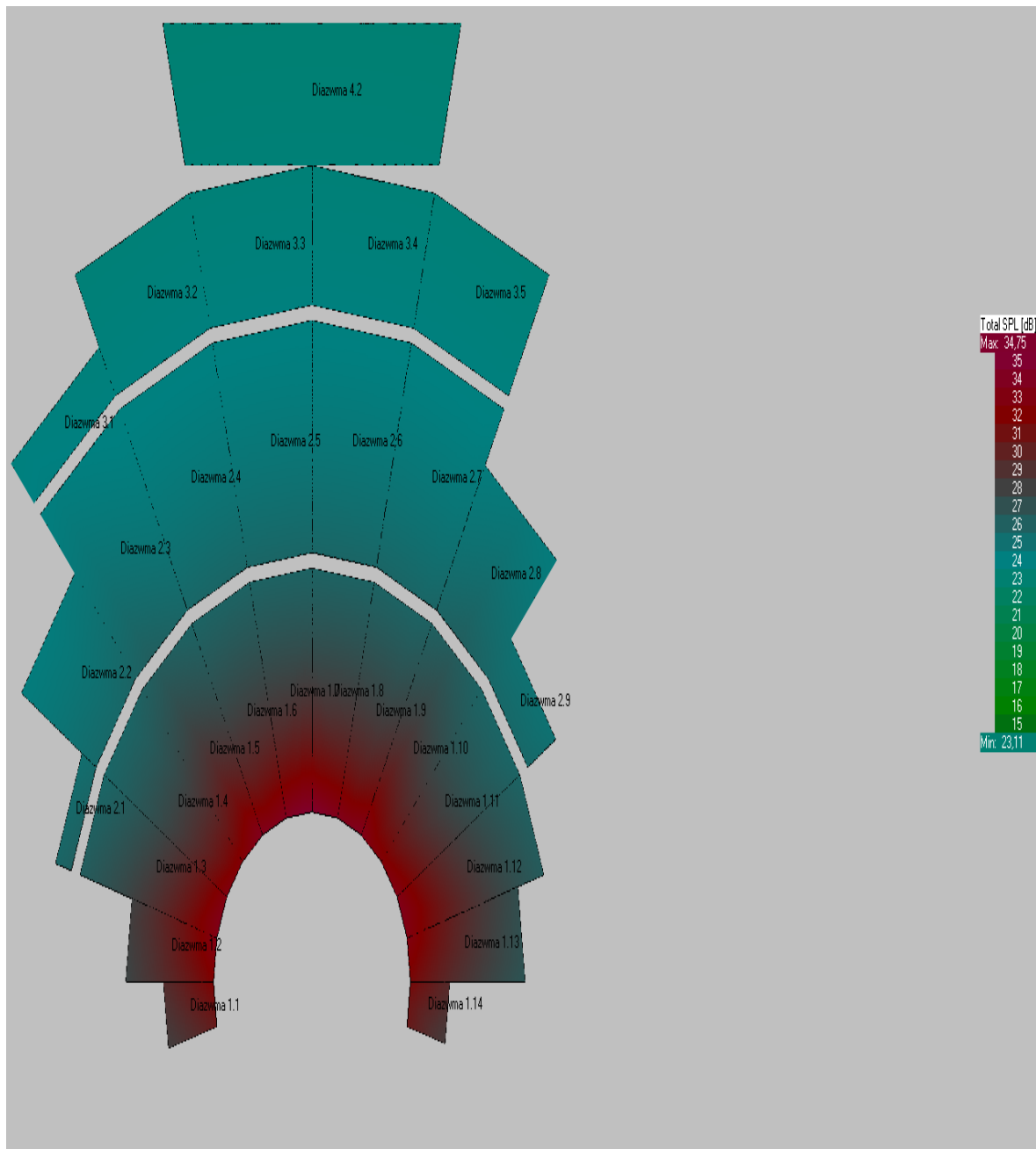
Στη συνέχεια , η αντιρκή φωνή αντικαταστάθηκε από μία γυναικεία ( **FEMLOUD**) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:



Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά πηγής "FemLoud"

Η συγκεκριμένη πηγή έδωσε τα εξής αποτελέσματα:





Εικόνα 29: Αποτελέσματα SPL για την πηγή "Female Loud"

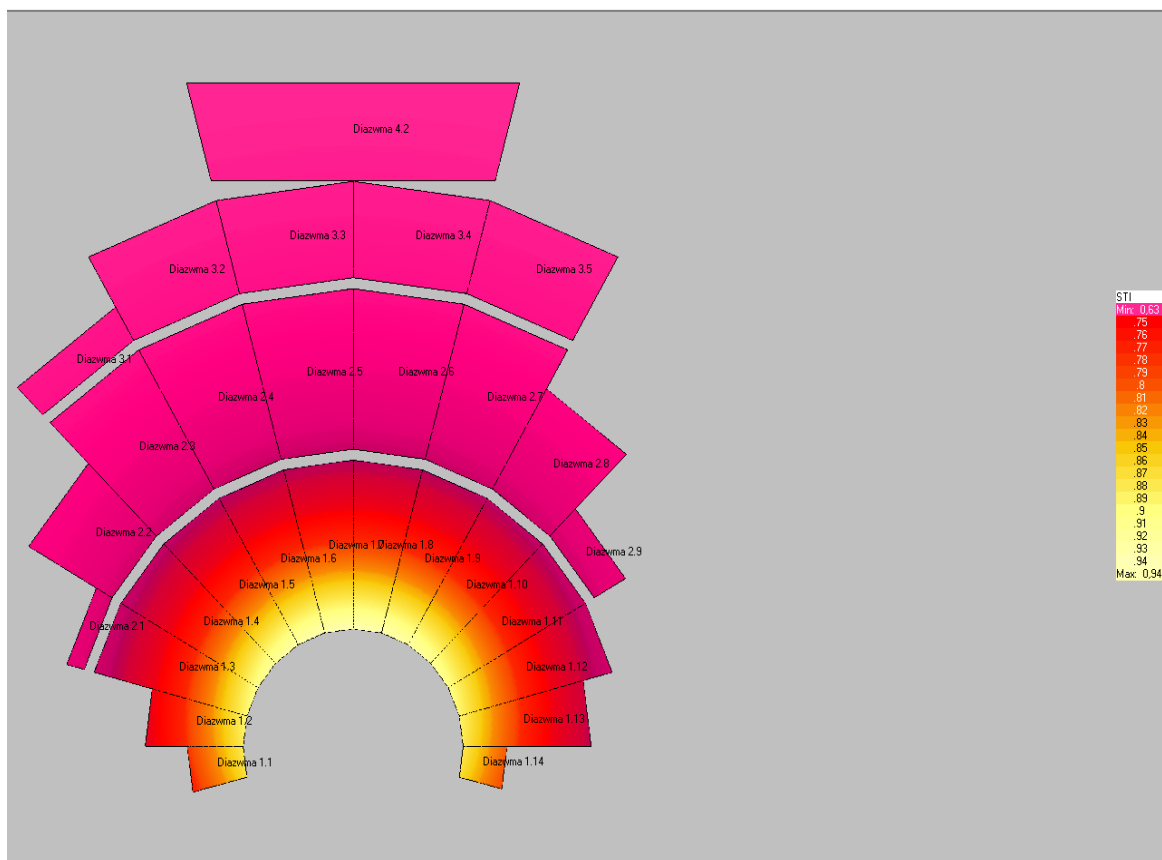
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα , διαπιστώνουμε ότι στις πρώτες θέσεις του θεάτρου φτάνει η ηχητική στάθμη της πηγής στο κοινό σχεδόν ανεπηρέαστη. Αντίθετα, όπως ήταν αναμενόμενο, όταν απομακρυνόμαστε προς τα πίσω και πλάγια του θεάτρου, έχουμε πτώση του μεγέθους. Στην περίπτωση της ανδρικής και γυναικείας φωνής, στα τελευταία διαζώματα έχουμε εξασθένηση της έντασης σε επίπεδα που ίσως να μην ακούει ικανοποιητικά το κοινό. Παρολαυτά, η κατανομή είναι αρκετά ομοιόμορφη και το θέατρο εμφανίζει άριστη συμμετρία.

### 4.2.3 Δείκτες ομιλίας

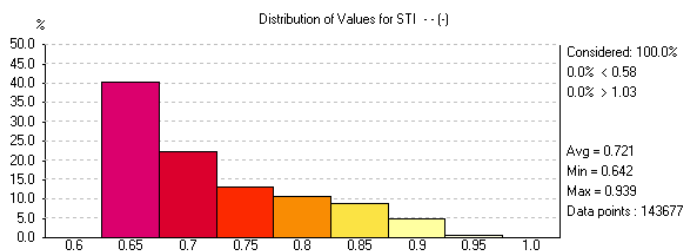
Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τους δείκτες που σχετίζονται με την καταληπτότητα της ομιλίας για τους τρεις τύπους πηγών που χρησιμοποιήσαμε και προηγουμένως. Στην παντοκατευθυντική πηγή παρουσιάζεται ενδεικτικά και η κατανομή των αποτελεσμάτων.

Για την παντοκατευθυντική πηγή:

STI:

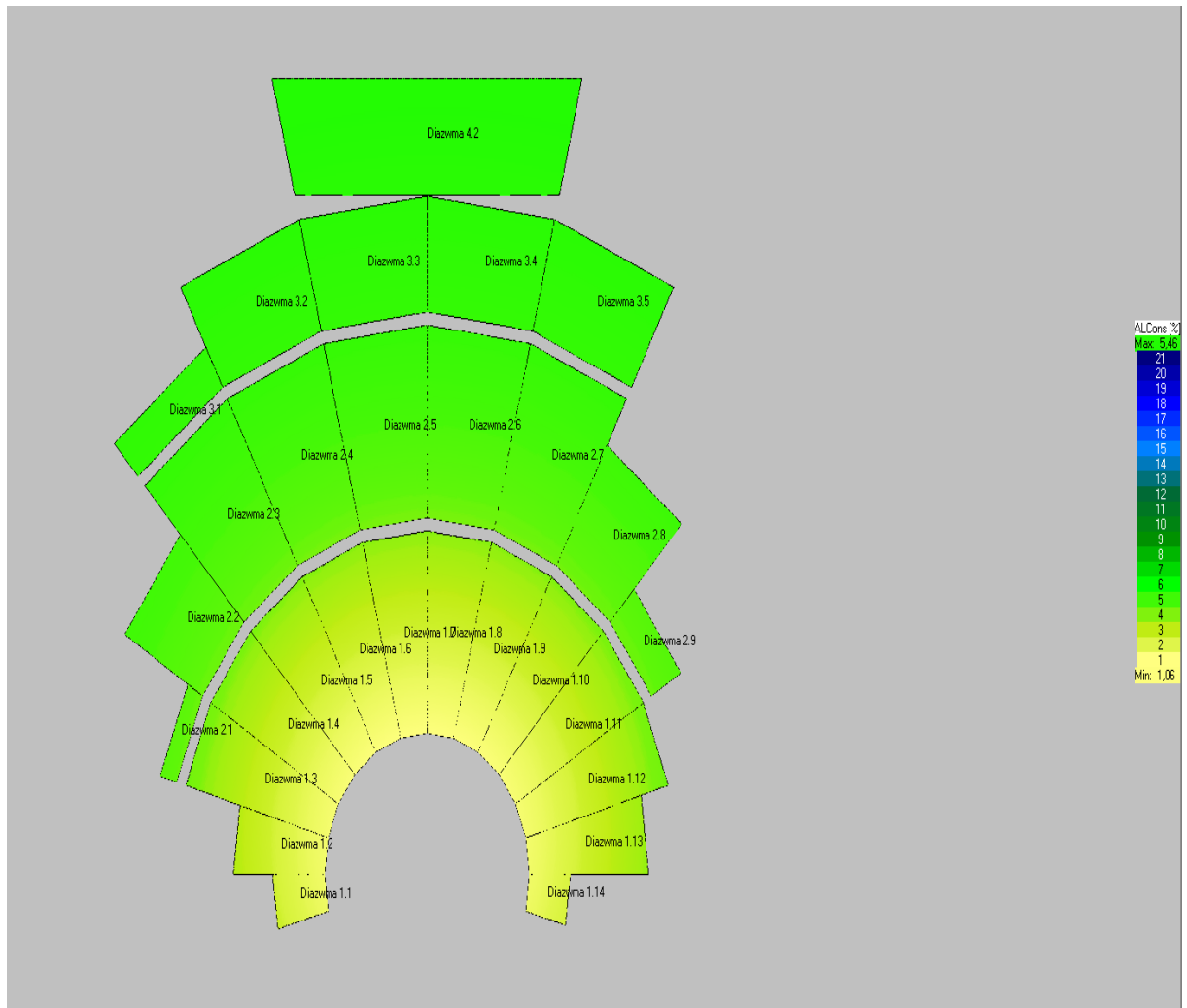


Εικόνα 30: Αποτελέσματα παραμέτρου STI για την παντοκατευθυντική πηγή

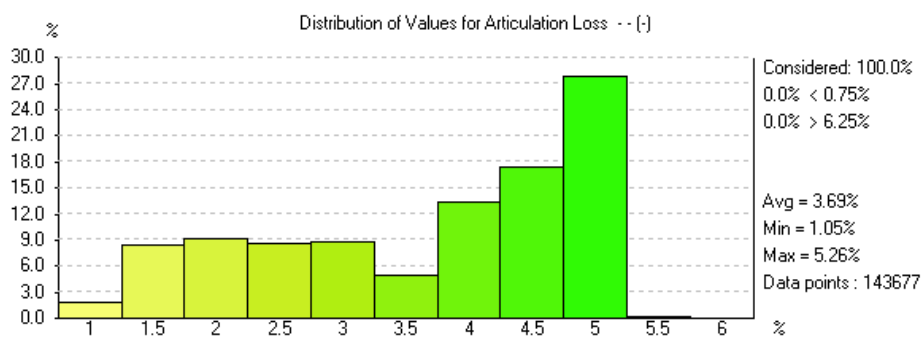


Εικόνα 31: Κατανομή STI για την παντοκατευθυντική πηγή

Alcons% :

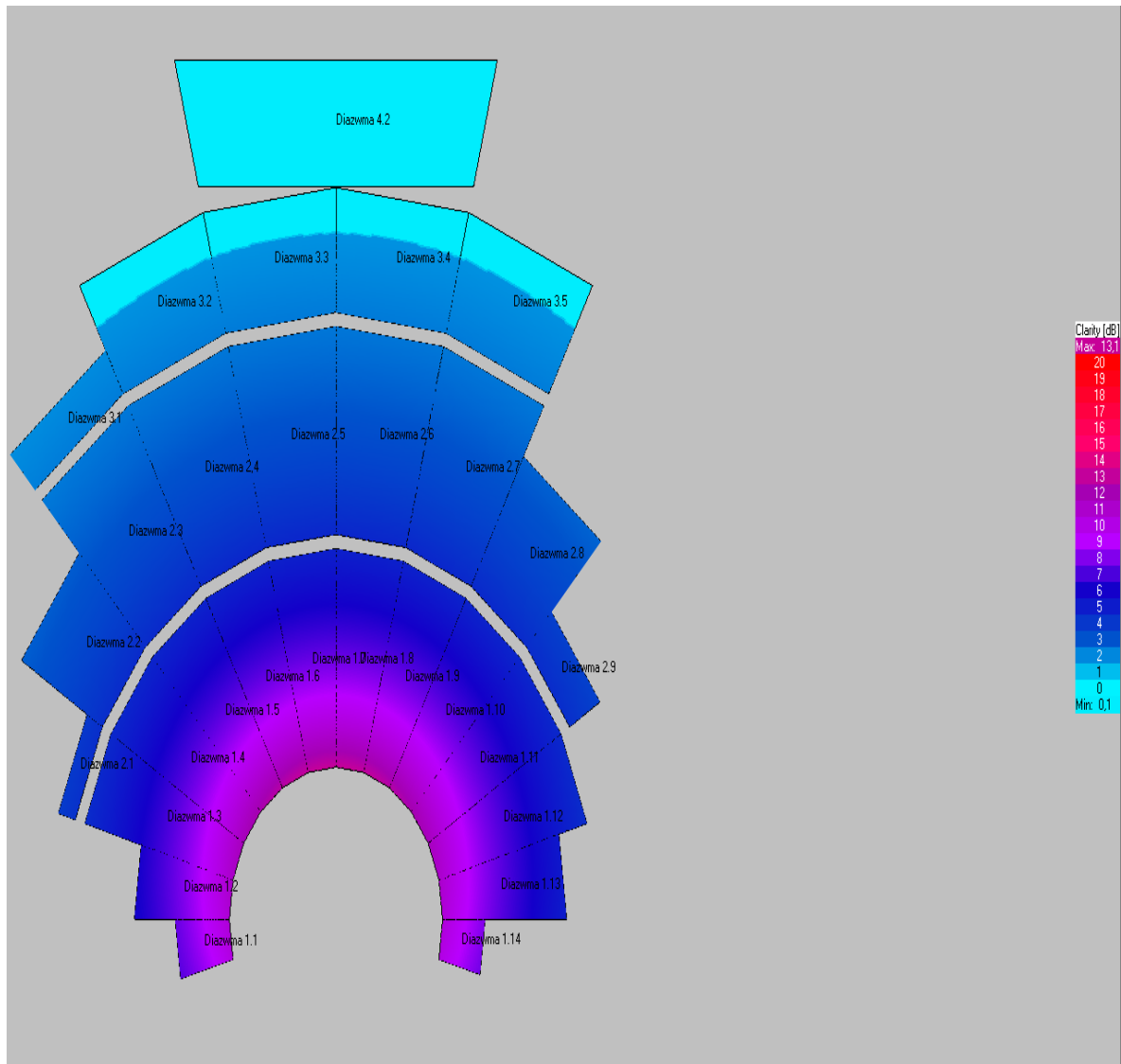


Εικόνα 32: Αποτελέσματα παραμέτρου Alcons% για την παντοκατευθυντική πηγή

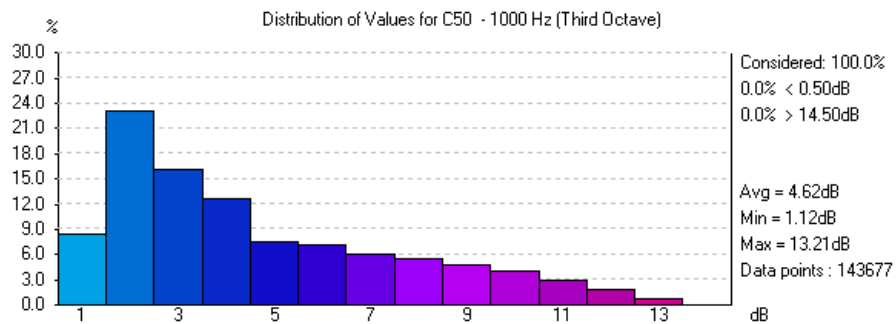


Εικόνα 33: Κατανομή Alcons% για την παντοκατευθυντική πηγή

C<sub>50</sub> :



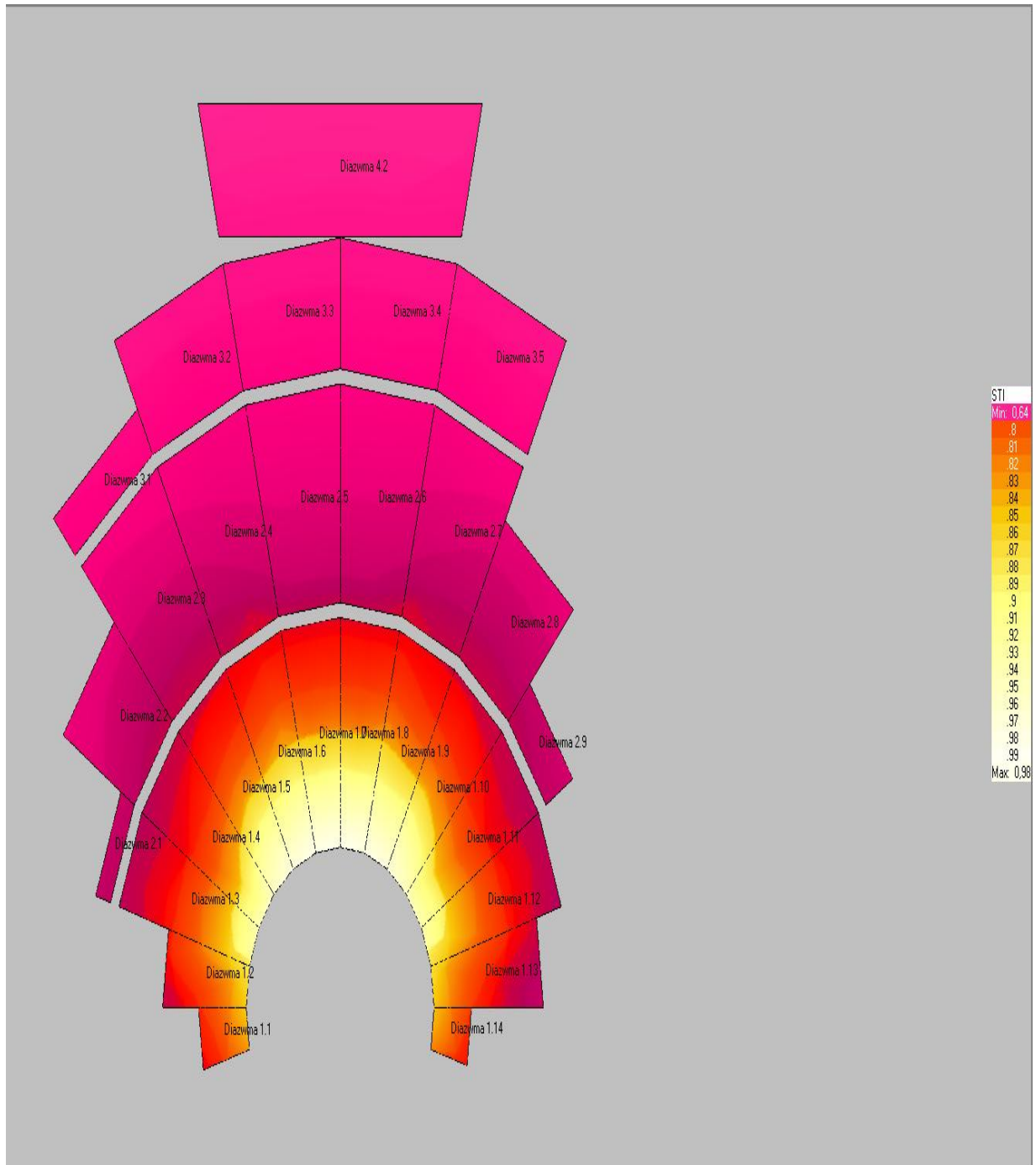
Εικόνα 34: Αποτελέσματα παραμέτρου C<sub>50</sub> για την παντοκατευθυντική πηγή



Εικόνα 35 : Κατανομή C<sub>50</sub> για την παντοκατευθυντική πηγή

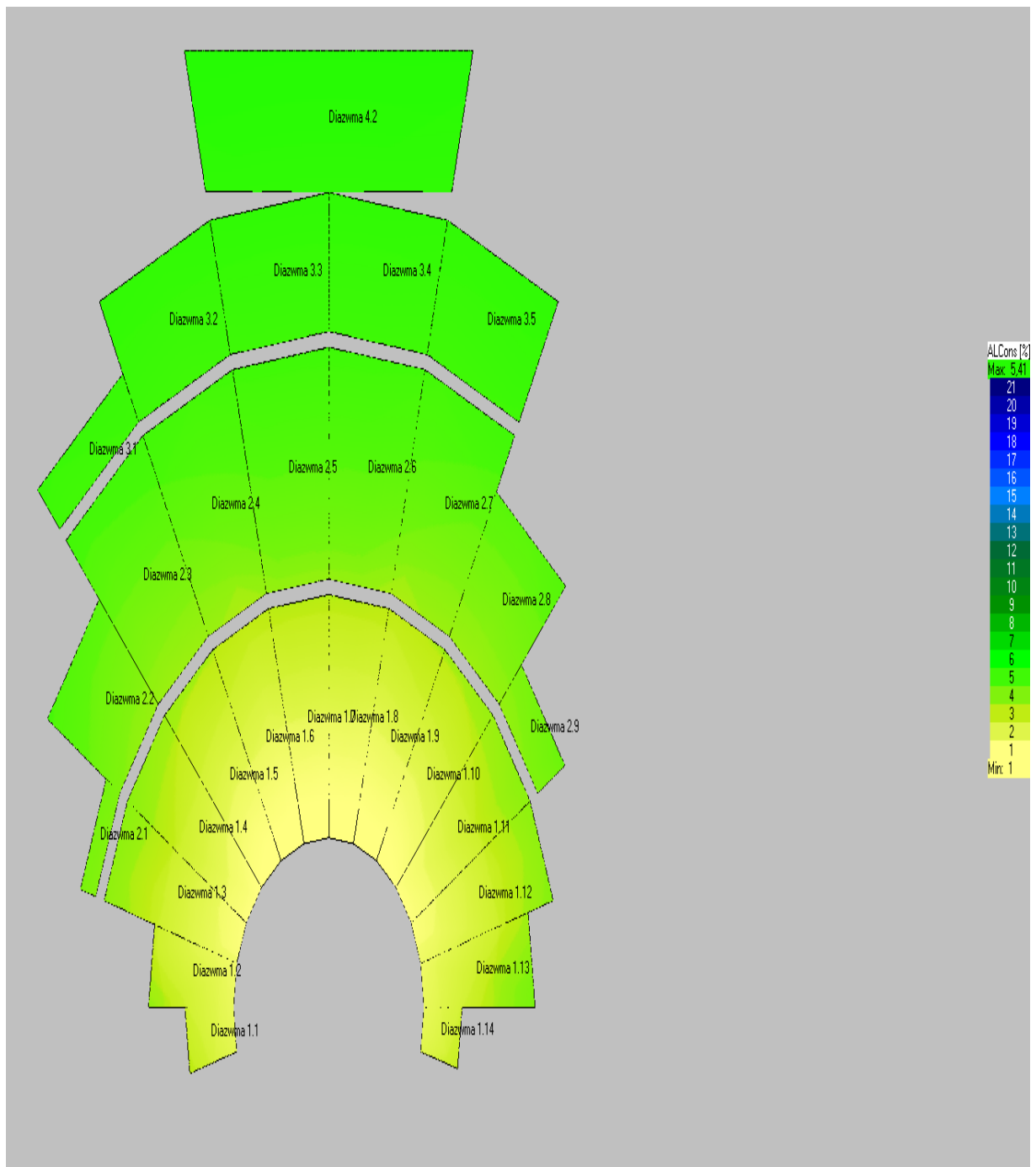
Για την πηγή MANLOUD:

STI:



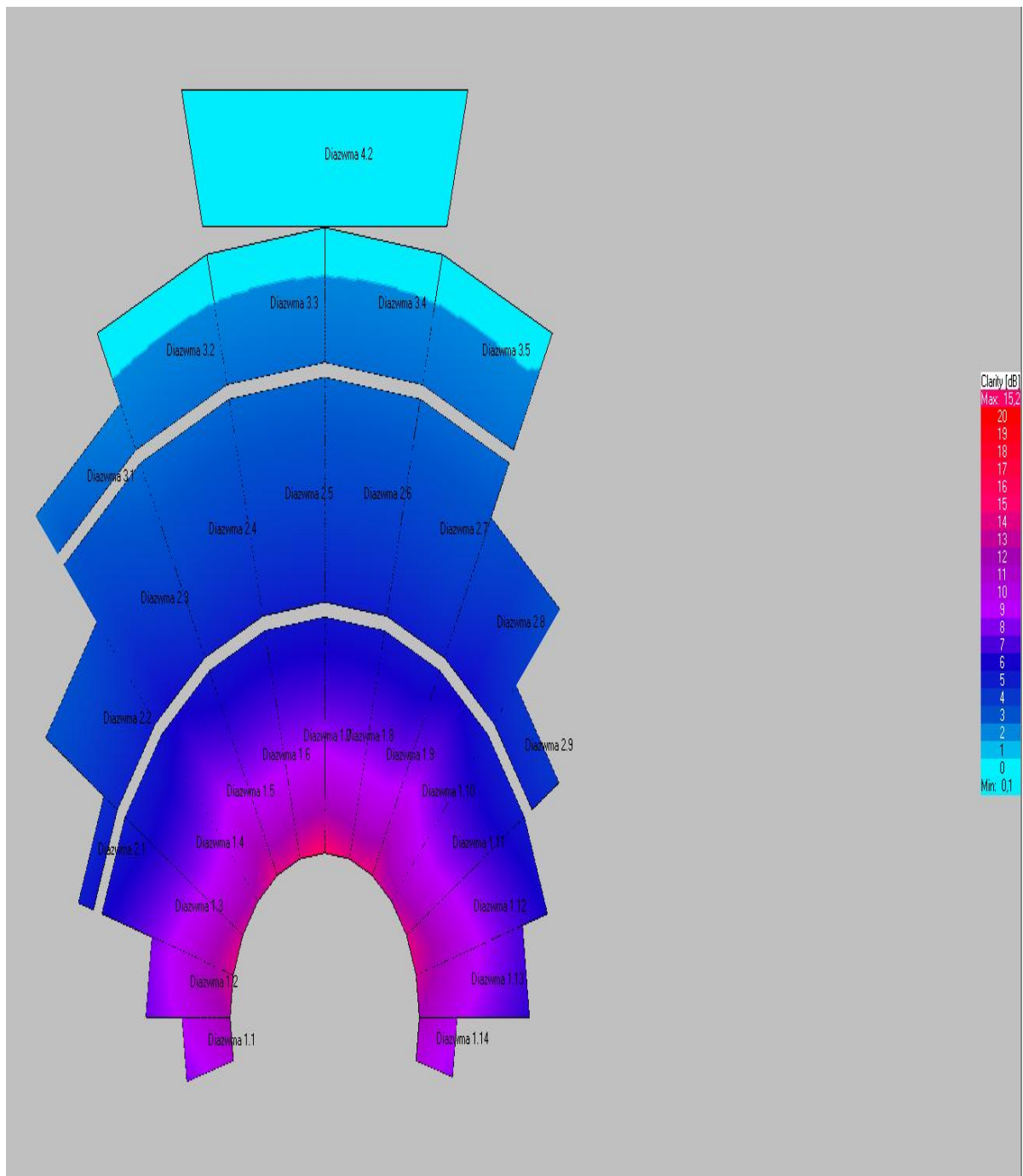
Εικόνα 36: Αποτελέσματα STI για την ανδρική φωνή

Alcons %:



Εικόνα 37: Αποτελέσματα Alcons% για την ανδρική φωνή

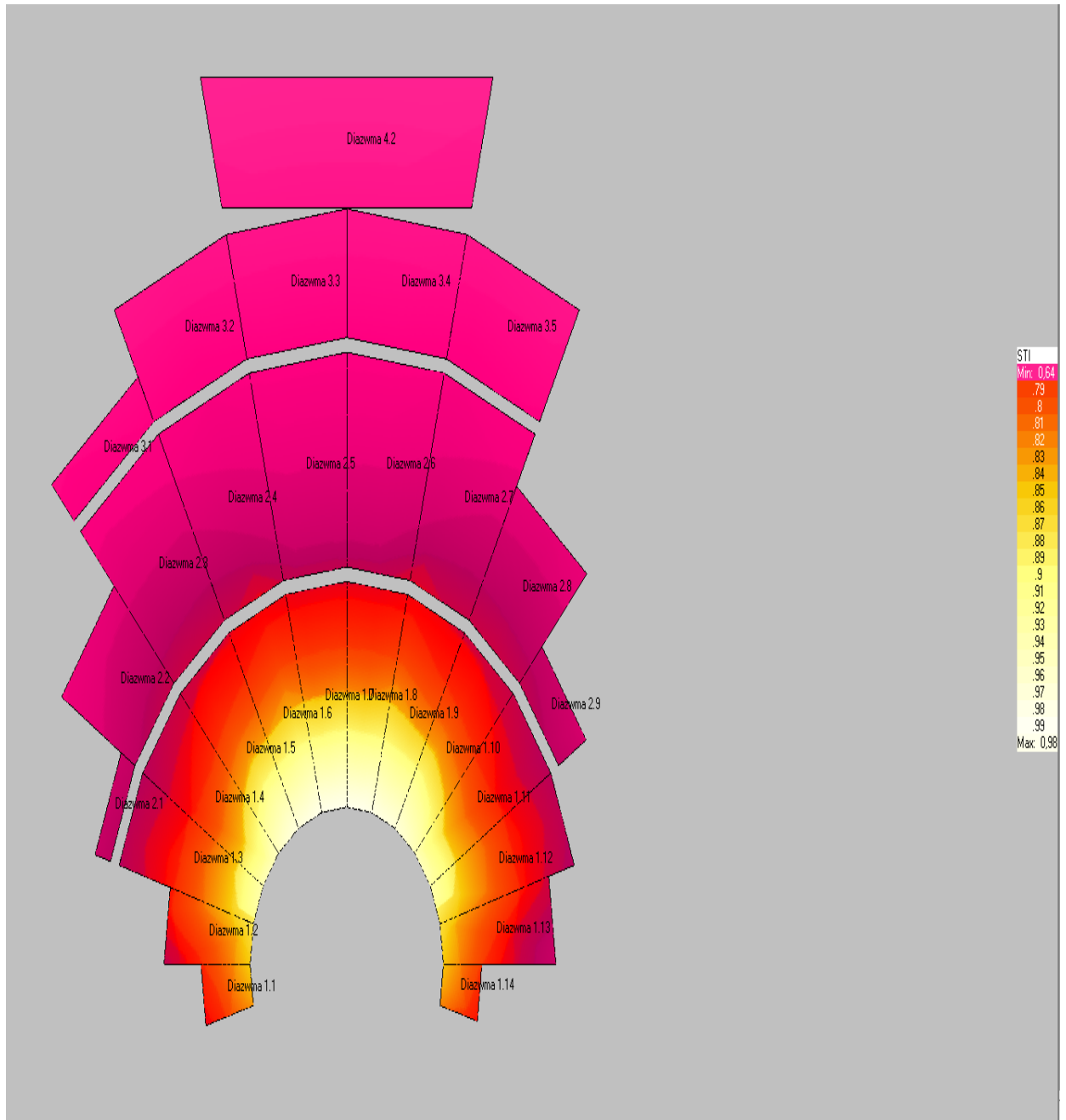
C<sub>50</sub>:



Εικόνα 38: Αποτελέσματα C<sub>50</sub> για την ανδρική φωνή

Για την πηγή FEMLOUD:

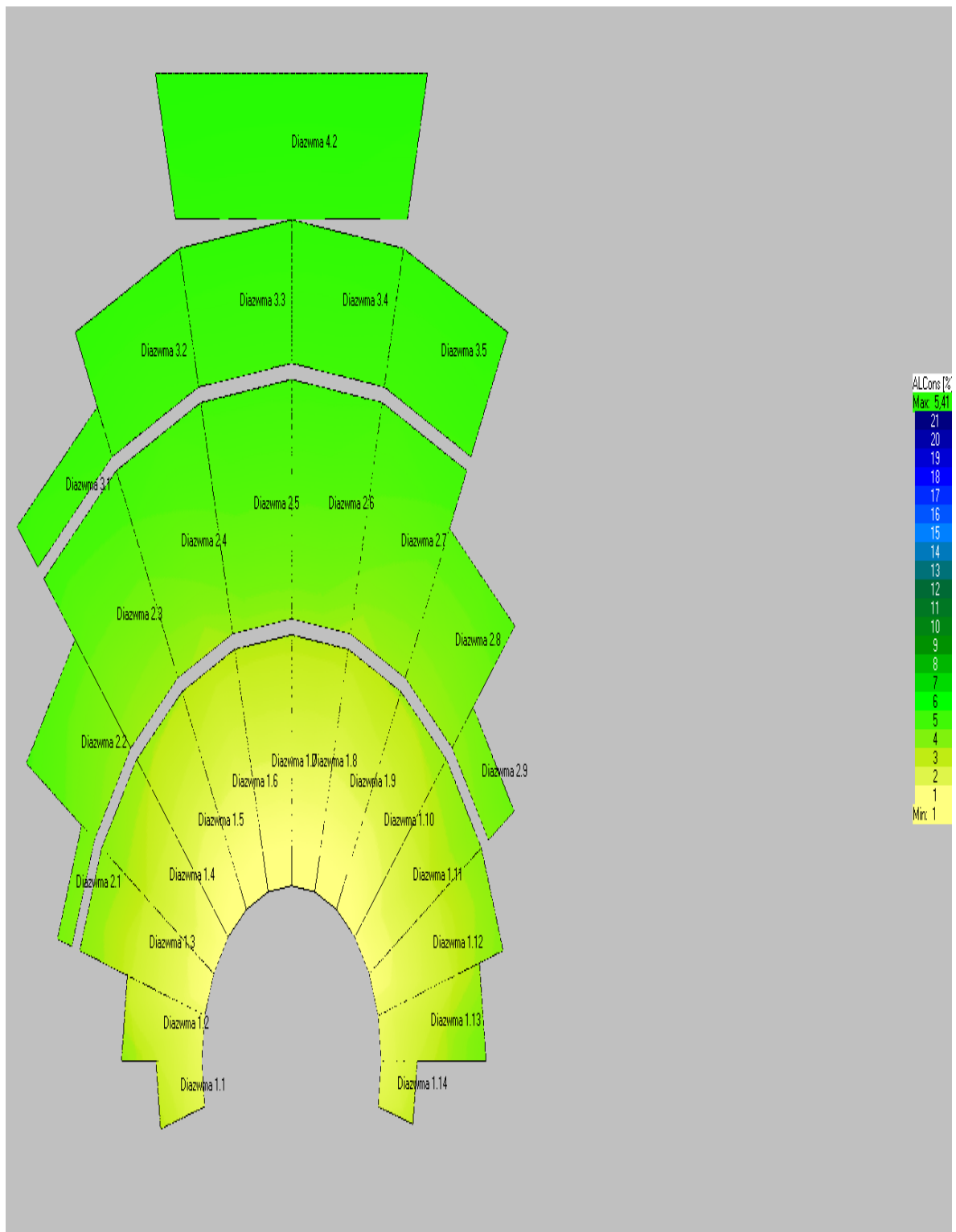
STI:



Εικόνα 39: Αποτελέσματα STI για τη γυναικεία φωνή

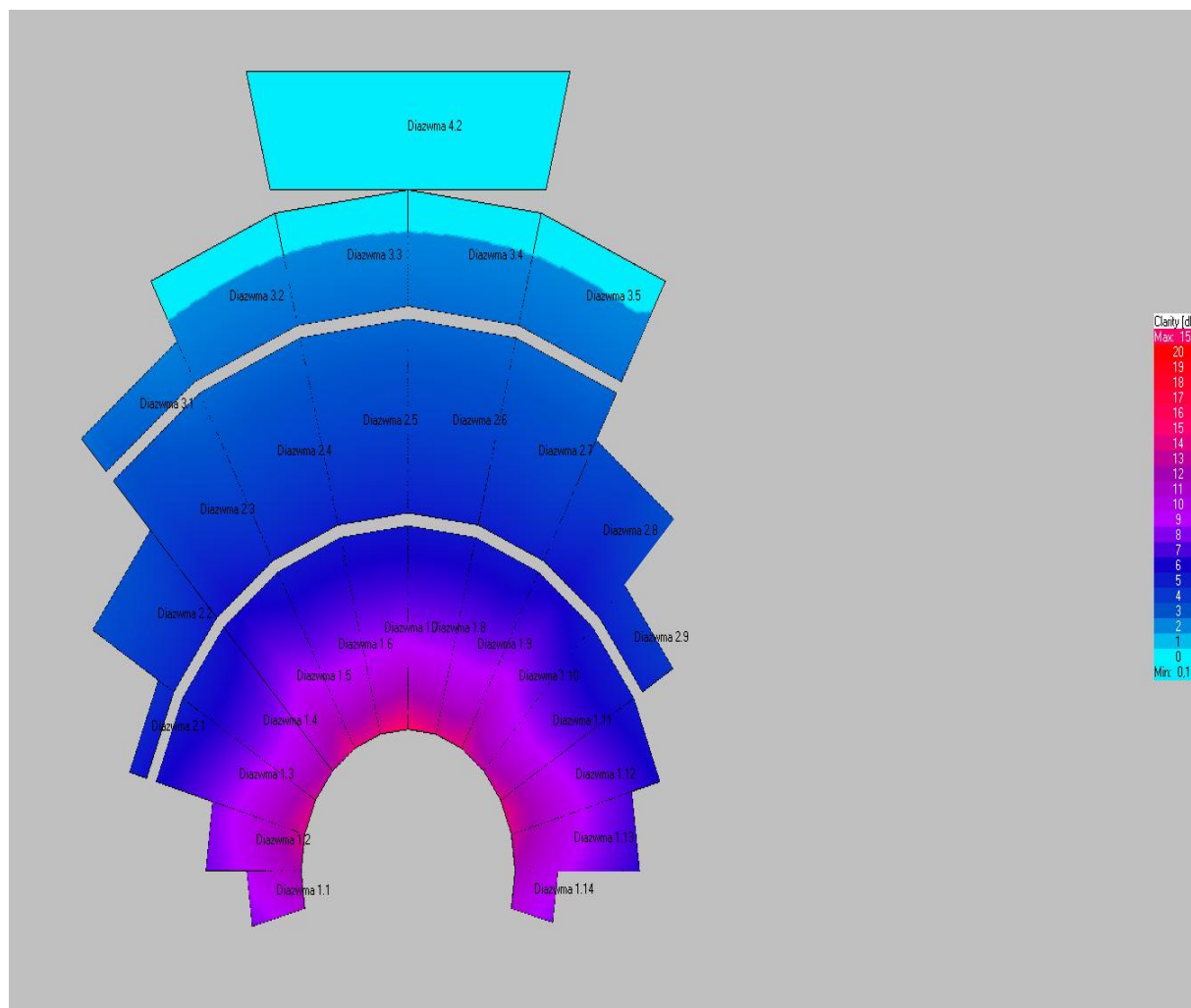


Alcons% :



Εικόνα 40: Αποτελέσματα Alcons% για τη γυναικεία φωνή

C<sub>50</sub>:

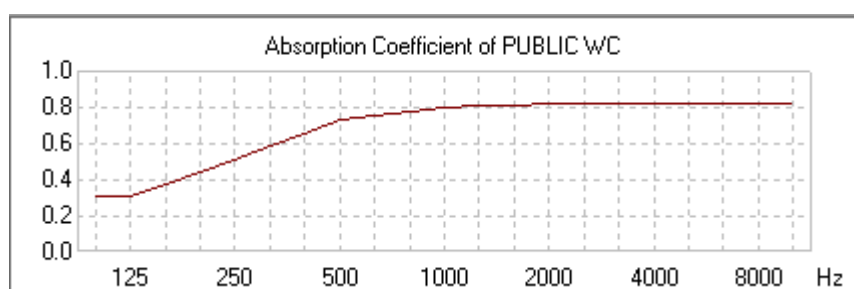


Εικόνα 41: Αποτελέσματα C<sub>50</sub> για τη γυναικεία φωνή

Οι δείκτες καταληπτότητας ομιλίας και για τους 3 τύπους πηγών κυμαίνονται σε πολύ καλά επίπεδα. Όπως ήταν αναμενόμενο, στις πρώτες σειρές τα αποτελέσματα είναι καλύτερα και όσο πηγαίνουμε προς τα πλάγια και προς τα πίσω έχουμε μία χειροτέρευση των τιμών. Όμως ακόμα και στο τελευταίο διάζωμα, οι τιμές είναι εντός των ορίων και έτσι μας επιτρέπεται να χαρακτηρίσουμε την καταληπτότητα ομιλίας ως "Εξαιρετική" σύμφωνα με τα αντίστοιχα ISO πρότυπα.

## 4.3 Γεμάτο θέατρο

Στη συνέχεια, πραγματοποιήσαμε μία πολύ ενδιαφέρουσα προσομοίωση που προσπαθεί να απαντήσει στο ερώτημα "πώς συμπεριφέρεται το θέατρο όταν είναι γεμάτο;". Προφανώς, δεν είχαμε τη δυνατότητα να κάνουμε μετρήσεις με γεμάτο θέατρο και έτσι έγιναν σε άδειο θέατρο. Έτσι, δοκιμάσαμε στο μοντέλο μας να αντικαταστήσουμε τις πέτρινες επιφάνειες με τις επιφάνειες "**PUBLIC WC**" (Public on **W**ooden **C**hairs) που εξομοιώνουν τη συμπεριφορά του κοινού καθήμενου σε καρέκλες παρόμοιες με τα αρχαία εδώλια.

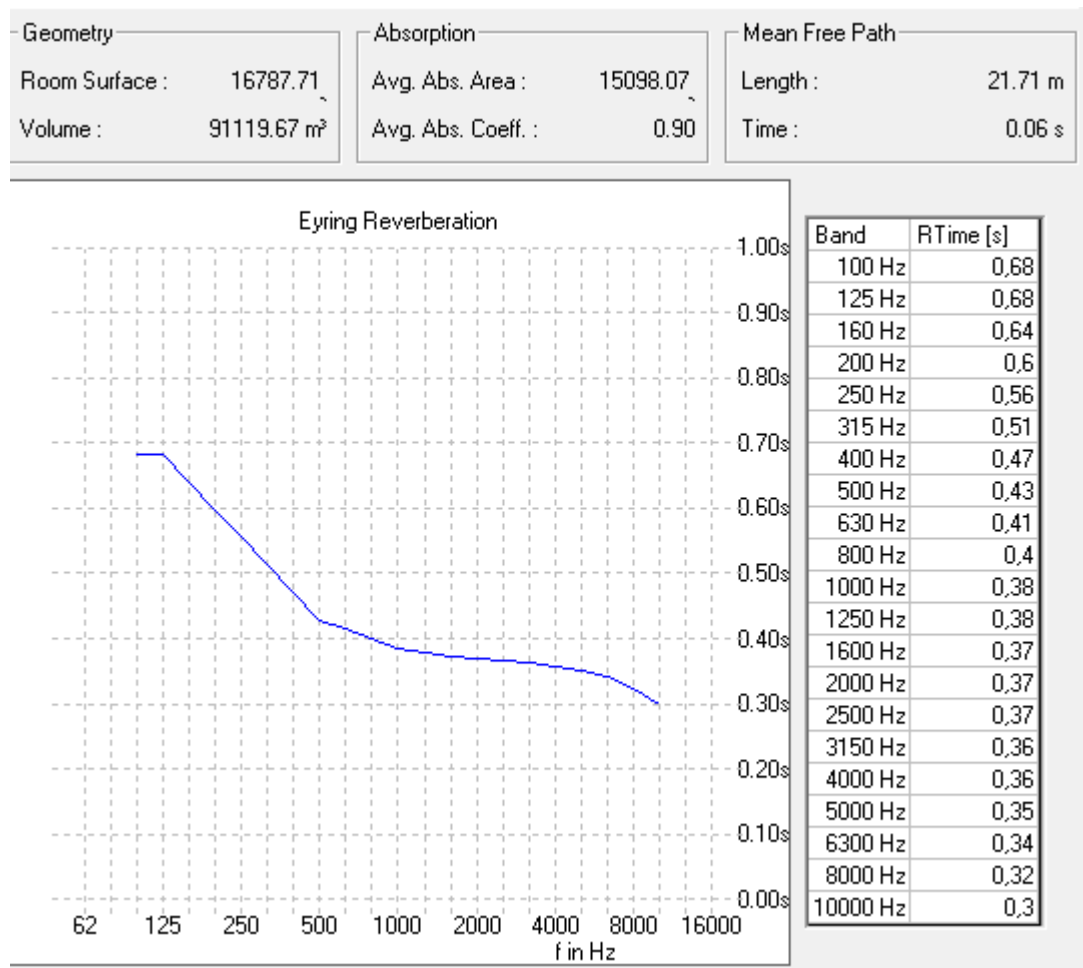


Εικόνα 42: Σταθερά απορρόφησης του υλικού "Public WC"

Πραγματοποιήσαμε την ίδια σειρά προσομοιώσεων με το άδειο θέατρο και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

### 4.3.1 Χρόνος Αντήχησης

Όπως και στο κενό θέατρο ξεκινάμε με το χρόνο αντήχησης. Πλέον το διάγραμμα του χώρου είναι το εξής:



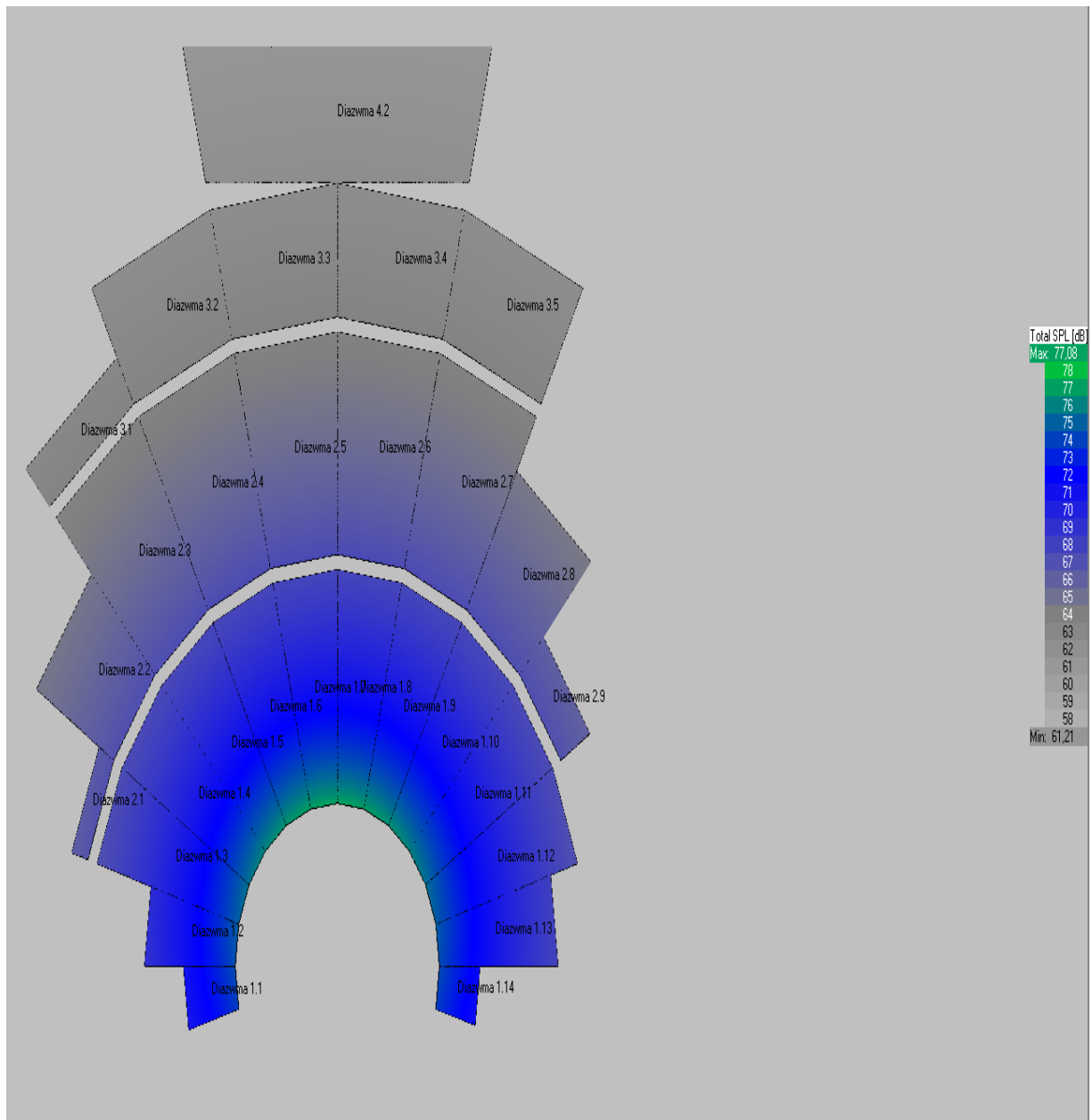
Εικόνα 43: Χρόνος αντήχησης για γεμάτο θέατρο

Όπως είναι λογικό, πλέον οι επιφάνειες (το κοινό δηλαδή) έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα και έτσι ο χρόνος αντήχησης πέφτει, κυρίως στις υψηλές συχνότητες. Είναι αξιοσημείωτο ότι ακολουθεί σχεδόν την ίδια καμπύλη με αυτή του κενού θεάτρου, καθώς και το ότι βρίσκεται μέσα στα ιδανικά πλαίσια χρόνου αντήχησης για χώρους που πραγματοποιούνται ομιλίες.

### 4.3.2 SPL

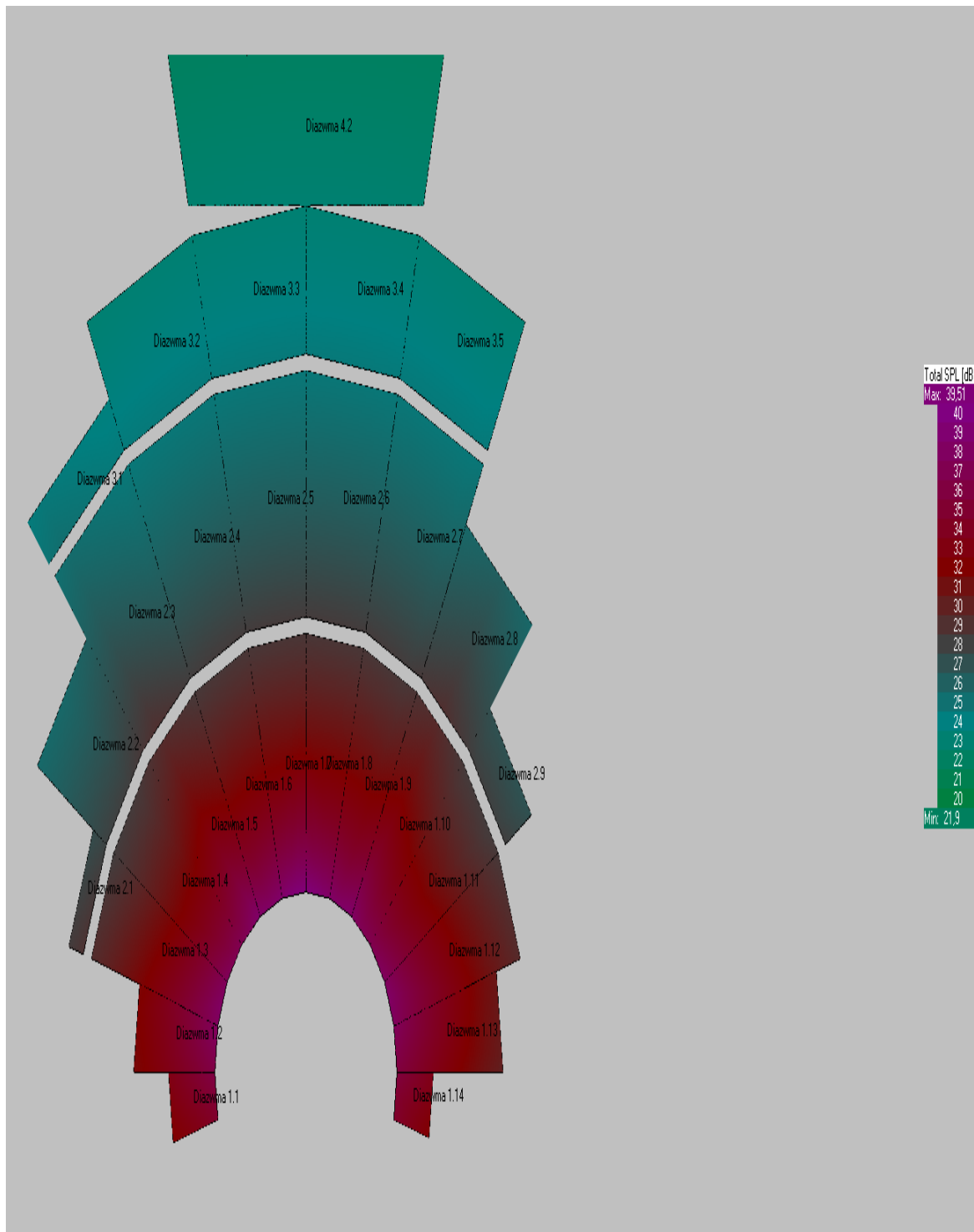
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της στάθμης ακουστικής πίεσης (SPL) για καθέναν από τους 3 τύπους πηγών που χρησιμοποιήσαμε και πρίν.

#### Παντοκατευθυντική:



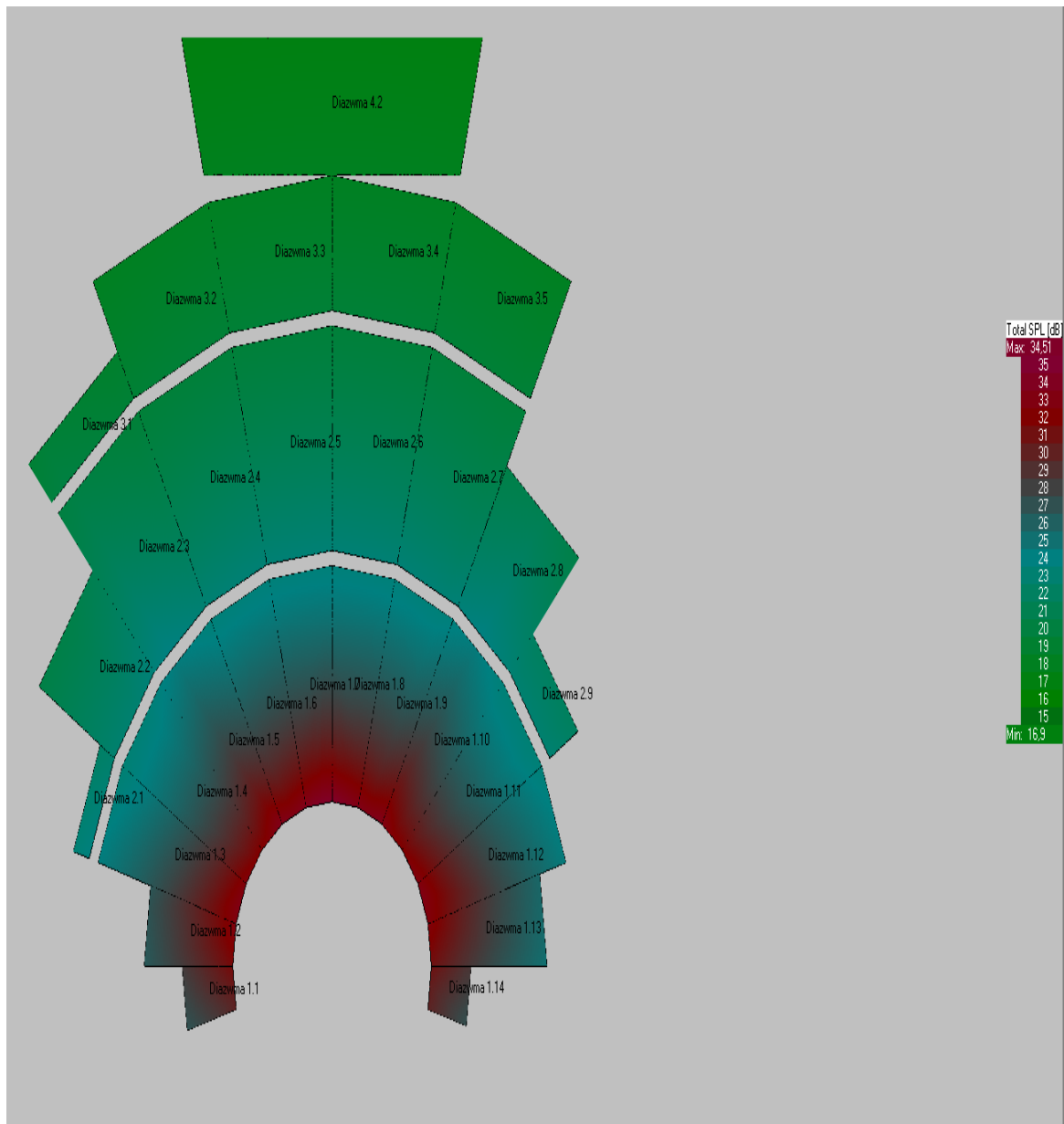
Εικόνα 44: Αποτελέσματα SPL για την παντοκατευθυντική πηγή

## Αντρική Φωνή :



Εικόνα 45: Αποτελέσματα SPL για την αντρική φωνή

## Γυναικεία Φωνή :



Εικόνα 46: Αποτελέσματα SPL για τη γυναικεία φωνή

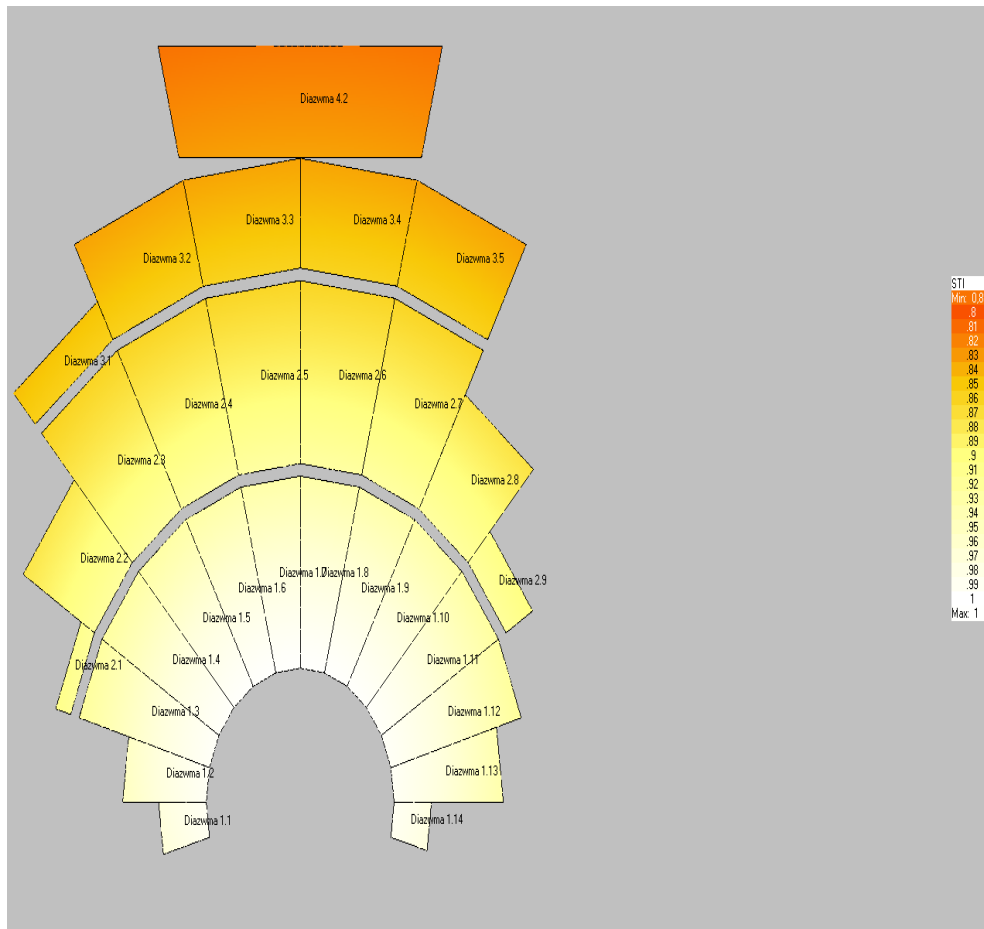
Όπως και στο άδειο θέατρο , έτσι και σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώνουμε ότι υπάρχει εξασθένηση της έντασης του ήχου στα πλάγια και στο πίσω μέρος του θεάτρου. Για άλλη μία φορά παρουσιάζεται εξαιρετική συμμετρία και ομοιόρφη κατανομή του μεγέθους. Με αυτό εννοούμε ότι ακόμα και στα σημεία που η ένταση είναι χαμηλή, είναι σταθερά χαμηλή και δεν υπάρχουν μέρη στο θέατρο που να παρουσιάζουν αποκλίσεις από τα γειτονικά τους.

### 4.3.3 Δείκτες ομιλίας

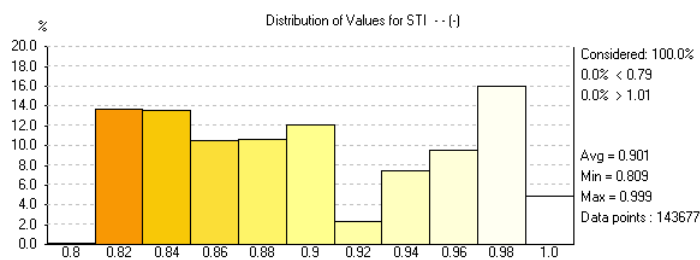
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των παραμέτρων που σχετίζονται με την καταληπτότητα της ομιλίας για τους τρεις τύπους πηγών που χρησιμοποιήθηκαν και πρηγουμένως.

#### Παντοκατευθυντική:

STI:



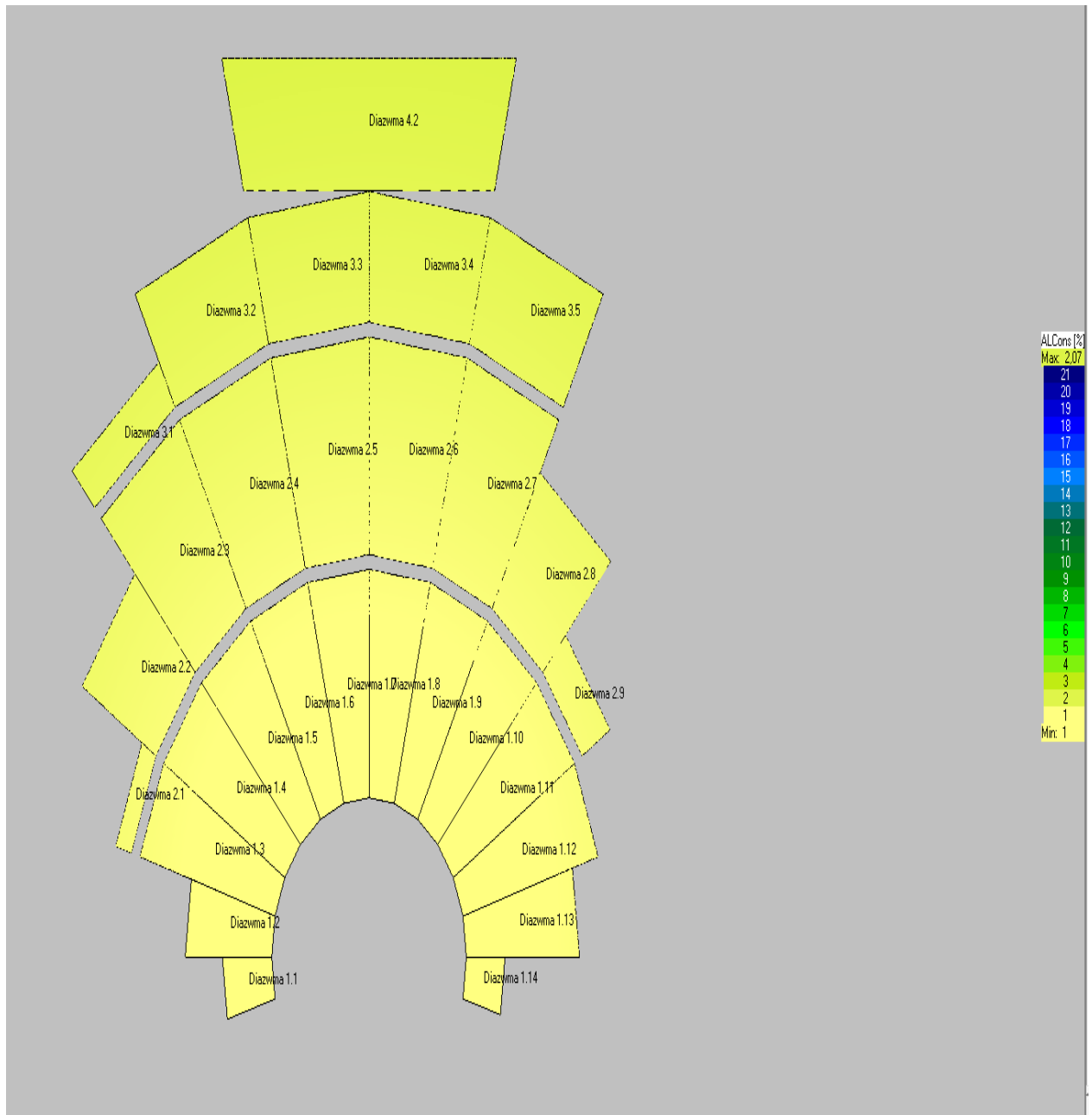
Εικόνα 47: Αποτελέσματα STI για την παντοκατευθυντική πηγή



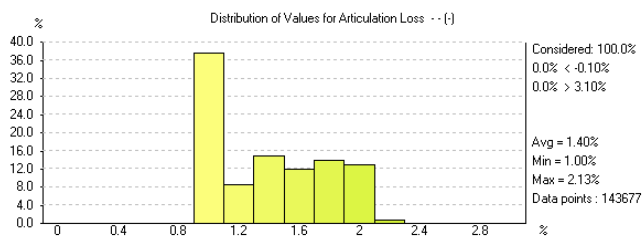
Εικόνα 48: Κατανομή STI για την παντοκατευθυντική πηγή



Alcons % :

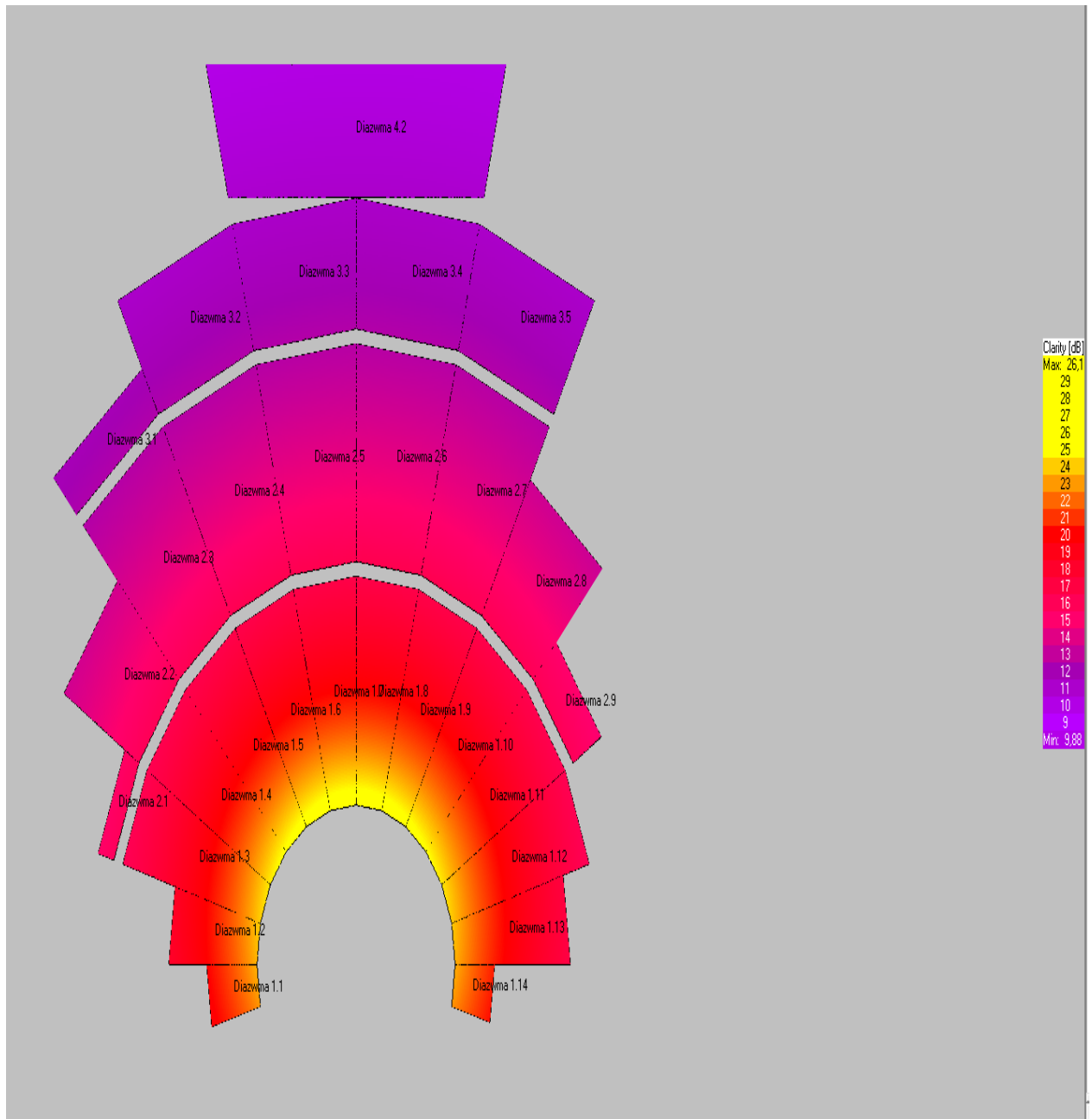


Εικόνα 49: Αποτελέσματα Alcons% για την παντοκατευθυντική πηγή

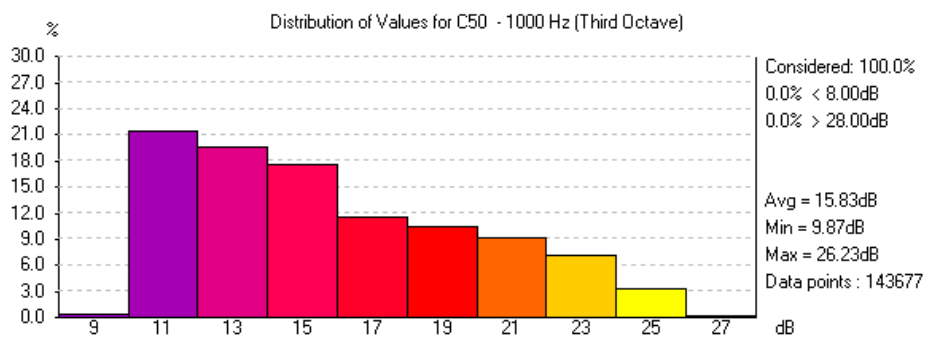


Εικόνα 50: Κατανομή Alcons% για την παντοκατευθυντική πηγή

C<sub>50</sub>:



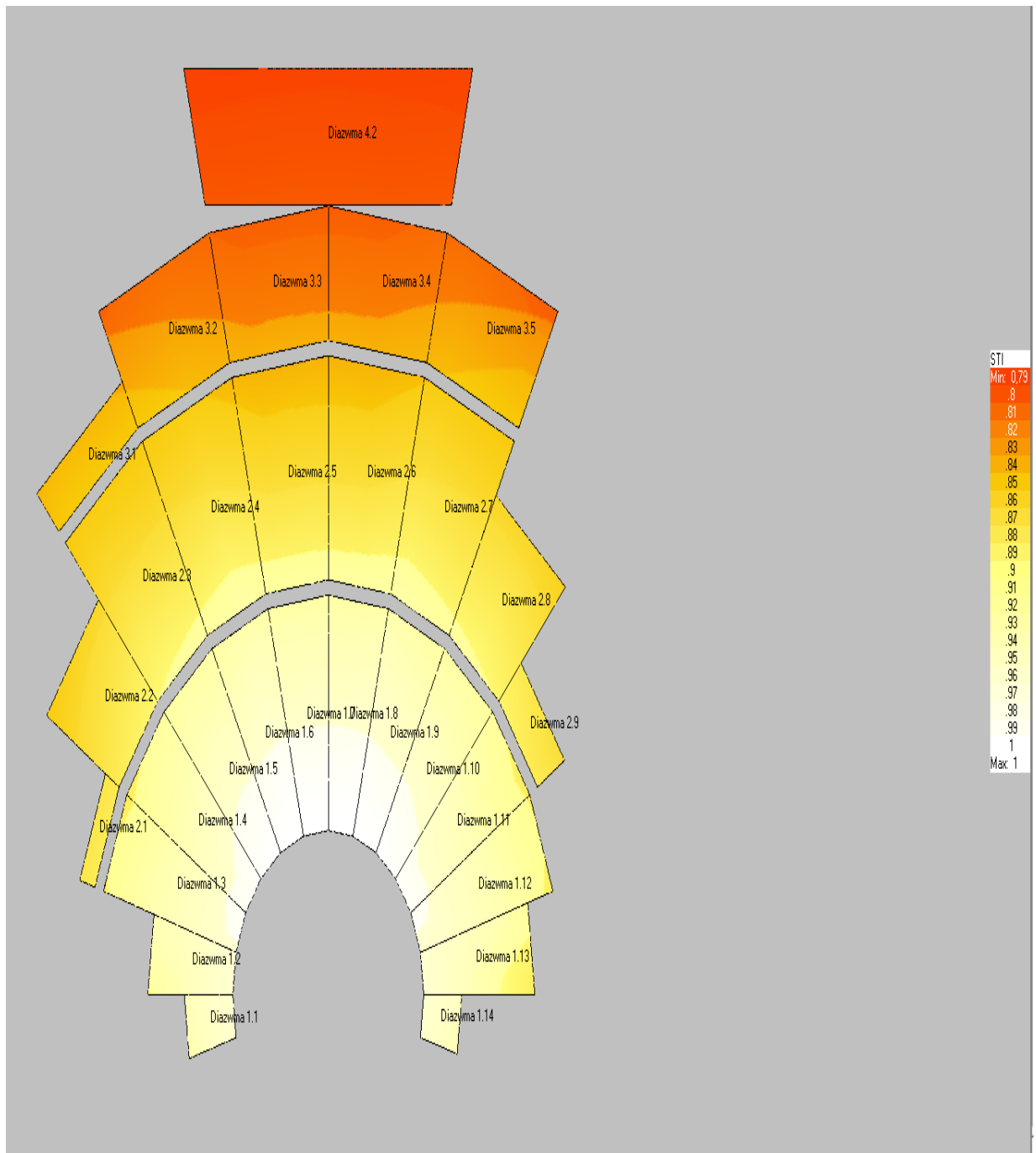
Εικόνα 51: Αποτελέσματα C<sub>50</sub> για την παντοκατευθυντική πηγή



Εικόνα 52: Κατανομή C<sub>50</sub> για την παντοκατευθυντική πηγή

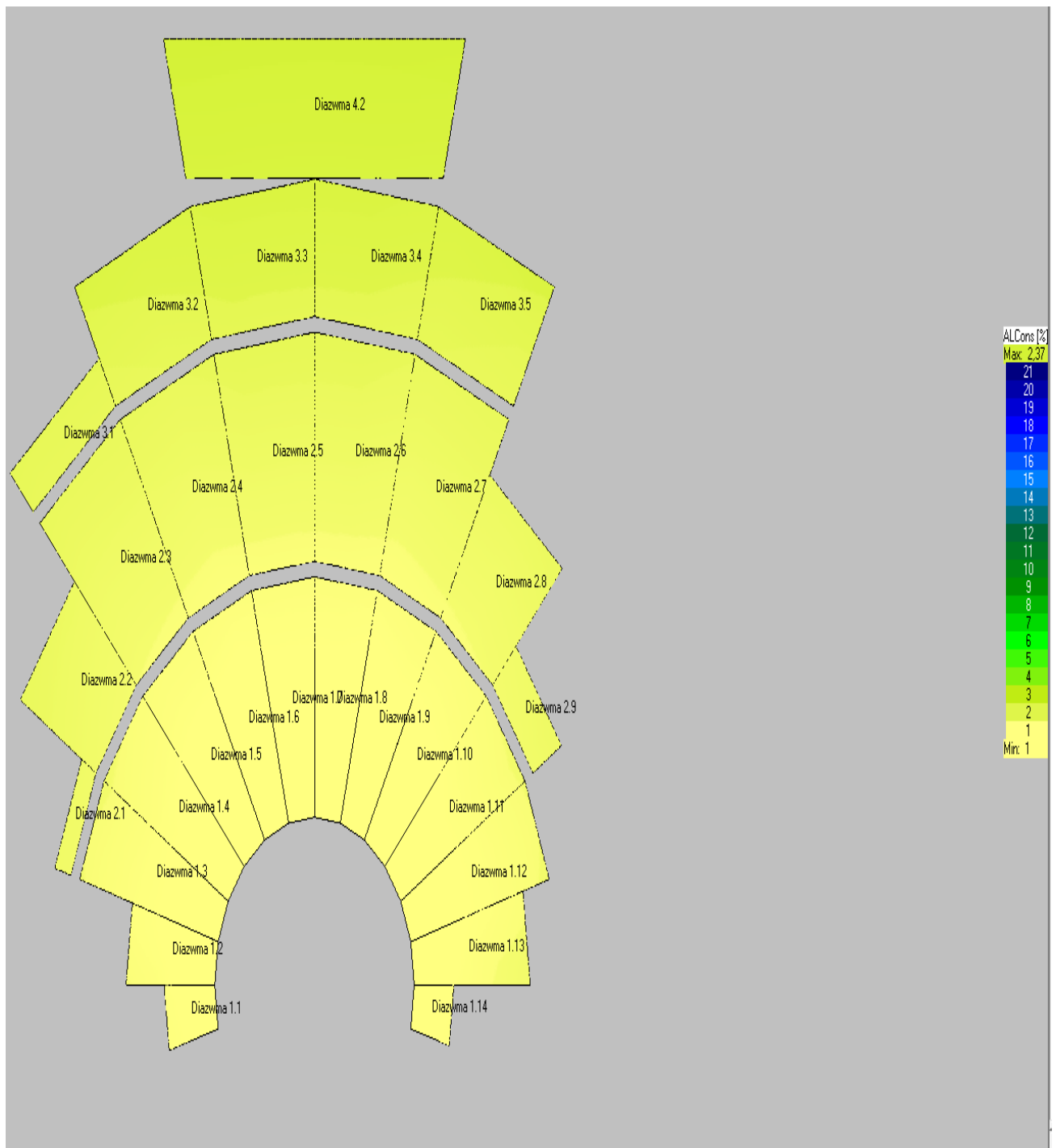
## Αντρική φωνή:

STI:



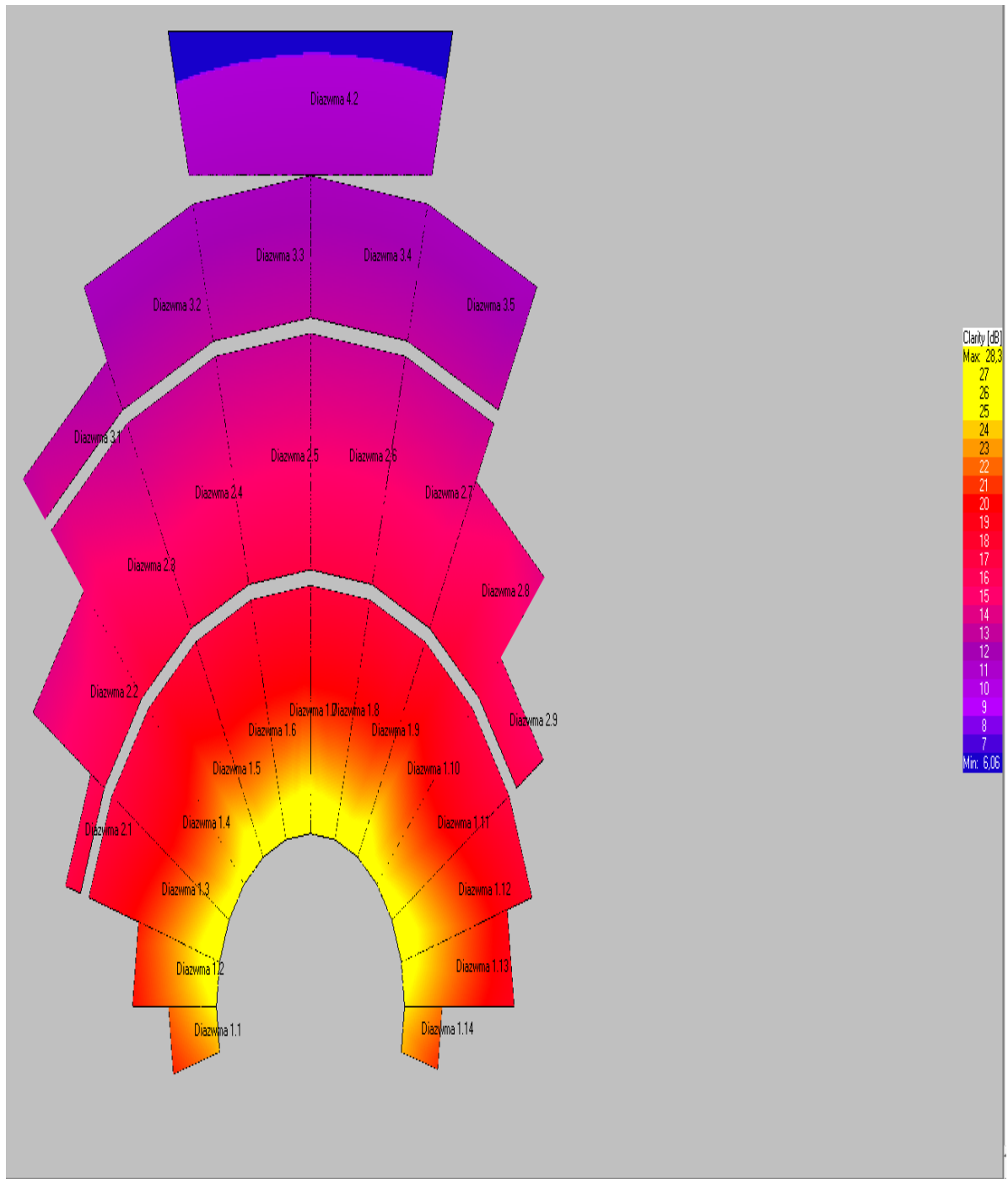
Εικόνα 53: Αποτελέσματα STI για την αντρική φωνή

Alcons% :



Εικόνα 54: Αποτελέσματα Alcons% για την αντρική φωνή

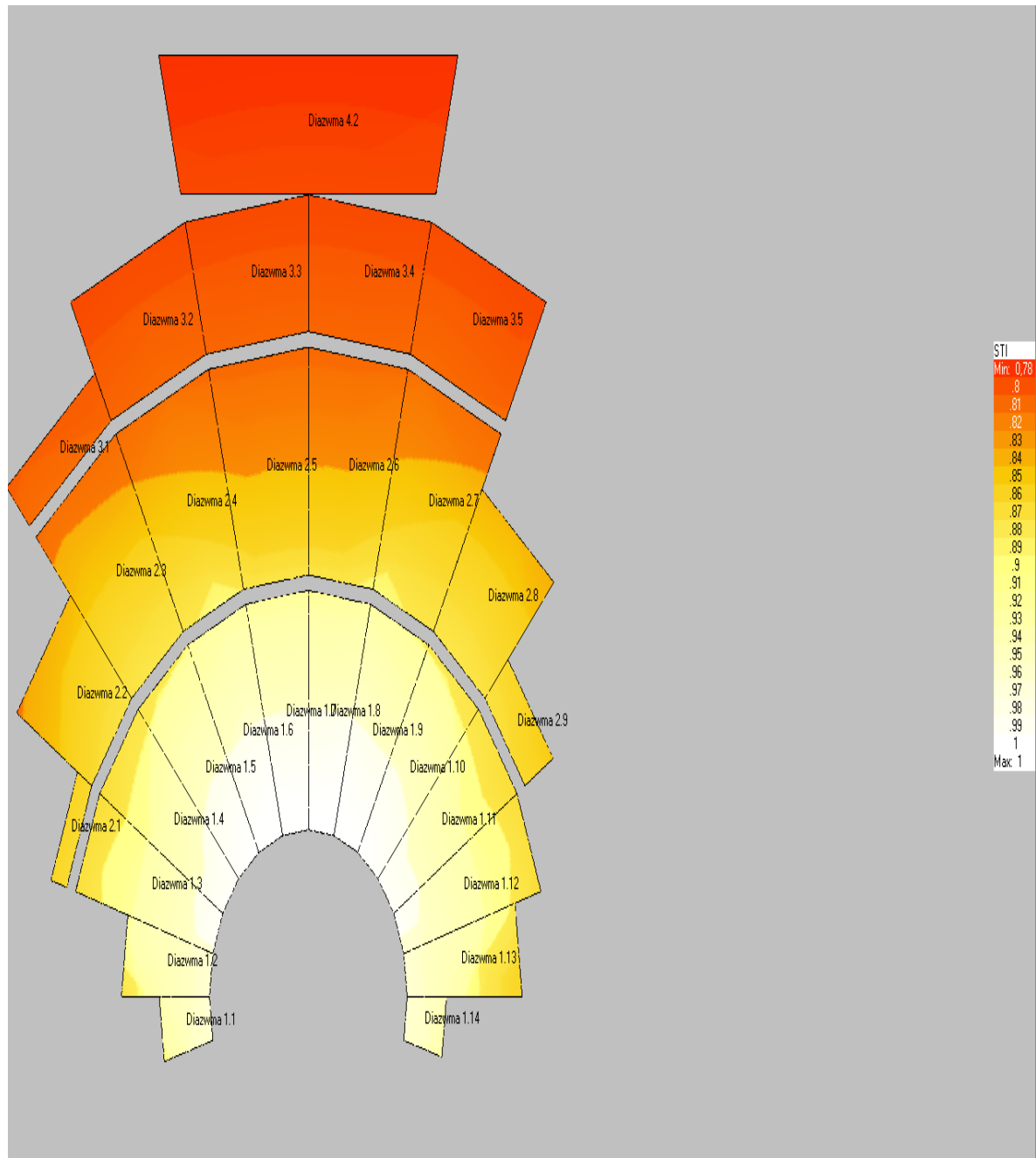
C<sub>50</sub>:



Εικόνα 55: Αποτελέσματα C<sub>50</sub> για την ανδρική φωνή

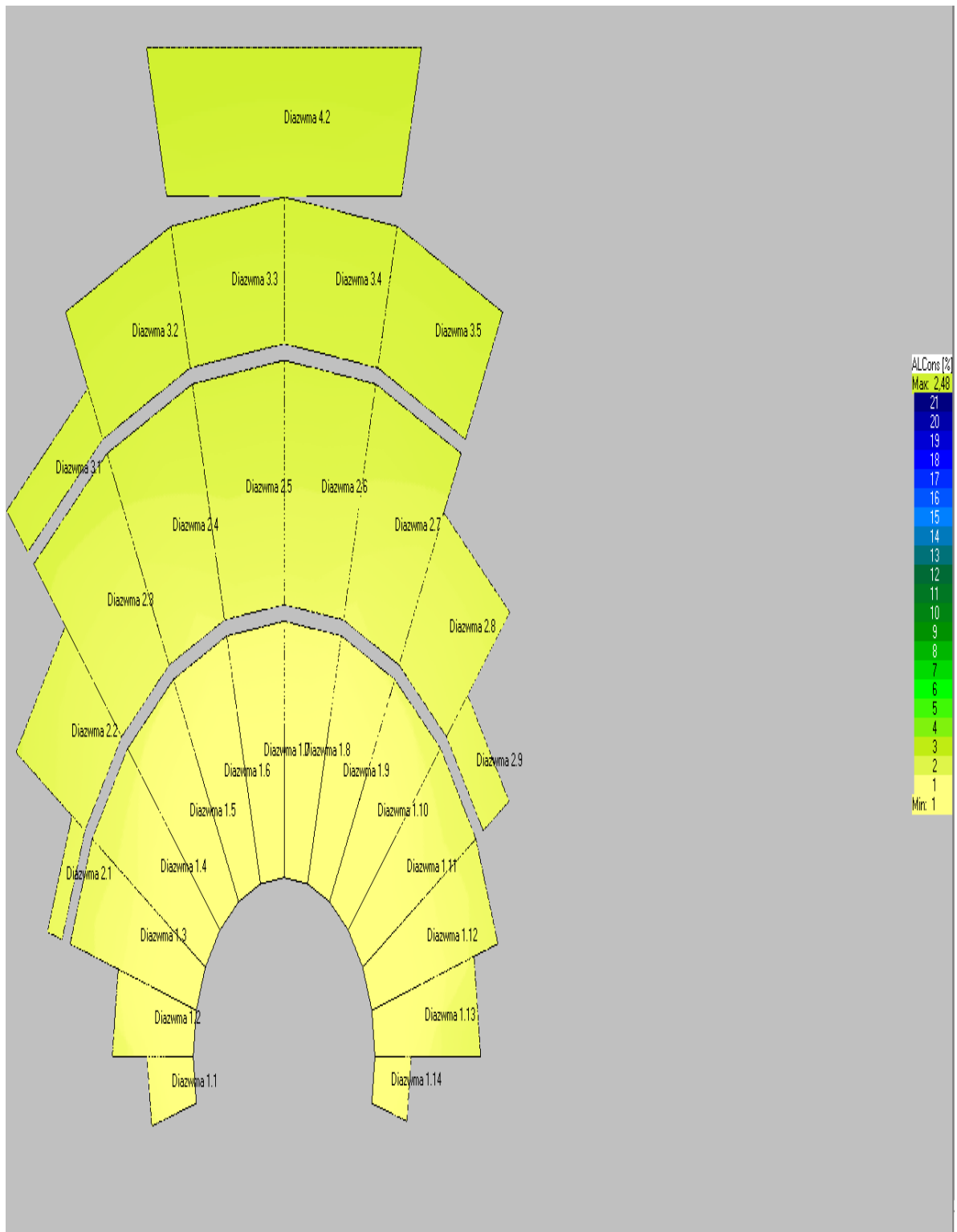
## Γυναικεία φωνή:

STI:



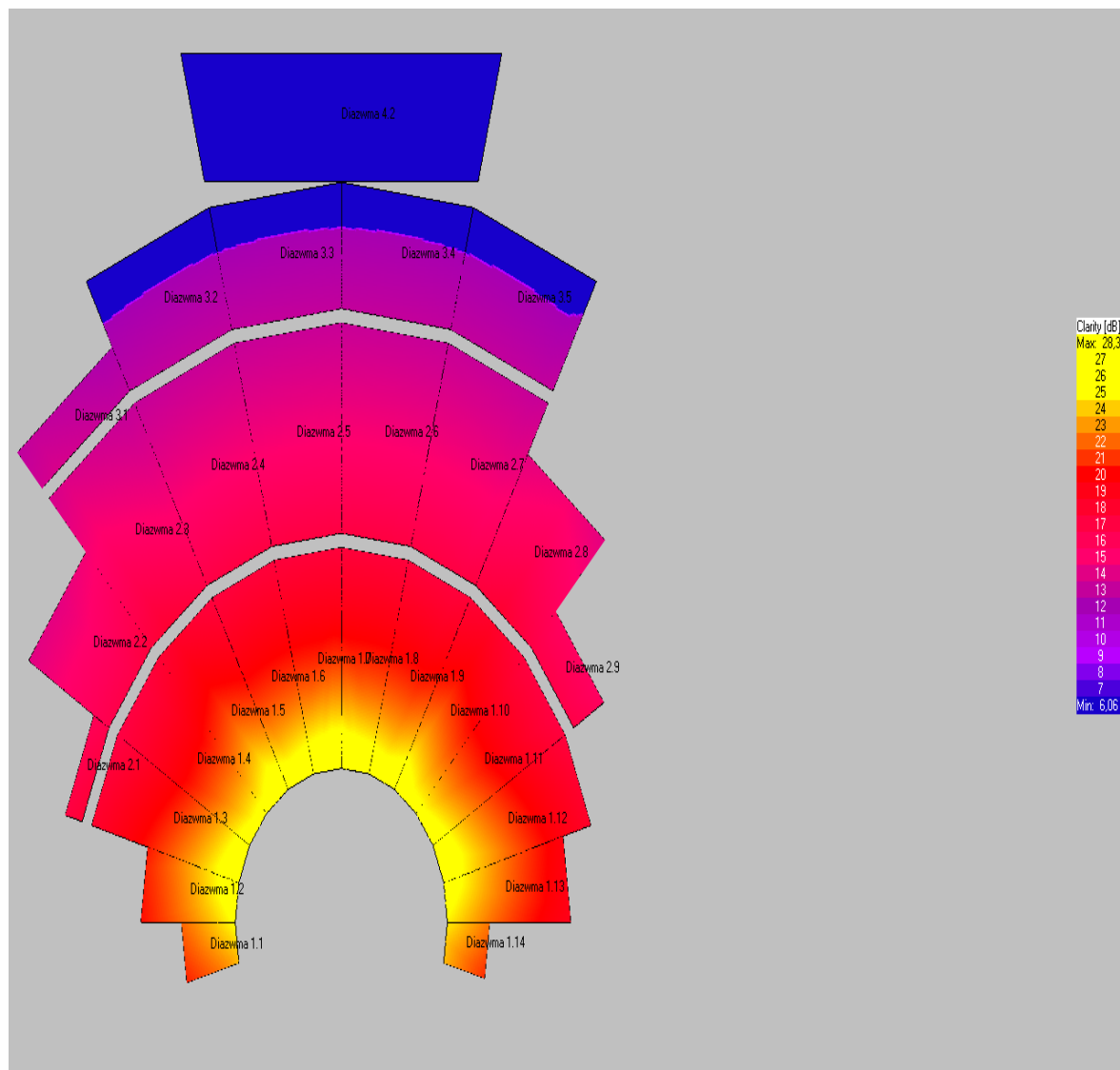
Εικόνα 56: Αποτελέσματα STI για τη γυναικεία φωνή

Alcons% :



Εικόνα 57: Αποτελέσματα Alcons% για τη γυναικεία φωνή

C<sub>50</sub>:



Εικόνα 58: Αποτελέσματα C<sub>50</sub> για τη γυναικεία φωνή

Οι δείκτες ομιλίας κυμαίνονται και στο γεμάτο θέατρο σε εξαιρετικά επίπεδα. Όπως είναι λογικό, στις πρώτες σειρές έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα και όσο απομακρυνόμαστε προς τα πλάγια και προς τα πίσω οι τιμές χειροτερεύουν, πάντα όμως μέσα στα ανεκτά πλαίσια. Και σε αυτήν την περίπτωση η καταληπτότητα ομιλίας του θεάτρου χαρακτηρίζεται ως "εξαιρετική". Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τιμών σε άδειο και γεμάτο θέατρο που ακολουθεί σε επόμενη ενότητα.



## 4.4 Συγκρίσεις

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει ένας σχολιασμός των αποτελεσμάτων μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων και προσομοίωσης, καθώς και μεταξύ των διαφόρων προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε.

### 4.4.1 Επιτόπιες Μετρήσεις- Προσομοίωση

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι τα σχέδια απεικόνιζαν επιπλέον κερκίδες οι οποίες περάστηκαν στο μοντέλο ( Διάγραμμα 4.2 ) αλλά καθώς τα σχέδια είναι του 1989, πλέον το διάγραμμα και οι κερκίδες δε διατηρούνται στην ακεραιότητά τους, έχουν σκεπαστεί από χώμα και δέντρα. Έτσι θα μείνει εκτός σύγκρισης, αφού δε μπορούσαμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις.

Για το μέγεθος Sound Pressure Level δηλαδή τη φασματική κατανομή ενός σήματος στο χώρο θα κάνουμε ένα πιάο ποιοτικό σχολιασμό. Γενικώς , επιβεβαιώνεται τόσο από τις μετρήσεις όσο και από το μοντέλο ότι η στάθμη ηχητικής πίεσης μειώνεται καθώς προχωρούμε προς τα πλάγια και πίσω του θεάτρου. Στις επιτόπιες μετρήσεις έχουμε πιάο έντονες διακυμάνσεις από σημείο σε σημείο κάτι που οφείλεται στους περιορισμούς που ορίζουν η διεύθυνση εκπομπής του ηχείου, καθώς και τα πολικά διαγράμματα των μικροφώνων. Αυτό που μπορούμε να εξάγουμε από τη σύγκριση είναι πώς το θέατρο συμπεριφέρεται αρκετά καλά στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων και ότι στα περισσότερα σημεία του θεάτρου ο ήχος φτάνει σε πολύ ικανοποιητική στάθμη (σε σχέση με την εκπεμπόμενη) χωρίς αυτό να σημαίνει ότι βέβαια ότι δεν υπάρχουν και μερικά σημεία που υπερτερούν έναντι κάποιων άλλων σε αυτόν τον τομέα.

Όσον αφορά το χρόνο αντήχησης, όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως, η προσομοίωση βρίσκεται αρκετά κοντά με το χρόνο των επιτόπιων μετρήσεων. Υπάρχουν αποκλίσεις σε κάποιες συχνότητες, αλλά αυτές είναι της τάξεως των 0.1-0.3 sec, γεγονός αναμενόμενο καθώς η προσομοίωση συμβαίνει σε περιβάλλον που παρόλο που λαμβάνονται υπόψιν οι συνθήκες ( θόρυβος βάθους, θερμοκρασία, υγρασία) δεν είναι τόσο ασταθές όσο το ανοιχτό θέατρο καθεαυτό. Γενικώς, οι καμπύλες της προσομοίωσης ακολουθούν αυτές των επιτοπίων μετρήσεων τόσο για επεξεργασία με Dirac όσο και με Matlab (με τις πολύ μικρές αποκλίσεις που αναφέρθηκαν) και βρίσκονται μέσα στα ενδεικνύμενα όρια χρόνου αντήχησης για ανθρώπινη ομιλία.

Τέλος, οι δείκτες καταληπτότητας βρίσκονται αρκετά κοντά και στην περίπτωση των επιτόπιων μετρήσεων και στην περίπτωση της προσομοίωσης με άδειο θέατρο, οπότε μπορούμε σχεδόν να μιλήσουμε για ταύτιση των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στον δείκτη STI υπάρχουν μικροδιαφορές που κυμαίνονται από 0.05 μέχρι 0.15, ενώ στον δείκτη Alcons% η κατάσταση είναι καλύτερη καθώς οι διαφορές είναι της τάξης του 1%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν αναφέρεται σύγκριση για τους δείκτες SNR και  $C_{50}$  καθώς το λογισμικό Dirac δεν υπολογίζει το  $C_{50}$  και αντίστοιχα το EASE το SNR.

#### 4.4.2 Προσομοίωση για κενό-Προσομοίωση για γεμάτο θέατρο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η σύγκριση της προσομοίωσης μεταξύ κενού και γεμάτου θεάτρου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το αρχαίο θέατρο φαίνεται να "λειτουργεί" καλύτερα όταν είναι γεμάτο. Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος αντήχησης πέφτει κατά 0.2-0.3 seconds και στις μεσαίες συχνότητες (όπου εντοπίζεται το φάσμα της ανθρώπινης φωνής) μέχρι και 0.4. Αυτό κάνει το θέατρο ακόμα πιο ιδανικό για ομιλίες. Το γεγονός επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες καταληπτότητας των οποίων οι τιμές γίνονται ακόμα καλύτερες όσο πιο γεμάτο είναι το θέατρο. Ο δείκτης STI αυξάνεται έως και 0.2 σε κάποια σημεία και η απώλεια συμφώνων (Alcons%) βελτιώνεται έως και 2.5%. Τέλος, η στάθμη ηχητικής πίεσης όταν το θέατρο είναι γεμάτο πέφτει περίπου κατά 6dB. Αυτό πιθανότατα να συμβαίνει λόγω του ότι τα σώματα απορροφούν ηχητική ενέργεια και προσκρούοντας ο ήχος σε αυτά, υφίσταται διάφορες μεταβολές, με αποτέλεσμα να φτάνει με χαμηλότερη στάθμη από αυτή που θα έφτανε αν ήταν άδειο το θέατρο.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

---

Συμπερασματικά , καταλήγουμε ότι οι επιτόπιες μετρήσεις μας επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι τα αρχαία θέατρα έχουν εξαιρετικό ακουστικό σχεδιασμό. Στις συχνότητες που εντοπίζεται η ανθρώπινη φωνή, παρουσιάζει πολύ καλή φασματική συμπεριφορά , κρατώντας αναλλοίωτο το συχνοτικό περιεχόμενο, με πολύ καλή κατανομή στο χώρο. Πιό συγκεκριμένα η ένταση του ήχου μειώνεται όσο προχωρούμε προς τα πλάγια και το πίσω μέρος του θεάτρου. Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου δεν επιβεβαιώνεται, γεγονός που οφείλεται προφανώς στην ύπαρξη ανακλάσεων από το κοίλο. Ο χρόνος αντήχησης του θεάτρου κυμένεται από **0.6** μέχρι **1** δευτερόλεπτα, γεγονός που ευνοεί ιδιαίτερα την ομιλία και πιό συγκεκριμένα την καταληπτότητα του λόγου. Οι αντίστοιχοι δείκτες κυμάνθηκαν σε πάρα πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Ο θεατής ακούει καθαρά σχεδόν σε όλα τα σημεία του θεάτρου, δεν υπάρχει απώλεια συμφώνων και ως εκ τούτου δεν καταβάλει προσπάθεια να καταλάβει το τί λέγεται, κάτι που θα του αποσπούσε την προσοχή από την παράσταση.

Η ακουστική προσομοίωση μέσω ηλεκτρονικού μοντέλου, αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία. Αυτό συμβαίνει καθώς η δυνατότητά μας να έχουμε ακριβή αρχιτεκτονική απεικόνιση του θεάτρου είναι συχνά περιορισμένη. Τα περισσότερα θέατρα δε διασώζονται αυτούσια και συνήθως υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία για τα σκηνικά οικοδομήματα. Στηριζόμαστε σε αρχαιολογικά σχέδια και εικασίες για την πλήρη εικόνα του θεάτρου. Έτσι , τα μοντέλα που κατασκευάζονται είναι ιδανικές απεικονίσεις της αρχικής μορφής του θεάτρου (όσο μπορούμε να την προσεγγίσουμε) ενώ οι επιτόπιες μετρήσεις αφορούν το θέατρο στη σημερινή του -ατελή- μορφή. Προφανώς, όσο περισσότερο αποκλίνει το θέατρο από την αρχική μορφή του, τόσο πιό δύσκολο θα είναι να εξάγουμε συμπεράσματα για το κατά πόσο οι υπολογισμοί του μοντέλου και οι επιτόπιες μετρήσεις συμφωνούν. Στην περίπτωση του Άργους βέβαια, διασώζεται αρκετά μεγάλο μέρος του θεάτρου, αν και τα πιό πρόσφατα αρχαιολογικά σχέδια που βρήκαμε ήταν πάνω από 20 χρονών και είχαν αποκλίσεις από την πραγματικότητα.

Παρολαυτά , το μοντέλο που κατασκευάσαμε συμφωνούσε αρκετά σε πολλά σημεία με τις επιτόπιες μετρήσεις και σε άλλα είχαμε σχεδόν ταύτιση αποτελεσμάτων. Γενικότερα, μπορούμε να μιλήσουμε για σύγκλιση αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για την ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου , λαμβάνοντας υπόψιν φυσικά και τις εξορισμού διαφορές ενός μοντέλου από την πραγματικότητα, αλλά και διάφορους περιορισμούς που εισάγει ο μετρητικός εξοπλισμός.

Επίσης στο θέατρο συμβαίνουν και κάποια φαινόμενα τα οποία δε μπορούν να ληφθούν υπόψιν στο μοντέλο, όπως σημείωσε και ο επιβλέπων κ. Καμπουράκης. Καθώς χρειάζεται εις βάθος ανάλυση, θα αναφέρουμε μόνο ότι συμβαίνουν διάφορες συσσωρεύσεις ενέργειας λόγω της παρουσίας θεατών που επηρεάζουν την κατανομή του ήχου, λειτουργώντας ως φίλτρα αλλά και προσφέροντας κάποια ενίσχυση του ήχου, κάτι το οποίο (στην παρούσα έκδοση τουλάχιστον) το λογισμικό δε δύναται να συμπεριλάβει στους αλγορίθμους του.



Κλείνοντας, αξίζει να σημειώσουμε ότι η μελέτη των αρχαίων θεάτρων έχει μεγάλη αξία, καθώς πρώτα απ'όλα αντιλαμβανόμαστε πώς ακόμα και χωρίς τη χρήση "τεχνητών μέσων" (ηχεία, ανακλαστήρες, απορροφητές κλπ.) μπορούμε να έχουμε εξαιρετική ακουστική συμπεριφορά σε ένα χώρο, αν αυτός έχει σχεδιαστεί σωστά λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές της ακουστικής φυσικής. Επιπρόσθετα, διαπιστώνουμε πώς λειτουργούν στην πράξη αυτές οι αρχές και μπορούμε να πάρουμε εξαιρετικές ιδέες για τη διαμόρφωση χώρων στο σήμερα.

Καθώς οι επιτόπιες μετρήσεις είναι μία αρκετά δύσκολη διαδικασία, αφού αφενώς δε διασώζεται μεγάλο μέρος των θεάτρων και αφετέρου χρειάζεται ακριβή αρα και ακριβό εξοπλισμό, ο οποίος και πάλι επηρεάζεται από διάφορες συνθήκες, μπορούμε με τη χρήση ηλεκτρονικών μοντέλων και την προσομοίωση να πλησιάσουμε αρκετά στην αρχική ακουστική συμπεριφορά των αρχαίων θεάτρων. Έτσι γλιτώνουμε αρκετό χρόνο αλλά και ρίχνουμε το κόστος της μελέτης. Επιπλέον, έχοντας το μοντέλο του θεάτρου, μπορούμε να κάνουμε νέες προσομοιώσεις οι οποίες να περιλαμβάνουν και ηλεκτρακουστική εγκατάσταση σε περίπτωση που χρειάζεται να διευρυνθεί η χρήση του θεάτρου (συναυλίες κλπ) αλλά και να διαπιστώσουμε το πώς θα επηρεαζόταν η ακουστική του εαν είχε ηχεία.

Για το τέλος, μία ευχή-παρότρυνση προς την πολιτεία είναι να διατηρήσει τα αρχαία θέατρα που βρίσκονται στη χώρα σε όσο το δυνατόν καλύτερη κατάσταση, μέσω των αντίστοιχων έργων συντήρησης-αναστήλωσης. Τόσο ως χώρους πολιτισμού και αναβίωσης και παρουσίασης παραστάσεων, όσο και ως μέρη μελέτης των επιστημών της αρχιτεκτονικής και της ακουστικής. Είναι στο χέρι όλων μας να σεβαστούμε αυτό που μας δόθηκε και που με τη σειρά μας θα παραδώσουμε στους επόμενους.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

Ακολουθούν οι κώδικες στο Matlab που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν τα μεγέθη Sound Pressure Level και Χρόνος Αντήρησης

```
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)];

```

```

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;49
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  $F_s/200 < F_c < F_s/5$ .
% 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); 50

% 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
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.
[Bi,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; 52
    y = filter(Bc,Ac,x);
    P(j*3+2) = sum(y.^2)/m;
    y = filter(Bi,Al,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')

```

## Βιβλιογραφία

- [1] B. & Kjaer, «Measuring Sound,» 1984.
- [2] P. Steven W.Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*.
- [3] W. M. H. Fletcher, «Loudness, its definition, measurement and calculation,» *Journal of the Acoustic Society of America*, 1933.
- [4] D. C. N. D. R. G. a. D. H. U. Jeremy Charbonneau, «A-Weighting the equal loudness contours,» σε *Acoustics 2012* , Hong Kong, 2012.
- [5] Κ. Μπακογιάννης, *Ακουστική Μελέτη Αιθουσών Μέσης εκπαίδευσης*, 2011.
- [6] T. G. M. R. D. L. J. H. Beckwith, *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 1995.
- [7] B. a. Kjaer, *Environmental Noise Measurement*, 1984.
- [8] Σ. Χ. Καρατζούνης Αριστείδης, *Μελέτη Θορύβου στο χώρο του Πολυτεχνείου*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.
- [9] E. J.-J. A. D. STAN Guy-Bart, «Comparison of different impulse response measurement techniques,» 2002.
- [10] W. C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press, 1922.
- [11] Χ. Σπυρίδης, *Φυσική και Μουσική Ακουστική*, Αθήνα: Εκδόσεις Grapholine, 2005.
- [12] L. Doelle, *Environmental Acoustics*, McGraw-Hill, 1972.
- [13] D. W. S. Dr. Wolfgang Ahnert, «Fundamentals to perform acoustical measurements».
- [14] Γ. Χ. Τζαμαλούκας, *Ήχος και Άνθρωπος*.
- [15] E. d. R. L. R. B. O. Marzena Miesikowska, «Acoustics in rooms for rehabilitation of laryngectomees,» 2013.
- [16] «Measuring Speech Intelligibility Using Dirac».
- [17] Π. Πολυκάρπου, *Ακουστικός Σχεδιασμός του Αρχαίου Θεάτρου Κουρίου*, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011.
- [18] Κ. C. P. F. Alton Everest, *Εγχειρίδιο Ακουστική*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.
- [19] D. Griesinger, «The audibility of direct sound as a key to measuring the clarity of speech and music».



- [20] Γ. Παπανικολάου, Ηλεκτρακουστική, Θεσσαλονίκη: University Studio Press, 2005.
- [21] Κ. Κ. Μερτζανάκης Κωνσταντίνος, Ακουστική Αρχαίων και Ρωμαϊκών Θεάτρων, ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, 2014.
- [22] Α. Πορτελάνος, «Αρχιτεκτονική Αρχαίων Θεάτρων,» *Εφημερίδα Καθημερινή*, 1999.
- [23] Μ. Κωτσογιάννης, Μοντελοποίηση της Ακουστικής Αρχαίων Θεάτρων, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.
- [24] Ό. Ψυχογιού. [Ηλεκτρονικό].
- [25] Κ. J. H. D. Marko Horvat, «Methods of Measuring the Reverberation Time,» σε *3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association*, Graaz, 2007.
- [26] F. Policardi, «MLS and SineSweep technique comparison in room-acoustic measurements,» 2011.





