



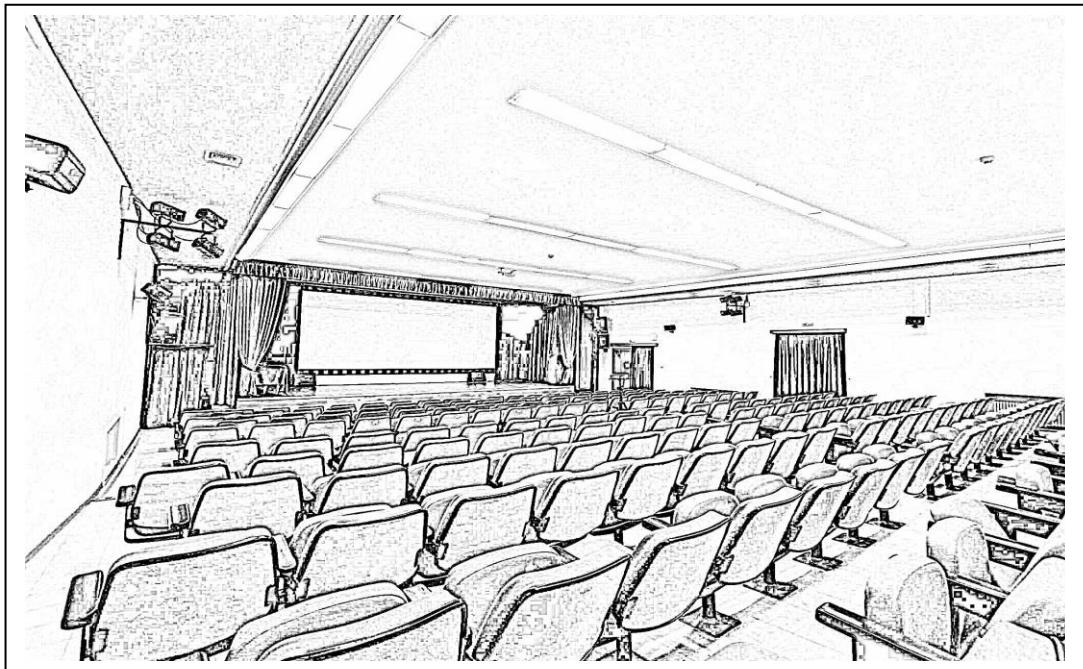
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

### **Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρου Εκδηλώσεων Πολλαπλών Χρήσεων**



**Φοιτητής: Τσιτσιρίγκος Κωνσταντίνος**  
**ΑΜ: 18387054**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Τάτλας Νικόλαος-Αλέξανδρος**  
**Καθηγητής**

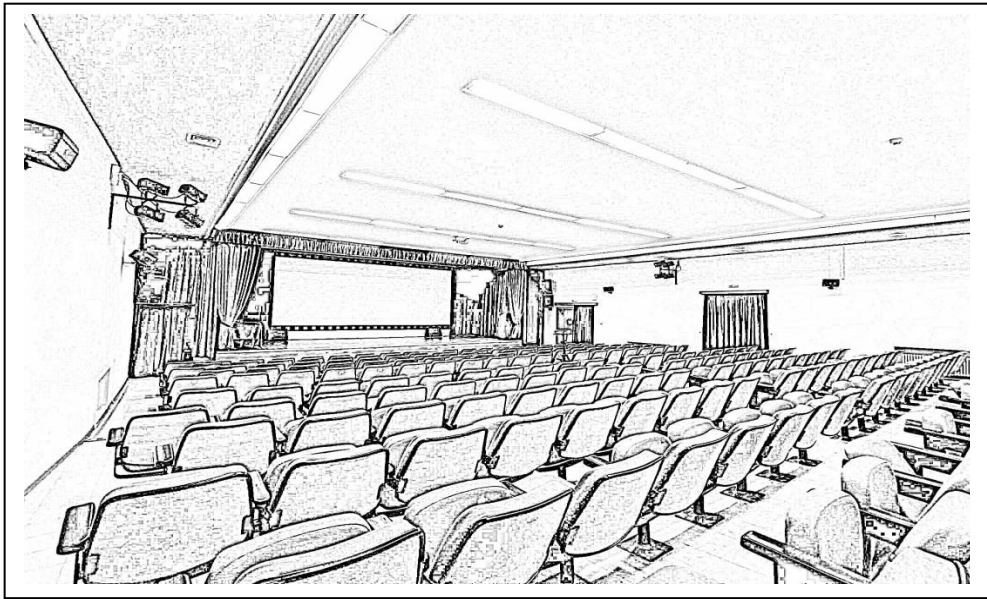
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Acoustic Design of a Multi-Purpose Event Space**



**Student: Tsitsirigkos Konstantinos**  
**Registration Number: 18387054**

**Supervisor**

**Tatlas Nikolaos-Alexandros**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, July 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Νικόλαος – Αλέξανδρος Τάτλας, Καθηγητής	Σωτήρης Καραμπέτσος, Αν. Καθηγητής	Σωτηρία Γαλατά Επ. Καθηγήτρια

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Τσιτσιρίγκος Κωνσταντίνος,  
Μήνας, 2024**

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσιτσιρίγκος Κωνσταντίνος του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 18387054 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών  
Κωνσταντίνος Τσιτσιρίγκος



Αφιερωμένη στους γονείς μου, στον αδερφό μου και στην κοπέλα μου.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τάτλα Νικόλαο – Αλέξανδρο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου.

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ την αρμόδια υπηρεσία διαχείρισης του Χατζηγιάννειου Πνευματικού Κέντρου Λάρισας για την άδεια πρόσβασης στο χώρο.

Επίσης, ευχαριστώ ολόψυχα τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την αγάπη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ βαθιά την κοπέλα μου για τη συνεχή συμπαράσταση, βοήθεια και κατανόηση κατά τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής περιόδου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της σημαντικής για εμένα εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ακουστική μελέτη του αμφιθεατρικού χώρου του Χατζηγιάννειου Πνευματικού Κέντρου του Δήμου Λαρισαίων, με στόχο την εύρεση βελτιώσεων στην ακουστική του χώρου ώστε να καταστεί κατάλληλος για πολλαπλές χρήσεις. Η μελέτη βασίζεται σε ακουστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό CATT-Acoustic. Συνολικά, αυτή η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση της ακουστικής επιστήμης καθώς και στην εφαρμογή πρακτικών λύσεων για τη βελτίωση της ακουστικής σε κλειστούς χώρους. Τα πρώτα τέσσερα κεφάλαια αναλύουν την εξέλιξη της ακουστικής διαχρονικά, το θεωρητικό υπόβαθρο και την ανθρώπινη αντίληψη του ήχου καθώς και τις θεωρητικές έννοιες που σχετίζονται με την ακουστική σε κλειστούς χώρους. Το πέμπτο κεφάλαιο περιέχει την ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου χρησιμοποιώντας το CATT-Acoustic, όπου περιγράφεται ο χώρος μελέτης και σχεδιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Πρώτον, πραγματοποιείται προσομοίωση του χώρου χωρίς καμία παρέμβαση και αξιολογούνται τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, γίνονται παρεμβάσεις στο χώρο για μουσική και ομιλία και πραγματοποιείται μια ακόμη προσομοίωση με χρήση μιας φυσικής πηγής που επιβεβαιώνει την ανάγκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης στο χώρο. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η ηλεκτροακουστική μελέτη και παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα. Τέλος, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των προστιθέμενων παρεμβάσεων, αναδεικνύοντας μια λύση για την ακουστική βελτίωση του χώρου ώστε να εξυπηρετεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις πολλαπλές χρήσεις του.

## Λέξεις – κλειδιά

Ακουστική Μελέτη, Ηλεκτροακουστική Μελέτη, Ακουστικός Σχεδιασμός, Αμφιθέατρο, Χώρος Πολλαπλών Χρήσεων, CATT-Acoustic, Χρόνος Αντήχησης, Ευκρίνεια, Διακριτότητα, RT60, C50, C80, D50, STI.

## **Abstract**

This thesis focuses on the acoustic study of the amphitheatre space of the Chatzianni Cultural Centre of the Municipality of Larisa, with the aim of finding improvements to the acoustics of the space in order to make it suitable for multiple uses. The study is based on acoustic simulations carried out with the CATT-Acoustic software. Overall, this work contributes to the understanding of acoustic science and the application of practical solutions for improving the acoustics of closed spaces. The first four chapters analyse the evolution of acoustics over time, the theoretical background, human perception of sound and theoretical concepts related to acoustics in enclosed spaces. The fifth chapter contains the acoustic study of the amphitheatre using CATT-Acoustic, where the study area is described and a 3D model is designed. First, a simulation of the space without any intervention is carried out and the results are evaluated. Subsequently, interventions are made in the room for music and speech and another simulation is carried out using a natural source that confirms the need for an electroacoustic installation in the space. Chapter six analyses the electroacoustic study and presents the theoretical results. Finally, the results of the added interventions are compared and evaluated, highlighting a solution for the acoustic improvement of the space to best serve its multiple uses.

## **Keywords**

Acoustic Study, Electroacoustic Study, Acoustic Design, Amphitheatre, Multipurpose Space, CATT-Acoustic, Reverberation Time, Clarity, Definition, RT60, C50, C80, D50, STI.



## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>13</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>15</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ιστορική Εξέλιξη της Ακουστικής .....</b>	<b>16</b>
1.1 Η Ακουστική στην Αρχαιότητα .....	16
1.2 Σημαντικά Επιτεύγματα .....	16
1.3 Η Ακουστική τον 19 <sup>ο</sup> αιώνα .....	17
1.3.1 Tyndall .....	17
1.3.2 Helmholtz.....	17
1.3.3 Rayleigh .....	17
1.4 Η Ακουστική τον 20 <sup>ο</sup> αιώνα .....	18
1.4.1 Αρχιτεκτονική Ακουστική .....	18
1.4.2 Φυσική Ακουστική.....	18
1.4.3 Μηχανική Ακουστική .....	19
1.4.4 Ομιλία.....	19
1.4.5 Υποβρύχια Ακουστική .....	19
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Θεωρητικό Υπόβαθρο της Ακουστικής .....</b>	<b>20</b>
2.1 Κατανόηση και Παραγωγή του Ήχου στον Αέρα .....	20
2.2 Το Ημιτονοειδές Κύμα.....	20
2.3 Ταχύτητα του Ήχου .....	21
2.4 Τύποι Ηχητικών Κυμάτων .....	22
2.4.1 Ηχητικά Κύματα Ανάλογα με τον Τρόπο Διάδοσης.....	22
2.4.2 Ηχητικά Κύματα Ανάλογα με τη Μορφή τους .....	22
2.5 Μεγέθη Μέτρησης του Ήχου .....	23
2.5.1 Ένταση Ήχου .....	23
2.5.2 Ηχητική Ενέργεια.....	23
2.5.3 Ηχητικές Στάθμες.....	24
2.6 Ήχος στον Ελεύθερο Χώρο.....	24
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Ανθρώπινη Αντίληψη του Ήχου .....</b>	<b>26</b>
3.1 Ανατομία του Αισθητήριου Οργάνου της Ακοής.....	26
3.1.1 Έξω αυτί.....	26
3.1.2 Μέσο αυτί.....	27
3.1.3 Έσω αυτί.....	27
3.2 Καμπύλες Ίσης Ακουστότητας .....	27
3.3 Περιοχή Ακουστότητας .....	28
3.4 Διαισθητικός Εντοπισμός .....	28
3.5 Φαινόμενο Haas.....	29
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Θεωρητικό Υπόβαθρο Ακουστικής Κλειστών Χώρων.....</b>	<b>31</b>
4.1 Αντήχηση (Reverberation) .....	31
4.2 Χρόνος Αντήχησης (RT <sub>60</sub> ) .....	32
4.3 Χρόνοι EDT, T <sub>10</sub> , T <sub>20</sub> , T <sub>30</sub> .....	32
4.4 Ηχώ (Echo).....	33
4.5 Πολλαπλή Ηχώ (Flutter Echo).....	33
4.6 Ευκρίνεια (Clarity).....	34
4.7 Διακρίσιμότητα (Definition) .....	35
4.8 Αντιληπτότητα των Συλλαβών (Syllable Intelligibility) .....	36
4.9 Απώλεια Συμφώνων (AL) (Articulation Loss) .....	37

<b>4.10</b>	<b>Δείκτης STI-RASTI .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Ακουστική Μελέτη Χώρου Πολλαπλών Χρήσεων .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Περιγραφή του Χώρου Μελέτης.....</b>	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Σχεδίαση 3-D Μοντέλου .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3</b>	<b>Το Περιβάλλον του CATT-Acoustic.....</b>	<b>42</b>
<b>5.4</b>	<b>Παραδοχές Μοντέλου.....</b>	<b>43</b>
<b>5.5</b>	<b>Διαχείριση Δεδομένων - Μεθοδολογία .....</b>	<b>44</b>
<b>5.6</b>	<b>Προσομοίωση Μοντέλου Χωρίς Παρεμβάσεις.....</b>	<b>46</b>
5.6.1	Χρόνος Αντήχησης RT <sub>60</sub> πριν τις Παρεμβάσεις .....	46
5.6.2	Ευκρίνεια C <sub>50</sub> και C <sub>80</sub> πριν τις Παρεμβάσεις .....	47
5.6.3	Διακριτότητα D <sub>50</sub> πριν τις Παρεμβάσεις.....	49
5.6.4	Στάθμη Πίεσης SPL πριν τις Παρεμβάσεις.....	49
5.6.5	Δείκτης STI πριν τις Παρεμβάσεις.....	50
5.6.6	Παράμετροι RT <sub>60</sub> , C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub> , D <sub>50</sub> σε τέσσερις θέσεις πριν τις Παρεμβάσεις.....	51
<b>5.7</b>	<b>Προσομοίωση Μοντέλου με Μόνιμες Παρεμβάσεις για Μουσική .....</b>	<b>53</b>
5.7.1	Χρόνος Αντήχησης RT <sub>60</sub> με Παρεμβάσεις για Μουσική.....	54
5.7.2	Ευκρίνεια C <sub>50</sub> και C <sub>80</sub> με Παρεμβάσεις για Μουσική.....	56
5.7.3	Διακριτότητα D <sub>50</sub> με Παρεμβάσεις για Μουσική .....	57
5.7.4	Στάθμη Πίεσης SPL με Παρεμβάσεις για Μουσική .....	58
5.7.5	Δείκτης STI με Παρεμβάσεις για Μουσική .....	58
5.7.6	Παράμετροι RT <sub>60</sub> , C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub> , D <sub>50</sub> σε τέσσερις θέσεις με Παρεμβάσεις για Μουσική .....	59
<b>5.8</b>	<b>Προσομοίωση Μοντέλου με Ρυθμιζόμενη Παρέμβαση για Ομιλία.....</b>	<b>61</b>
5.8.1	Χρόνος Αντήχησης RT <sub>60</sub> με Παρέμβαση για Ομιλία.....	62
5.8.2	Ευκρίνεια C <sub>50</sub> και C <sub>80</sub> με Παρέμβαση για Ομιλία .....	64
5.8.3	Διακριτότητα D <sub>50</sub> με Παρέμβαση για Ομιλία .....	65
5.8.4	Στάθμη Πίεσης SPL με Παρέμβαση για Ομιλία .....	66
5.8.5	Δείκτης STI με Παρέμβαση για Ομιλία .....	66
5.8.6	Παράμετροι RT <sub>60</sub> , C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub> , D <sub>50</sub> σε τέσσερις θέσεις με Παρέμβαση για Ομιλία .....	67
<b>5.9</b>	<b>Προσομοίωση Μοντέλου Χωρίς Παρεμβάσεις με Φυσική Πηγή .....</b>	<b>69</b>
5.9.1	Χρόνος Αντήχησης RT <sub>60</sub> με Φυσική Πηγή.....	69
5.9.2	Ευκρίνεια C <sub>50</sub> και C <sub>80</sub> με Φυσική Πηγή.....	71
5.9.3	Διακριτότητα D <sub>50</sub> με Φυσική Πηγή.....	72
5.9.4	Στάθμη Πίεσης SPL με Φυσική Πηγή .....	72
5.9.5	Δείκτης STI με Φυσική Πηγή .....	73
5.9.6	Παράμετροι RT <sub>60</sub> , C <sub>50</sub> , C <sub>80</sub> , D <sub>50</sub> σε τέσσερις θέσεις με Φυσική Πηγή .....	74
<b>6</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Ηλεκτροακουστική Μελέτη .....</b>	<b>76</b>
<b>6.1</b>	<b>Μικρόφωνα .....</b>	<b>76</b>
<b>6.2</b>	<b>Ηχεία.....</b>	<b>77</b>
<b>6.3</b>	<b>Επιθυμητή Στάθμη Πίεσης .....</b>	<b>77</b>
<b>6.4</b>	<b>Συνιστώμενοι Χρόνοι Αντήχησης .....</b>	<b>78</b>
<b>6.5</b>	<b>Ενεργός Ακουστική Απόσταση (Effective Acoustical Distance - EAD) .....</b>	<b>78</b>
<b>6.6</b>	<b>Απαιτούμενο Ακουστικό Κέρδος (Needed Acoustic Gain – NAG).....</b>	<b>79</b>
<b>6.7</b>	<b>Δυνητικό Ακουστικό Κέρδος (Potential Acoustic Gain – PAG).....</b>	<b>79</b>
<b>6.8</b>	<b>Θεωρητικά Αποτελέσματα .....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>82</b>
	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>83</b>
	<b>Παράρτημα Α «Αρχείο Master».....</b>	<b>84</b>
	<b>Παράρτημα Β «Ορισμός Ακροατών» .....</b>	<b>96</b>
	<b>Παράρτημα Γ «Ορισμός Πηγών» .....</b>	<b>97</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα των υλικών της αίθουσας. [6], [8]

Πίνακας 2: Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα υλικών για μόνιμες παρεμβάσεις. [22], [23]

Πίνακας 3: Συντελεστής απορρόφησης ανά συχνότητα του διάτρητου ρυθμιζόμενου πάνελ. [6]

Πίνακας 4: Σταθερές υπολογισμού χρόνου αντήχησης για διάφορους χώρους. [8]

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αμφιθέατρο Χατζηγιάννειου Πολιτιστικού Κέντρου Λάρισας – Φωτογραφία με όψη προς τη σκηνή.

Εικόνα 2: Αμφιθέατρο Χατζηγιάννειου Πολιτιστικού Κέντρου Λάρισας – Φωτογραφία με όψη προς το ακροατήριο.

Εικόνα 3: 3-D απεικόνιση του χώρου στο SketchUp 2017.

Εικόνα 4: Αρχικός σχεδιασμός ακροατηρίου στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 5: Τελικός σχεδιασμός χώρου στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 6: Αποτύπωση χώρου στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 7: Ρυθμίσεις του Predict SxR.

Εικόνα 8: Ρυθμίσεις του Map Measures.

Εικόνα 9: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου πριν τις παρεμβάσεις στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 10: Χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 11: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 12: Χρωματική κατανομή  $C_{80}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 13: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 14: Χρωματική κατανομή στάθμης πίεσης SPL στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 15: Χρωματική κατανομή του δείκτη STI στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 16: Χρόνοι αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 17: Ευκρίνεια  $C_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 18: Ευκρίνεια  $C_{80}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 19: Διακριτότητα  $D_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.

Εικόνα 20: 3-D μοντέλο των μόνιμων παρεμβάσεων με γυψοσανίδες και ακουστικά πάνελ.

Εικόνα 21: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου μετά τις παρεμβάσεις για μουσική στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 22: Χρωματική κατανομή χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 23: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 24: Χρωματική κατανομή  $C_{80}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 25: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 26: Χρωματική κατανομή SPL στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 27: Χρωματική κατανομή δείκτη STI στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

Εικόνα 28: Χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

Εικόνα 29: Ευκρίνεια  $C_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

Εικόνα 30: Ευκρίνεια  $C_{80}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

Εικόνα 31: Διακριτότητα  $D_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

Εικόνα 32: Παρέμβαση με επιπλέον ρυθμιζόμενο ακουστικό πάνελ πάνω από το κεντρικό μπροστινό μέρος του ακροατηρίου για ομιλία.

Εικόνα 33: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου με παρέμβαση για ομιλία στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 34: Χρωματική κατανομή χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 35: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 36: Χρωματική κατανομή  $C_{80}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 37: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 38: Χρωματική κατανομή SPL στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 39: Χρωματική κατανομή STI στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

Εικόνα 40: Χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

Εικόνα 41: Ευκρίνεια  $C_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

Εικόνα 42: Ευκρίνεια  $C_{80}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

Εικόνα 43: Διακριτότητα  $D_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

Εικόνα 44: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου με φυσική πηγή στο CATT-Acoustic.

Εικόνα 45: Χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 46: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 47: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 48: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 49: Χρωματική κατανομή στάθμης πίεσης SPL στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 50: Χρωματική κατανομή του δείκτη STI στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

Εικόνα 51: Χρόνοι αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

Εικόνα 52: Ευκρίνεια  $C_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

Εικόνα 53: Ευκρίνεια  $C_{80}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

Εικόνα 54: Διακριτότητα  $D_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή

Εικόνα 55: Απόστασεις ομιλητή – μικροφώνου – κοντινότερου ηχείου – πιο απομακρυσμένου ακροατή.

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Στο στιγμιότυπο (A) το κύμα προκαλεί τη συμπίεση των σωματιδίων του αέρα σε ορισμένες περιοχές και την αραιώση σε άλλες. Στο στιγμιότυπο (B) φαίνεται η μικρή μετακίνηση του κύματος προς τα δεξιά. [6]

Σχήμα 2: Η κυματομορφή ενός ημιτονοειδούς κύματος. Το στιγμιαίο πλάτος δίνεται από την έκφραση  $A \sin(2\pi ft)$ , όπου  $t$  ο χρόνος,  $f$  η συχνότητα, και  $A$  το μέγιστο πλάτος. Η φάση υποδεικνύεται κατά μήκος του άξονα της φάσης, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το πρώτο σημείο διέλευσης μηδέν. [7]

Σχήμα 3: Κατά την εικονιζόμενη σταθερή γωνία, η ίδια ηχητική ενέργεια κατανέμεται σε σφαιρικές επιφάνειες αυξανόμενου εμβαδού καθώς αυξάνεται το  $r$ . Η ένταση του ήχου είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από τη σημειακή πηγή. [6]

Σχήμα 4: Η φυσιολογία του αυτιού. [12]

Σχήμα 5: Καμπύλες ίσης ακουστότητας. [12]

Σχήμα 6: Η ακουστική περιοχή του ανθρώπινου αυτιού. [6]

Σχήμα 7: Η διαισθητική αίσθηση κατεύθυνσης εξαρτάται εν μέρει από τη διαφορά στην ένταση και τη φάση του ήχου που πέφτει στα δύο αυτιά. [6]

Σχήμα 8: Το φαινόμενο Haas στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. [6]

Σχήμα 9: Οι επιδράσεις των πλευρικών ανακλάσεων στην αντίληψη του απευθείας ήχου. [13]

Σχήμα 10: Μια απεικόνιση των διαδρομών που διανύει ο ήχος από τον βιολιστή στον ακροατή, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου ήχου και των τεσσάρων πρώτων ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. [14]

Σχήμα 11: Υπολογισμός χρόνων EDT, T<sub>10</sub>, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub>. [8]

Σχήμα 12: Πολλαπλή ηχώ μεταξύ παράλληλων τοίχων. [17]

Σχήμα 13: Υπολογισμός ευκρίνειας από την κρουστική απόκριση του χώρου. [8]

Σχήμα 14: Κρουστική απόκριση χώρου διάρκειας 1000ms. Στην εικόνα απεικονίζονται τα τμήματα της κρουστικής απόκρισης τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διακριτότητας. [8]

Σχήμα 15: Σχέση (%) αντιληπτότητας σε σχέση με τον λόγο (SNR). [8]

Σχήμα 16: Ποιότητα ομιλίας. [8]

Σχήμα 17: Βέλτιστος χρόνος αντήχησης βάση του όγκου του χώρου και το είδος των ηχητικών δραστηριοτήτων.

Σχήμα 18 : Παράδειγμα απαραίτητης εγκατάστασης ηλεκτροακουστικού συστήματος.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χώροι πολλαπλών χρήσεων γίνονται όλο και πιο συνηθισμένοι καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες περιστάσεις, όπως ομιλίες, συνέδρια, μουσικές εκδηλώσεις, θεατρικές παραστάσεις και προβολές ταινιών. Για να είναι ο ήχος κατάλληλος για όλες αυτές τις δραστηριότητες, πρέπει και η ακουστική του χώρου να προσαρμόζεται ανάλογα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία μεταβλητού χρόνου αντήχησης στο χώρο ανάλογα με το είδος της απορρόφησης που χρησιμοποιείται.

Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει έναν αμφιθεατρικό χώρο που χρησιμοποιείται καθημερινά για διάφορες εκδηλώσεις και στοχεύει στη βελτίωση της ακουστικής του. Σκοπός είναι η αντιμετώπιση των ακουστικών προβλημάτων με απλές παρεμβάσεις στο χώρο έτσι ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα οι διαφορετικές χρήσεις του.

Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός είναι απαραίτητο να γίνει ένας συνδυασμός της θεωρίας της ακουστικής με την πρακτική προσομοίωση του χώρου σε ειδικό λογισμικό. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από το λογισμικό CATT-Acoustic αναλύθηκαν και προτάθηκαν λύσεις μέσω διαφορετικών δοκιμών για τη ρύθμιση της ακουστικής ανά περίπτωση. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε επίσης πηγή βελτίωσης των προσωπικών γνώσεων και κίνητρο για έρευνα μέσω της θεωρίας και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ιστορική Εξέλιξη της Ακουστικής

Η εξέλιξη της ακουστικής από την αρχαιότητα έως και σήμερα έχει διαμορφώσει την ανθρώπινη εμπειρία και την τεχνολογική πρόοδο. Κατά την αρχαιότητα, οι αναζητήσεις για την κατανόηση του ήχου, αποτέλεσαν τις βάσεις για την περαιτέρω επιστημονική εξέλιξη. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, μεγάλοι πρωτοπόροι ερευνητές ανακάλυψαν τις βασικές αρχές που διαμορφώνουν τη σύγχρονη ακουστική. Από την άλλη πλευρά, κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα έγιναν επαναστατικές αλλαγές στην ακουστική με την εισαγωγή νέων επιστημονικών θεωριών αλλά και ηλεκτροακουστικών συσκευών.

### 1.1 Η Ακουστική στην Αρχαιότητα

Η ακουστική είναι η επιστήμη του ήχου. Παρόλο που τα ηχητικά κύματα είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο και το σύμπαν, η επιστημονική μελέτη του ήχου θεωρείται γενικά ότι έχει την προέλευσή της από την αρχαία Ελλάδα. Όμως, φαίνεται οι πρώτες εφαρμογές του όρου ακουστική στην επιστήμη του ήχου να έγιναν από τον Γάλλο μαθηματικό και φυσικό Joseph Sauveur το 1701. Ο Πυθαγόρας, ο οποίος καθιέρωσε τα μαθηματικά στον ελληνικό πολιτισμό κατά τον έκτο αιώνα π.Χ., μελέτησε τη δόνηση των χορδών και των μουσικών ήχων. Φαίνεται ότι ανακάλυψε ότι η διαίρεση του μήκους μιας δονούμενης χορδής σε απλά κλάσματα παράγει αρμονικά μουσικά διαστήματα. Αν και οι Έλληνες γνώριζαν σίγουρα τη σημασία του καλού ακουστικού σχεδιασμού έχοντας κατασκευάσει πολλά εξαιρετικά θέατρα, ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας Vitruvius ήταν ο πρώτος που έγραψε σχετικά γι' αυτά στο έργο του "De Architectura", το οποίο περιλαμβάνει μια αξιοσημείωτη κατανόηση και ανάλυση της ακουστικής του θεάτρου. Σημαντική του αναφορά είναι η έκφραση: «Πρέπει να επιλεγεί ένας χώρος στον οποίο η φωνή θα μπορεί να ακούγεται ομαλά και να μην επιστρέφεται από την ανάκλαση, η οποία μπορεί να μεταφέρει ένα ασαφές νόημα στο αυτί». [1]

### 1.2 Σημαντικά Επιτεύγματα

Στην περίοδο των αρχαίων Ελλήνων και Ρωμαίων (650π.Χ. – 400μ.Χ.) έγιναν σημαντικές ανακαλύψεις στον τομέα της ακουστικής. Οι Έλληνες κατασκεύασαν μερικά από τα πρώτα υπαίθρια αμφιθέατρα, με σχέδια που μοιάζουν με ένα τμήμα κύκλου, λίγο μεγαλύτερο από 180 μοίρες. Το θέατρο της Επιδαύρου, κατασκευασμένο το 330π.Χ., είναι ένα καλά διατηρημένο παράδειγμα. Τα απότομα κεκλιμένα καθίσματα στα αμφιθέατρα και ο χαμηλός θόρυβος περιβάλλοντος συνέβαλαν στην άριστη καταληπτότητα της ομιλίας. Οι Ρωμαίοι ακολούθησαν το ελληνικό πρότυπο αμφιθεάτρων, αλλά περιόρισαν το τόξο των καθισμάτων σε 180 μοίρες και πρόσθεσαν υπερυψωμένο χώρο ερμηνείας. Το Κολοσσαίο, με χωρητικότητα περίπου 50.000 θέσεων, είναι ένα από τα πιο εντυπωσιακά ρωμαϊκά αμφιθέατρα.

Κατά τον Μεσαίωνα (476μ.Χ. – 1492μ.Χ.), μετά την αποδοχή του χριστιανισμού άρχισε η κατασκευή μεγάλων εκκλησιών και ναών με χαρακτηριστικό αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό τη θολωτή στέγη που κάλυπτε τετράγωνα ή πολυγωνικές κατόψεις. Το πιο γνωστό κτίριο της εποχής είναι η Αγία Σοφία που κατασκευάστηκε μεταξύ (532μ.Χ. – 537μ.Χ.) στην Κωνσταντινούπολη με σκοπό την καλή ακουστική των ψαλμών και των λειτουργιών.

Την περίοδο της Αναγέννησης υπήρξε μεγάλη άνθιση της τέχνης και της μουσικής με αποτέλεσμα να αρχίσει και πάλι η κατασκευή θεάτρων στην Ιταλία. Το 1580, η Ολυμπιακή Ακαδημία της Βιτσέντσα ανέθεσε στον αρχιτέκτονα Palladio την κατασκευή του «Olympic Theatre» το οποίο είχε ημιελλειπτική κάτοψη καθισμάτων, ακολουθώντας το κλασικό πρότυπο, η σκηνή είχε ίδια διαμόρφωση ορχήστρας με τα παλαιά ρωμαϊκά θέατρα και στο πίσω μέρος του κοινού υπήρχε στοά με κίονες. Στη συνέχεια, αυτός ο τύπος θεάτρων εξελίχθηκε, αντικαθιστώντας την ημιελλειπτική μορφή καθισμάτων σε μορφή σχήματος U και αφαιρέθηκε ο τοίχος της σκηνής. Η ακουστική αυτών



των πρώτων θεάτρων ήταν ικανοποιητική έχοντας καλή καταληπτότητα ομιλίας, υποστηρίζοντας ακόμη και έργα του Shakespeare. [2]

### 1.3 Η Ακουστική τον 19<sup>ο</sup> αιώνα

Η ακουστική άνθισε πραγματικά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Πολλοί επιστήμονες, μουσικοί και αρχιτέκτονες αντιμετώπιζαν νέες προκλήσεις και δυσκολίες και αυτό τους ώθησε να αναπτύξουν νέες τεχνικές και μεθόδους για τη βελτίωση της ακουστικής σε διάφορους χώρους. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτα είναι τα έργα των Tyndall, von Helmholtz και Rayleigh. [1]

#### 1.3.1 Tyndall

Ο John Tyndall ως καθηγητής φυσικής φιλοσοφίας δημοσίευσε το 1867 το βιβλίο του περί τον ήχο και μεταξύ των μελετών του για τον προσδιορισμό της κυματομορφής των μουσικών ήχων, ερευνούσε την επίδραση της ομίχλης στη μετάδοση του ήχου μέσω της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, διεξήγαγε μελέτες για τη διάδοση του ήχου πάνω από το νερό σε διάφορες καιρικές συνθήκες στους δρόμους του Dover. Οι έρευνές του αποκάλυψαν μεγάλες ασυνέπειες στη διάδοση του ήχου, προσδιορίζοντας καλύτερα τις συνθήκες και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική μετάδοση. [1]

#### 1.3.2 Helmholtz

Ο Hermann von Helmholtz αφού εγκατέλειψε την άσκηση του ιατρικού επαγγέλματος αφοσιώθηκε στη συγγραφή εργασιών που αναφερόντουσαν στη φυσιολογία, την αντίληψη των χρωμάτων και τον ηλεκτρισμό. Το βιβλίο του «On Sensations of Tone» το 1862 συνδυάζει τις γνώσεις του στη φυσιολογία, τη φυσική και τη μουσική. Εργάστηκε με διάφορα μουσικά όργανα, πειραματιζόμενος με πιρούνια συντονισμού, τη σειρήνα και τα περίφημα αντηχεία του, για να αποδείξει ότι ο τόνος οφείλεται στη θεμελιώδη συχνότητα, αλλά η ποιότητα ενός μουσικού ήχου οφείλεται στην παρουσία ανώτερων μερικών συχνοτήτων. Έδειξε πώς το αυτί μπορεί να διαχωρίσει τις διάφορες συνιστώσες ενός σύνθετου τόνου και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ποιότητα ενός τόνου εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό και τη σχετική ισχύ των επιμέρους ήχων του τόνου και όχι από τη σχετική τους φάση. [1]

#### 1.3.3 Rayleigh

Ο Rayleigh ήταν ένας επιστήμονας με αξιοσημείωτη συνεισφορά στην ακουστική συγγράφοντας ένα από τα βασικότερα βιβλία ακουστικής το «Theory of Sound». Ο Rayleigh συνδύασε την πειραματική εργασία με τη θεωρία. Έχοντας ανάγκη από έναν τρόπο για τον προσδιορισμό της έντασης μιας ηχητικής πηγής παρατήρησε ότι το φως που αιωρείται σε μια ακτίνα ήχου τείνει να ευθυγραμμιστεί με το επίπεδο της κάθετα στη διεύθυνση της ηχητικής δέσμης. Η ροπή που ασκείται στο δίσκο είναι ανάλογη με την ένταση του ήχου, και με την παρέμβαση ενός φωτεινού καθρέφτη σε ένα ηχητικό πεδίο, η ένταση του ήχου θα μπορούσε να μετρηθεί μέσω ενός ευαίσθητου οπτικού μοχλού. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως δίσκος Rayleigh και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για τη μέτρηση της έντασης του ήχου.

Ένα άλλο ακουστικό φαινόμενο που φέρει το όνομά του είναι η διάδοση των κυμάτων Rayleigh στην επίπεδη επιφάνεια ενός ελαστικού στερεού. Τα κύματα Rayleigh παρατηρούνται τόσο σε μεγάλες όσο και σε μικρές κλίμακες. Το μεγαλύτερο μέρος της δόνησης που γίνεται αισθητή εξαιτίας ενός σεισμού οφείλεται στα κύματα Rayleigh, τα οποία μπορούν να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα σεισμικά κύματα. [1]

## 1.4 Η Ακουστική τον 20<sup>ο</sup> αιώνα

Κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, η αρχιτεκτονική ακουστική αναγνωρίστηκε ως επιστήμη και ως τέχνη. Οι πιο συνηθισμένες πτυχές της ακουστικής δωμάτων, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου του θορύβου και των δονήσεων και της ανάπτυξης αποτελεσματικών ακουστικών υλικών, βελτιώθηκαν σημαντικά. Ο 20<sup>ος</sup> αιώνας ήταν η αρχή για την ανάπτυξη ηλεκτροακουστικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένων μικροφώνων, ενισχυτών, μεγάλφωνων και άλλων ηλεκτρονικών μέσων επεξεργασίας τα οποία είχαν καθοριστικό ρόλο για την ακουστική μελέτη των χώρων. [2]

### 1.4.1 Αρχιτεκτονική Ακουστική

Ο Wallace Clement Sabine (1868–1919) θεωρείται γενικά ο πατέρας της αρχιτεκτονικής ακουστικής. Ήταν ο πρώτος που έκανε ποσοτικές μετρήσεις στην ακουστική των δωμάτων. Η ανακάλυψή του ότι το γινόμενο της συνολικής απορρόφησης και της διάρκειας του υπολειπόμενου ήχου είναι μια σταθερά αποτελεί μέχρι σήμερα την αρχή του ηχητικού ελέγχου στα δωμάτια.

Ο Sabine μέσα από τα πειράματά του καθόρισε τον χρόνο αντήχησης στην αίθουσα διαλέξεων Fogg του πανεπιστημίου του Harvard χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα και ένα χρονογράφο. Βρήκε τον χρόνο αντήχησης στην άδεια αίθουσα να είναι 5,62sec. Στη συνέχεια άρχισε να προσθέτει μαξιλάρια από το θέατρο Sanders και να μετρά τους παραγόμενους χρόνους αντήχησης. Ανέπτυξε μια εμπειρική σχέση που συνδέει το χρόνο αντήχησης, τον όγκο και το μέσο συντελεστή απορρόφησης πολλαπλασιασμένος με το συνολικό εμβαδό των τοίχων, οροφής και δαπέδου. Αυτός ο τύπος καλείται χρόνος αντήχησης κατά Sabine που θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

Μετά την επιτυχία του Sabine στην αίθουσα διαλέξεων Fogg, του ζητήθηκε να διαμορφώσει ακουστικές προδιαγραφές για το νέο μουσικό Hall της Βοστώνης, που τώρα είναι γνωστό ως Symphony Hall, το οποίο θα εξασφάλιζε την εξαιρετική ακρόαση μουσικής από κάθε θέση. Χρησιμοποιώντας το μαθηματικό του τύπο για το χρόνο αντήχησης, ο Sabine προσαρμοσε προσεκτικά το διάστημα μεταξύ των σειρών καθισμάτων, την κλίση των τοίχων, το σχήμα της σκηνής και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στους τοίχους για να παράγουν το εξαιρετικό ήχο που ακούγεται σήμερα στο Symphony Hall. [1]

### 1.4.2 Φυσική Ακουστική

Η φυσική ακουστική είναι η επιστήμη του ήχου που επικεντρώνεται στη μελέτη των φυσικών νόμων που διέπουν την προέλευση, τη μετάδοση και την αντίδραση του ήχου. Αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση των βασικών φαινομένων όπως η διάδοση του ήχου, η ανάκλαση, η διάθλαση, η διάχυση και η απορρόφηση του ήχου. Επίσης, εξετάζει τη χρήση της ακουστικής για τη μελέτη φυσικών ιδιοτήτων της ύλης και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να προκληθούν αλλαγές σε αυτές τις ιδιότητες μέσω του ήχου. Οι υπέρηχοι χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την μελέτη του ανώτερου ορίου ακοής στα ζώα από τον Francis Galton. Αργότερα, οι υπέρηχοι χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των ιατρικών διαγνώσεων και της υποβρύχιας εξερεύνησης. Οι υπόηχοι περιγράφουν ήχους με συχνότητες χαμηλότερες από αυτές που μπορεί να ακούσει το ανθρώπινο αυτί όπως συμβαίνει για παράδειγμα πολύ πριν την δόνηση του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. [1]

Η αεροακουστική είναι ένα παράρτημα της ακουστικής που μελετά τη παραγωγή θορύβου μέσω είτε της ταραχώδους κίνησης του ρευστού είτε των αεροδυναμικών δυνάμεων που αλληλοεπιδρούν με επιφάνειες. Η παραγωγή θορύβου μπορεί επίσης να σχετίζεται με ροές που ποικίλλουν περιοδικά. Ένα εμφανές παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι οι αιολικοί ήχοι που παράγονται από τον άνεμο που πνέει πάνω από σταθερά αντικείμενα. Παρόλο που δεν έχει καθιερωθεί μια πλήρης επιστημονική

θεωρία για την παραγωγή θορύβου από αεροδυναμικές ροές, η πρακτική ανάλυση της αεροακουστικής βασίζεται στην αεροακουστική αναλογία που προτάθηκε από τον Sir James Lighthill τη δεκαετία του 1950. [3]

Η οπτοακουστική (ή φωτοακουστική) επίδραση αφορά την παραγωγή ήχου μέσω της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη. Κατά την απορρόφηση ενός μοναδικού παλμικού λέιζερ σε ένα δείγμα, δημιουργείται μια θερμαινόμενη περιοχή που επεκτείνεται θερμικά, δημιουργώντας έτσι μια μηχανική διαταραχή που μεταδίδεται στο περιβάλλον μέσω ηχητικού κύματος. [1]

#### 1.4.3 Μηχανική Ακουστική

Η ενίσχυση του ήχου περιλαμβάνοντας είσοδο και έξοδο μετατροπέων μαζί με τον ηλεκτρονικό ενισχυτή έχει καταλάβει έναν βασικό ρόλο στη μηχανική ακουστική του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Οι μετατροπείς σε ένα σύστημα ενίσχυσης ήχου είναι τα μικρόφωνα και τα ηχεία. Τα πρώτα μικρόφωνα ήταν ο μαγνητικός πομπός του Bell και τα μικρόφωνα συμπυκνωμένου άνθρακα των Edison και Berliner. Μια μεγάλη εξέλιξη έγινε το 1917 κατά την η εφεύρεση του πυκνωτικού μικροφώνου από τον Edward Wente. [1]

#### 1.4.4 Ομιλία

Η παραγωγή, η μετάδοση και η αντίληψη του λόγου έχουν πάντα παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική. Το 1939, ο Homer Dudley εφηύρε το «vocoder», ένα σύστημα στο οποίο το σήμα του διαμορφωτή διαιρείται σε πολλές ζώνες συχνοτήτων. Το επίπεδο κάθε ζώνης αποστέλλεται ως σήμα σε ένα αντίστοιχο φίλτρο περάσματος ζώνης. Το φίλτρο ρυθμίζεται στην ίδια συχνότητα που αναλύθηκε. Ένα ακόμη όργανο που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάλυση του λόγου είναι ο φασματογράφος ήχου, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά στα εργαστήρια τηλεφωνίας Bell Telephone περίπου το 1945. Αυτό το όργανο καταγράφει ένα χρονοδιάγραμμα συχνότητας-χρόνου για ένα σύντομο δείγμα ομιλίας στο οποίο το επίπεδο ήχου αντιπροσωπεύεται από τον βαθμό σκοτεινότητας σε ένα δισδιάστατο γράφημα χρονικής συχνότητας. [1]

#### 1.4.5 Υποβρύχια Ακουστική

Η χρήση του ήχου στο νερό για τη μετάδοση και λήψη πληροφοριών είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα. Μία από τις πρώιμες ανθρώπινες εφαρμογές του υποβρύχιου ήχου ήταν η εγκατάσταση βυθισμένων κουδουνιών στα σκαριά. Οι υποβρύχιοι ήχοι από αυτά τα κουδούνια θα μπορούσαν να ανιχνευτούν σε αποστάσεις μεγάλων αποστάσεων από υδρόφωνα που τοποθετούνταν στα σκαριά των πλοίων. Το 1912, ο Fessenden ανέπτυξε έναν ηλεκτροδυναμικό πομπό που επέτρεπε την υποβρύχια επικοινωνία μεταξύ πλοίων με τον κώδικα Morse. Η ασφάλεια της ωκεανικής πλοήγησης ενισχύθηκε με την εισαγωγή του βυθόμετρου, το οποίο καθόριζε το βάθος του νερού μετρώντας τον χρόνο που απαιτούν οι σύντομοι παλμοί ήχου για να ταξιδέψουν από τον πομπό στον πυθμένα του ωκεανού και να επιστρέψουν. Μία πολύ σημαντική εφαρμογή της υποβρυχίου ακουστικής, γνωστή ως S.O.N.A.R. (Sound Navigation And Ranging) ή «ηχοπλοήγηση» χρησίμευσε στην ανίχνευση, καταδίωξη και ταξινόμηση των υποβρυχίων. Αυτό απαιτούσε την ανάπτυξη αποδοτικής μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε υποβρύχιο ήχο, τη σχεδίαση συστημάτων ικανών να ανιχνεύουν ασθενή σήματα στην παρουσία θορύβου, και τη μελέτη των θεμελιωδών φαινομένων που επηρεάζουν τη μετάδοση ήχου στον ωκεανό. [4]

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Θεωρητικό Υπόβαθρο της Ακουστικής

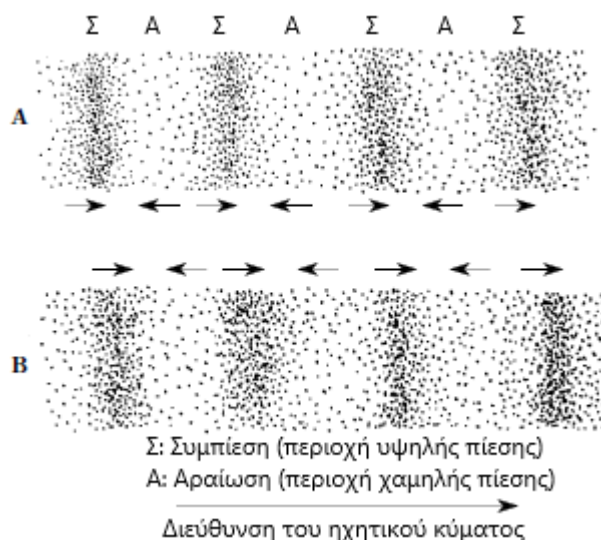
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζονται οι βασικές αρχές που περιγράφουν τον ήχο. Μέσω της συγκεκριμένης θεωρίας κατανοείται πως δημιουργείται ο ήχος αλλά και πως διαδίδεται σε διάφορα περιβάλλοντα. Το θεωρητικό αυτό πλαίσιο συνδέει την εφαρμογή των ακουστικών αρχών σε πρακτικές εφαρμογές που είναι σημαντικές για τον τομέα της ακουστικής.

### 2.1 Κατανόηση και Παραγωγή του Ήχου στον Αέρα

Ένας ήχος λέγεται ότι υπάρχει όταν μια διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσω ενός ελαστικού υλικού προκαλεί μια μεταβολή στην πίεση ή μια μετατόπιση των σωματιδίων του υλικού η οποία μπορεί να ανιχνευθεί από ένα άτομο ή από ένα όργανο. [5]

Οι μικρές κουκκίδες του σχήματος 1 αντιπροσωπεύουν μόρια αέρα. Τα μόρια που συνωστίζονται μεταξύ τους αντιπροσωπεύουν τις περιοχές συμπίεσης στις οποίες η πίεση του αέρα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την επικρατούσα ατμοσφαιρική πίεση. Οι αραιές περιοχές αναπαριστούν αραιώσεις όπου η πίεση είναι ελαφρώς μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Τα μικρά βέλη υποδεικνύουν ότι, κατά μέσο όρο, τα μόρια κινούνται προς τα δεξιά των κορυφών συμπίεσης και προς τα αριστερά στις περιοχές αραιωμάτων. Κάθε μόριο θα κινηθεί σε ορισμένη απόσταση προς τα δεξιά και στη συνέχεια θα διανύσει την ίδια απόσταση και προς τα αριστερά.

Τα μόρια του αέρα τείνουν να συσσωρεύονται εκεί όπου τα δύο βέλη δείχνουν το ένα προς το άλλο, και αυτό συμβαίνει λίγο δεξιότερα από κάθε συμπίεση. Όταν τα βέλη δείχνουν σε αντίθετες διευθύνσεις, η πυκνότητα των μορίων μειώνεται. Έτσι, η κίνηση των περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης δεξιότερα, εξηγεί τη διεύθυνση του κύματος προς τα δεξιά. [6]



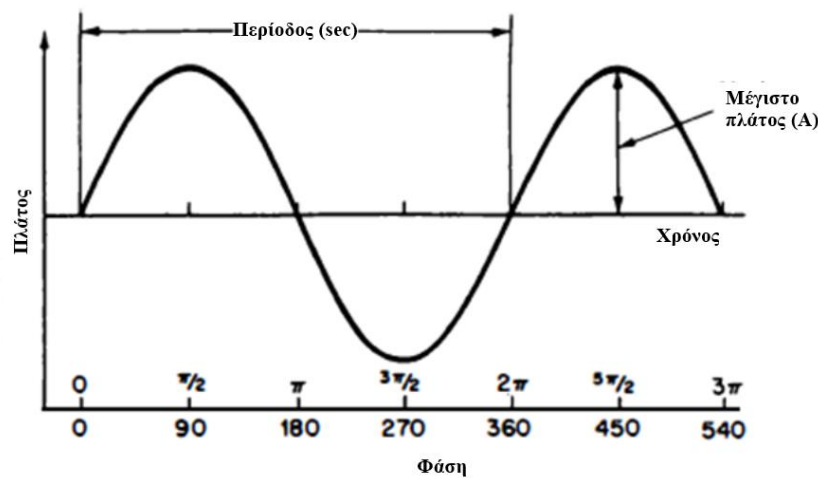
Σχήμα 1: Στο στιγμιότυπο (A) το κύμα προκαλεί τη συμπίεση των σωματιδίων του αέρα σε ορισμένες περιοχές και την αραιώση σε άλλες. Στο στιγμιότυπο (B) φαίνεται η μικρή μετακίνηση του κύματος προς τα δεξιά. [6]

### 2.2 Το Ημιτονοειδές Κύμα

Το ηχητικό κύμα γενικά εξασθενεί καθώς απομακρύνεται από την πηγή και μπορεί επίσης να υπόκειται σε ανακλάσεις και διαθλάσεις που προκαλούνται από τοίχους ή αντικείμενα στην πορεία του. Έτσι, η ηχητική «εικόνα» που φτάνει στο αυτί διαφέρει κάπως από εκείνη που αρχικά

δημιουργήθηκε. Ένας από τους απλούστερους τύπους ήχου είναι το ημιτονοειδές κύμα, το οποίο έχει την κυματομορφή (μεταβολή της πίεσης συναρτήσει του χρόνου) που παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Το κύμα αυτό είναι απλό τόσο από φυσική και μαθηματική άποψη όσο και από την άποψη του ακουστικού συστήματος. Τα ημιτονοειδή παράγουν ιδιαίτερα απλές αποκρίσεις στο ακουστικό σύστημα και έχουν έναν πολύ καθαρό ή «αγνό» ήχο.

Για να περιγραφεί ένα ημιτονοειδές κύμα, πρέπει να προσδιοριστούν τρία πράγματα: η συχνότητα, το πλάτος και η φάση. Η συχνότητα δείχνει πόσες φορές ανά δευτερόλεπτο επαναλαμβάνεται η κυματομορφή. Προσδιορίζεται σε Hertz, όπου 1 Hertz (Hz) είναι 1 κύκλος/sec. Το πλάτος εκφράζει τη μέγιστη μεταβολή ενός σημείου από το σημείο ισορροπίας του κατά τη διέλευση του κύματος. Η φάση αντιστοιχεί στο τμήμα του κύκλου μέσω του οποίου το κύμα έχει προχωρήσει σε σχέση με κάποιο σταθερό χρονικό σημείο. Η φάση μπορεί να μετρηθεί σε μοίρες ή σε ακτίνια. Ένας πλήρης κύκλος αντιστοιχεί σε 360° ή 2π ακτίνια. [7]



Σχήμα 2: Η κυματομορφή ενός ημιτονοειδούς κύματος. Το στιγμιαίο πλάτος δίνεται από την έκφραση  $A \sin(2\pi ft)$ , όπου  $t$  ο χρόνος,  $f$  η συχνότητα, και  $A$  το μέγιστο πλάτος. Η φάση υποδεικνύεται κατά μήκος του άξονα της φάσης, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το πρώτο σημείο διέλευσης μηδέν. [7]

### 2.3 Ταχύτητα του Ήχου

Η ταχύτητα διάδοσης ή η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη μάζα και την ελαστικότητα του μέσου. Η ελαστικότητα του αέρα προσδιορίζεται πειραματικά ως μια σταθερά πολλαπλασιασμένη επί την ατμοσφαιρική πίεση. Η σταθερά  $\gamma$  βρέθηκε ότι είναι ο λόγος της ειδικής θερμότητας του αέρα σε σταθερή πίεση προς την ειδική θερμότητα σε σταθερό όγκο. Ο λόγος αυτός είναι ίσος με 1,4 για το εύρος θερμοκρασιών που μελετάνε οι επιστήμονες. Η ταχύτητα του ήχου,  $c$ , στον αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{1,4 P_0}{\rho}} \quad (1)$$

Όπου  $P_0$  = ατμοσφαιρική πίεση και  
 $\rho$  = πυκνότητα του αέρα

Υποθέτοντας ότι ο αέρας ενεργεί ως ιδανικό αέριο, μπορεί να αποδειχθεί ότι η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται μόνο από την απόλυτη θερμοκρασία του αέρα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2)$$

Όπου  $t$  = θερμοκρασία του αέρα ( $C^\circ$ ) και

$c$  = ταχύτητα του ήχου ( $m \cdot s^{-1}$ )

Σε συνήθεις θερμοκρασίες δωματίου, η ταχύτητα του ήχου είναι περίπου 340m/s.

Το μήκος κύματος  $\lambda$ , είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων πίεσης ή μεταξύ διαδοχικών ελαχίστων πίεσης σε ένα επίπεδο κύμα. Μονάδα μέτρησής του είναι τα μέτρα (m). Η σχέση μεταξύ  $\lambda$ ,  $c$  και  $f$  είναι:

$$c = \lambda \cdot f \quad (3)$$

[8]

## 2.4 Τύποι Ηχητικών Κυμάτων

Στην ακουστική, η κατανόηση του είδους των ηχητικών κυμάτων αλλά και των χαρακτηριστικών τους είναι πολύ σημαντική για την περαιτέρω ανάλυση και βελτίωση της ηχητικής απόδοσης σε διάφορα περιβάλλοντα. Στις υποενότητες 2.4.1 και 2.4.2 εξετάζονται οι τύποι ηχητικών κυμάτων ανάλογα τον τρόπο διάδοσης και τη μορφή τους.

### 2.4.1 Ηχητικά Κύματα Ανάλογα με τον Τρόπο Διάδοσης

#### 2.4.1.1 Διαμήκη Ηχητικά Κύματα

Το ηχητικό κύμα κινείται προς τα έξω από το δονούμενο σώμα, αλλά τα μόρια δεν προχωρούν με το κύμα. Δονούνται γύρω από μια μέση θέση ηρεμίας. Οι δονήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος ενός άξονα που ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση προς την οποία διαδίδεται ο ήχος. Αυτή η μορφή κύματος είναι γνωστή ως «διάμηκες κύμα». [7]

#### 2.4.1.2 Εγκάρσια Ηχητικά Κύματα

Τα εγκάρσια κύματα είναι τα κύματα στα οποία η ταχύτητα διάδοσης, με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου, είναι κάθετες. [8]

### 2.4.2 Ηχητικά Κύματα Ανάλογα με τη Μορφή τους

#### 2.4.2.1 Επίπεδο Ηχητικό Κύμα

Είναι το ηχητικό κύμα του οποίου τα μέτωπα κύματος διαδίδονται παράλληλα προς την κατεύθυνση της διάδοσής του (π.χ. το ηχητικό κύμα που παράγεται από ένα έμβολο που ταλαντώνεται σε έναν μακρύ κύλινδρο). [9]

#### 2.4.2.2 Αποκλίνον Ηχητικό Κύμα

Ένα αποκλίνον ηχητικό κύμα είναι ένα κύμα όπου η ηχητική ενέργεια κατανέμεται σε μία όλο και μεγαλύτερη περιοχή καθώς το κύμα διαδίδεται μακριά από την ηχητική πηγή (δηλ. η ένταση του ήχου μειώνεται με την απόσταση από την πηγή). [9]

### 2.4.2.3 Σφαιρικό Ηχητικό Κύμα

Ένα σφαιρικό ηχητικό κύμα παράγεται από μια ηχητική πηγή η οποία εκπέμπει ηχητική ενέργεια εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις (π.χ. μια μονοπολική πηγή). [9]

### 2.4.2.4 Προοδευτικό Ηχητικό Κύμα

Όταν υπάρχει μεταφορά ενέργειας προς την κατεύθυνση διάδοσης του ηχητικού κύματος, το κύμα χαρακτηρίζεται ως προοδευτικό. [9]

### 2.4.2.5 Στάσιμο Ηχητικό Κύμα

Ένα στάσιμο κύμα παράγεται από την παρεμβολή δύο ή περισσότερων ηχητικών κυμάτων που δημιουργεί ένα μοτίβο μέγιστων και ελάχιστων τιμών πίεσης το οποίο είναι σταθερό με το χρόνο (π.χ. στάσιμα κύματα μπορούν να υπάρχουν σε σωλήνες, μουσικά όργανα και σε μεγαλύτερους όγκους, όπως τα δωμάτια). [9]

## 2.5 Μεγέθη Μέτρησης του Ήχου

Τα μεγέθη μέτρησης του ήχου στην ακουστική είναι κρίσιμα τόσο για την ποσοτικοποίηση όσο και για την ανάλυση των ηχητικών φαινομένων. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη μέτρησης του ήχου, όπως η ένταση του ήχου, η ηχητική ενέργεια και οι ηχητικές στάθμες.

### 2.5.1 Ένταση Ήχου

Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη κατεύθυνση είναι το πηλίκο της ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας.

Όταν ο ήχος διαδίδεται ελεύθερα στον χώρο, δεν υπάρχουν ανακλάσεις και άρα υπάρχει ελεύθερη διάδοση του ήχου. Στην περίπτωση που ο ήχος εκπέμπεται από κάποια πηγή σε συνθήκες ελεύθερης διάδοσης, το μέτρο της έντασης του ήχου σε κάποιο σημείο, όταν είναι γνωστή η πίεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (W/m^2) \quad (4)$$

Όπου  $\rho$  = πυκνότητα του αέρα σε ( $kg/m^3$ )

$p$  = πίεση σε (Pa)

$c$  = ταχύτητα του αέρα σε (m/s)

[8]

### 2.5.2 Ηχητική Ενέργεια

Η συνολική ακουστική ενέργεια που εκπέμπεται από μια πηγή σε ένα εύρος συχνοτήτων για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ολοκλήρωσης της ηχητικής έντασης πάνω σε μια υποθετική επιφάνεια που περιβάλλει την πηγή.

Η ισχύς που εκπέμπεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις είναι:

$$W = (4\pi r^2)I \quad (W) \quad (5)$$

Η κάθε πηγή ήχου εκπέμπει ηχητική ισχύ και δημιουργεί ακουστική πίεση στο αυτί. Το εύρος των ακουστικών πιέσεων που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος κυμαίνεται από  $10^{-12} W/m^2$  (κατώφλι ακουστικότητας) και  $5 \times 10^{-6} W/m^2$  (όριο μόνιμης βλάβης). [10]

### 2.5.3 Ηχητικές Στάθμες

Η στάθμη ηχητικής πίεσης ( $L_p$ ) είναι το δεκαπλάσιο του ηχητικού λογάριθμου του λόγου πιέσεων και μετριέται σε (dB).

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (6)$$

Όπου  $p$  = ηχητική πίεση

$$p_0 = \text{ηχητική πίεση αναφοράς} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$$

Η στάθμη ηχητικής έντασης ( $L_I$ ) μετριέται σε (dB) και δίνεται από τον τύπο:

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (7)$$

Όπου  $I$  = ηχητική ένταση

$$I_0 = \text{ένταση αναφοράς} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Η στάθμη ηχητικής ισχύος ( $L_W$ ) μετριέται σε (dB) και δίνεται από τον τύπο:

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (8)$$

Όπου  $W$  = ηχητική ισχύς

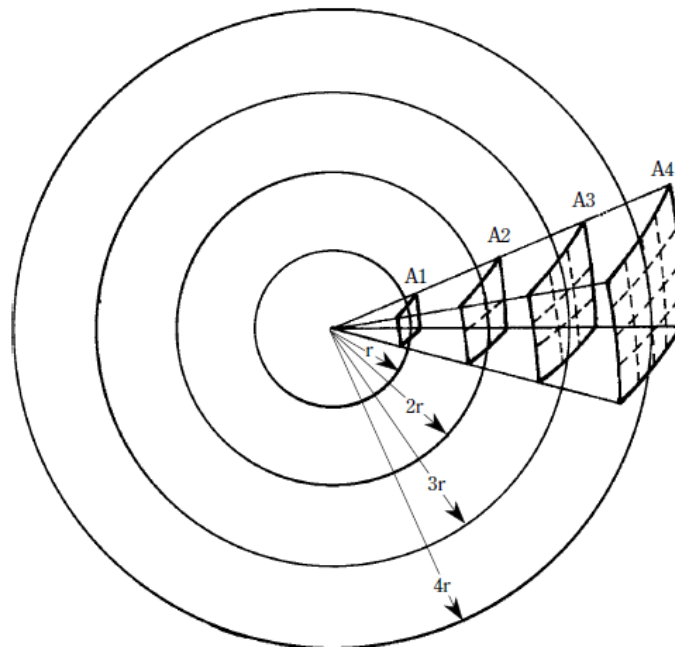
$$W_0 = \text{ισχύς αναφοράς} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

[10]

## 2.6 Ήχος στον Ελεύθερο Χώρο

Η ένταση του ήχου μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Στον ελεύθερο χώρο, μακριά από την επίδραση περιβαλλοντικών αντικειμένων, ο ήχος από μια πηγή σημείου διαδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ένταση του ήχου μειώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Ο ίδιος ήχος ισχύος ρέει μέσω των A1, A2, A3 και A4, αλλά οι επιφάνειες αυξάνονται με το τετράγωνο της ακτίνας,  $r$ . Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του ήχου ανά μονάδα επιφάνειας (ένταση) μειώνεται με το τετράγωνο της ακτίνας. Ο διπλασιασμός της απόστασης μειώνει την ένταση στο ένα τέταρτο της αρχικής τιμής, ο τριπλασιασμός της απόστασης παράγει 1/9, ενώ η αύξηση της απόστασης σε τέσσερις φορές παράγει 1/16 της αρχικής έντασης. Ο νόμος του τετραγώνου αντιστροφής ορίζει ότι η ένταση του ήχου σε ένα ελεύθερο πεδίο είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. [6]





Σχήμα 3: Κατά την εικονιζόμενη σταθερή γωνία, η ίδια ηχητική ενέργεια κατανέμεται σε σφαιρικές επιφάνειες αυξανόμενου εμβαδού καθώς αυξάνεται το  $r$ . Η ένταση του ήχου είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από τη σημειακή πηγή. [6]

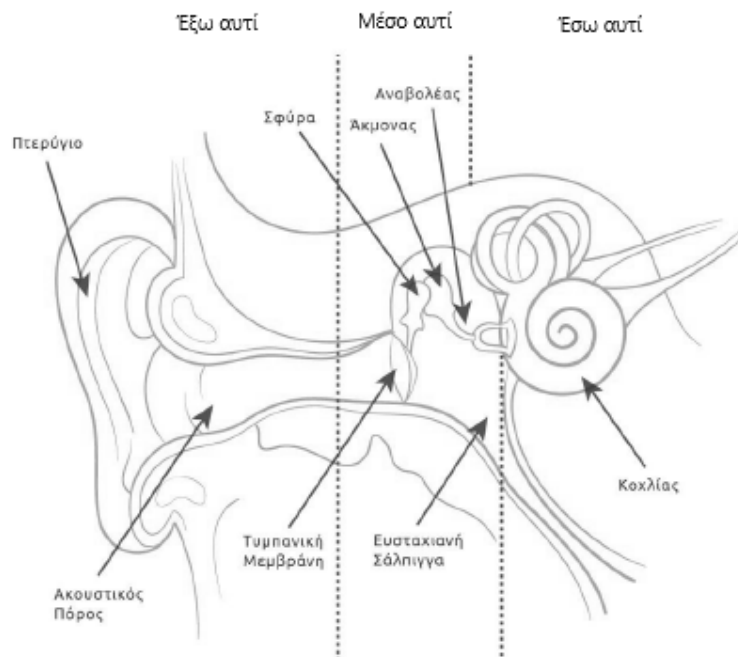
### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Ανθρώπινη Αντίληψη του Ήχου

Η μελέτη της δομής του αυτιού αποτελεί μελέτη της φυσιολογίας. Η μελέτη της ανθρώπινης αντίληψης του ήχου εμπίπτει στον γενικό τομέα της ψυχολογίας. Η ψυχοακουστική είναι ένας όρος που περιλαμβάνει τη φυσική δομή του αυτιού, τη διαδρομή του ήχου, την αντίληψη του ήχου και τις αμοιβαίες τους σχέσεις. Το ηχητικό κύμα που προσκρούει στο αυτί θέτει σε κίνηση μηχανικές κινήσεις που οδηγούν σε εκκρίσεις νευρώνων που φθάνουν στον εγκέφαλο και δημιουργούν αισθήσεις. [6]

Ένας νέος, υγιής άνθρωπος είναι ικανός να ακούει ήχους στο εύρος συχνοτήτων 20Hz-20kHz. Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να διακρίνει τη διαφορά μεταξύ ενός τόνου 1000Hz και ενός τόνου 1002Hz. Με φυσιολογική ακοή, ένας ήχος του 1kHz που μετατοπίζει το τύμπανο λιγότερο από 1Å (Angstrom), μπορεί να ανιχνευθεί. Το εύρος της έντασης του αυτιού εκτείνεται στα άκρα από το κατώφλι στο οποίο μπορούν να ανιχνευθούν οι πιο ήπιοι ήχοι έως το βουητό ενός μαχητικού αεροσκάφους που απογειώνεται. [11]

#### 3.1 Ανατομία του Αισθητήριου Οργάνου της Ακοής

Η ανατομία του αυτιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4, είναι οργανωμένη σε τρία μέρη, που ονομάζονται έξω αυτί, μέσο αυτί και έσω αυτί. Το εξωτερικό και το μέσο αυτί είναι γεμάτα αέρα, ενώ το εσωτερικό αυτί είναι γεμάτο υγρό.



Σχήμα 4: Η φυσιολογία του αυτιού. [12]

##### 3.1.1 Έξω αυτί

Η εξωτερική περιοχή περιλαμβάνει το πτερύγιο και έναν σωλήνα που ονομάζεται ακουστικός πόρος ή ακουστικό κανάλι. Το πτερύγιο συγκεντρώνει τα ηχητικά κύματα και βοηθά στην αντίληψη της κατεύθυνσης του ήχου. Το ακουστικό κανάλι, μήκους 2.7 εκατοστών, λειτουργεί ως ηχητικός σωλήνας κατευθύνοντας τα ηχητικά κύματα προς την τυμπανική μεμβράνη. [13]

### 3.1.2 Μέσο αυτί

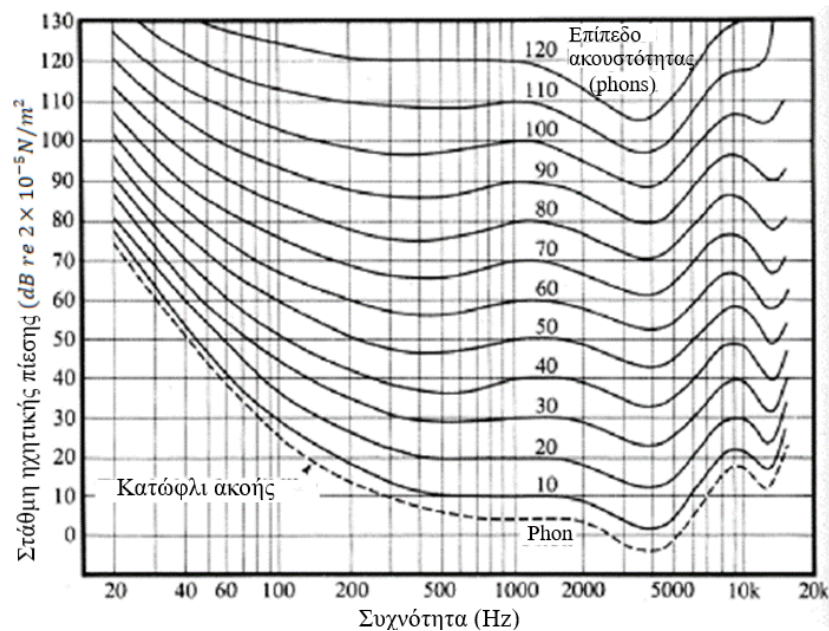
Το κάτω τοίχωμα της κοιλότητας περιέχει ένα άνοιγμα που ονομάζεται ευσταχιανή σάλπιγγα, η οποία συνδέει το μέσο αυτί με το φάρυγγα. Η ευσταχιανή σάλπιγγα λειτουργεί για να διατηρεί την ίδια μέση πίεση και στις δύο πλευρές του τυμπάνου. Η σάλπιγγα αυτή είναι συνήθως κλειστή, αλλά μπορεί να ανοίξει με το χασμουρητό ή την κατάποση κάθε φορά που η πίεση έξω από το τύμπανο μειώνεται ή αυξάνεται. Υπάρχουν τρία λεπτά οστά, τα οστάρια, που ονομάζονται σφύρα, άκμωνας και αναβολέας τα οποία μαζί σχηματίζουν το μοχλικό σύστημα. Το μοχλικό σύστημα περιορίζει το πλάτος των δονήσεων στο τύμπανο και ταυτόχρονα αυξάνει τη δύναμη των δονήσεων. Το γεγονός αυτό αυξάνει δραματικά την πίεση στην οβάλ θυρίδα ενώ περιορίζει τη μετατόπιση της για δεδομένο πλάτος δόνησης της τυμπανικής μεμβράνης. [12]

### 3.1.3 Έσω αυτί

Το εσωτερικό τμήμα του αυτιού αποτελείται από τον κοχλία και το ακουστικό νεύρο. Ο κοχλίας έχει σπειρωειδή μορφή με τρεις συνολικά περίπου στροφές, Ακόμη, χωρίζεται σε τρεις κοιλότητες από δύο μεμβράνες, την βασική και την μεμβράνη του Reissner. Από αυτές, ενεργό ρόλο στο μηχανισμό της ακοής έχει η βασική μεμβράνη. Ο κοχλίας είναι γεμάτος υγρό με σύσταση διαλυμένου NaCl με ιόντα  $K^+$ . Οι δονήσεις από τα οστά μεταφέρονται στον υγρό κοχλία και με τη σειρά τους δονούν την επιφάνεια της βασικής μεμβράνης. Εκεί υπάρχει το όργανο του Corti με περίπου 15000 εξωτερικά και 3500 εσωτερικά τριχίδια. Το κάθε τριχίδιο μέσω των 40 έως 140 μετατροπέων που υπάρχουν στη βάση του, μετατρέπει τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρικούς παλμούς και τα ακουστικά ερεθίσματα μεταφέρονται στο ακουστικό νεύρο με μια σειρά παλμών. [13]

## 3.2 Καμπύλες Ίσης Ακουστότητας

Γενικά γίνεται αντιληπτό πως η ευαισθησία του αυτιού μειώνεται στις πολύ χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας, που αρχικά προτάθηκαν από τους Fletcher-Munson και Robinson-Dadson, απεικονίζουν την ανθρώπινη αντίληψη της έντασης σε σχέση με τη συχνότητα. Η μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το phon. [13]

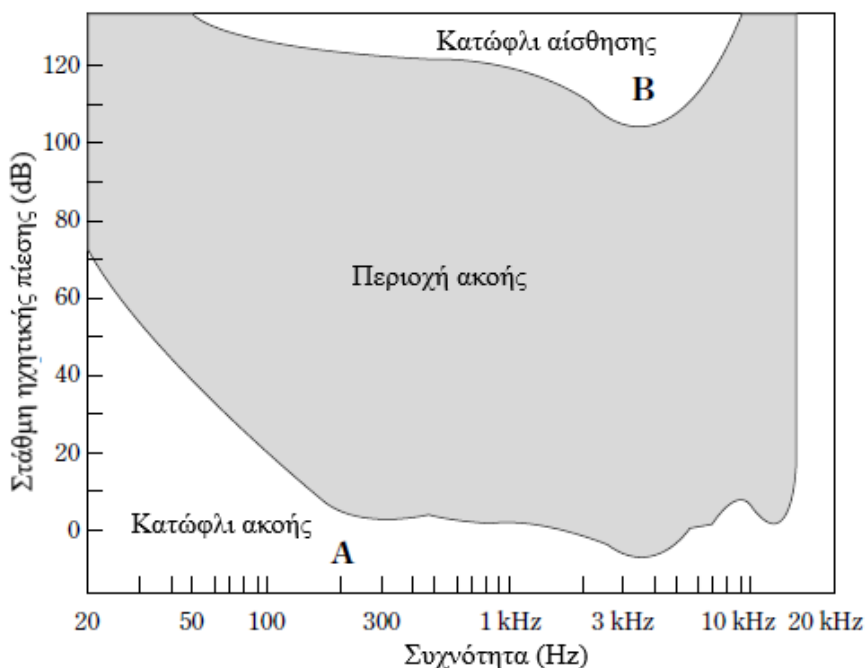


Σχήμα 5: Καμπύλες ίσης ακουστότητας. [12]

### 3.3 Περιοχή Ακουστότητας

Οι καμπύλες A και B του σχήματος 6 προέκυψαν από αξιολογήσεις εκπαιδευμένων ακροατών. Αυτοί οι ακροατές ήταν τοποθετημένοι απέναντι από την ηχητική πηγή και τους ανατέθηκε να προσδιορίσουν αν ένας τόνος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ήταν απλώς ακουστός (καμπύλη A) ή αν άρχιζε να γίνεται επώδυνος (καμπύλη B). Αυτές οι καμπύλες σηματοδοτούν τα άκρα της αντίληψής μας για την ένταση του ήχου.

Η καμπύλη A, γνωστή ως κατώφλι ακοής, αποκαλύπτει ότι τα ανθρώπινα αυτιά είναι πιο ευαίσθητα γύρω στα 3kHz. Σε αυτή την ευαίσθητη συχνότητα, ένα επίπεδο ηχητικής πίεσης 0dB μπορεί μόλις να ακουστεί από ένα άτομο με μέση ακουστική οξύτητα. Η καμπύλη B του σχήματος 6 αντιπροσωπεύει τη στάθμη σε κάθε συχνότητα στην οποία γίνεται αισθητή η αίσθηση γαργαλιτού στα αυτιά. Αυτό συμβαίνει σε μια ηχητική πίεση επιπέδου περίπου 120 ή 130dB. Περαιτέρω αύξηση της στάθμης έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της αίσθησης έως ότου δημιουργηθεί η αίσθηση του πόνου. Μεταξύ του κατωφλίου ακοής (καμπύλη A) και του κατωφλίου αίσθησης (καμπύλη B) βρίσκεται η περιοχή της ακουστότητας. Πρόκειται για μια περιοχή με δύο διαστάσεις: την κατακόρυφη διάσταση της στάθμης ηχητικής πίεσης και το οριζόντιο εύρος των συχνοτήτων που μπορεί να αντιληφθεί το αυτί. Όλοι οι ήχοι που βιώνει ο άνθρωπος πρέπει να είναι τέτοιας συχνότητας ώστε να εμπίπτουν σε αυτή την ακουστική περιοχή. [6]

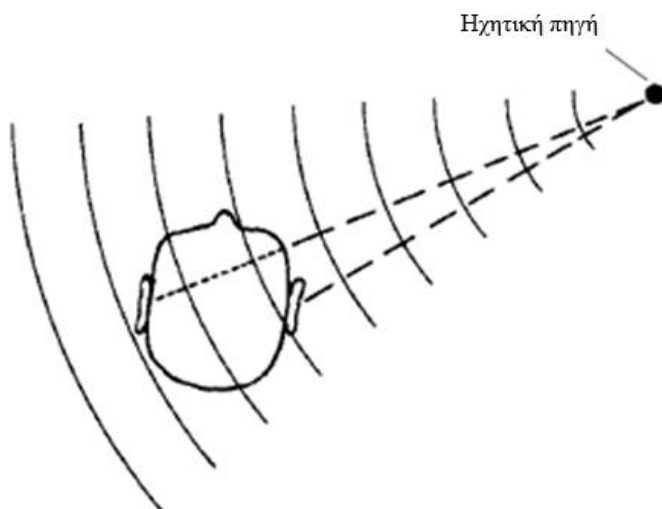


Σχήμα 6: Η ακουστική περιοχή του ανθρώπινου αυτιού. [6]

### 3.4 Διαισθητικός Εντοπισμός

Οι στερεοφωνικές εγγραφές και τα ηχητικά συστήματα αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη εξέλιξη. Αντίθετα, η στερεοφωνική ακοή υπάρχει τουλάχιστον όσο και ο άνθρωπος. Και τα δύο εστιάζουν στον εντοπισμό της πηγής του ήχου. Στις αρχές της ιστορίας, κάποιοι πίστευαν ότι να έχεις δύο αυτιά ήταν σαν να έχεις δύο πνεύμονες ή δύο νεφρά, δηλαδή αν κάτι πήγαινε στραβά με το ένα, το άλλο θα μπορούσε ακόμα να λειτουργήσει. Ο Rayleigh έδειξε ότι αυτή η ιδέα δεν ίσχυε με ένα απλό πείραμα στο πανεπιστήμιο του Cambridge. Βρισκόμενος στη μέση ενός κύκλου βοηθών που

μιλούσαν, ο Rayleigh, με κλειστά τα μάτια, εντόπισε την πηγή του ήχου με μεγάλη ακρίβεια, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι τα δύο αυτιά λειτουργούν μαζί στον εντοπισμό του ήχου. Οι δύο παράγοντες που εμπλέκονται είναι η διαφορά στην ένταση και η διαφορά στο χρόνο άφιξης (φάση) του ήχου που πέφτει στα δύο αυτιά. Στο σχήμα 7, το δεξί αυτί που βρίσκεται πλησιέστερα στην πηγή δέχεται μεγαλύτερη ένταση από ό,τι το μακρινότερο αριστερό αυτί, επειδή το σκληρό κρανίο ρίχνει μια «ηχητική σκιά». Λόγω της διαφοράς της απόστασης από τη πηγή, το μακρινό αυτί λαμβάνει τον ήχο κάπως αργότερα από το κοντινό αυτί. Μια άλλη μέθοδος αντίληψης της κατεύθυνσης συμβαίνει σε ένα σχετικά μικρό δωμάτιο. Ο ήχος φτάνει στο άτομο μέσω μιας άμεσης διαδρομής που ακολουθείται από πολλές ανακλάσεις από πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Ο ήχος που φτάνει πρώτος δημιουργεί στον ακροατή την κύρια αντίληψη της κατεύθυνσης. Αυτό έχει ονομαστεί ως νόμος του πρώτου μετώπου κύματος. [6]

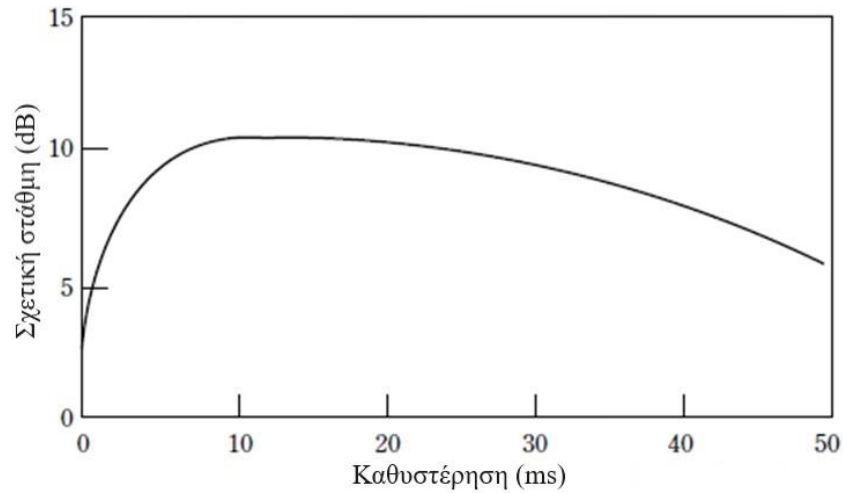


Σχήμα 7: Η διαισθητική αίσθηση κατεύθυνσης εξαρτάται εν μέρει από τη διαφορά στην ένταση και τη φάση του ήχου που πέφτει στα δύο αυτιά. [6]

### 3.5 Φαινόμενο Haas

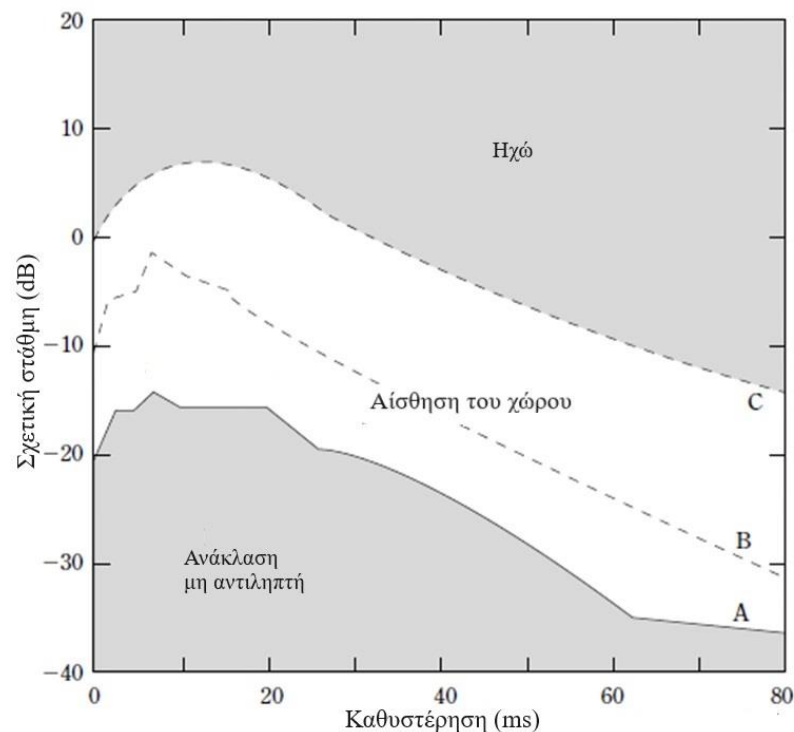
Σε μια κατάσταση ακροατηρίου, το αυτί και ο εγκέφαλος έχουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να συγκεντρώνουν τις ανακλάσεις που φτάνουν σε απόσταση περίπου 50msec μετά τον άμεσο ήχο και να τις συνδυάζουν για να δώσουν την εντύπωση ότι ο ήχος προέρχεται από την κατεύθυνση τις αρχικής πηγής, ακόμη και αν υπάρχουν ανακλάσεις από τις κατευθύνσεις. Η ηχητική ενέργεια που ενσωματώνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου δίνει μια εντύπωση προστιθέμενης έντασης. Η ακοή λειτουργεί καλύτερα κατά τα πρώτα 20 έως 30msec ενώ πέρα από τα 50 έως 80msec κυριαρχεί η ανάκλαση, γνωστή ως ηχώ.

Ο Haas τοποθέτησε τις παρατηρητές σε απόσταση 3 μέτρων από δύο μεγάφωνα τοποθετημένα έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία 45 μοιρών, τη γραμμή συμμετρίας του παρατηρητή που διαιρεί αυτή τη γωνία. Σε σχεδόν ανηχοϊκές συνθήκες, οι παρατηρητές καλούνταν να ρυθμίσουν έναν εξασθενητή μέχρι ο ήχος από το «άμεσο» μεγάφωνο να είναι ίσος με εκείνον του «καθυστερημένου» μεγάφωνου. Στη συνέχεια προχώρησε στη μελέτη των αποτελεσμάτων της μεταβολής της καθυστέρησης. Ο Haas όπως φαίνεται στο σχήμα 8 διαπίστωσε ότι στην καθυστέρηση 5 έως 35 msec ο ήχος από το ηχείο με καθυστέρηση πρέπει να αυξηθεί περισσότερο από 10dB σε σχέση με τον άμεσο πριν ακουστεί σαν ηχώ. Αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο προτεραιότητας ή φαινόμενο Haas. [6]



Σχήμα 8: Το φαινόμενο Haas στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. [6]

Στο σχήμα 9 παρατηρείται η επίδραση των ανακλάσεων από τις πλευρικές επιφάνειες μιας αίθουσας στην αντίληψη του ανακλώμενου ήχου. Η καμπύλη A αντιστοιχεί στο όριο κάτω από το οποίο οι ανακλάσεις δεν είναι αντιληπτές. Καθώς η στάθμη των ανακλάσεων αυξάνεται, η ανάκλαση παραμένει μη αντιληπτή, αλλά δημιουργείται μια ευχάριστη αίσθηση του χώρου. Η καμπύλη B αποτελεί το μέσο όρο μεταξύ των καμπυλών A και C. Όταν η στάθμη του ανακλώμενου ήχου υπερβαίνει την καμπύλη C, τότε η ανάκλαση γίνεται αντιληπτή ως ηχώ. [13]



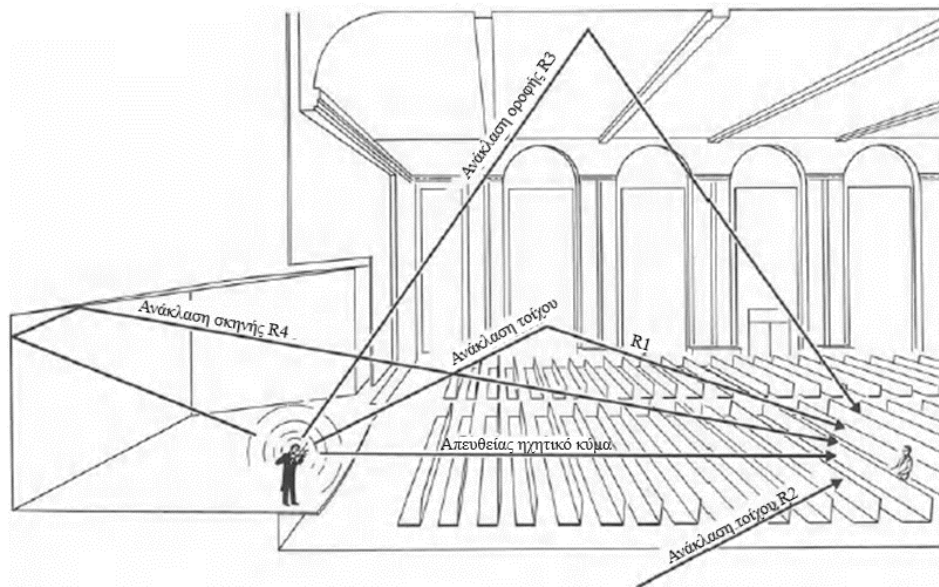
Σχήμα 9: Οι επιδράσεις των πλευρικών ανακλάσεων στην αντίληψη του απευθείας ήχου. [13]

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Θεωρητικό Υπόβαθρο Ακουστικής Κλειστών Χώρων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένες βασικές έννοιες της ακουστικής των κλειστών χώρων. Μέσω αυτών των εννοιών που αναλύονται μπορεί να γίνει κατανοητό το πώς διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την ακουστική εμπειρία ενός χώρου και τότε θεωρούμε πως ένας χώρος έχει «καλή» ή «κακή» ακουστική. Ακόμη με τη μελέτη αυτών των παραμέτρων μπορούν να διατυπωθούν συστάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής ποιότητας.

### 4.1 Αντήηση (Reverberation)

Η αντήηση, είναι η συνέχιση ενός μουσικού ήχου σε μια αίθουσα μετά την παύση του οργάνου που τον παρήγαγε. Αυτός ο «εκ των υστέρων ήχος» εξασθενεί καθώς ταξιδεύει προς τα έξω. Για παράδειγμα καθώς ένας βιολιστής στη σκηνή σε μια αίθουσα συναυλιών που παίζει μια νότα, το ακουστικό κύμα που ακτινοβολείται προς τα έξω από το βιολί προς κάθε κατεύθυνση, συναντά τις γύρω επιφάνειες - τοίχους, την οροφή και την περιοχή του ακροατηρίου. Ένας ακροατής, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, ακούει πρώτα το άμεσο ηχητικό κύμα, ακολουθούμενο, μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα, από μια διαδοχή "πρώτων" ανακλάσεων (που στο σχήμα 10 χαρακτηρίζονται ως R1 R2, R3 , κ.λπ.). Αυτές οι πρώτες ανακλάσεις συνεχίζουν να συναντούν περισσότερες επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας του ακροατηρίου. Σε ένα δευτερόλεπτο, στην πραγματικότητα, επειδή ο ήχος ταξιδεύει τόσο γρήγορα, η μια νότα από το βιολί μπορεί να προσκρούσει και να ανακλαστεί από τις επιφάνειες ενός δωματίου περίπου 20 φορές. Φυσικά, ο ήχος χάνει κάποια ενέργεια σε κάθε συνάντηση, ιδιαίτερα στην περιοχή του ακροατηρίου, έτσι ώστε αυτό που ακούει ο ακροατής να μειώνεται σταδιακά. [14]



Σχήμα 10: Μια απεικόνιση των διαδρομών που διανύει ο ήχος από τον βιολιστή στον ακροατή, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου ήχου και των τεσσάρων πρώτων ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. [14]

## 4.2 Χρόνος Αντήλησης ( $RT_{60}$ )

Είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος για την περιγραφή των ακουστικών ιδιοτήτων ενός χώρου. Ο χρόνος αντήλησης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου ( $L_p$ ) σε κάποιο σημείο ενός δωματίου να μειωθεί κατά 60dB μετά την απενεργοποίηση της ηχητικής πηγής. Δεδομένου ότι τα δωμάτια σπάνια έχουν ιδανικά διάχυτο ηχητικό πεδίο, ο χρόνος αντήλησης θα είναι διαφορετικός σε διαφορετικές θέσεις στο δωμάτιο. [15]

Ο χρόνος αντήλησης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο Norris-Eyring:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{A} \quad (9)$$

Όπου  $A$  είναι η ολική απορρόφηση και ισούται με:

$$A = S \ln \frac{1}{1 - \bar{a}} \quad (10)$$

Και  $\bar{a}$  είναι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης και ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{a} = \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots + a_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n} \quad (11)$$

Όπου  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$  το εμβαδόν κάθε επί μέρους επιφάνειας και  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Ακόμη, εάν ο συντελεστής απορρόφησης είναι μικρός  $a < 0.1$ , ο χρόνος αντήλησης ορίζεται από τη προσεγγιστική σχέση του Sabine:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\bar{a}S} = \frac{0.161V}{A} \quad (12)$$

Όπου  $A$  η συνολική απορρόφηση δωματίου σε  $m^2$ .

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots + a_n S_n \quad (13)$$

[12]

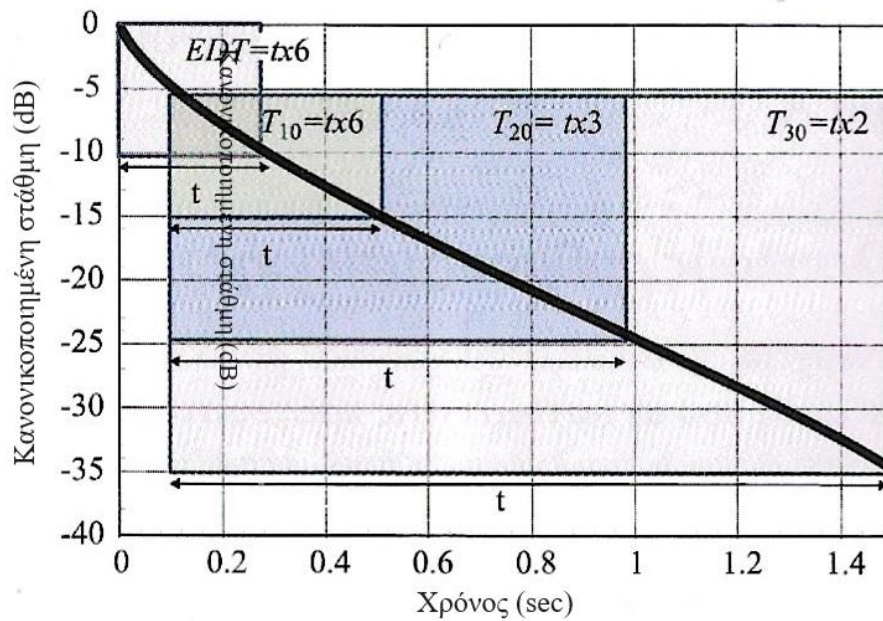
## 4.3 Χρόνοι EDT, $T_{10}, T_{20}, T_{30}$

Ο πρώτος χρόνος αντήλησης EDT, αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του ήχου, οι οποίες έχουν καθοριστικό ρόλο στην ακουστική του χώρου. Ο χρόνος EDT ορίζεται ως έξι φορές η χρονική περίοδος που απαιτείται έτσι ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά 10dB, αφού μηδενιστεί η πηγή. Ο EDT συνήθως είναι μικρότερος από τον  $T_{60}$ .

Ο χρόνος  $T_{30}$  ορίζεται ως δύο φορές ο χρόνος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί -5 έως -35dB μετά τον μηδενισμό της πηγής. Ανάλογα ορίζονται και οι χρόνοι  $T_{20}$  και  $T_{10}$ . Ο χρόνος  $T_{10}$  είναι τρεις φορές ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση του ήχου από -5 έως -25dB και αντίστοιχα ο χρόνος  $T_{10}$  ορίζεται ως έξι φορές ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί ο ήχος από -5 έως -15dB. [8]



Υπολογισμός χρόνων EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$



Σχήμα 11: Υπολογισμός χρόνων EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ . [8]

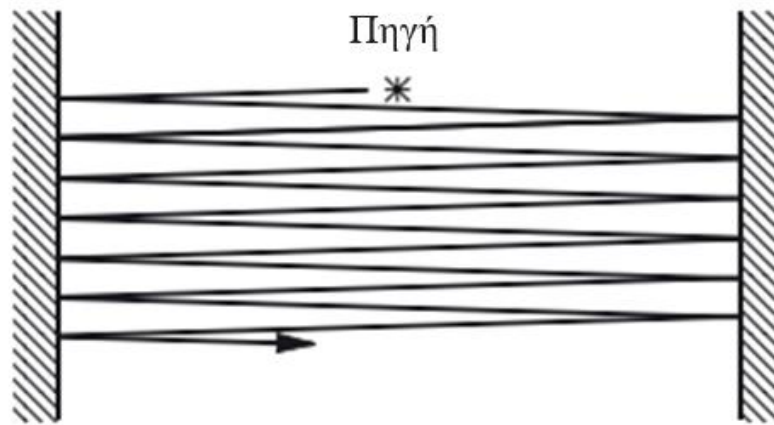
#### 4.4 Ηχώ (Echo)

Αν μια ανάκλαση ενός ήχου μπορεί να ακουστεί ως ξεχωριστό ηχητικό γεγονός, δηλαδή ως επανάληψη του αρχικού ηχητικού σήματος τότε το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ηχώ. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν η ανάκλαση καθυστερεί από τον απευθείας ήχο τουλάχιστον 100ms. Η ηχώ μπορεί να δημιουργήσει μια δυσάρεστη εμπειρία σε μια αίθουσα συναυλιών ή σε μια αίθουσα διαλέξεων καθώς αποσπά την προσοχή των ακροατών. Σε σοβαρές περιπτώσεις μια ηχώ μπορεί να μειώσει σοβαρά την απόλαυση μουσικής ή την καταληπτότητα της ομιλίας, αφού οι ήχοι/συλλαβές της ομιλίας αναμειγνύονται και το κείμενο μπερδεύεται. Ηχώ μπορεί να δημιουργηθεί από επιφάνειες οροφών που είναι πολύ ψηλές ή που επικεντρώνουν τον ήχο σε μια περιοχή της αίθουσας. Ακόμη, ηχώ ενδέχεται να προκύψει από έναν μακρύ, ψηλό, καμπυλωτό πίσω τοίχο του οποίου το κεντρικό σημείο βρίσκεται κοντά στο μπροστινό μέρος του ακροατηρίου ή στη σκηνή. Η ηχώ είναι πιο ενοχλητική σε αίθουσες με μικρούς χρόνους αντήχησης. [14],[16]

#### 4.5 Πολλαπλή Ηχώ (Flutter Echo)

Ενώ η ηχώ περιλαμβάνει μεγάλες καθυστερήσεις και μεγάλη διαδρομή, η πολλαπλή ηχώ συνήθως περιλαμβάνει μικρή απόσταση διαδρομής αλλά επαναλαμβάνεται πολλές φορές. Μια κοινή πολλαπλή ηχώ εμφανίζεται μεταξύ δύο παράλληλων τοίχων όπως φαίνεται στο σχήμα 12. Οι επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις δημιουργούν ένα χαρακτηριστικό «χτύπημα», το οποίο παρατηρείται χτυπώντας τα χέρια σε διαδρόμους ή σε δωμάτια με επίπεδους παράλληλους τοίχους. Στα αμφιθέατρα, το προφανές μέλημα είναι ότι οι μουσικοί δεν πρέπει να βρίσκονται ανάμεσα σε δύο παράλληλες επιφάνειες. Αλλά ακόμη και με παράλληλους τοίχους σκηνής, οι πολλαπλές αντηχήσεις είναι πιθανό να ακουστούν μόνο όταν βρίσκονται λίγοι μουσικοί στη σκηνή. Η πολλαπλή ηχώ είναι ένα από τα λίγα ακουστικά προβλήματα που διορθώνονται σχετικά εύκολα.

Αναπροσανατολισμός μιας από τις παράλληλες επιφάνειες μόνο κατά 5° είναι επαρκής για να το διορθώσει, όπως επίσης και η μέτρια εφαρμογή απορρόφησης ή διάχυσης. [17]



Σχήμα 12: Πολλαπλή ηχώ μεταξύ παράλληλων τοίχων. [17]

#### 4.6 Ευκρίνεια (Clarity)

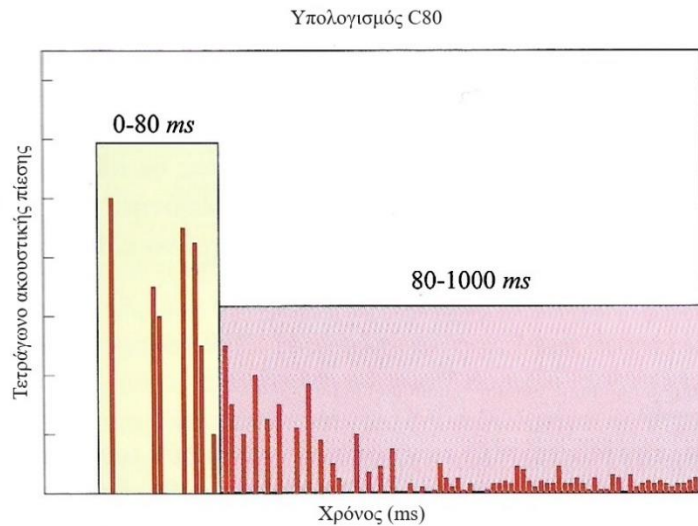
Αν η αντήχηση είναι η επικάλυψη ή η ανάμειξη διαδοχικών συλλαβών και μουσικών νοτών, ο όρος της «ευκρίνειας» είναι το αντίθετο της αντήχησης, δηλαδή η διαφοροποίηση κάθε συλλαβής και μουσικής νότας. Η ευκρίνεια και η αντήχηση συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό (αντιστρόφως ανάλογα), οπότε οι χώροι με υψηλή αντήχηση υποφέρουν από απώλεια ευκρίνειας, και τα δωμάτια με χαμηλό χρόνο αντήχησης διαθέτουν πλούσια ευκρίνεια. [18]

Η ευκρίνεια είναι ένα μέσο που συγκρίνει την ενέργεια στο αρχικό τμήμα της κρουστικής απόκρισης με το καθυστερημένο τμήμα της κρουστικής απόκρισης, χρησιμοποιώντας το χρονικό όριο των 80ms που χρησιμοποιείται για τη μουσική και το χρονικό όριο των 50ms που χρησιμοποιείται για ομιλία. Η διαφορά στο χρονικό όριο μεταξύ των δύο σημάτων οφείλεται στο γεγονός ότι οι ανακλάσεις της μουσικής είναι λιγότερο ανιχνεύσιμες από τις ανακλάσεις της ομιλίας. Η ευκρίνεια  $C_{80}$  και  $C_{50}$  βασίζεται στην παράμετρο Klarheitmass του Reichardt και δίνεται από τη σχέση:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{80ms} [g(t)]^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right\} dB \quad (14)$$

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt}{\int_{50ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right\} dB \quad (15)$$

Όπου η  $g(t)$  είναι η κρουστική απόκριση του χώρου. [15]



Σχήμα 13: Υπολογισμός ευκρίνειας από την κρουστική απόκριση του χώρου. [8]

#### 4.7 Διακριτότητα (Definition)

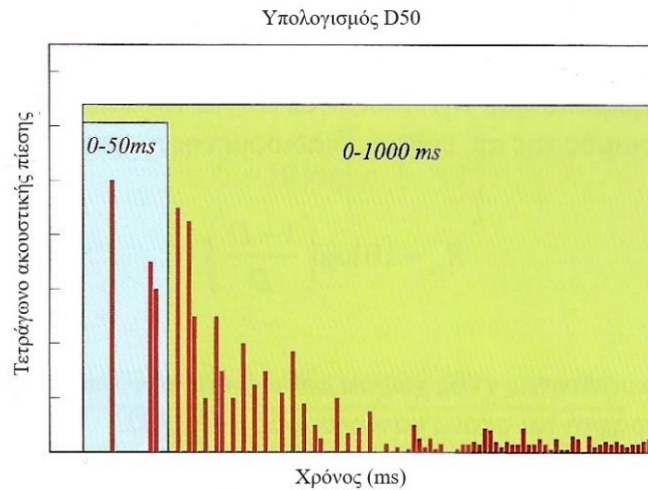
Από το 1850 είναι γνωστό ότι οι ανακλάσεις είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ακουστική ενός χώρου. Η ακουστική παράμετρος  $D_{50}$  είναι ένας πρώτος συντελεστής που επιτρέπει την αξιολόγηση της καταληπτότητας της ομιλίας. Συνδέεται στενά με τις ανακλάσεις του ήχου στο χώρο, ιδίως για τις πρώτες ανακλάσεις. Ακούμε χιλιάδες ανακλάσεις μαζί με τον απευθείας ήχο, αλλά μόνο αυτές που φτάνουν με χρονική καθυστέρηση έως 50ms έχουν νόημα για την ομιλία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτές οι συγκεκριμένες ανακλάσεις συμβάλλουν στον καθορισμό του ακουστικού «χαρακτήρα» του χώρου (τους τρόπους με τους οποίους οι διάφοροι χώροι έχουν ξεχωριστούς ήχους) και ενισχύουν τον απευθείας ήχο. Επομένως, η σημασία τους είναι αξιοσημείωτη.

Ο Thiele στην προσπάθειά του να δημιουργήσει ένα αντικειμενικό, μετρήσιμο κριτήριο, ήταν ο πρώτος που υιοθέτησε τον όρο D (Definition). Η εξίσωση που ορίζει τον όρο D είναι:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} 100\% \quad (16)$$

[19]

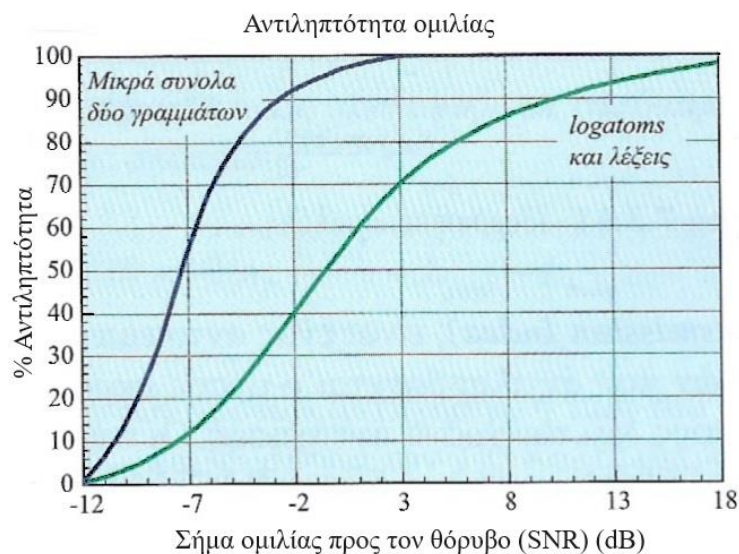
Και τα δύο ολοκληρώματα πρέπει να περιλαμβάνουν τον άμεσο ήχο. Προφανώς, το D θα είναι 100% αν η κρουστική απόκριση δεν περιέχει συνιστώσες με καθυστερήσεις που υπερβαίνουν τα 50ms, για παράδειγμα για τη μετάδοση ήχου σε εξωτερικούς χώρους. [16]



Σχήμα 14: Κρουστική απόκριση χώρου διάρκειας 1000ms. Στο σχήμα απεικονίζονται τα τμήματα της κρουστικής απόκρισης τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διακριτότητας. [8]

#### 4.8 Αντιληπτότητα των Συλλαβών (Syllable Intelligibility)

Η ποιότητα της ομιλίας εκφράζεται από αυτή την ποσότητα. Το ποσοστό (%) του συνολικού αριθμού συλλαβών που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας τυπικής συνομιλίας και γίνονται αντιληπτές από έναν μέσο ακροατή είναι γνωστό ως αντιληπτότητα ομιλίας, σύμφωνα με τους προηγούμενους κανονισμούς. Όταν το ποσοστό είναι τουλάχιστον 95%, η πληροφορία θεωρείται ικανοποιητική. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η αντίληψη επηρεάζεται κυρίως από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και τον χρόνο αντήχησης του χώρου ( $T_{60}$ ). Το σήμα ομιλίας θεωρείται ως το σήμα σε αυτή την περίπτωση. Ο τρόπος μέτρησης της αντιληπτότητας πραγματοποιείται με μια σειρά από μη λογικές συλλαβές που απελευθερώνονται στο περιβάλλον δοκιμής. Οι ακροατές καλούνται να γράψουν τι άκουσαν αφού τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις. Το μέτρο της αντιληπτότητας των συλλαβών είναι το ποσοστό των συλλαβών που έγιναν σωστά αντιληπτές. [8]



Σχήμα 15: Σχέση (%) αντιληπτότητας σε σχέση με τον λόγο (SNR). [8]

#### 4.9 Απόλεια Συμφώνων (AL) (Articulation Loss)

Οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της παραμόρφωσης και του σχετικού ποσοστού μείωσης στην καταληπτότητα της ομιλίας από την αντήχηση μέσω της επί τοις εκατό απώλεια κατανόησης συμφώνων %  $AL_{cons}$ .

$$\% AL_{cons} = \frac{200r^2RT_{60}^2(n+1)}{V \cdot Q}, r > 3D_c \quad (17)$$

Όπου:

- $r$  η απόσταση πηγής/δέκτη σε m,  $D_c$  η κρίσιμη απόσταση και ορίζεται από τη σχέση  $D_c = \sqrt{\frac{RQ}{16\pi}} = 0,14\sqrt{RQ}$ ,  $V$  ο όγκος του χώρου σε  $m^2$ ,  $RT_{60}$  ο χρόνος αντήχησης του χώρου σε sec,  $Q$  η κατευθυντικότητα της πηγής και  $(n+1)$  ο αριθμός όμοιων πηγών αν αυτές λειτουργούν ταυτόχρονα, πάνω από τη μία πηγή (π.χ. ένας ομιλητής ή ηχείο  $\rightarrow n = 0$ ).
- Οι πιο πάνω σχέσεις ισχύουν για  $SNR > 25$  dB.
- Αν  $\% AL_{cons} < 10\%$  συνήθως δεν υπάρχει πρόβλημα στην κατανόηση του μηνύματος.
- Αν  $\% AL_{cons} > 15\%$  το μήνυμα δεν είναι αντιληπτό.

Επομένως θεωρώντας την τιμή  $\% AL_{cons} = 15\%$ , σαν οριακή τιμή απώλειας κατανόησης, μπορούν να προσδιοριστούν οι παράμετροι, οι οποίες για έναν χώρο επιτρέπουν την  $\% AL_{cons}$  να πάρει την τιμή αυτή. Άρα έχουμε:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{15VQ}{200RT_{60}^2(n+1)}} \quad (18)$$

$$Q_{min} = \frac{200r^2RT_{60}^2(n+1)}{15V} \quad (19)$$

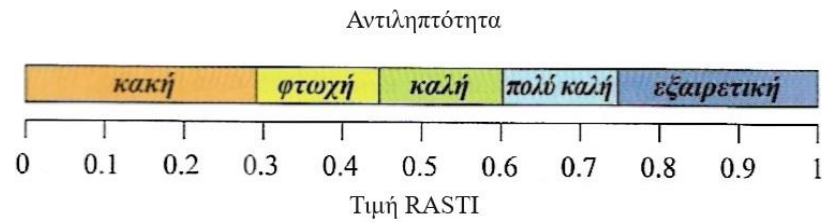
$$RT_{max} = \sqrt{\frac{15VQ}{200r^2(n+1)}} \quad (20)$$

$$V_{min} = \frac{200r^2RT_{60}^2(n+1)}{15Q} \quad (21)$$

[12]

#### 4.10 Δείκτης STI-RASTI

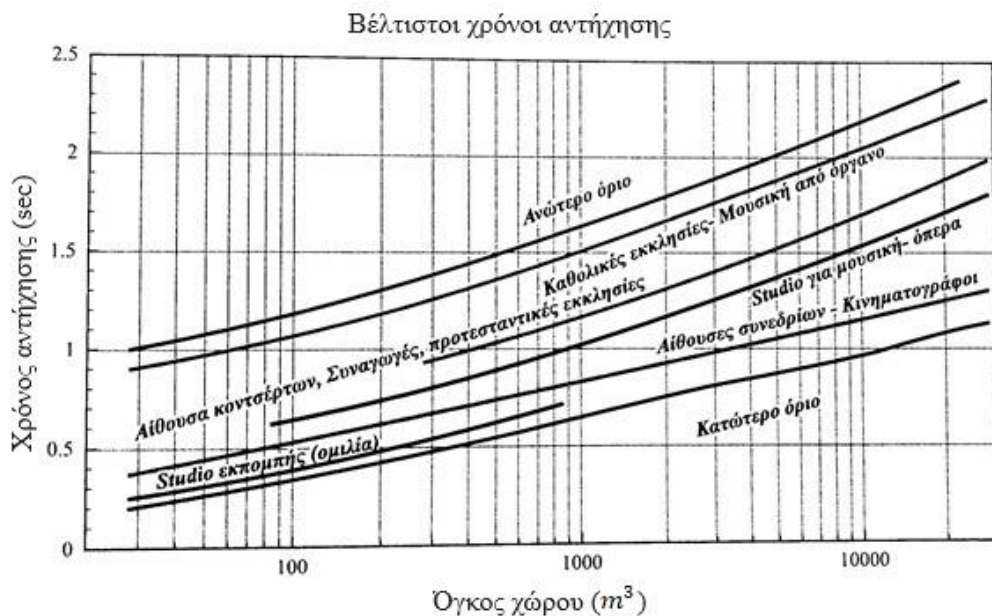
Λαμβάνοντας υπόψη τόσο το θόρυβο βάθους όσο και το χρόνο αντήχησης, ο δείκτης STI (Speech Transmission Index) είναι ένας αντικειμενικός δείκτης που υπολογίζει το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής. Εφαρμόζεται συχνά στην αξιολόγηση της ομιλίας και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 χωρίς μονάδες μέτρησης. [8]



Σχήμα 16: Ποιότητα ομιλίας. [8]

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Ακουστική Μελέτη Χώρου Πολλαπλών Χρήσεων

Η χρήση αιθουσών για περισσότερους από έναν σκοπούς απασχόλησε στο παρελθόν πολλούς αρχιτέκτονες όπως για παράδειγμα το Redoutensaal της Βιέννης, της κλασικής ορθογώνιας αίθουσα συναυλιών που αναπτύχθηκε μέσα στην αίθουσα χορού. Επίπεδες διαρρυθμίσεις δαπέδου για χορούς υπήρχαν επίσης σε θέατρα, όπως στην Όπερα των Βερσαλλιών στη Γαλλία το 1770 και στο θέατρο Covent Garden το 1809. Ωστόσο, ο συνειδητός σχεδιασμός των αιθουσών για να φιλοξενεί περισσότερους από έναν ακουστικούς τύπους παραστάσεων είναι σχετικά πρόσφατος. Αυτό συμβαίνει όλο και πιο συχνά για οικονομικούς λόγους διότι τα αμφιθέατρα που προορίζονται σε μία μόνο χρήση είναι συχνά μη ρεαλιστικά εάν δεν πρόκειται να βρίσκονται σε μεγάλα αστικά κέντρα. Έτσι η ευελιξία της χρήσης τους γίνεται πλέον κανονισμός. Η ενσωμάτωση μιας επέκτασης της σκηνης που ενώνεται ομαλά με ένα χώρο ορχήστρας, διευκολύνει τη συμμετοχή ορχηστρικών παραστάσεων στον ήδη υπάρχοντα χώρο. Όλα αυτά τα στοιχεία τα οποία συμβάλλουν στην αξιοποίηση του χώρου για διάφορες χρήσεις είναι πλέον δεδομένα αλλά δεν βοηθούν σημαντικά στην αλλαγή της ακουστικής. [17]



Σχήμα 17: Βέλτιστος χρόνος αντήχησης βάση του όγκου του χώρου και το είδος των ηχητικών δραστηριοτήτων. [8]

### 5.1 Περιγραφή του Χώρου Μελέτης

Το “Χατζηγιάννιο” Πνευματικό Κέντρο του Δήμου Λαρισαίων βρίσκεται στο κέντρο της πόλης της Λάρισας και αποτελεί έναν εντυπωσιακό πολυχώρο που χρησιμοποιείται καθημερινά για διάφορες πολιτιστικές εκδηλώσεις όπως θεατρικές και μουσικές παραστάσεις, εκθέσεις τέχνης και διαλέξεις. Ακόμη λειτουργεί ως χώρος συνάντησης πολιτιστικών οργανισμών και εκπαιδευτικών ιδρυμάτων. Μεταξύ της ύπαρξης βιβλιοθηκών, του τμήματος αθλητισμού, τις σχολικές επιτροπές και την αίθουσα τεχνών «ΤΑΚΗΣ ΤΛΟΥΠΑΣ» υπάρχει στο χώρο του ισογείου το αμφιθέατρο πολλαπλών χρήσεων χωρητικότητας 220 θέσεων. [20]



Εικόνα 1: Αμφιθέατρο Χατζηγιάννειου Πνευματικού Κέντρου Λάρισας – Φωτογραφία με όψη προς τη σκηνή.



Εικόνα 2: Αμφιθέατρο Χατζηγιάννειου Πνευματικού Κέντρου Λάρισας – Φωτογραφία με όψη προς το ακροατήριο.



Για την ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου έπρεπε να δοθεί άδεια πρόσβασης από την αρμόδια υπηρεσία και σε σύντομο χρονικό διάστημα ξεκίνησε η αποτύπωση του υπό μελέτη χώρου δεδομένου ότι δεν δόθηκαν σχέδια. Αρχικά, με τη χρήση του μετρητή αποστάσεων laser «Hilti PD 40» και ενός τυπικού μέτρου 5 μέτρων πάρθηκαν όλες οι μετρήσεις για την εκ νέου δημιουργία των αρχιτεκτονικών σχεδίων του χώρου (περιλαμβάνοντας τη σκηνή και το ακροατήριο) και στη συνέχεια έγινε μια εκτίμηση των υλικών των επιφανειών του αμφιθεάτρου μιας και δεν υπήρχαν συγκεκριμένα έγγραφα που να περιγράφουν τις ακουστικές τους ιδιότητες. Τέλος, έγινε η αποτύπωση του ηχητικού εξοπλισμού του χώρου που ήταν πολύ σημαντική για την ακουστική μελέτη.

Πιο συγκεκριμένα, το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια του πατώματος είναι πλακάκι PVC ενώ οι πλαϊνοί τοίχοι του ακροατηρίου, το ταβάνι και ο πίσω τοίχος είναι από μπετόν και βαμμένοι με πλαστικό χρώμα. Τα καθίσματα των ακροατών είναι υφασμάτινα με εσωτερικό αφρολέξ και αναδιπλούμενα. Η σκηνή περιέχει ξύλινο παρκέ δάπεδο. Οι δύο πόρτες εισόδου στο χώρο είναι ξύλινες και οι δύο πόρτες στο πίσω μέρος του αμφιθεάτρου που χωρίζουν το αμφιθέατρο με την αυλή του κτιρίου είναι με διπλά τζάμια. Στο πίσω μέρος της σκηνής και γύρω από αυτή υπάρχουν παχιές βελούδινες κουρτίνες ρυθμιζόμενου μήκους. Οι ίδιες υλικού κουρτίνες καλύπτουν και τις τέσσερις πόρτες του αμφιθεάτρου. Οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 1 και πάρθηκαν από την βιβλιογραφία, καθώς δεν υπήρχαν καταχωρημένα στοιχεία αυτών.

Πίνακας 1: Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα των υλικών της αίθουσας. [6], [8]

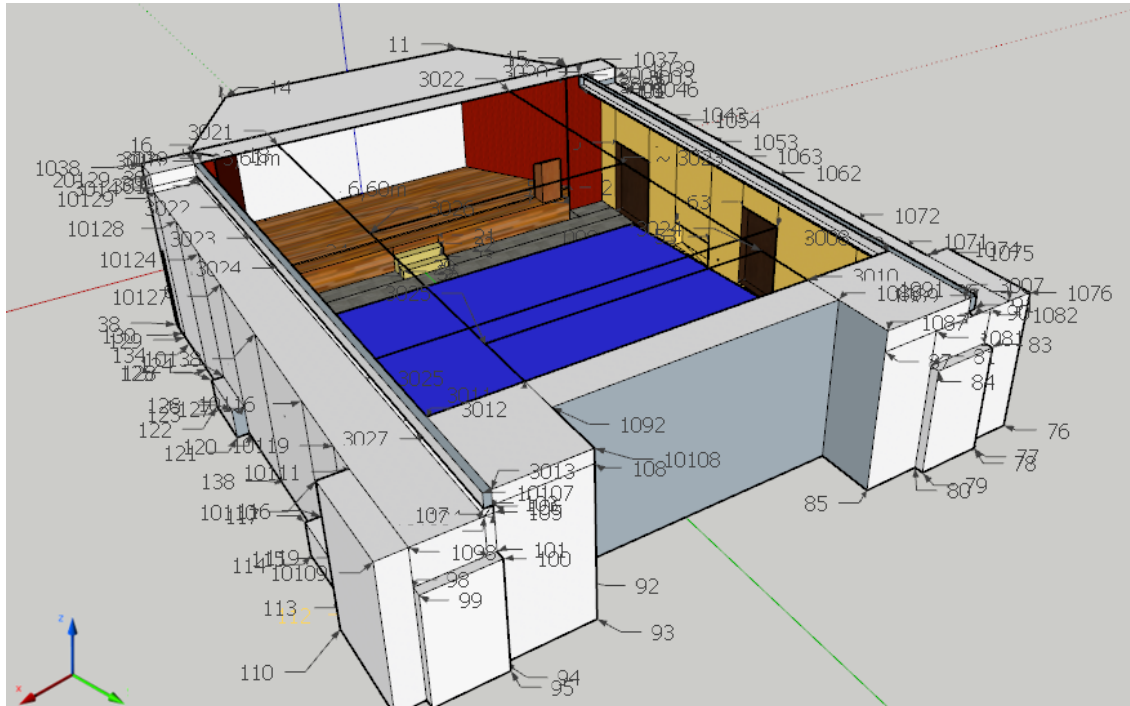
		Οκταβική Ζώνη					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Υλικά	<b>Υφασμα</b>	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.35
	<b>Κουρτίνα</b>	0.05	0.15	0.35	0.40	0.50	0.50
	<b>Παρκέ δάπεδο</b>	0.04	0.04	0.06	0.12	0.10	0.15
	<b>Βαμμένος τοίχος</b>	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	<b>Ξύλινη πόρτα</b>	0.15	0.10	0.06	0.08	0.10	0.05
	<b>Διπλό τζάμι</b>	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
	<b>Πλαστικό πλακάκι</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05
	<b>Κοινό</b>	0.25	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40

Η βασική ηλεκτροακουστική εγκατάσταση που χρησιμοποιείται στην αίθουσα περιλαμβάνει τέσσερα ηχεία ELX112 της εταιρείας Electro-Voice τα οποία είναι δίδρομα 12" με γωνίες κάλυψης (HxV)=(60x40) και ισχύος 250W. Είναι τοποθετημένα σε συστοιχίες συμμετρικά στο αριστερό και δεξί μπροστινό τμήμα της σκηνής. Η αποτύπωση της θέσης των ηχείων στο χώρο έγινε με τη χρήση του μετρητή αποστάσεων laser.

## 5.2 Σχεδίαση 3-D Μοντέλου

Αφού ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις και η αποτύπωση του χώρου στο χαρτί, δημιουργήθηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση αυτού του χώρου με τη χρήση του προγράμματος SketchUp 2017 της Google. Αυτό το βήμα βοήθησε αρκετά στην κατανόηση της γεωμετρίας του χώρου και στην προβολή των γεωγραφικών συντεταγμένων κάθε γωνίας, κάτι το οποίο χρειάστηκε στη συνέχεια για

τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης στο CATT-Acoustic. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του χώρου έγινε κατά μήκος του άξονα y (πράσινος άξονας) με αρχή το σημείο στο κέντρο του πίσω μέρους της σκηνης και το πλάτος του χώρου εκτείνεται στα αρνητικά και θετικά του άξονα x (κόκκινος άξονας). Τέλος το ύψος του αμφιθεάτρου ορίζεται κατά τον άξονα z (μπλε άξονας).



Εικόνα 3: 3-D απεικόνιση του χώρου στο SketchUp 2017.

### 5.3 Το Περιβάλλον του CATT-Acoustic

Το CATT-Acoustic είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό το οποίο χειρίζεται την προσομοίωση της ακουστικής των χώρων. Αναπτύχθηκε από τον Σουηδό Bengt-Inge Dalenbäck το 1988 και διατίθεται από την ίδια του την εταιρεία την Computer-Aided Theater Technique (CATT).

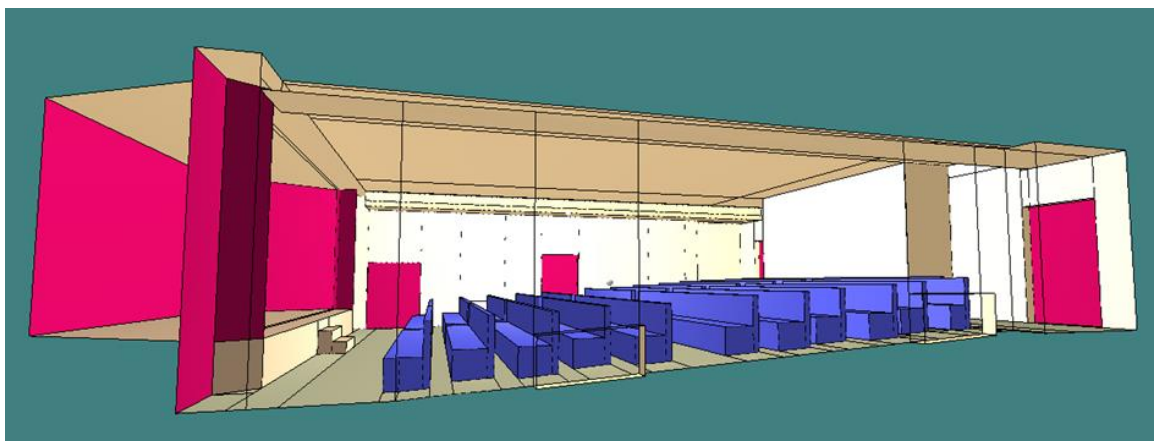
Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο CATT-Acoustic είναι η Image-Source Method, η Randomized Tail-Corrected Cone-Tracing (RTC), η The Universal Cone Tracer (TUCT), η Edge Diffraction και Hybrid Methods. Με την Image-Source Method υπολογίζονται οι πρώιμες ανακλάσεις. Η αρχική έκδοση του CATT-Acoustic βασιζόταν σε αυτή τη μέθοδο, η οποία εντοπίζει τις πηγές ανακλάσεων στο χώρο ως εικονικές πηγές που προέρχονται από διάφορες ανακλάσεις σε επιφάνειες. Με την Randomized Tail-Corrected Cone-Tracing (RTC) που αναπτύχθηκε από τον Bengt-Inge Dalenbäck μοντελοποιούνται οι ανακλάσεις που διαχέονται. Με αυτήν τη μέθοδο ανιχνεύονται οι δέσμες ακτινών που ανακλώνται και διαχέονται στο χώρο, διορθώνοντας τυχόν ατέλειες στον υπολογισμό της αντήχησης. Η λειτουργία ανάλυσης The Universal Cone Tracer (TUCT) χρησιμοποιεί πολλαπλούς αλγορίθμους πρόβλεψης, ανάλογα με τον τύπο του χώρου που μοντελοποιείται και τις απαιτήσεις του χρήστη. Αντιμετωπίζει τις ελλείψεις των προηγούμενων μεθόδων, όπως η RTC και εφαρμόζει μια προσέγγιση που χωρίζει τις ακτίνες σε πολλαπλές υποακτίνες, οι οποίες συνεχίζουν να διαχέονται. Έτσι διορθώνεται η ακρίβεια των προβλέψεων, ιδίως εάν πρόκειται για ανακλάσεις από μικρές ή καμπύλες επιφάνειες. Με τη λειτουργία του Edge

Diffraction υπολογίζεται η διάθλαση από τις ακμές στις πρώιμες ανακλάσεις, χρησιμοποιώντας μια δευτερεύουσα μέθοδο πηγής ακμής. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη σε μοντελοποίηση χώρων με σύνθετες γεωμετρίες. Τέλος, το CATT-Acoustic μπορεί να συνδυάζει διάφορες μεθόδους (Hybrid Methods) για να επιτύχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. [24]

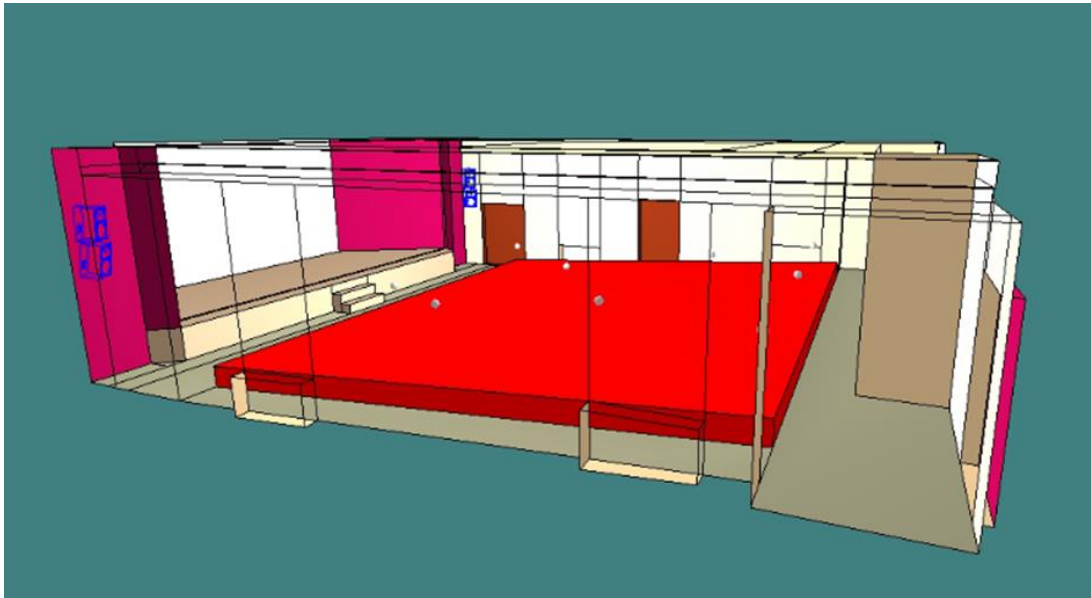
Η σχεδίαση του μοντέλου στο πρόγραμμα CATT-Acoustic γίνεται αρχικά με την εισαγωγή των γεωμετρικών συντεταγμένων των σημείων που ορίζουν κάθε επιφάνεια στο αρχείο master.geo. Με τη βοήθεια του τρισδιάστατου σχεδίου στο SketchUp 2017 περάστηκαν οι γωνίες που ορίζουν κάθε πλευρά στο χώρο και στη συνέχεια ορίστηκαν οι αντίστοιχες επιφάνειες και το είδος του υλικού τους. Οι επιφάνειες αυτές είναι σημαντικό να ορίζονται με τον κανόνα του δεξιού χεριού κατά τον οποίο τα δάκτυλα ορίζουν τη σειρά των σημείων και ο αντίχειρας τη φορά του διανύσματος η οποία πρέπει να είναι προς το εσωτερικό του χώρου. Στη συνέχεια ορίζονται οι ηχητικές πηγές και οι θέσεις των ακροατών σε ξεχωριστά txt αρχεία που ονομάζονται src.loc και rec.loc αντίστοιχα. Στο αρχείο των πηγών ορίζονται οι φυσικές και ηλεκτροακουστικές πηγές που υπάρχουν στο χώρο με την αντίστοιχη γωνία κλίσης προς το ακροατήριο. Τα master.geo, src.loc και rec.loc παρουσιάζονται στα Παραρτήματα Α, Β και Γ.

#### 5.4 Παραδοχές Μοντέλου

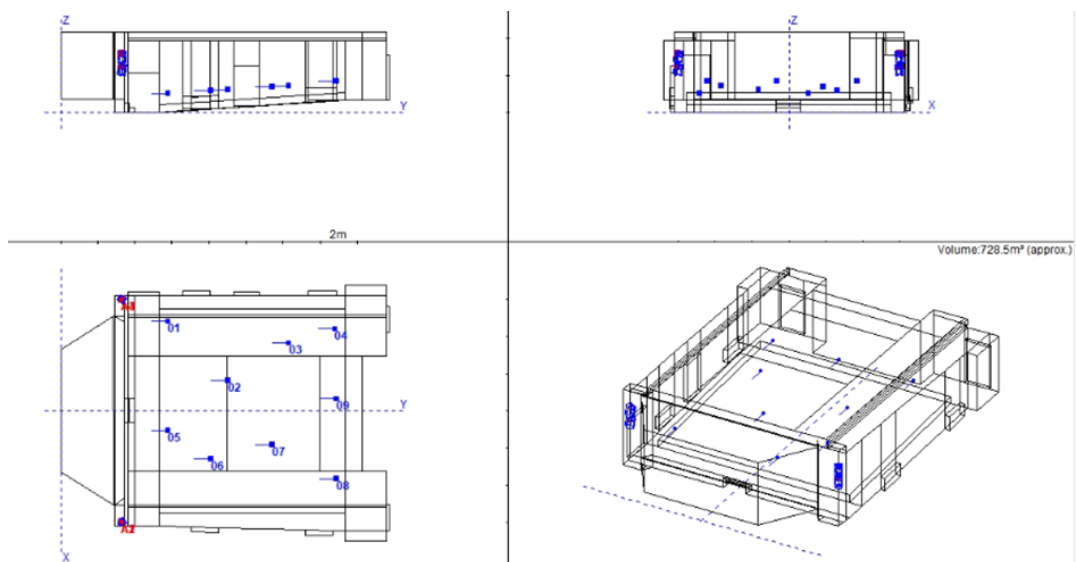
Αρχικά ο χώρος του ακροατηρίου ορίστηκε σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια που πάρθηκαν όπως φαίνεται στην εικόνα 4 αλλά οι επιφάνειες των καθισμάτων εμφάνιζαν σφάλμα στην προσομοίωση και μετά από πολλές προσπάθειες αποφασίστηκε να οριστεί το κοινό ως ένας ενιαίος όγκος έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Αυτό επηρεάζει αμελητέα το αποτέλεσμα διότι το συνολικό εμβαδό των καθισμάτων παραμένει περίπου το ίδιο. Ο τελικός σχεδιασμός του ακροατηρίου φαίνεται στην εικόνα 5. Ακόμη, καθώς δεν υπήρχε κάποιο μοντέλο των ηχείων που περιέχει η αίθουσα για χρήση στο CATT-Acoustic και δεν ήταν δυνατό να βρεθούν τα ακριβή τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών, επιλέχθηκαν τα ηχεία «V2-1264» της Community τα οποία είναι παρόμοια με αυτά του υπό μελέτη χώρου.



Εικόνα 4: Αρχικός σχεδιασμός ακροατηρίου στο CATT-Acoustic.



Εικόνα 5: Τελικός σχεδιασμός χώρου στο CATT-Acoustic.

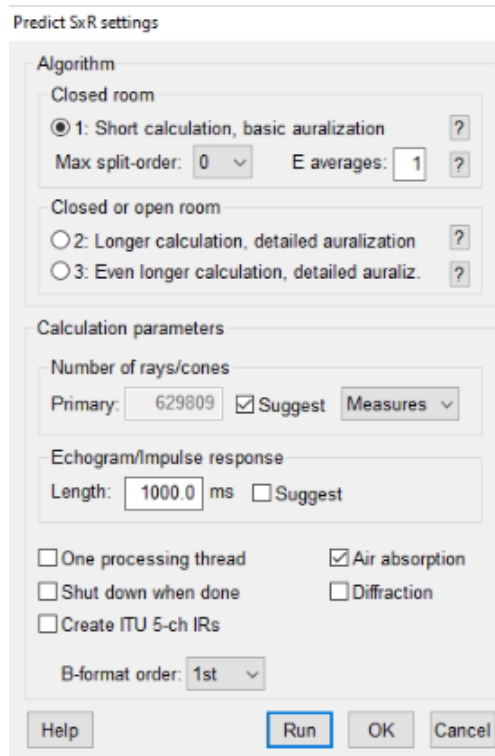


Εικόνα 6: Αποτύπωση χώρου στο CATT-Acoustic.

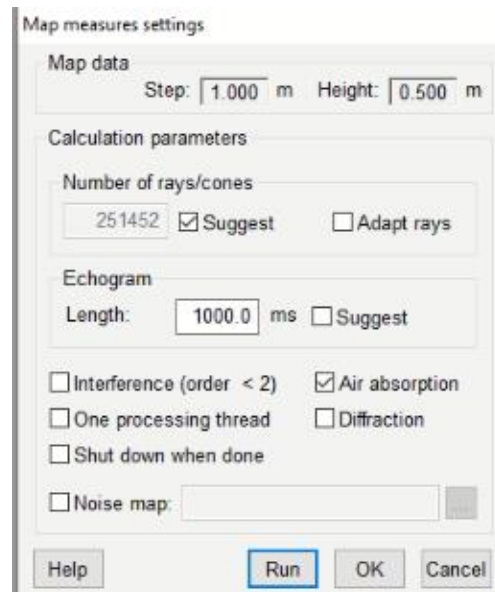
## 5.5 Διαχείριση Δεδομένων - Μεθοδολογία

Έχοντας έτοιμο το μοντέλο προσομοίωσης και δεδομένου ότι ο στόχος είναι να προταθούν λύσεις έτσι ώστε ο χώρος να είναι κατάλληλος για ακουστική πολλαπλών χρήσεων, πάρθηκαν τα αποτελέσματα σε τρεις κατηγορίες. Αρχικά έγινε η προσομοίωση του χώρου χωρίς ακουστικές παρεμβάσεις, στη συνέχεια έγινε προσομοίωση με μόνιμες παρεμβάσεις που βελτιώνουν την ακουστική και ο χώρος είναι κατάλληλος για μουσικές εκδηλώσεις και παραστάσεις και η τελευταία προσομοίωση αφορά την παρέμβαση που προτάθηκε όταν πρόκειται να γίνονται συνέδρια και ομιλίες.

Πριν την προσομοίωση έπρεπε να οριστούν οι παράμετροι του προγράμματος των πεδίων Predict SxR και Map Measures. Στις εικόνες 7 και 8 φαίνονται αντίστοιχα οι επιλεγμένες ρυθμίσεις.



Εικόνα 7: Ρυθμίσεις του Predict SxR.



Εικόνα 8: Ρυθμίσεις του Map Measures.

Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν σε κάθε κατηγορία είναι ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας καθώς και οι χρωματικές κατανομές των παραμέτρων του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$ , της ευκρίνειας  $C_{50}$  και  $C_{80}$ , της διακριτότητας  $D_{50}$ , της στάθμης ισχύος SPL και του συντελεστή STI. Ακόμη, πάρθηκαν οι διαγραμματικές απεικονίσεις του χρόνου αντήχησης, της ευκρίνειας  $C_{50}$  και  $C_{80}$  και της διακριτότητας  $D_{50}$  ανά συχνότητα για τέσσερις διαφορετικές θέσεις του ακροατηρίου. Τα δεδομένα για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις αφορούν τον ήχο που φτάνει από το σύνολο των πηγών. Για

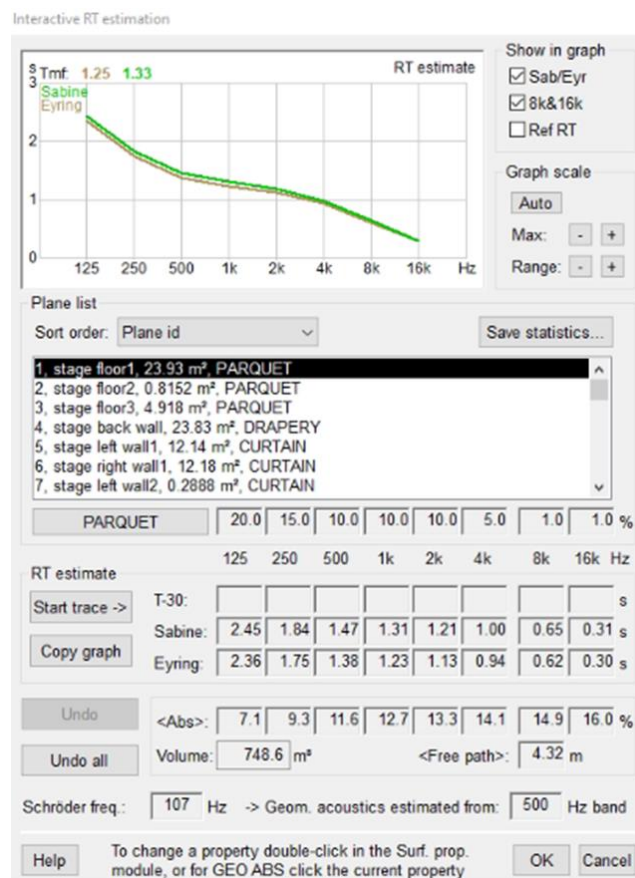
παράδειγμα, για τη θέση 01 επιλέχθηκε το \*x01 που αφορά τον ήχο που φτάνει στη θέση αυτή συναρτήσει και των τεσσάρων πηγών. Έτσι, μπορεί να γίνει μια σύγκριση των τιμών στις διαφορετικές θέσεις του κοινού και να προταθούν αντίστοιχα μέτρα βελτίωσης της ακουστικής εκεί που υπάρχει μεγαλύτερο πρόβλημα. Ο θεωρητικός όγκος της αίθουσας που προκύπτει από το CATT-Acoustic είναι  $748.6m^3$ .

## 5.6 Προσομοίωση Μοντέλου Χωρίς Παρεμβάσεις

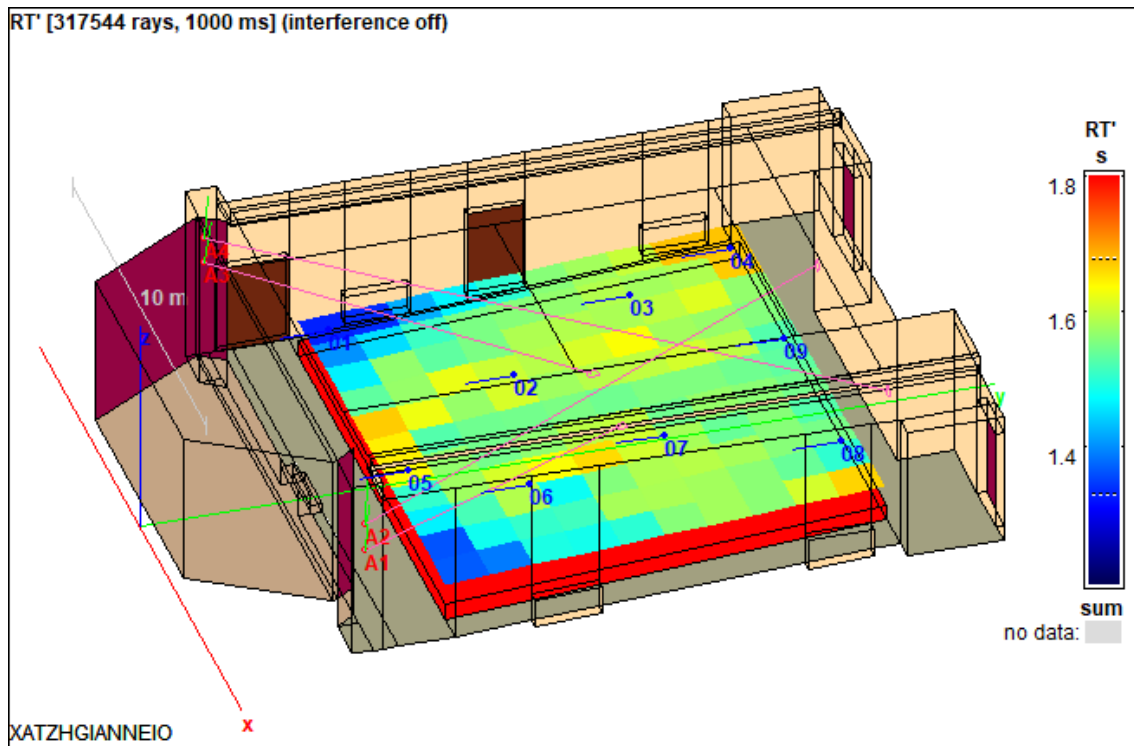
Κατά την πρώτη προσομοίωση του μοντέλου έχοντας ανοιχτές τις κουρτίνες των τεσσάρων πορτών και του υφασμάτινου πάνελ οθόνης της σκηνής πάρθηκαν οι συγκεκριμένοι ακουστικοί παράμετροι της αίθουσας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα της πρώτης προσομοίωσης.

### 5.6.1 Χρόνος Αντήχησης $RT_{60}$ πριν τις Παρεμβάσεις

Τα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου στο CATT-Acoustic φαίνονται αναλυτικά ανά συχνότητα στην εικόνα 9. Ο μέσος χρόνος αντήχησης της αίθουσας κατά Sabine είναι 1.33sec ενώ κατά Eyring είναι 1.25sec. Παρατηρείται τόσο από την καμπύλη όσο και από τα δεδομένα της εικόνας 1 πως ο συγκεκριμένος χώρος έχει υψηλό χρόνο αντήχησης της χαμηλές συχνότητες. Παρατηρώντας την εικόνα 10 γίνεται αντιληπτό πως το μεγαλύτερο πρόβλημα υπάρχει κυρίως της κεντρικές και πίσω θέσεις του κοινού. Αυτό είναι λογικό διότι τα ηχεία βρίσκονται σε συστοιχία ένα πάνω στο άλλο και αρκετά μακριά από εκείνες τις θέσεις καθώς και ότι υπάρχουν περισσότερες ανακλάσεις του ήχου στους πίσω τοίχους της αίθουσας.



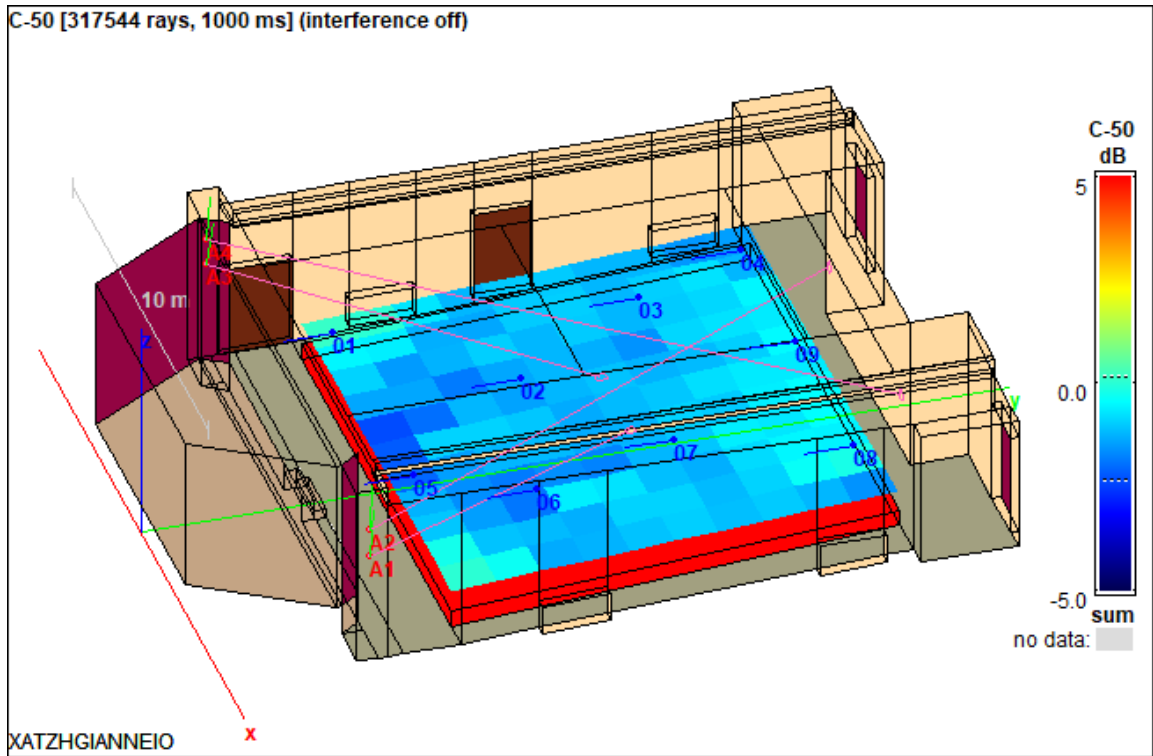
Εικόνα 9: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου πριν τις παρεμβάσεις στο CATT-Acoustic.



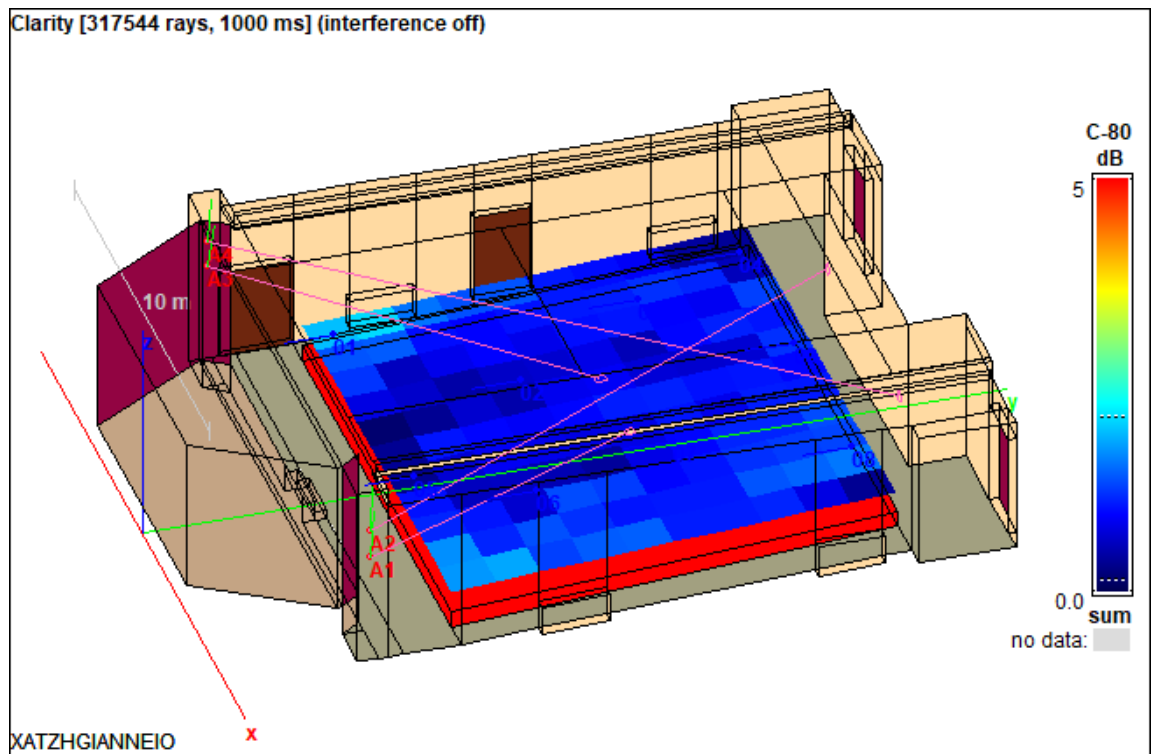
Εικόνα 10: Χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

### 5.6.2 Ευκρίνεια $C_{50}$ και $C_{80}$ πριν τις Παρεμβάσεις

Ο συγκεκριμένος χώρος όπως φαίνεται και στην εικόνα 11 έχει χαμηλό ποσό ευκρίνειας  $C_{50}$  το οποίο κυμαίνεται στο ακροατήριο μεταξύ του  $-2,5\text{dB}$  και  $0,1\text{dB}$  και δείχνει πόσο κατάλληλη είναι η αίθουσα για ομιλίες. Δηλαδή επιβεβαιώνεται πως ο υψηλός χρόνος αντήχησης που επικρατεί στην αίθουσα επιφέρει κακό ποσό ευκρίνειας. Αντίστοιχα, από την εικόνα 12 παρατηρείται πως ο χώρος χωρίς κάποια παρέμβαση παρέχει ποσό ευκρίνειας  $C_{80}$  στο κοινό μεταξύ  $0,1\text{dB}$  και  $2,5\text{dB}$  το οποίο είναι πιο κοντά στα όρια για χρήση της αίθουσας για μουσικές εκδηλώσεις.



Εικόνα 11: Χρωματική κατανομή C<sub>50</sub> στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

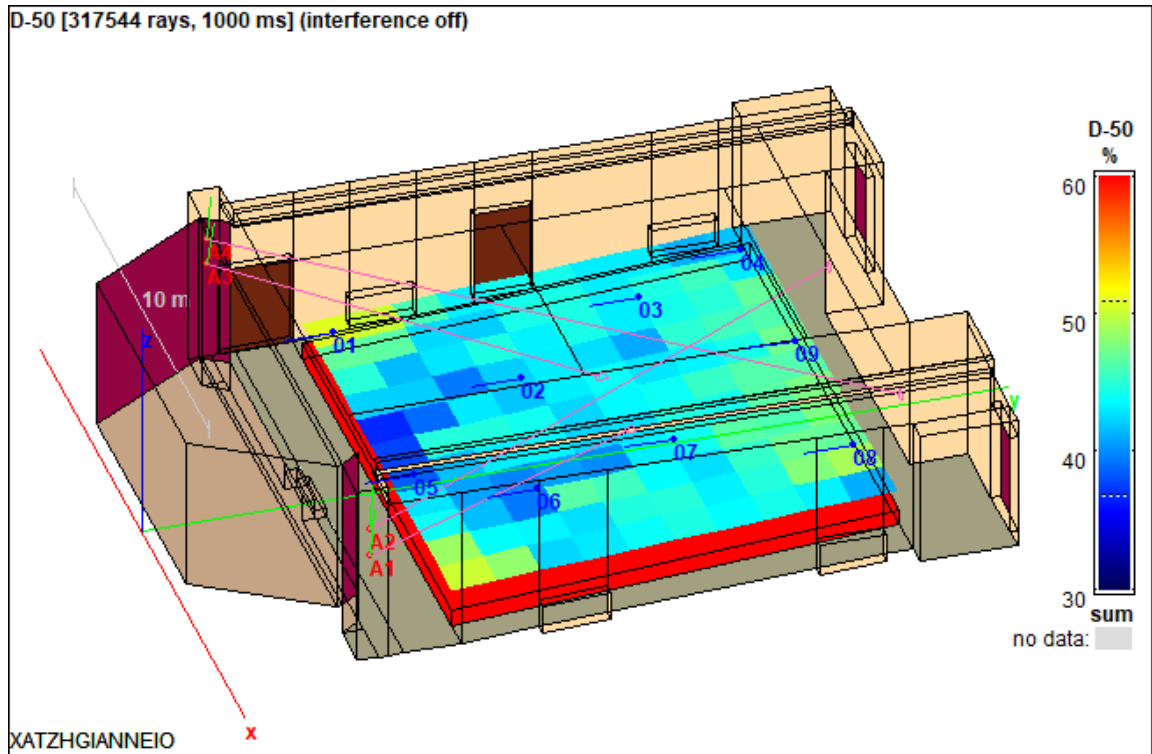


Εικόνα 12: Χρωματική κατανομή C<sub>80</sub> στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.



### 5.6.3 Διακριτότητα $D_{50}$ πριν τις Παρεμβάσεις

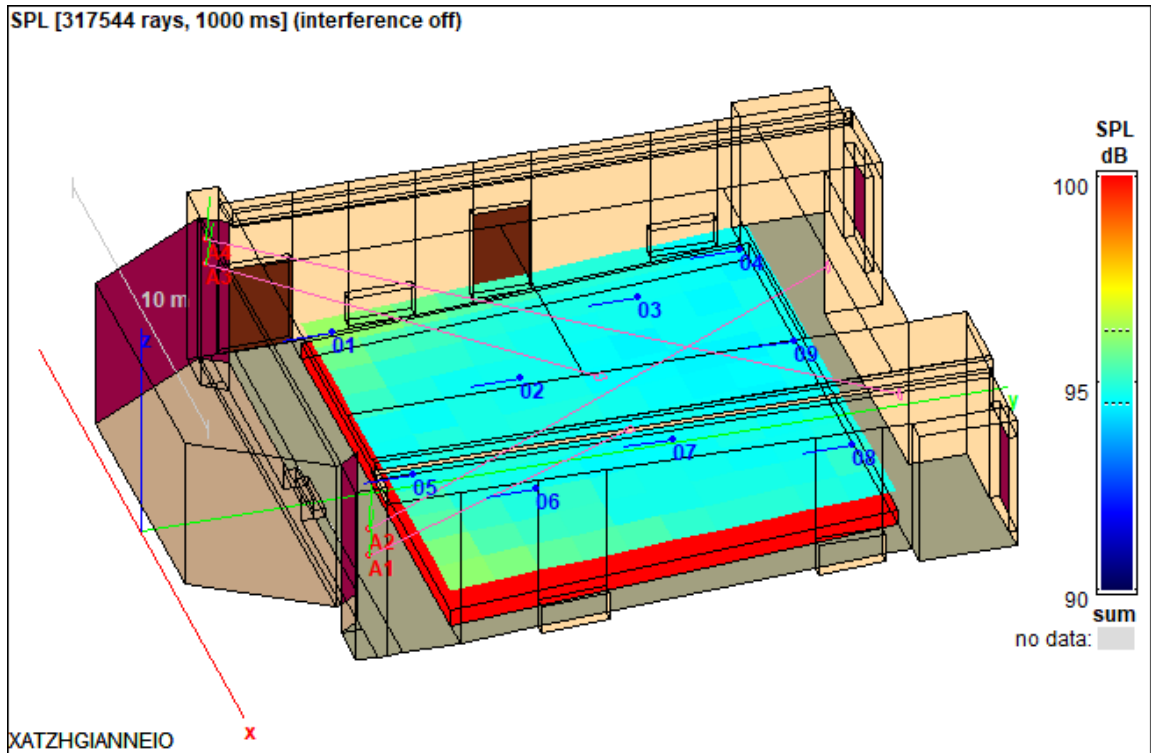
Γίνεται αντιληπτό από την εικόνα 13 πως ο χώρος χωρίς κάποια παρέμβαση δεν παρουσιάζει καλό ποσοστό  $D_{50}$ . Οι τιμές του  $D_{50}$  στο χώρο του ακροατηρίου κυμαίνονται από 37% έως 51% που δεν θεωρούνται καλές για κατανόηση της ομιλίας.



Εικόνα 13: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

### 5.6.4 Στάθμη Πίεσης SPL πριν τις Παρεμβάσεις

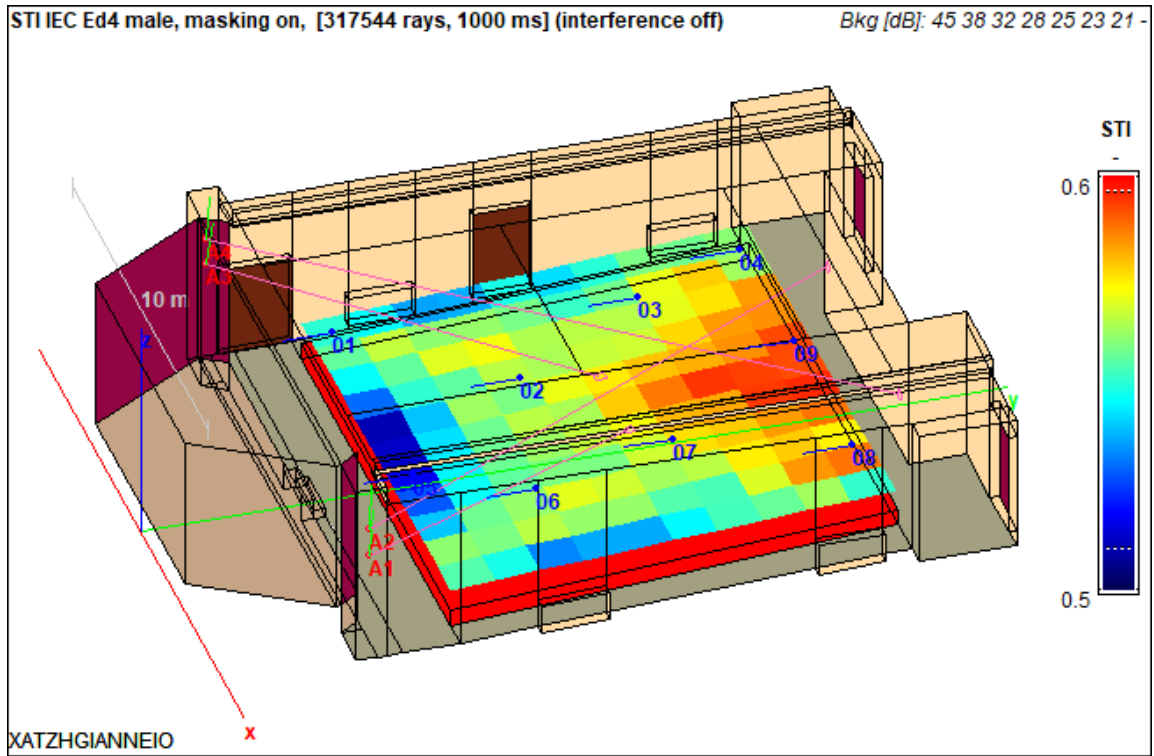
Η τιμή του SPL του χώρου κυμαίνεται από 94,5dB έως 96,4dB στο ακροατήριο με τις μεγαλύτερες τιμές να επικρατούν στις αριστερές και δεξιές μπροστινές θέσεις του κοινού διότι είναι πιο κοντά στα ηχεία.



Εικόνα 14: Χρωματική κατανομή στάθμης πίεσης SPL στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

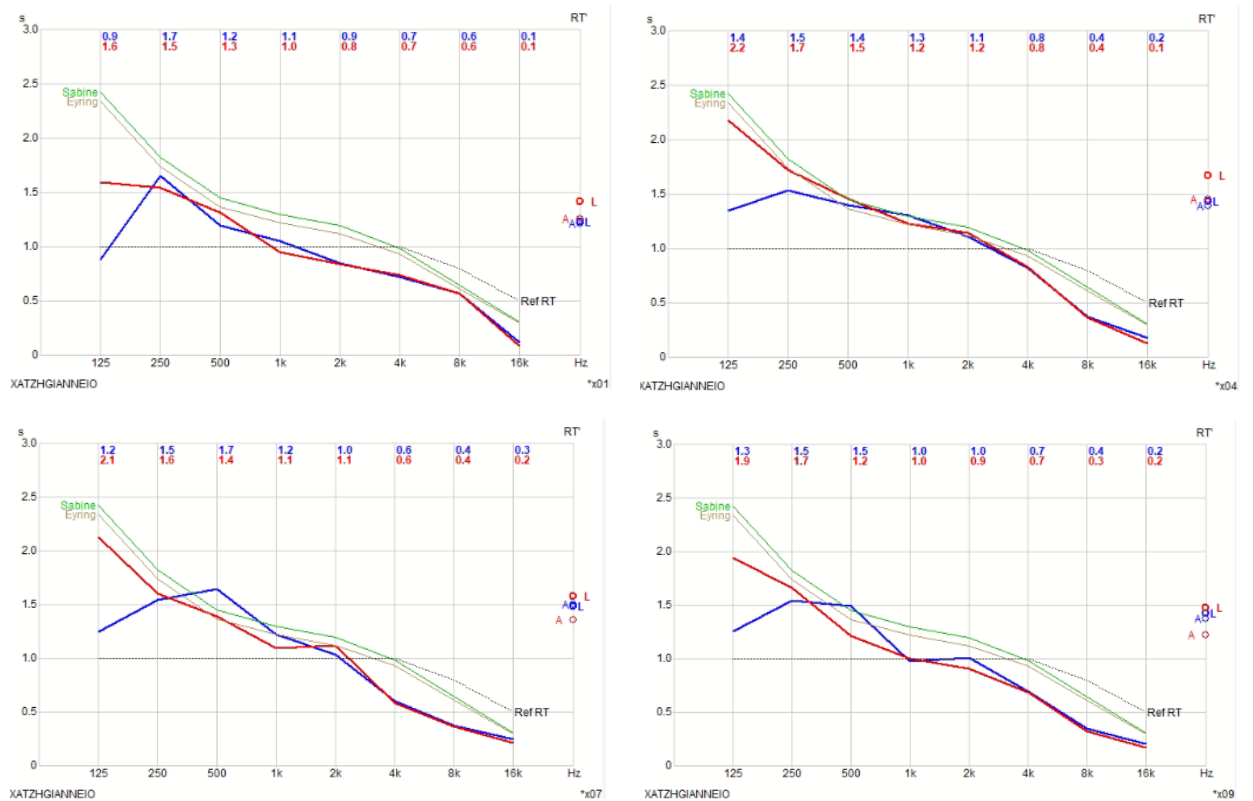
### 5.6.5 Δείκτης STI πριν τις Παρεμβάσεις

Ο δείκτης STI βρίσκεται κατά μέσο όρο στο 0,56 όπως φαίνεται από την εικόνα () κάτι το οποίο συμφωνεί στο ότι η καταληπτότητα της ομιλίας είναι στην κατηγορία «καλή». Υπάρχει ακόμη μια ανομοιόμορφη κατανομή του δείκτη STI καθώς οι πίσω κεντρικές θέσεις παρέχουν τιμές που προσεγγίζουν το 0,6 ενώ οι πρώτες κεντρικές μπροστινές θέσεις έχουν STI στο 0,52. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει διότι η διάταξη και η γωνία στρέψης των ηχείων «στοχεύουν» τις πίσω κεντρικές θέσεις ενώ οι κεντρικές μπροστινές δεν είναι στην κατάλληλη εμβέλεια των ηχείων. Επίσης υπάρχει ανάκλαση του ήχου από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από το κοινό και επηρεάζει τον ήχο που φτάνει στις πίσω θέσεις.

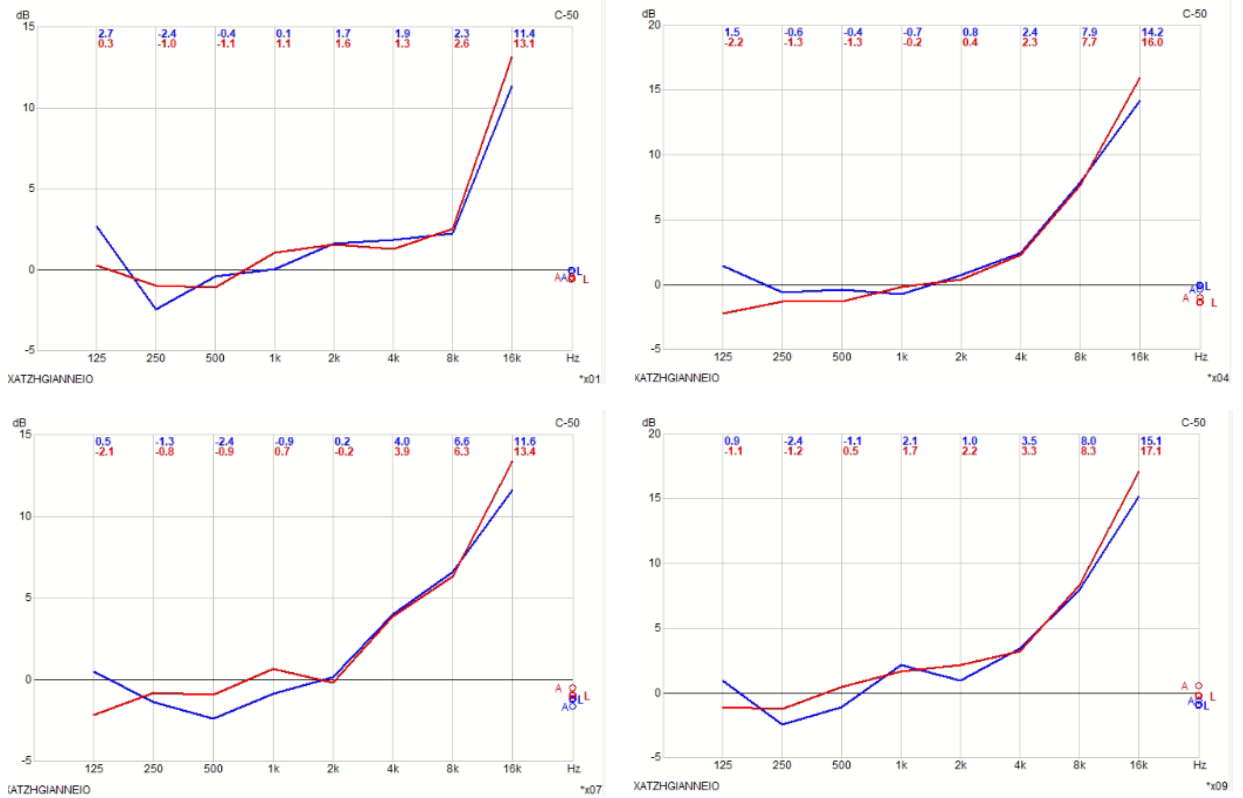


Εικόνα 15: Χρωματική κατανομή του δείκτη STI στο ακροατήριο πριν τις παρεμβάσεις.

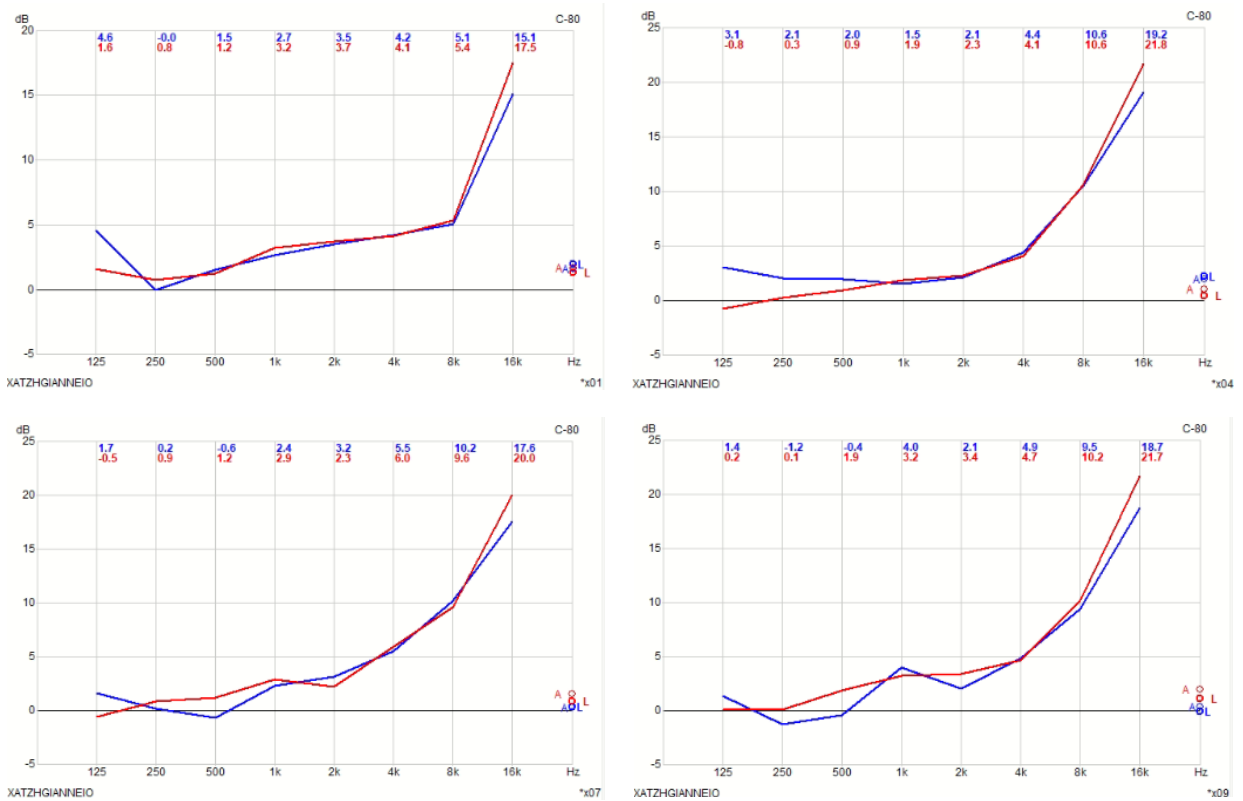
### 5.6.6 Παράμετροι $RT_{60}$ , $C_{50}$ , $C_{80}$ , $D_{50}$ σε τέσσερις θέσεις πριν τις Παρεμβάσεις



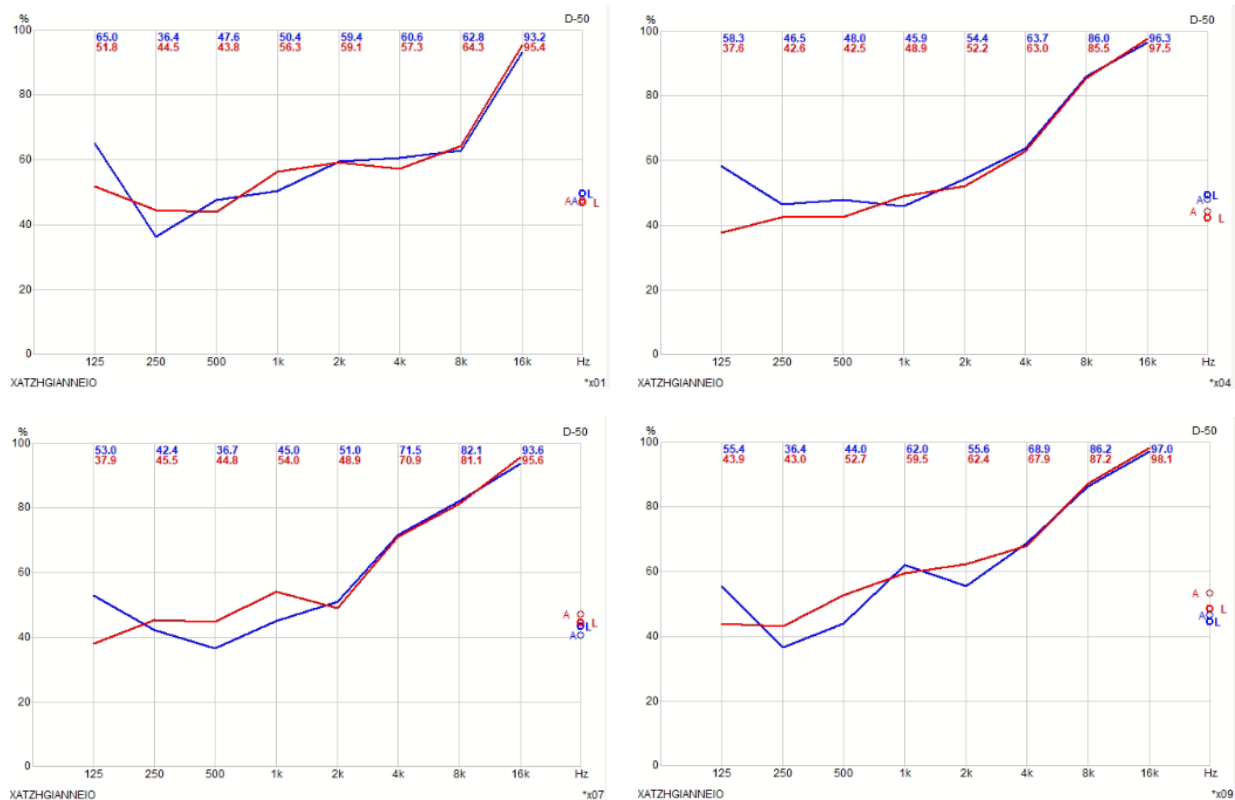
Εικόνα 16: Χρόνοι αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.



Εικόνα 17: Ευκρίνεια C<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.



Εικόνα 18: Ευκρίνεια C<sub>80</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.



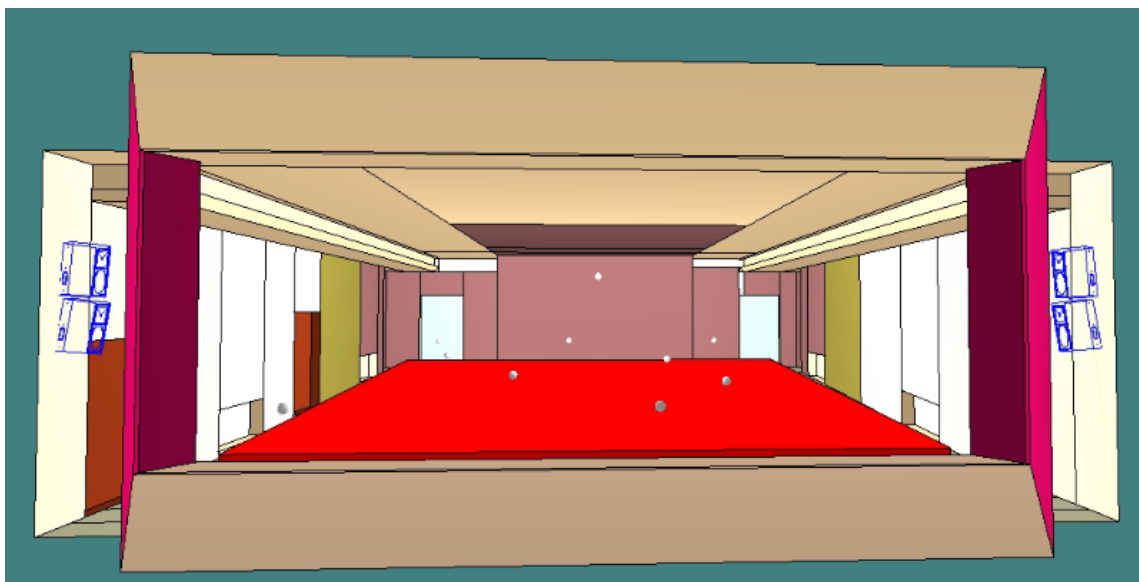
Εικόνα 19: Διακριτότητα D<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις πριν τις παρεμβάσεις.

## 5.7 Προσομοίωση Μοντέλου με Μόνιμες Παρεμβάσεις για Μουσική

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται πως ο χώρος χρειάζεται απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες διότι εφόσον η χρήση του είναι τόσο για ομιλίες όσο και μουσικές παραστάσεις θα πρέπει να έχουμε έναν ενδιάμεσο χρόνο αντήχησης. Για να μειωθεί ο χρόνος αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες τοποθετήθηκαν γυψοσανίδες που έχουν μεγαλύτερη απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες, αρχικά, μόνο στο πίσω μέρος της αίθουσας και έγινε μία νέα προσομοίωση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά διότι υπήρχε μεγάλη διαφορά του χρόνου αντήχησης μεταξύ των μπροστινών και πίσω θέσεων οπότε αποφασίστηκε να επενδυθούν με γυψοσανίδα 12mm οι πίσω τοίχοι της αίθουσας και ένα κομμάτι των πλαϊνών τοίχων των πίσω θέσεων καθώς και το κεντρικό τμήμα του ταβανιού που εκτείνεται από τις κεντρικές μέχρι τις πίσω θέσεις. Ακόμη, για να διορθωθεί η μεγάλη διαφορά του χρόνου αντήχησης στις κεντρικές και πίσω θέσεις, επιλέχθηκε να επενδυθούν τα πλαϊνά αυτών των θέσεων με διάτρητο ξύλινο πάνελ που παρέχει ακόμη μεγαλύτερη απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες. Στην εικόνα 20 φαίνεται με το γκρι χρώμα η επένδυση του πίσω μέρους και του ταβανιού με γυψοσανίδα και με το πράσινο χρώμα είναι η τοποθέτηση του διάτρητου ξύλινου πάνελ. Οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 2 και πάρθηκαν από την βιβλιογραφία.

Πίνακας 2: Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα υλικών για μόνιμες παρεμβάσεις. [22], [23]

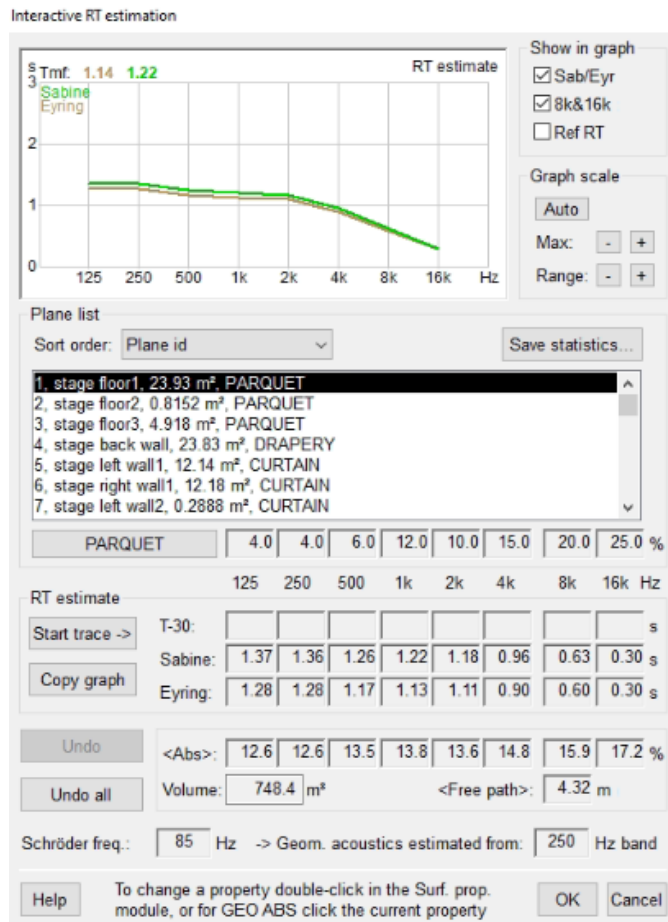
Υλικά	Οκταβική Ζώνη					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Γυψοσανίδα 12mm	0.30	0.10	0.06	0.05	0.04	0.04
Διάτρητο ξύλινο πάνελ	0.39	0.86	0.58	0.29	0.15	0.10



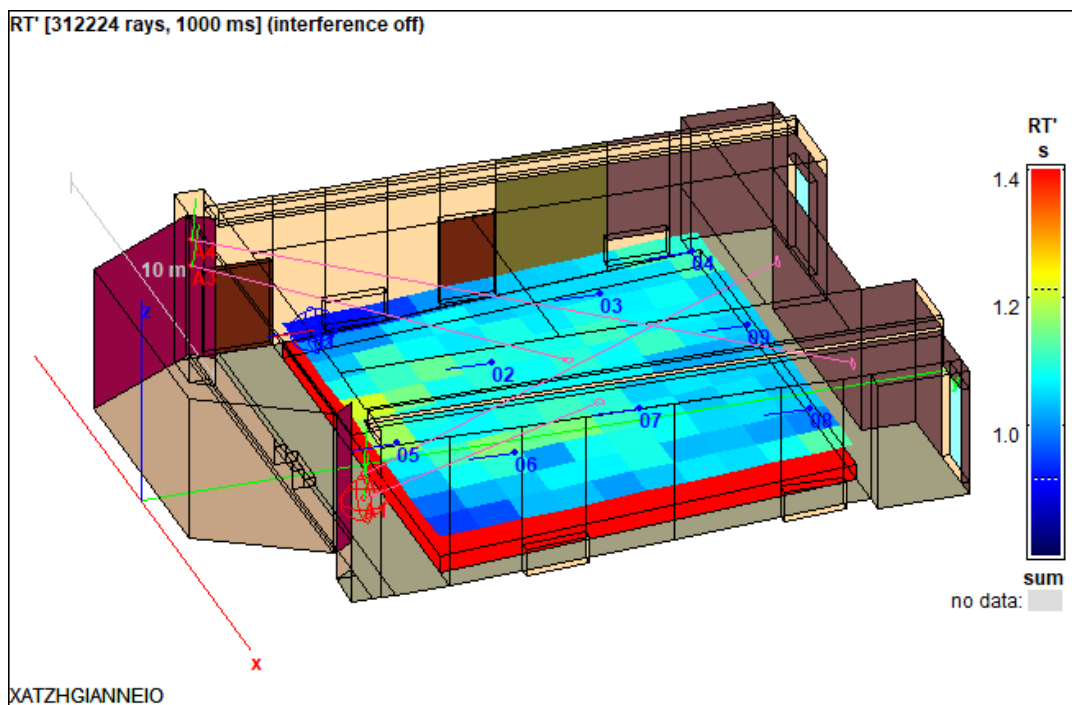
Εικόνα 20: 3-D μοντέλο των μόνιμων παρεμβάσεων με γυψοσανίδες και ακουστικά πάνελ.

### 5.7.1 Χρόνος Αντήχησης $RT_{60}$ με Παρεμβάσεις για Μουσική

Με τις παρεμβάσεις των γυψοσανίδων και των διάτρητων ακουστικών πάνελ έγιναν αρκετές προσομοιώσεις με κλειστές και ανοιχτές τις κουρτίνες και κρίθηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα πως η βέλτιστη χρήση του χώρου για μουσικές παραστάσεις είναι με ανοιχτές όλες τις κουρτίνες του χώρου διότι έτσι αυξάνεται ο χρόνος αντήχησης. Σε συνδυασμό με την απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες λόγω των παρεμβάσεων δημιουργείται συνολικά ένας καλός χρόνος αντήχησης για αυτού του είδους εκδηλώσεων. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 21 ο μέσος χρόνος αντήχησης της αίθουσας κατά Sabine είναι 1.22sec και κατά Eyring είναι 1.14sec. Ακόμη φαίνεται πως διορθώθηκε το πρόβλημα του υψηλού χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες δημιουργώντας πλέον μια πιο ομαλή καμπύλη. Το ιδανικό θα ήταν να υπήρχε ακόμη πιο υψηλός χρόνος αντήχησης για μουσικές εκδηλώσεις αλλά επειδή ο χώρος χρησιμοποιείται και για άλλους σκοπούς χρειάζεται να παρέχει όσο το δυνατό έναν ενδιάμεσο χρόνο αντήχησης.



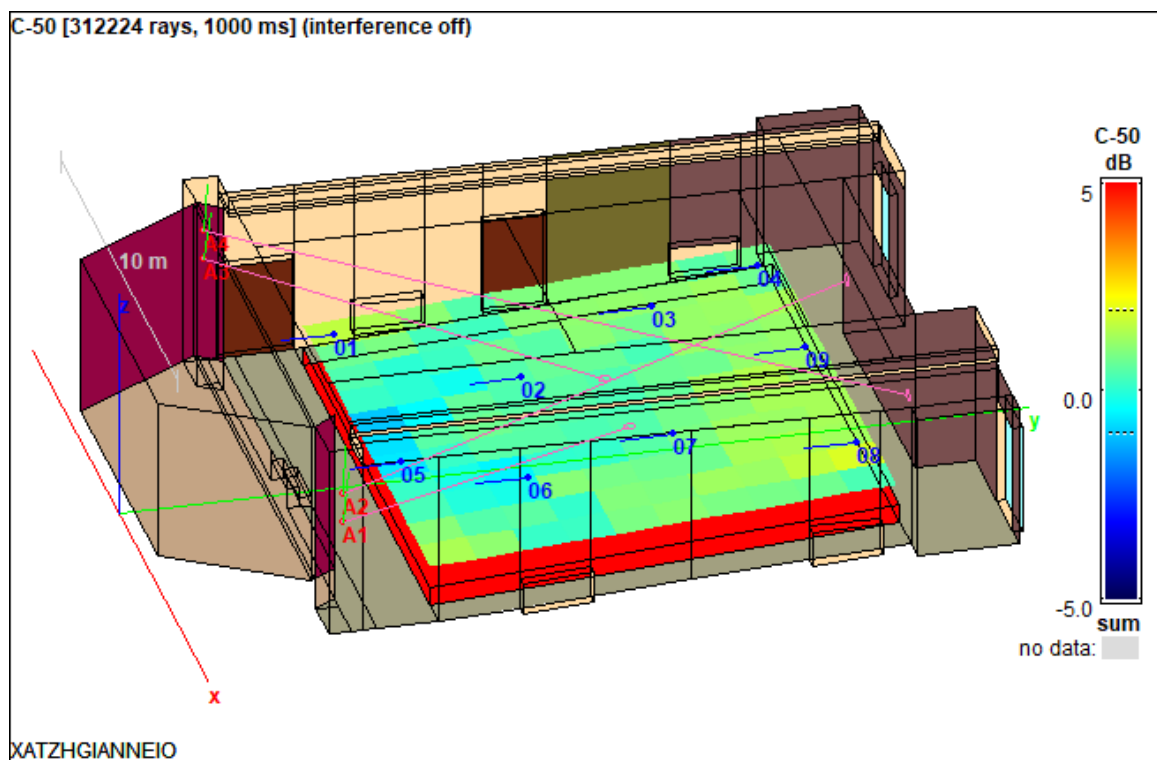
Εικόνα 21: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου μετά τις παρεμβάσεις για μουσική στο CATT-Acoustic.



Εικόνα 22: Χρωματική κατανομή χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

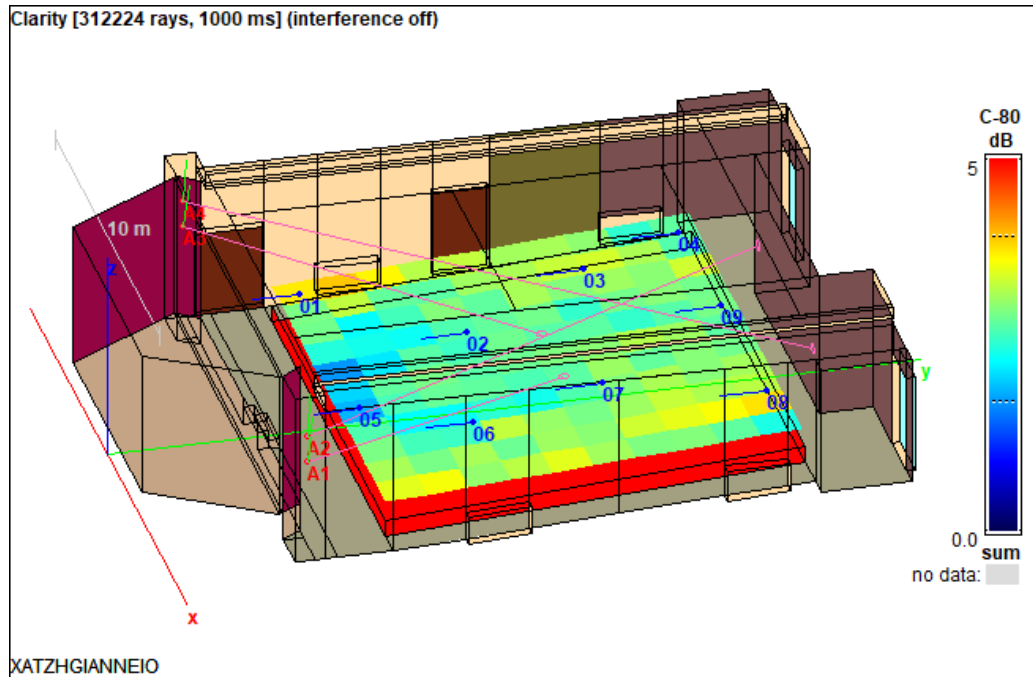
### 5.7.2 Ευκρίνεια C<sub>50</sub> και C<sub>80</sub> με Παρεμβάσεις για Μουσική

Το ποσό της ευκρίνειας C<sub>50</sub> στο σύνολο του ακροατήριου κυμαίνεται μεταξύ του -1,1dB και 2dB όπως φαίνεται και στην εικόνα 23. Παρατηρούμε μια αύξηση από την περίπτωση χωρίς ακουστικές παρεμβάσεις αλλά παραμένει σε χαμηλές τιμές για χρήση της αίθουσας για ομιλία και συνέδρια. Αντίστοιχα, παρατηρείται ότι με τις παρεμβάσεις απορρόφησης των χαμηλών συχνοτήτων στο πίσω μέρος της αίθουσας με τη χρήση γυψοσανίδων και ακουστικών πάνελ βελτιώνεται το εύρος της τιμής της ευκρίνειας C<sub>80</sub>. Πλέον το ποσό της ευκρίνειας C<sub>80</sub> στο ακροατήριο κυμαίνεται μεταξύ 1,8dB και 3,9dB όπως φαίνεται και στην εικόνα 24 το οποίο είναι το ιδανικό εύρος για χρήση του χώρου για μουσικές εκδηλώσεις.



Εικόνα 23: Χρωματική κατανομή C<sub>50</sub> στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

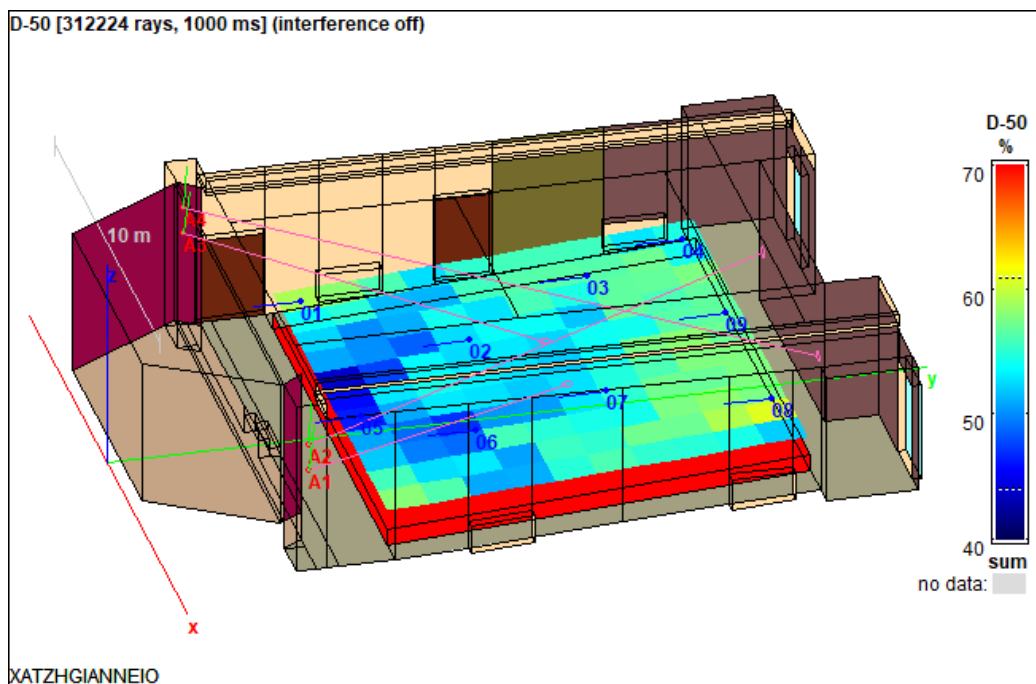




Εικόνα 24: Χρωματική κατανομή C<sub>80</sub> στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

### 5.7.3 Διακριτότητα D<sub>50</sub> με Παρεμβάσεις για Μουσική

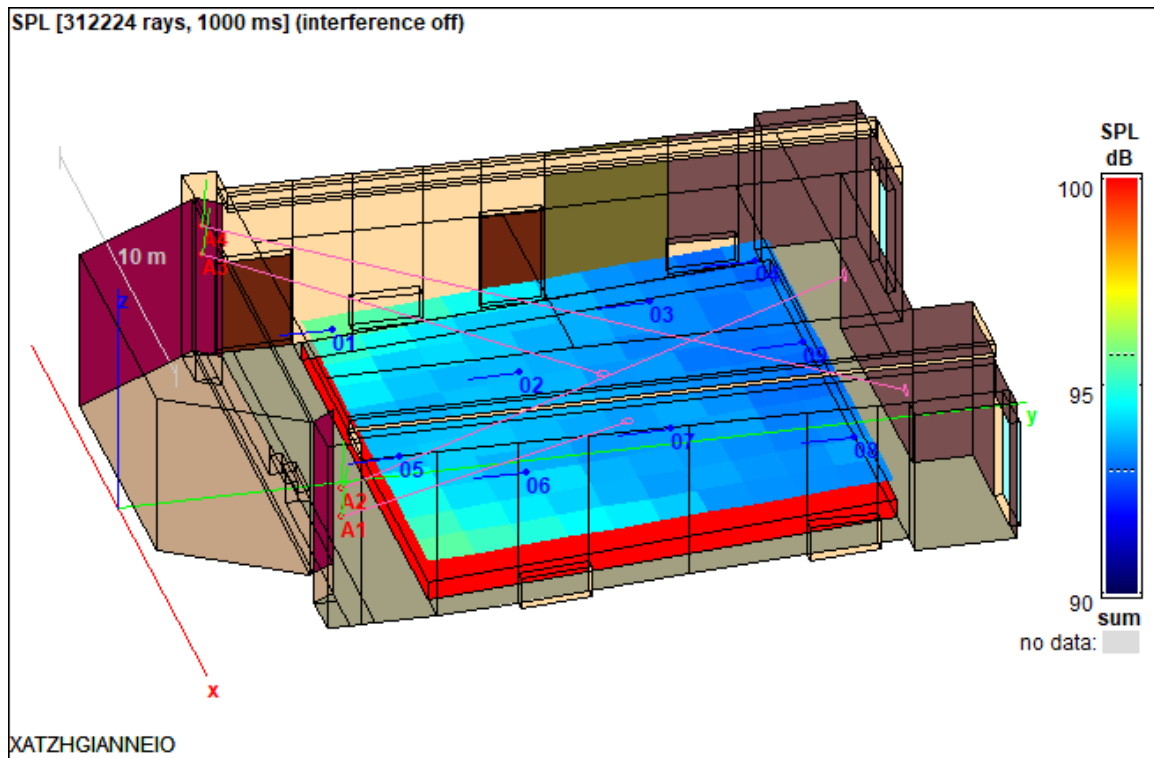
Το ποσοστό διακριτότητας D<sub>50</sub> όπως φαίνεται στην εικόνα 25 κυμαίνεται από 45% έως 61% που θεωρείται ένα καλό ποσοστό για χρήση ενός χώρου για μουσική. Σχετικά με την κατανομή του ποσοστού D<sub>50</sub> στο ακροατήριο παρατηρούνται μερικές μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των μπροστινών κεντρικών θέσεων και των υπολοίπων το οποίο οφείλεται στην απορρόφηση που προστέθηκε στο πίσω μέρος του χώρου.



Εικόνα 25: Χρωματική κατανομή D<sub>50</sub> στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

### 5.7.4 Στάθμη Πίεσης SPL με Παρεμβάσεις για Μουσική

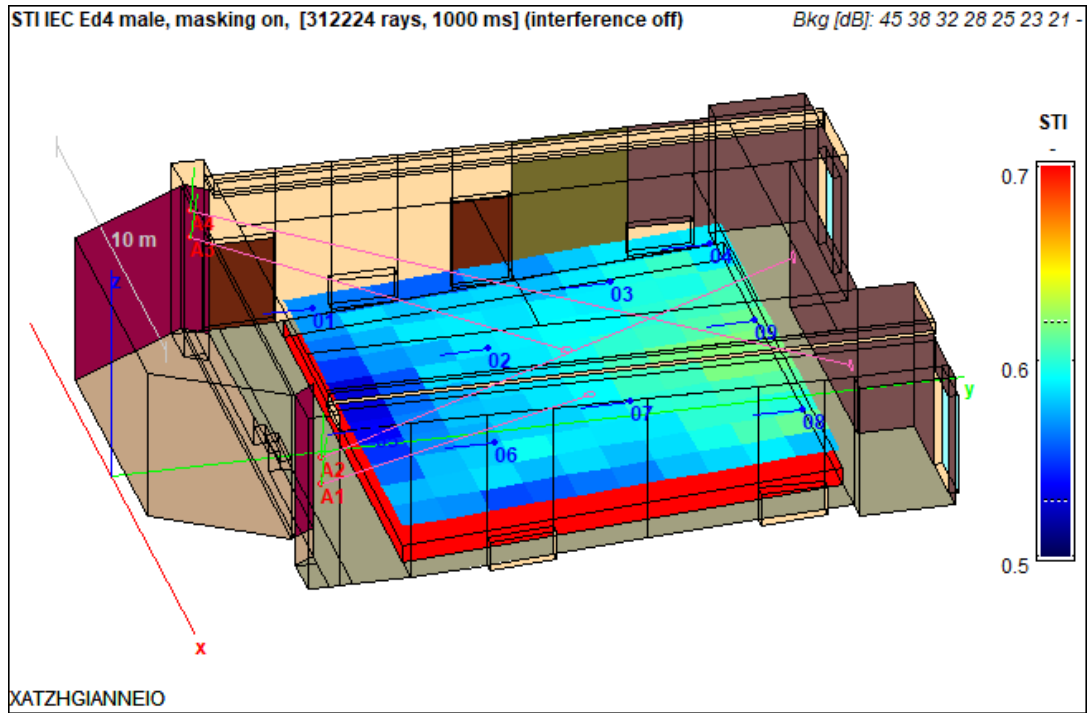
Η τιμή του SPL στο χώρο του ακροατηρίου κυμαίνεται από 93dB έως 95,8dB το οποίο είναι ελαφρώς μειωμένο από την περίπτωση χωρίς καμία ακουστική παρέμβαση κάτι το οποίο είναι λογικό διότι προστέθηκαν απορροφητικά υλικά στους τοίχους. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές ηχητικής πίεσης στις αριστερές και δεξιές μπροστινές θέσεις του κοινού διότι είναι πιο κοντά στα ηχεία.



Εικόνα 26: Χρωματική κατανομή SPL στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

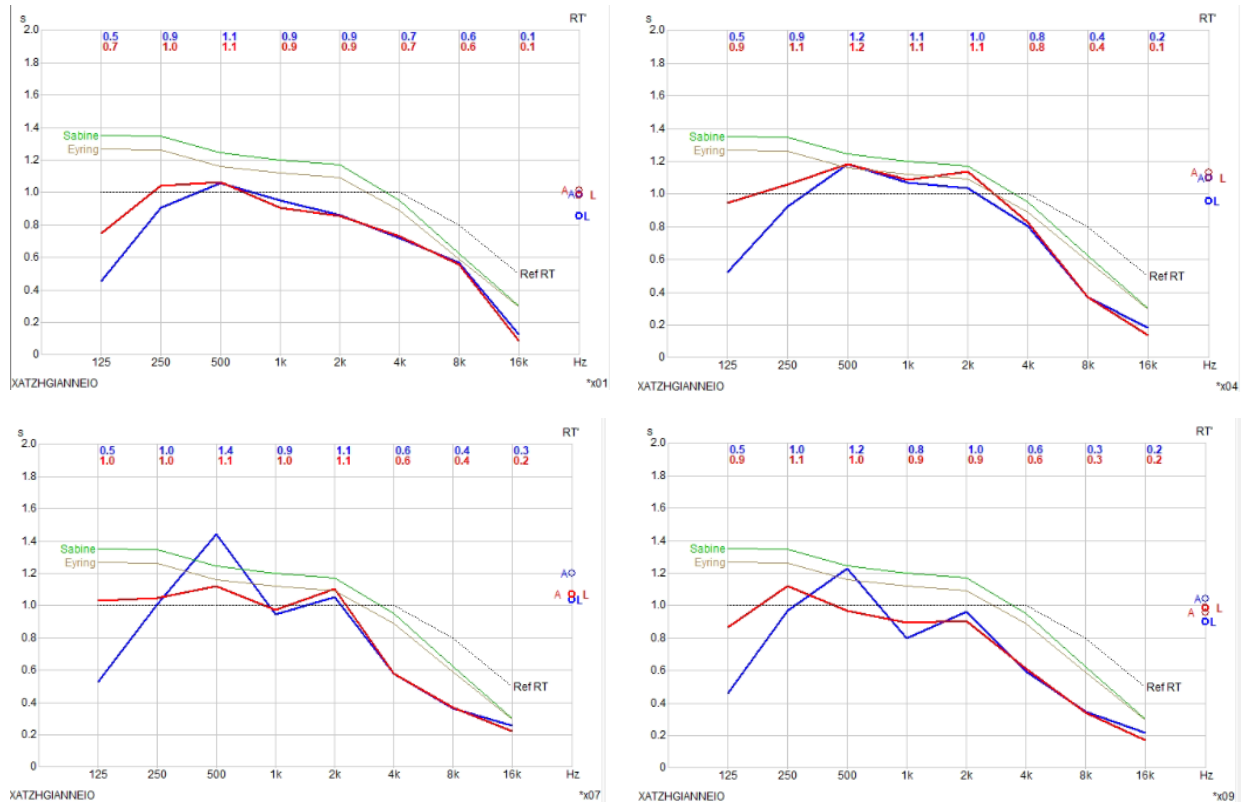
### 5.7.5 Δείκτης STI με Παρεμβάσεις για Μουσική

Ο δείκτης STI βρίσκεται κατά μέσο όρο στο 0,58 με ελάχιστη τιμή το 0,53 και μέγιστη το 0,63 όπως φαίνεται από την εικόνα 27. Και σε αυτή την περίπτωση παρά τη μικρή αύξηση του δείκτη STI η αίθουσα βρίσκεται στην κατανόηση της ομιλίας στην κατηγορία «καλή». Επιβεβαιώνεται έτσι πως η αίθουσα χρειάζεται και άλλη ακουστική παρέμβαση εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για συνέδρια και ομιλίες. Στην περίπτωση για μουσική δεν επηρεάζει αυτή η τιμή σε μεγάλο βαθμό τον ήχο που παράγεται. Υπάρχει ξανά μια ανομοιομορφία στην κατανομή του δείκτη STI καθώς οι πίσω κεντρικές θέσεις παρέχουν τιμές που προσεγγίζουν το 0,63 ενώ οι πρώτες κεντρικές μπροστινές θέσεις το 0,53. Αυτό συμβαίνει για τον ίδιο λόγο που προαναφέρθηκε στην περίπτωση πριν τις παρεμβάσεις δημιουργώντας την ανάγκη για μια νέα ακουστική παρέμβαση που θα μειώνει την ανομοιομορφία της κατανομής του δείκτη STI καθώς και την αύξησή του για ακόμη καλύτερη ποιότητα ομιλίας.



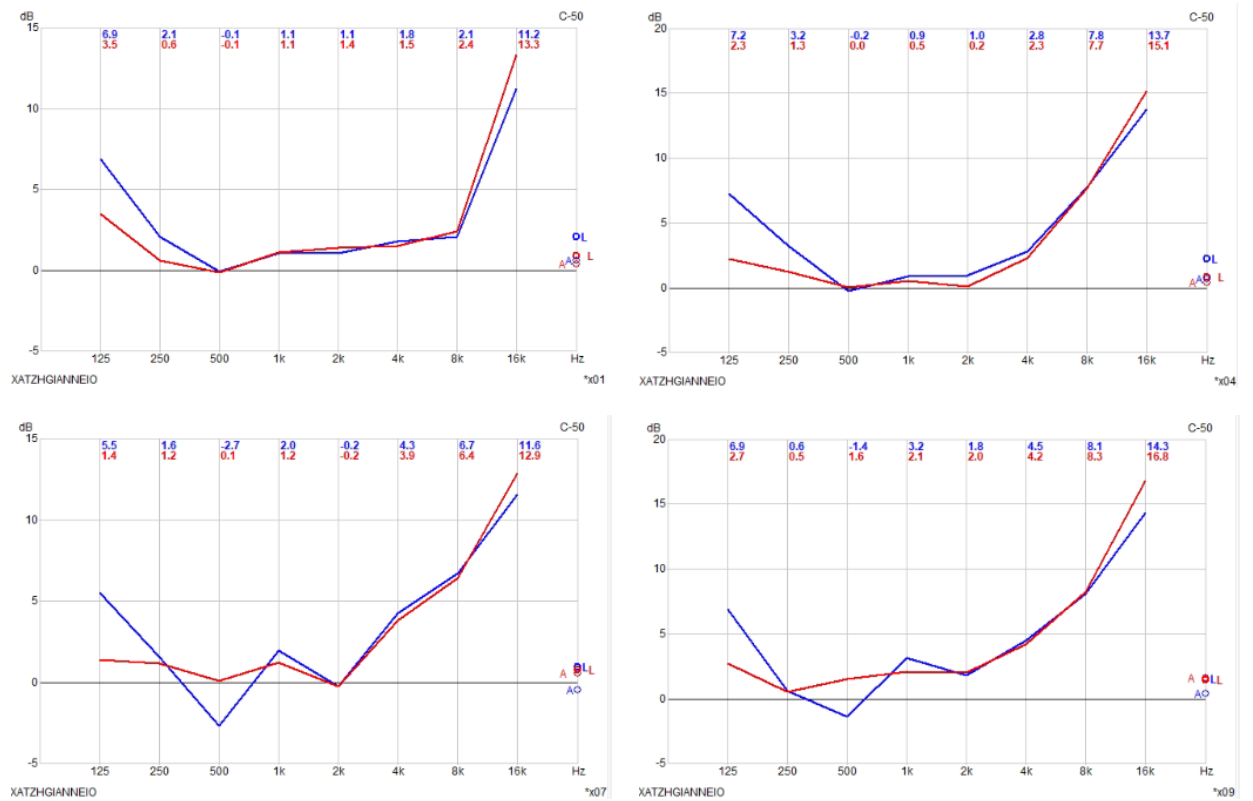
Εικόνα 27: Χρωματική κατανομή δείκτη STI στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.

### 5.7.6 Παράμετροι $RT_{60}$ , $C_{50}$ , $C_{80}$ , $D_{50}$ σε τέσσερις θέσεις με Παρεμβάσεις για Μουσική

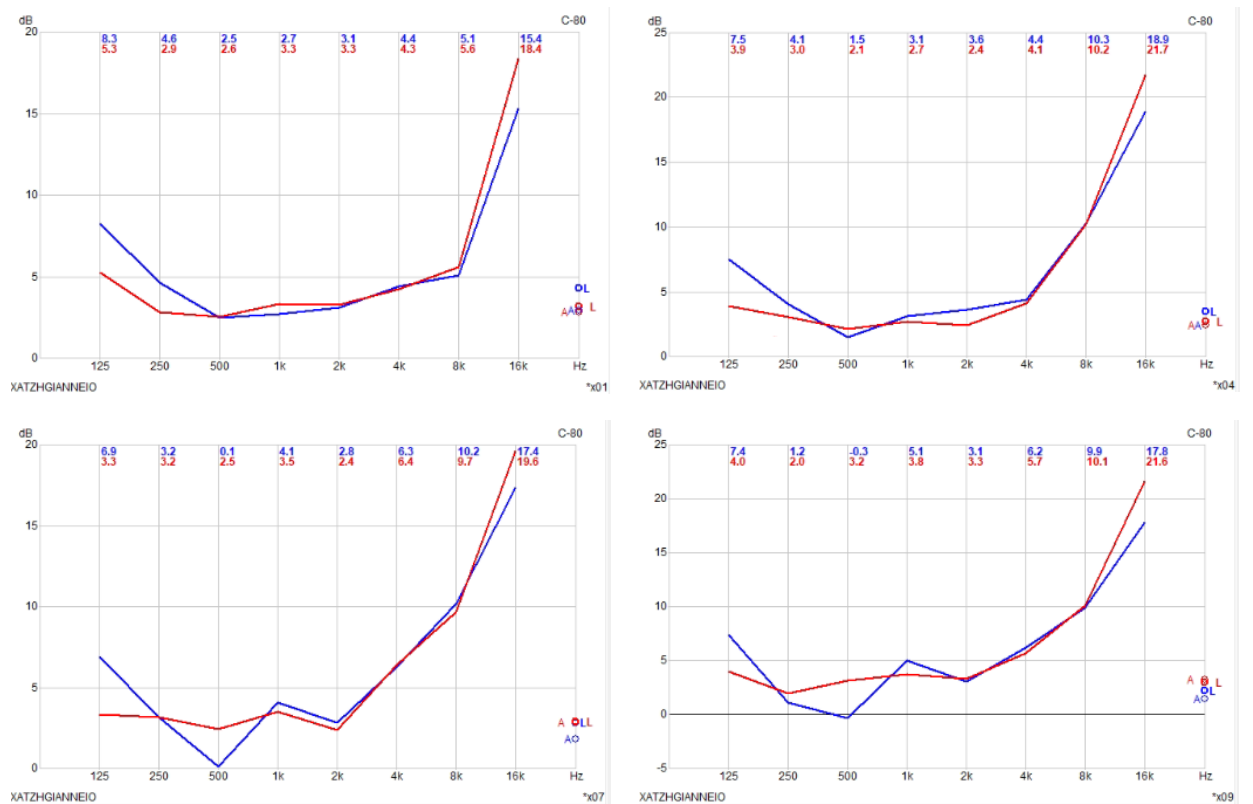


Εικόνα 28: Χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

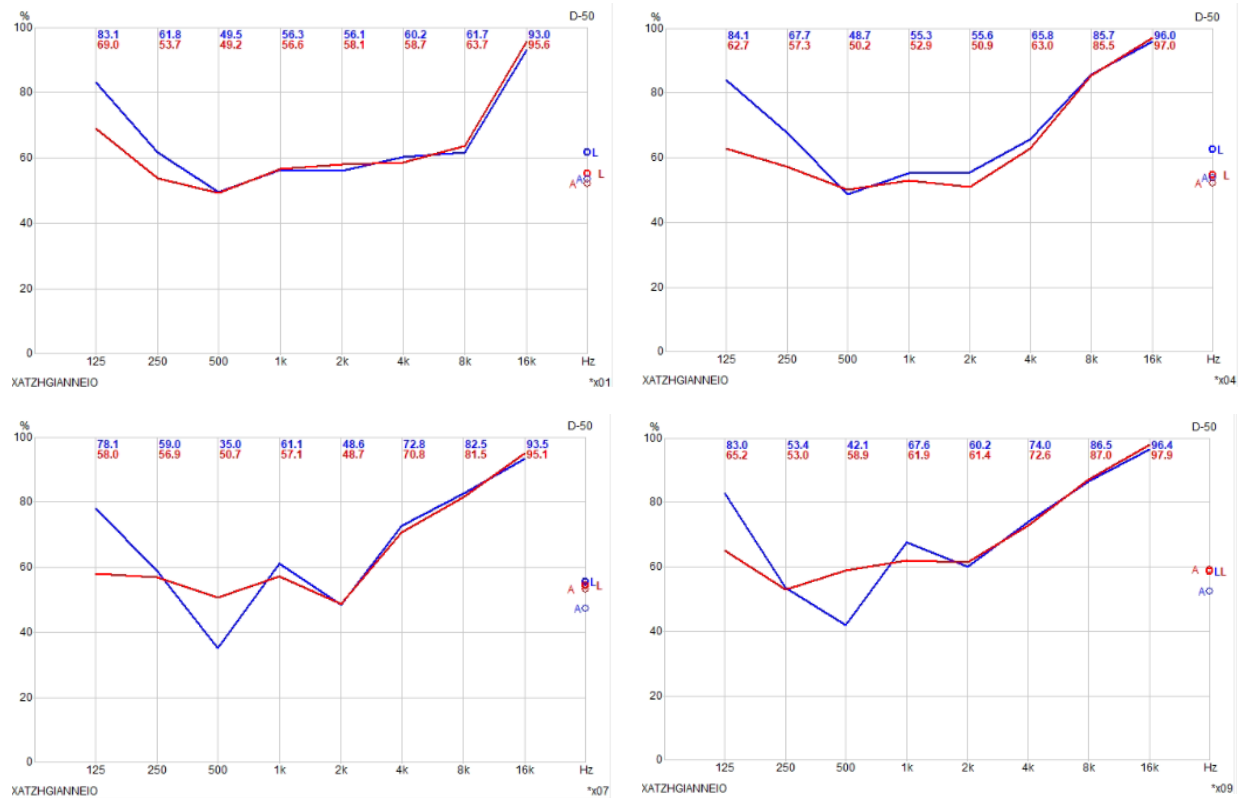
Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρου Εκδηλώσεων Πολλαπλών Χρήσεων



Εικόνα 29: Ευκρίνεια C<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.



Εικόνα 30: Ευκρίνεια C<sub>80</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.



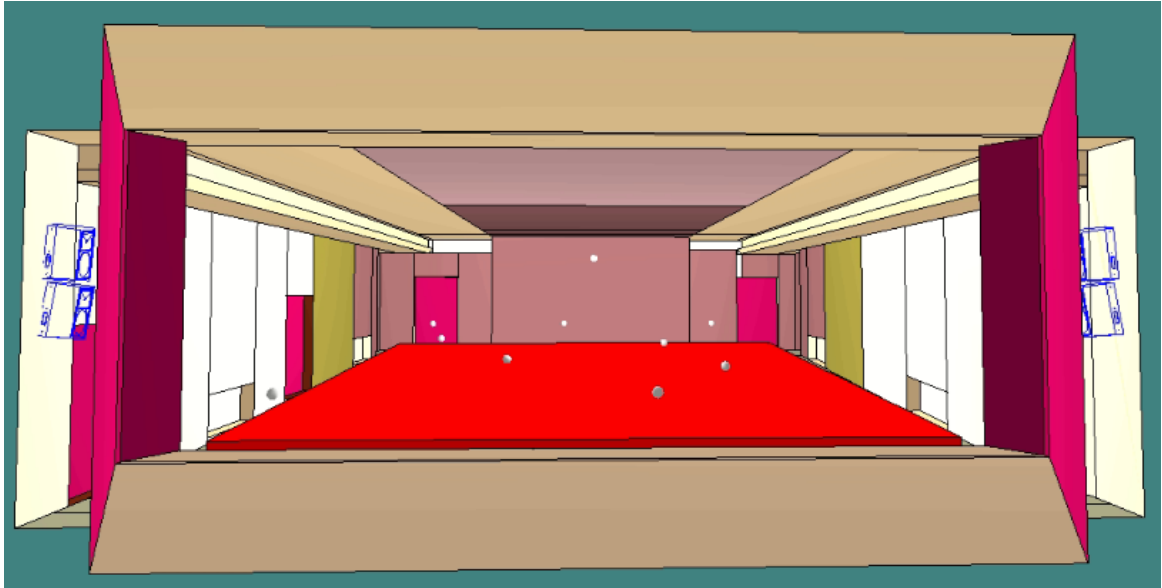
Εικόνα 31: Διακριτότητα D<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για μουσική.

## 5.8 Προσομοίωση Μοντέλου με Ρυθμιζόμενη Παρέμβαση για Ομιλία

Μια από τις καθημερινές χρήσεις της αίθουσας είναι τα πολιτιστικά, πολιτικά, επιστημονικά και εκπαιδευτικά συνέδρια και ομιλίες. Αυτό προϋποθέτει πως ο χώρος πρέπει να έχει έναν χαμηλό χρόνο αντήχησης για να ακούγονται κατανοητά οι ομιλητές. Λόγω του ότι είναι ένας χώρος πολλαπλών χρήσεων, έπρεπε να βρεθεί μια λύση η οποία θα προσαρμόζει τον χώρο όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ομιλία. Μετά από προσομοιώσεις του χώρου στο CATT-Acoustic βρέθηκε πως η καλύτερη επιλογή είναι να χρησιμοποιείται ο χώρος με όλες τις κουρτίνες κλειστές. Αυτό μείωσε και άλλο το χρόνο αντήχησης της αίθουσας αλλά δημιούργησε μια ανομοιομορφία του χρόνου αντήχησης στις μπροστινές κεντρικές θέσεις. Έτσι, μετά από διάφορες δοκιμές με παρεμβάσεις απορροφητικών υλικών στο χώρο βρέθηκε μια λύση κάνοντας την αίθουσα ακόμη πιο κατάλληλη για ομιλίες ιδίως όταν πρόκειται να παραβρίσκεται λίγος κόσμος. Με την κατασκευή ενός μηχανισμού που θα ανοιγοκλείνει ένα ρυθμιζόμενο διάτρητο πάνελ με μεγάλη απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες, βελτιώνεται κατά πολύ ο χρόνος αντήχησης των μπροστινών θέσεων. Ο μηχανισμός αυτός θα σύρει το πάνελ όταν δεν χρειάζεται πάνω από την κεντρική γυροσανίδα που τοποθετήθηκε ως μόνιμη παρέμβαση. Στον πίνακα 3 φαίνεται η απορρόφηση ανά συχνότητα του ακουστικού πάνελ που βρέθηκε από τη βιβλιογραφία και στην εικόνα 32 παρουσιάζεται αυτό το πάνελ στο χώρο με γκρι ανοιχτό χρώμα.

Πίνακας 3: Συντελεστής απορρόφησης ανά συχνότητα του διάτρητου ρυθμιζόμενου πάνελ.[6]

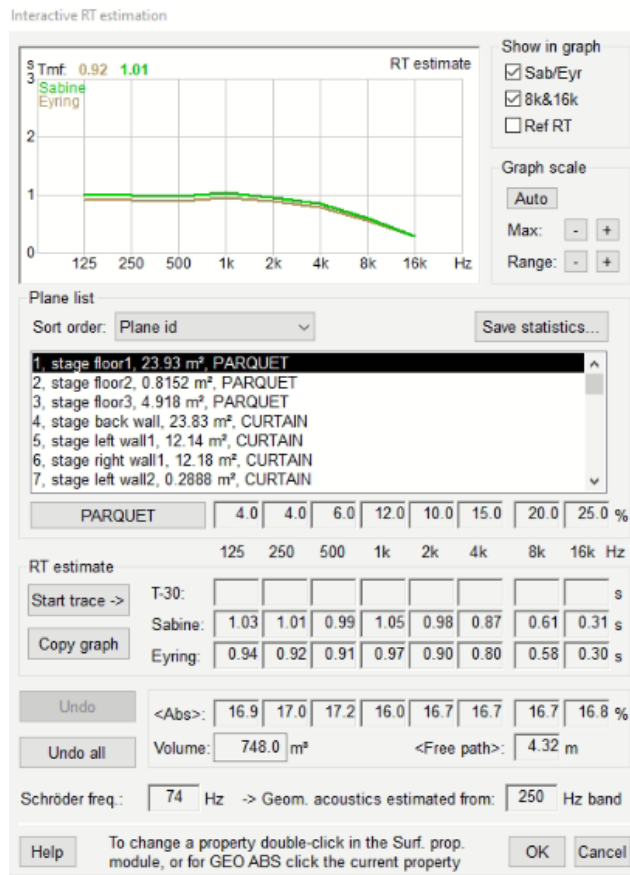
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Διάτρητο πάνελ	0.98	0.88	0.52	0.21	0.16	0.14



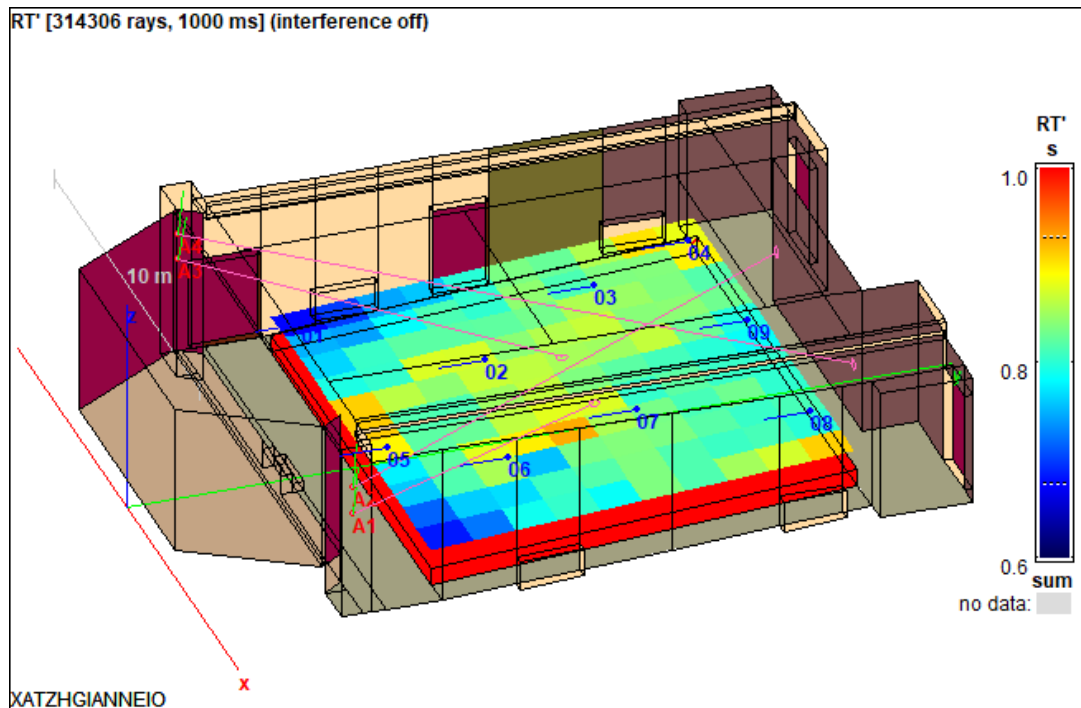
Εικόνα 32: Παρέμβαση με επιπλέον ρυθμιζόμενο ακουστικό πάνελ (γκρι ανοιχτό χρώμα) πάνω από το κεντρικό μπροστινό μέρος του ακροατηρίου για χρήση του χώρου για ομιλίες.

### 5.8.1 Χρόνος Αντήχησης $RT_{60}$ με Παρέμβαση για Ομιλία

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της εικόνας 33, ο χρόνος αντήχησης μειώθηκε και έφτασε σε κατάλληλα επίπεδα για χρήσης της αίθουσας για συνέδρια και ομιλίες. Ο μέσος χρόνος αντήχησης κατά Sabine είναι 1.01sec και κατά Eyring είναι 0.92sec.



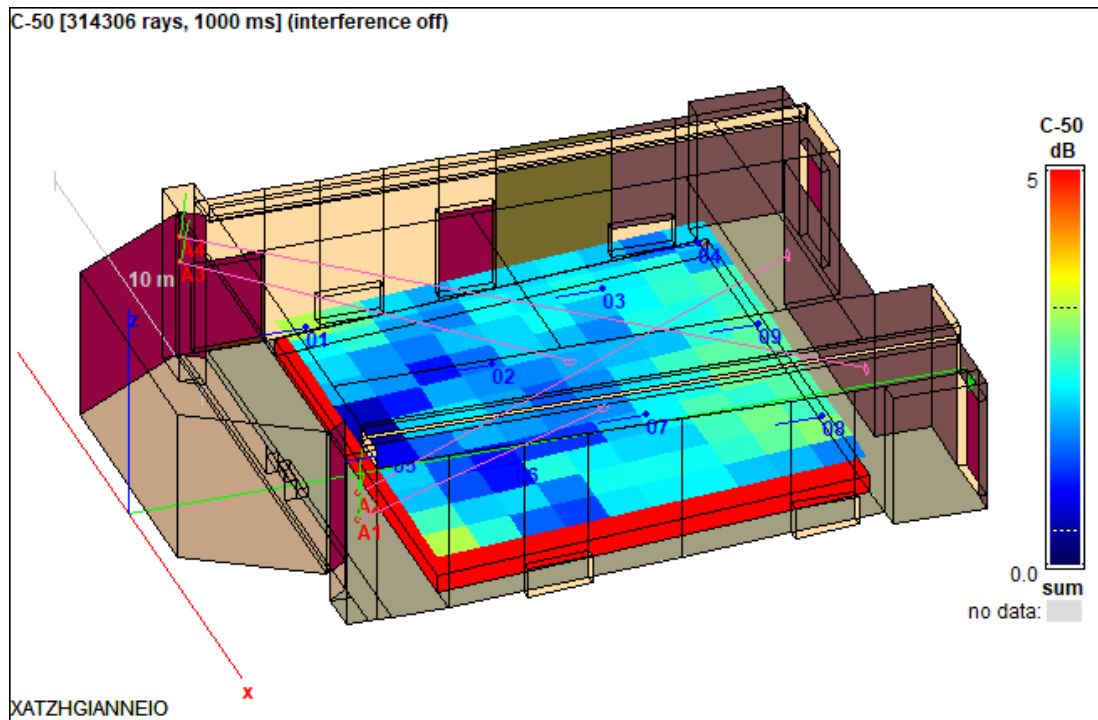
Εικόνα 33: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου με παρέμβαση για ομιλία στο CATT-Acoustic.



Εικόνα 34: Χρωματική κατανομή χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

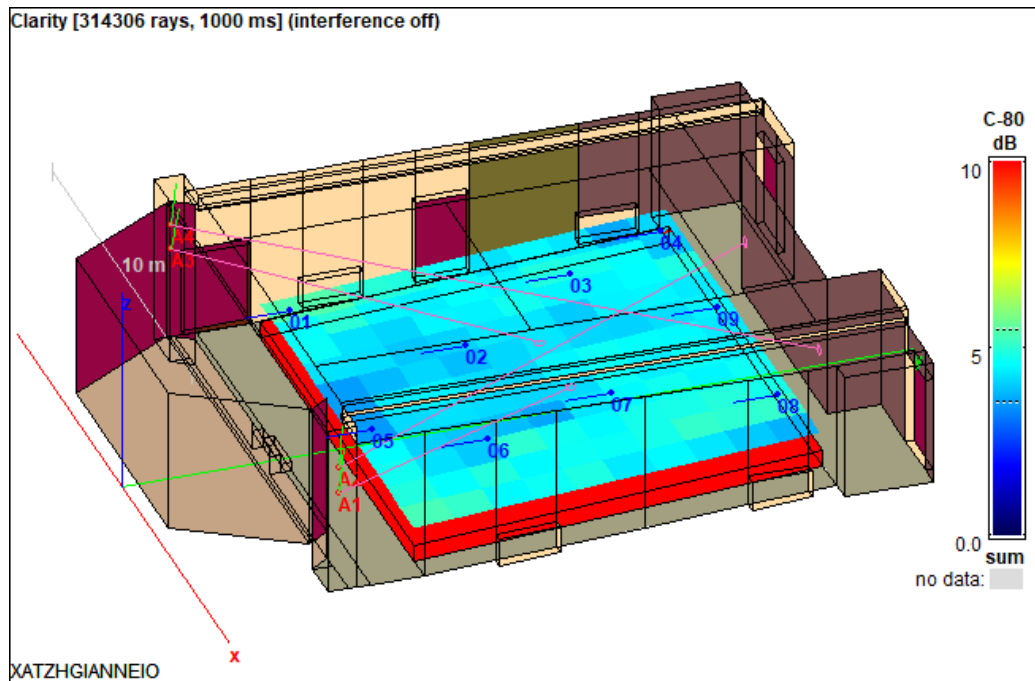
### 5.8.2 Ευκρίνεια $C_{50}$ και $C_{80}$ με Παρέμβαση για Ομιλία

Το ποσό της ευκρίνειας  $C_{50}$  στο σύνολο του ακροατήριου κυμαίνεται μεταξύ του 0.5dB και 3.3dB όπως φαίνεται και στην εικόνα 35. Παρατηρείται μια αύξηση της τιμής του  $C_{50}$  από την περίπτωση που η αίθουσα χρησιμοποιείται για μουσική. Αντίστοιχα, αύξηση παρατηρείται και στην ευκρίνεια  $C_{80}$  στο σύνολο του ακροατηρίου καθώς κυμαίνεται πλέον μεταξύ των τιμών 3,1dB και 5,5dB όπως φαίνεται στην εικόνα 36. Η παρέμβαση με το ρυθμιζόμενο πάνελ σε συνδυασμό με τις προηγούμενες παρεμβάσεις βελτίωσε ακόμη περισσότερο την ακουστική του χώρου όταν πρόκειται να χρησιμοποιείται για ομιλίες και συνέδρια.



Εικόνα 35: Χρωματική κατανομή  $C_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

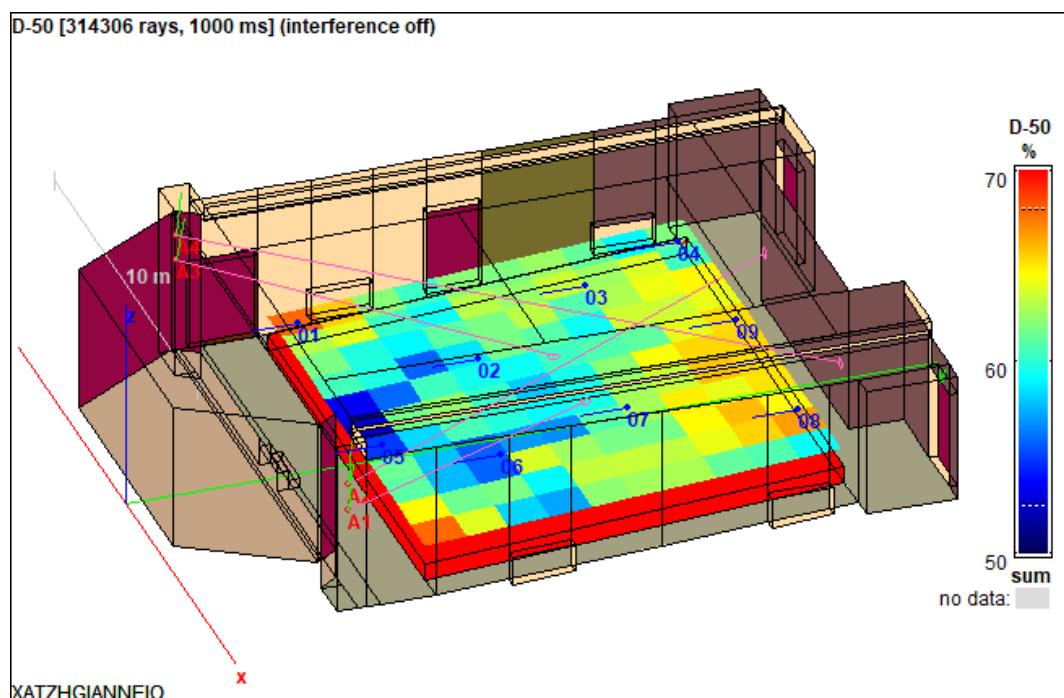




Εικόνα 36: Χρωματική κατανομή  $C_{80}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

### 5.8.3 Διακριτότητα $D_{50}$ με Παρέμβαση για Ομιλία

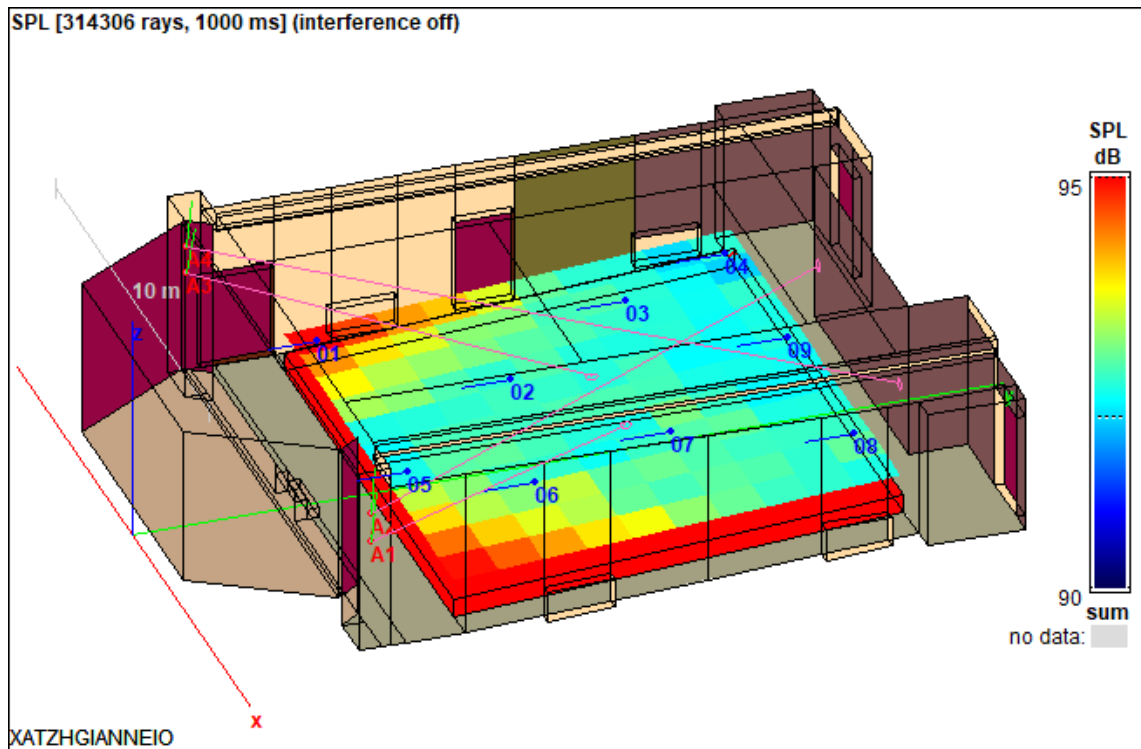
Το ποσοστό διακριτότητας  $D_{50}$  στο σύνολο του ακροατηρίου κυμαίνεται μεταξύ του 52,8% και 68% όπως φαίνεται από την εικόνα 37. Υπάρχει βελτίωση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση και καθιστά την αίθουσα ικανή για την καταληπτότητα της ομιλίας. Όσον αφορά την κατανομή του ποσοστού  $D_{50}$  στο ακροατήριο παρατηρούμε και πάλι πως οι μπροστινές κεντρικές θέσεις δεν έχουν τόσο καλό ποσοστό  $D_{50}$  σε σχέση με τις πίσω κεντρικές θέσεις.



Εικόνα 37: Χρωματική κατανομή  $D_{50}$  στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.  
ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Τσιτσιρίγκος Κωνσταντίνος

### 5.8.4 Στάθμη Πίεσης SPL με Παρέμβαση για Ομιλία

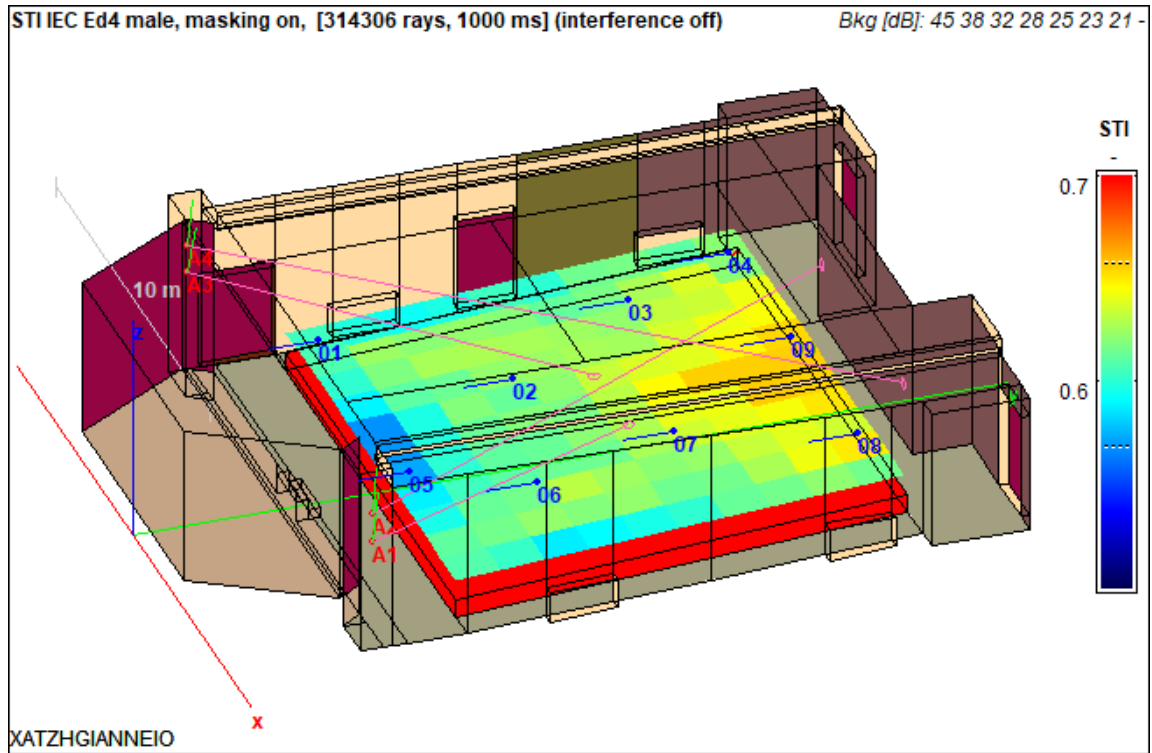
Η τιμή του SPL στο χώρο του ακροατηρίου κυμαίνεται μεταξύ του 92,1dB και 95dB το οποίο είναι στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη περίπτωση δείχνοντας πως παρά την νέα προσθήκη του ρυθμιζόμενου ακουστικού πάνελ δεν επηρεάστηκε η ηχητική στάθμη. Παρατηρούνται και σε αυτή την περίπτωση πως υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές της ηχητικής πίεσης στις αριστερές και δεξιές μπροστινές θέσεις του ακροατηρίου.



Εικόνα 38: Χρωματική κατανομή SPL στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

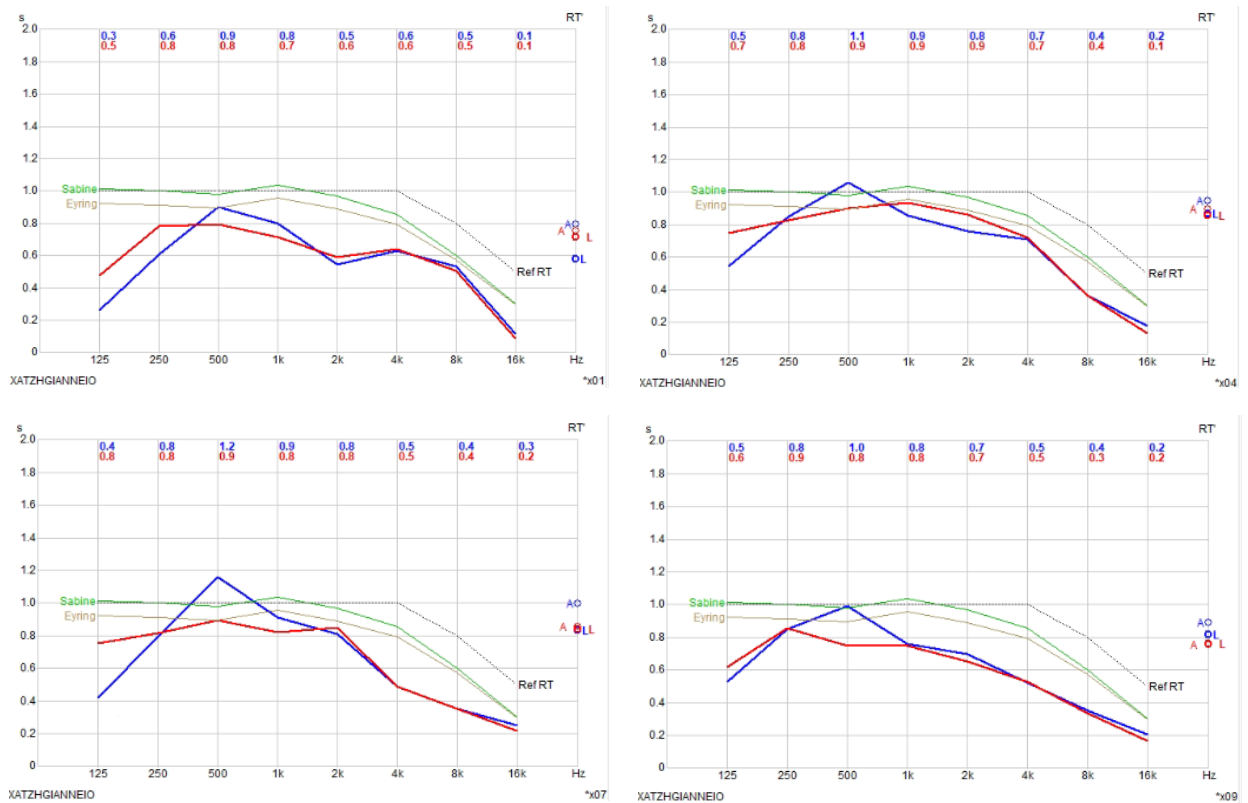
### 5.8.5 Δείκτης STI με Παρέμβαση για Ομιλία

Ο δείκτης STI βρίσκεται κατά μέσο όρο στο 0,61 με ελάχιστη τιμή το 0,58 και μέγιστη το 0,66 όπως φαίνεται από την εικόνα 39. Υπάρχει μια αύξηση του δείκτη STI από την προηγούμενη περίπτωση και πλέον ο χώρος ταξινομείται στην κλίμακα αξιολόγησης της κατανόησης της ομιλίας στο «πολύ καλή». Ακόμη, η ανομοιομορφία στην κατανομή του δείκτη STI στο ακροατήριο μειώθηκε ελαφρώς αλλά και πάλι παρατηρείται πως οι μπροστινές κεντρικές θέσεις έχουν χειρότερη ακουστική από τις πίσω κεντρικές θέσεις.



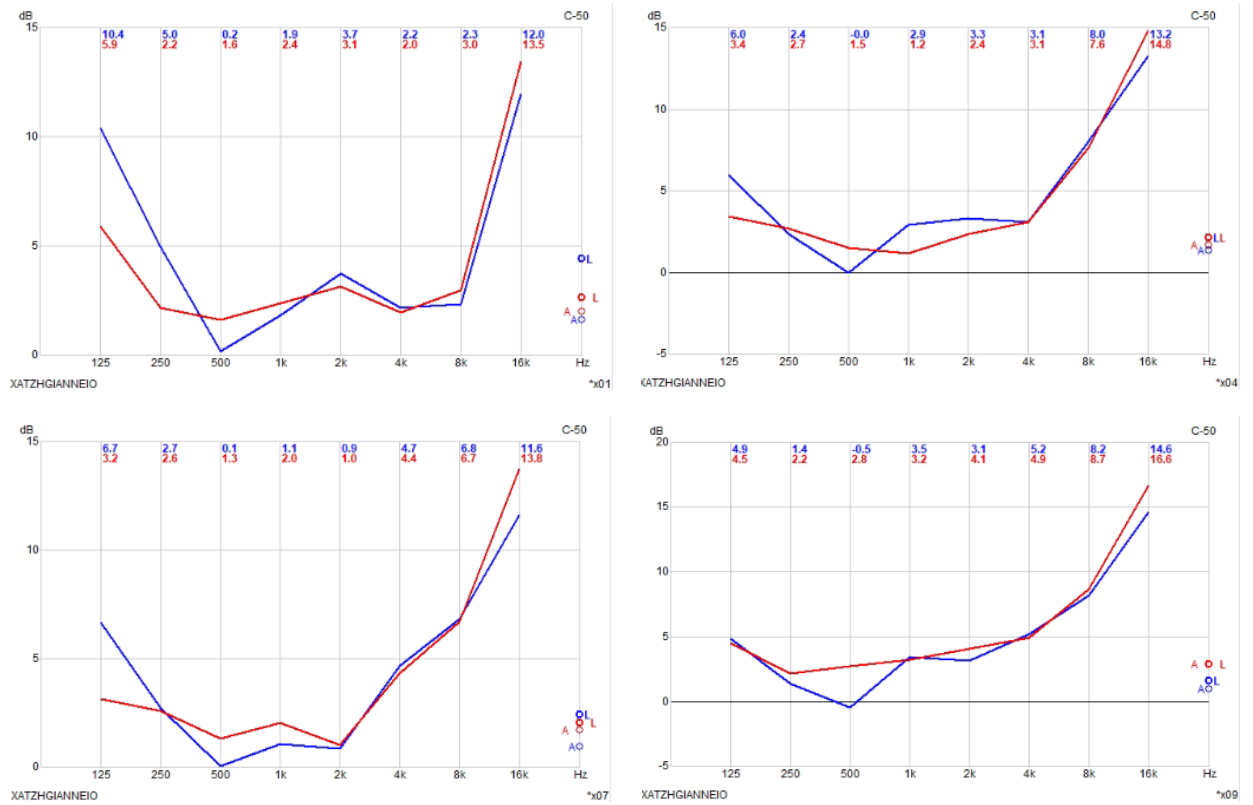
Εικόνα 39: Χρωματική κατανομή STI στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία.

### 5.8.6 Παράμετροι $RT_{60}$ , $C_{50}$ , $C_{80}$ , $D_{50}$ σε τέσσερις Θέσεις με Παρέμβαση για Ομιλία

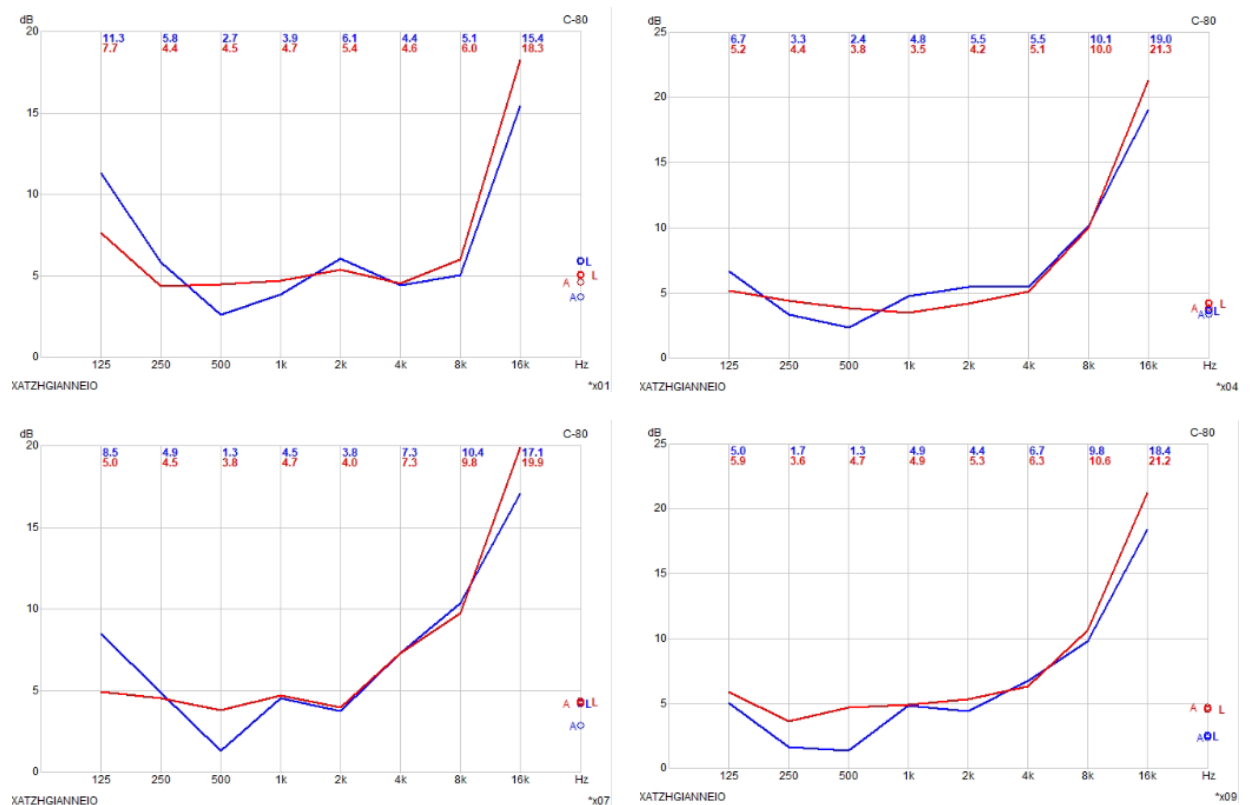


Εικόνα 40: Χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

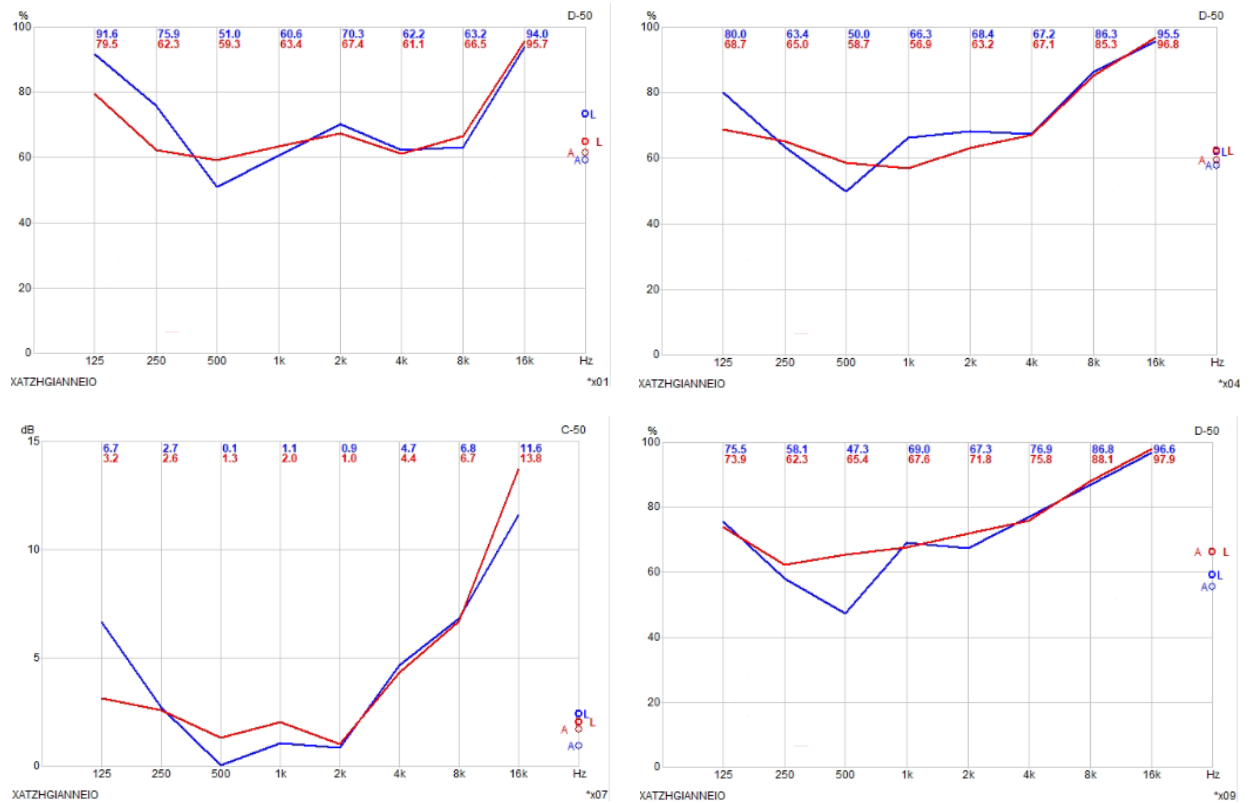
Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρου Εκδηλώσεων Πολλαπλών Χρήσεων



Εικόνα 41: Ευκρίνεια C<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.



Εικόνα 42: Ευκρίνεια C<sub>80</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.



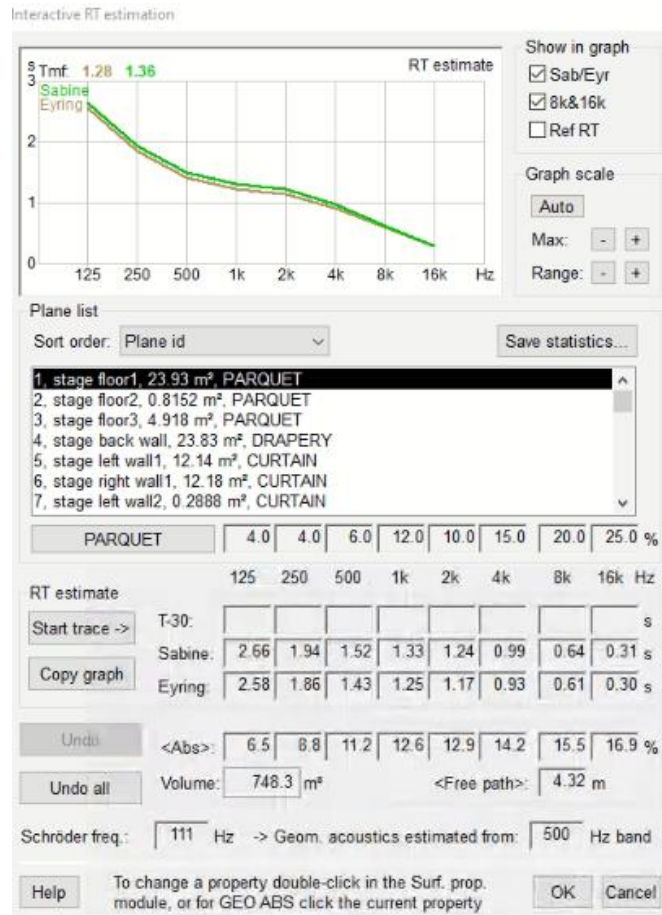
Εικόνα 43: Διακριτότητα  $D_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με απορρόφηση για ομιλία.

## 5.9 Προσομοίωση Μοντέλου Χωρίς Παρεμβάσεις με Φυσική Πηγή

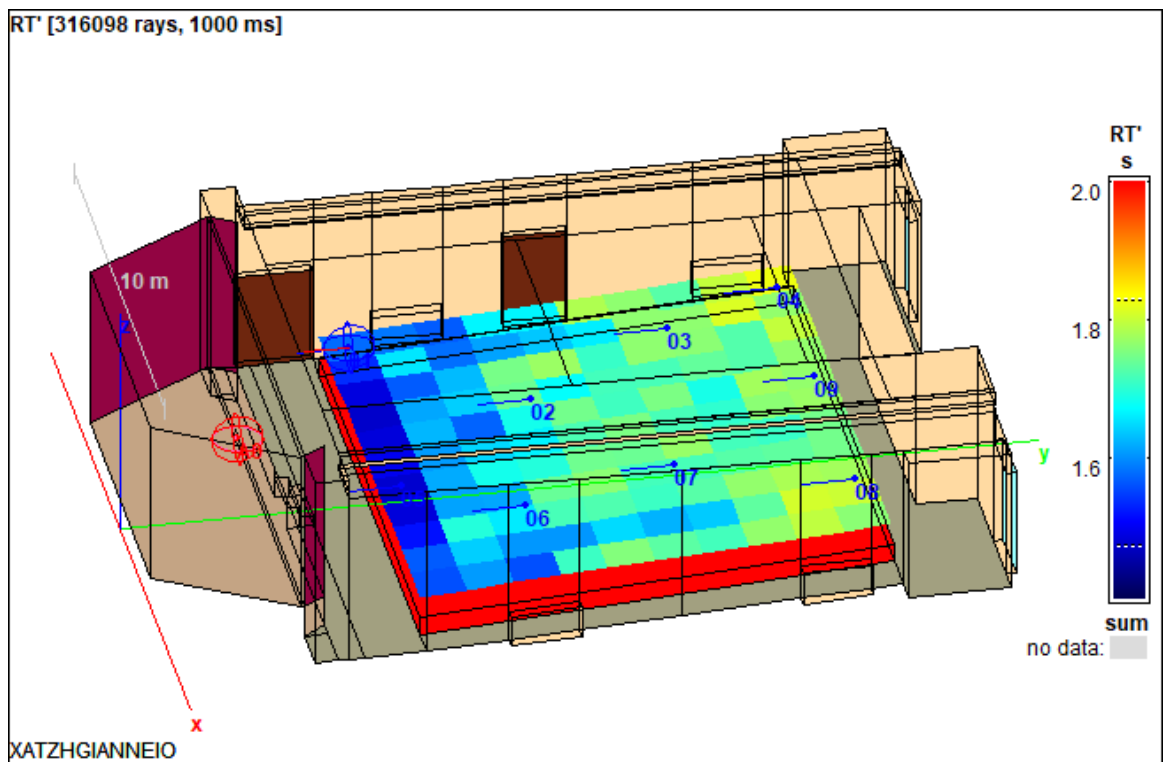
Ο χώρος περιείχε εξαρχής ηλεκτροακουστική εγκατάσταση αλλά δεν υπάρχουν έγγραφα που αναφέρουν ότι έχει γίνει ηλεκτροακουστική μελέτη. Έτσι, για να επιβεβαιωθεί ότι ο χώρος χρειάζεται ηλεκτροακουστική υποβοήθηση έπρεπε να παρθούν οι μετρήσεις με χρήση μιας φυσικής πηγής (π.χ. ομιλητής). Ο ομιλητής τοποθετήθηκε στο κέντρο της σκηνής και σε απόσταση 2 μέτρων από τον πίσω τοίχο. Στη συνέχεια πάρθηκαν εκ νέου οι παράμετροι για την περίπτωση που ο χώρος δεν έχει υποστεί κάποια παρέμβαση.

### 5.9.1 Χρόνος Αντήχησης $RT_{60}$ με Φυσική Πηγή

Τα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου στο CATT-Acoustic φαίνονται αναλυτικά ανά συχνότητα στην εικόνα 44. Ο μέσος χρόνος αντήχησης της αίθουσας κατά Sabine είναι 1.36sec ενώ κατά Eyring είναι 1.28sec. Γίνεται αντιληπτό πώς η αίθουσα έχει και σε αυτή την περίπτωση υψηλό χρόνο αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες και άρα ο ηλεκτροακουστικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει ο χώρος ήταν απαραίτητος. Αυτό παρατηρείται ακόμη και από την κατανομή του χρόνου αντήχησης, όπου οι πρώτες θέσεις έχουν χαμηλότερο χρόνο αντήχησης από τις κεντρικές και πίσω.



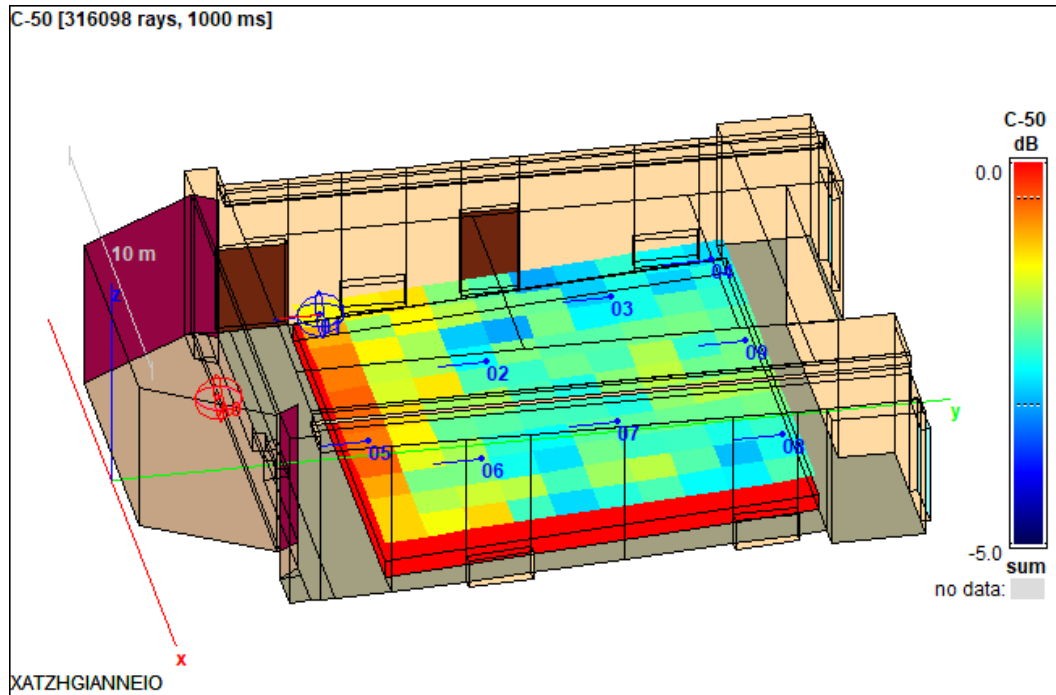
Εικόνα 44: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  του χώρου με φυσική πηγή στο CATT-Acoustic.



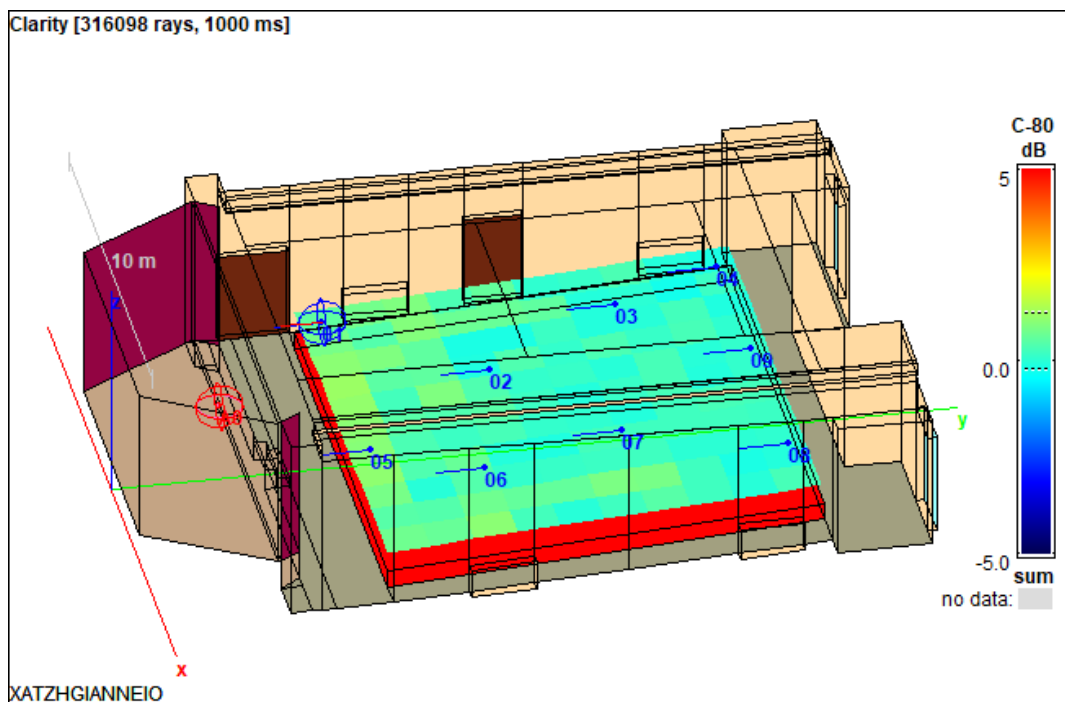
Εικόνα 45: Χρωματική κατανομή του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

### 5.9.2 Ευκρίνεια C<sub>50</sub> και C<sub>80</sub> με Φυσική Πηγή

Το ποσό της ευκρίνειας C<sub>50</sub> στο σύνολο του ακροατήριου κυμαίνεται μεταξύ του -3,1dB και -0,6dB όπως φαίνεται στην εικόνα 46. Αντίστοιχα το ποσό της ευκρίνειας C<sub>80</sub> στο ακροατήριο κυμαίνεται μεταξύ -0,2dB και 1,3dB όπως φαίνεται από την εικόνα 47. Και στις δύο περιπτώσεις η ευκρίνεια βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα και δεν καθιστά την αίθουσα κατάλληλη για μουσική και ομιλία.



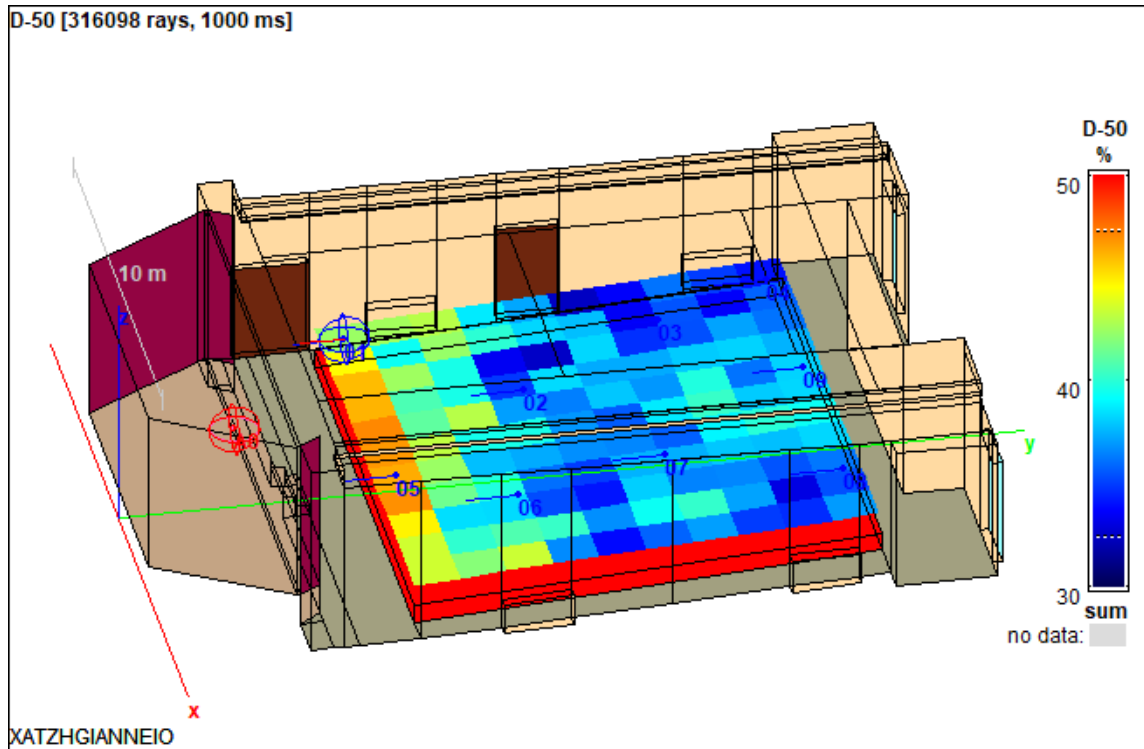
Εικόνα 46: Χρωματική κατανομή C<sub>50</sub> στο ακροατήριο με φυσική πηγή.



Εικόνα 47: Χρωματική κατανομή C<sub>80</sub> στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

### 5.9.3 Διακριτότητα D<sub>50</sub> με Φυσική Πηγή

Η διακριτότητα D<sub>50</sub> στο ακροατήριο είναι σε πολύ χαμηλό ποσοστό στο μεγαλύτερο μέρος του ακροατηρίου, κυμαινόμενη περίπου μεταξύ του 35% και 45%. Μόνο οι μπροστινές θέσεις έχουν καλύτερο ποσοστό διακριτότητας, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ του 40% και 47% και οφείλεται στο ότι βρίσκονται κοντά στον ομιλητή.

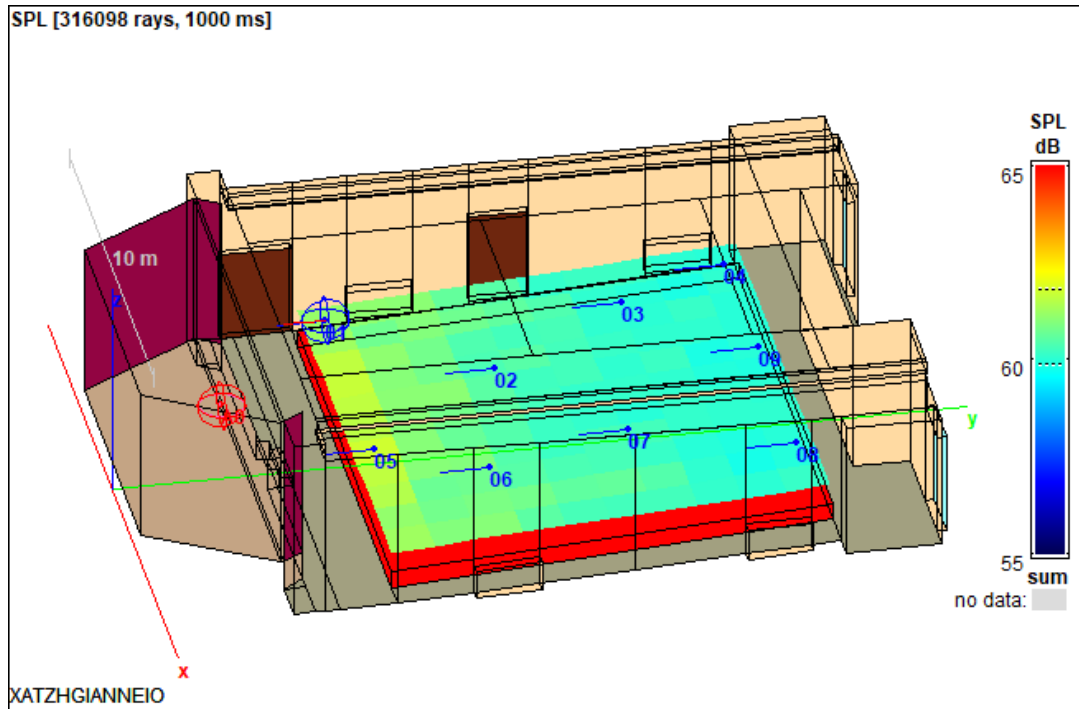


Εικόνα 48: Χρωματική κατανομή D<sub>50</sub> στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

### 5.9.4 Στάθμη Πίεσης SPL με Φυσική Πηγή

Η τιμή του SPL στο ακροατήριο παρατηρείται από την εικόνα 49 πως κυμαίνεται μεταξύ του 60dB και 62dB, η οποία είναι αρκετά χαμηλή και οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ενίσχυση του ηχητικού σήματος στο συγκεκριμένο χώρο είναι απαραίτητη.

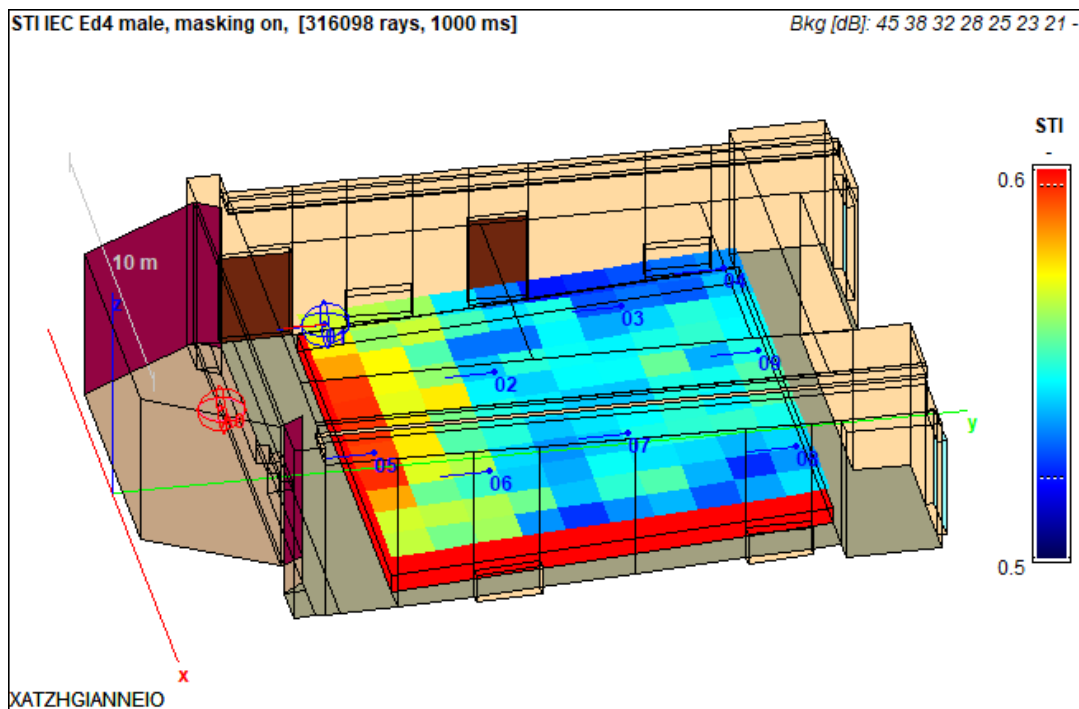




Εικόνα 49: Χρωματική κατανομή στάθμης πίεσης SPL στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

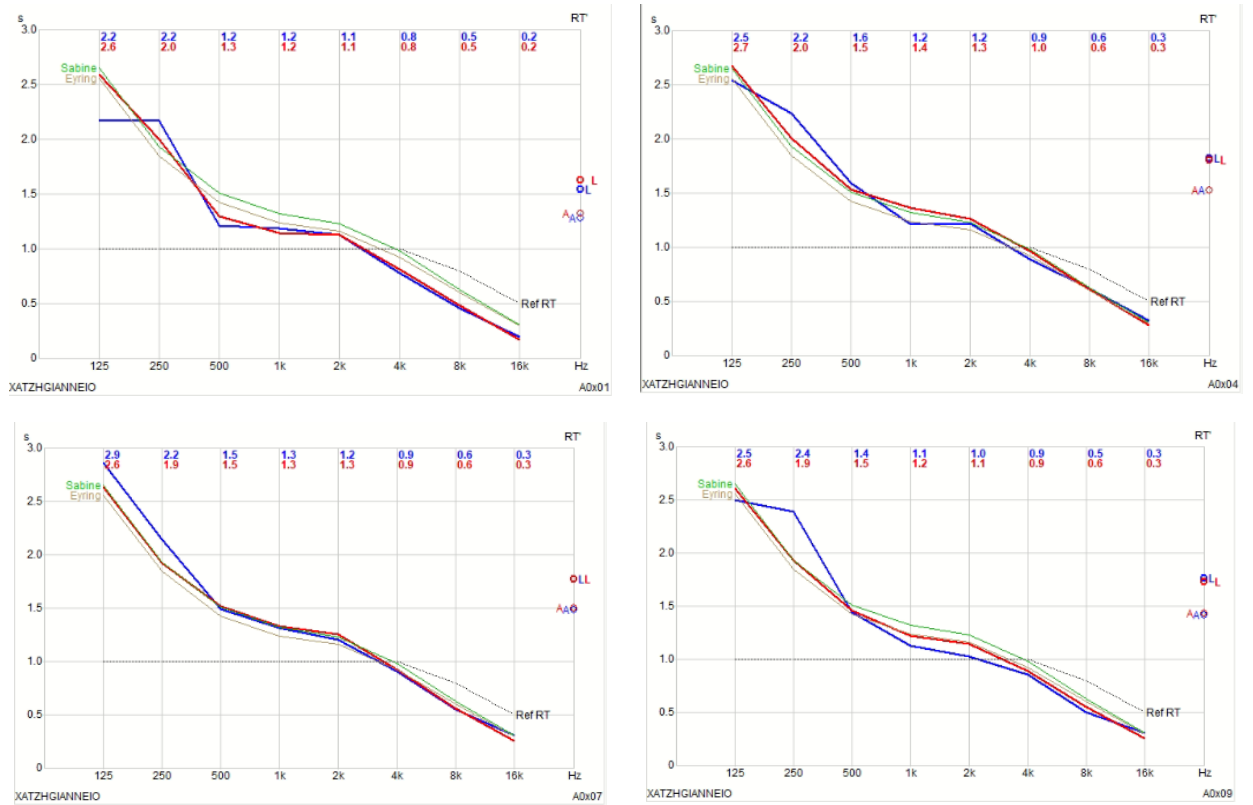
### 5.9.5 Δείκτης STI με Φυσική Πηγή

Ο δείκτης STI, όπως φαίνεται από την εικόνα 50, βρίσκεται μεταξύ του 0,5 και 0,6. Οι υψηλότερες τιμές επικρατούν στις μπροστινές κεντρικές θέσεις κάτι το οποίο είναι λογικό διότι είναι πιο κοντά στον ομιλητή. Επομένως και από το αποτέλεσμα του δείκτη STI επιβεβαιώνεται πως για το συγκεκριμένο χώρο χρειάζεται να γίνει εισαγωγή ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης.

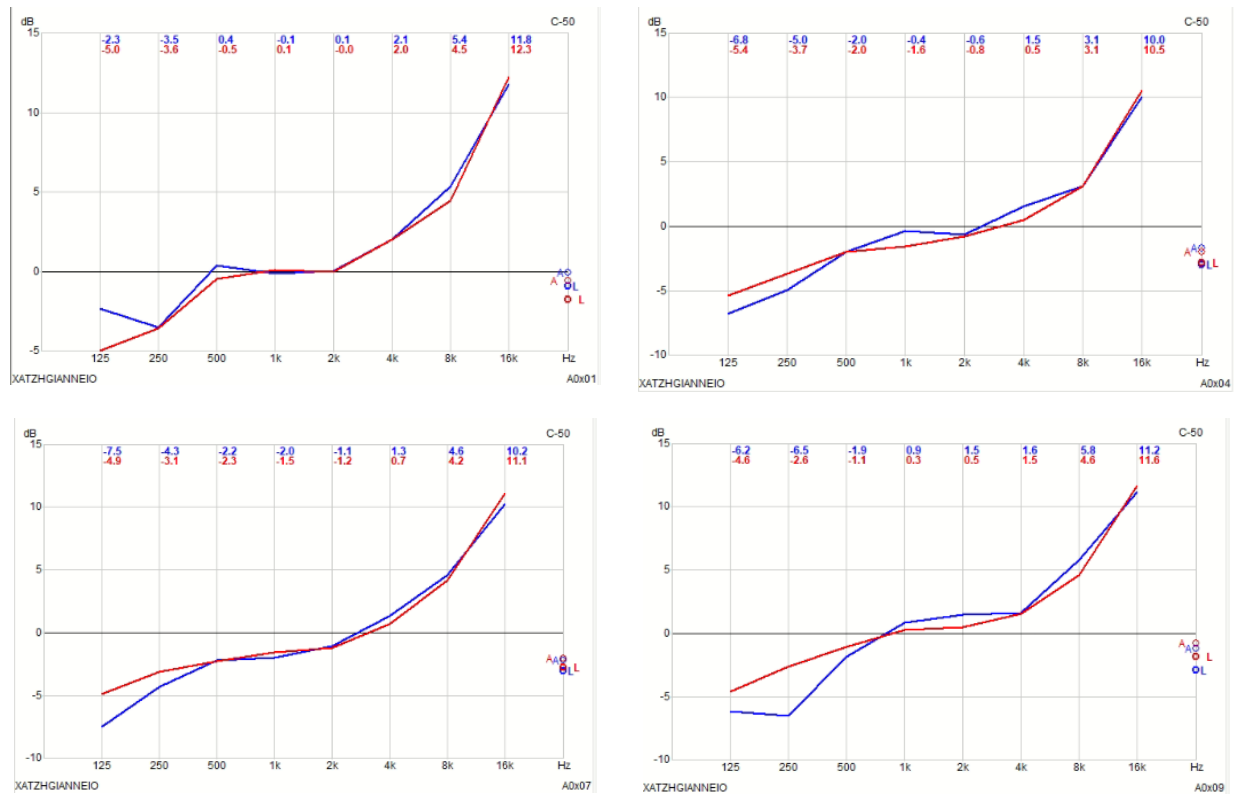


Εικόνα 50: Χρωματική κατανομή του δείκτη STI στο ακροατήριο με φυσική πηγή.

### 5.9.6 Παράμετροι $RT_{60}$ , $C_{50}$ , $C_{80}$ , $D_{50}$ σε τέσσερις θέσεις με Φυσική Πηγή

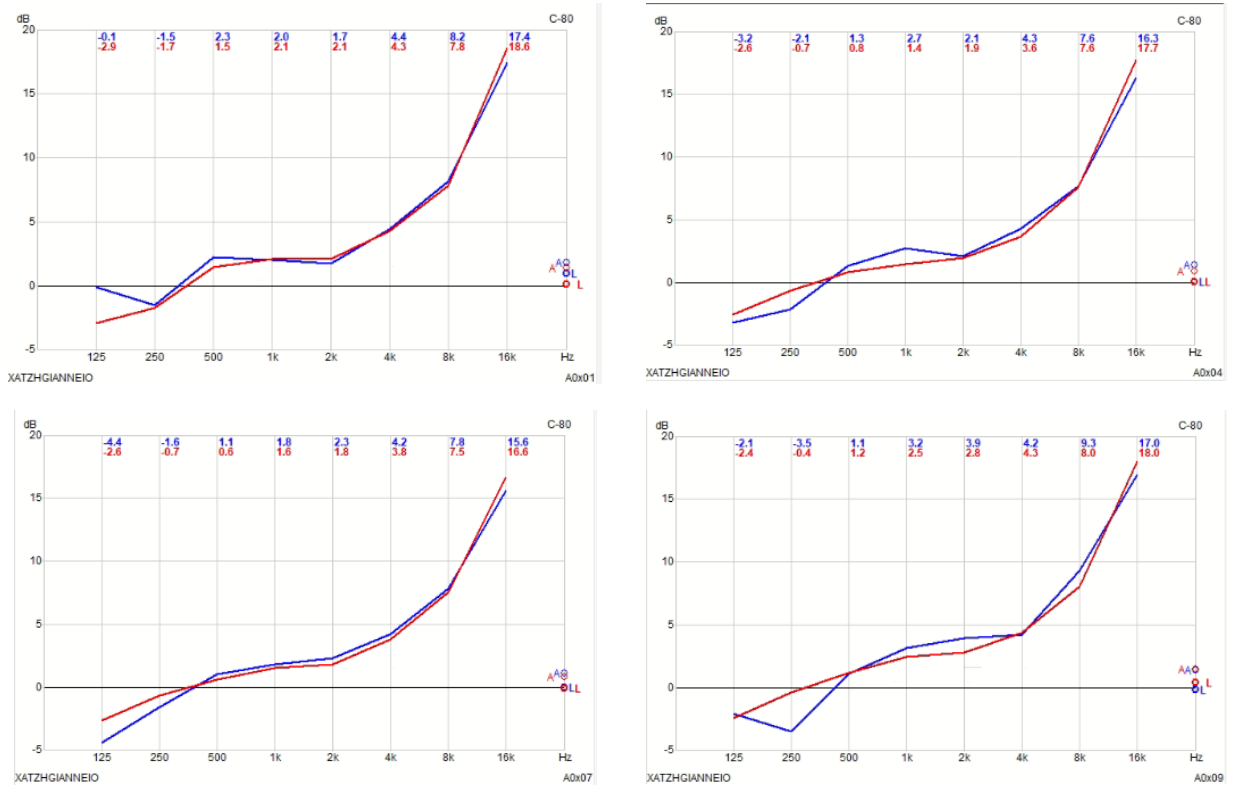


Εικόνα 51: Χρόνοι αντήχησης  $RT_{60}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

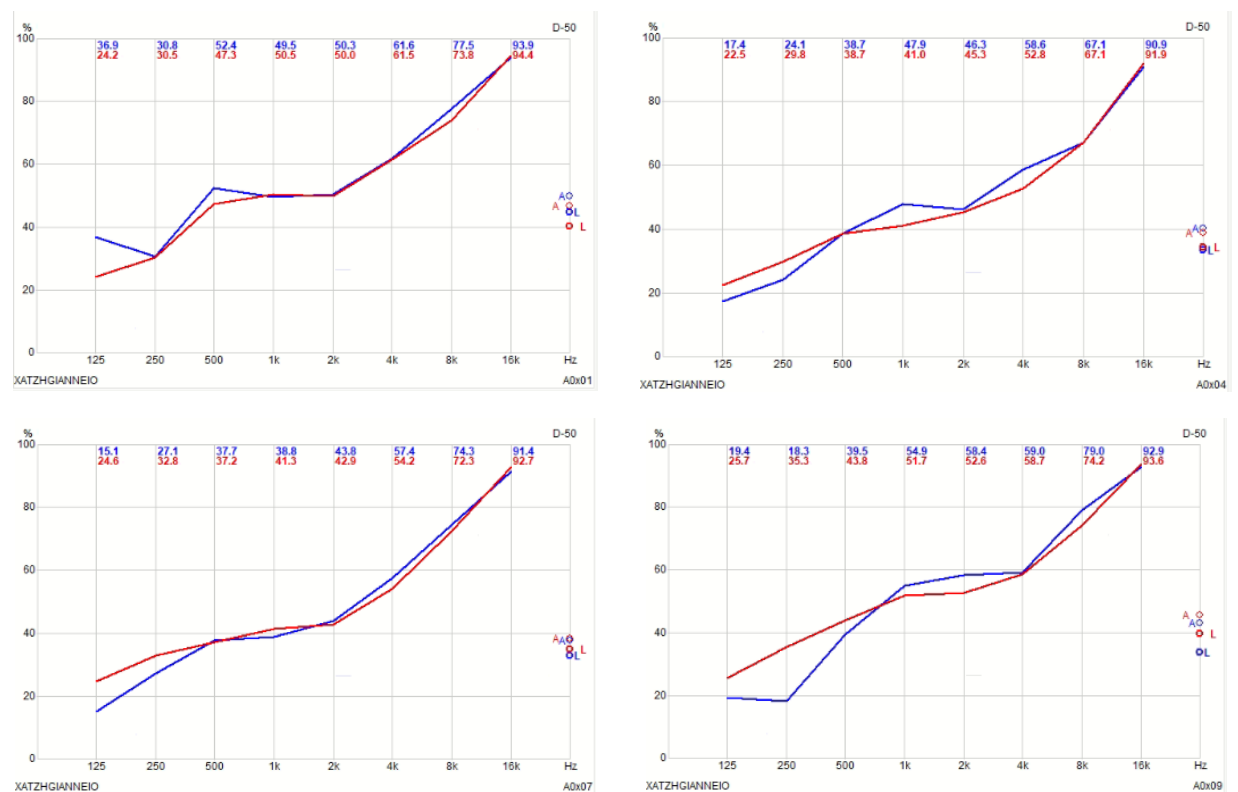


Εικόνα 52: Ευκρίνεια  $C_{50}$  ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρου Εκδηλώσεων Πολλαπλών Χρήσεων



Εικόνα 53: Ευκρίνεια C<sub>80</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.



Εικόνα 54: Διακρίτοτητα D<sub>50</sub> ανά συχνότητα σε τέσσερις θέσεις με φυσική πηγή.

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Ηλεκτροακουστική Μελέτη

Στη σημερινή εποχή υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ ακουστικής δωματίου και ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης. Έτσι, σπάνια θα βρεθεί αίθουσα συνεδριάσεων μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους που να μην είναι εξοπλισμένη με σύστημα ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης για την ενίσχυση της ομιλίας. Δεν έχει σημασία αν αυτή η αίθουσα είναι εκκλησία, συνεδριακό ή αίθουσα πολλαπλών χρήσεων. Πολλοί ομιλητές και τραγουδιστές δεν μπορούν, αλλά και δεν θέλουν να καταβάλουν τόση μεγάλη προσπάθεια έτσι ώστε να καταφέρουν να εκφραστούν ξεκάθαρα απέναντι στους ακροατές χωρίς ηλεκτροακουστική υποβοήθηση. Αντίθετα, προτιμούν να βασίζονται στο μικρόφωνο που τους προσφέρεται εύκολα. Αλλά και οι ακροατές απαιτούν ολοένα και περισσότερο μια ένταση που θα κάνει την ακρόαση τόσο καθαρή όσο είναι στις ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές ή στον κινηματογράφο.

Τα ηλεκτροακουστικά συστήματα σε αίθουσες είναι αναγκαία διότι ανοίγουν δυνατότητες ακουστικής σχεδίασης που θα ήταν αδιανόητες με παραδοσιακά μέσα ακουστικής επεξεργασίας ενός χώρου. Όλο και πιο συχνά κατασκευάζονται αίθουσες και χώροι παραστάσεων μεγαλύτερου μεγέθους, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε μεγάλο κοινό να παρακολουθήσει προσωπικά σημαντικές πολιτιστικές, ψυχαγωγικές ή αθλητικές εκδηλώσεις. Αυτό δεν θα ήταν δυνατό χωρίς την ενίσχυση του ήχου μέσω ηλεκτροακουστικών συστημάτων, αφού η ανθρώπινη φωνή ή ένα μουσικό όργανο από μόνο του δεν θα μπορούσε να παράγει επαρκή ένταση στα αυτιά των περισσότερων ακροατών. Επιπλέον, οι μεγάλες αίθουσες χρησιμοποιούνται συχνά, κυρίως για οικονομικούς λόγους, για πολύ διαφορετικά είδη περιστάσεων. Για αυτό το λόγο είναι μεγάλο πλεονέκτημα ότι τα ηλεκτροακουστικά συστήματα επιτρέπουν την προσαρμογή των ακουστικών συνθηκών μιας αίθουσας σε διαφορετικά είδη περιστάσεων, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό. Ένα σύστημα ενίσχυσης ήχου που έχει σχεδιαστεί βέλτιστα για τη μετάδοση ομιλίας σε μια συγκεκριμένη αίθουσα μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική ευκρίνεια ομιλίας ακόμα και αν ο χρόνος αντήχησης του χώρου είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το βέλτιστο για την ομιλία. Αυτό το γεγονός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή της «φυσικής» ακουστικής της αίθουσας για μουσικές παραστάσεις. [16]

### 6.1 Μικρόφωνα

Τόσο τα μικρόφωνα όσο και τα μεγάφωνα είναι ηλεκτρομηχανικές συσκευές που μετατρέπουν τα ηχητικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα και αντίστροφα. Τα μικρόφωνα αντιλαμβάνονται μικρές αλλαγές στην ηχητική πίεση μέσω της κίνησης ενός λεπτού διαφράγματος. Τα κωνικά ηχεία δημιουργούν αλλαγές στην πίεση μέσω της κίνησης ενός διαφράγματος που κινείται από ένα πηνίο σύρματος, βυθισμένο σε ένα μαγνητικό πεδίο. Δεδομένου ότι τόσο τα μικρόφωνα όσο και τα μεγάφωνα λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, τα μικρόφωνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεγάφωνα και τα μεγάφωνα ως μικρόφωνα. Ακόμη και το ανθρώπινο τύμπανο μπορεί να λειτουργήσει ως μεγάφωνο. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μικροφώνων που χρησιμοποιούνται είναι δυναμικά, πυκνωτικά, ηλεκτρετ, κεραμικά και ταινίας. Όλα τα μικρόφωνα αποτελούνται από ένα διάφραγμα, το οποίο κινείται προς-πίσω ανταποκρινόμενο στις μεταβολές της πίεσης ή της ταχύτητας που προκαλούνται από ένα ηχητικό κύμα, και ηλεκτρονικά εξαρτήματα που μετατρέπουν την κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα. [2]

Τα μικρόφωνα χαρακτηρίζονται από ευαισθησία, η οποία είναι η τάση εξόδου ανά μονάδα πίεσης, εκφρασμένη σε V/Pa ή mV/Pa. Οι τυπικές τιμές για ένα δυναμικό μικρόφωνο είναι μεταξύ 1 και 5mV/Pa και ενός πυκνωτικού μικροφώνου είναι μεταξύ 5 και 50mV/Pa. Ακόμη, η ευαισθησία μπορεί να εκφραστεί σε dB όπου ως αναφορά λαμβάνεται η ποσότητα 1 V/Pa.

Η κατευθυντικότητα των μικροφώνων ορίζεται ως η συνάρτηση ευαισθησίας  $M(\theta)$  προς τη μέγιστη ευαισθησία  $M_0$ .

$$D = \frac{M(\theta)}{M_0} \quad (22)$$

Με βάση τον ορισμό της κατευθυντικότητας ορίζονται οι εξής κατηγορίες μικροφώνων:

Πανκατευθυντικό αν  $M/M_0 = 1$

Δικατευθυντικό τάξης  $n$  αν  $M/M_0 = (\cos\theta)^n$

Μονοκατευθυντικό τάξης  $n$  αν  $M/M_0 = (1 - \beta + \beta \cos\theta)(\cos\theta)^{n-1}, 0 < \beta < 1$

Τα μονοκατευθυντικά μικρόφωνα περιλαμβάνουν τις παρακάτω ειδικές περιπτώσεις για ( $n=1$ )

- Καρδιοειδές με  $\beta = 0,5$ , όπου  $M/M_0 = 1/2 + 1/2\cos\theta$
  - Super-καρδιοειδές με  $\beta = 0,67$ , όπου  $M/M_0 = 1/3 + 2/3\cos\theta$
  - Υπερκαρδιοειδές με  $\beta = 0,75$ , όπου  $M/M_0 = 1/4 + 3/4\cos\theta$
- [13]

## 6.2 Ηχεία

Τα ηχεία είναι ο τελικός μετατροπέας του ηλεκτρικού σήματος εισόδου σε ηχητικά κύματα. Ένα ηχείο προδιαγράφεται με την ονομαστική του ευαισθησία σε dB/W/m, την ονομαστική τιμή αντίστασης που συνηθίζεται να είναι 4, 8 ή 16 Ω και τη μέγιστη συνεχή ισχύ που μπορεί να αντέξει. Τα ηχεία αποτελούνται από τουλάχιστον δύο μεγάφωνα έτσι ώστε να καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος του ακουστικού φάσματος. Ένα ηχείο δύο δρόμων έχει τυπική απόκριση 80Hz έως 15kHz και ένα ηχείο τριών δρόμων έχει τυπική απόκριση 50Hz έως 18kHz. Για χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται μεγάλης διαμέτρου ηχεία (18" ή και μεγαλύτερης), τα οποία ονομάζονται subwoofer.

Η περιοχή κάλυψης ενός ηχείου υπολογίζεται με βάση τις γωνίες κάλυψης στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα και είναι η συνολική γωνία για την οποία η στάθμη έχει ελαττωθεί κατά 6dB σε σχέση με τη στάθμη στον κατακόρυφο άξονα. Αν οι γωνίες κάλυψης  $\varphi$  και  $\theta$  είναι γνωστές τότε μπορεί να υπολογιστεί ο παράγοντας κατευθυντικότητας του ηχείου.

$$Q = \frac{180^\circ}{\sin^{-1}(\sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2})} \quad (23)$$

Όπου:

$\varphi$  η γωνία κάλυψης στον οριζόντιο άξονα

$\theta$  η γωνία κάλυψης στον κατακόρυφο άξονα [13]

## 6.3 Επιθυμητή Στάθμη Πίεσης

Η επιθυμητή στάθμη πίεσης του χώρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{pd} = L_N + 25dB \quad (24)$$

Όπου  $L_N$  είναι η στάθμη θορύβου σε dB(A) του χώρου. [12]

## 6.4 Συνιστώμενοι Χρόνοι Αντήχησης

Για χώρους διαλέξεων προτιμώνται χώροι με μεγάλη αντιληπτότητα. Έχοντας την αντιληπτότητα της ομιλίας ως κριτήριο, πρέπει σε έναν χώρο με πληρότητα ακροατών 2/3, ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια να ισούται με 4 στη συχνότητα των 500Hz. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος αντήχησης δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{4VQ_s}{312L^2Q_m} \quad (25)$$

Όπου:

$V$  είναι ο όγκος του χώρου,

$Q_s, Q_m$  είναι παράγοντες κατευθυντικότητας πηγής και μικροφώνου,

$L$  είναι το μήκος του χώρου

Οι γενικότερα παραδεκτοί ιδανικοί χρόνοι αντήχησης δίνονται σήμερα από τη σχέση:

$$T_{60} = A \log V + B \quad (26)$$

Όπου  $A$  και  $B$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου και  $V$  είναι ο όγκος του χώρου.

Πίνακας 4: Σταθερές υπολογισμού χρόνου αντήχησης για διάφορους χώρους. [8]

Είδος Χώρου	A	B
Καθολικοί Ναοί – Αίθουσες συναυλιών	0,4	0,22
Ναοί διαμαρτυρομένων	0,35	0,19
Ορθόδοξες εκκλησίες - Όπερες	0,3	0,16
Κινηματογράφοι – Αίθουσες Μουσικής (Music Halls)	0,22	0,11
Χώροι διαλέξεων – Στούντιο	0,2	0,11
Χώροι ελέγχου	0,11	0,148

## 6.5 Ενεργός Ακουστική Απόσταση (Effective Acoustical Distance - EAD)

Η μέγιστη απόσταση από τον ομιλητή στην οποία ένας ακροατής θα κατανοεί άνετα την ομιλία ορίζεται ως ισοδύναμη ή ενεργός ακουστική απόσταση equivalent, or effective acoustical distance (EAD) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$EAD = D_{ref} 10^{\frac{L_{pt} - L_{pd}}{20}} \quad (27)$$

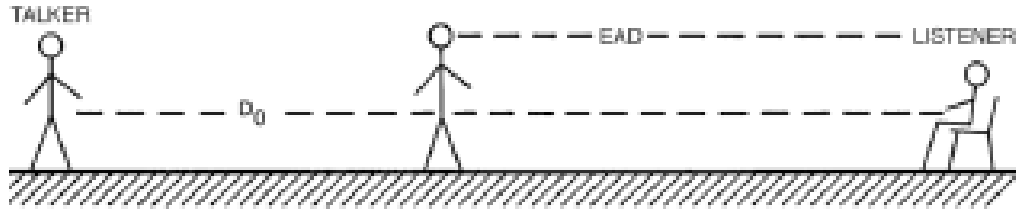
Όπου:

$D_{ref}$  είναι η απόσταση αναφοράς (π.χ., το 1m).

$L_{pd}$  είναι η επιθυμητή στάθμη.

$L_{pt}$  είναι η στάθμη αναφοράς ενός ομιλητή στην απόσταση αναφοράς  $D_{ref}$ .

Το ηλεκτροακουστικό σύστημα είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί εάν ισχύει  $D_0 > EAD$ . [12]



Σχήμα 18 : Παράδειγμα απαραίτητης εγκατάστασης ηλεκτρακουστικού συστήματος.

## 6.6 Απαιτούμενο Ακουστικό Κέρδος (Needed Acoustic Gain – NAG)

Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος αναφέρεται στο κατά πόσο πρέπει να ενισχυθεί η φωνή του ομιλητή (στάθμη  $L_{pt}$  σε κάποια απόσταση αναφοράς  $D_{ref}$ ) έτσι ώστε η στάθμη στη θέση του ακροατή να είναι επαρκής για άνετη κατανόηση. Δηλαδή, η ενίσχυση θα πρέπει να πλησιάζει τουλάχιστον την EAD. Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (NAG) για έναν κλειστό χώρο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NAG = 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi EAD^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi D_0^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (28)$$

Όπου R είναι η σταθερά δωματίου και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{V}{\left( \frac{T_{60}}{0,16} - \bar{S} \right)} \quad (29)$$

[12]

## 6.7 Δυνητικό Ακουστικό Κέρδος (Potential Acoustic Gain – PAG)

Το δυνητικό ακουστικό κέρδος δίνεται από τη σχέση:

$$PAG = \Delta D_0 + \Delta D_1 - \Delta D_S - \Delta D_2 + L_{LSpol} + L_{Mpol} - 10 \log NOM - FSM$$

Όπου:

$$\Delta \chi = -10 \log \left( \frac{Q}{4\pi x^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Επομένως η τελική σχέση για το PAG είναι:

$$PAG = 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi D_S^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi D_2^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi D_0^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi D_1^2} + \frac{4}{R} \right) + L_{LSpol} + L_{Mpol} - 10 \log NOM - FSM \quad (30)$$

Αν οι πολικές αποκρίσεις του μικροφώνου δεν είναι γνωστές τότε συνηθίζεται να θεωρείται  $L_{LSpol} + L_{Mpol} \leq 6dB$ .

Η ύπαρξη περισσότερων από ένα μικρόφωνα (των οποίων γίνεται μίξη), αυξάνει το ποσό ανάδρασης, κατά μια στάθμη  $10 \log NOM$ , όπου  $NOM$  είναι ο αριθμός των μικροφώνων και συνεπώς μειώνει το PAG κατά ίσο ποσό.

Επίσης, συνήθως εισάγεται επιπλέον περιθώριο ευστάθειας (feedback stability margin) με την περαιτέρω μείωση του του PAG κατά μια στάθμη  $FSM \geq 6 \text{ dB}$ .

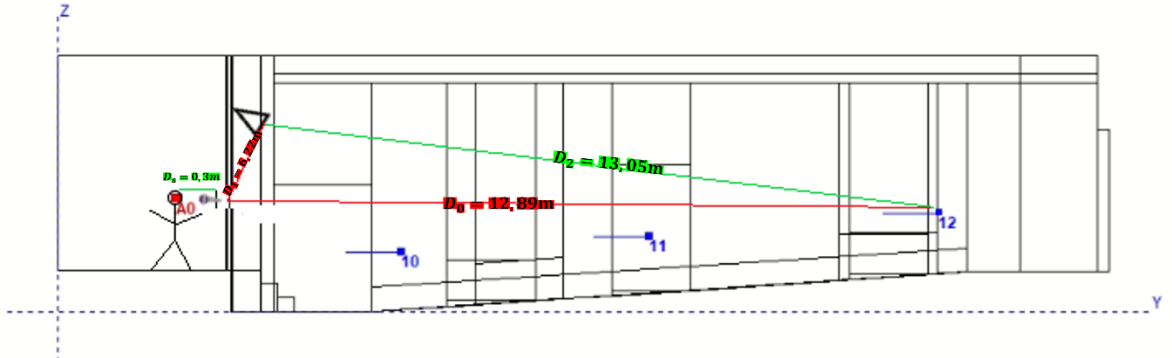
Επομένως το σύστημα θεωρείται ότι είναι ευσταθές εάν ισχύει  $PAG > NAG$ . [12]

## 6.8 Θεωρητικά Αποτελέσματα

- Η στάθμη του ήχου που πρέπει να φτάνει σε κάθε ακροατή πρέπει να είναι τουλάχιστον 25dB πάνω από τη στάθμη θορύβου του χώρου. Δηλαδή να ισχύει ( $SNR \geq 25\text{dB}$ ). Το πρόγραμμα CATT-Acoustic δίνει για το χώρο μελέτης στάθμη θορύβου  $L_N = 35,8\text{dB}$  και επομένως υπολογίζεται από τη σχέση (24) πως η στάθμη ήχου που πρέπει να φτάσει στον κάθε ακροατή είναι  $L_{pd} = L_N + 25\text{dB} = 60,8\text{dB}$ .
- Η ενεργός ακουστική απόσταση (EAD) ενός ομιλητή που παράγει στάθμη  $L_{pt} = 65\text{dB}$  στο 1m υπολογίζεται από τη σχέση (27) και ισούται με  $EAD = 1,62\text{m}$ .
- Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να βρεθεί ένας ακροατής από τον ομιλητή είναι  $D_0 = 12,89\text{m}$ , συνεπώς  $D_0 > EAD$  και άρα είναι απαραίτητη η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.
- Το αμφιθέατρο έχει τέσσερα ηχεία τα οποία βρίσκονται συμμετρικά στο χώρο σε δύο συστοιχίες αριστερά και δεξιά του μπροστινού τμήματος της σκηνης. Τα θεωρητικά αποτελέσματα που θα κρίνουν εάν το ηλεκτροακουστικό σύστημα είναι ευσταθές χωρίς Larsen Effect (Feedback) θα υπολογιστούν για το πάνω ηχείο της συστοιχίας που βρίσκεται στον αριστερό πλαϊνό τοίχο.
  - Η απόσταση του ομιλητή από τον πιο απομακρυσμένο ακροατή της πίσω σειράς καθισμάτων είναι  $D_0 = 12,89\text{m}$ .
  - Η απόσταση του μικροφώνου με το ηχείο είναι  $D_1 = 6,22\text{m}$ .
  - Η απόσταση του πιο απομακρυσμένου ακροατή από το ηχείο είναι  $D_2 = 13,05\text{m}$ .
  - Η απόσταση του ομιλητή από το μικρόφωνο είναι  $D_s = 0,3\text{m}$ .
  - Ο όγκος του χώρου που δίνεται από το CATT-Acoustic είναι  $V = 748,6\text{m}^3$ .
  - Το συνολικό εμβαδό που δίνεται από το CATT-Acoustic είναι  $S = 693,2\text{m}^2$ .
  - Η σταθερά του δωματίου υπολογίζεται από τη σχέση (29) και είναι  $R = 236,1\text{m}^2$ .
  - Η μέση τιμή του χρόνου αντήχησης για ομιλία είναι  $RT_{60} = 0,9\text{sec}$ .
  - Το περιθώριο κέρδους για ομιλία είναι  $H = 12$ .
  - Το περιθώριο ευστάθειας (Feedback Stability Margin) είναι  $FSM = 6\text{dB}$ .
  - Ο αριθμός των μικροφώνων είναι  $NOM = 1$ .
  - Οι πολικές αποκρίσεις του μικροφώνου δεν είναι γνωστές οπότε θεωρείται  $L_{Lspot} + L_{Mpol} = 6\text{dB}$ .
  - Η ευαισθησία του ηχείου (Community V2-1264) είναι  $L_{sens} = 98\text{dB}$  με οριζόντια γωνία κάλυψης  $\alpha = 60^\circ$  και κάθετη γωνία κάλυψης  $\beta = 40^\circ$ .
  - Ο παράγοντας κατευθυντικότητας του ηχείου υπολογίζεται από τη σχέση (23) και είναι  $Q = 18,3$ .
  - Η ελάχιστη κατευθυντικότητα υπολογίζεται από τη σχέση (19) και για  $D_{max} = 12,89\text{m}$  είναι  $Q_{min} = 4,79$ .
  - Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος υπολογίζεται από τη σχέση (28) και είναι  $NAG = 18,47\text{dB}$ .
  - Το δυναμικό ακουστικό κέρδος υπολογίζεται από τη σχέση (30) και είναι  $PAG = 21,99\text{dB}$ .



- Επομένως ισχύει  $PAG > NAG$  και άρα το ηλεκτροακουστικό σύστημα είναι ευσταθές χωρίς Larsen Effect (Feedback).
- Η καταληπτότητα ομιλίας για τον πιο απομακρυσμένο ακροατή υπολογίζεται από τη σχέση (17) και είναι  $\%Al_{cons} = 8.9\%$  η οποία είναι αποδεκτή διότι είναι μικρότερη από 15%.



Εικόνα 55: Αποστάσεις ομιλητή – μικροφώνου – κοντινότερου ηχείου – πιο απομακρυσμένου ακροατή.

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναδείχθηκε η σημασία της ακουστικής των χώρων και πόσο πολυσύνθετο θέμα είναι. Οι θεωρητικές βάσεις των πρώτων κεφαλαίων βοήθησαν στην κατανόηση και τη βελτίωση της ακουστικής μελέτης που έγινε. Στόχος της συγκεκριμένης ακουστικής μελέτης είναι να γίνουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές παρεμβάσεις στο χώρο για τη βελτίωση της ακουστικής χωρίς να υποστεί ολική ανακαίνιση. Οι συγκεκριμένες παρεμβάσεις πρέπει να προορίζουν το χώρο ως ένα χώρο πολλαπλών χρήσεων καθώς καθημερινά χρησιμοποιείται για ποικίλες περιστάσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης συμπεραίνουμε πως οι παρεμβάσεις βελτιώνουν την ακουστική της αίθουσας καθώς ο χρόνος αντήχησης προσεγγίζει τις επιθυμητές τιμές αλλά και οι παράμετροι  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  και  $D_{50}$  επίσης βελτιώνονται. Τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που παρουσιάζουν τις παραπάνω παραμέτρους σε τέσσερις θέσεις στο ακροατήριο δείχνουν επίσης τη βελτίωση της ακουστικής του χώρου αλλά ακόμη και ότι υπάρχει η ανομοιομορφία στο πως κατανέμεται ο ήχος το ακροατήριο. Αυτό βελτιώνεται ελαφρώς με τις παρεμβάσεις που έγιναν αλλά για να υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή του ήχου σε όλο το ακροατήριο θα πρέπει να προστεθεί επιπλέον ενίσχυση από ηλεκτροακουστικό εξοπλισμό. Καθώς ο χώρος περιείχε ήδη έναν ηλεκτροακουστικό εξοπλισμό, έπρεπε να μελετηθεί εάν ήταν αναγκαίος και κατά πόσο αποτελεσματικός είναι. Έτσι, μέσω της προσομοίωσης με μια φυσική πηγή, αναδείχθηκε το συμπέρασμα πώς ήταν απαραίτητη η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση. Επιπρόσθετα, τα θεωρητικά αποτελέσματα της ηλεκτροακουστικής μελέτης επιβεβαίωσαν ότι το ηλεκτροακουστικό σύστημα που περιέχει ο χώρος είναι ευσταθές και λειτουργικό. Τέλος, αναδείχθηκε το πώς η γεωμετρία του χώρου μπορεί να επηρεάσει αντίστοιχα τη διάδοση του ήχου στο ακροατήριο αλλά και το πώς μικρές αλλαγές μπορούν να επιφέρουν μια λύση στο πρόβλημα. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα μπορούσε να αποφευχθεί εάν είχε πραγματοποιηθεί ακουστική μελέτη πριν την κατασκευή του χώρου, τονίζοντας έτσι τη σημασία της. Κατά αυτόν τον τρόπο θα είχαν επιτευχθεί ακόμη καλύτερα ακουστικά αποτελέσματα με χαμηλότερο κόστος απ' ό,τι με τη μετέπειτα παρέμβαση.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Rossing, T. (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. Berlin: Springer.
- [2] Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. London: Elsevier Inc.
- [3] Wikipedia contributors. (12 Φεβρουαρίου 2024). "Aeroacoustics." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Ανακτήθηκε 28 Φεβρουαρίου, 2024, από <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroacoustics>.
- [4] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics (4th ed.)*. New York: John Wiley & Sons.
- [5] Beranek, L. L., & Mellow, T. J. (2012). *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Oxford, UK: Academic Press, an imprint of Elsevier.
- [6] Everest, F.A. (2001). *Master Handbook of Acoustics. 4th ed.* New York: McGraw-Hill.
- [7] Moore, B. C. J. (2013). *An Introduction to the Psychology of Hearing (6th ed.)*. Leiden, The Netherlands: Brill.
- [8] Σκαρλάτος, Δ. (2021). *Εφαρμοσμένη ακουστική - Ηχοπροστασία (5η έκδοση)*. Πάτρα: Εκδόσεις Gotsis.
- [9] Ginn, K. B. (1978). *Architectural Acoustics (2nd ed.)*. Brüel & Kjaer.
- [10] Βραχόπουλος, Μ. (2022). Φυσική Περιβάλλοντος: ήχος και θόρυβος κεφ. 10. [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Εργαστήριο Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Ερευνών, 13/1/2022
- [11] Raichel, D. R. (2006). *The Science and Applications of Acoustics (2nd ed.)*. Springer Science+Business Media, Inc.
- [12] Ποτηράκης, Σ. (2019). *Ηλεκτροακουστική II [πανεπιστημιακές σημειώσεις]*. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Αιγάλεω.
- [13] Λουτρίδης, Σ. (2009). *Ηλεκτροακουστική & Ηχητικές Εγκαταστάσεις*. Αθήνα: Ίων
- [14] Beranek, L. L. (2004). *Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture (2nd ed.)*. Springer.
- [15] Sandaker, V., 2018. *Rehearsal Rooms for Acoustical Instruments-Comparing Measurements and Subjective Experiences*.
- [16] Kuttruff, H. (2000). *Room Acoustics (4th ed.)*. London, UK: Spon Press.
- [17] Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design (2nd ed.)*. Abingdon, UK: Spon Press.
- [18] Ermann, M. (2015). *Architectural Acoustics Illustrated*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Τριγωνίδης, Δ., 2023. *Ακουστικός και ηλεκτροακουστικός σχεδιασμός κεντρικής αίθουσας συνεδριακού κέντρου (αμφιθέατρο)*.
- [20] Δήμος Λαρισαίων. (2024). "Χατζηγιάνναιο Πνευματικό Κέντρο." Διαθέσιμο στο: <https://www.larissa-dimos.gr/el/gia-tous-polites/xatzigiannαιο> [Ανακτήθηκε 20 Φεβρουαρίου, 2024].
- [21] CATT-A v9.1g:1. (2022). *User's Manual CATT-AcousticTMv9.1g:1*.
- [22] ALPHAcoustic, 2024. *Wooden Acoustic Panel ALPHAcoustic-WP*. ALPHAcoustic. Διαθέσιμο στο: <https://alphacoustic.com/en/product/wooden-acoustic-panel-alphacoustic-wp/> [Ανακτήθηκε 16 Μαρτίου 2024].
- [23] Acoustic Supplies, 2024. *Absorption Coefficient Chart*. Acoustic Supplies. Διαθέσιμο στο: <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/> [Ανακτήθηκε 16 Μαρτίου 2024].
- [24] Honeycutt, R., 2014. *Predictive Acoustics and Acoustical Modeling Software: CATT-Acoustic*. audioXpress. Διαθέσιμο στο: <https://audioxpress.com/index.php/article/predictive-acoustics-and-acoustical-modeling-software-catt-acoustic> [Ανακτήθηκε 28 June 2024].

## Παράρτημα Α «Αρχείο Master»

;MASTER.GEO

;PROJECT=XATZHGIANNEIO

ABS drapery = < 4 5 11 18 30 35> {245 241 232}

ABS curtain = <5 15 35 40 50 50> { 146 4 66 }

ABS parquet = <4 4 6 12 10 15> {196 164 132}

ABS paintedwall = <1 1 1 2 2 2> {255 218 162}

ABS wooddoor = <15 10 6 8 10 5> {110 38 14}

ABS glass = <35 25 18 12 7 4> { 153 255 255 }

ABS plasticiles = <1 1 1 1 5 5> {162 160 128}

ABS audience = <25 35 40 40 40 40 > {255 0 0 }

ABS panel\_1 = <39 86 58 29 15 10 > {115 106 43}

ABS plasterboard = <30 10 6 5 4 4 > {121 79 79 }

ABS plasterboard\_1 = <98 88 52 21 16 14 > {196 154 154 }

### CORNERS

;stage corners

1 -3.3 0 0.70

2 -5.10 2.84 0.70

3 5.09 2.86 0.70

4 3.3 0 0.70

5 -5.10 2.92 0.70

6 5.09 2.94 0.70

7 -4.77 3.43 0.70

8 4.71 3.43 0.70

9 -5.10 2.92 0

10 -4.77 3.43 0

19 4.71 3.43 0

20 5.09 2.94 0

21 -0.68 3.43 0.70

22 -0.68 3.43 0.48

23 -0.68 3.43 0

24 0.62 3.43 0.70

25 0.62 3.43 0.48

26 0.62 3.43 0

27 0.62 3.70 0

28 0.62 3.70 0.24

29 0.62 3.70 0.48

30 -0.68 3.70 0.48

31 -0.68 3.70 0.24

32 -0.68 3.70 0

33 -0.68 3.98 0

34 -0.68 3.98 0.24

35 0.62 3.98 0.24

36 0.62 3.98 0

37 -6.20 2.92 0

38 6.22 2.94 0

39 -6.19 3.65 0

;door corners

40 -6.39 3.65 0

41 -6.40 5.30 0

42 -6.20 5.30 0

43 -6.20 5.30 2.14

44 -6.40 5.30 2.14

45 -6.39 3.65 2.14

46 -6.19 3.65 2.14

59 -6.39 9.35 0.35

60 -6.39 10.69 0.35

61 -6.39 10.69 2.49

62 -6.19 10.69 2.49

63 -6.19 9.35 2.49

64 -6.39 9.35 2.49

;ceiling corners

11 -3.30 0 4.31

12 -5.10 2.84 4.31

13 5.09 2.86 4.31  
14 3.30 0 4.31  
15 -5.10 2.92 4.31  
16 5.09 2.94 4.31  
17 -4.77 3.43 4.31  
18 4.71 3.43 4.31  
1037 -6.20 2.92 4.31  
1038 6.22 2.94 4.31  
1043 -6.19 5.30 3.86  
1046 -6.19 3.65 3.86  
1053 -6.19 8.07 3.86  
1054 -6.19 6.57 3.86  
1062 -6.19 10.69 3.86  
1063 -6.19 9.35 3.86  
1071 -6.19 14.87 3.86  
1072 -6.19 13.37 3.86  
1074 -6.19 15.37 3.86  
1075 -6.77 15.37 3.86  
1076 -6.77 17.56 3.86  
1081 -4.22 17.56 3.86  
1082 -5.67 17.56 3.86  
1086 -2.93 16.26 4.31  
1087 -2.93 17.56 4.31  
1089 -5.04 17.56 4.31  
1091 -5.19 17.56 4.31  
1092 3.26 16.26 4.31  
1098 6.46 17.56 3.86  
10102 5.22 17.56 3.86  
10107 5.22 17.56 4.31  
10108 3.26 17.56 4.31  
10109 7.02 17.56 3.86  
10110 7.02 15.37 3.86  
10111 6.47 15.37 3.86  
10119 6.45 14.70 3.86  
10116 6.41 13.21 3.86

10127 6.30 8.54 3.86  
10124 6.27 7.04 3.86  
10128 6.22 5.30 3.86  
10129 6.22 3.65 3.86  
20129 6.23 3.65 4.31  
3001 -5.19 3.65 3.86  
3002 -5.19 3.65 4.01  
3003 -6.19 3.65 4.01  
3004 -5.19 3.65 4.31  
3005 -5.04 3.65 4.01  
3006 -6.19 17.56 3.86  
3008 -5.04 15.37 4.31  
3010 -2.93 15.37 4.31  
3011 3.26 15.37 4.31  
3012 5.07 15.37 4.31  
3013 5.07 17.56 4.31  
3014 6.22 3.65 4.01  
3015 5.22 3.65 4.01  
3016 5.22 3.65 3.86  
3017 5.07 3.65 4.01  
3018 5.22 3.65 4.31  
3019 5.07 3.65 4.31  
3020 -5.04 3.65 4.31  
3021 3.26 3.65 4.31  
3022 -2.93 3.65 4.31  
3023 -2.93 8.97 4.31  
3024 -2.93 13.97 4.31  
3025 3.26 13.97 4.31  
3026 3.26 8.97 4.31  
10138 6.35 10.69 3.86

;wall corners

1039 -6.19 3.65 4.31  
47 -6.19 6.57 0.08

48 -6.19 8.07 0.18  
49 -6.19 6.57 0.18  
50 -6.44 6.57 0.18  
51 -6.44 8.07 0.18  
52 -6.44 8.07 0.87  
53 -6.19 8.07 0.87  
54 -6.19 6.57 0.87  
55 -6.44 6.57 0.87  
56 -6.19 9.35 0.26  
57 -6.19 10.69 0.35  
58 -6.19 9.35 0.35  
65 -6.19 13.37 0.53  
66 -6.19 14.87 0.63  
67 -6.19 13.37 0.63  
68 -6.44 13.37 0.63  
69 -6.44 14.87 0.63  
70 -6.44 14.87 1.32  
71 -6.19 14.87 1.32  
72 -6.19 13.37 1.32  
73 -6.44 13.37 1.32  
74 -6.19 15.37 0.66  
75 -6.77 15.37 0.66  
76 -6.77 17.56 0.66  
77 -5.67 17.56 0.66  
78 -5.67 17.76 0.66  
79 -4.23 17.76 0.66  
80 -4.22 17.56 0.66  
81 -4.22 17.56 3.08  
82 -5.67 17.56 3.08  
83 -5.67 17.76 3.08  
84 -4.23 17.76 3.08  
85 -2.93 17.56 0.66  
86 -2.93 16.26 0.66  
87 -2.93 17.56 3.86  
88 -5.04 17.56 3.86



89 -5.04 17.56 4.01  
90 -5.19 17.56 3.86  
91 -5.19 17.56 4.01  
92 3.26 16.26 0.66  
93 3.26 17.56 0.66  
94 5.05 17.56 0.66  
95 5.05 17.76 0.66  
96 6.46 17.76 0.66  
97 6.46 17.56 0.66  
98 6.46 17.56 3.08  
99 6.46 17.76 3.08  
100 5.05 17.76 3.08  
101 5.05 17.56 3.08  
102 5.22 17.56 3.08  
103 5.07 17.56 4.01  
104 5.07 17.56 3.86  
105 5.05 17.56 3.86  
106 5.05 17.56 4.01  
107 5.22 17.56 4.01  
108 3.26 17.56 4.01  
109 7.02 17.56 0.66  
110 7.02 15.37 0.66  
111 6.47 15.37 0.66  
112 6.45 14.70 0.62  
113 6.71 14.70 0.62  
114 6.71 13.21 0.52  
115 6.41 13.21 0.52  
116 6.41 13.21 1.31  
117 6.71 13.21 1.31  
118 6.71 14.70 1.31  
119 6.45 14.70 1.31  
120 6.30 8.54 0.21  
121 6.56 8.54 0.21  
122 6.53 7.04 0.11  
123 6.27 7.04 0.11

124 6.27 7.04 0.80

125 6.53 7.04 0.80

126 6.56 8.54 0.90

127 6.30 8.54 0.90

128 6.22 5.30 0

129 6.23 3.65 0

;floor corners

130 6.23 3.43 0

131 5.09 3.43 0

132 -5.10 3.43 0

133 -6.19 3.43 0

134 6.23 3.98 0

135 6.22 5.10 0

137 -6.19 3.98 0

138 6.35 10.69 0.35

501 5.50 5.30 0

502 -5.50 5.30 0

503 5.50 15.37 0.66

504 -5.50 15.37 0.66

;audience corners

505 5.50 5.30 0.40

506 5.50 15.37 1.06

507 -5.50 15.37 1.06

508 -5.50 5.30 0.40

PLANES

;stage planes

[1 stage floor1 / 2 1 4 3 / parquet ]

[2 stage floor2 / 5 2 3 6 / parquet ]

- [3 stage floor3 / 7 5 6 8 24 21 / parquet ]
- [4 stage back wall / 1 11 14 4 / curtain]
- [5 stage left wall1 / 2 12 11 1 / curtain ]
- [6 stage right wall1 / 4 14 13 3 / curtain]
- [7 stage left wall2 / 5 15 12 2 / curtain]
- [8 stage right wall2 / 3 13 16 6 / curtain]
- [9 stage left wall3 / 7 17 15 5 / curtain]
- [10 stage left wall3mir / 5 15 17 7 / curtain]
- [11 stage right wall3 / 6 16 18 8 / curtain]
- [12 stage right wall3mir / 8 18 16 6 / curtain]
- [13 stage left down wall / 9 5 7 10 / parquet ]
- [14 stage right down wall / 19 8 6 20 / parquet ]
- [15 stage center wall1 / 10 7 21 22 23 / parquet ]
- [16 stage center wall2 / 26 25 24 8 19 / parquet ]
- [17 stage center wall3 / 22 21 24 25 / parquet ]
- [18 stage stair1 / 23 22 30 31 32 / parquet ]
- [19 stage stair2 / 27 28 29 25 26 / parquet ]
- [20 stage stair3 / 32 31 34 33 / parquet ]
- [21 stage stair4 / 36 35 28 27 / parquet ]
- [22 stage stair5 / 30 22 25 29 / parquet ]
- [23 stage stair6 / 31 30 29 28 / parquet ]
- [24 stage stair7 / 34 31 28 35 / parquet ]
- [25 stage stair8 / 33 34 35 36 / parquet ]
- [26 stage left wall / 37 1037 15 5 9 / curtain ]
- [27 stage right wall / 20 6 16 1038 38 / curtain ]

;wall-door planes

- [28 wall1 / 39 46 1046 3003 1039 1037 37 133/ paintedwall ]
- [29 door1 / 40 45 46 39 / wooddoor ]
- [30 door2 / 41 44 45 40 / curtain ]
- [31 door3 / 42 43 44 41 / wooddoor ]
- [32 door4 / 44 43 46 45 / wooddoor ]
- [33 door5 / 42 41 40 39 / wooddoor ]
- [34 wall2 / 43 1043 1046 46 / paintedwall ]

- [35 wall3 / 48 49 47 / paintedwall ]
- [36 wall4 / 47 49 54 1054 1043 43 42 /paintedwall ]
- [37 wall5 / 50 55 54 49 / paintedwall ]
- [38 wall6 / 51 52 55 50 / paintedwall ]
- [39 wall7 / 48 53 52 51 / paintedwall ]
- [40 wall8 / 52 53 54 55 / paintedwall ]
- [41 wall9 / 48 51 50 49 / paintedwall ]
- [42 wall10 / 53 1053 1054 54 / paintedwall ]
- [43 wall11 / 56 58 63 1063 1053 53 48 / paintedwall]
- [44 wall12 / 57 58 56 / paintedwall ]
- [45 door6 / 59 64 63 58 / wooddoor ]
- [46 door7 / 60 61 64 59 / curtain ]
- [47 door9 / 57 62 61 60 / wooddoor ]
- [48 door10 / 61 62 63 64 / wooddoor ]
- [49 door11 / 57 60 59 58 / wooddoor ]
- [50 wall13 / 62 1062 1063 63 / paintedwall]
- [51 wall14 / 65 67 72 1072 1062 62 57 / panel\_1]
- [52 wall15 / 66 67 65 / paintedwall ]
- [53 wall16 / 68 73 72 67 / paintedwall ]
- [54 wall17 / 69 70 73 68 / paintedwall ]
- [55 wall18 / 66 71 70 69 / paintedwall ]
- [56 wall19 / 70 71 72 73 / paintedwall ]
- [57 wall20 / 66 69 68 67 / paintedwall ]
- [58 wall21 / 71 1071 1072 72 / plasterboard]
- [59 wall22 / 74 1074 1071 71 66 / plasterboard]
- [60 wall23 / 75 1075 1074 74 / plasterboard ]
- [61 wall24 / 76 1076 1075 75 / plasterboard]
- [62 wall25 / 77 82 1082 3006 1076 76 / plasterboard]
- [63 wall26 / 78 83 82 77 / paintedwall ]
- [64 glass door1 / 79 84 83 78 / curtain ]
- [65 wall27 / 80 81 84 79 / paintedwall ]
- [66 wall28 / 84 81 82 83 / paintedwall ]
- [67 wall29 / 80 79 78 77 / paintedwall ]
- [68 wall30 / 81 1081 88 90 1082 82 / plasterboard]
- [69 wall31 / 85 87 1081 81 80 / plasterboard]

- [70 wall32 / 87 1087 1089 89 88 1081 / paintedwall ]
- [71 wall33 / 89 1089 1091 91 / paintedwall ]
- [72 wall34 / 88 89 90 / paintedwall ]
- [73 wall35 / 86 1086 1087 87 85 / plasterboard]
- [74 wall36 / 92 1092 1086 86 / plasterboard]
- [75 wall37 / 93 108 10108 1092 92 / plasterboard]
- [76 wall38 / 94 101 105 106 108 93 / plasterboard]
- [77 wall39 / 107 10107 3013 10108 108 106 103/ paintedwall ]
- [78 wall40 / 104 103 106 105 / paintedwall ]
- [79 wall41 / 10102 103 104 / paintedwall ]
- [80 wall42 / 102 10102 104 105 101 / paintedwall ]
- [81 wall43 / 98 1098 10102 102 / plasterboard]
- [82 wall44 / 95 100 101 94 / paintedwall ]
- [83 glass door2 / 96 99 100 95 / curtain ]
- [84 wall45 / 97 98 99 96 / paintedwall ]
- [85 wall46 / 99 98 102 101 100 / paintedwall ]
- [86 wall47 / 97 96 95 94 / paintedwall ]
- [87 wall48 / 109 10109 1098 98 97 / plasterboard]
- [88 wall49 / 110 10110 10109 109 / plasterboard]
- [89 wall50 / 111 10111 10110 110 / plasterboard]
- [90 wall51 / 112 119 10119 10111 111 / plasterboard]
- [91 wall52 / 113 118 119 112 / paintedwall ]
- [92 wall53 / 114 117 118 113 / paintedwall ]
- [93 wall54 / 115 116 117 114 / paintedwall ]
- [94 wall55 / 117 116 119 118 / paintedwall ]
- [95 wall56 / 115 114 113 112 / paintedwall ]
- [96 wall57 / 116 10116 10119 119 / plasterboard]
- [97 wall58 / 120 127 10127 10138 138 / paintedwall ]
- [98 wall59a / 138 10138 10116 116 115 / panel\_1 ]
- [99 wall59 / 121 126 127 120 / paintedwall ]
- [100 wall60 / 122 125 126 121 / paintedwall ]
- [101 wall61 / 123 124 125 122 / paintedwall ]
- [102 wall62 / 125 124 127 126 / paintedwall ]
- [103 wall63 / 123 122 121 120 / paintedwall ]
- [104 wall64 / 124 10124 10127 127 / paintedwall ]

[105 wall65 / 128 10128 10124 124 123 / paintedwall ]

[106 wall66 / 129 10129 10128 128 134 / paintedwall ]

[107 wall67 / 38 1038 20129 3014 10129 129 130 / paintedwall ]

;floor planes

[108 floor1 / 38 130 131 20 / plastictiles]

[109 floor2 / 20 131 19 / plastictiles]

[110 floor3 / 133 37 9 132 / plastictiles]

[111 floor4 / 10 132 9 / plastictiles]

[112 floor5 / 130 129 134 36 27 26 19 131 / plastictiles]

[113 floor6 / 23 32 33 137 39 133 132 10 / plastictiles]

[114 floor7 / 134 128 501 502 42 137 33 36 / plastictiles]

[115 floor8 / 128 123 120 138 115 112 111 503 501 / plastictiles]

[116 floor9 / 502 504 74 66 65 57 56 48 47 42 / plastictiles]

[117 floor10 / 110 109 97 94 93 92 86 85 80 77 76 75 74 504 503 111 / plastictiles]

;audience planes

[118 audience surface / 505 506 507 508 / audience]

[119 audience2 / 505 501 503 506 / audience]

[120 audience3 / 506 503 504 507 / audience]

[121 audience4 / 507 504 502 508 / audience]

[122 audience5 / 508 502 501 505 / audience]

;ceiling planes

[123 ceil1 / 11 12 13 14 / paintedwall ]

[124 ceil2 / 12 15 16 13 / paintedwall ]

[125 ceil3 / 1037 1039 3004 3020 3022 3021 3019 3018 20129 1038 16 15 / paintedwall ]

[126 ceil4 / 3001 3002 3003 1046 / paintedwall ]

[127 ceil5 / 3002 3004 1039 3003 / paintedwall ]

[128 ceil6 / 3005 3002 3001 / paintedwall ]

[129 ceil7 / 3006 1082 90 3001 1046 1043 1054 1053 1063 1062 1072 1071 1074/ paintedwall ]

[130 ceil8 / 1076 3006 1074 1075 / paintedwall ]

- [131 ceil9 / 90 89 3005 3001 / paintedwall ]
- [132 ceil10 / 89 91 3002 3005 / paintedwall ]
- [133 ceil11 / 91 1091 3004 3002 / paintedwall ]
- [134 ceil12 / 1091 1089 3008 3020 3004 / paintedwall ]
- [135 ceil13 / 1087 1086 3010 3008 1089 / paintedwall ]
- [136 ceil14 / 1092 3011 3010 1086 / plasterboard ]
- [137 ceil15 / 3013 3012 3011 1092 10108 / paintedwall ]
- [138 ceil16 / 10110 10111 1098 10109 / paintedwall ]
- [139 ceil17 / 10129 3016 10102 1098 10111 10119 10116 10127 10124 10128 / paintedwall ]
- [140 ceil18 / 3016 3017 103 10102 / paintedwall ]
- [141 ceil19 / 3017 3015 107 103 / paintedwall ]
- [142 ceil20 / 3015 3018 10107 107 / paintedwall ]
- [143 ceil21 / 3018 3019 3013 10107 / paintedwall ]
- [144 ceil22 / 10129 3014 3015 3016 / paintedwall ]
- [145 ceil23 / 3014 20129 3018 3015 / paintedwall ]
- [146 ceil24 / 3019 3021 3026 3025 3011 3012 / paintedwall ]
- [147 ceil25 / 3021 3022 3023 3026 / plasterboard\_1 ]
- [148 ceil26 / 3023 3024 3025 3026 / plasterboard ]
- [149 ceil27 / 3024 3010 3011 3025 / plasterboard]
- [150 ceil28 / 3022 3020 3008 3010 3024 3023/ paintedwall ]

## Παράρτημα Β «Ορισμός Ακροατών»

;REC.LOC

;PROJECT=XATZHGIANNEIO

### RECEIVERS

1 -4.81 5.80 1.00

2 -1.63 9.04 1.20

3 -3.64 12.32 1.40

4 -4.41 14.81 1.66

5 1.06 5.80 1.00

6 2.61 8.11 1.15

7 1.85 11.41 1.35

8 3.68 14.89 1.66

9 -0.64 14.88 1.66

;10 0 5.80 1.00

;11 0 10 1.26

;12 0 14.89 1.66



## Παράρτημα Γ «Ορισμός Πηγών»

;SRC.LOC

;PROJECT=XATZHGIANNEIO

;Natural Source

SOURCE A0

DIRECTIVITY = "omni"

POS = 0 2 1.9

AIMANGLES = 0 0

Lp1m\_a = Lp\_voice\_normal

END

;Speakers

SOURCE A1

DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"

POS = 6.00 3.30 2.48

AIMPOS = 5.92 3.42 2.46

Lp1m\_a = Lp\_voice\_normal

MICSENSITIVITY = -35 ;as an actual mic

GAIN = <75 75 75 75 75 75>

END

SOURCE A2

DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"

POS = 6.00 3.30 3.14

AIMPOS = 5.92 3.42 3.13

Lp1m\_a = Lp\_voice\_normal

MICSENSITIVITY = -35 ;as an actual mic

GAIN = <75 75 75 75 75 75>

END

SOURCE A3

DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"

POS = -6.00 3.30 2.48

AIMPOS = -5.92 3.42 2.46

Lp1m\_a = Lp\_voice\_normal

MICSENSITIVITY = -35 ;as an actual mic

GAIN = <75 75 75 75 75 75>

END

SOURCE A4

DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"

POS = -6.00 3.30 3.14

AIMPOS = -5.92 3.42 3.13

Lp1m\_a = Lp\_voice\_normal

MICSENSITIVITY = -35 ;as an actual mic

GAIN = <75 75 75 75 75 75>

END