



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών & Βιώσιμου Σχεδιασμού

Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη ηχητικής εγκατάστασης για αναπαραγωγή ηχητικού
περιεχομένου εμπύθισης σε ανοικτούς χώρους ως μέρος
πολυμεσικής εγκατάστασης

Αλεξάνδρου Κ. Αλέξανδρος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Καλλίρης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμ. Δημοσιογραφίας &
Μέσων Μαζικής Επικοινωνίας ΑΠΘ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης

Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας
Πληροφορίας Πανεπιστημίου Πατρών

Μάιος 2024

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Μελέτη ηχητικής εγκατάστασης για αναπαραγωγή ηχητικού περιεχομένου εμβύθισης σε ανοικτούς χώρους ως μέρος πολυμεσικής εγκατάστασης

Αλεξάνδρου Κ. Αλέξανδρος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Καλλίρης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμ. Δημοσιογραφίας &
Μέσων Μαζικής Επικοινωνίας ΑΠΘ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης

Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας
Πληροφορίας Πανεπιστημίου Πατρών

Μάιος 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Καλλίρη Γεώργιο, για την πολύτιμη υποστήριξη και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τον φίλο & συνάδελφο Κάτσαρη Αναστάσιο, ο οποίος με εισήγαγε στον κόσμο της ακουστικής και της ηχοληψίας, συνδυάζοντας την επιστήμη του μηχανικού, με την τέχνη της μουσικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος και να αφιερώσω την εργασία στην κόρη μου Κωνσταντίνα και στον γιο μου Στάθη.

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας:

Καλλίρης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμ. Δημοσιογραφίας & Μέσων Μαζικής Επικοινωνίας ΑΠΘ

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης

Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας Πληροφορίας Πανεπιστημίου Πατρών

Μελέτη ηχητικής εγκατάστασης για αναπαραγωγή ηχητικού περιεχομένου εμβύθισης σε ανοικτούς χώρους ως μέρος πολυμεσικής εγκατάστασης

Αλεξάνδρου Κ. Αλέξανδρος
ΦΥΣΙΚΟΣ Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ακουστική μελέτη ενός υφιστάμενου εξωτερικού χώρου, του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος. Συγκεκριμένα εξετάζεται ο χώρος ανάμεσα στη βιβλιοθήκη του ιδρύματος και το κτίριο της Λυρικής σκηνής, ώστε να υλοποιηθεί μια ακουστική εγκατάσταση για την πραγματοποίηση καλλιτεχνικών δρώμενων με δυνατότητα για αναπαραγωγή ηχητικού περιεχομένου εμβύθισης.

Η εγκατάσταση θα γίνει με σκοπό την εκφραστική ικανοποίηση του καλλιτεχνικού σκέλους καθώς και την βέλτιστη ακουστική εμπειρία του επισκέπτη, ώστε μέσα από τον ήχο να κατανοήσει καλύτερα το οπτικό περιεχόμενο και να εκτιμήσει τη μουσική και τον ηχητικό σχεδιασμό.

Αρχικά λαμβάνει χώρα επισκόπηση της βιβλιογραφίας, σχετικά με συστήματα πολυκαναλικού ήχου και την εξέλιξή τους στο χρόνο και τις βασικές αρχές που διέπουν τη σύνθεση ηχητικού πεδίου.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μελέτη του χώρου, κάτοψη και έλεγχος τυχών προβλημάτων που θα πρέπει να διερευνηθούν στο πλαίσιο του σχεδιασμού, προκειμένου να γίνει μοντελοποίησή του, ώστε να γίνει σωστή κατανομή του απευθείας ήχου. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή και επισκόπηση συγκεκριμένων μηχανημάτων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την συνολική ηλεκτροακουστική εγκατάσταση. Ακολουθεί τέλος, η προσομοίωση και οπτικοποίηση μέσω λογισμικού του συστήματος επιλεγμένων σεναρίων χρήσης του χώρου και η πραγματοποίηση των απαραίτητων ρυθμίσεων.

Study of sound system installation for the reproduction of immersive audio content in open spaces as part of a multimedia installation

Alexandrou K. Alexandros
Physics Diploma University of Patras

ABSTRACT

The subject of this work is an acoustic study of an existing outdoor space, the Stavros Niarchos Foundation. Specifically, the space between the institution's library and Liriki skini is being examined, in order to implement an acoustic installation for the realization of artistic events with the possibility of reproducing immersive audio content.

The installation will be made with the aim of the expressive satisfaction of the artistic side as well as the optimal auditory experience of the visitor, so that through the sound he can better understand the visual content and appreciate the music and the sound design.

First, an overview of the literature on multichannel sound systems, as well as their evolution over time, the acoustic design of rooms, the layouts and soundproofing arrangements, the modern design methods through computer accounting, but also the construction details that must be considered

Then a study of the space is carried out, a floor plan and a check of possible problems that should be investigated in the context of the design, in order to model it, in order to make a correct distribution of the direct sound. Final step is the selection of machines that should be used for the overall electro-acoustic installation and simulation and visualization through system software for selected scenarios of using the place and making the necessary settings.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Κατάλογος εικόνων και πινάκων	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Γενικά.....	14
1.2 Σκοπός της έρευνας.....	14
1.3 Αντικείμενο της έρευνας και μεθοδολογία.....	15
1.4 Προσδοκώμενα αποτελέσματα	15
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	16
2.1 Ελεύθερο και αντηχητικό πεδίο	16
2.2 Χρόνος αντήχησης.....	17
2.3 Αμφιωτική ακοή.....	18
2.3 Μονοφωνία.....	22
2.4 Στερεοφωνία 2 καναλιών.....	22
2.5 Στερεοφωνία 3 καναλιών (3-0).....	23
2.6 Στερεοφωνία 4 καναλιών (3-1).....	24
2.7 Στερεοφωνία 5.1 surround (3-2).....	25
2.8 Στερεοφωνία 7.1 surround.....	26
2.9 Διαμόρφωση matrix surround.....	27
2.10 Dolby stereo- Dolby digital	27

2.11 Dolby Atmos	28
2.12 Σύνοψη.....	30
3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (WAVE FIELD SYNTHESIS)	31
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Ηλεκτροακουστικές τεχνικές	32
3.3 Αρχές ηλεκτροακουστικής δημιουργίας ανακλάσεων και αντήχησης	33
3.4 Μορφοποίηση ηχητικής δέσμης με γραμμικές συστοιχίες ηχείων	38
3.5 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές της σύνθεσης ηχητικού πεδίου σε συνδυασμό με την μορφοποίηση ηχητικής δέσμης.	40
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	42
4.1 Υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη χώρου	42
4.2 Προοριζόμενη χρήση του χώρου και προδιάγραφες.....	44
5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CATT ACOUSTIC- ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ	50
5.1 Υπολογισμοί ακουστικών δεικτών μέσω του λογισμικού Catt-Acoustics.....	50
5.2 Παρεμβάσεις στο χώρο με σκοπό τη βελτίωση των ακουστικών δεικτών. ...	57
5.3 Σύνοψη.....	78
6 ΗΧΗΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ HOLOPLOT	79
6.1 Εισαγωγή.....	79
6.2 Holoplot	79
6.3 Ηχητική σχεδίαση μέσω της τεχνολογίας της Holoplot	80
6.4 Παραμετροποίηση λογισμικού της Holoplot.....	81

6.4.1 Χρήση του συστήματος για συναυλία	86
6.4.2 Χρήση του συστήματος για προβολή ταινίας	101
6.4.3 Χρήση του συστήματος για ομιλία	111
6.4.4 Χρήση του συστήματος για καλλιτεχνικό δρώμενο	118
6.5 Συμπεράσματα	120
Βιβλιογραφικές Αναφορές	123
Παράρτημα 1:Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων X1 MD96 X1 και MD80-S	125
Παράρτημα 2: Εικόνες	131

Κατάλογος εικόνων και πινάκων

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Η ηχητική ενέργεια που περνά από 1m^2 σε απόσταση r , θα περάσει από 4m^2 σε απόσταση $2r$ και θα έχει 4 φορές μικρότερη ένταση. (Ανακτήθηκε από : Rumsey, 2001) σελ.16.

Εικόνα 2-2 Χρόνος αντήχησης ορισμός (Κώτσου, 2019)...σελ.17

Εικόνα 2.3 Διαωτική χρονική διαφορά ITD από 2 ηχητικές πηγές (ανακτήθηκε από: ITD_ILD presentation) ... σελ.18

Εικόνα 2.4 Τιμές ITD (σε msec) για διάφορες θέσεις αζιμούθιου (University of Washington, 2007) ... σελ.19

Εικόνα 2.5 Τιμές IDL για διαφορετικές συχνότητες σε σχέση με την γωνία της ηχητικής πηγής.(Ανακτήθηκε από: Warren 2008) ... σελ.20

Εικόνα 2.6 Κώνος σύγχυσης για καθορισμένη ITD. Όλες οι πηγές στην επιφάνεια του κώνου προκαλούν την ίδια καθορισμένη ITD.(Ανακτήθηκε από : Λελεδάκης, 2012) ... σελ.21

Εικόνα 2.7 Δύο set HRTF, αριστερά το αριστερό αυτί και δεξιά το δεξί.Οι μετρήσεις έγιναν ακριβώς μπροστά από τον ακροατή στις 0° και 30° , 60° , 90° , ακριβώς πάνω από το κεφάλι του. (Ανακτήθηκε από : Λελεδάκης, 2012) ... σελ.21

Εικόνα 2.8 Βέλτιστη τοποθέτηση ηχείων και ακροατή για στερεοφωνική αναπαραγωγή. σελ.23

Εικόνα 2.9 Στερεοφωνία 3 καναλιών. ... σελ.23

Εικόνα 2.10 Στερεοφωνία 4 καναλιών, 3 κεντρικά και ένα κανάλι που καλύπτει μια σειρά περιμετρικών ηχείων. ... σελ.24

Εικόνα 2.11 Διάταξη ηχείων για 5.1 surround σύστημα. ... σελ.25

Εικόνα 2.12 Διάταξη ηχείων για 7.1 surround σύστημα. ... σελ.26

Εικόνα 2.13 Τα δεδομένα του Dolby Digital αποθηκεύονται με οπτικό τρόπο μεταξύ των δοντιών ενός 35mm φιλμ.(Dolby Laboratories, Inc). ... σελ.28

Εικόνα 2.14 Dolby Atmos 7.1.4 σύστημα οικιακής διασκέδασης (ανακτήθηκε από: <https://kmraudio.de/atmos-beginner-guide/>)... σελ.29

Εικόνα 2.15 Απεικόνιση ακουστικών αντικειμένων λογισμικού Trinnov (ανακτήθηκε από: <https://kmraudio.de/atmos-beginner-guide/>)... σελ.29

Εικόνα 3.1 Το απευθείας σήμα και το σήμα από το ηχείο με χρονική καθυστέρηση... σελ.32

Εικόνα 3.2 Μονοκάναλη εκδοχή ηλεκτροακουστικού συστήματος για ενίσχυση αντήχησης βασιζόμενη σε εξωτερική ακουστική καθυστέρηση... σελ.33

Εικόνα 3.3 Μονοκάναλο σύστημα δημιουργίας ηλεκτροακουστικών ανακλάσεων βασιζόμενο σε 'εσωτερικές' ηλεκτρονικές καθυστερήσεις που καθορίζονται από τη συσκευή του συστήματος... σελ.34

Εικόνα 3.4 Εξίσωση Kirchhoff-Helmholtz... σελ.34

Εικόνα 3.5 Σύμφωνα με την εξίσωση Kirchhoff-Helmholtz το ηχητικό πεδίο μέσα σε μία επιφάνεια S, εξαιτίας ηχητικών πηγών έξω από αυτήν, καθορίζεται πλήρως από το ηχητικό πεδίο μέσα στην επιφάνεια S... σελ.35

Εικόνα 3.6 Διαχωρισμός περιοχής εκπομπής και περιοχής ακρόασης... σελ.35

Εικόνα 3.7 Ολοκλήρωμα Rayleigh II... σελ.35

Εικόνα 3.8 Σύνθεση ηχητικού πεδίου με τη βοήθεια της εξίσωσης Rayleigh II... σελ.36

Εικόνα 3.9 Εξομοίωση και επανεκπομπή μετώπων κύματος, μέσω επεξεργαστή, όταν τα μικρόφωνα και τα ηχεία βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις. ... σελ.37

Εικόνα 3.10 Αναπαραγωγή ηχητικού πεδίου... σελ.37

Εικόνα 3.11 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης 2 σημειακών πηγών ήχου... σελ.38

Εικόνα 3.12 Με την κατάλληλη αλλαγή στο πλάτος και την διαφορά φάσης αλλάζει η κατευθυντικότητα του κύματος. Ανακτήθηκε από:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phasearray.gif>... σελ.39

Εικόνα 3.13 Συστοιχίες ηχείων για υλοποίηση beam forming... σελ.39

Εικόνα 3.14 Πολικό διάγραμμα από συστοιχία ηχείων για beam forming... σελ.39

Εικόνα 4.1 Αίθριος χώρος προς μελέτη στο Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος... σελ.42

Εικόνα 4.2 Σχέδιο αίθριου χώρου μέσω του λογισμικού Sketch up pro 2022. ... σελ.43

Εικόνα 4.3 Δυνατές χρήσεις του χώρου, απαιτήσεις και προβλήματα προς επίλυση. ... σελ.44

Εικόνα 4.4. Θέση του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος. Ανακτήθηκε από Google maps. ... σελ.45

Εικόνα 4.5 Χάρτης κυκλοφοριακού θορύβου Νότιας Αθήνας. ... σελ.46

Εικόνα 4.6 Αποστάσεις του χώρου από τους παρακείμενους αυτοκινητόδρομους.

Ανακτήθηκαν από το Google Earth... σελ.47

Εικόνα 4.7 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (sec), για διάφορα είδη ακρόασης και όγκο χώρου. ... σελ.48

Εικόνα 5.1 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και το γαλάζιο αντιστοιχεί στον ουρανό και το ελεύθερο πεδίο απέναντι από τις πηγές. Στη μεσαία εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης... σελ.52

Εικόνα 5.2 Αρχική εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic για τον υπο μελέτη χώρο στο Ίδρυμα Σταυρος Νιάρχος... σελ.53

Εικόνα 5.3 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 , υφιστάμενη κατάσταση. ... σελ.54

Εικόνα 5.4 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, υφιστάμενη κατάσταση... σελ.55

Εικόνα 5.5 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, υφιστάμενη κατάσταση... σελ.55

Εικόνα 5.6 Δείκτης C-50 για το χώρο, υφιστάμενη κατάσταση... σελ.56

Εικόνα 5.7 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, υφιστάμενη κατάσταση... σελ.56

Εικόνα 5.8 Περίπτωση Ι. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και με κόκκινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης. ... σελ.58

Εικόνα 5.9 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση Ι. ... σελ.59

Εικόνα 5.10 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 περίπτωση Ι. ... σελ.60

Εικόνα 5.11 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση Ι. ... σελ.60

Εικόνα 5.12 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση Ι. ... σελ.61

Εικόνα 5.13 Δείκτης C-50, περίπτωση Ι. ... σελ.61

Εικόνα 5.14 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση Ι. ... σελ.62

Εικόνα 5.15 Περίπτωση ΙΙ. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζεται ο τοίχος πίσω από τη σκηνή, πράσινο το πάτωμα και με κόκκινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης. ... σελ.63

Εικόνα 5.16 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση ΙΙ. ... σελ.64

Εικόνα 5.17 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 περίπτωση ΙΙ. ... σελ.65

Εικόνα 5.18 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση ΙΙ. ... σελ.65

Εικόνα 5.19 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση ΙΙ. ... σελ.66

Εικόνα 5.20 Δείκτης C-50, περίπτωση II. ... σελ.66

Εικόνα 5.21 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση II. ... σελ.67

Εικόνα 5.22 Περίπτωση III. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και με σκούρο πράσινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί κατά το ήμισυ με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης. ... σελ.68

Εικόνα 5.23 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση III. ... σελ.69

Εικόνα 5.24 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 περίπτωση III. ... σελ.70

Εικόνα 5.25 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση III. ... σελ.70

Εικόνα 5.26 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση III. ... σελ.71

Εικόνα 5.27 Δείκτης C-50, περίπτωση III. ... σελ.71

Εικόνα 5.28 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση III. ... σελ.72

Εικόνα 5.29 Περίπτωση IV. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα ο τοίχος πίσω από τη σκηνή, πράσινο το πάτωμα και με σκούρο πράσινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με διαχυτικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης. ... σελ.73

Εικόνα 5.30 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση IV. ... σελ.74

Εικόνα 5.31 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 περίπτωση IV. ... σελ.75

Εικόνα 5.32 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση IV. ... σελ.76

Εικόνα 5.33 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση IV. ... σελ.76

Εικόνα 5.34 Δείκτης C-50, περίπτωση IV. ... σελ.77

Εικόνα 5.35 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση IV. ... σελ.77

Εικόνα 6.1 Η MSG SPHERE στο Λάς Βέγκας... σελ.79

Εικόνα 6.2 Παραδείγματα δημιουργίας ηχητικών πεδίων μέσω του λογισμικού της Holoplot... σελ.80

Εικόνα 6.3 Αρχικό μενού λογισμικού Holoplot plan... σελ.82

Εικόνα 6.4 Επιφάνεια εργασίας (εξωτερικός χώρος Σ. Νιάρχος) στο λογισμικό Holoplot, πριν την τοποθέτηση μονάδων ηχείων... σελ.83

- Εικόνα 6.5 Δημιουργία συστοιχιών ηχείων Holoplot μέσω του Holoplot plan... σελ.84
- Εικόνα 6.6 Θέσεις συστοιχιών και ζώνες κάλυψης στο λογισμικό Holoplot plan... σελ.84
- Εικόνα 6.7 Συστοιχίες και μενού ρυθμίσεων για δέσμη κάλυψης. ... σελ.85
- Εικόνα 6.8 Συστοιχίες και μενού ρυθμίσεων για την παραμετρική δέσμη. ... σελ.86
- Εικόνα 6.9 Περιοχή κάλυψης για χρήση συναυλίας... σελ.87
- Εικόνα 6.10 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise. ... σελ.88
- Εικόνα 6.11 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης στο 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, στην περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise. ... σελ.89
- Εικόνα 6.12 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise και κρουστική απόκριση σε διάφορα σημεία για έλεγχο της στάθμης dB-SPL ανά συχνότητα. ... σελ.90
- Εικόνα 6.13 Απεικόνιση dB-SPL με εύρος μπάνας bandwidth 1/6 της οκτάβας, με σήμα pink-noise και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz. ... σελ.92
- Εικόνα 6.14 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής M-noise. ... σελ.93
- Εικόνα 6.15 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης στο 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, στην περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής M-noise. ... σελ.94
- Εικόνα 6.16 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής M-noise και κρουστική απόκριση σε διάφορα σημεία για έλεγχο της στάθμης dB-SPL ανά συχνότητα. ... σελ.95
- Εικόνα 6.17 Απεικόνιση dB-SPL με εύρος μπάνας bandwidth 1/6 της οκτάβας, με σήμα m-noise και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz... σελ.97
- Εικόνα 6.18 Έλεγχος ακουστικής σκίασης στα 400 Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz... σελ.99
- Εικόνα 6.19 Απεικόνιση συμβολής κυμάτων στο χώρο με ανάλυση 1/12 της οκτάβας, στα 1000Hz. ... σελ.100
- Εικόνα 6.20 Θέση οθόνης για χρήση του χώρου για προβολή ταινίας... σελ.102
- Εικόνα 6.21 Στάθμη συστήματος σε συνεχή λειτουργία, με ρόζ θόρυβο, σε dBC SPL, με μία στήλη ανά συστοιχία εικόνα α (πάνω) και με 3 στήλες ανά συστοιχία εικόνα β (κάτω), χωρίς μείωση κέρδους αναπαραγωγής. ... σελ.103
- Εικόνα 6.22 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην κεντρική συστοιχία (επιλεγμένη). ... σελ.104

Εικόνα 6.23 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην αριστερή συστοιχία (επιλεγμένη). ... σελ.104

Εικόνα 6.24 Στάθμη έντασης σε κλίμακα 1 οκτάβα για κεντρικές συχνότητες 125Hz, 1000Hz και 8000Hz στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην αριστερή συστοιχία (επιλεγμένη). ... σελ.106

Εικόνα 6.25 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην πίσω δεξιά συστοιχία (επιλεγμένη). ... σελ.108

Εικόνα 6.26 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται στο σύνολο των συστοιχιών. ... σελ.108

Εικόνα 6.27 Στάθμη έντασης σε κλίμακα 1 οκτάβα για κεντρικές συχνότητες 125Hz, 1000Hz και 8000Hz στο σύνολο του χώρου που οφείλεται στο σύνολο των συστοιχιών. ... σελ.110

Εικόνα 6.28 Περιοχές κάλυψης για χρήση του χώρου για ομιλία και αντίστοιχες παραμετρικές δέσμες ακτινών, πίσω όψη (πάνω), μπροστά όψη (κάτω). ... σελ.112

Εικόνα 6.29 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (κάτω), χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτινών. ... σελ.113

Εικόνα 6.30 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στην περιοχή του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Αγγλικά, χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτινών, μέσω της πίσω αριστερής συστοιχίας. ... σελ.114

Εικόνα 6.31 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (κάτω), χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτινών, που προέρχονται από την ίδια κεντρική συστοιχία. ... σελ.115

Εικόνα 6.32 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (μεσαία), χρησιμοποιώντας δέσμες κάλυψης, που προέρχονται από την αριστερή και την πίσω δεξιά συστοιχία. Στην κάτω εικόνα φαίνονται και οι δυο δέσμες μαζί. ... σελ.117

Εικόνα 6.33 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL σε 3 σημεία του χώρου, όπου χρησιμοποιούνται εικονικές πηγές ήχου για την αναπαράσταση καλλιτεχνικού δρώμενου. Στην κάτω εικόνα φαίνεται η στάθμη και των 3 πηγών ταυτόχρονα. ... σελ.120

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Κλίμακα αξιολόγησης με βάση τις τιμές RASTI... σελ.49

Πίνακας 5.1 Συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών του χώρου... σελ.50

Πίνακας 5.2 Συντελεστές απορρόφησης- διάχυσης των υλικών για την παρέμβαση... σελ.57

Πίνακας 5.3 Περιπτώσεις που εξετάστηκαν και δυνατές παρεμβάσεις... σελ.57

Πίνακας 6.1 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας της Holoplot... σελ.81

Πίνακας 6.2 Περιπτώσεις διαφορετικής χρήσης του χώρου που θα εξεταστούν... σελ.83

Πίνακας 6.3 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από την αριστερή συστοιχία. ...
σελ.105

Πίνακας 6.4 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από την αριστερή συστοιχία ανά
κεντρική συχνότητα 125Hz, 1000Hz, 8000Hz... σελ.107

Πίνακας 6.5 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από το σύνολο των συστοιχιών. ...
σελ.109

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2023 – 2024, στο πλαίσιο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος «Ακουστικός Σχεδιασμός & Ψηφιακός Ήχος» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Η μελέτη και ο ακουστικός σχεδιασμός ενός υφιστάμενου χώρου προκειμένου να επιτευχθούν άρτια ακουστικά αποτελέσματα, αποτελεί μια πρόκληση για έναν μηχανικό ήχου και απαιτείται αποδοτική μεθοδολογία.

Ο σχεδιασμός γίνεται μέσω σύγχρονων σχεδιαστικών πρακτικών ενώ γίνεται λεπτομερής ανάλυση μέσω εξειδικευμένων λογισμικών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή προκειμένου να αντιμετωπιστούν όλοι οι παράμετροι και οι δυσκολίες υλοποίησης.

1.2 Σκοπός της έρευνας

Ο σκοπός της Διπλωματικής εργασίας είναι η εκπόνηση μίας ολοκληρωμένης ακουστικής μελέτης υπό τους περιορισμούς ενός υφιστάμενου χώρου, με στόχο τη δυνατότητα πολλαπλής χρήσης του ως κατευθυντήρια γραμμή σε παρόμοιες εφαρμογές. Η περίπτωση ενός υφιστάμενου χώρου και η ανάδειξη των δυνατοτήτων χρήσης του για άλλες εφαρμογές με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού, αποτελεί ένα πολύ καλό υπόδειγμα για το σκοπό της έρευνας.

1.3 Αντικείμενο της έρευνας και μεθοδολογία

Ο εξεταζόμενος χώρος είναι εξωτερικός, ισόγειος και έχει εμβαδό κάλυψης περίπου 2000m². Βρίσκεται στο Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος (Stavros Niarchos Foundation Cultural Center), στη νότια πλευρά της Αθήνας. Ο χώρος βρίσκεται ανάμεσα στην Εθνική Βιβλιοθήκη και την Εθνική Λυρική Σκηνή.

Αρχικά αναλύεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που περιλαμβάνει τις βασικές αρχές που διέπουν τα φαινόμενα του ήχου που αφορούν την παρούσα μελέτη, το ελεύθερο πεδίο, την αμφιωτική ακοή καθώς και την ιστορική εξέλιξη των συστημάτων στερεοφωνίας. Ακολουθεί τέλος το θεωρητικό υπόβαθρο για τη σύνθεση ηχητικού πεδίου και τις εφαρμογές που αυτό βρίσκει.

Κατόπιν ορίζεται η μεθοδολογία εκπόνησης της μελέτης, αποτυπώνεται η υφιστάμενη κατάσταση, ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου, αλλά και τα υλικά κατασκευής. Κατόπιν καθορίζονται όλοι οι περιορισμοί που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον ακουστικό σχεδιασμό και εξετάζονται οι λειτουργικά εφαρμόσιμες επιλογές χρήσης. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση του κυκλοφοριακού θορύβου, μέσω των επίσημων χαρτών του Υπουργείου Περιβάλλοντος και υπολογισμός των απαραίτητων ακουστικών δεικτών.

Στο επόμενο στάδιο έγινε μοντελοποίηση του χώρου στο λογισμικό Catt-Acoustics και υπολογισμός ακουστικών δεικτών, ενώ με βάση τα αποτελέσματα υλοποιήθηκαν περιπτώσεις παρεμβάσεων για τη βελτίωσή τους.

Τέλος με βάση τις ανάγκες και τις προδιαγραφές επιλέχθηκε για την ολοκλήρωση της μελέτης, η χρήση συγκεκριμένου ηχητικού συστήματος και υλοποιήθηκαν περιπτώσεις χρήσης του στο συγκεκριμένο χώρο.

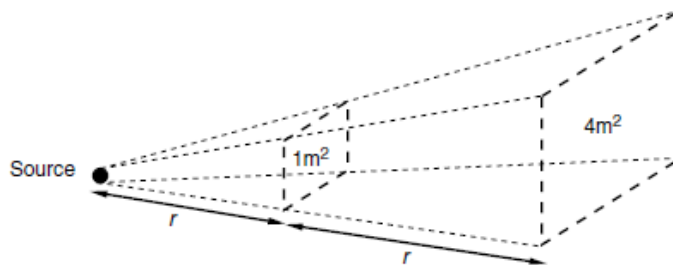
1.4 Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Προσδοκώμενο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι να προσδιοριστεί με βάση τις ιδιαιτερότητες και τα προβλήματα που εμφανίζει ο υπό μελέτη χώρος, το κατάλληλο σύστημα που θα μπορέσει να υποστηρίξει τις μελλοντικές του χρήσεις. Η παρούσα μελέτη θα αποτελέσει έναν οδηγό για την αξιοποίηση παρόμοιων χώρων με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων. Καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται συνεχώς, η μελέτη ενός νέου συστήματος και των δυνατοτήτων που μπορεί να έχει, αποτελεί μία πρόκληση και δίνει τη δυνατότητα για νέες εφαρμογές.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Ελεύθερο και αντηχητικό πεδίο

Ελεύθερο πεδίο θεωρείται στην ακουστική η περιοχή όπου δεν υπάρχουν καθόλου ανακλάσεις, βέβαια στην πραγματικότητα πάντα υπάρχει κάποιο είδος ανάκλασης, έστω και σε χαμηλό επίπεδο, π.χ. το έδαφος. Ιδανικά ελεύθερο πεδίο θεωρείται όταν κάποιος βρίσκεται πάνω από το έδαφος, μακριά από κτίρια ή επιφάνειες και τότε θα έχει την εμπειρία ενός ακουστικά κενού περιβάλλοντος. Σε ένα ελεύθερο πεδίο η ενέργεια του ήχου ακτινοβολείται από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς ανακλάσεις και ισχύει ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου για τον υπολογισμό του επιπέδου έντασης του ήχου σε κάποια απόσταση από την πηγή, εικόνα 2.1.

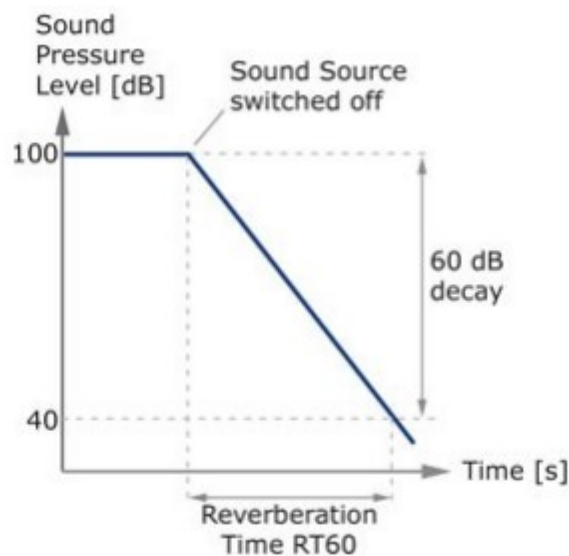


Εικόνα 2-1 Η ηχητική ενέργεια που περνά 1m^2 σε απόσταση r , θα περάσει από 4m^2 σε απόσταση $2r$ και θα έχει 4 φορές μικρότερη ένταση. (Ανακτήθηκε από : Rumsey, 2001).

Σε περίπτωση κατευθυντικής πηγής λαμβάνεται υπόψιν και ο συντελεστής κατευθυντικότητας στον αντίστοιχο άξονα.

2.2 Χρόνος αντήχησης.

Ως χρόνος αντήχησης (reverberation time RT) σε ένα χώρο ορίζεται ως ο απαιτούμενος χρόνος ώστε να μειωθεί η στάθμη ενός σήματος κατά 60 dB μετά τη διακοπή ενός σταθερής έντασης σήματος από την πηγή (Κοντομίχης & Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013).



Εικόνα 2-2 Χρόνος αντήχησης ορισμός (Κώτσου, 2019)

Το 1898 ο Sabine προσδιόρισε εμπειρικά ένα τύπο που υπολογίζει τον χρόνο αντήχησης, αποτελεί έναν στατιστικό τύπο που δεν λαμβάνει υπόψιν τη γεωμετρία του χώρου. Στην πράξη η σχέση του Sabine δίνει ακριβή αποτελέσματα όταν η απορρόφηση του χώρου είναι χαμηλή, οι διαστάσεις του χώρου δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και ο όγκος του χώρου είναι μεγάλος ώστε το πεδίο να θεωρείται διάχυτο, (Κώτσου, 2019).

Η εξίσωση του Sabine αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην ακουστική :

$$RT = 0.161 \cdot \frac{V}{A} \quad (\text{σε sec}) \quad \text{Σχέση 2.1 Εξίσωση Sabine}$$

Όπου V ο όγκος του χώρου σε m³ και A η απορρόφηση του χώρου σε m², η οποία υπολογίζεται από τη σχέση 1.2:

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n \quad \text{Σχέση 2.2 Συνολική απορρόφηση σε m}^2$$

Το 1930 οι Norris και Eyring πρότειναν μια βελτιωμένη εκδοχή (σχέση 1.3). του τύπου του Sabine με την προϋπόθεση ότι το πεδίο αντήχησης είναι διαχυτικό. Η εξίσωση Norris και Eyring δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα όταν η απορρόφηση είναι μεγάλη, (Κώτσου, 2019).

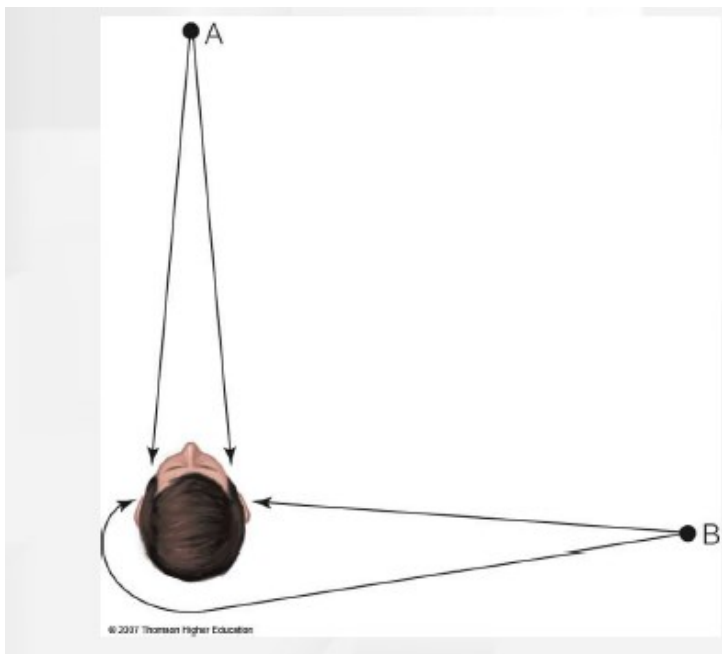
$$RT=0.161 \cdot \frac{V}{-S \ln(1-a)} \quad \text{Σχέση 2.3 Εξίσωση Norris και Eyring}$$

όπου a η μέση ηχοαπορρόφηση του δωματίου που υπολογίζεται από την σχέση 2.4.

$$\bar{a} = \frac{A}{S} \quad \text{Σχέση 1.4 Μέση ηχοαπορρόφηση}$$

2.3 Αμφιωτική ακοή.

Ένα χαρακτηριστικό της ανθρώπινης ακοής είναι η αμφιωτική ακοή η οποία επιτρέπει στον άνθρωπο να εντοπίζει τη θέση μίας ηχητικής πηγής. Ανάλογα με το πού βρίσκεται η ηχητική πηγή σε σχέση με τον ακροατή υπάρχει μια χρονική διαφορά άφιξης των ηχητικών κυμάτων στα αυτιά του, «Διαωτική χρονική διαφορά» (Interaural time difference- ITD) η οποία εξαρτάται επιπλέον από την συχνότητα του ήχου, την σκίαση που προκαλεί το κεφάλι του ακροατή και τα πτερύγια του αυτιού του (εικόνα 2.3).

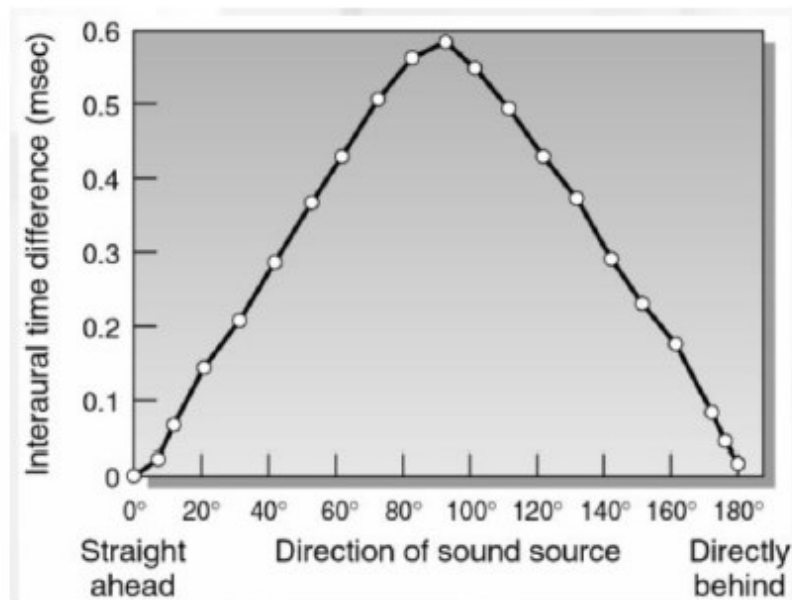


Εικόνα 2.3 Διαωτική χρονική διαφορά ITD από 2 ηχητικές πηγές.

(ανακτήθηκε από: ITD_ILD presentation)

Η ITD παίρνει την ελάχιστη τιμή της όταν η πηγή είναι σε ευθεία με τον ακροατή (πηγή A της εικόνας 2.3) και την μέγιστη όταν η πηγή είναι σε ευθεία, με τον νοητό άξονα που συνδέει τα 2 αυτιά του ακροατή (διαωτικός άξονας), (πηγή B της εικόνας 2.3).

Στην εικόνα 2.4 φαίνονται τιμές της ITD για διάφορες οριζόντιες γωνίες, σε σχέση με το κεφάλι του λήπτη.

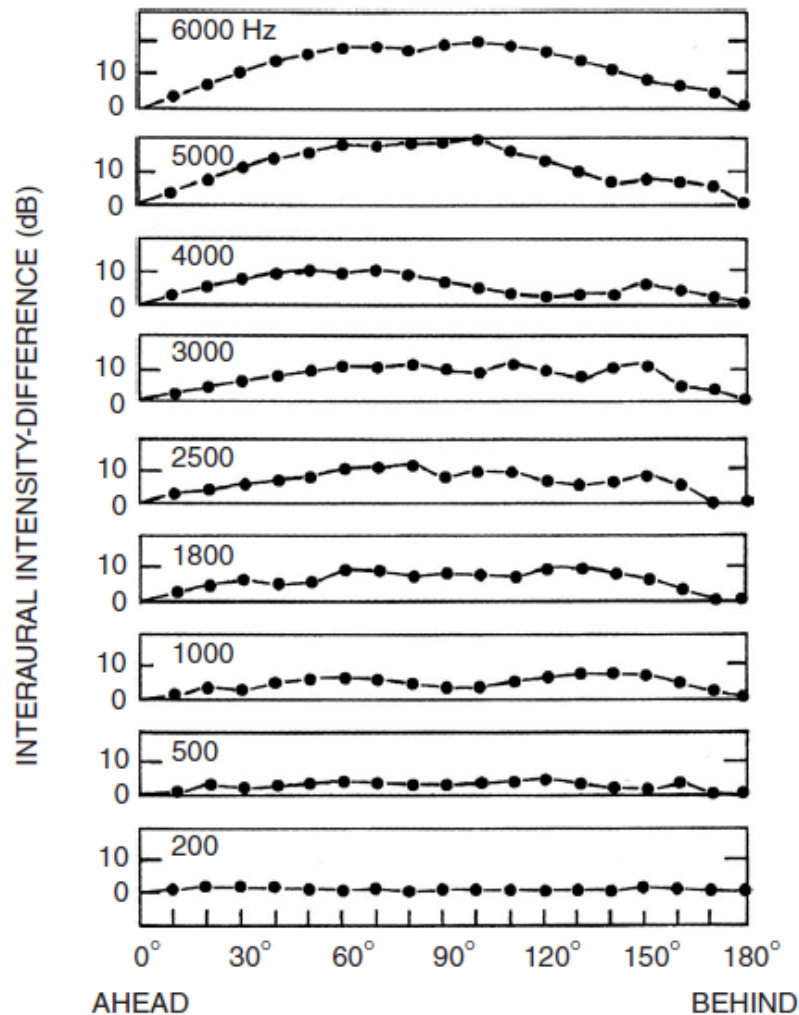


Εικόνα 2.4 Τιμές ITD (σε msec) για διάφορες θέσεις αζιμούθιου (University of Washington, 2007).

Τα ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας (πάνω από 1.5 kHz, περίπου), εξασθενούν κατά τη διέλευσή τους μέσα από κάποιο αντικείμενο, έτσι καθώς διέρχονται μέσα από το κεφάλι του ακροατή, μειώνεται η στάθμη έντασής τους, με αποτέλεσμα να ακούει ήχο διαφορετικής στάθμης, «Διαωτική διαφορά στάθμης» (Interaural level difference- ILD).

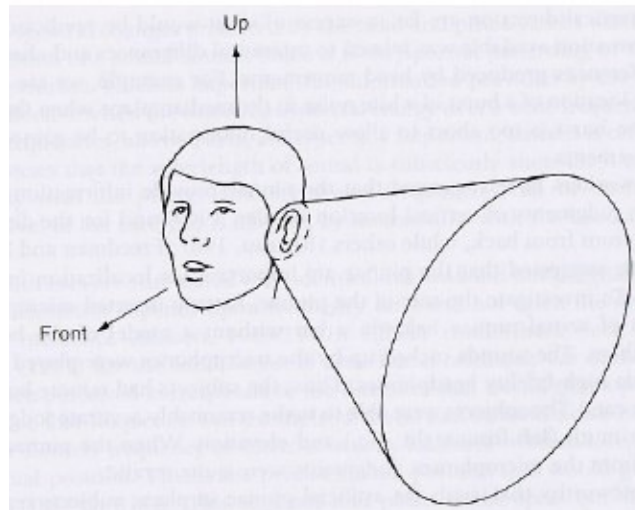
Η ILD βοηθάει στο χωρικό εντοπισμό ηχητικής πηγής που εκπέμπει σήματα σε υψηλές συχνότητες ενώ η ITD για τα σήματα με συχνότητες μικρότερες από 1.5 kHz, περίπου, αφού η παρουσία του κεφαλιού δεν προκαλεί σημαντική μείωση στάθμης, (Φλώρος, 2013).

Οι τιμές ILD για 6 διαφορετικές τιμές συχνότητας σε συνάρτηση με την γωνία της ηχητικής πηγής, φαίνονται στην εικόνα 2.5.



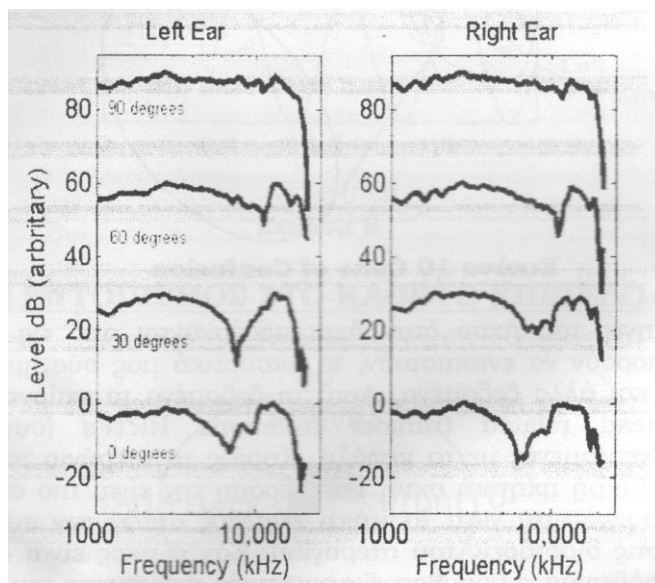
Εικόνα 2.5 Τιμές IDL για διαφορετικές συχνότητες σε σχέση με την γωνία της ηχητικής πηγής. (Ανακτήθηκε από: Warren 2008)

Αν και οι τιμές των ILD και ITD βοηθούν στον χωρικό εντοπισμό της θέσης μιας ηχητικής πηγής, γύρω από τον ακροατή υπάρχουν θέσεις, που παρέχουν τις ίδιες τιμές ILD και ITD και προκαλούν σύγχυση ως προς την πραγματική θέση της πηγής. Ο χώρος που αντιστοιχεί σε αυτές τις τιμές είναι κωνικός και ονομάζεται κώνος σύγχυσης (cone of confusion), (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 Κώνος σύγχυσης για καθορισμένη ITD. Όλες οι πηγές στην επιφάνεια του κώνου προκαλούν την ίδια καθορισμένη ITD. (Ανακτήθηκε από : Λελεδάκης, 2012)

Για τον ακριβέστερο εντοπισμό της θέσης μιας ηχητικής πηγής, χρησιμοποιούνται και οι «συναρτήσεις μεταφοράς σχετικές με την κεφαλή» (Head-related transfer functions-HRTF). Οι συναρτήσεις αυτές, δείχνουν πως επιδρά το αυτί, το κεφάλι και του σώμα (Τσιφλίδης, 2013). Τα μέρη αυτά, και κυρίως το αυτί, φιλτράρουν τα σήματα έτσι ώστε μέσα σε αυτά να περιέχονται οι πληροφορίες που αφορούν την διεύθυνση πρόσπτωσης και τη θέση της πηγής. Μέσα σε ανηχικούς θαλάμους, με προσομοίωση, προκύπτουν οι συναρτήσεις HRTF και ενδεικτικά για τον κάθετο άξονα παρουσιάζονται στην εικόνα 2.7 για 4 γωνίες.



Εικόνα 2.7 Δύο set HRTF, αριστερά το αριστερό αυτί και δεξιά το δεξί. Οι μετρήσεις έγιναν ακριβώς μπροστά από τον ακροατή στις 0ο και 30ο, 60ο, 90ο, ακριβώς πάνω από το κεφάλι του. (Ανακτήθηκε από : Λελεδάκης, 2012)

2.3 Μονοφωνία.

Η λέξη μονοφωνία ετυμολογικά προέρχεται από τις λέξεις μόνο=ένα + φωνή.

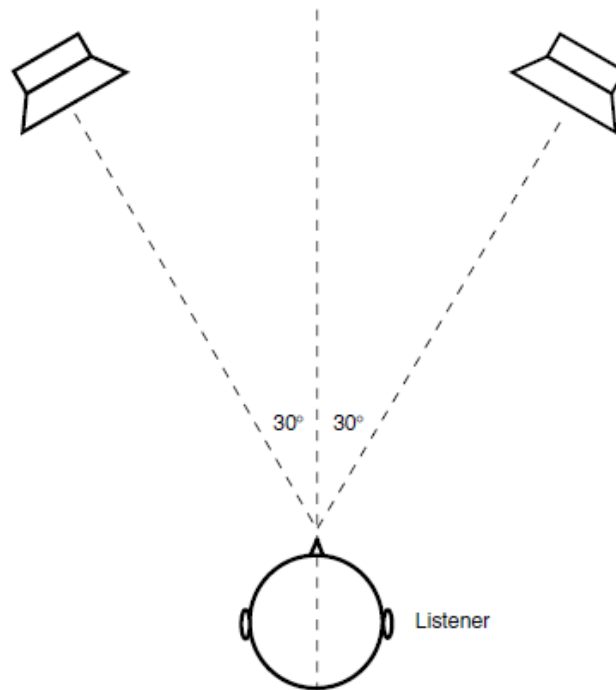
Όταν η ηχογράφηση ενός ήχου π.χ. μιας κιθάρας ή και περισσότερων μουσικών οργάνων, γίνεται από ένα και μόνο μικρόφωνο ή η αναπαραγωγή αντίστοιχα από ένα κανάλι ήχου τότε ο ήχος ονομάζεται μονοφωνικός. Στη μονοφωνία δεν υπάρχει δυνατότητα διασποράς του ήχου, παρά μόνο η διαχείριση του βάθους μέσω της διαφοράς εντάσεων των εξερχόμενων ήχων. Σε μια μονοφωνική αναπαραγωγή δεν υπάρχει καλύτερη θέση ακρόασης για τους ακροατές. Από τα τέλη του 18ου αιώνα που ανακαλύφθηκαν τα πρώτα αυτόματα μηχανήματα καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου μέχρι και τα τέλη του 1950, ήταν μονοφωνικά (Τριποδάκης 2011)

(<https://www.musicgateway.com/blog/music-production/mono-vs-stereo>)

2.4 Στερεοφωνία 2 καναλιών.

Η στερεοφωνική αναπαραγωγή 2 καναλιών (2-0 stereo) υλοποιείται με 2 μπροστινά κανάλια ήχου και έχει επικρατήσει να ονομάζεται απλά στέρεο,(εικόνα 2.8). Ουσιαστικά όμως ο όρος στερεοφωνία εκφράζει ηχητικές ‘εικόνες’ τριών διαστάσεων (surround sound). Στα διεθνή πρότυπα η περιγραφή στερεοφωνικής διαμόρφωσης ηχείων γίνεται με 2 αριθμούς στο πρότυπο ‘x-y stereo’ όπου x είναι ο αριθμός των μπροστινών καναλιών ενώ y είναι τα πίσω ή πλευρικά κανάλια.

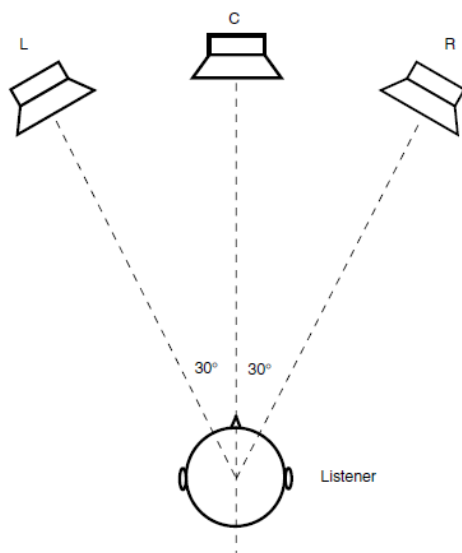
Στην στερεοφωνική αναπαραγωγή, τόσο και ηχογράφηση, υπάρχει η απαίτηση να δημιουργηθεί η εντύπωση φυσικών χώρων, θέσεων πηγής, βάθος, μέγεθος και ούτω καθεξής και να αναδημιουργηθεί, ένα ηχητικό πεδίο με ακρίβεια. Βέβαια οι ακροατές σπάνια κάθονται στη βέλτιστη θέση ακρόασης, ενώ συχνά μετακινούνται στο χώρο καθώς ακούν. Μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια είναι δυνατό να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ακουστικά, αλλά δεν είναι πάντα μια πρακτική ή επιθυμητή μορφή για ακρόαση. Στην πράξη μία ακριβής ανακατασκευή ηχητικού πεδίου που καλύπτει μια ευρεία ακρόαση μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση πολύ μεγάλου αριθμού ηχείων και αυτό είναι πιθανό να μην είναι πρακτικό για τις περισσότερες εφαρμογές.



Εικόνα 2.8 Βέλτιστη τοποθέτηση ηχείων και ακροατή για στερεοφωνική αναπαραγωγή

2.5 Στερεοφωνία 3 καναλιών (3-0).

Η στερεοφωνία 3 καναλιών αποτελείται από ένα αριστερό, ένα δεξί και ένα κεντρικό ηχείο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 Στερεοφωνία 3 καναλιών.

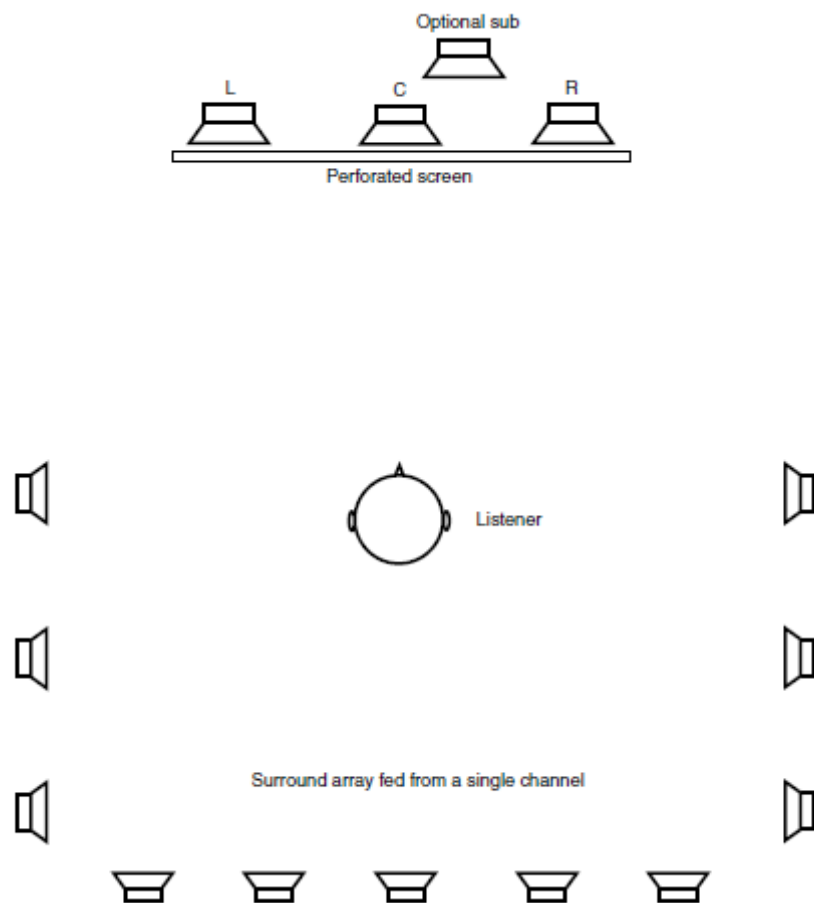
Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα της στερεοφωνίας τριών καναλιών. Πρώτον, επιτρέπει κάπως φαρδύτερη μπροστινή σκηνή ήχου από τη στερεοφωνία δύο καναλιών, επειδή το κεντρικό κανάλι ενεργεί για να «αγκυρώσει» την κεντρική εικόνα και τα αριστερά και δεξιά μεγάφωνα μπορεί να τοποθετηθούν πιο έξω στα πλάγια (μέχρι και $\pm 45^\circ$).

Δεύτερον, το κεντρικό μεγάφωνο επιτρέπει μεγαλύτερη γκάμα θέσεων ακρόασης σε πολλές περιπτώσεις, π.χ. σινεμά, καθώς ο ήχος πηγάζει από μια πραγματική πηγή.

Ένα πρακτικό πρόβλημα με το στερεοφωνικό τριών καναλιών είναι η θέση του κεντρικού ηχείου, το οποίο σε ένα σινεμά μπορεί να τοποθετηθεί πίσω από την οθόνη, ωστόσο σε καθημερινές εφαρμογές π.χ. σε οικιακό περιβάλλον, θα πρέπει να μπει εκεί που είναι η οθόνη, δημιουργώντας πρακτικά προβλήματα.

2.6 Στερεοφωνία 4 καναλιών (3-1).

Σε σχέση με τη στερεοφωνία 3 καναλιών, υπάρχει ένα επιπλέον κανάλι που μπορεί να καλύψει μια σειρά περιμετρικών ηχείων π.χ. σε ένα σινεμά, ώστε να αυξηθεί η ακουστική εμπειρία των ακροατών, εικόνα 2.10.



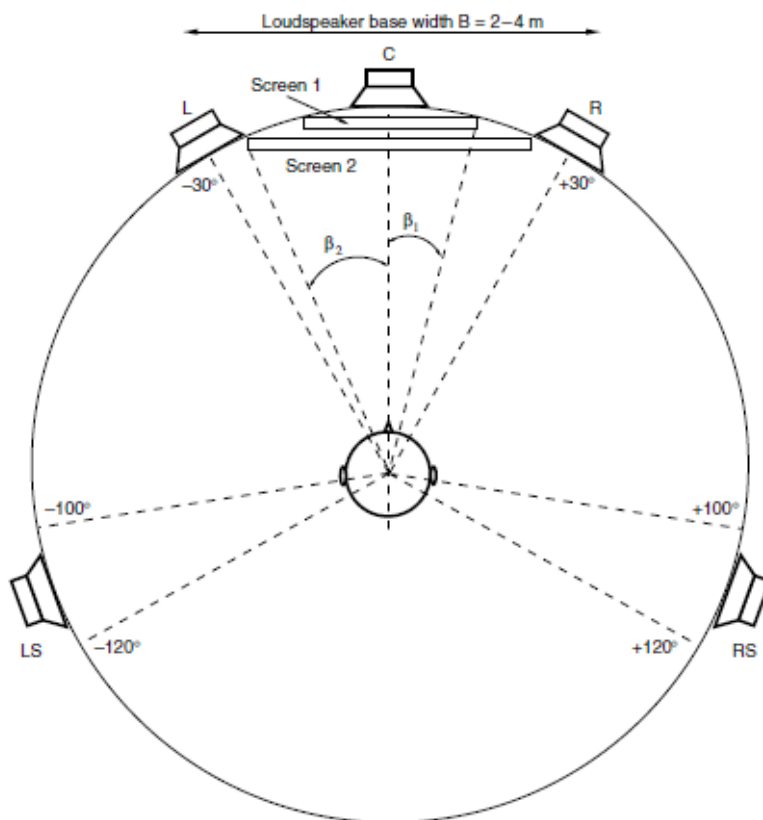
Εικόνα 2.10 Στερεοφωνία 4 καναλιών, 3 κεντρικά και ένα κανάλι που καλύπτει μια σειρά περιμετρικών ηχείων.

2.7 Στερεοφωνία 5.1 surround (3-2).

Με τη στερεοφωνική διαμόρφωση 3-2 έχουν τυποποιηθεί πολυάριθμες εφαρμογές ήχου surround, συμπεριλαμβανομένου του κινηματογράφου, της τηλεόρασης καθώς και για οικιακή χρήση. Λόγω της ευρείας χρήσης του στη γενική γλώσσα, ο όρος «5.1 surround» έχει επικρατήσει.

Αποτελείται από τρία μπροστινά κανάλια για χρήση για συμβατική στερεοφωνική εικόνα τριών καναλιών και δύο πλευρικά κανάλια τα οποία προορίζονται μόνο για τη δημιουργία υποστηρικτικής ατμόσφαιρας, εφέ ή «εντύπωση δωματίου». Με τεχνικές panning και γνώση των ψυχοακουστικών διαδικασιών, μπορούν να τροφοδοτηθούν τα πέντε κανάλια με ακρίβεια, για πλήρη ηχητικό εντοπισμό.

Στην ονομασία 5.1, ο αριθμός 1 αναφέρεται στο κανάλι χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer ή low frequency effects). Η διάταξη των ηχείων και η διαμόρφωση των καναλιών σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R BS.775, φαίνεται στην εικόνα 2.11.



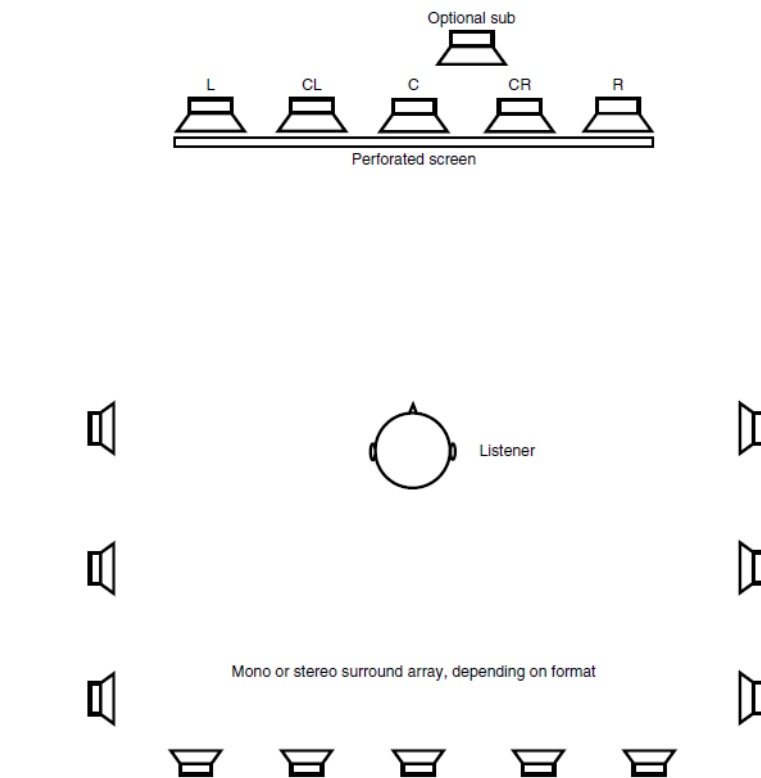
Εικόνα 2.11 Διάταξη ηχείων για 5.1 surround σύστημα.

Το κανάλι για εφέ χαμηλής συχνότητας είναι ένα ξεχωριστό κανάλι sub-bass με όριο που εκτείνεται στο μέγιστο των 120 Hz. Προορίζεται για μεταφορά ειδικού περιεχομένου χαμηλής συχνότητας που απαιτεί ηχητική πίεση σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά που

μπορούν να χειριστούν τα κύρια κανάλια. Δεν προορίζεται για τη μεταφορά της συνιστώσας χαμηλής συχνότητας των σημάτων του κύριου καναλιού και είναι χρήσιμο κυρίως σε εφαρμογές ήχου και εικόνας όπως εκρήξεις ή και άλλοι θόρυβοι υψηλών εντάσεων, αν και μπορεί να είναι χρησιμοποιείται και σε άλλες περιπτώσεις.

2.8 Στερεοφωνία 7.1 surround.

Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση προστίθενται 2 επιπλέον κανάλια σε σχέση με το 5.1, στο κέντρο αριστερά (CL) και στο κέντρο δεξιά (CR). Η διαμόρφωση αυτή βρίσκει εφαρμογή σε σινεμά όπου λόγω της ευρείας οθόνης χρειάζονται πρόσθετα κανάλια για την κάλυψη γωνιών μεταξύ ηχείων για όλες τις θέσεις των θεατών, (εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 Διάταξη ηχείων για 7.1 surround σύστημα.

2.9 Διαμόρφωση matrix surround.

Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιτρέπει χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που συνδυάζει τα υφιστάμενα κανάλια (συνήθως 2, για να είναι συμβατό και με άλλα συστήματα) με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλο αποκωδικοποιητή. Με τη μητροποίηση (matrix) των σημάτων μπορούν να αναπαρασταθούν χρησιμοποιώντας λιγότερα κανάλια από αυτά που περιέχει το αρχικό υλικό.

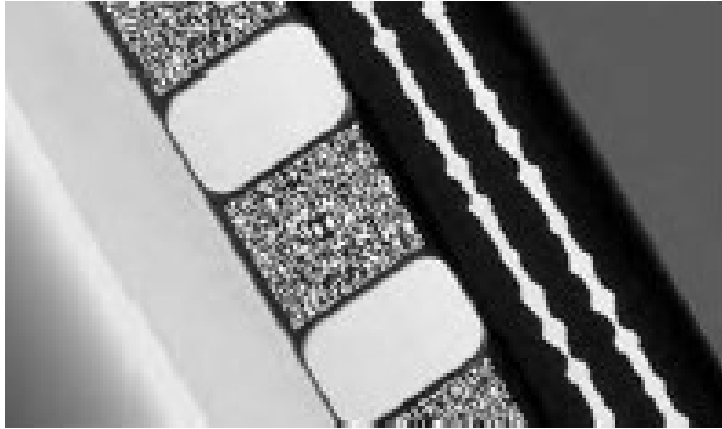
2.10 Dolby stereo- Dolby digital

Η Dolby Labs ασχολήθηκε στενά με την ανάπτυξη του κινηματογραφικού ήχου surround και σταδιακά μετακινήθηκε στον τομέα του ήχου surround για ευρύτερη εμπορική χρήση από καταναλωτές.

Το Dolby Stereo είναι μια μορφή ήχου που χρησιμοποιεί ήχο 4 καναλιών για οπτική ηχογράφιση 35mm και ήχο 6 καναλιών για μαγνητική ηχογράφιση 70mm. Αυτό παράγει ποιότητα ήχου που μπορεί να εμβυθίσει πλήρως τον θεατή μέσω ειδικά τοποθετημένων ηχείων σε μια κινηματογραφική αίθουσα. Το Dolby Stereo Matrix χρησιμοποιεί τέσσερα κανάλια — Αριστερά, Δεξιά, Κέντρο και Surround — για να το πετύχει. Τα 4 κανάλια συνδυάζονται ως 2 (Left-total και Right-total) πάνω στο φιλμ της ταινίας.

Κάθε DVD παγκοσμίως και όλες οι υψηλής ευκρίνειας (HD) εκπομπές στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούν Dolby Digital (γνωστό ως AC-3). Το Dolby Digital 5.1 έχει εξελιχθεί σε Dolby Digital Plus™, παρέχοντας έως και 7.1 κανάλια ήχου surround σε συσκευές που κυμαίνονται από τηλεοράσεις έως κινητά τηλέφωνα.

Στον πυρήνα της, η τεχνολογία Dolby Digital αντιπροσωπεύει έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο για τα κινηματογραφικά στούντιο, τα τηλεοπτικά δίκτυα και άλλους παρόχους περιεχομένου να συμπιέζουν το μέγεθος των πολυκαναλικών αρχείων ήχου, χωρίς να επηρεάζουν την ποιότητα του ήχου. Όσο μικρότερο είναι το αρχείο, τόσο πιο εύκολη είναι η διανομή του. Με το Dolby Digital, είναι δυνατό να συμπεριληφθεί μια πλήρη μίξη ήχου 5.1 καναλιών σε εκτύπωση φιλμ ή DVD ή ως μέρος τηλεοπτικής μετάδοσης, εικόνα 2.13.

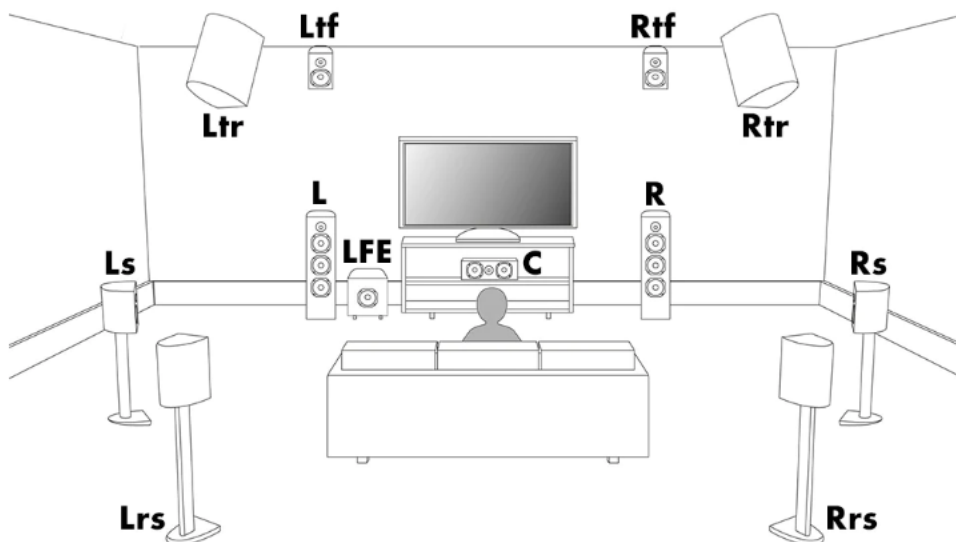


Εικόνα 2.13 Τα δεδομένα του Dolby Digital αποθηκεύονται με οπτικό τρόπο μεταξύ των δοντιών ενός 35mm φιλμ.(Dolby Laboratories, Inc)

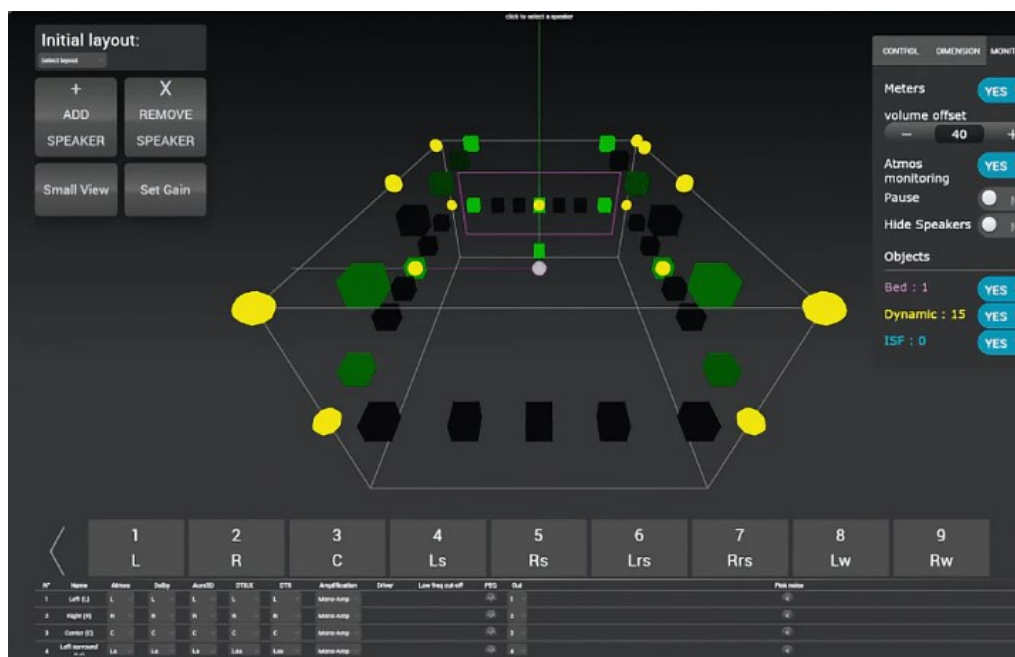
2.11 Dolby Atmos

Το σύστημα Dolby Atmos σε σχέση με το παραδοσιακό 5.1 και 7.1 σύστημα surround της Dolby, προσθέτει μια τρίτη, πάνω από το κεφάλι του ακροατή διάσταση, (εικόνα 2.14) και έτσι δεν είναι πια ένα σύστημα στέρεο με 6 ή 7 κανάλια. Το Dolby Atmos προσφέρει μια εμπειρία ακρόασης που με ακρίβεια αντιπροσωπεύει το φυσικό ήχο.

Το Dolby Atmos εισάγει την έννοια του ακουστικού αντικειμένου (audio object), π.χ. μια κιθάρα ή φωνητικά και έτσι ο ήχος δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένο αριθμό καναλιών ή σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου, αφού το ακουστικό αντικείμενο μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε στο χώρο, (εικόνα 2.15). Συνήθως χρησιμοποιούνται μέχρι 64 ηχεία και βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε σινεμά αλλά και για οικιακή χρήση ή ακόμα και σε κινητά τηλέφωνα.



Εικόνα 2.14 Dolby Atmos 7.1.4 σύστημα οικιακής διασκέδασης (ανακτήθηκε από: <https://kmraudio.de/atmos-beginner-guide/>)



Trinnov Object Viewer

Εικόνα 2.15 Απεικόνιση ακουστικών αντικειμένων λογισμικού Trinnov (ανακτήθηκε από: <https://kmraudio.de/atmos-beginner-guide/>)

2.12 Σύνοψη

Τα συστήματα που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο ικανοποιούν την επίτευξη ακουστικής εμπειρίας υψηλού επιπέδου σε πολλές εφαρμογές ωστόσο εμφανίζουν κάποιους περιορισμούς όταν πρόκειται για δημιουργία ακουστικού πεδίου που πλησιάζει το πραγματικό και το οποίο αποδίδει καλύτερα η θεωρία της σύνθεσης ηχητικού πεδίου και οι εφαρμογές της.

3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (WAVE FIELD SYNTHESIS)

3.1 Εισαγωγή

Η ακουστική σε κάποιο χώρο, καθορίζεται από τις ιδιότητες τόσο του άμεσου ήχου όσο και του ανακλώμενου. Εάν χρησιμοποιούνται ηλεκτροακουστικά μέσα για την αποκατάσταση των ενοχλητικών φαινομένων, πρέπει να αντιμετωπιστούν προβλήματα εντοπισμού της ηχητικής πηγής και να γίνει διαχείριση του πεδίου αντήχησης. Για να αποφευχθούν αυτές οι παρενέργειες εισάγεται η έννοια της σύνθεσης ηλεκτροακουστικού μετώπου κύματος, wave field synthesis (WFS). Η συγκεκριμένη θεωρία βασίζεται στο ολοκλήρωμα Kirchhoff-Helmholtz.

Σε αυτή τη θεωρία τα πεδία κυμάτων των ηχητικών πηγών μετρούνται στη σκηνή από κατευθυντικά μικρόφωνα. Στη συνέχεια, προεκτείνονται ηλεκτρονικά μακριά από τη σκηνή και τελικά επαναμεταδίδονται στην αίθουσα από μία ή περισσότερες συστοιχίες ηχείων.

Το προτεινόμενο σύστημα στοχεύει στην εκπομπή μετώπων κυμάτων που είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα πραγματικά κυματικά πεδία.

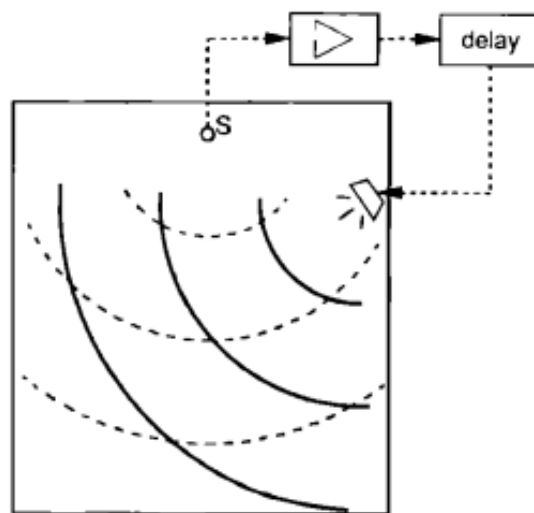
Θεωρητικά, η ανάγκη είναι να μην υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των ηλεκτρονικά δημιουργούμενων κυμάτων και των πραγματικών κυμάτων. Χρησιμοποιώντας την ιδέα της εικονικής πηγής, τα ανακλώμενα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν με τον ίδιο τρόπο όπως ο άμεσος ήχος, (A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel).

Η κρουστική απόκριση ενός χώρου περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες του απευθείας ήχου, από μια ηχητική πηγή, του ψευδοαπευθείας ήχου από μια εικονική ηχητική πηγή, των πρώιμων και των μεταγενέστερων ανακλάσεων, οι οποίες επιδρούν στην ακουστική αντίληψη ενός μουσικού κομματιού ή την καταληπτότητα μιας ομιλίας. Οι πρώιμες ανακλάσεις οι οποίες φτάνουν στον ακροατή συνεισφέρουν στην ένταση και την ευκρίνεια του ήχου και του δημιουργούν την αίσθηση του χώρου. Οι μεταγενέστερες ανακλάσεις δημιουργούν είτε λίγο είτε περισσότερο αντηχητικό πεδίο και αποδίδουν στο χώρο πιο ‘γεμάτο’ ήχο ή πιο ζεστό και λαμπρό. Τα επιθυμητά αποτελέσματα σχετικά με τις ανακλάσεις καθορίζονται από την αρχιτεκτονική διάταξη του χώρου, συγκεκριμένα ο όγκος και οι μέσες ακουστικές ιδιότητες των υλικών στα όρια του χώρου, καθορίζουν τον χρόνο αντήχησης και το επίπεδο αντήχησης. Ανάλογα με τη χρήση του χώρου απαιτούνται διαφορετικές

ακουστικές συνθήκες, έτσι για μία ομιλία ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι πιο μικρός από ότι σε μια μουσική εκτέλεση. Σε κάποιο χώρο πολλαπλών χρήσεων, οι ακουστικές συνθήκες πρέπει να ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση του κάθε φορά. Διάφορες αρχιτεκτονικές λύσεις βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση π.χ. κινούμενες κουρτίνες ή οροφές κ.α. ωστόσο οι λύσεις αυτές είναι πολύπλοκες, ακριβές και δύσκολες στην υλοποίηση, χωρίς να επιφέρουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα κάθε φορά.

3.2 Ηλεκτροακουστικές τεχνικές

Τη λύση στο σχεδιασμό ανακλαστικών πρότυπων, δόθηκε μέσω ηλεκτροακουστικών διαδικασιών, που επιτρέπουν πιο απλή και ευέλικτη δημιουργία ακουστικών συνθηκών, ανάλογα με την χρήση του χώρου. Η δημιουργία ενός φυσικού ακουστικού πεδίου παραμένει ωστόσο δύσκολη και με τα ηλεκτροακουστικά μέσα. Ένα συνηθισμένο πρόβλημα είναι ότι ο εντοπισμός της θέσης της ηχητικής πηγής προσδιορίζεται από τη θέση του ηχείου και όχι από την πραγματική θέση της ηχητικής πηγής π.χ. τραγουδιστής και συνήθως λύνεται χρησιμοποιώντας καθυστέρηση (delay), ώστε το σήμα από το ηχείο (ψευδοαπευθείας ήχος) να φτάνει μετά από το σήμα της πηγής, ακόμα και έτσι όμως πρέπει τα 2 σήματα να μην διαφέρουν πολύ στον ακροατή (εικόνα 3.1).

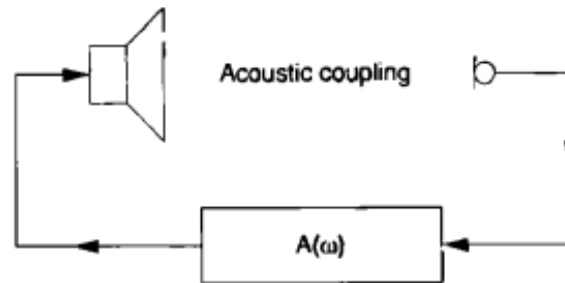


Εικόνα 3.1 Το απευθείας σήμα και το σήμα από το ηχείο με χρονική καθυστέρηση

Τα υψηλής ποιότητας ηλεκτροακουστικά συστήματα για ψευδοαπευθείας ή ανακλώμενο ήχο βασίζονται στην τεχνολογία μετώπου κύματος (wave front technology) τα οποία θεωρητικά, δημιουργούν ηλεκτροακουστικά πεδία ήχου, τα οποία δεν ξεχωρίζουν από τα φυσικά.

3.3 Αρχές ηλεκτροακουστικής δημιουργίας ανακλάσεων και αντήχησης

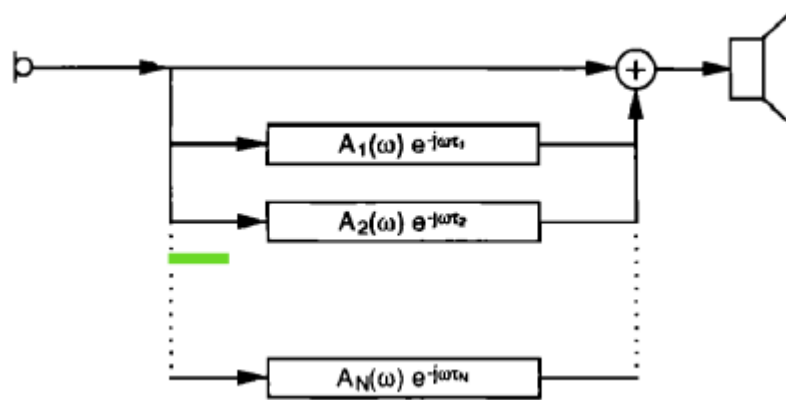
Τα ηλεκτροακουστικά συστήματα αναπτύχθηκαν στη λογική της αύξησης του αντηχητικού ήχου ενισχύοντας την αντηχητική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα αριθμό καναλιών τα οποία έχουν ένα μικρόφωνο συνδεδεμένο μέσω ενός εξασθενητή σε ένα ηχείο το οποίο επανεκπέμπει το σήμα στο ακροατήριο, εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Μονοκάναλη εκδοχή ηλεκτροακουστικού συστήματος για ενίσχυση αντήχησης
βασισμένη σε εξωτερική ακουστική καθυστέρηση

Το μικρόφωνο λαμβάνει τον ήχο από ένα ακουστικό και όχι ηλεκτρικό μονοπάτι, προκειμένου να δημιουργηθεί η επόμενη ηλεκτροακουστική ανάκλαση, η οποία δημιουργείται από την ακουστική καθυστέρηση μεταξύ ηχείου και μικροφώνου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ακουστικό ζευγάρωμα (acoustic coupling) και απαιτεί αρκετά κανάλια ήχου, έχει όμως και μειονεκτήματα, όπως είναι ο χρωματισμός του ήχου και για να αποφευχθεί αυτό απαιτούνται πολλά κανάλια ήχου. Το κούρδισμα (tuning) του συστήματος είναι απαραίτητο σε αυτή την περίπτωση.

Μία δεύτερη χρήση των ηλεκτροακουστικών συστημάτων για τη δημιουργία των ανακλαστικών κυμάτων, είναι ότι δημιουργούν τις ακουστικές συνθήκες που ταιριάζουν στο χώρο και στο είδος της μουσικής που εκπέμπεται. Η συνεισφορά κάθε ηχείου καθορίζεται από μια ηλεκτρονική γραμμή καθυστέρησης (delay) που δημιουργείται από την αντίστοιχη συσκευή (internal hardware), εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Μονοκάναλο σύστημα δημιουργίας ηλεκτροακουστικών ανακλάσεων βασιζόμενο σε ‘εσωτερικές’ ηλεκτρονικές καθυστερήσεις που καθορίζονται από τη συσκευή του συστήματος.

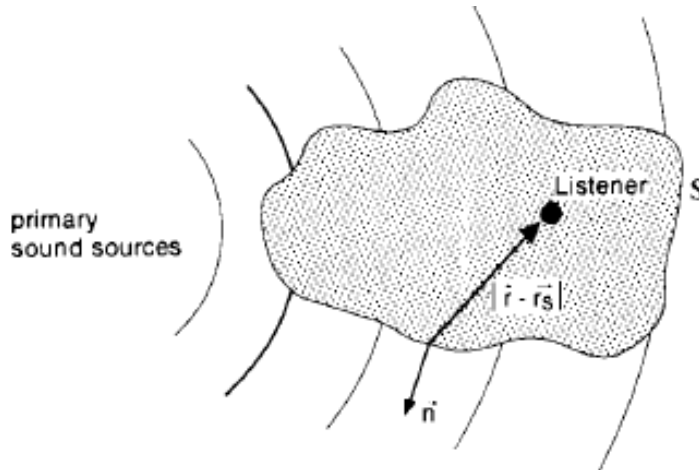
Τα συστήματα που βασίζονται σε αυτή την αρχή υιοθετούν τα χαρακτηριστικά του χώρου χρησιμοποιώντας τα μικρόφωνα ως πηγή εισόδου. Το ακουστικό ζευγάριωμα μικροφώνων και ηχείων πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν λιγότερο, βελτιώνοντας τις θέσεις των μικροφώνων και την κατευθυντικότητα τους. Το μειονέκτημα του συστήματος είναι ότι είναι δύσκολο να εξασφαλίσει την αμφιωτική ακοή σε όλες τις θέσεις ακρόασης. Ο μοναδικός τρόπος να δημιουργηθούν πραγματικά φυσικές ακουστικές συνθήκες είναι η σύνθεση μετώπων κύματος όπως σε πραγματικές συνθήκες συμβαίνει. Ο συνδυασμός των παραπάνω δύο τεχνικών δημιουργεί ένα ελκυστικό αντηχητικό πεδίο.

Η σύνθεση μετώπων ηχητικών κυμάτων βασίζεται στην αρχή του Huygens, η οποία αναφέρει ότι κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερογενής πηγή του κύματος. Ο Kirchhoff έδωσε μια ποσοτική έκφραση στην παραπάνω αρχή και προέκυψε ο τύπος των Kirchhoff-Helmholtz, που φαίνεται στην εικόνα 3.4.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) + \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial n} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right] dS.$$

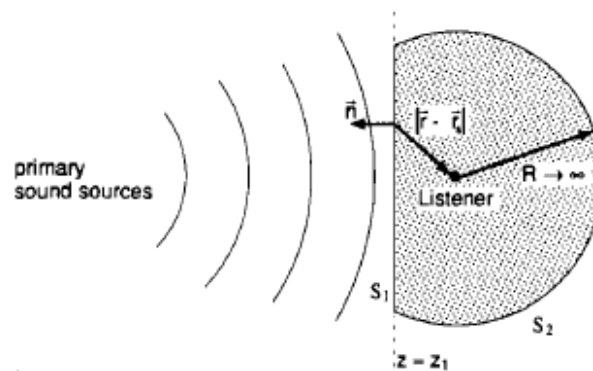
Εικόνα 3.4 Εξίσωση Kirchhoff-Helmholtz

Όπου $k=\omega/c$, ο κυματικός αριθμός, το \mathbf{r} προσδιορίζει ένα σημείο μέσα σε μία επιφάνεια S , εικόνα 3.5, $P(\mathbf{r}_s, \omega)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της κατανομής πίεσης σε μια επιφάνεια S εξαιτίας κάποιας πηγής έξω από αυτή την επιφάνεια.



Εικόνα 3.5 Σύμφωνα με την εξίσωση Kirchhoff-Helmholtz το ηχητικό πεδίο μέσα σε μία επιφάνεια S, εξαιτίας ηχητικών πηγών έξω από αυτήν, καθορίζεται πλήρως από το ηχητικό πεδίο μέσα στην επιφάνεια S

Εάν η επιφάνεια S διαχωρίζεται από την ευθεία $z=z_1$, εικόνα 3.6, η οποία διαχωρίζει την περιοχή ακρόασης από την περιοχή εκπομπής του ηχητικού σήματος, τότε η εξίσωση Kirchhoff-Helmholtz, μπορεί να γραφεί σαν ολοκλήρωμα Rayleigh II, εικόνα 3.7, σε αυτή την περίπτωση, μόνο η κατανομή πίεσης στην περιοχή S_1 είναι απαραίτητη.

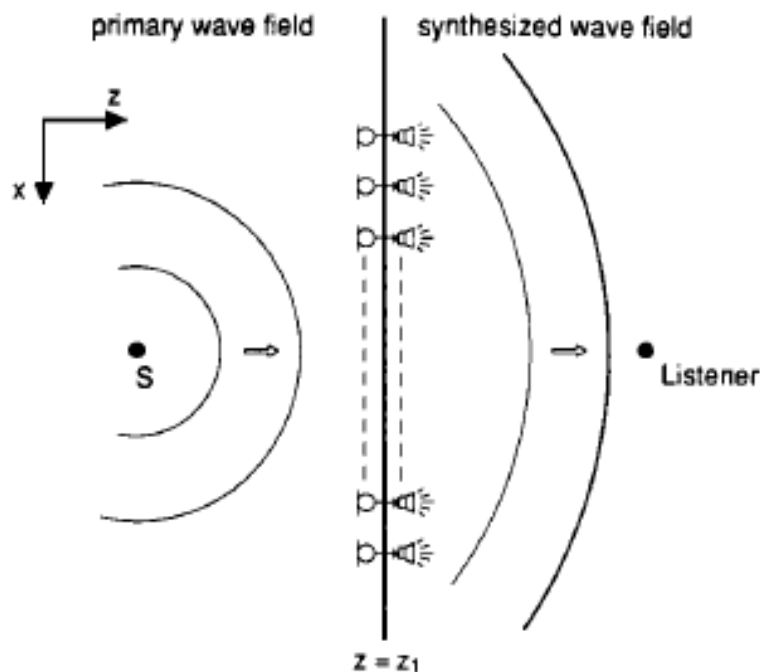


Εικόνα 3.6 Διαχωρισμός περιοχής εκπομπής και περιοχής ακρόασης

$$P(\mathbf{r}, \omega) = |z - z_1| \int_{S_1} P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{1 + jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|^3} \times e^{-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|} dS_1.$$

Εικόνα 3.7 Ολοκλήρωμα Rayleigh II

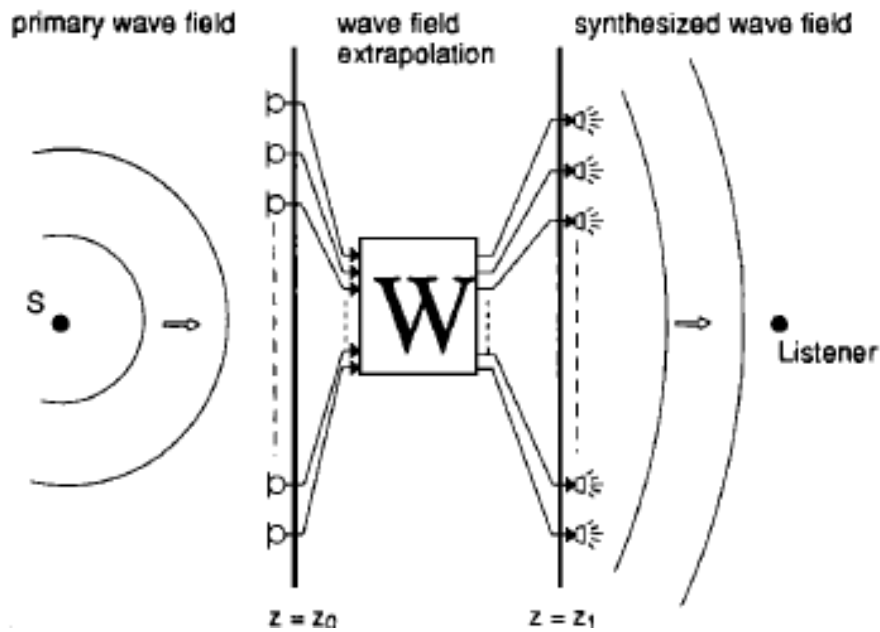
Η εξίσωση Rayleigh II εκφράζει επίσης ότι κάθε σημείο της επιφάνειας S_1 συνεισφέρει σαν δευτερογενής πηγή, η ένταση της οποίας προσδιορίζεται από την ηχητική πίεση στο συγκεκριμένο σημείο. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν, με φυσικό τρόπο, να γίνει σύνθεση ηχητικών κυμάτων σε κάθε σημείο ακρόασης επανεκπέμποντας την ηχητική πίεση, που ηχογραφείται από μικρόφωνα στην διαχωριστική γραμμή $z=z_1$, από ηχεία με διπολικά χαρακτηριστικά, εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Σύνθεση ηχητικού πεδίου με τη βοήθεια της εξίσωσης Rayleigh II

Όταν αυτή η φυσική διαδικασία συμβαίνει ταυτόχρονα με την αναπαραγωγή απευθείας κύματος από την ηχητική πηγή, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του σήματος της πηγής και διατήρηση των ιδιοτήτων της στο χώρο και το χρόνο.

Στην περίπτωση που η σειρά μικροφώνων για την ηχογράφηση και η σειρά των ηχείων για την επανεκπομπή, σύνθεση των μετώπων κύματος, έχουν διαφορετικές συντεταγμένες (z_0, z_1), τότε μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένας επεξεργαστής που εξομοιώνει και επανεκπέμπει, το μέτωπο κύματος, εικόνα 3.9.

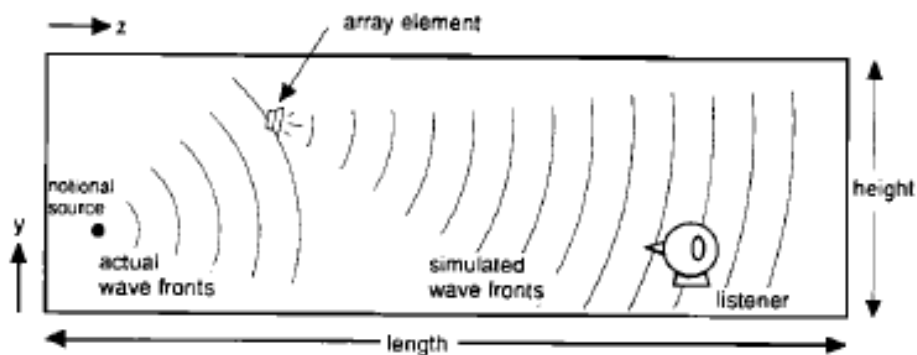


Εικόνα 3.9 Εξομοίωση και επανεκπομπή μετώπων κύματος, μέσω επεξεργαστή, όταν τα μικρόφωνα και τα ηχεία βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις.

Συμπερασματικά η σύνθεση μετώπων κύματος αποτελείται από τρία βήματα:

- A) Ηχογράφηση από μια σειρά μικροφώνων στη θέση z_0 .
- B) Εξομοίωση και επανεκπομπή από έναν επεξεργαστή από τη θέση z_0 στη z_1 .
- Γ) Εκπομπή από μια σειρά ηχείων στη θέση z_1 .

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, το παραγόμενο ηχητικό πεδίο είναι ίδιο με το πραγματικό, εικόνα 3.10.



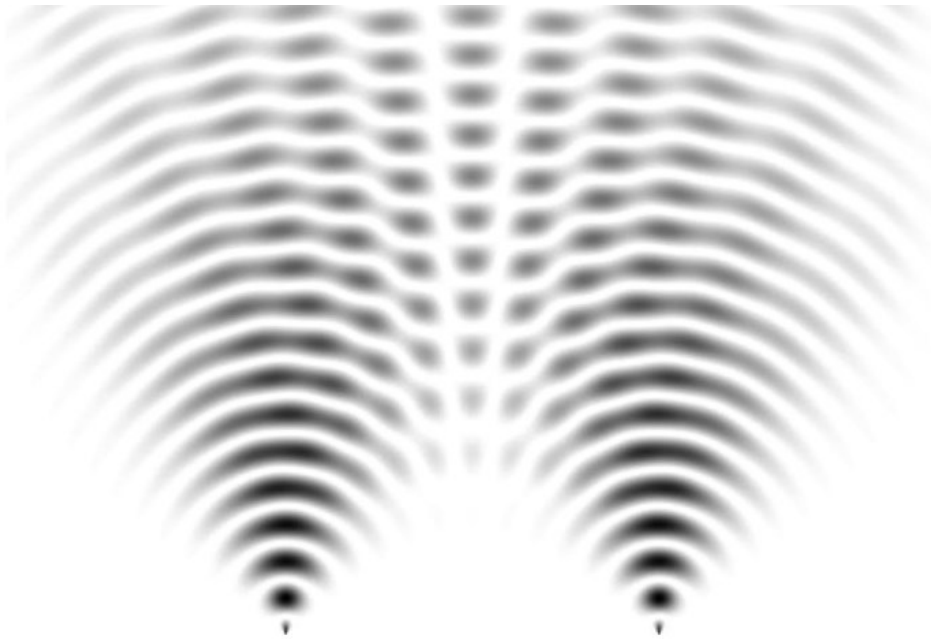
Εικόνα 3.10 Αναπαραγωγή ηχητικού πεδίου

3.4 Μορφοποίηση ηχητικής δέσμης με γραμμικές συστοιχίες ηχείων

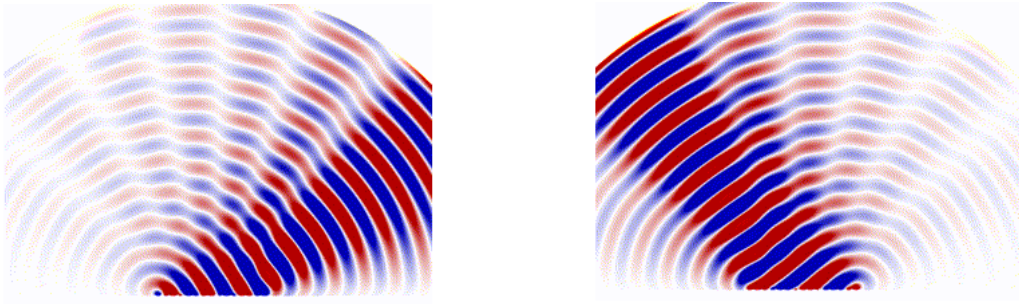
Η σύνθεση ηχητικού μετώπου είτε στις 2 είτε στις 3 διαστάσεις (2-D or 3-D beam forming), είναι η ικανότητα να ελέγχουμε τον ήχο στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, ανεξάρτητα τον ένα από τον άλλο, σχηματίζοντας διαφορετικούς τύπους μετώπων κύματος ανάλογα με την εφαρμογή και το ακροατήριο. Δίνεται έτσι με αυτό τον τρόπο η δυνατότητα να κατευθυνθεί ο ήχος σε συγκεκριμένες περιοχές και να αποφευχθούν κάποιες άλλες, (Santana 2017).

Ελέγχοντας τη σχετική διαφορά φάσης και πλάτους μεταξύ των στοιχείων, μπορούμε να διαμορφώσουμε το μοτίβο εκπομπής σύμφωνα με τις ανάγκες μας.

Στην εικόνα 3.11 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ 2 σημειακών πηγών ενώ στην εικόνα 3.12 φαίνεται η επίδραση που έχει η αλλαγή της διαφοράς φάσης και του πλάτους στην κατευθυντικότητα του κύματος από τις 2 πηγές.



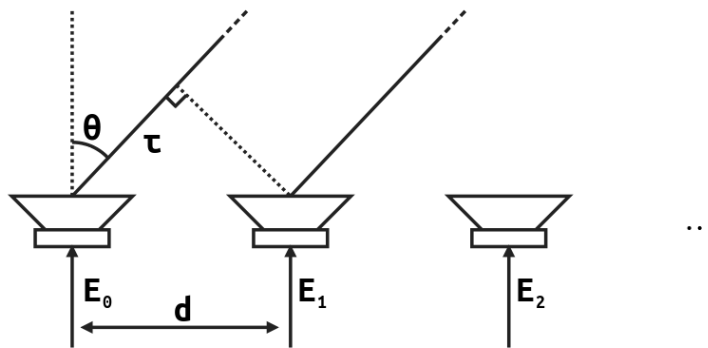
Εικόνα 3.11 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης 2 σημειακών πηγών ήχου



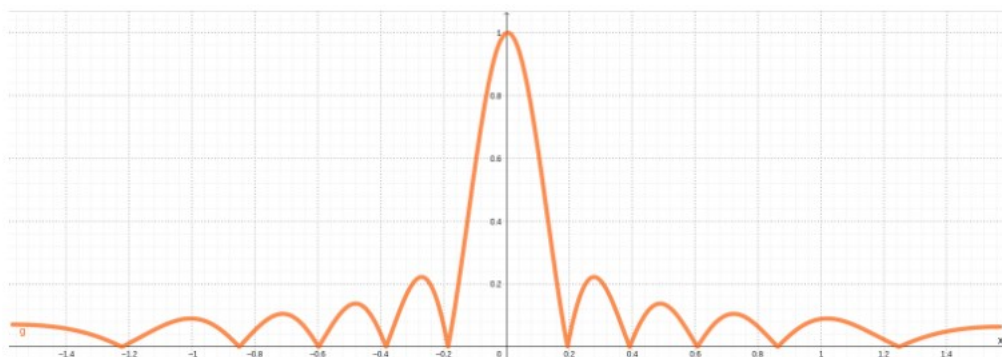
Εικόνα 3.12 Με την κατάλληλη αλλαγή στο πλάτος και την διαφορά φάσης αλλάζει η κατευθυντικότητα του κύματος. Ανακτήθηκε από:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phasearray.gif>

Για την επίτευξη του κατάλληλου αποτελέσματος χρησιμοποιούνται συστοιχίες ηχείων, εικόνα 3.13, οι οποίες με τις παραπάνω ρυθμίσεις θα αποδώσουν το επιθυμητό πολικό διάγραμμα, όπως για παράδειγμα της εικόνας 3.14.



Εικόνα 3.13 Συστοιχίες ηχείων για υλοποίηση beam forming



Εικόνα 3.14 Πολικό διάγραμμα από συστοιχία ηχείων για beam forming

3.5 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές της σύνθεσης ηχητικού πεδίου σε συνδυασμό με την μορφοποίηση ηχητικής δέσμης.

Η σύνθεση ηχητικού πεδίου βρίσκει πολλές εφαρμογές, όπως η δημιουργία εικονικών ηχητικών σκηνών, δηλ. με ηχητικών σκηνών που αποτελούνται από μεμονωμένες πηγές ήχου που έχουν σήμα εισόδου, θέση κτλ. Οι ηχητικές σκηνές μπορούν να εγγραφούν χρησιμοποιώντας κατάλληλες μικροφωνικές συστοιχίες όπως σφαιρικές και κυκλικές.

Μπορούν να δημιουργηθούν για παράδειγμα πηγές που να χρησιμοποιηθούν ως:

- Εστιασμένες εικονικές πηγές ήχου: Ένα συνθετικό ηχητικό πεδίο μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να συγκλίνει σε ένα μέρος της περιοχής ακρόασης προς ένα σημείο εστίασης και να αποκλίνει πίσω αυτό το σημείο εστίασης.
- Κινούμενες εικονικές πηγές ήχου: είναι δυνατό να συνθέτουν το ηχητικό πεδίο μιας κινούμενης ηχητικής πηγής έτσι ώστε το φαινόμενο Doppler να αναδημιουργείται σωστά, όχι μόνο η αλλαγή συχνότητας, όπως συμβαίνει με τις συμβατικές μεθόδους.

Η οπτική απόδοση στο στάδιο του σχεδιασμού ενός καλλιτεχνικού δρώμενου, αποτελεί ένα καλλιτεχνικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, το αντίστοιχο της ηχητικής απόδοσης είναι εξίσου σημαντικό αφού ο σκοπός δεν είναι απλά να ευχαριστήσει τον ακροατή με τον ήχο, αλλά να δημιουργήσει ένα εικονικό ακουστικό περιβάλλον που μεταφέρει το σωστό επίπεδο του ήχου δημιουργώντας ένα φυσικό ακουστικό περιβάλλον.

Η δοκιμές εξοπλισμού κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, την απόδοση σε δυσμενή ακουστικά περιβάλλοντα. Αντί να πραγματοποιούνται εκτεταμένες δοκιμές σε εξωτερικούς χώρους, η χωρική και φασματική δομή του θορύβου του δρόμου μπορεί να αναπαραχθεί και στο εργαστήριο, με κατάλληλες τεχνικές σύνθεσης ηχητικού πεδίου.

Η δημιουργία των ζωνών σιωπής για ένα μόνο μέρος των ακροατών, κοντά σε ένα επιθυμητό ακουστικό περιεχόμενο (Wu και Abhayapala, 2011). Αυτή η προσέγγιση μπορεί χρησιμοποιείται επίσης για την δημιουργία διαφορετικών ακουστικών συμβάντων σε χρήστες σε διαφορετικές τοποθεσίες του χώρου ακρόασης, για παράδειγμα τα διαφορετικά καθίσματα ενός αυτοκινήτου και επιτυγχάνεται με τη μορφοποίηση ηχητικής δέσμης (beam forming).

Καθώς εισάγονται ρομπότ διαφόρων ειδών για να αντικαταστήσουν ή να επεκτείνουν τις ανθρώπινες λειτουργίες, διερευνάται επίσης η ακουστική αντίληψή τους. Φυσικά τα ακουστικά συστήματα των ρομπότ είναι καθαρά τεχνικά και απαιτούν την αναπαραγωγή ηχητικών πεδίων με καλά καθορισμένες φυσικές ιδιότητες, αφού η ψυχοακουστική με την παραδοσιακή έννοια δεν ισχύει πλέον. Αντίστοιχα για την έρευνα για ακουστικά βαρηκοΐας απαιτείται σύνθεση

πολύπλοκων ηχητικών πεδίων κάτω από εργαστηριακές συνθήκες (Ahrens, Rabenstein, Spors, 2014).

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη χώρου

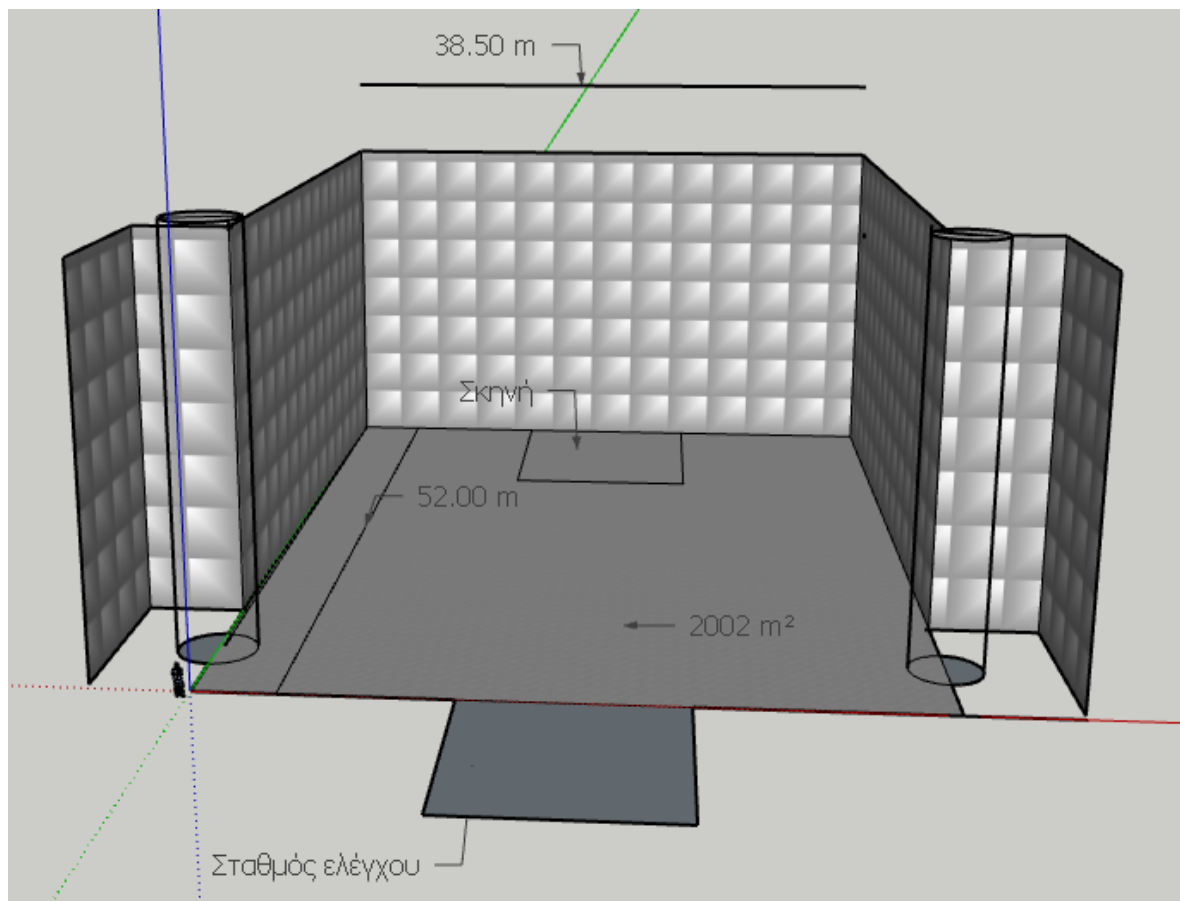
Το κτίριο, που ονομάζεται Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος (Stavros Niarchos Foundation Cultural Center), σχεδιάστηκε από τον γνωστό αρχιτέκτονα Renzo Piano και βρίσκεται στο πάρκο Καλλιθέας, στη νότια πλευρά της Αθήνας. Περιλαμβάνει την Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάδας και την Εθνική Λυρική Σκηνή. Το κτίριο και το περιβάλλον του αποτελούν ένα πολιτιστικό κέντρο που φιλοδοξεί να προωθήσει τον πολιτισμό, την τέχνη, την εκπαίδευση και την κοινωνική συνοχή. Η μελέτη αφορά έναν εξωτερικό χώρο του Ιδρύματος. Συγκεκριμένα εξετάζεται ο χώρος ανάμεσα στη βιβλιοθήκη του ιδρύματος και το κτίριο της Λυρικής σκηνής (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Αίθριος χώρος προς μελέτη στο Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος

Ο χώρος έχει σχήμα Π και οι διαστάσεις του είναι 52m βάθος (προς την είσοδο της βιβλιοθήκης και 38,5m πλάτος μεταξύ των 2 κτιρίων. Οι πλαϊνές επιφάνειες των κτιρίων είναι γυάλινες και φτάνουν σε ύψος 22m περίπου, ενώ το έδαφος είναι καλυμμένο κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του με μαρμάρινες πλάκες.

Ο χώρος σχεδιάστηκε στο λογισμικό Sketch up pro 2022 και φαίνεται στην εικόνα 4.2.



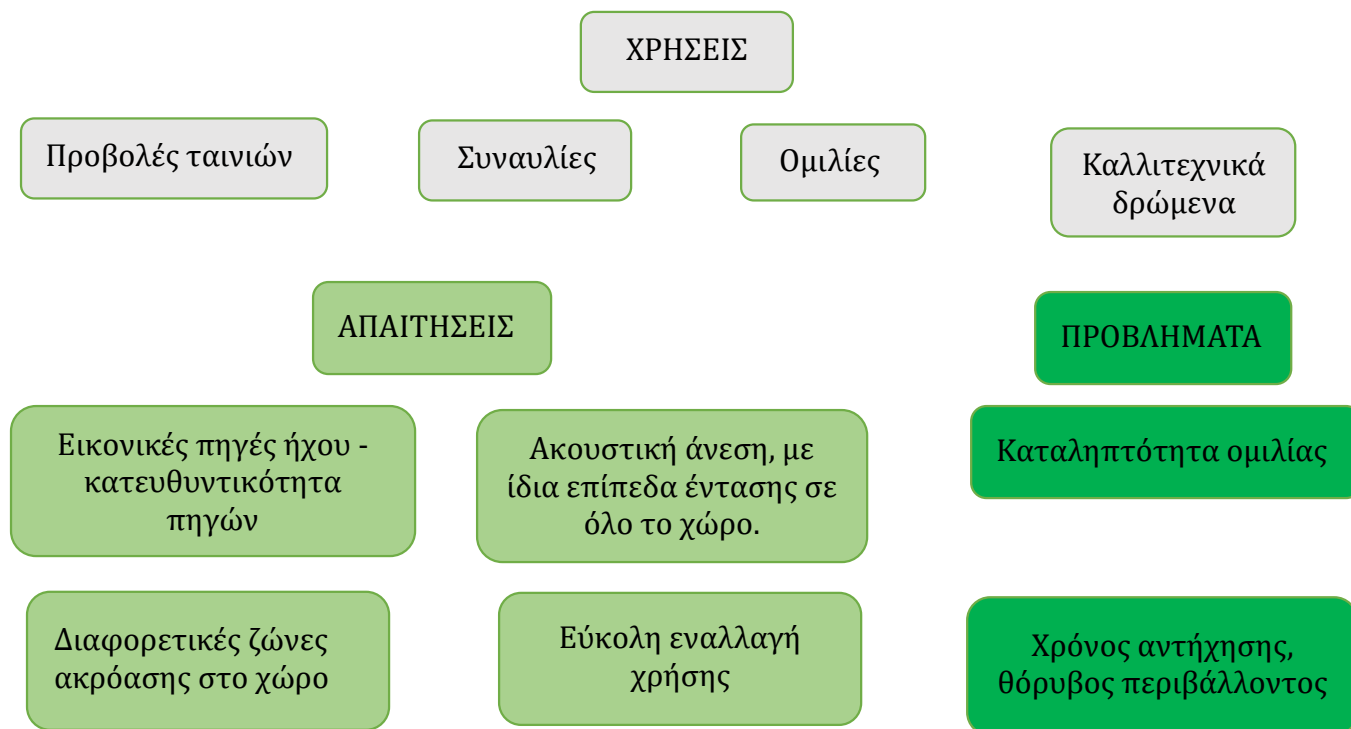
Εικόνα 4.2 Σχέδιο αίθριου χώρου μέσω του λογισμικού Sketch up pro 2022.

Ο διαθέσιμος χώρος που θα καλύψει η παρούσα μελέτη είναι περίπου 2000 m², ενώ στην παρούσα κατάσταση δεν υπάρχει κάποια ηλεκτροακουστική εγκατάσταση στο χώρο, πέραν αυτής που καλύπτει τους εξωτερικούς χώρους γενικά.

4.2 Προοριζόμενη χρήση του χώρου και προδιάγραφες

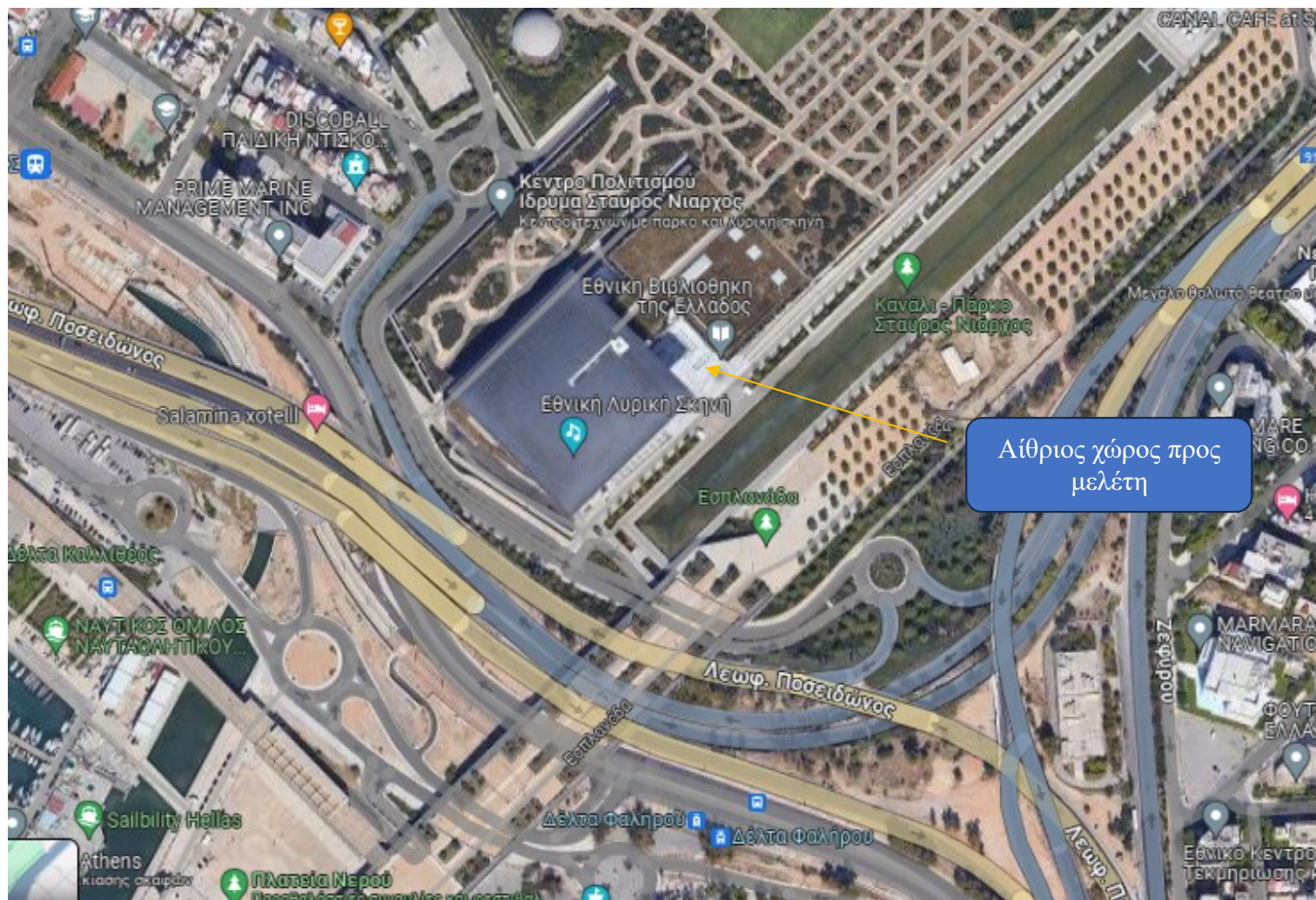
Οι ενέργειες του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος τους περιλαμβάνουν την υποστήριξη προγραμμάτων και πρωτοβουλιών που στοχεύουν στη βελτίωση της κοινωνίας και την ενίσχυση της εκπαίδευσης και του πολιτισμού. Καθώς διαθέτει άνετη πρόσβαση και πάρκινγκ, συγκεντρώνει καθημερινά πλήθος κόσμου που απολαμβάνουν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους του, για χαλάρωση και αναψυχή.

Ο επιλεγμένος, αίθριος χώρος προς μελέτη, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για διάφορες δραστηριότητες και δεδομένου του γεγονότος ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα αρχιτεκτονικών παρεμβάσεων, θα πρέπει να γίνει επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα ταιριάζει στις απαιτήσεις και στην αισθητική του χώρου. Οι δυνατές χρήσεις του χώρου και τα πιθανά προβλήματα ή απαιτήσεις που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν σε μια ακουστική μελέτη, συνοψίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 4.3.



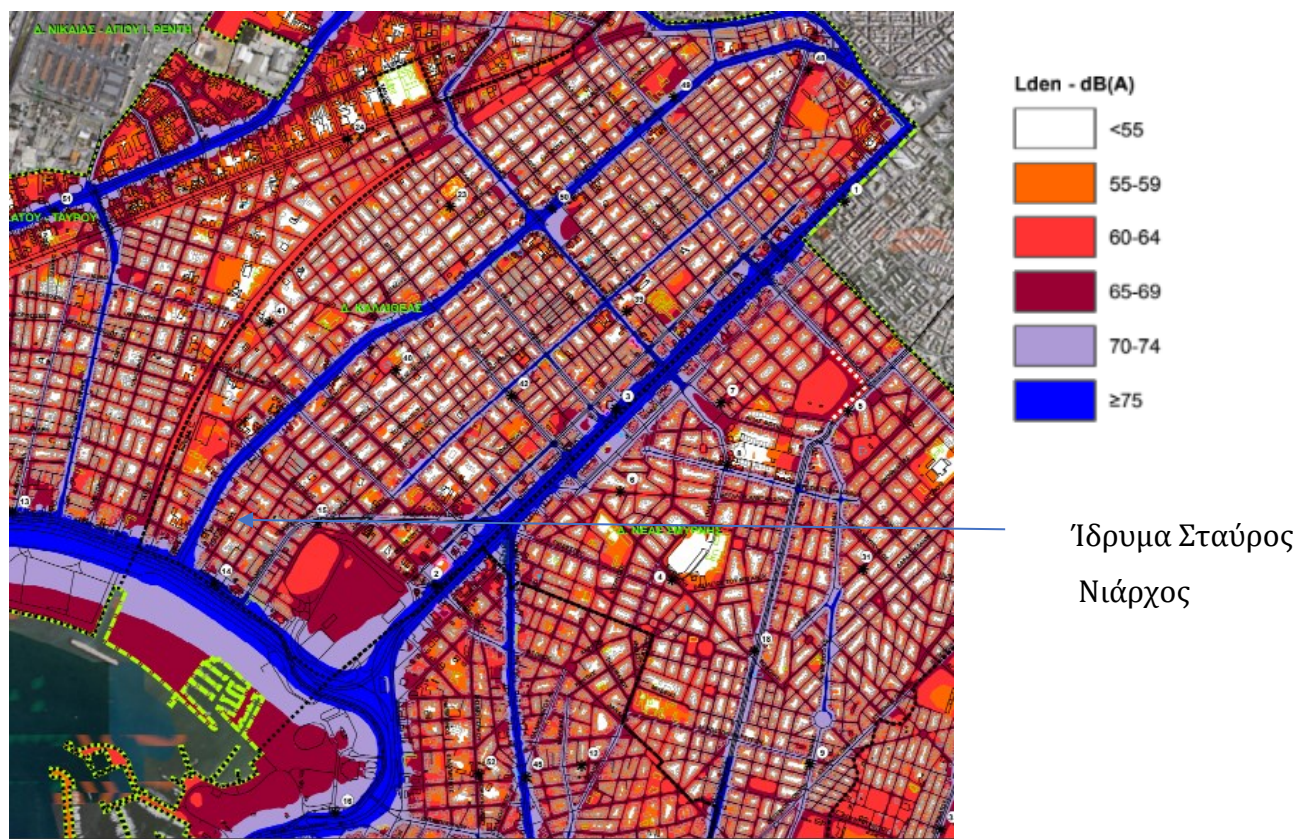
Εικόνα 4.3 Δυνατές χρήσεις του χώρου, απαιτήσεις και προβλήματα προς επίλυση.

Η θέση του πάρκου είναι κοντά στην παραλιακή οδό Ποσειδώνος, εικόνα 4.4, με αποτέλεσμα ο χώρος της παρούσης μελέτης να είναι εκτεθειμένος σε περιβαλλοντολογικούς θορύβους.



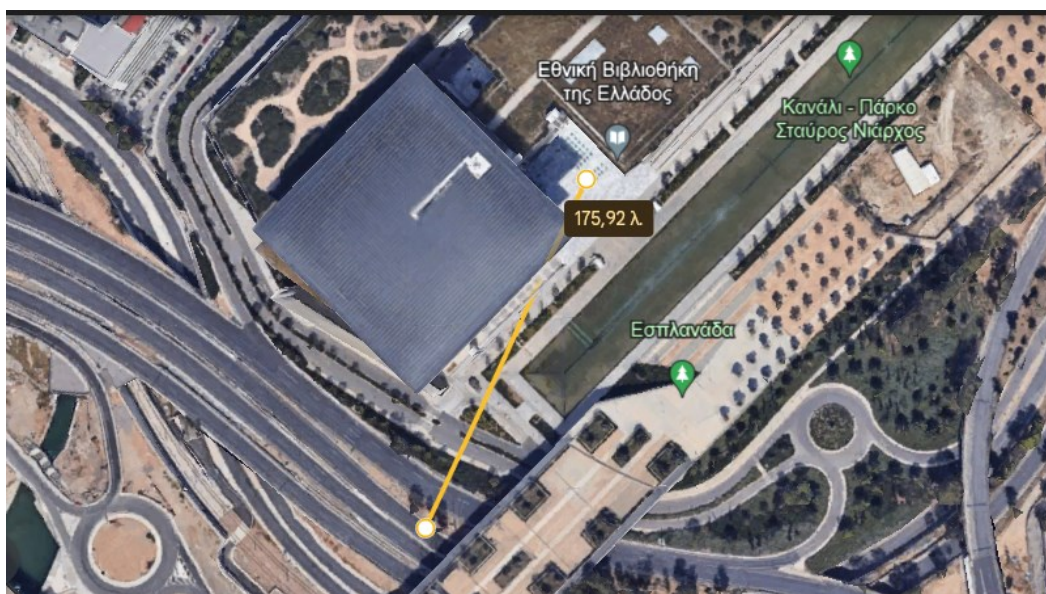
Εικόνα 4.4. Θέση του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος. Ανακτήθηκε από Google maps.

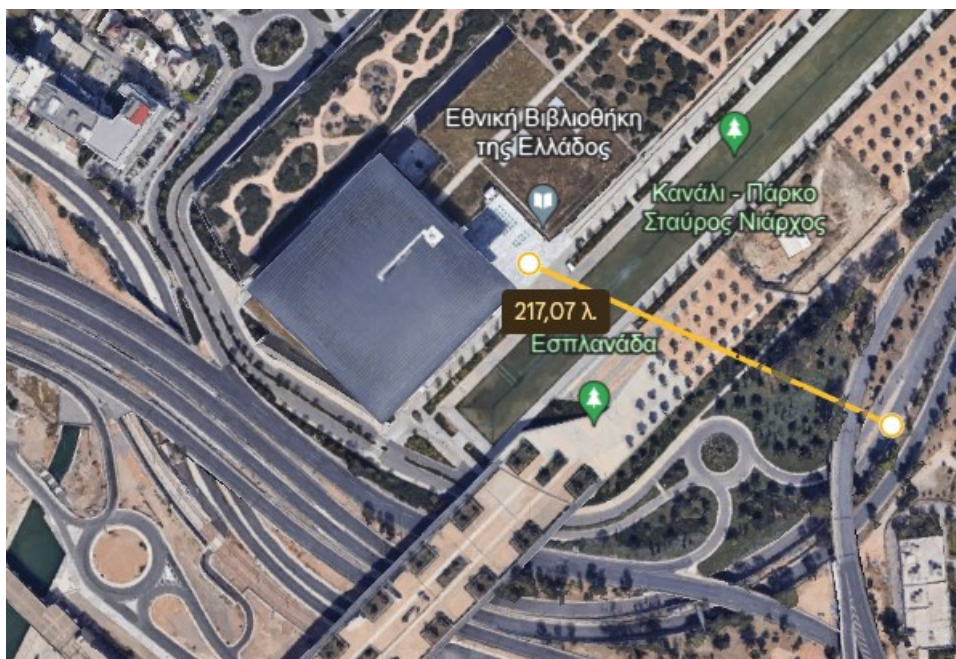
Από την ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος ανακτήθηκε ο χάρτης κυκλοφοριακού θορύβου (εικόνα 4.5), όπου αναφέρεται σε μέτρηση του δείκτη L_{den} , ο οποίος εκφράζει τη μέση ενεργειακή στάθμη θορύβου κατά τη διάρκεια του 24ώρου (Σκαρλάτος 2013) και χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της όχλησης που συνδέεται με την έκθεση στο θόρυβο.



Εικόνα 4.5 Χάρτης κυκλοφοριακού θορύβου Νότιας Αθήνας.

Οι αποστάσεις του χώρου της μελέτης από τους αυτοκινητόδρομους φαίνονται στην εικόνα 4.6.

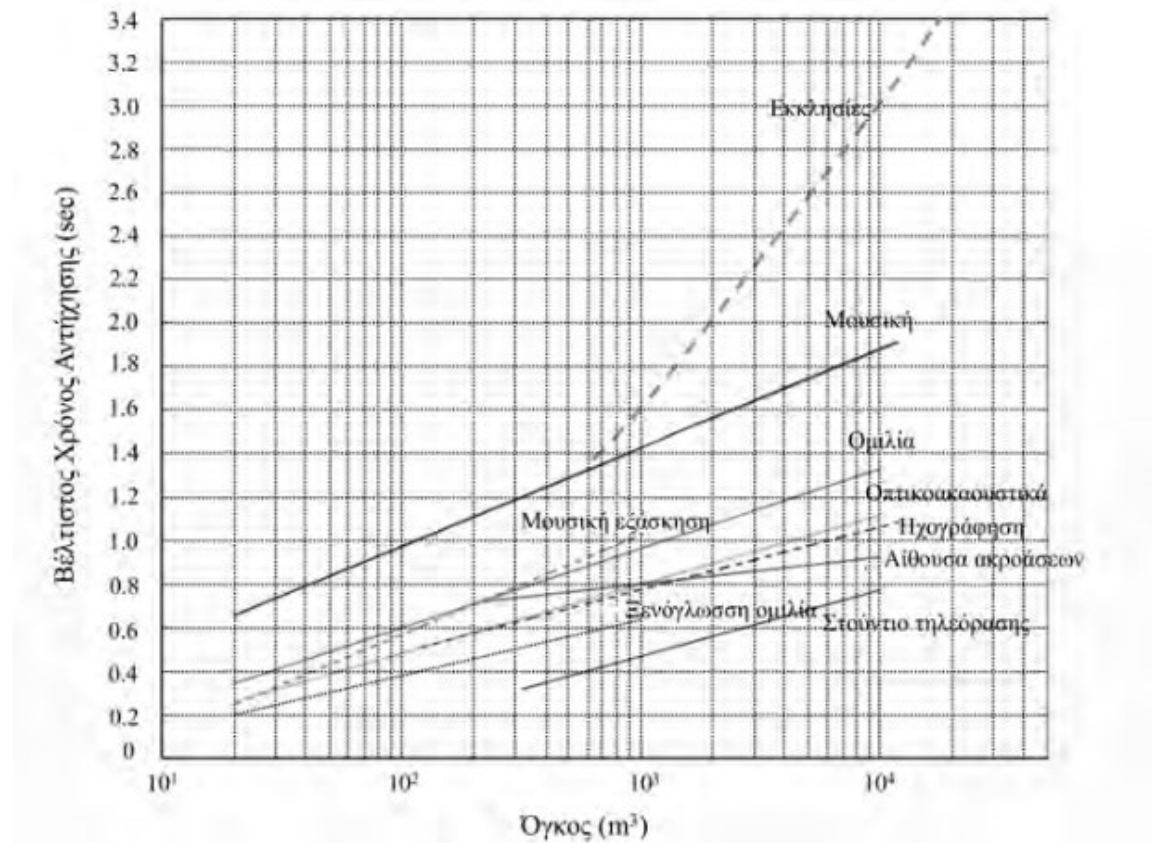




Εικόνα 4.6 Αποστάσεις του χώρου από τους παρακείμενους αυτοκινητόδρομους. Ανακτήθηκαν από το Google Earth

Η απόσταση των αυτοκινητοδρόμων από τα κτίρια, καθώς και το γεγονός ότι τα κτίρια της Εθνικής Λυρικής σκηνής και της Εθνικής Βιβλιοθήκης έχουν μεγάλο ύψος, δημιουργεί μια σχετική προστασία από το θόρυβο του αυτοκινητόδρομου.

Προκειμένου ο χώρος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ομιλίες ή και σε συγκεκριμένα καλλιτεχνικά δρώμενα, ένα σημαντικό ζήτημα προς επίλυση είναι η αντήχηση που εμφανίζει ο χώρος, η οποία μειώνει την καταληπτότητα της ομιλίας (Κοντομίχος, Ζαρούχας, Χατζηαντωνίου, 2013), η οποία ενισχύεται από το γεγονός ότι το υλικό των πλαϊνών επιφανειών των κτιρίων είναι το γυαλί, το οποίο εμφανίζει μικρή ηχομείωση (Σκαρλάτος 2013). Στην εικόνα 4.7 φαίνεται ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης με βάση τον όγκο και την επιθυμητή χρήση του χώρου. Ο όγκος του υπό μελέτη χώρου είναι 40.737 m^3 .



Εικόνα 4.7 Βέλτιστος χρόνος αντίληψης (sec), για διάφορα είδη ακρόασης και όγκο χώρου.

Λόγω του μεγάλου όγκου του χώρου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό του βέλτιστου χρόνου αντίληψης:

Καλλιτεχνικά δρώμενα: $T=0.32\log V-0.17=1.3s$

Ομιλίες: $T=0.37\log V-0.14=1.57s$

Μουσικές παραστάσεις: $T=0.45\log V+0.07=2.14s$

Μουσικές πρόβες: $T=0.47\log V-0.37=1.8s$

(<https://www.omnicalculator.com/physics/reverberation-timeoptimal-reverberation-time-formulas>)

Ο δείκτης που σχετίζεται με την καταληπτότητα της ομιλίας είναι ο STI (Speech Transmission Index) και μετρά το ποσοστό των συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον θόρυβο βάθους αλλά και τον χρόνο αντίληψης. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1. Ο υπολογισμός του δείκτη STI όπως και του RASTI (Rapid Speech Transmission Index) που είναι ουσιαστικά μια προσέγγιση του STI, χαρακτηρίζει την ποιότητα ομιλίας. Οι τιμές του δείκτη RASTI σε σχέση με την καταληπτότητα της ομιλίας φαίνονται στον πίνακα 4.1.

RASTI	Καταληπτότητα
0-0.3	κακή
0.3-0.45	ικανοποιητική
0.45-0.6	καλή
0.6-0.75	πολύ καλή
0.75-1	τέλεια

Πίνακας 4.1 Κλίμακα αξιολόγησης με βάση τις τιμές RASTI

Σε συνδυασμό με το δείκτη STI, χρησιμοποιείται και ο δείκτης C-50 για τον προσδιορισμό της ευκρίνειας (Clarity) κατά την αναπαραγωγή σημάτων ομιλίας.

Ένα επιπλέον ζητούμενο χαρακτηριστικό, είναι η επίτευξη ίδιων επιπέδων έντασης ήχου, σε όλη την έκταση του χώρου καθώς και η δυνατότητα δημιουργίας ζωνών ακρόασης, για παράδειγμα μια ομιλία να μεταδίδεται ταυτόχρονα σε διαφορετικές γλώσσες και ακροατές σε μία περιοχή του χώρου να ακούν την ομιλία σε μία γλώσσα Α και σε άλλη περιοχή του χώρου σε μία γλώσσα Β. Σε καλλιτεχνικά δρώμενα, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας εικονικής πηγής ήχου, για παράδειγμα να τοποθετηθεί σε κάποιο σημείο ο ήχος από ένα μουσικό όργανο, έτσι ώστε να εκπέμπεται απευθείας ήχος από το σημείο, χωρίς να υπάρχει ηχείο στο σημείο αυτό. Οι ακροατές που βρίσκονται ή κινούνται στο χώρο, θα μπορούν να βιώνουν, ανάλογα με το που βρίσκονται, μια διαφορετική εμπειρία ακρόασης. Το σύστημα, τέλος, θα πρέπει να επιτρέπει εύκολη εναλλαγή ανάλογα με τη χρήση, χωρίς μεγάλες επεμβάσεις στο χώρο.

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CATT ACOUSTIC- ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ

5.1 Υπολογισμοί ακουστικών δεικτών μέσω του λογισμικού Catt-Acoustics

Για την ακουστική μελέτη του χώρου χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό Catt-Acoustic v9.1g, το οποίο προσομοιώνει το χώρο και δίνει τη δυνατότητα υπολογισμών διαφόρων ακουστικών δεικτών.

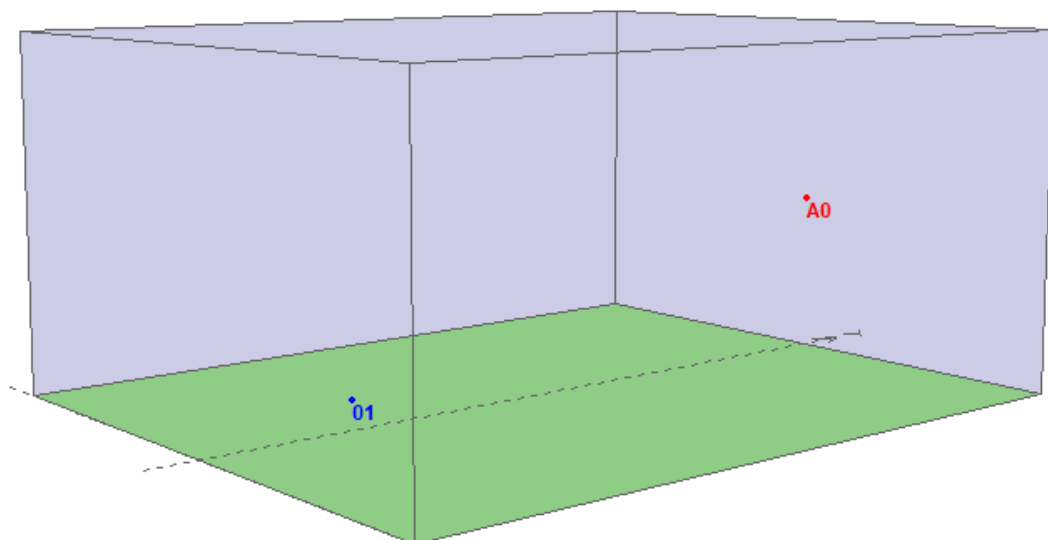
Στο κεντρικό μενού του προγράμματος και συγκεκριμένα στο αρχείο Geo-File, δόθηκαν οι συντεταγμένες των κορυφών του χώρου, προκειμένου να σχεδιαστεί ο χώρος με βάση τις διαστάσεις του και ορίστηκαν τα υλικά με τους αντίστοιχους συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1.

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (γυαλί)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
α (μάρμαρο)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
α (αέρας)	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 5.1 Συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών του χώρου

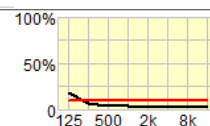
Μέσω των αρχείων Receiver-File και Source-File ορίστηκε η θέση μιας πανκατευθυντικής πηγής και η θέση ενός ακροατή στο χώρο.

Το 3-διαστάσεων σχέδιο με τη θέση των πηγής και του ακροατή φαίνεται στην εικόνα 5.1.

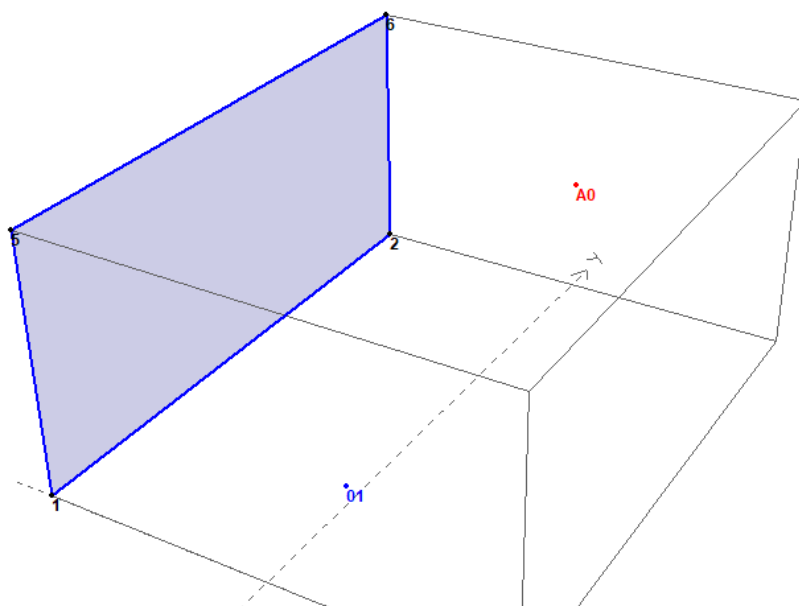


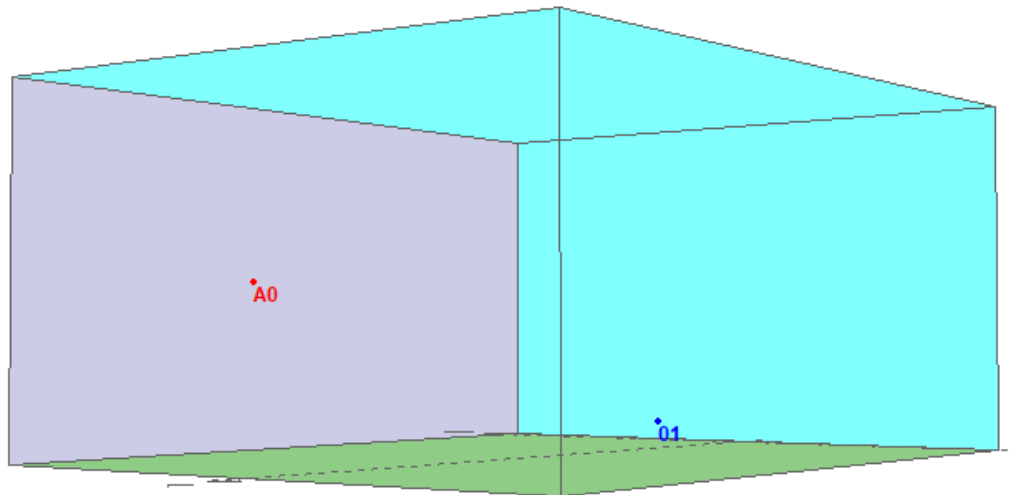
Plane 6 : left wall, S=1049.8m²

GLASS
Abs. coeff.: < 18.0 6.00 4.00 3.00 2.00 2.00 : 2.00 2.00 > %
Scat. coeff.: < 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 : 10.0 10.0 > % (L)
Auto-edge.:
Sum scatt.:



MASTER.GEO:32

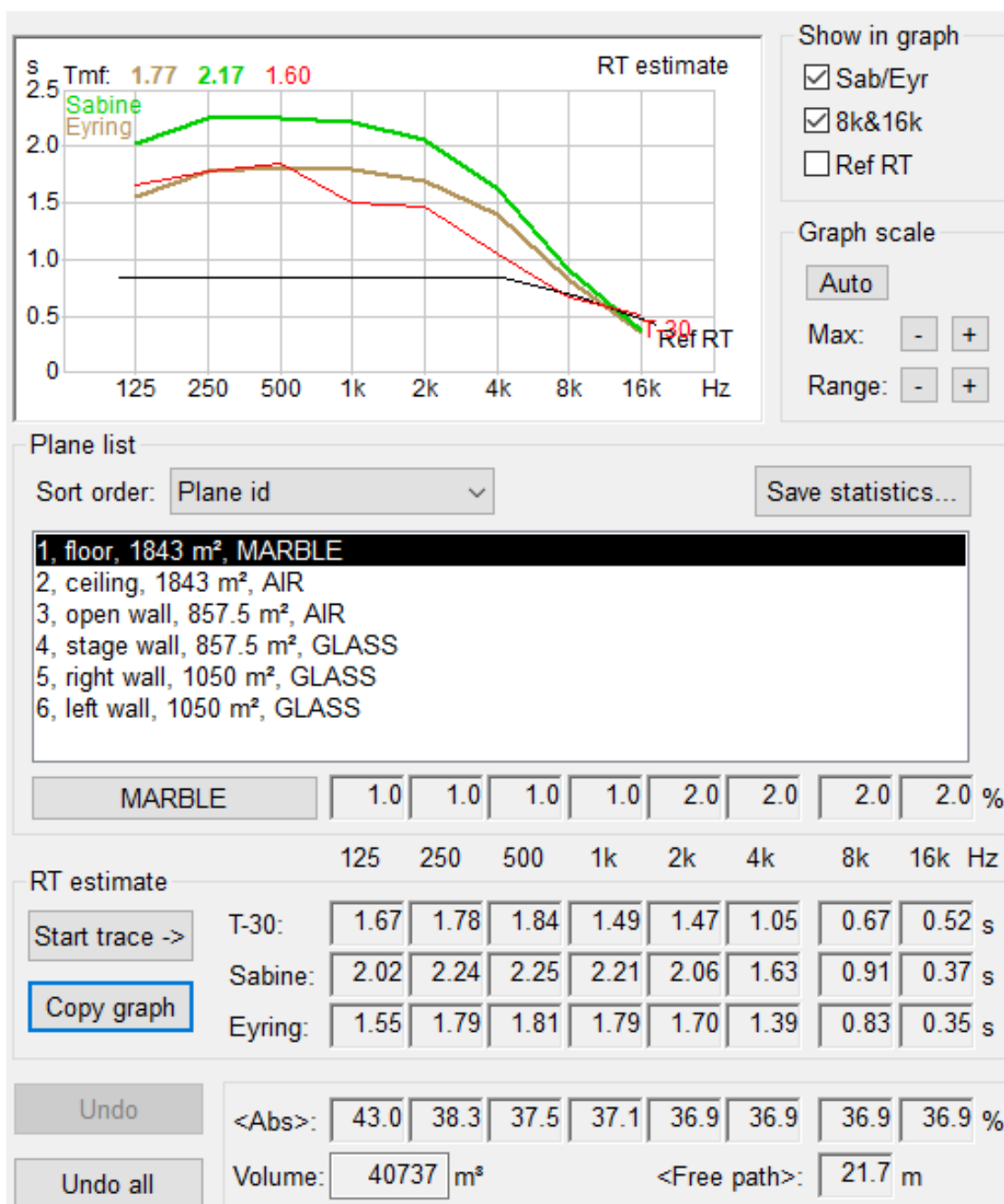




Εικόνα 5.1 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και το γαλάζιο αντιστοιχεί στον ουρανό και το ελεύθερο πεδίο απέναντι από τις πηγές. Στη μεσαία εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Από το κεντρικό μενού του λογισμικού επιλέχθηκε interactive RT estimation και στη συνέχεια start trace για τον υπολογισμό του δείκτη T-30, υπολογίζεται αρχικά ο χρόνος μέσα στον οποίο η ακουστική πίεση μειώνεται κατά 30dB και αφού πολλαπλασιαστεί επί 2 δίνει το δείκτη T-30. Τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στην εικόνα 5.2.

nteractive RT estimation

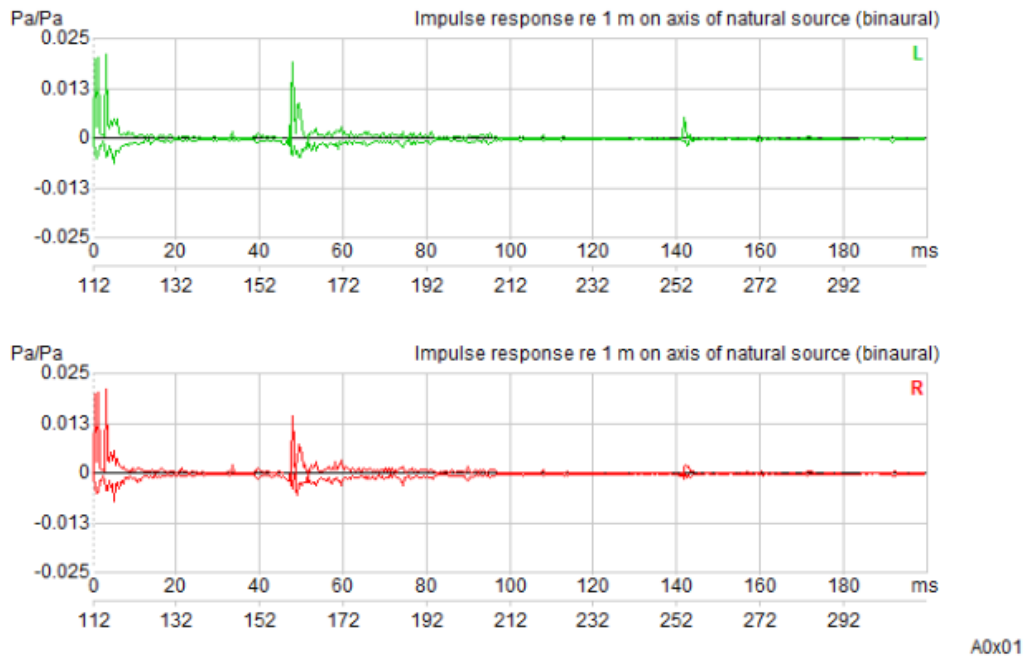


Εικόνα 5.2 Αρχική εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acoustic για τον υπο μελέτη χώρο στο Ίδρυμα Σταυρος Νιάρχος

Από τις τιμές του δείκτη T-30 σε σχέση με τις τιμές του τύπου του Eyring φαίνεται ότι ο χώρος δεν είναι πολύ διαχυτικός ($T-30 > T_{Eyring}$ σε κάποιες συχνότητες) και θα χρειαστεί κάποια επέμβαση στο χώρο.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκαν, μέσω του λογισμικού, πιο λεπτομερείς μέτρησεις. Από το μενού TUCT prediction, ορίστηκε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το ακροατήριο και επιλέχθηκε η χρήση της πηγής A₀.

Από το επόμενο μενού επιλέχθηκε Predict SxR ώστε να εξάγει το λογισμικό την κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 , εικόνα 5.3.

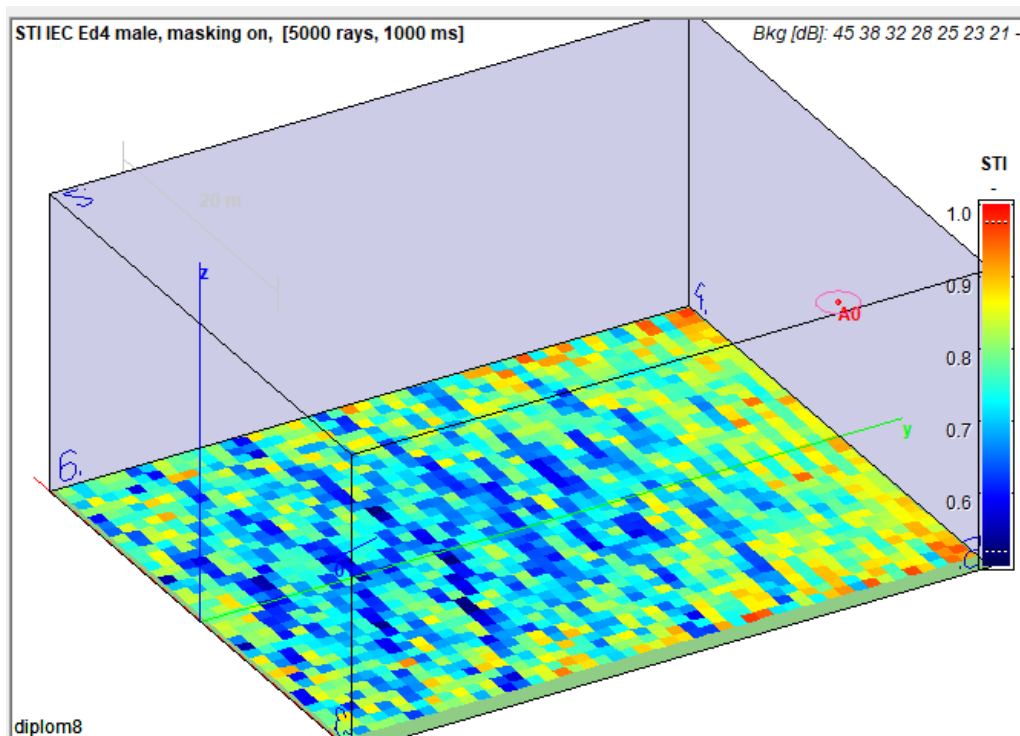


Εικόνα 5.3 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή A_0 , υφιστάμενη κατάσταση.

Από τις κρουστική απόκριση φαίνεται ότι υπάρχει έντονη ανάκλαση στα 50ms περίπου, που οφείλεται στις πλευρικές γυάλινες επιφάνειες. Η υλοποίηση παρέμβασης στο χώρο θα μπορούσε να βελτιώσει την κατάσταση.

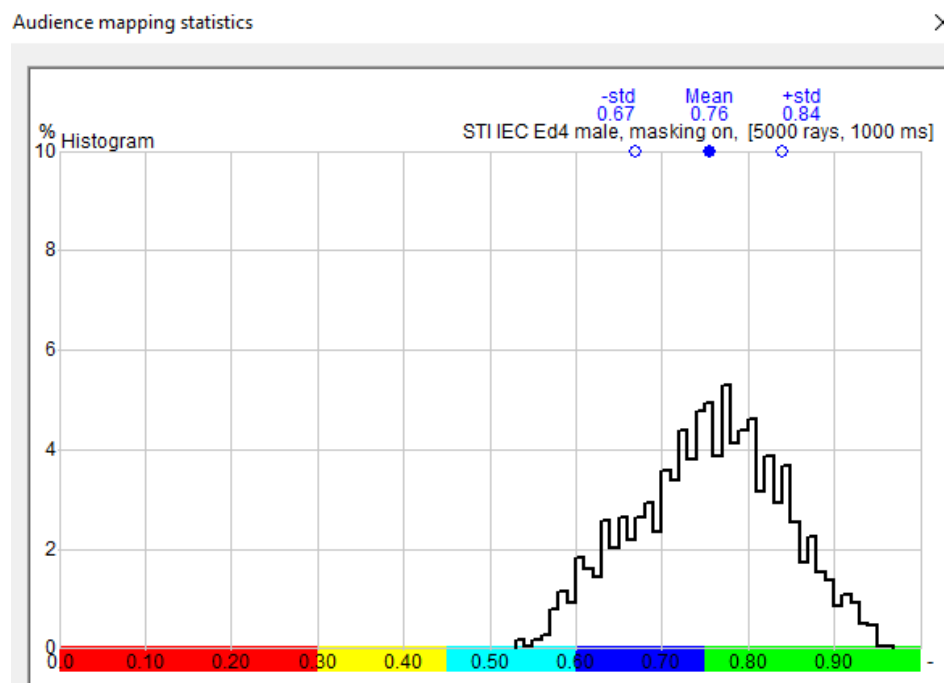
Από το μενού, ακολούθως, επιλέχθηκε το Map measures προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες STI, T-30, C-50.

Συγκεκριμένα ο δείκτης STI φαίνεται στην εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, υφιστάμενη κατάσταση.

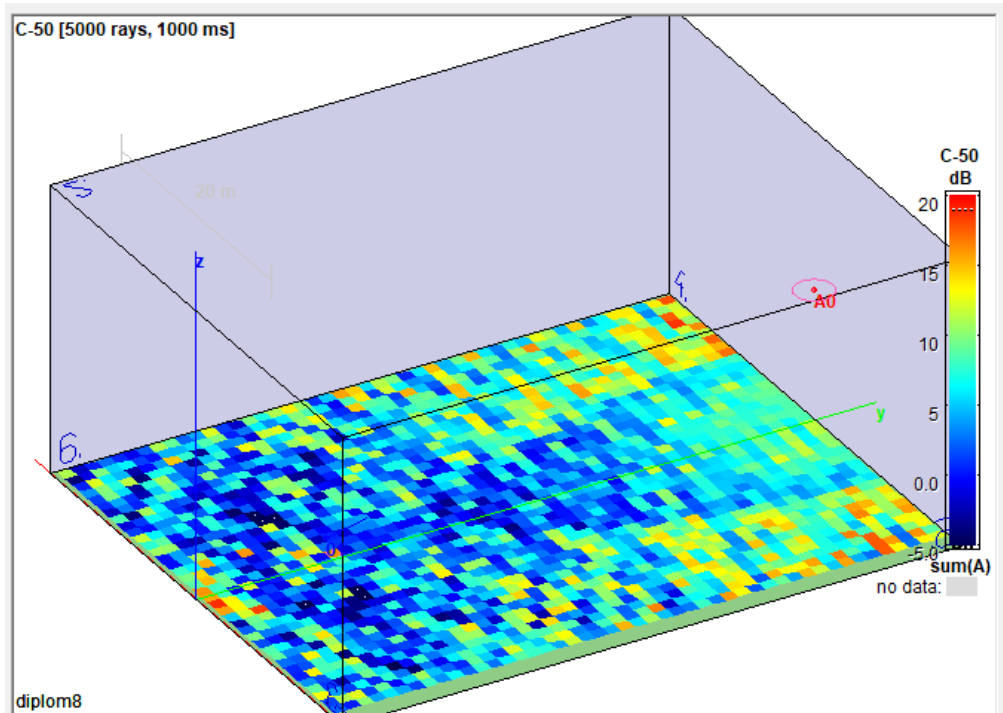
Οι στατιστικές τιμές του δείκτη STI φαίνονται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, υφιστάμενη κατάσταση

Στην εικόνα 5.4 φαίνεται ότι υπάρχουν περιοχές με χαμηλές τιμές του δείκτη (μπλε σκούρο), το οποίο επιβεβαιώνει και η εικόνα 5.5, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι ο χώρος επιδέχεται βελτιώσεων.

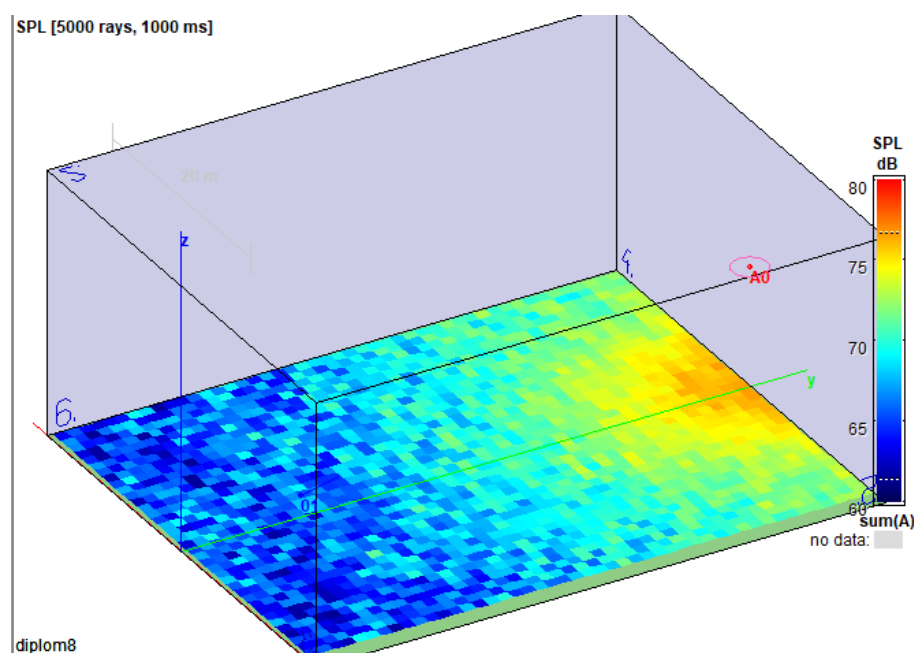
Υπολογίζοντας και το δείκτη C-50 προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.6.



Εικόνα 5.6 Δείκτης C-50 για το χώρο, υφιστάμενη κατάσταση.

Η μέτρηση του δείκτη C-50 δείχνει περιοχές μειωμένης ευκρίνειας, κυρίως από τη μέση του χώρου και προς τα πίσω. Προκειμένου να βελτιωθούν οι τιμές στους παραπάνω δείκτες, επανασχεδιάστηκε ο χώρος μέσω του λογισμικού με προτεινόμενες παρεμβάσεις.

Η αντίστοιχη μέτρηση στάθμης SPL φαίνεται στην εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, υφιστάμενη κατάσταση

5.2 Παρεμβάσεις στο χώρο με σκοπό τη βελτίωση των ακουστικών

δεικτών.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αντήχηση, από τις πλευρικές κυρίως επιφάνειες, υλοποιήθηκαν 4 σενάρια, με τοποθέτηση είτε διαχυτικών υλικών στους πλευρικούς τοίχους είτε απορροφητικών. Οι συντελεστές των αντίστοιχων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.2. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.3.

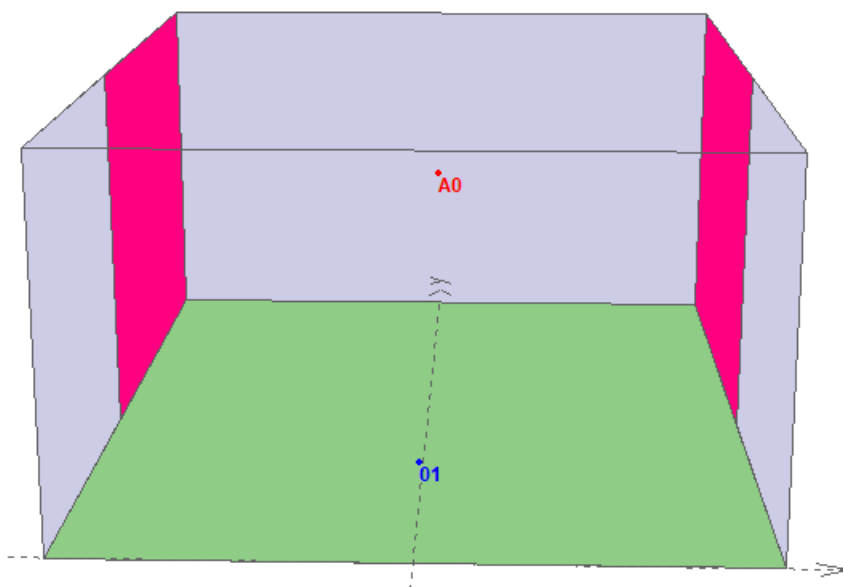
f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (απορρόφησης)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
α (διάχυσης)	0.38	0.49	0.64	0.81	0.86	0.91

Πίνακας 5.2 Συντελεστές απορρόφησης- διάχυσης των υλικών για την παρέμβαση

Περιπτώσεις	Παρεμβάσεις
I	μισός τοίχος απορροφητικός
II	ολόκληρος ο τοίχος απορροφητικός
III	μισός τοίχος διαχυτικός
IV	ολόκληρος ο τοίχος διαχυτικός

Πίνακας 5.3 Περιπτώσεις που εξετάστηκαν και δυνατές παρεμβάσεις

Αρχικά έγινε τοποθέτηση απορροφητικών υλικών π.χ κουρτινά ή απορροφητικό ύφασμα στους 2 πλευρικούς τοίχους καλύπτοντας την μισή επιφάνειά τους, στην περίπτωση I (μισός τοίχος απορροφητικός). Το αντίστοιχο 3- διαστάσεων σχέδιο φαίνεται στην εικόνα 5.8.



Plane 9 : left wall-fixed, S=585.7m²

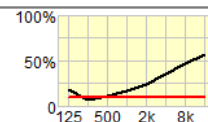
ABSORBENT

Abs. coeff.: < 18.0 6.00 11.0 17.0 24.0 35.0 : 46.0 57.0 > %

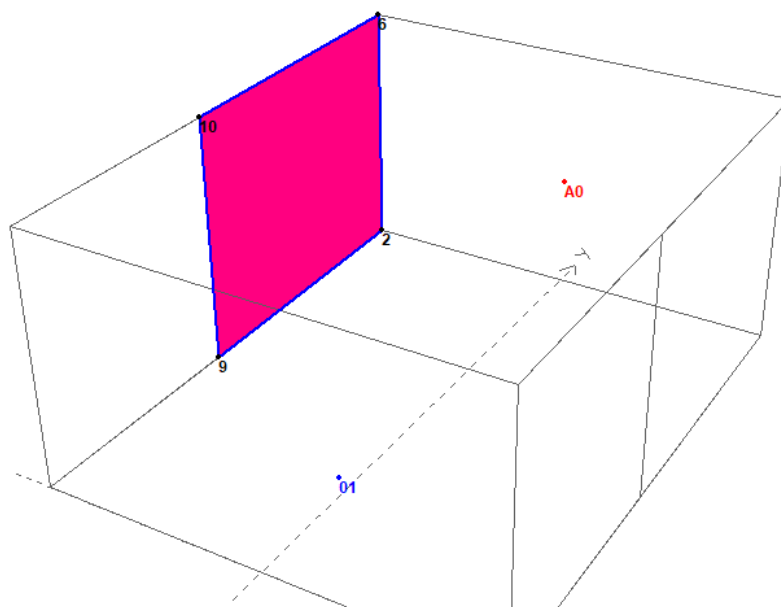
Scat. coeff.: < 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 : 10.0 10.0 > % (L)

Auto-edge:

Sum scatt.:



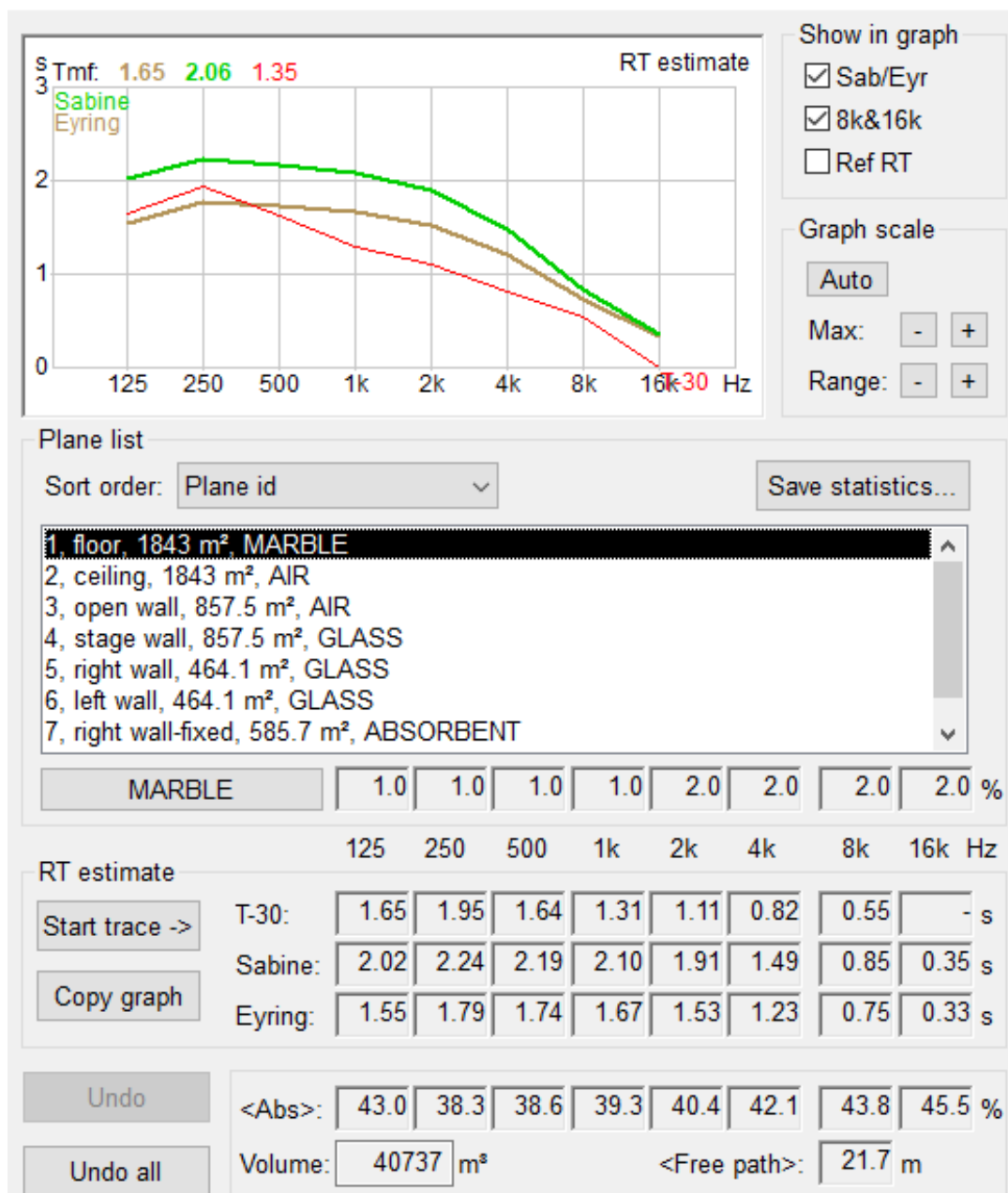
MASTER.GEO:37



Εικόνα 5.8 Περίπτωση I. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και με κόκκινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Από το κεντρικό μενού του λογισμικού επιλέχθηκε interactive RT estimation και στη συνέχεια start trace για τον υπολογισμό του δείκτη T-30 και τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στην εικόνα 5.9.

Interactive RT estimation

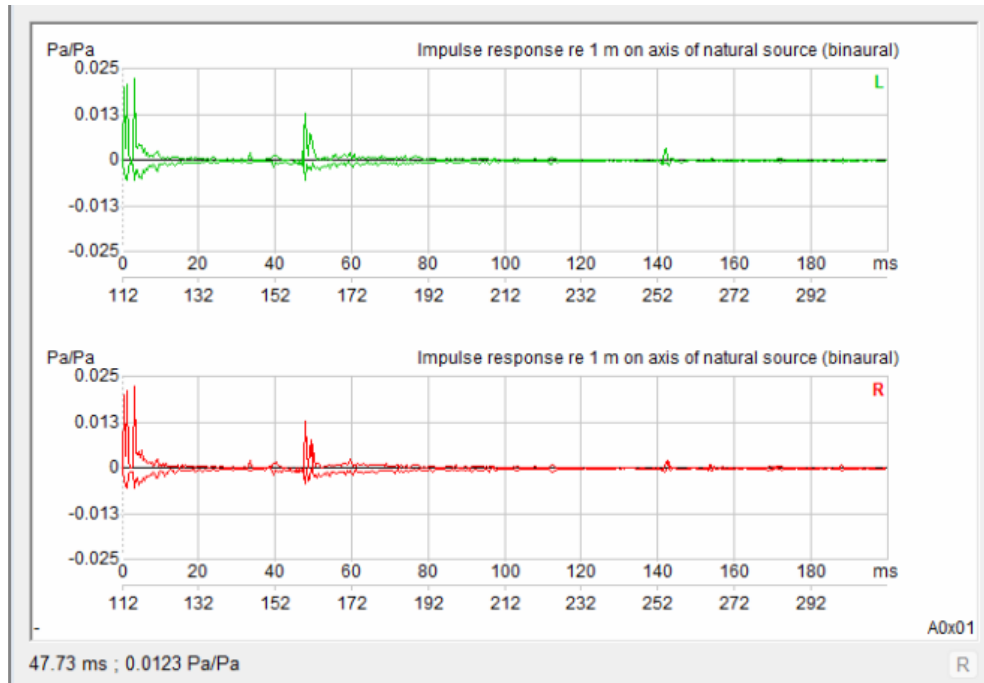


Εικόνα 5.9 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση I.

Οι τιμές του χρόνου αντήχησης είναι λίγο μικρότερες, από τις μεσαίες συχνότητες και πάνω, σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν στην υφιστάμενη κατάσταση της εικόνας 5.2.

Στη συνέχεια από το μενού TUCT prediction, ορίστηκε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το ακροατήριο και επιλέχθηκε η χρήση της πηγής A₀.

Από το επόμενο μενού επιλέχθηκε Predict SxR ώστε να εξάγει το λογισμικό την κρουστική αποκρίση στη θέση του ακροατή A₀, εικόνα 5.10.

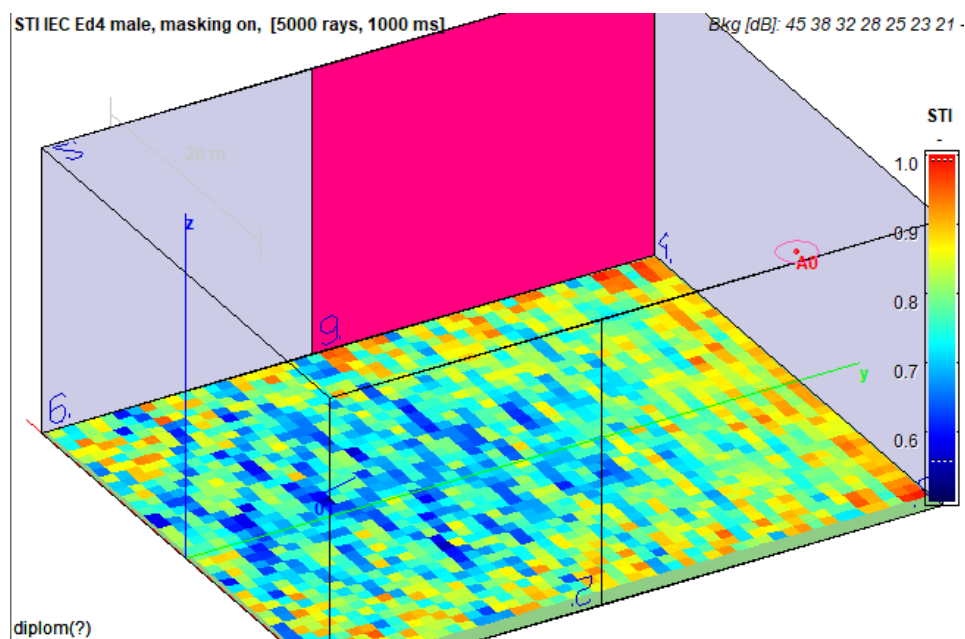


Εικόνα 5.10 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή, περίπτωση I.

Συγκρίνοντας την εικόνα 5.3 και 5.10 φαίνεται ότι με την παρέμβαση I, μειώθηκε το flutter echo που εμφανίζεται στα 50ms.

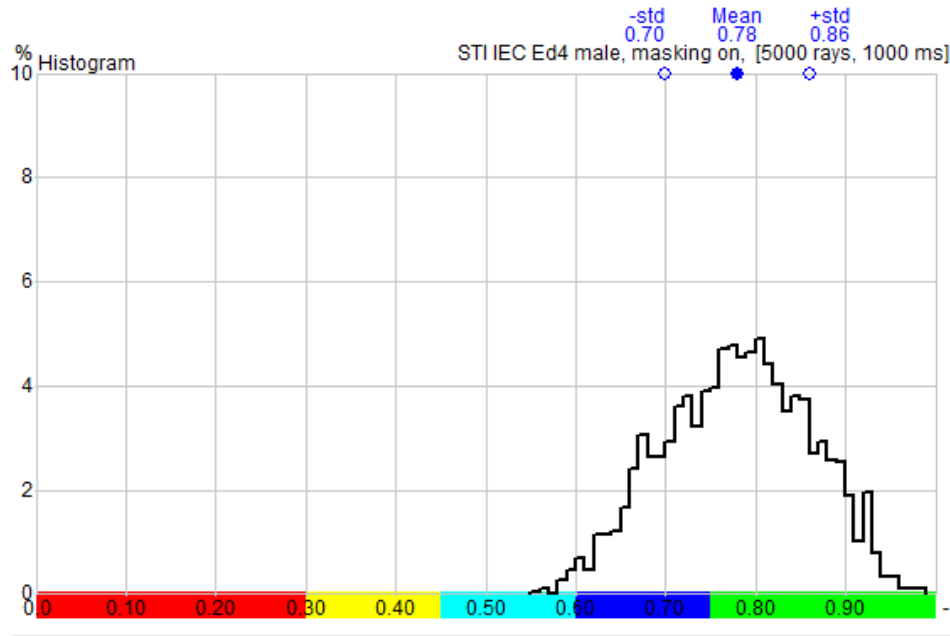
Από το μενού, ακολούθως, επιλέχθηκε το Map measures προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες STI, T-30, C-50 για την περίπτωση I.

Συγκεκριμένα ο δείκτης STI φαίνεται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση I.

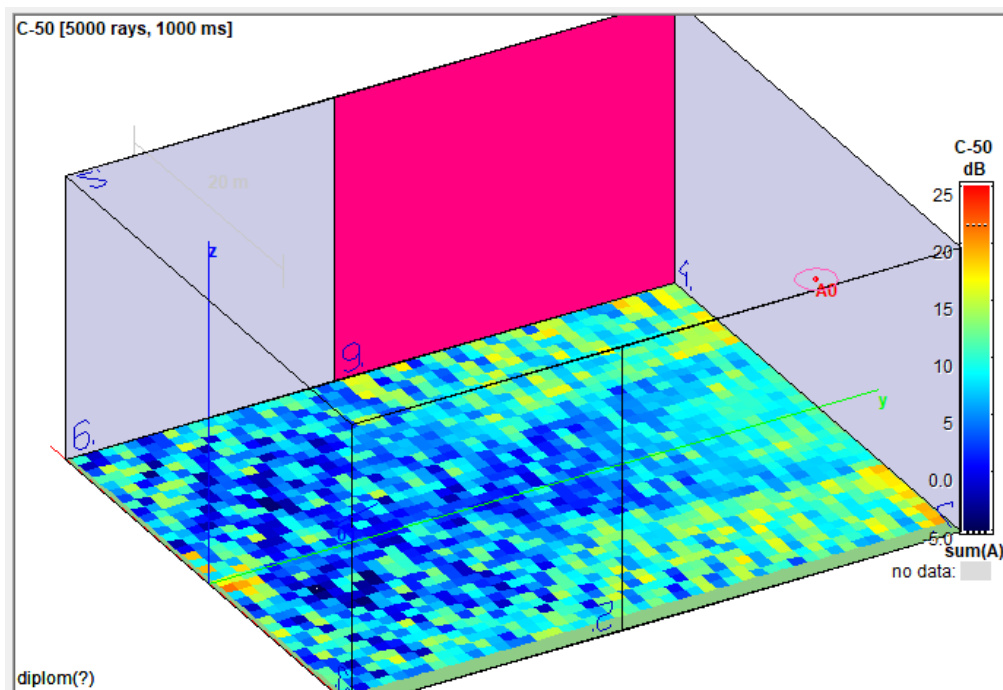
Οι στατιστικές τιμές του δείκτη STI φαίνονται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση I.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του STI σε σχέση με εκείνες της εικόνας 5.5 είναι βελτιωμένες.

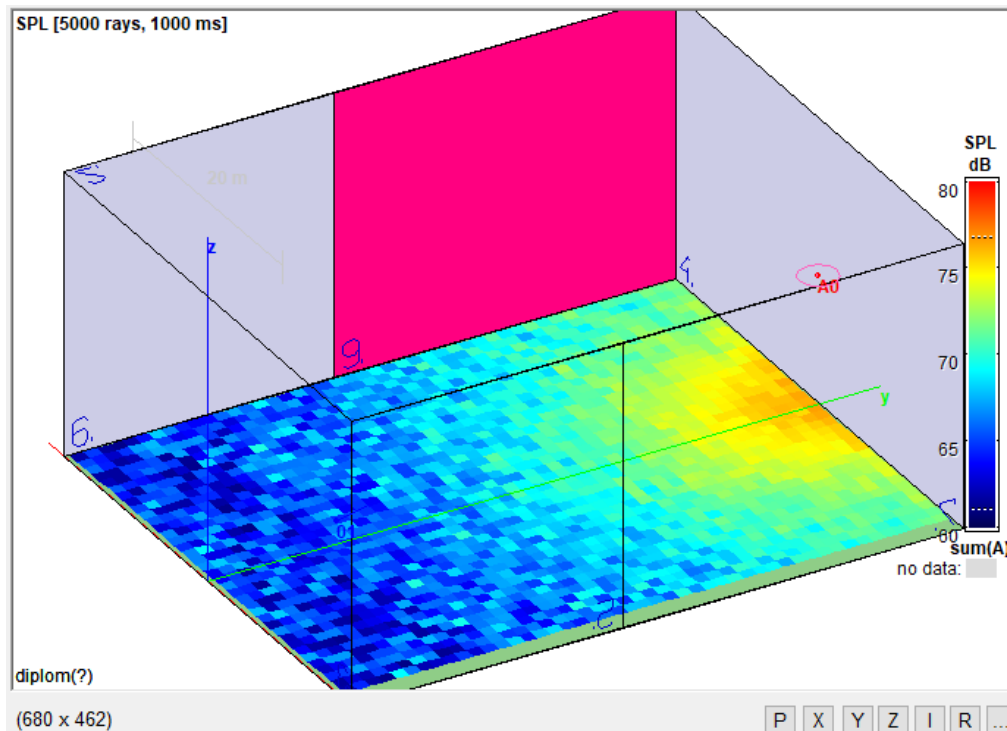
Υπολογίζοντας και το δείκτη C-50 προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.13.



Εικόνα 5.13 Δείκτης C-50, περίπτωση I.

Πολύ μικρή βελτίωση εμφανίζει και ο δείκτης C-50 σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση (εικόνα 5.6).

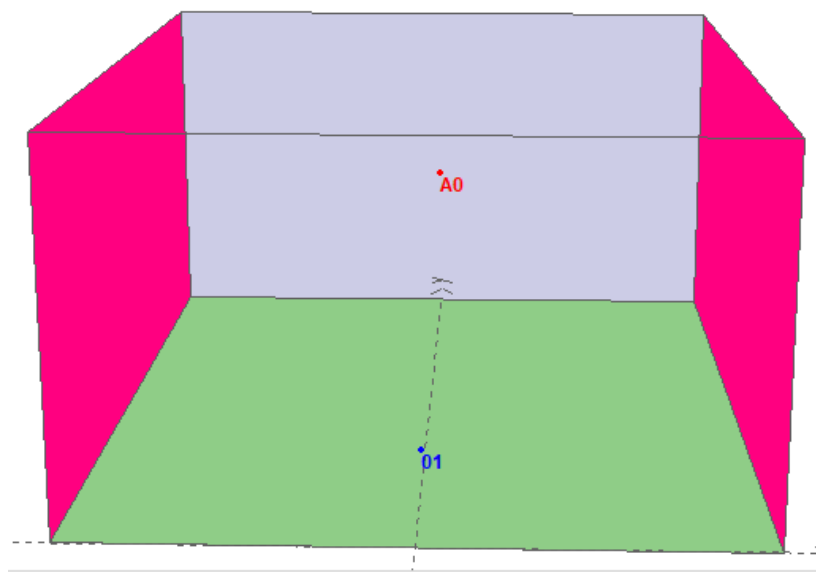
Η αντίστοιχη μέτρηση στάθμης SPL φαίνεται στην εικόνα 5.14.

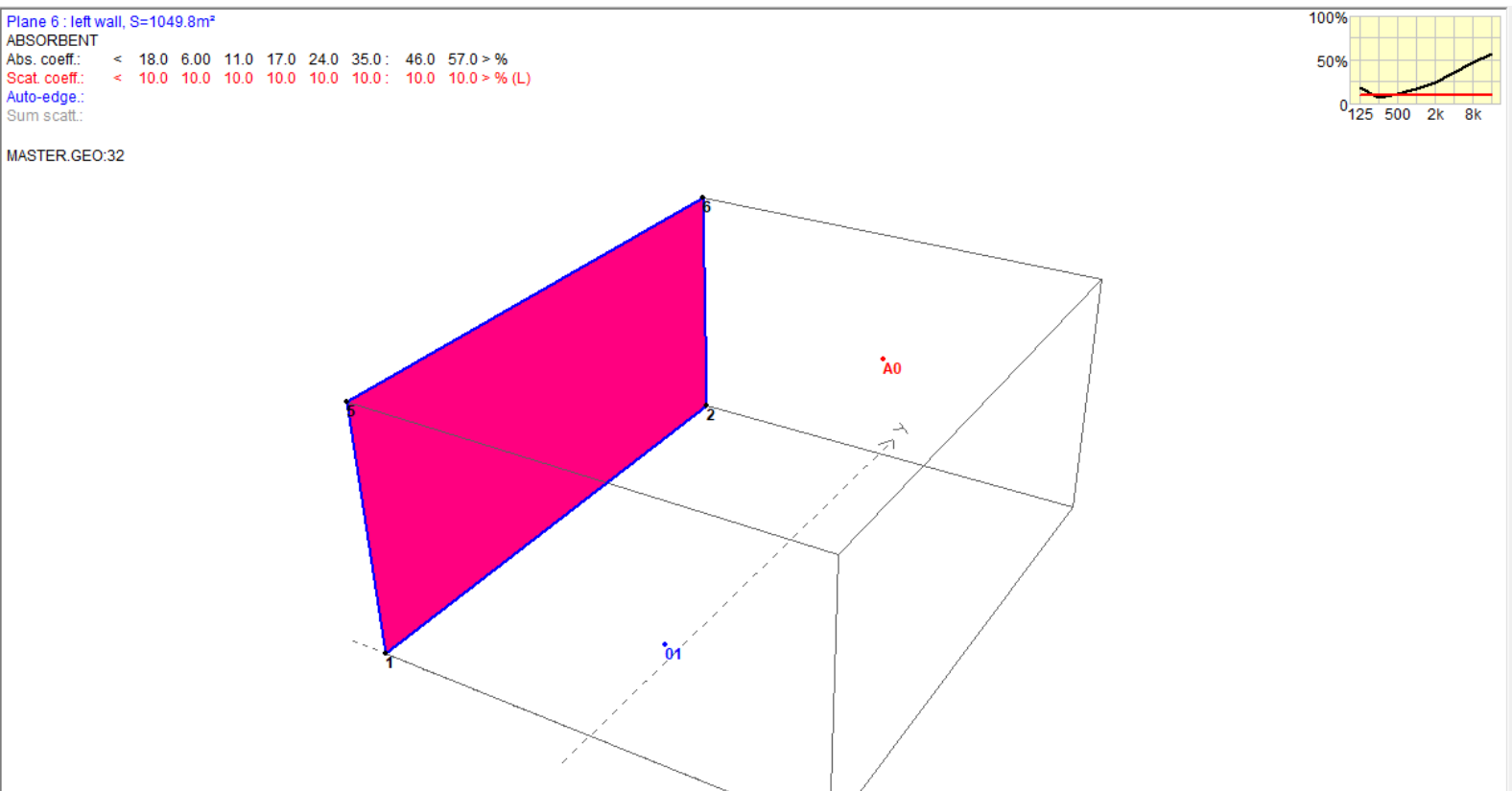


Εικόνα 5.14 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση I.

Η στάθμη SPL εμφανίζεται περίπου ίδια με την υφιστάμενη κατάσταση (εικόνα 5.7).

Στη συνέχεια εξετάστηκε η περίπτωση II, όπου οι 2 πλευρικοί τοίχοι καλύπτονται εξ ολοκλήρου με απορροφητικό υλικό. Το αντίστοιχο 3- διαστάσεων σχέδιο φαίνεται στην εικόνα 5.15.

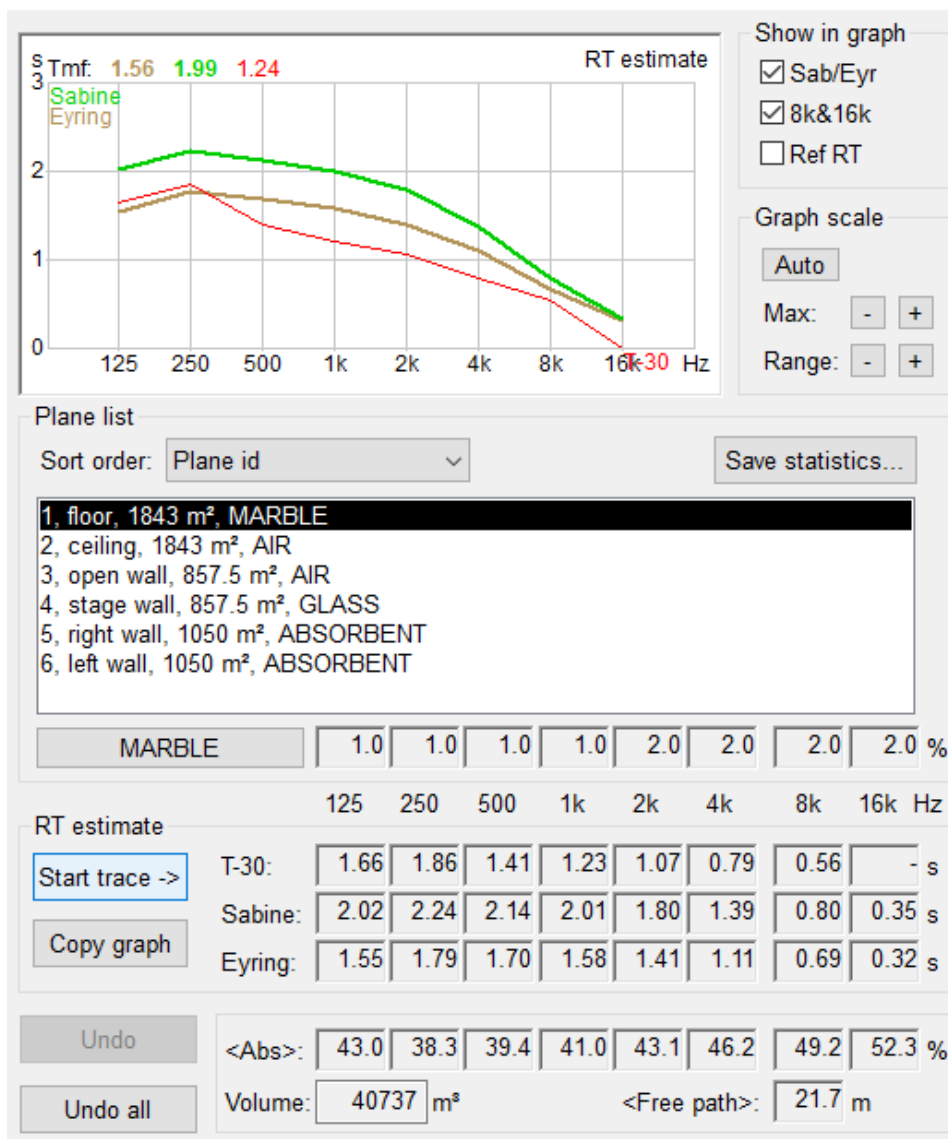




Εικόνα 5.15 Περίπτωση II. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζεται ο τοίχος πίσω από τη σκηνή, πράσινο το πάτωμα και με κόκκινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Από το κεντρικό μενού του λογισμικού επιλέχθηκε interactive RT estimation και στη συνέχεια start trace για τον υπολογισμό του δείκτη T-30 και τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στην εικόνα 5.16.

Interactive RT estimation

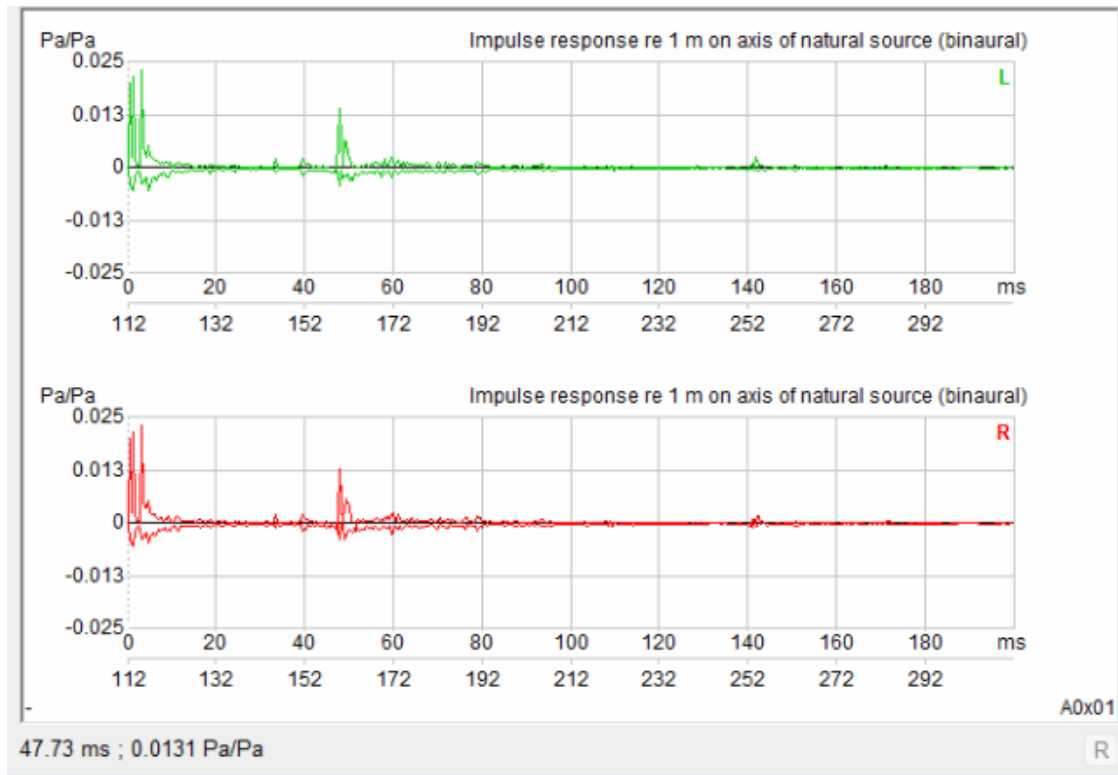


Εικόνα 5.16 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acoustic στην περίπτωση II.

Ο χρόνος αντήχησης, όπως ήταν αναμενόμενο μειώθηκε περαιτέρω, κάτι βέβαια που δεν είναι επιθυμητό σε περίπτωση χρήσης του χώρου για συναυλία για παράδειγμα.

Στη συνέχεια από το μενού TUCT prediction, ορίστηκε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το ακροατήριο και επιλέχθηκε η χρήση της πηγής A₀.

Από το επόμενο μενού επιλέχθηκε Predict SxR ώστε να εξάγει το λογισμικό την κρουστική αποκρίση στη θέση του ακροατή A₀, εικόνα 5.17.

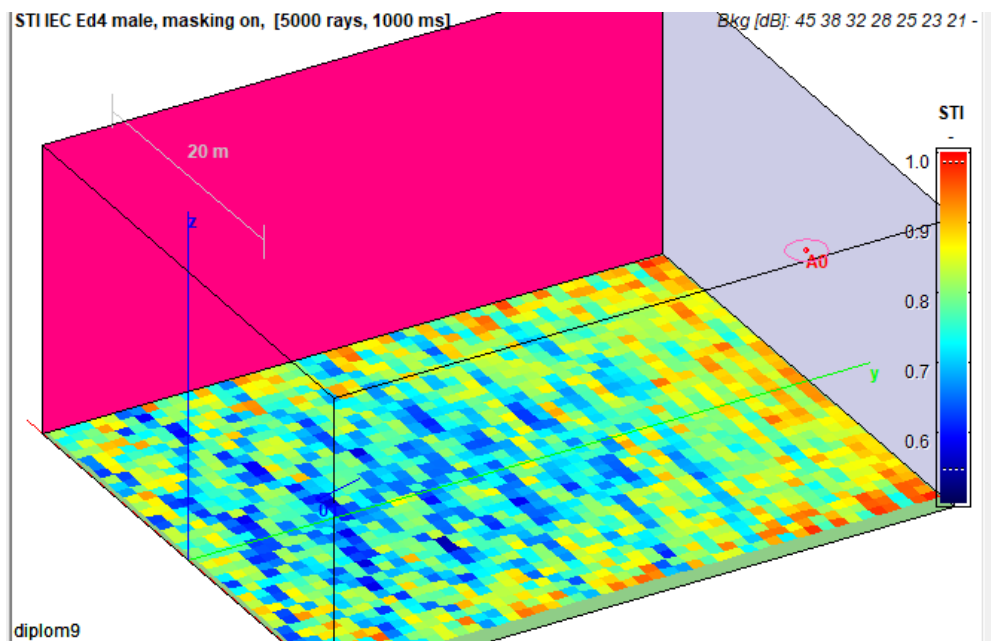


Εικόνα 5.17 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή, περίπτωση II.

Παρατηρούμε ότι ενώ καλύφθηκαν εξ ολοκλήρου οι πλευρικοί τοίχοι με απορροφητικό υλικό, δεν εξαλείφθηκε η έντονη ανάκλαση στα 50 ms.

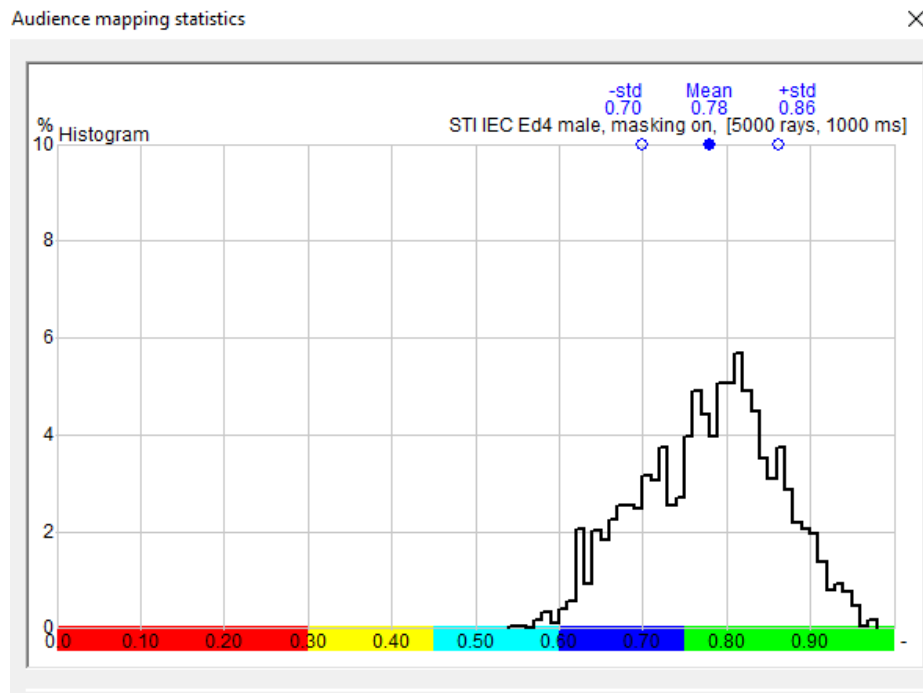
Από το μενού, ακολούθως, επιλέχθηκε το Map measures προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες STI, T-30, C-50 για την περίπτωση II.

Συγκεκριμένα ο δείκτης STI φαίνεται στην εικόνα 5.18.



Εικόνα 5.18 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση II.

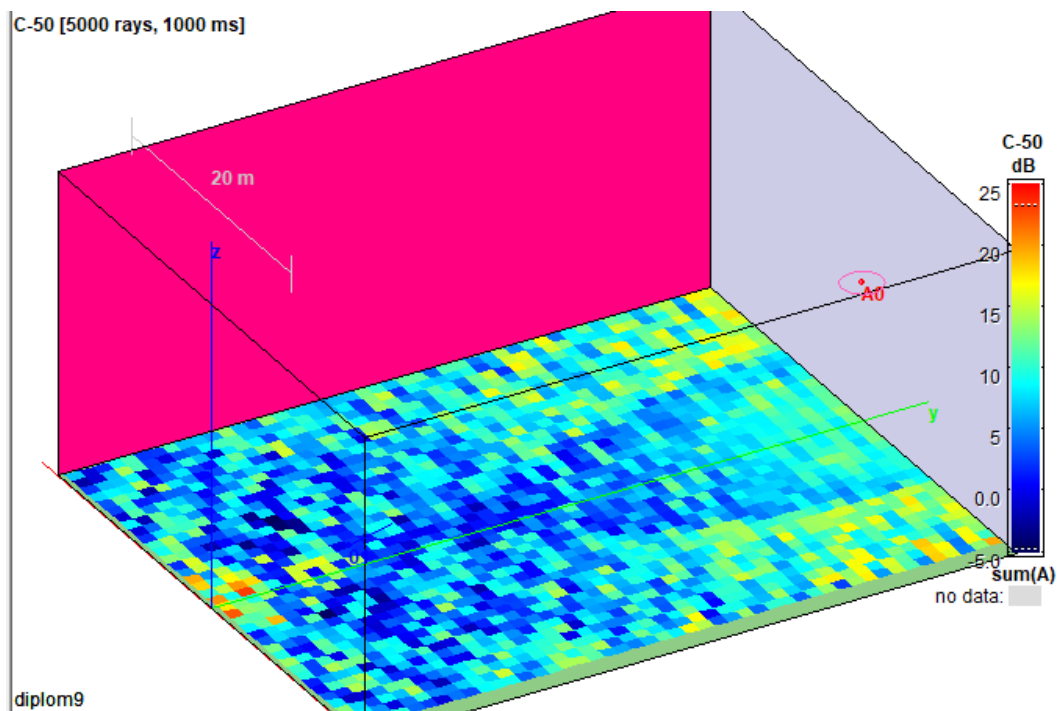
Οι στατιστικές τιμές του δείκτη STI φαίνονται στην εικόνα 5.19.



Εικόνα 5.19 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση II.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του STI σε σχέση με εκείνες της εικόνας 5.12 είναι ακόμη πιο βελτιωμένες.

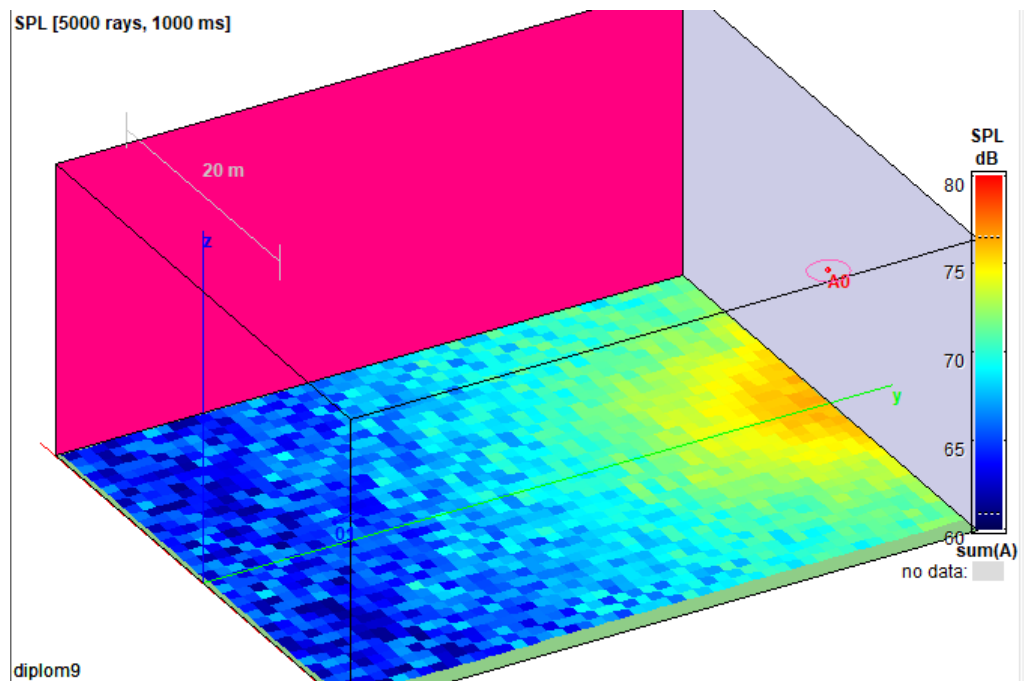
Υπολογίζοντας και το δείκτη C-50 προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.20.



Εικόνα 5.20 Δείκτης C-50, περίπτωση II.

Μικρή βελτίωση εμφανίζει και ο δείκτης C-50 σε σχέση με την περίπτωση I (εικόνα 5.13), ειδικά κοντά στις πλευρικές επιφάνειες.

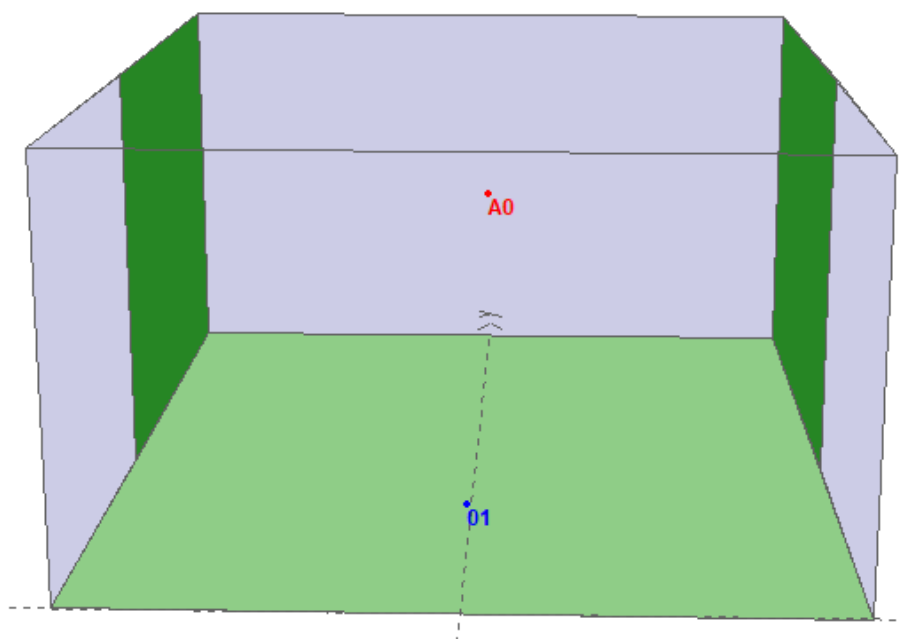
Η αντίστοιχη μέτρηση στάθμης SPL φαίνεται στην εικόνα 5.21.



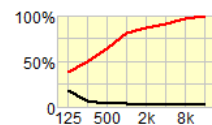
Εικόνα 5.21 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση II.

Η στάθμη SPL εμφανίζεται όπως και στην περίπτωση I, περίπου ίδια με την υφιστάμενη κατάσταση (εικόνα 5.7).

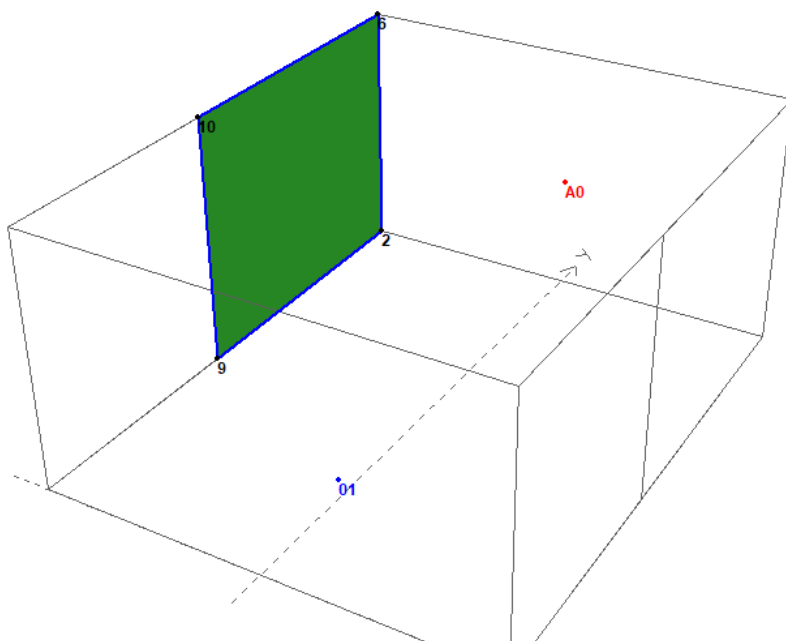
Ακολούθως εξετάστηκε η περίπτωση III, όπου οι 2 πλευρικοί τοίχοι καλύπτονται κατά το ήμισυ με διαχυτικό υλικό. Το αντίστοιχο 3- διαστάσεων σχέδιο φαίνεται στην εικόνα 5.22.



Plane 9 : left wall-fixed, S=585.7m²
DIFFUSE
Abs. coeff.: < 18.0 6.00 4.00 3.00 2.00 2.00 : 2.00 2.00 > %
Scat. coeff.: < 38.0 49.0 64.0 81.0 86.0 91.0 : 96.0 99.0 > % (L)
Auto-edge.:
Sum scatt.:



MASTER.GEO:37



Εικόνα 5.22 Περίπτωση III. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πλαϊνοί τοίχοι, πράσινο το πάτωμα και με σκούρο πράσινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί κατά το ήμισυ με απορροφητικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Από το κεντρικό μενού του λογισμικού επιλέχθηκε interactive RT estimation και στη συνέχεια start trace για τον υπολογισμό του δείκτη T-30 και τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στην εικόνα 5.23.

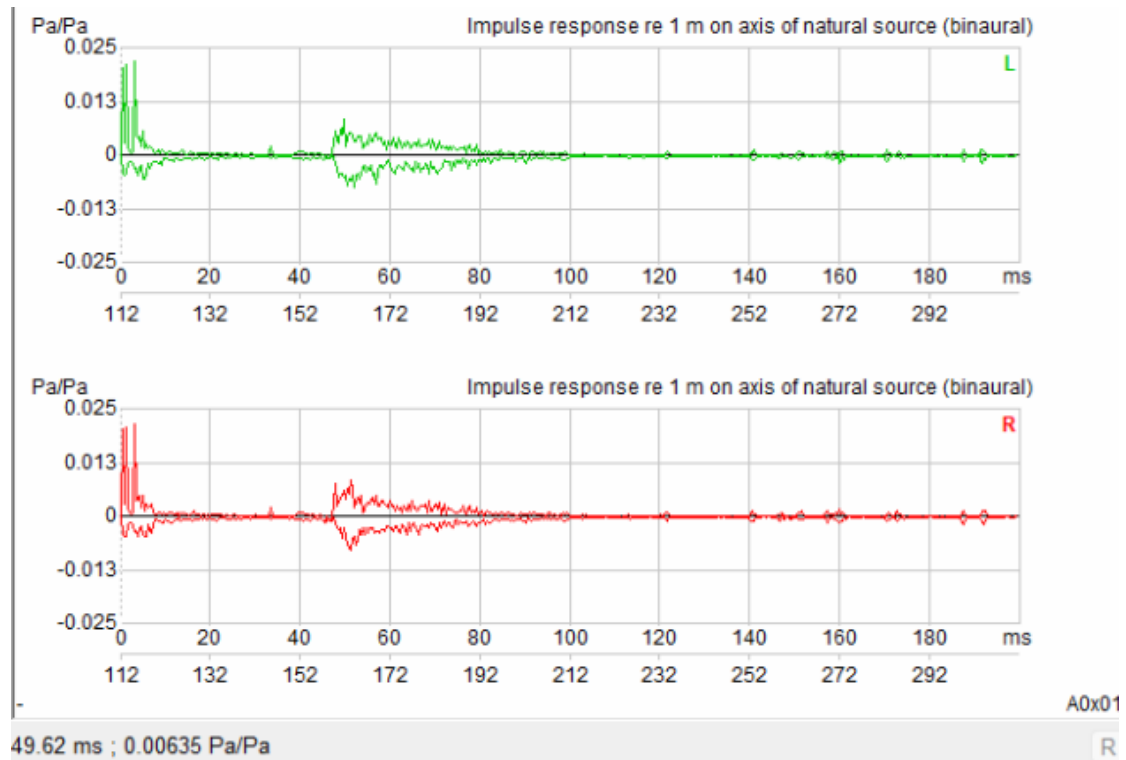


Εικόνα 5.23 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acoustic στην περίπτωση III.

Ο χρόνος αντήχησης, όπως ήταν αναμενόμενο μειώθηκε σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, διατηρώντας την όμως σε καλά επίπεδα, ώστε να διατηρηθεί η ζωντάνια του χώρου.

Στη συνέχεια από το μενού TUCT prediction, ορίστηκε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το ακροατήριο και επιλέχθηκε η χρήση της πηγής A₀.

Από το επόμενο μενού επιλέχθηκε Predict SxR ώστε να εξάγει το λογισμικό την κρουστική αποκρίση στη θέση του ακροατή A₀, εικόνα 5.24.

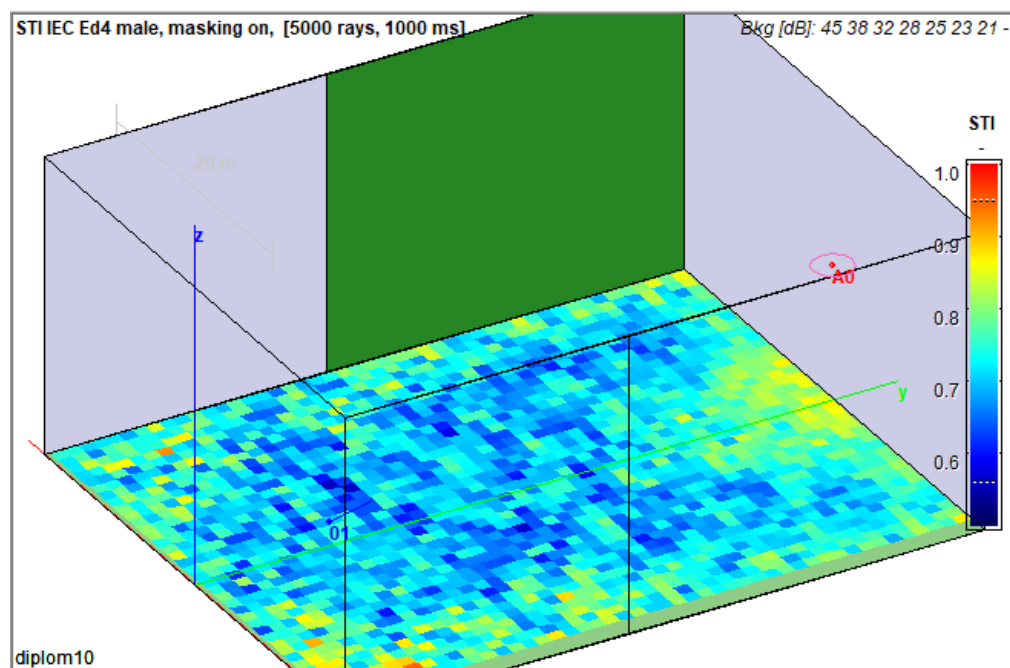


Εικόνα 5.24 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή, περίπτωση III.

Η χρήση του διαχυτικού υλικού στους πλευρικούς τοίχους διέλυσε και σκόρπισε το flutter echo που παρατηρείται στα 50 ms.

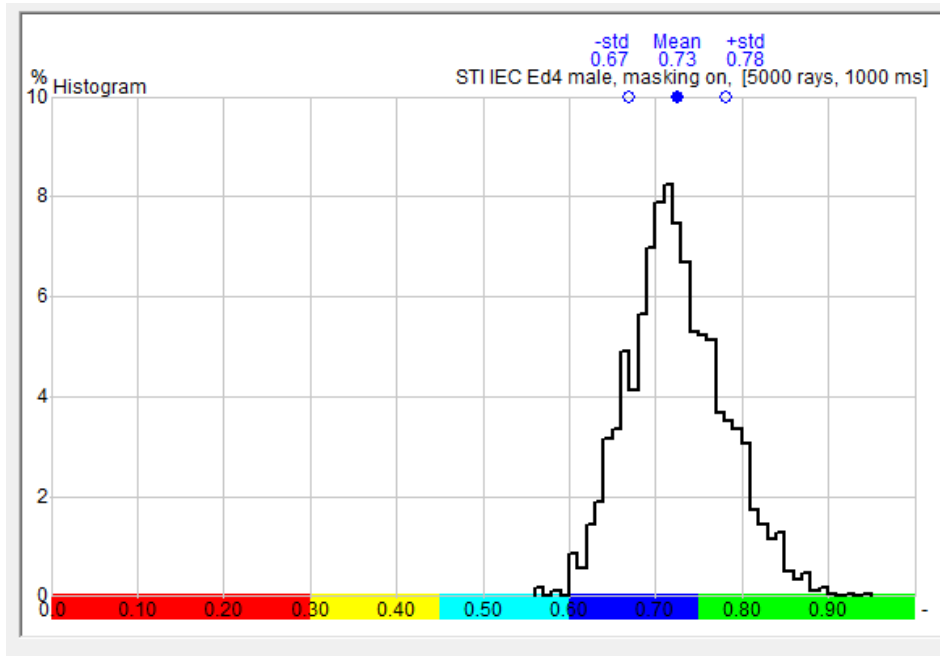
Από το μενού, ακολούθως, επιλέχθηκε το Map measures προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες STI, T-30, C-50 για την περίπτωση III.

Συγκεκριμένα ο δείκτης STI φαίνεται στην εικόνα 5.25.



Εικόνα 5.25 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση III.

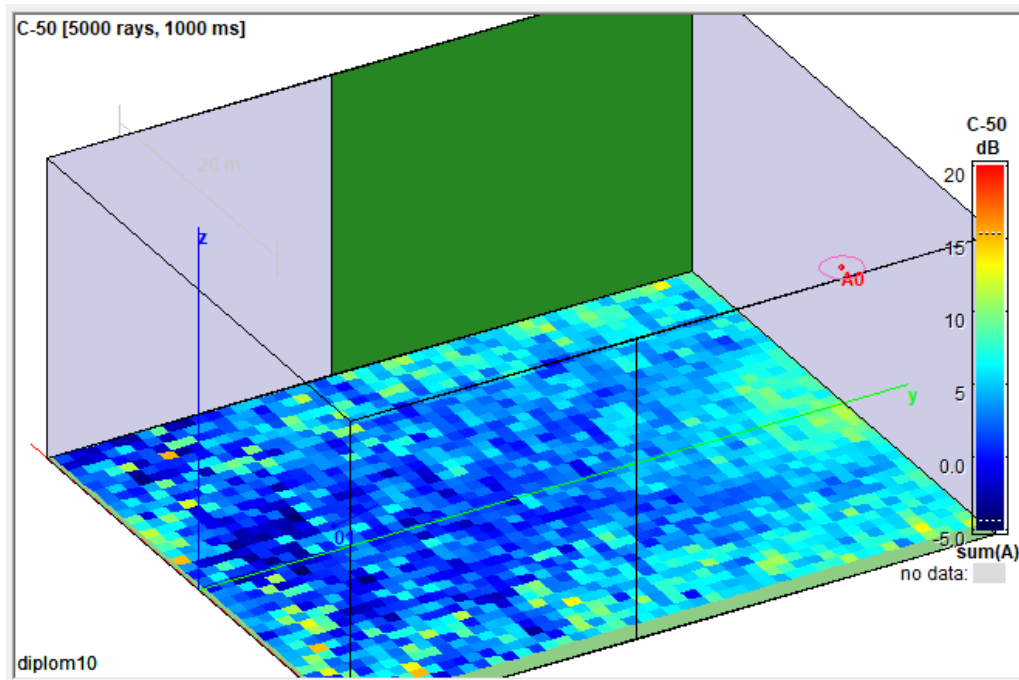
Οι στατιστικές τιμές του δείκτη STI φαίνονται στην εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.26 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση III.

Οι τιμές του δείκτη STI με το διαχυτικό υλικό παραμένουν σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, λίγο μικρότερα σε σχέση με τις περιπτώσεις I και II.

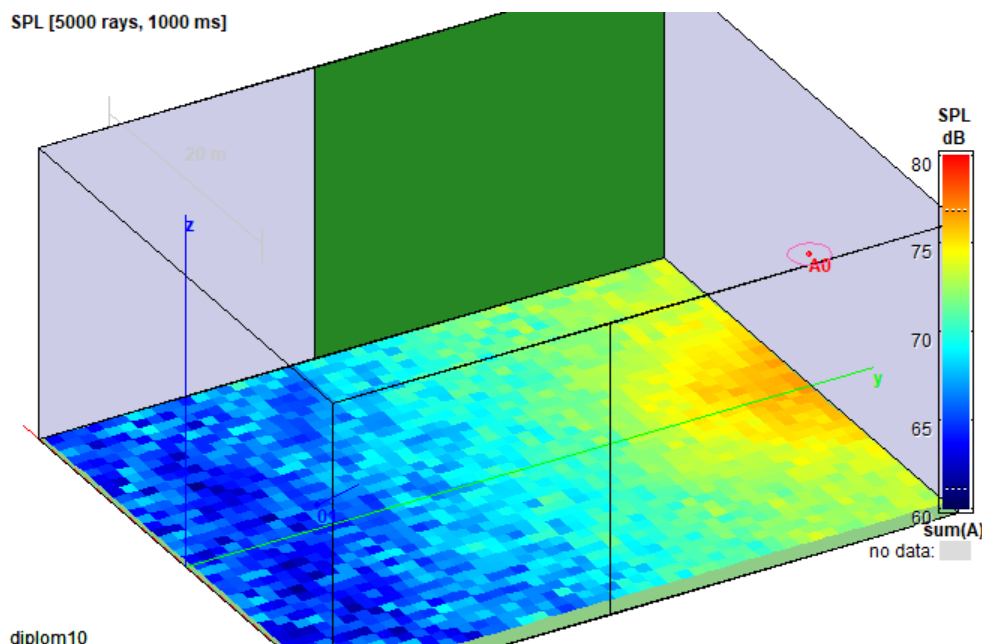
Υπολογίζοντας και το δείκτη C-50 προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.27.



Εικόνα 5.27 Δείκτης C-50, περίπτωση III.

Ο δείκτης C-50 σε σχέση με την περίπτωση I και II (εικόνες 5.13, 5.20), είναι σε πιο χαμηλά επίπεδα, ωστόσο παραμένουν ικανοποιητικά.

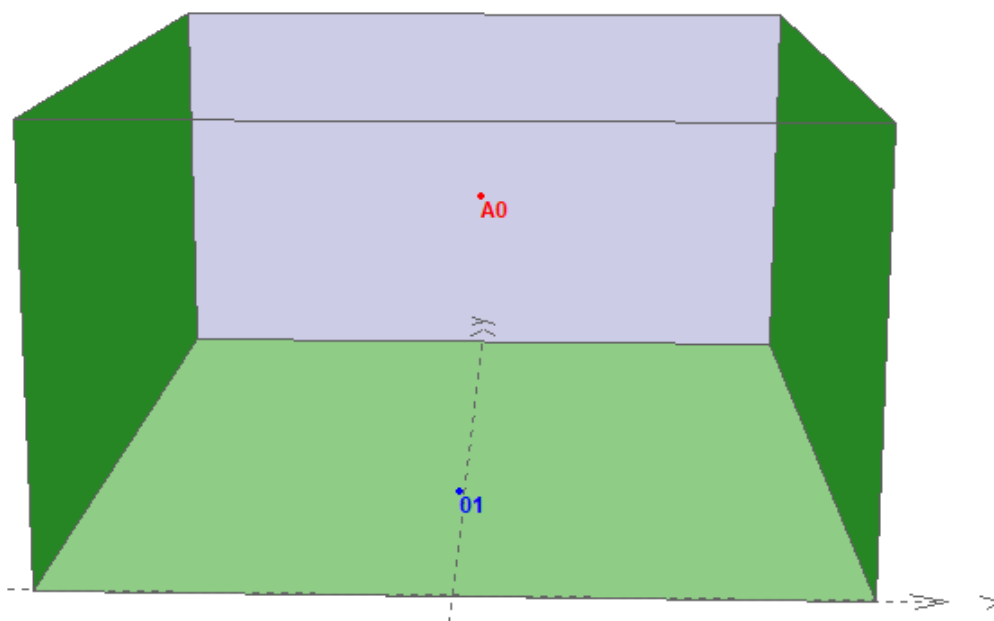
Η αντίστοιχη μέτρηση στάθμης SPL φαίνεται στην εικόνα 5.28.



Εικόνα 5.28 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση III.

Η στάθμη SPL εμφανίζεται σε πιο αυξημένα επίπεδα σε σχέση με την περίπτωση I και II (εικόνες 5.14, 5.21).

Τέλος εξετάστηκε η περίπτωση IV, όπου οι 2 πλευρικοί τοίχοι καλύπτονται εξ ολοκλήρου με διαχυτικό υλικό. Το αντίστοιχο 3- διαστάσεων σχέδιο φαίνεται στην εικόνα 5.29.



Plane 6 : left wall, S=1049.8m²

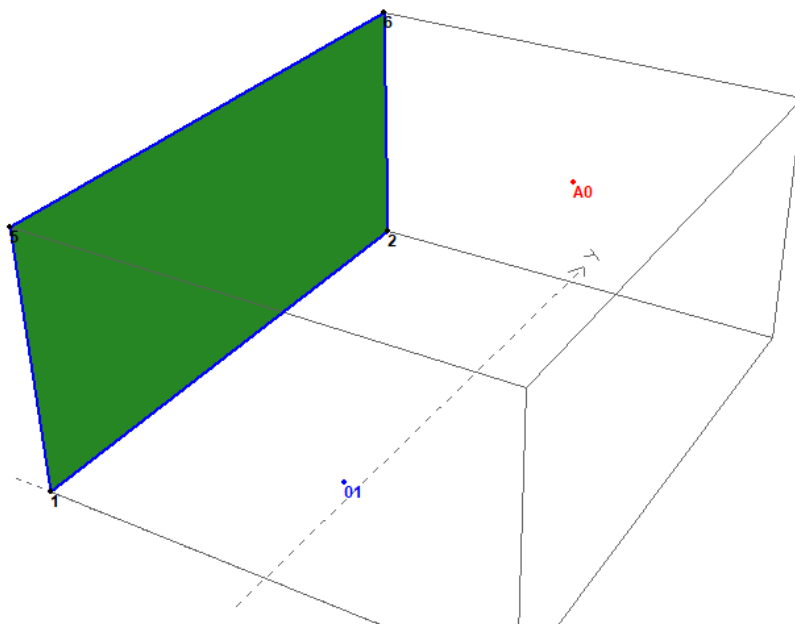
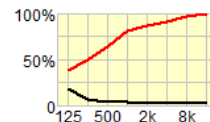
DIFFUSE

Abs. coeff.: < 18.0 6.00 4.00 3.00 2.00 2.00 : 2.00 2.00 > %
Scat. coeff.: < 38.0 49.0 64.0 81.0 86.0 91.0 : 96.0 99.0 > % (L)

Auto-edge:

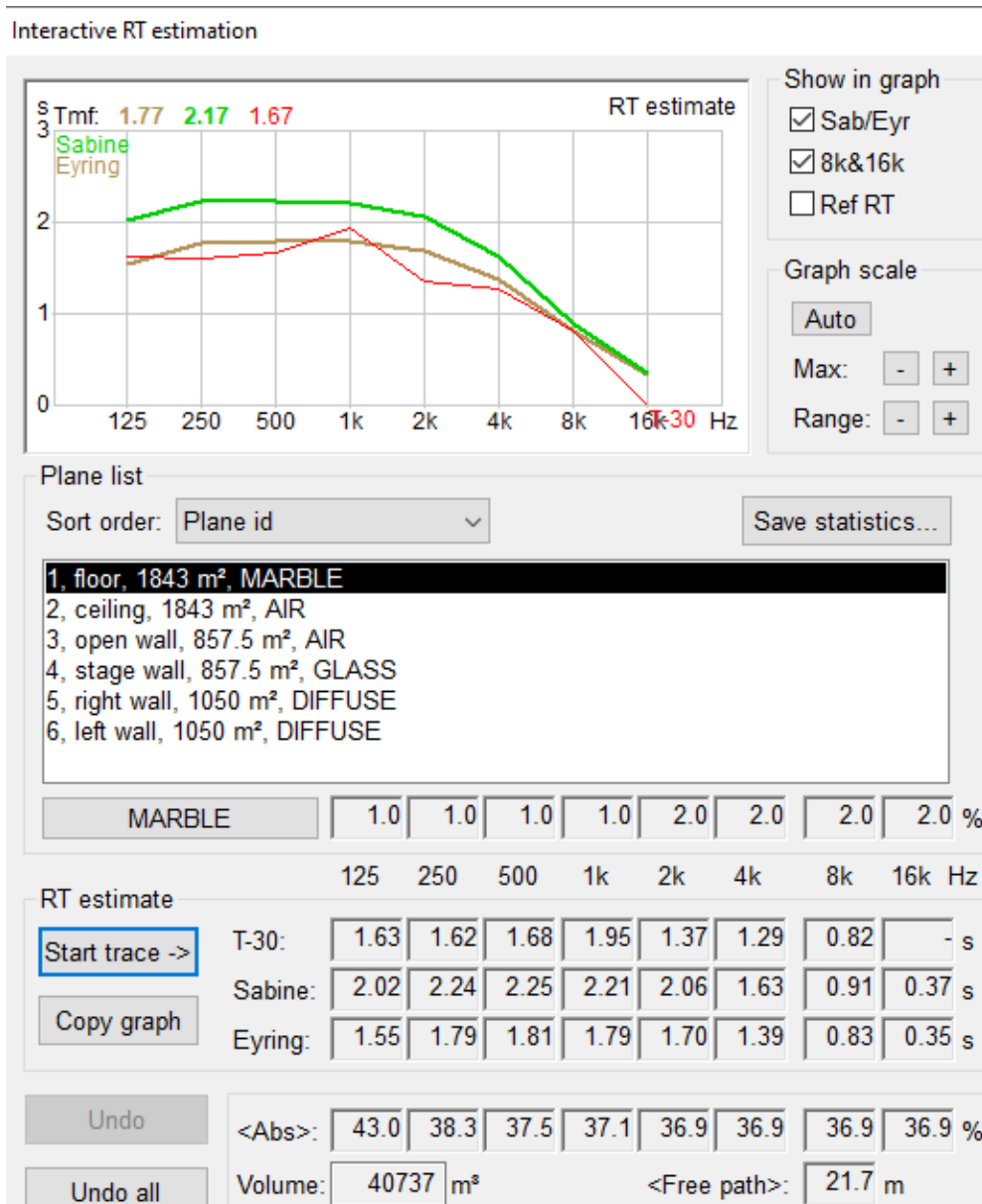
Sum scatt:

MASTER.GEO:32



Εικόνα 5.29 Περίπτωση IV. 3-διαστάσεων απεικόνιση μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic, με γκρι χρώμα ο τοίχος πίσω από τη σκηνή, πράσινο το πάτωμα και με σκούρο πράσινο οι πλαϊνές επιφάνειες που έχουν καλυφθεί με διαχυτικό υλικό. Στη κάτω εικόνα φαίνεται το υλικό των πλαϊνών τοίχων και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης

Από το κεντρικό μενού του λογισμικού επιλέχθηκε interactive RT estimation και στη συνέχεια start trace για τον υπολογισμό του δείκτη T-30 και τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται στην εικόνα 5.30.

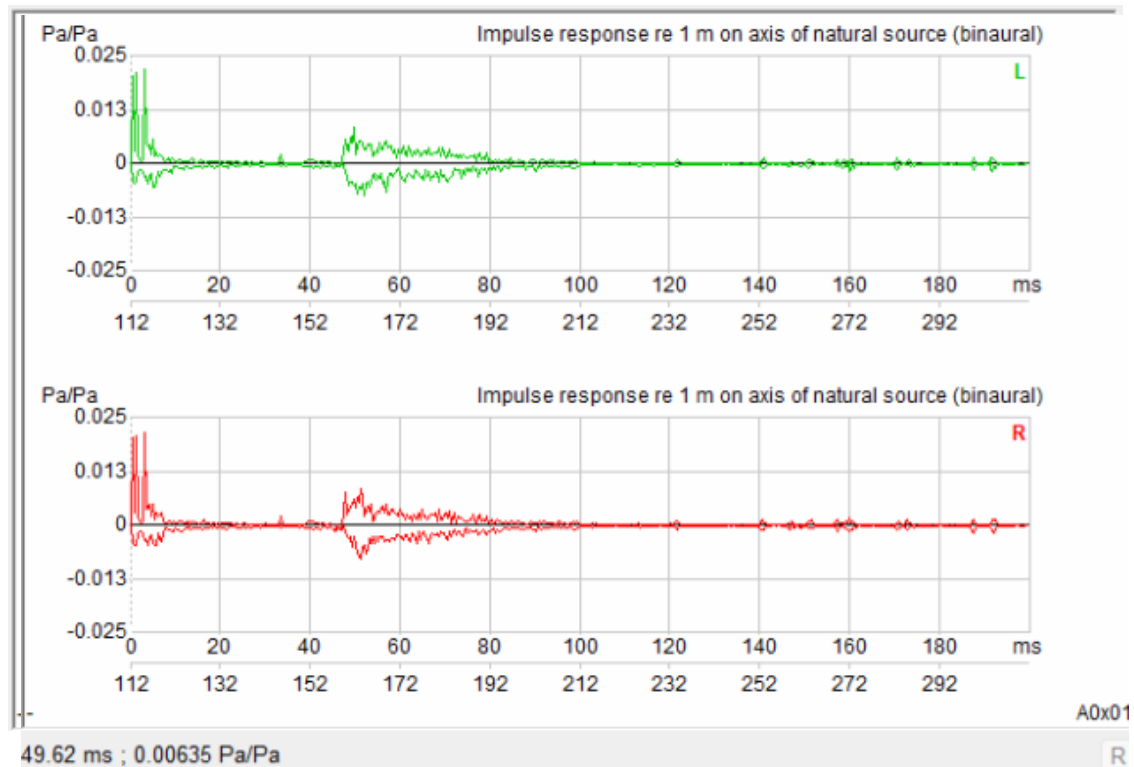


Εικόνα 5.30 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης μέσω του λογισμικού Catt -Acousic στην περίπτωση IV.

Ο χρόνος αντήχησης είναι αυξημένος σε σχέση με την περίπτωση III, ωστόσο διατηρείται σε καλά επίπεδα.

Στη συνέχεια από το μενού TUCT prediction, ορίστηκε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το ακροατήριο και επιλέχθηκε η χρήση της πηγής A₀.

Από το επόμενο μενού επιλέχθηκε Predict SxR ώστε να εξάγει το λογισμικό την κρουστική αποκρίση στη θέση του ακροατή A₀, εικόνα 5.31.

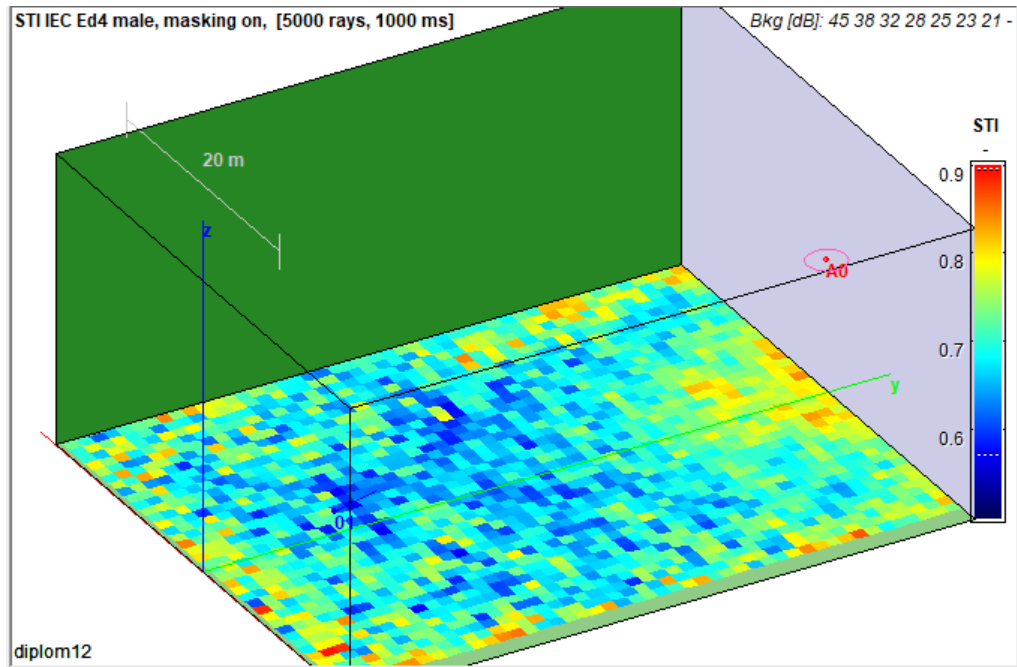


Εικόνα 5.31 Κρουστική απόκριση στη θέση του ακροατή, περίπτωση IV.

Η χρήση του διαχυτικού υλικού σε ολόκληρους τους πλευρικούς τοίχους διέλυσε και σκόρπισε το flutter echo που παρατηρείται στα 50 ms, με παρόμοια αποτελέσματα με την περίπτωση III.

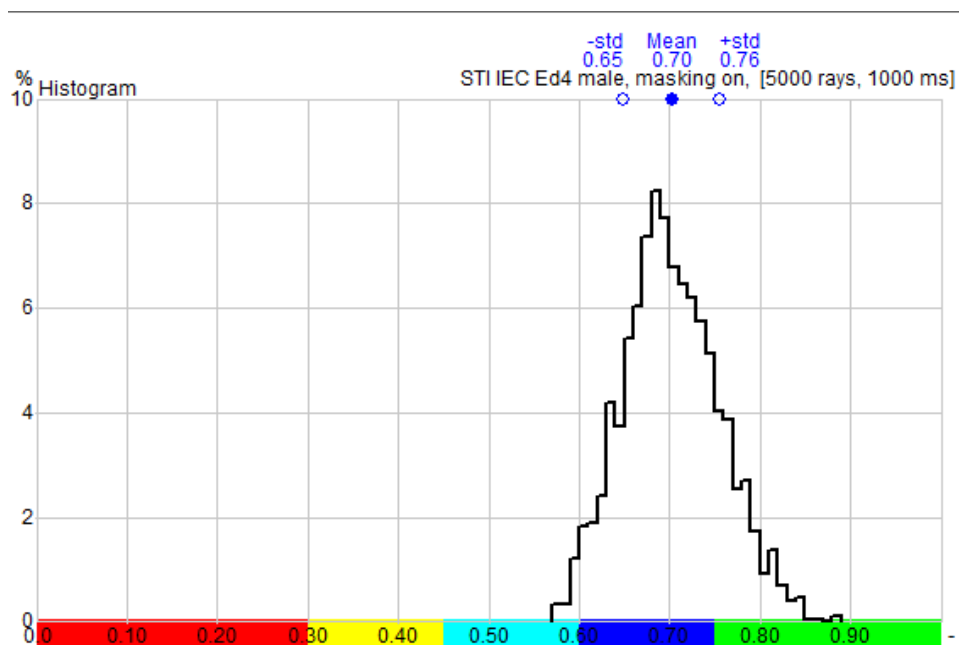
Από το μενού, ακολούθως, επιλέχθηκε το Map measures προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες STI, T-30, C-50 για την περίπτωση III.

Συγκεκριμένα ο δείκτης STI φαίνεται στην εικόνα 5.32.



Εικόνα 5.32 Απεικόνιση δείκτη STI για το χώρο, περίπτωση IV.

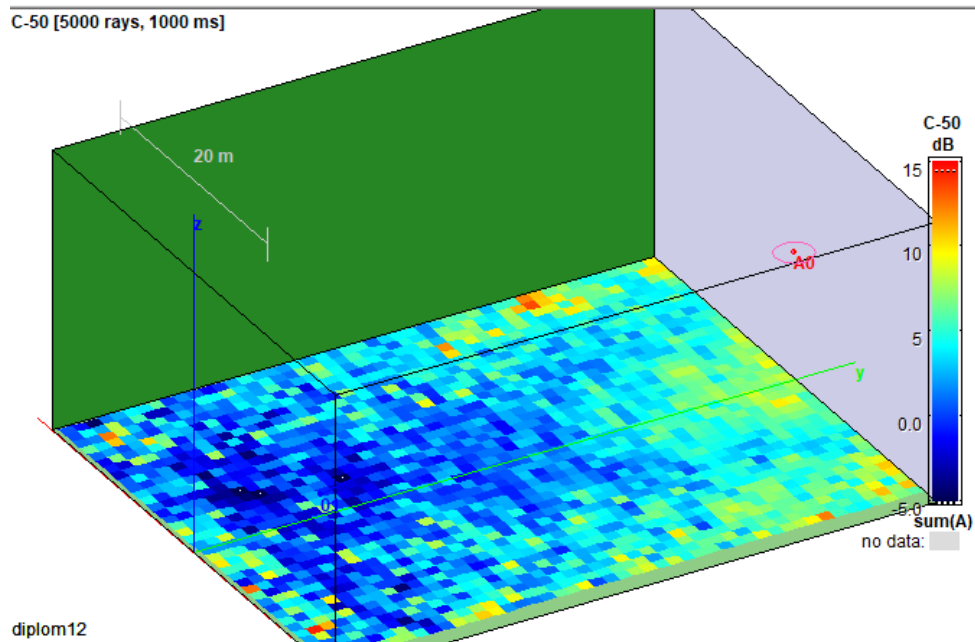
Οι στατιστικές τιμές του δείκτη STI φαίνονται στην εικόνα 5.33



Εικόνα 5.33 Στατιστικές τιμές του δείκτη STI, περίπτωση IV.

Οι τιμές του δείκτη STI με το διαχυτικό υλικό παραμένουν σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, λίγο μικρότερα σε σχέση με τις περιπτώσεις I και II και σε παρόμοια επίπεδα με την περίπτωση III (εικόνα 5.25).

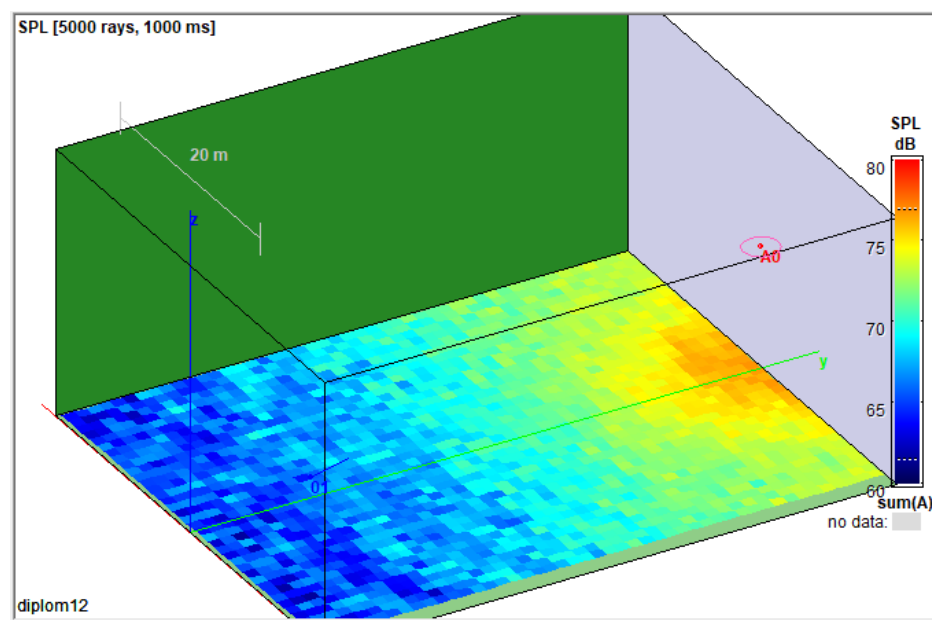
Υπολογίζοντας και το δείκτη C-50 προέκυψε το γράφημα της εικόνας 5.34.



Εικόνα 5.34 Δείκτης C-50, περίπτωση IV.

Ο δείκτης C-50 σε σχέση με την περίπτωση I και II (εικόνες 5.13, 5.20), είναι σε πιο χαμηλά επίπεδα, ενώ σε σχέση με την περίπτωση III (εικόνα 5.27) είναι λίγο καλύτερα.

Η αντίστοιχη μέτρηση στάθμης SPL φαίνεται στην εικόνα 5.35.



Εικόνα 5.35 Στάθμη SPL στο επίπεδο του ακροατηρίου, περίπτωση IV.

Η στάθμη SPL εμφανίζεται σε πιο αυξημένα επίπεδα σε σχέση με την περίπτωση I και II και III (εικόνες 5.14, 5.21, 5.28).

5.3 Σύνοψη

Οι ανωτέρω παρεμβάσεις που σχεδιάστηκαν μέσω του λογισμικού, βελτιώνουν την υφιστάμενη κατάσταση σε ικανοποιητικό βαθμό, ωστόσο ο χώρος εμφανίζει ιδιαιτερότητες, λόγω πολύ μεγάλων διαστάσεων, καθιστώντας δύσκολη την υλοποίησή τους. Η αναζήτηση ενός εξειδικευμένου συστήματος κρίνεται επιβεβλημένη.

6 ΗΧΗΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ HOLOPLOT

6.1 Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του χώρου, τα προβλήματα και τις απαιτήσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2 της παρούσης διπλωματικής εργασίας, κρίθηκε σκόπιμη η αναζήτηση μονάδων, για την κάλυψη του χώρου, οι οποίες θα υποστηρίζουν τη δυνατότητα είτε σύνθεσης ηχητικού πεδίου, είτε πολυζωνικής εκπομπής μέσω beam forming, είτε και τα 2.

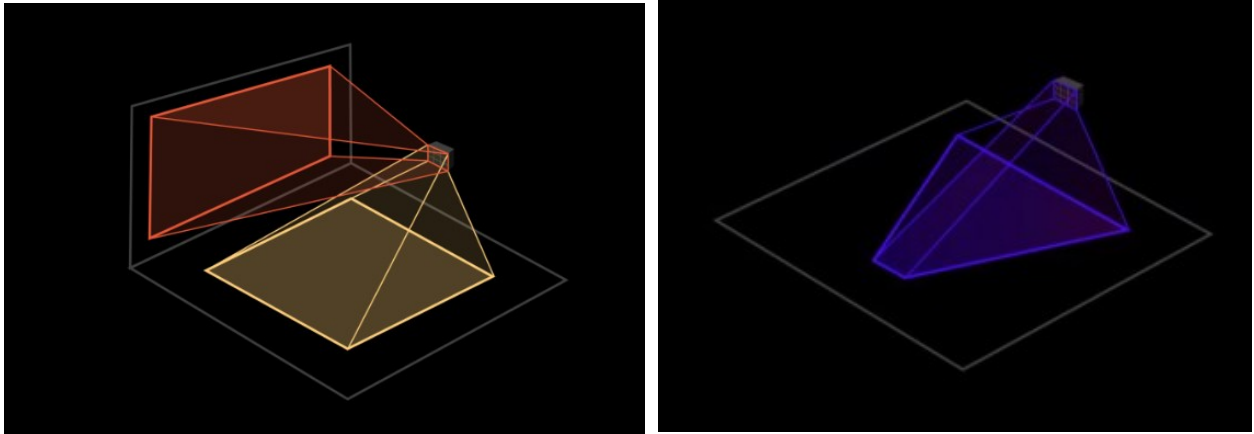
6.2 Holoplot

Μετά από έρευνα και προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω συνθήκες επιλέχθηκαν να μελετηθούν, τα συστήματα που έχει αναπτύξει η εταιρία Holoplot η οποία ειδικεύεται στη δημιουργία εγκαταστάσεων τεχνολογίας ήχου. Οι εγκαταστάσεις της, ανά τον κόσμο χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές, όπως παραστάσεις, συναυλίες, εκθέσεις και πολλά άλλα, προσφέροντας στους ακροατές εμπειρία εμπύθισης στο ηχητικό περιεχόμενο. Το μεγαλύτερο έργο της είναι η MSG SPHERE στο Λάς Βέγκας στην οποία έχουν εγκατασταθεί 1578 μονάδες του μοντέλου X1 (εικόνα 5.1).



Εικόνα 6.1 Η MSG SPHERE στο Λάς Βέγκας

Οι μονάδες που παράγει, ενσωματώνουν υψηλή τεχνολογία δημιουργώντας και με τη βοήθεια του λογισμικού της, διαφορετικά μεγέθη ακροατηρίων, διαφορετικές ρυθμίσεις ανάλογα με τη χρήση, χωρίς να απαιτείται η επανατοποθέτηση των μονάδων στο χώρο, εικόνα 6.2. Συνδυάζει την τεχνολογία του 3-D Audio Beamforming και Wave field synthesis σε μια συσκευή που ελέγχεται με τη βοήθεια λογισμικού.



Εικόνα 6.2 Παραδείγματα δημιουργίας ηχητικών πεδίων μέσω του λογισμικού της Holoplot

6.3 Ηχητική σχεδίαση μέσω της τεχνολογίας της Holoplot

Η τεχνολογία που έχει αναπτύξει η Holoplot επιτρέπει στους μηχανικούς ακουστικού σχεδιασμού να χαρτογραφήσουν τον ήχο στο χώρο με μια προσέγγιση 3 διαστάσεων, ενσωματώνοντας την τεχνολογία beamforming και Wave Field Synthesis στο ίδιο σύστημα.

Οι συστοιχίες (Matrix array) παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ηχητικές δέσμες κάλυψης μιας περιοχής (coverage beams), παραμετρικές ηχητικές δέσμες (parametric beams) και εικονικές πηγές (virtual sources) των οποίων τα βασικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 6.1.

Συγκεκριμένα, μια δέσμη κάλυψης είναι μια βελτιστοποιημένη δέσμη, προσαρμοσμένη στο σχήμα και το μέγεθος της στοχευμένης περιοχής. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία beamforming, μια προκαθορισμένη περιοχή στόχος, μπορεί να αντιστοιχιστεί πίσω στην επιφάνεια της διάταξης Matrix. Κάθε μεγάφωνο στη συστοιχία Matrix ελέγχεται ξεχωριστά για να επιτευχθεί συλλογικά η επιθυμητή χωρική και φασματική απόκριση της συστοιχίας.

Μια παραμετρική δέσμη από την άλλη, είναι μια μέθοδος για μια συστοιχία Matrix να παράγει ένα κατευθυντικό ακουστικό μέτωπο κύματος, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους γωνία ανοίγματος και γωνία κατεύθυνσης, που ορίζονται στο σχέδιο.

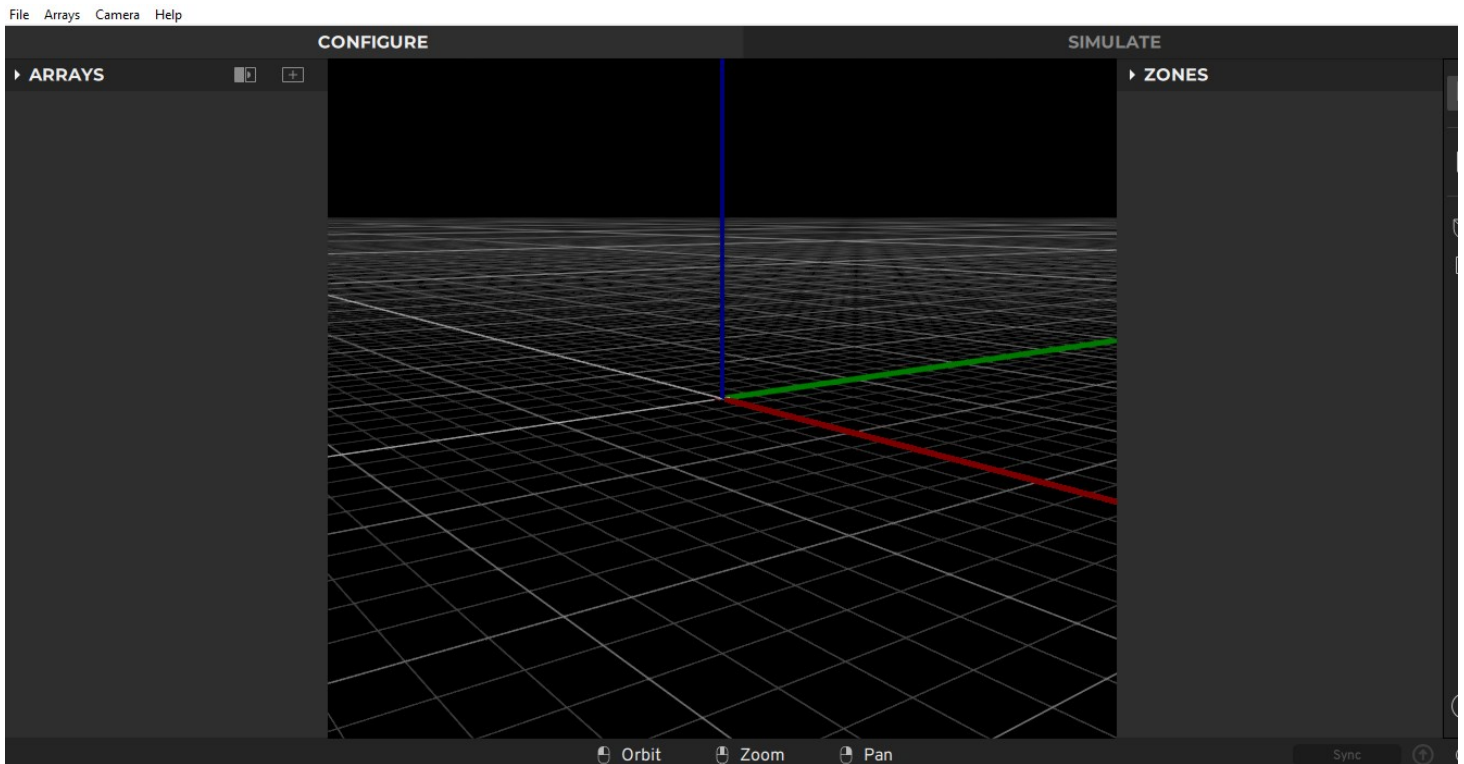
Τέλος μια εικονική πηγή είναι μια μέθοδος για μια διάταξη Matrix, να παράγει ένα κατευθυντικό ακουστικό μέτωπο κύματος, που αντιπροσωπεύει μια πηγή ήχου, που προέρχεται από ένα σημείο στο χώρο, το οποίο βρίσκεται μπροστά ή πίσω από τη συστοιχία και ορίζεται με συντεταγμένες στο σχέδιο.

	Coverage Beams	Parametric Beams	Virtual Sources
Βασική τεχνολογία	3D Audio Beamforming	3D Audio Beamforming	Wave Field Synthesis
Ρυθμιζόμενες ιδιότητες	<ul style="list-style-type: none"> • Επιλεγμένες ζώνες • Επιθυμητό επίπεδο έντασης, απόκρισης, φάσης • Συνθήκες περιβάλλοντος 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοιγόμενες γωνίες (V/H) • Κατευθυνόμενες γωνίες (V/H) • Λειτουργία απόδοσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Συντεταγμένες (X, Y, Z) • Κατευθυνόμενες γωνίες (V/H) • Λειτουργία απόδοσης
Βασικές λειτουργίες	<ul style="list-style-type: none"> • Στοχευμένες ζώνες • Περιοχές ακροατών • Αποφυγή επιφανειών και μικροφώνων 	<ul style="list-style-type: none"> • Βελτιωμένη εικόνα σκηνης • Ενισχυμένα εφέ 	<ul style="list-style-type: none"> • Εντοπισμός στο πεδίο • Ανακλάσεις • Άγκυρες για panning αντικειμένων
Αριθμός διαθέσιμων υποδοχών σε κάθε συστοιχία X1	4	8(μοιράζονται τις ίδιες υποδοχές με τις εικονικές πηγές)	8(μοιράζονται τις ίδιες υποδοχές με τις παραμετρικές δέσμες)

Πίνακας 6.1 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας της Holoplot

6.4 Παραμετροποίηση λογισμικού της Holoplot

Η Holoplot έχει αναπτύξει λογισμικό το οποίο επιτρέπει τη διαχείριση των αντίστοιχων συστημάτων της και ονομάζεται Holoplot plan (Beta v0.12.5), εικόνα 6.3. Η πρόσβαση στο λογισμικό είναι περιορισμένη και παρέχεται κατόπιν επικοινωνίας με το αντίστοιχο τμήμα.



Εικόνα 6.3 Αρχικό μενού λογισμικού Holoplot plan

Το λογισμικό παρέχει κάποια βασικά εργαλεία σχεδίασης, ωστόσο μπορεί να γίνει εισαγωγή έτοιμου σχεδίου, το οποίο έχει σχεδιαστεί στο λογισμικό Sketch up.

Συγκεκριμένα για την υλοποίηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Sketch up pro 2022 στην οποία εγκαταστάθηκε το extension : Kronos glTF Exporter for SketchUp by Centaur το οποίο ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα της Holoplot, (<https://holoplot.com/documentation?doc=/tutorials/installing-khronos-gltf-exporter/>). Στη βιβλιοθήκη υλικών του Sketch up προστέθηκαν τα υλικά AudienceZone και BoundaryZone, τα οποία επίσης ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα της Holoplot, (<https://holoplot.com/documentation?doc=/tutorials/getting-started-in-sketchup/>).

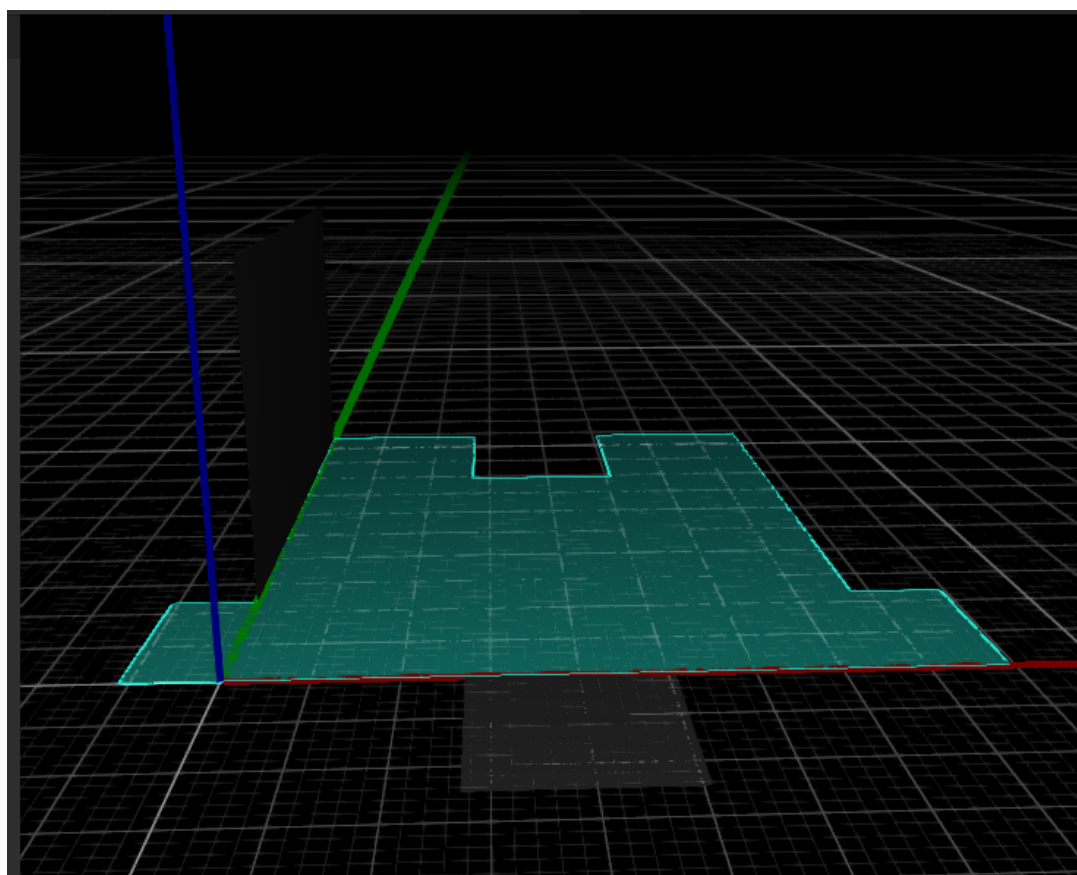
Ο χώρος σχεδιάστηκε (εικόνα 4.2) και έγινε εξαγωγή του αρχείου σε μορφή .glTF την οποία υποστηρίζει το λογισμικό Holoplot plan.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις περιπτώσεις χρήσης που φαίνονται στον πίνακα 6.2, ενώ οι απαιτήσεις και τα αντίστοιχα προβλήματα προς επίλυση, έχουν ήδη περιγραφεί στην εικόνα 4.3.

Περίπτωση I	Περίπτωση II	Περίπτωση III	Περίπτωση IV
Συναυλία	Προβολή ταινίας	Ομιλία	Καλλιτεχνικό δρώμενο

Πίνακας 6.2 Περιπτώσεις διαφορετικής χρήσης του χώρου που θα εξεταστούν

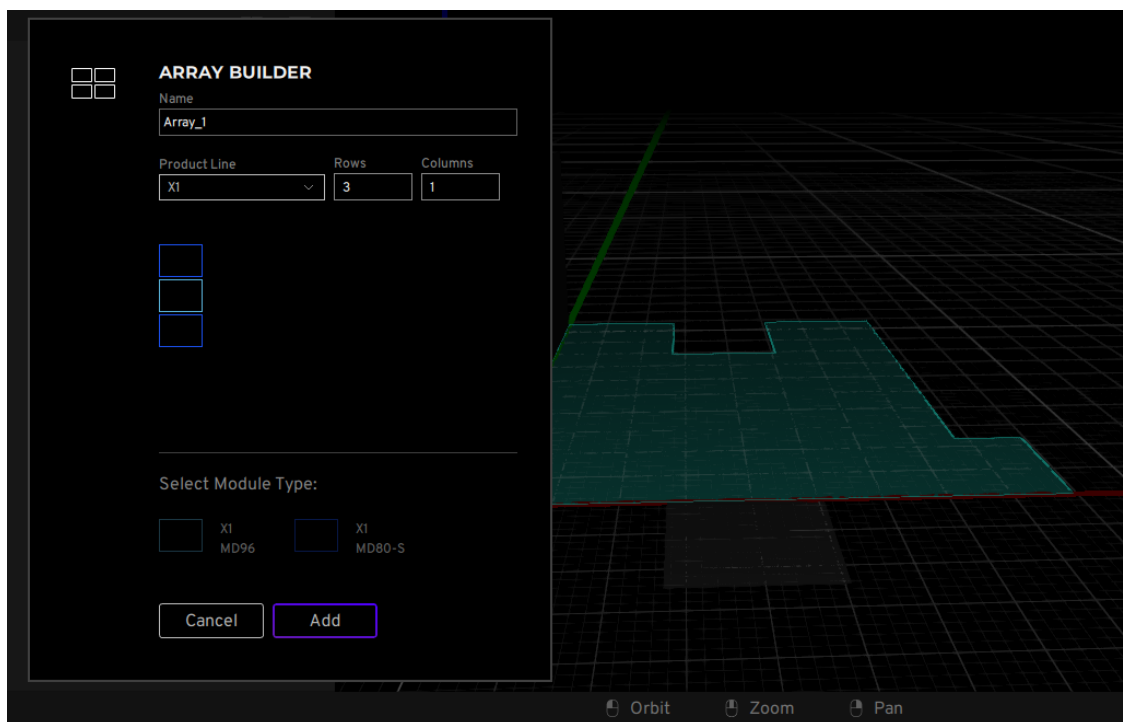
Για την εξέταση των περιπτώσεων του πίνακα 6.2, έγινε εισαγωγή του σχεδίου από το Sketch up στο λογισμικό Holoplot plan προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες εργασίες, εικόνα 6.4.



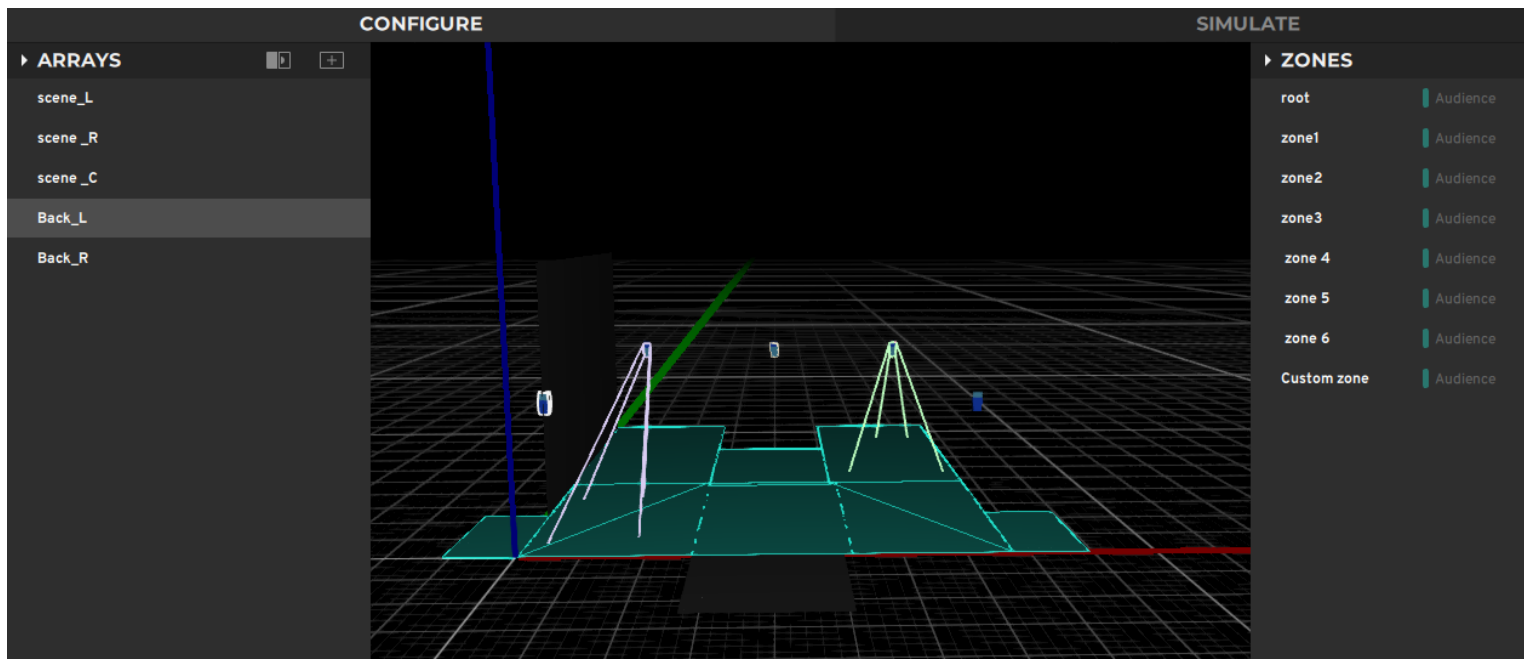
Εικόνα 6.4 Επιφάνεια εργασίας (εξωτερικός χώρος Σ. Νιάρχος) στο λογισμικό Holoplot, πριν την τοποθέτηση μονάδων ηχείων

Επιλέχθηκε η χρήση 5 συστοιχιών ηχείων (τα οποία δημιουργήθηκαν από το μενού αριστερά Arrays, εικόνα 6.5) και τοποθετήθηκαν μπροστά αριστερά, δεξιά, μια συστοιχία πάνω από τη σκηνή και 2 πίσω αριστερά και δεξιά, εικόνα 6.6. Κάθε συστοιχία αποτελείται από μια στήλη και 3 γραμμές και για κάθε μία, έχουν επιλεγεί το μοντέλο X1 MD96(1 μονάδα) και X1 MD80-S (2 μονάδες). Το μοντέλο X1 MD80-S διαθέτει και subwoofer. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων X1 MD96 X1 και MD80-S φαίνονται στο παράρτημα Ι. Στο

χώρο σχεδιάστηκαν ζώνες κάλυψης με τα εργαλεία σχεδίασης που παρέχει το ίδιο το πρόγραμμα (δεξιά εικόνα 6.4).



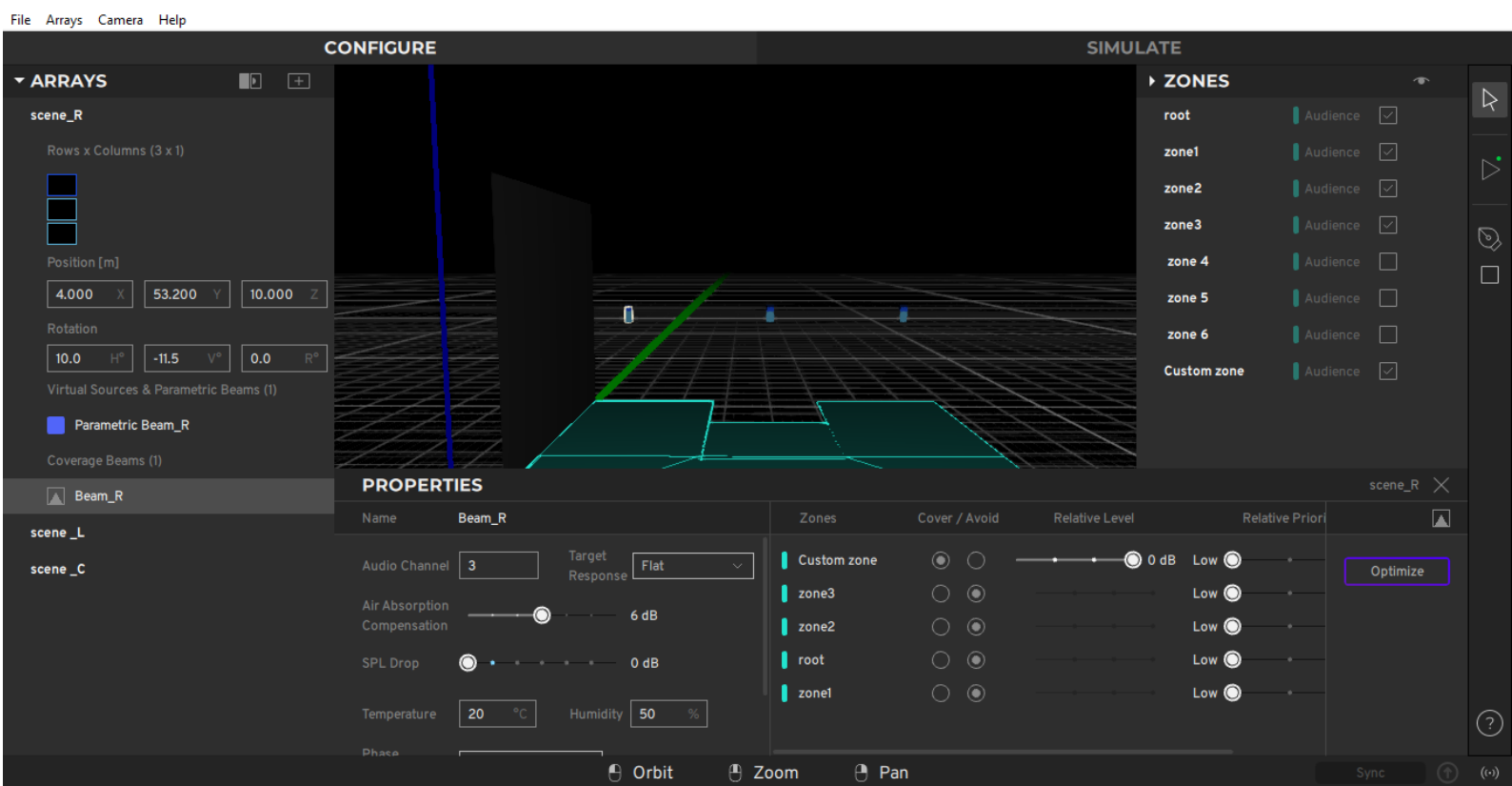
Εικόνα 6.5 Δημιουργία συστοιχιών ηχείων HoloPlot μέσω του HoloPlot plan



Εικόνα 6.6 Θέσεις συστοιχιών και ζώνες κάλυψης στο λογισμικό HoloPlot plan

Τα ηχεία τοποθετήθηκαν πίσω από την σκηνή συμμετρικά σε ύψος 10m ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη κάλυψη χωρίς να εμποδίζεται η δραστηριότητα στη σκηνή.

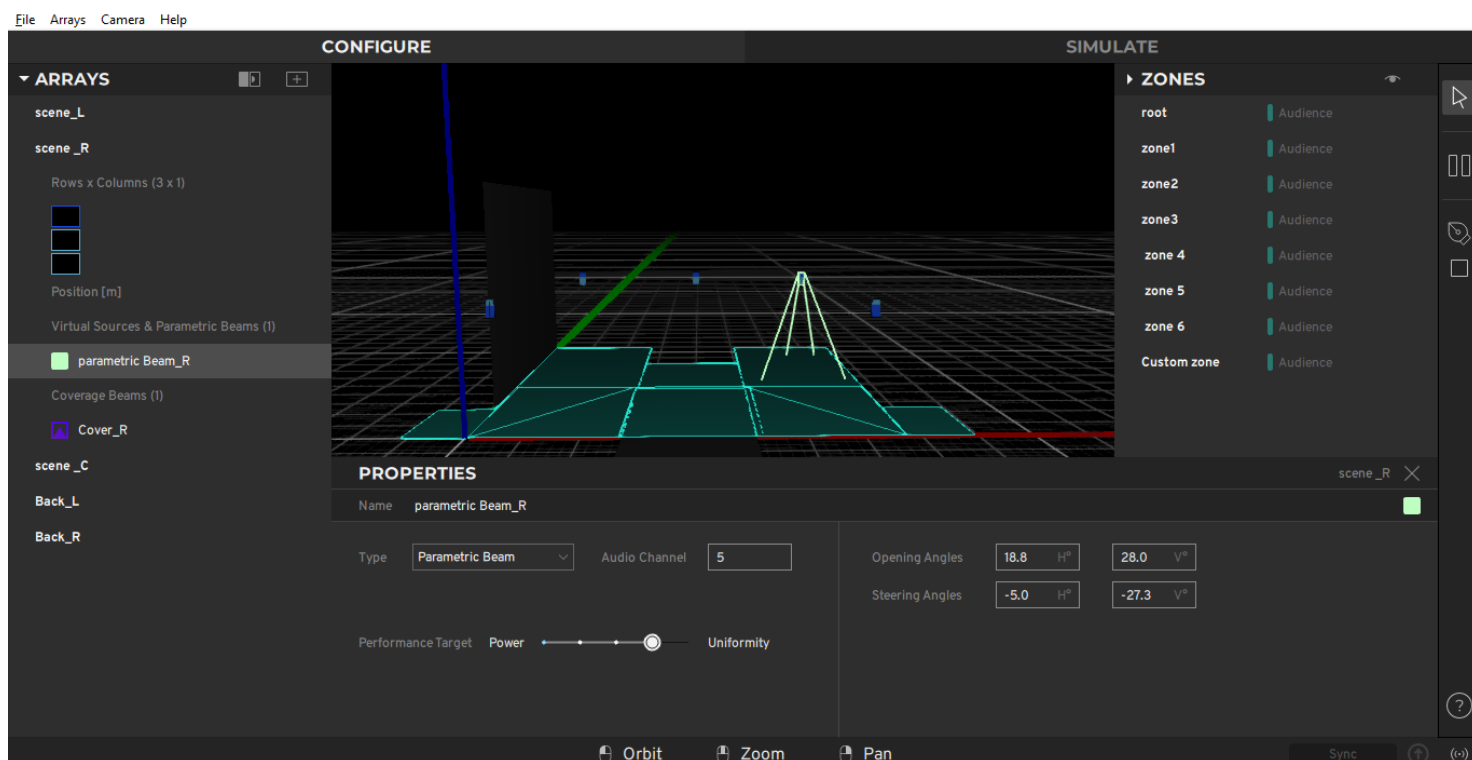
Δημιουργήθηκαν επίσης μια δέσμη κάλυψης (coverage beam) και μια παραμετρική δέσμη (parametric beam), ανά συστοιχία. Στην εικόνα 6.7 φαίνονται οι συστοιχίες που έχουν δημιουργηθεί scene_R, scene_L, scene_C, back_L, back_R, το μενού με τις ρυθμίσεις και ιδιότητες της δέσμης κάλυψης που δημιουργήθηκε. Η δέσμη κάλυψης έχει ρόλο να καλύψει μια επιλεγμένη ζώνη (zones, δεξιά στην εικόνα 6.7) ενώ μπορεί να αποφύγει κάποια άλλη (Cover/Avoid, κάτω στην εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.7 Συστοιχίες και μενού ρυθμίσεων για δέσμη κάλυψης.

Η παραμετρική δέσμη και το αντίστοιχο μενού ρυθμίσεων φαίνονται στην εικόνα 6.8.

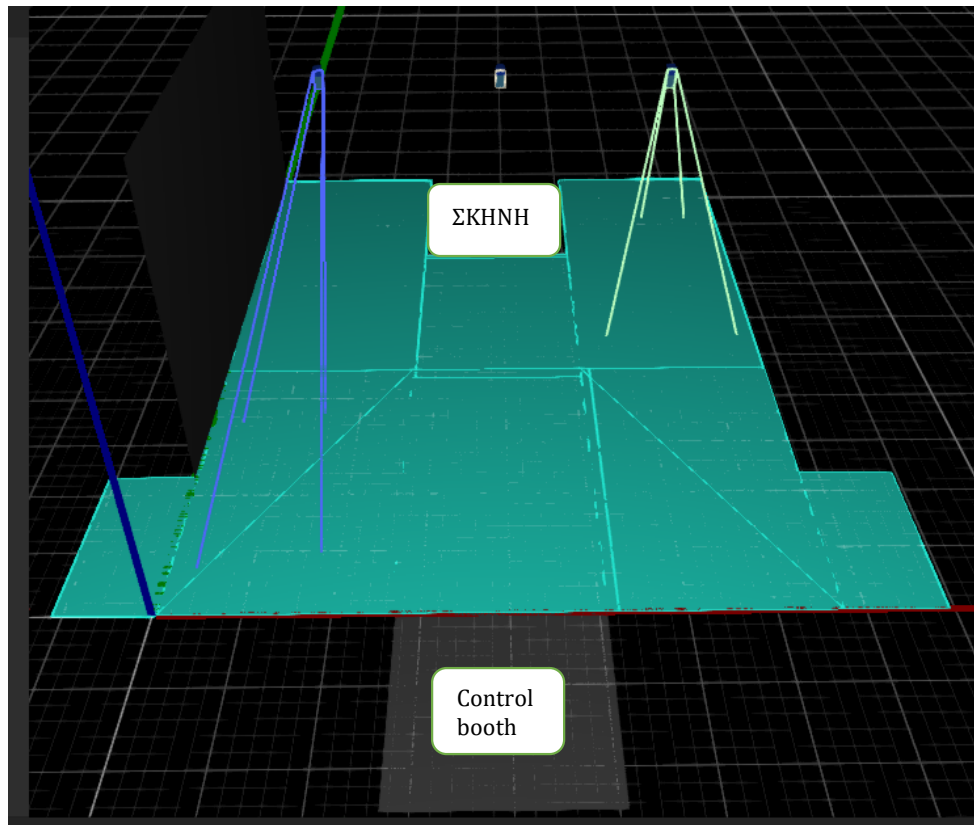
Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν δέσμες και για τις 5 συστοιχίες (arrays) και ανάλογα με την χρήση θα γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις, ανά εξεταζόμενη περίπτωση.



Εικόνα 6.8 Συστοιχίες και μενού ρυθμίσεων για την παραμετρική δέσμη.

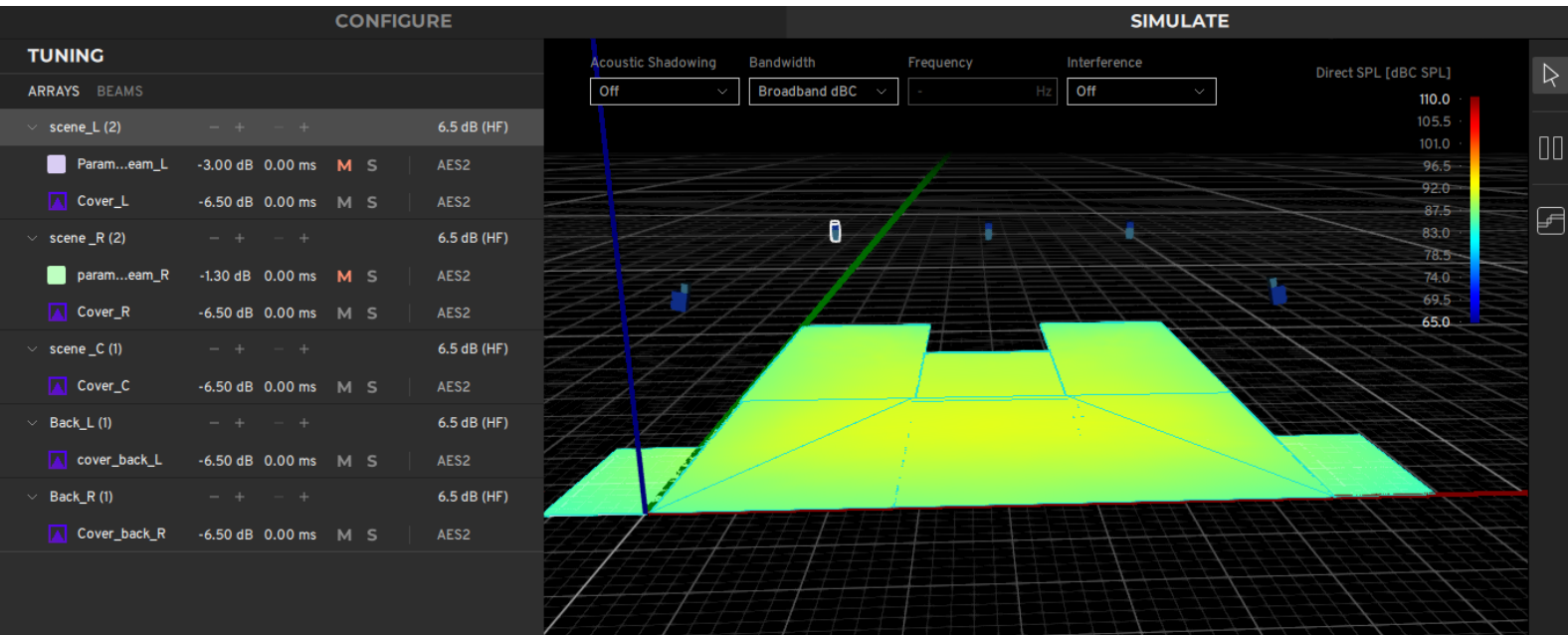
6.4.1 Χρήση του συστήματος για συναυλία

Ο συγκεκριμένος χώρος ενδείκνυται για υλοποίηση συναυλιών καθώς έχει πολύ μεγάλη έκταση και η περιοχή κάλυψης φαίνεται στην εικόνα 6.9, όλη η πράσινη περιοχή. Στην ίδια εικόνα φαίνεται και η θέση της σκηνής και του χώρου ελέγχου των συσκευών (control booth). Το επιθυμητό επίπεδο ακρόασης, για συναυλία είναι τα 85dB. Στις ρυθμίσεις των δεσμών κάλυψης έγινε επιλογή όλης της περιοχής, ρυθμίστηκε ο δείκτης SPL drop στο 0, ώστε ο ήχος να σβήνει πολύ ομαλά και όχι 6dB, με κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Στο ίδιο μενού η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 20°C, η υγρασία 50% και η απορρόφηση του αέρα στα 2dB. Το εισερχόμενο σήμα για την μέτρηση είναι ροζ θόρυβος (pink noise) και M-noise (music). Στη συνέχεια επιλέχθηκε Optimize για κάθε δέσμη κάλυψης ξεχωριστά και από το κεντρικό μενού έγινε μετάβαση στο Simulate.



Εικόνα 6.9 Περιοχή κάλυψης για χρήση συναυλίας

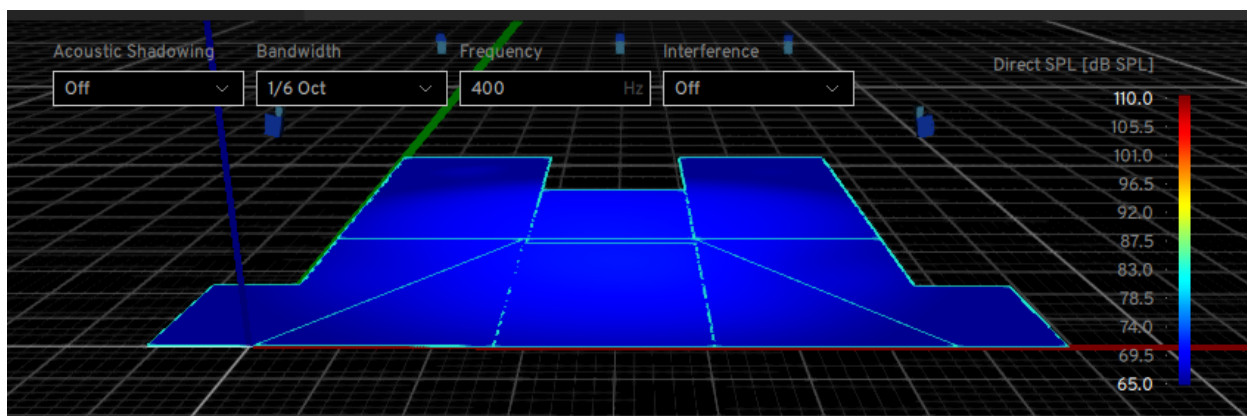
Προκειμένου η μετρούμενη στάθμη να αντικατοπτρίζει και την ακουστότητα του ήχου χρησιμοποιείται είτε η συνάρτηση βάρους A (μέτρηση σε dBA) είτε η συνάρτηση βάρους C (μέτρηση σε dBC) (Σκαρλάτος, 2013). Σε μια συναυλία οι στάθμες έντασης φτάνουν σε κάποιες στιγμές σε υψηλά επίπεδα, για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε να ελεγχθεί η στάθμη και να μετρηθεί σε dBC (broadband dBC). Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.10. Σε κάθε συστοιχία εφαρμόστηκε κατάλληλη μείωση ώστε η ένταση να είναι στα επιθυμητά επίπεδα και να μην δημιουργείται όχληση στο ακροατήριο.

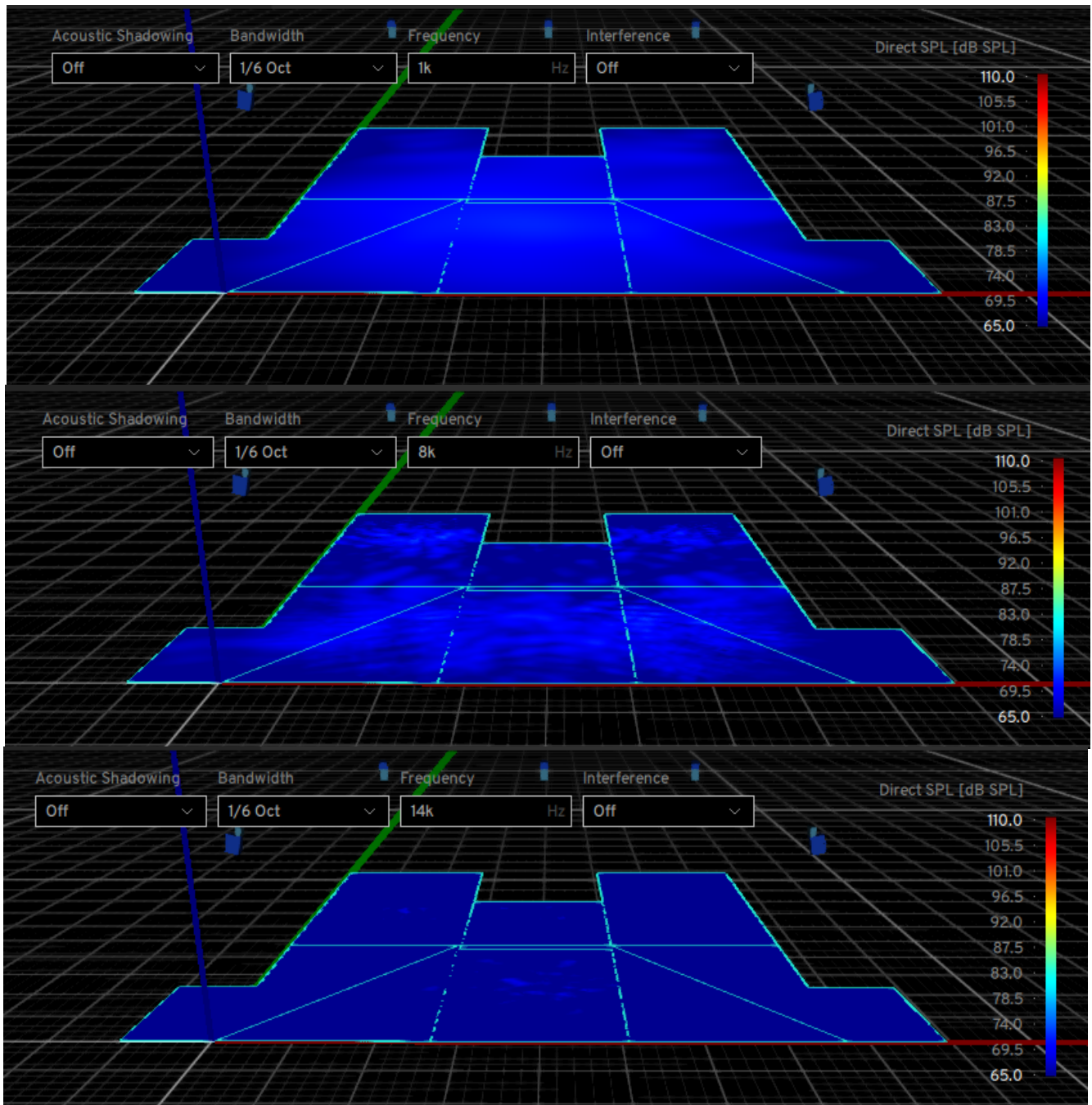


Εικόνα 6.10 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.10 η κάλυψη υλοποιείται στα επιθυμητά επίπεδα σε όλη την έκταση του χώρου.

Ο υπολογισμός της στάθμης έντασης σε 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, φαίνεται στην εικόνα 6.11.

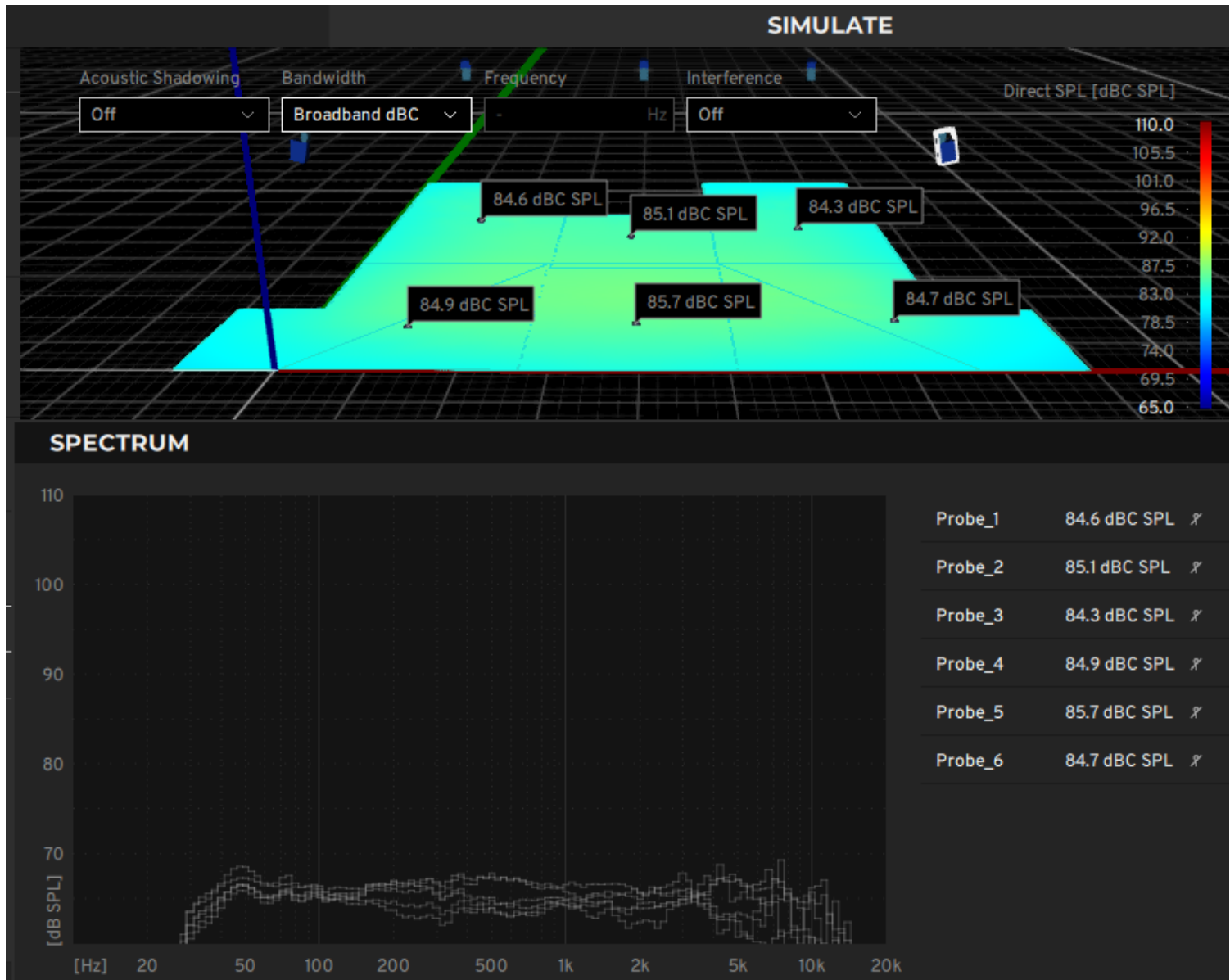




Εικόνα 6.11 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης στο 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, στην περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise.

Κατά τον υπολογισμό της στάθμης για τις παραπάνω κεντρικές συχνότητες στο 1/6 της οκτάβας φαίνεται επίσης η ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου.

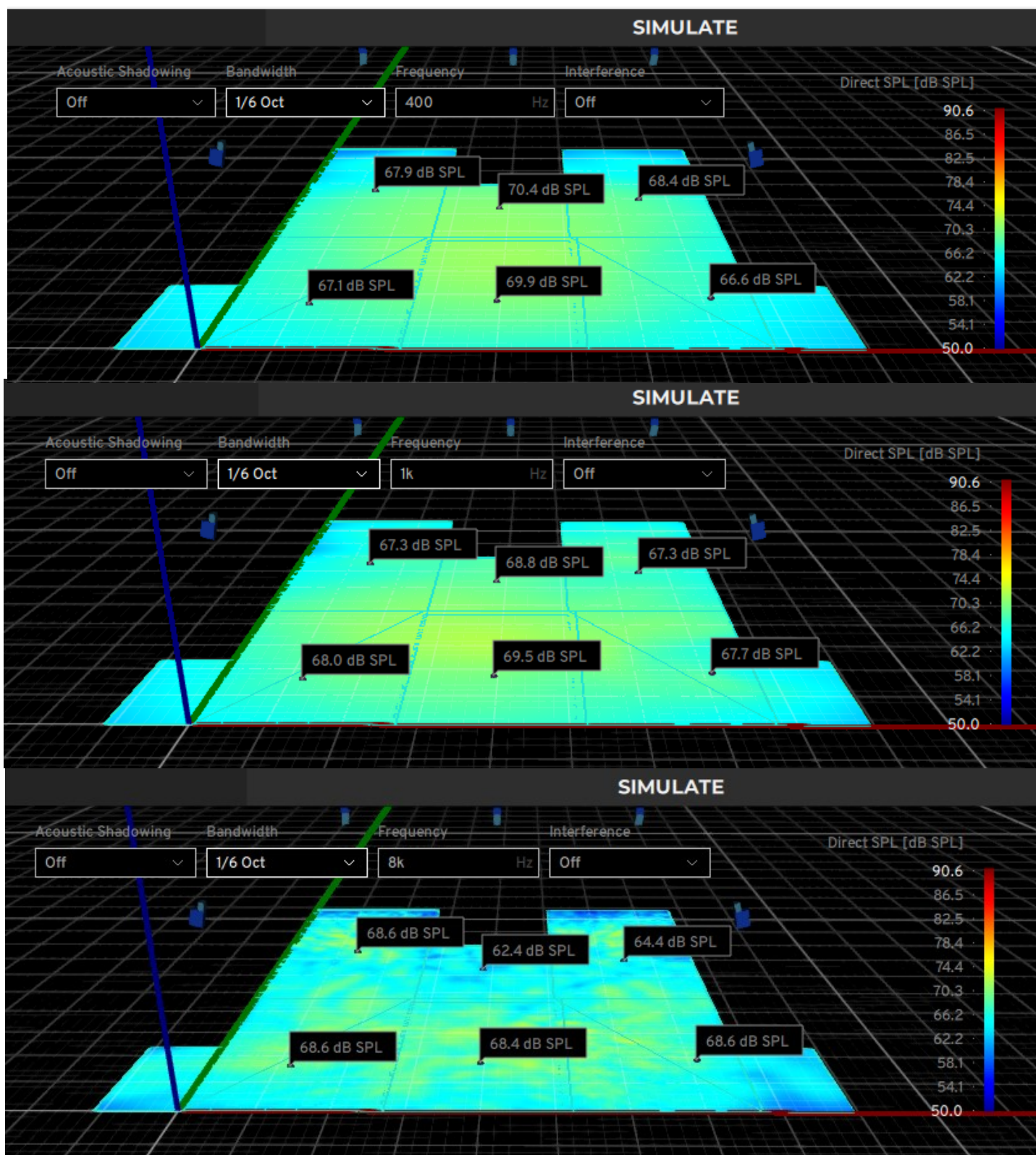
Από το πλαινό μενού του προγράμματος μπορεί να εξαχθεί η κρουστική απόκριση σε επιλεγμένα σημεία, όπου φαίνεται η ένταση σε dB-SPL. Τα αποτελέσματα σε 6 σημεία στο ακροατήριο φαίνονται στην εικόνα 6.12.

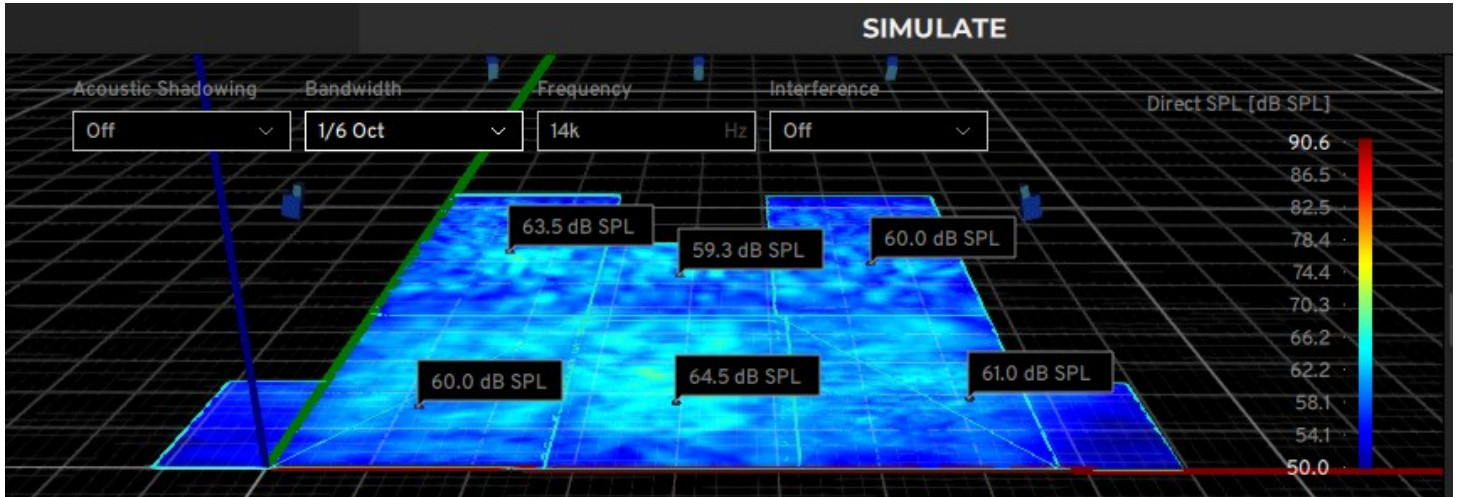


Εικόνα 6.12 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής pink noise και κρουστική απόκριση σε διάφορα σημεία για έλεγχο στις στάθμης dB-SPL ανά συχνότητα.

Από την εικόνα 6.12 φαίνεται ότι η επιθυμητή στάθμη των 85dB έχει επιτευχθεί μετά από κατάλληλες ρυθμίσεις ανα συστοιχία.

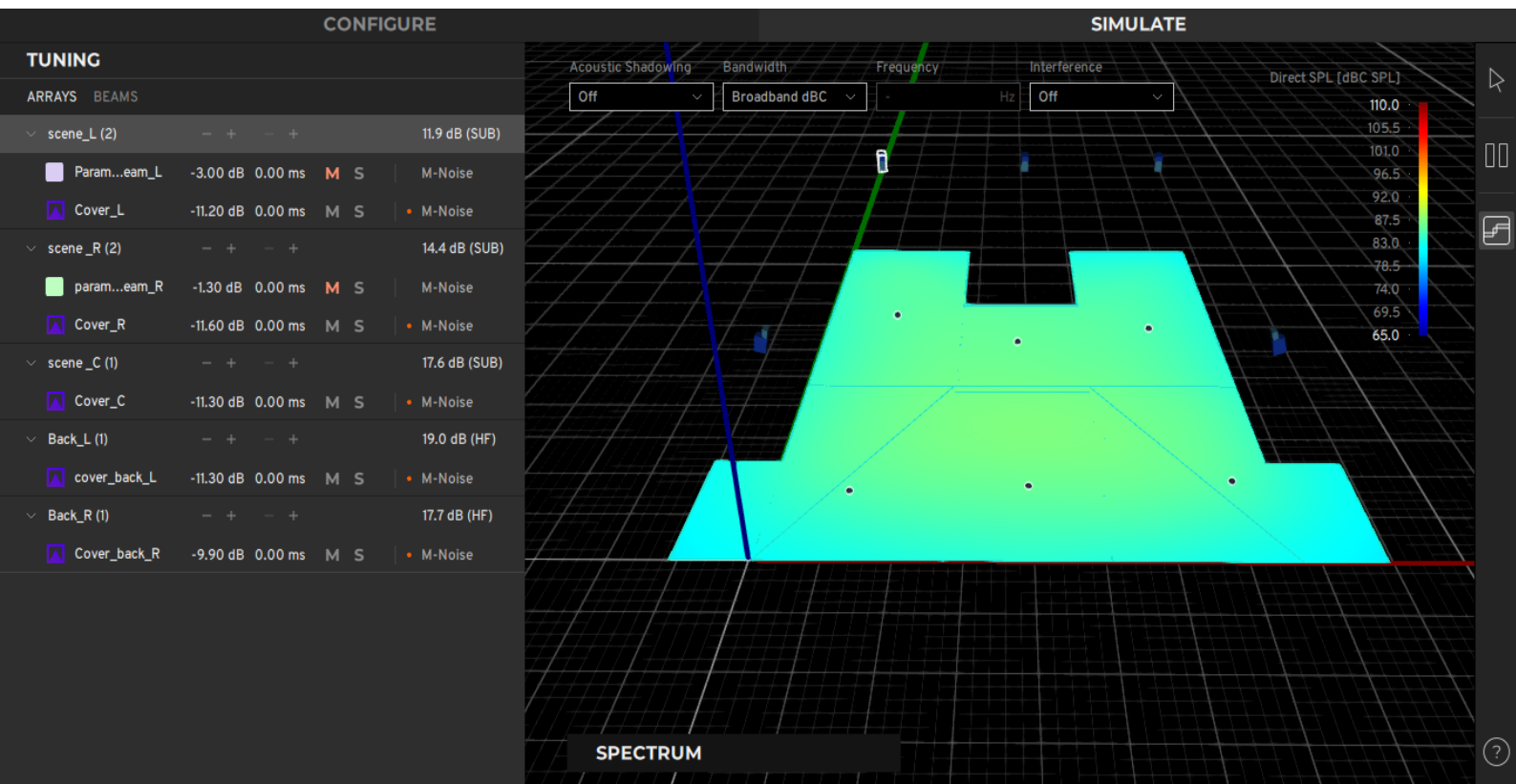
Η απεικόνιση dB-SPL με εύρος μπάνας bandwidth 1/6 της οκτάβας και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, με pink-noise και σε συγκεκριμένα σημεία, φαίνεται στην εικόνα 6.13.





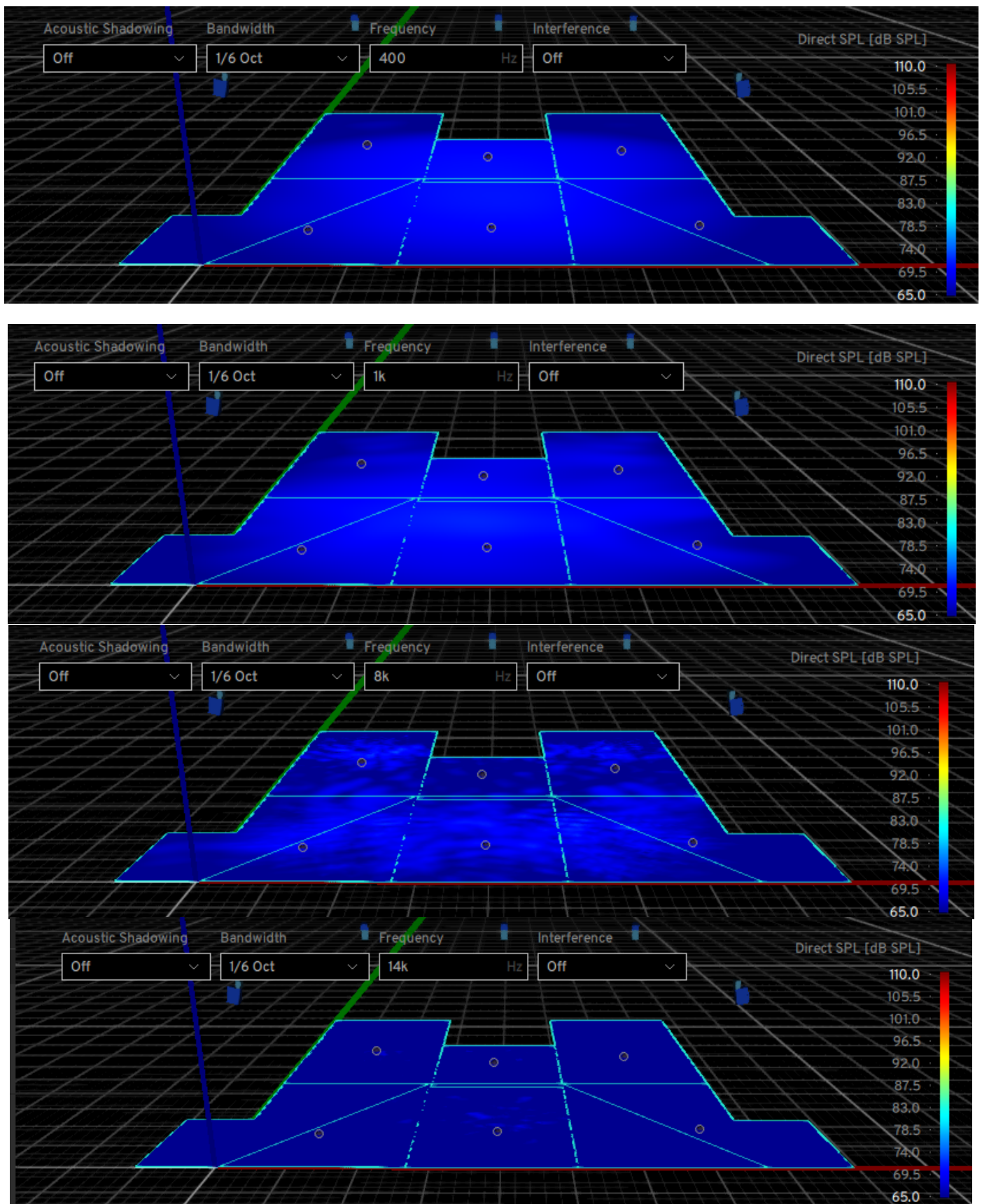
Εικόνα 6.13 Απεικόνιση dB-SPL με εύρος μπάντας bandwidth 1/6 της οκτάβας, με σήμα pink-noise και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε η δοκιμή χρησιμοποιώντας σαν σήμα M-noise (music noise). Το Music-Noise είναι ένα νέο, μαθηματικά προερχόμενο δοκιμαστικό σήμα, που μιμείται αποτελεσματικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της μουσικής και επιτρέπει μια πολύ πιο ακριβή μέτρηση της γραμμικής κορυφής SPL ενός συστήματος μεγαφώνων, σε οποιαδήποτε εφαρμογή, που απαιτεί αναπαραγωγή μουσικού περιεχομένου. Αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια Meyer Sound. Κατά την εφαρμογή εφαρμόστηκε κατάλληλη μείωση σε κάθε συστοιχία και σε dBC μέτρηση τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.14. Στην ίδια εικόνα φαίνονται και οι ρυθμίσεις ανα συστοιχία που έφεραν το επιθυμητό αποτέλεσμα.



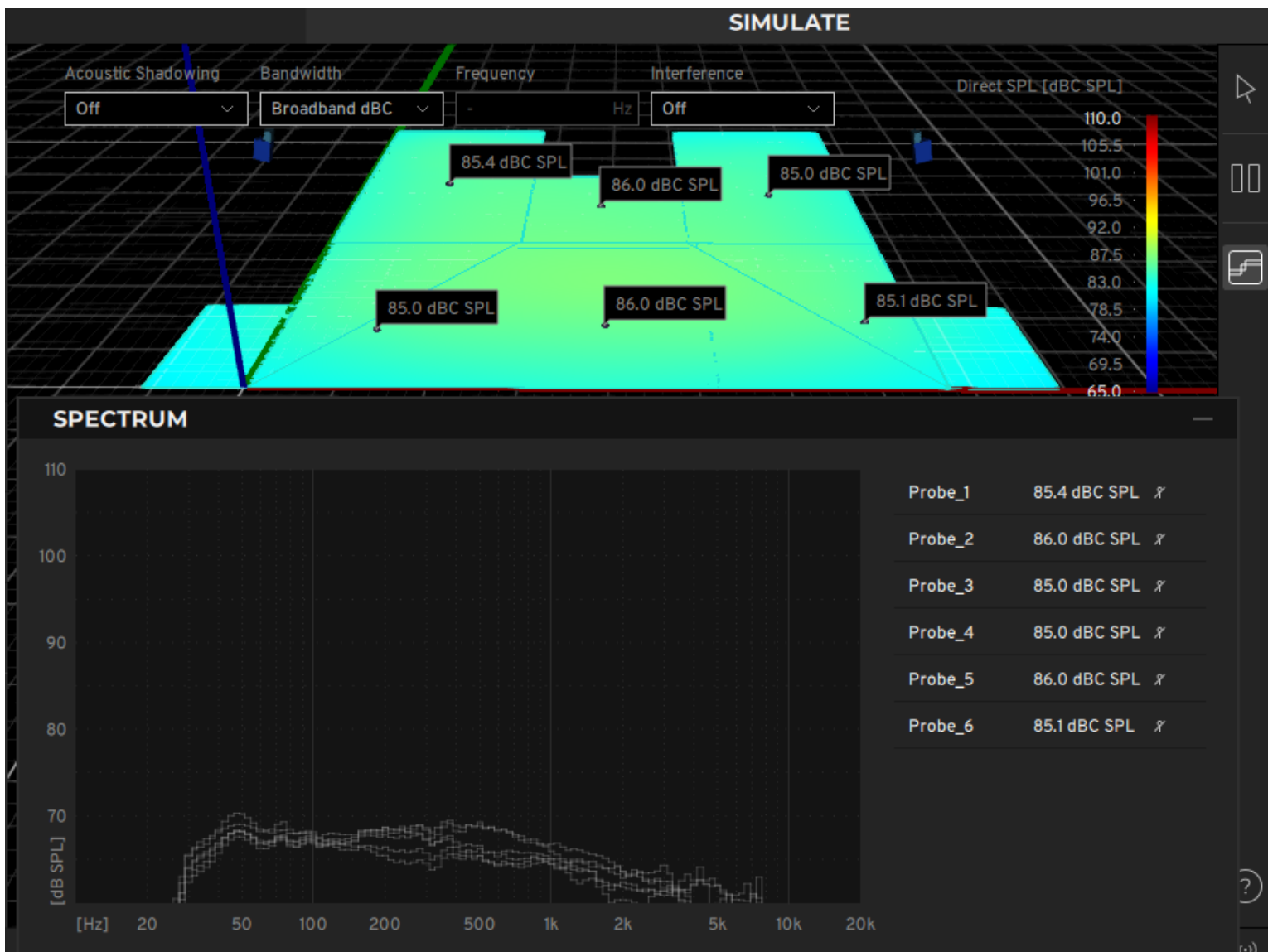
Εικόνα 6.14 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής M-noise.

Ο υπολογισμός της στάθμης έντασης σε 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz και με σήμα M-noise, φαίνεται στην εικόνα 6.15.



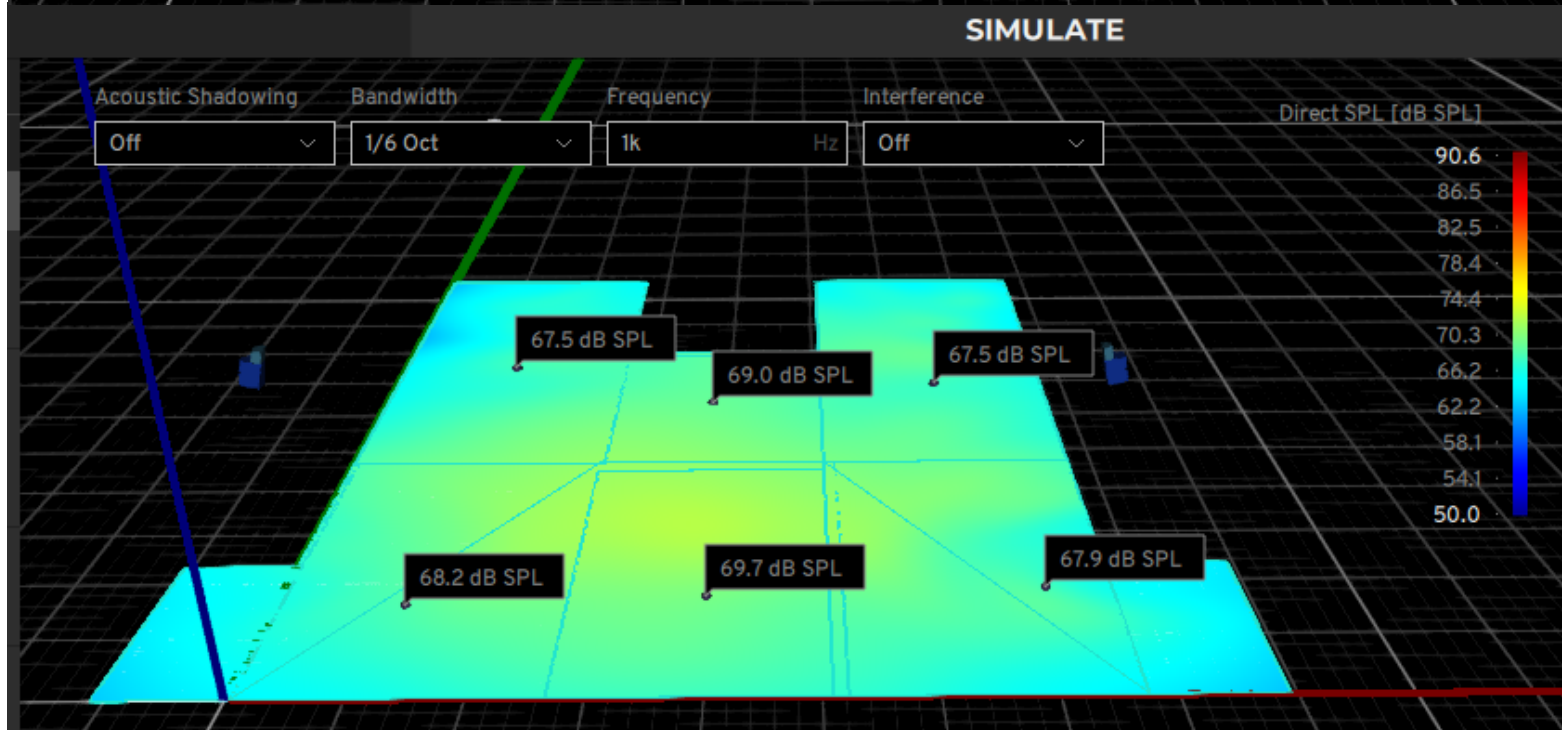
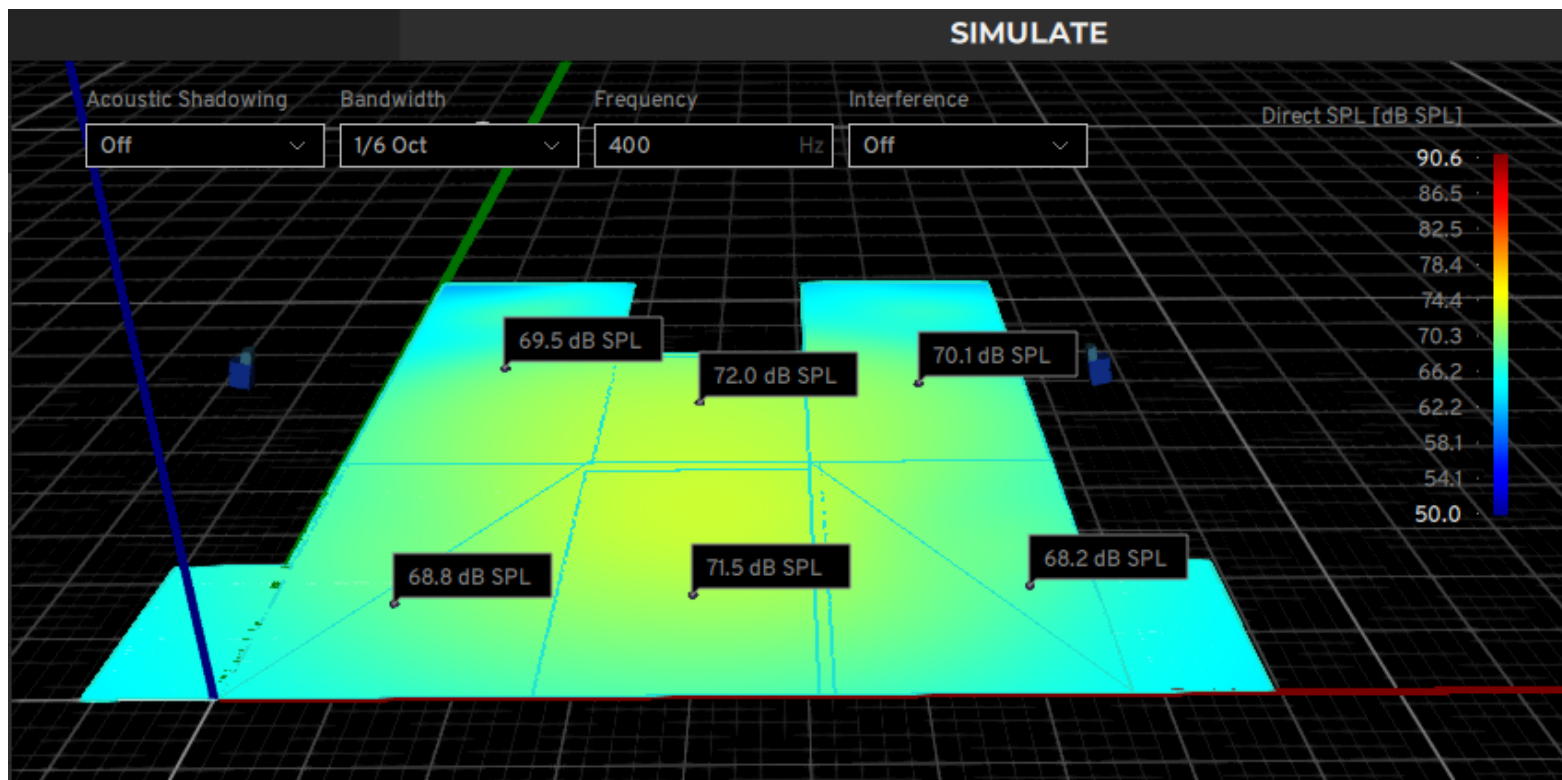
Εικόνα 6.15 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης στο 1/6 της οκτάβας, για τα 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, στην περίπτωση συναλίας, με σήμα δοκιμής M-noise.

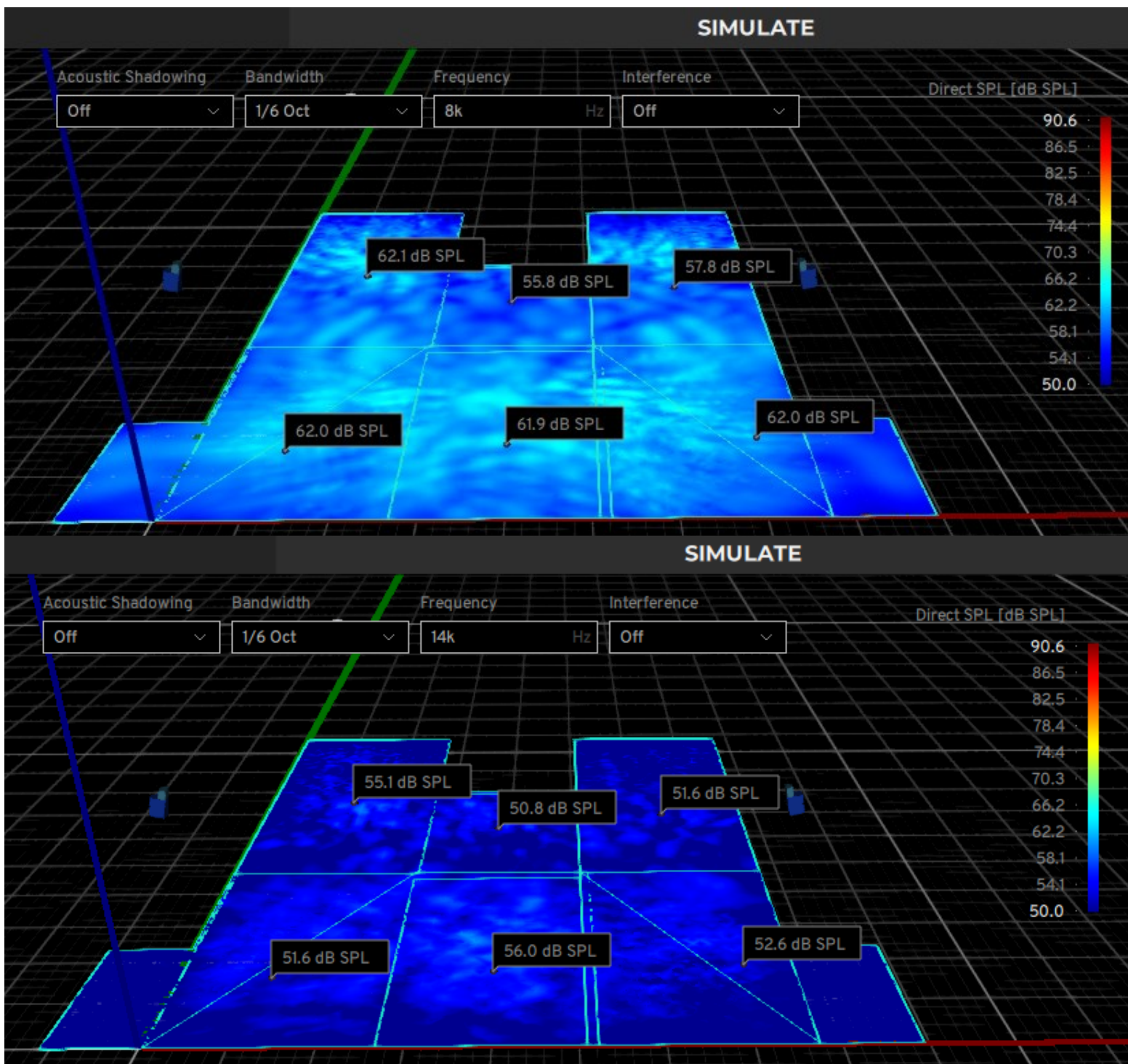
Από το πλαινό μενού του προγράμματος έγινε εξαγωγή των κρουστικών αποκρίσεων σε επιλεγμένα σημεία, όπου φαίνεται η ένταση σε dB-SPL. Τα αποτελέσματα σε 6 σημεία στο ακροατήριο φαίνονται στην εικόνα 6.16.



Εικόνα 6.16 Χρωματική απεικόνιση στάθμης έντασης σε dBC για την περίπτωση συναυλίας, με σήμα δοκιμής M-noise και κρουστική απόκριση σε διάφορα σημεία για έλεγχο της στάθμης dB-SPL ανά συχνότητα.

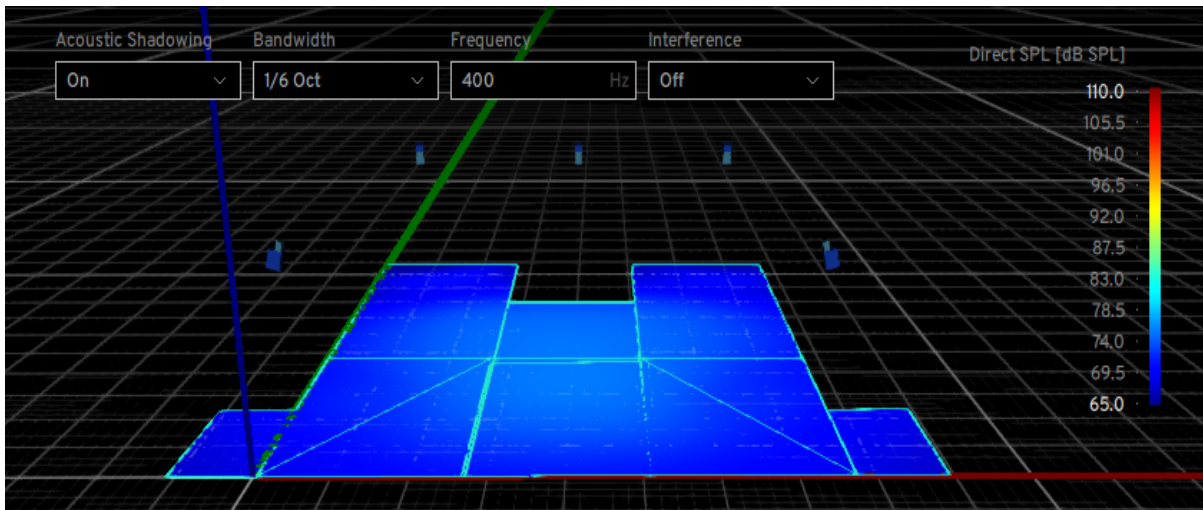
Η απεικόνιση dB-SPL με εύρος μπάντας bandwidth 1/6 της οκτάβας και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, με m-noise και σε συγκεκριμένα σημεία, φαίνεται στην εικόνα 6.17.

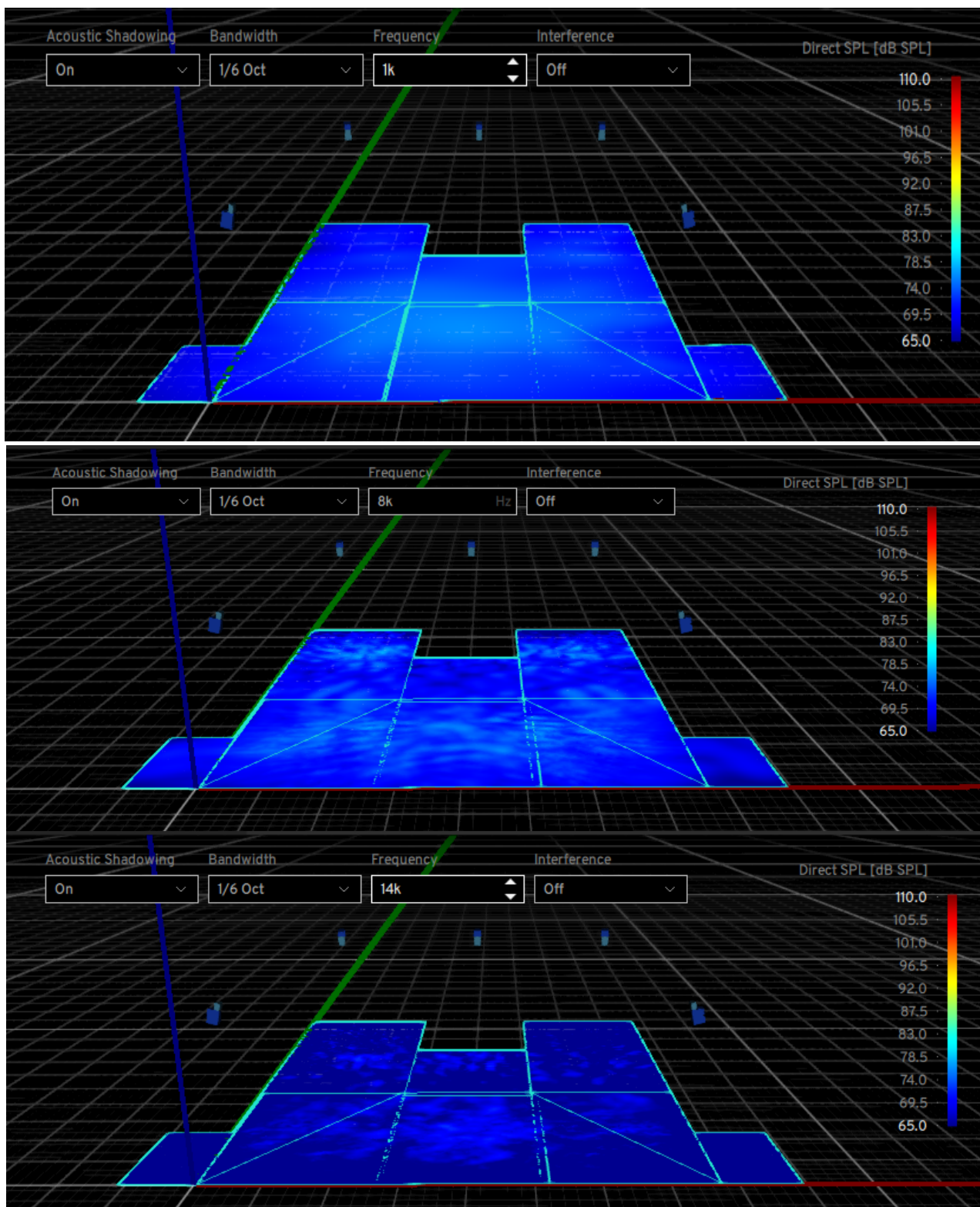




Εικόνα 6.17 Απεικόνιση dB-SPL με εύρος μάντας bandwidth 1/6 της οκτάβας, με σήμα m-noise και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz

Στη συνέχεια ακολούθησε έλεγχος ύπαρξης ακουστικής σκίασης (Acoustic shadow), αν και ο χώρος είναι ανοικτός και δεν υπάρχει ενδιάμεση παρεμβολή αντικειμένων ή επιφανειών. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε επιλέγοντας Acoustic shadowing ON, στο εύρος μπάντας bandwidth 1/6 της οκτάβας και για συχνότητες 400Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz, τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.18.

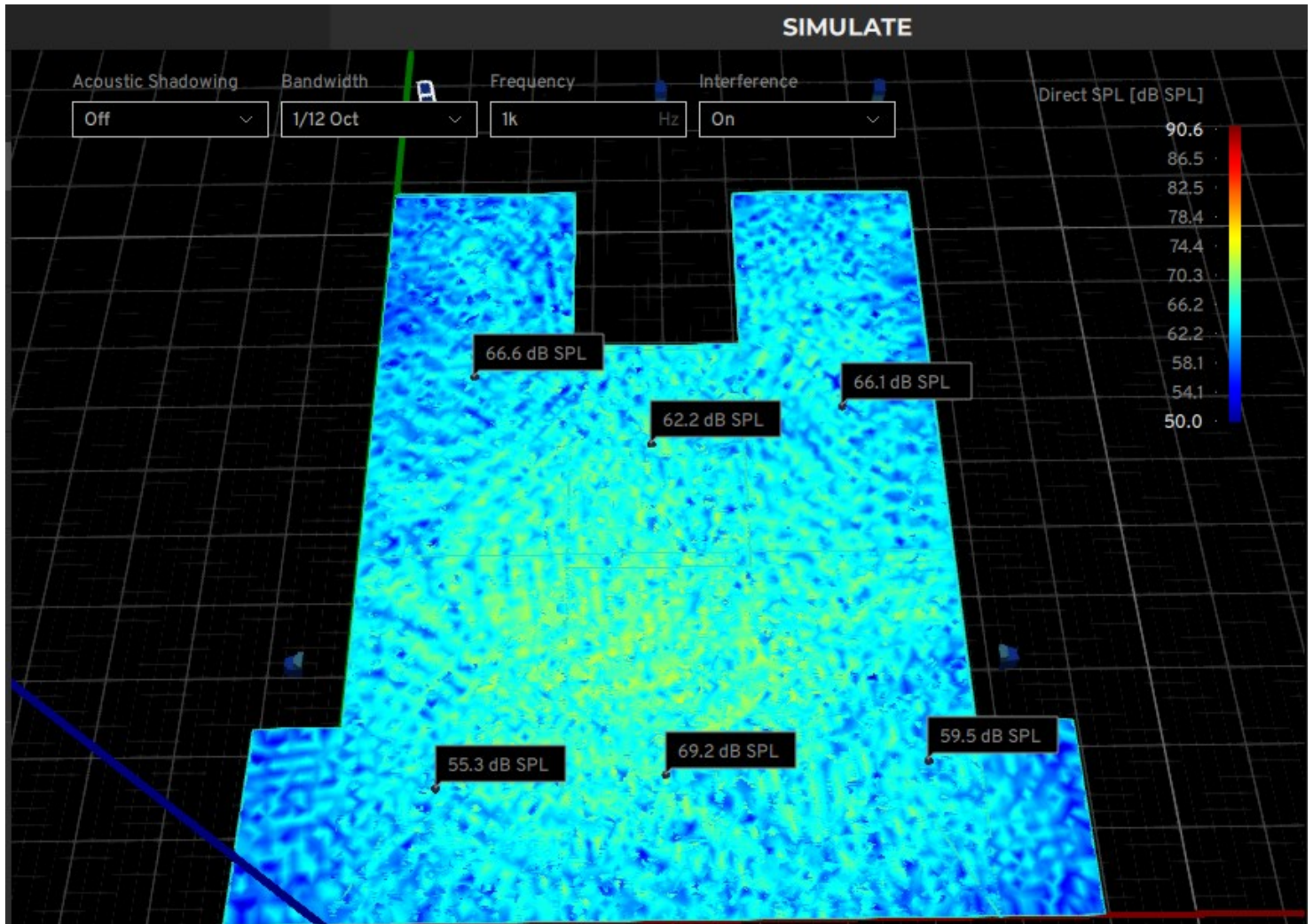




Εικόνα 6.18 Έλεγχος ακουστικής σκίασης στα 400 Hz, 1kHz, 8kHz και 14kHz

Από τις απεικονήσεις της εικόνας 6.18 φαίνεται ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη σκίαση μέχρι τα 8kHz και η περιοχή καλύπτεται επαρκώς.

Τέλος από το μενού του προγράμματος επιλέχθηκε Interference ON όπου φαίνεται η συμβολή των κυμάτων στο χώρο, τα σημεία ενίσχυσης του ήχου καθώς και μειωμένου πλάτους και για ανάλυση στο 1/12 της οκτάβας στα 1000Hz προέκυψε η απεικόνιση της εικόνας 6.19.

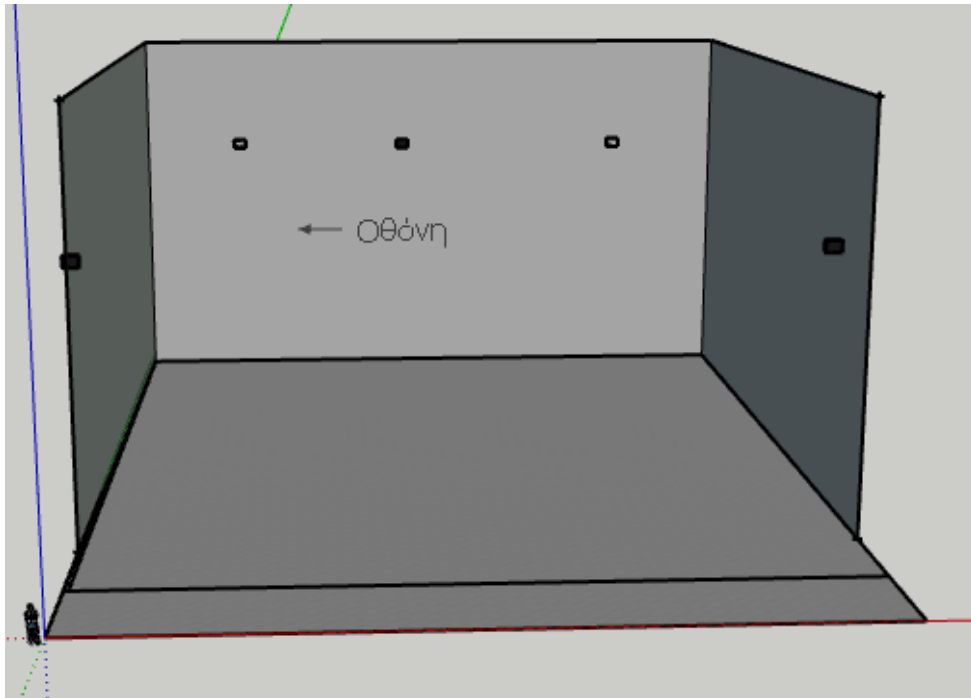


Εικόνα 6.19 Απεικόνιση συμβολής κυμάτων στο χώρο με ανάλυση 1/12 της οκτάβας, στα 1000Hz.

6.4.2 Χρήση του συστήματος για προβολή ταινίας

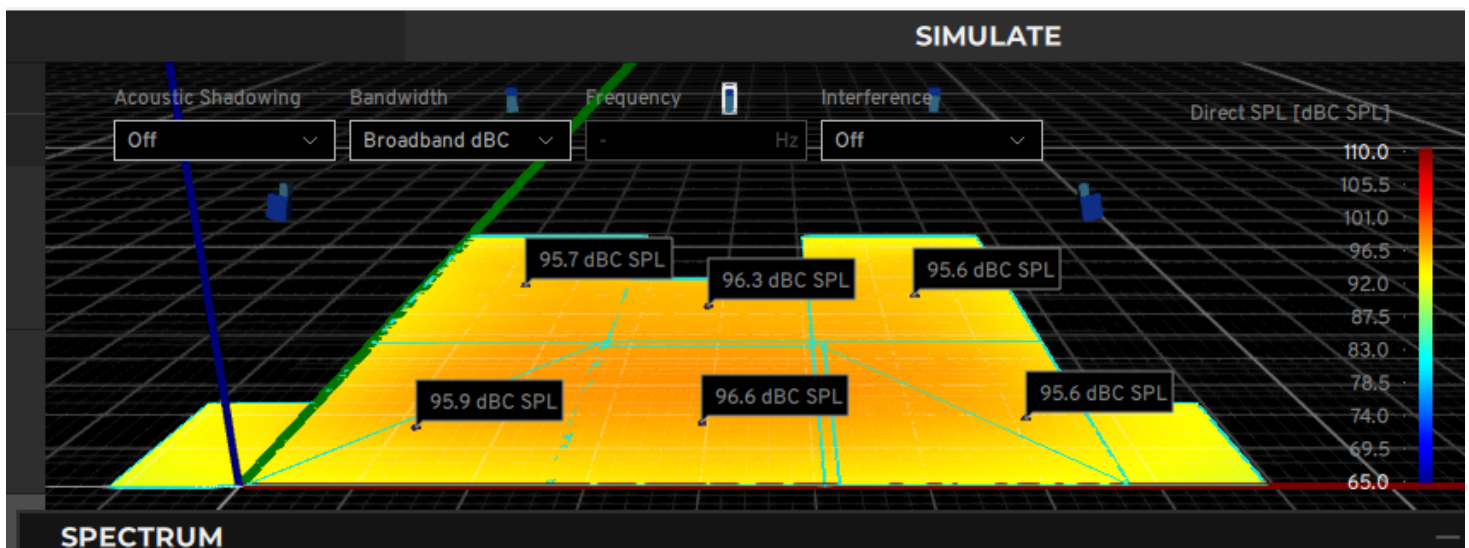
Ο χώρος ενδείκνυται για προβολή ταινιών είτε μεμονωμένα είτε ως τμήμα κάποιου καλλιτεχνικού δρώμενου. Η γεωμετρία του και η μεγάλη του έκταση, επιτρέπει την προβολή σε μεγάλο πλήθος θεατών με τοποθέτηση ειδικής οθόνης στην πλευρά, πίσω από την σκηνή ή ακόμα και σε συνδυασμό με τις πλαϊνές επιφάνειες. Στην εικόνα 6.20 φαίνεται και η θέση της οθόνης. Το επιθυμητό επίπεδο ακρόασης για προβολή ταινίας είναι επίσης τα 85dB. Καθώς έχουν τοποθετηθεί 5 συστοιχίες ηχείων το σύστημα υποστηρίζει προβολές ταινιών σε 5.1 ή και περισσότερο. Το κινηματογραφικό soundtrack εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις, έχει δηλαδή μεγάλο dynamic range κάτι που δεν ισχύει τόσο στις συναυλίες, ανάλογα βέβαια και με το είδος της μουσικής. Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση της συναυλίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση της προβολής ταινίας, ωστόσο για λόγους σύγκρισης αυξήθηκαν οι μονάδες ανά συστοιχία για πιο ενισχυμένη απόδοση. Σε κάθε συστοιχία προστέθηκαν άλλες 2 στήλες με τα μοντέλα, X1 MD96 (1 μονάδα) και X1 MD80-S (2 μονάδες) (συνολικά 3 στήλες και 3 γραμμές, 3X3). Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου φαίνεται ότι στις χαμηλές συχνότητες έχει μέγιστο έντασης 142 dB και στις υψηλές συχνότητες 152 dB.

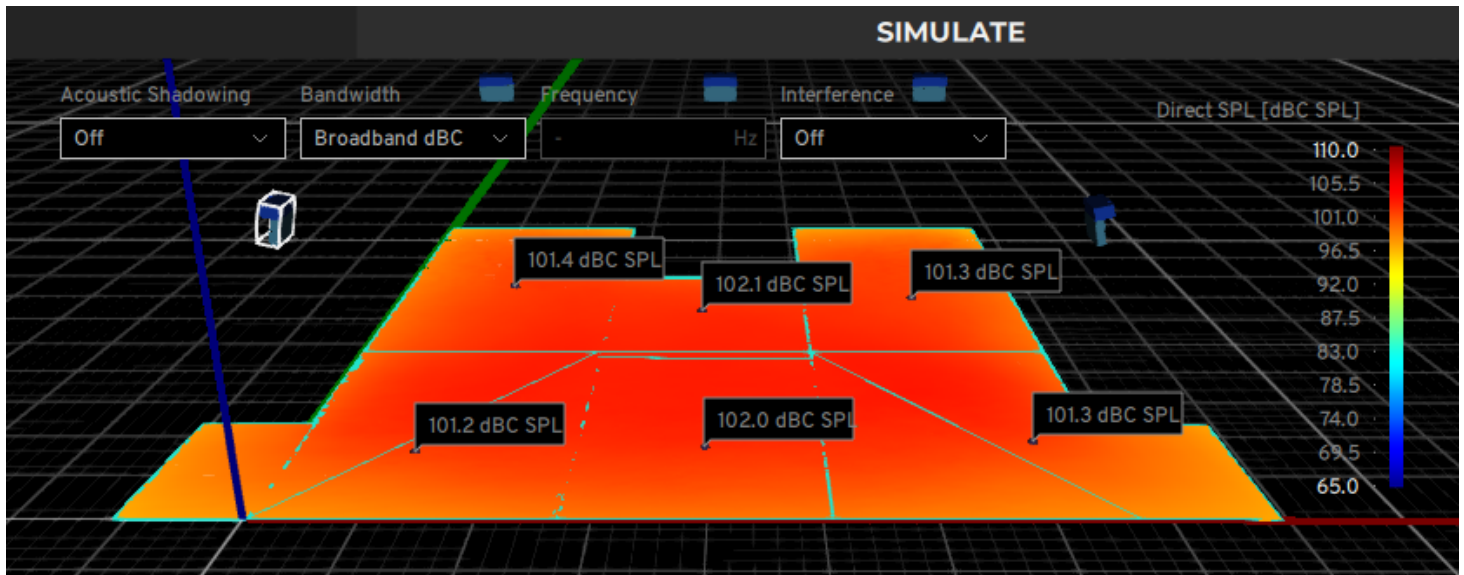
Στις ρυθμίσεις των δεσμών κάλυψης έγινε, όπως και στην περίπτωση της συναυλίας, επιλογή όλης της περιοχής, ρυθμίστηκε ο δείκτης SPL drop στο 0, ώστε ο ήχος να σβήνει πολύ ομαλά και όχι 6dB, με κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Στο ίδιο μενού η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 20oC , η υγρασία 50% και η απορρόφηση του αέρα στα 2dB. Το εισερχόμενο σήμα για την μέτρηση είναι ροζ θόρυβος (pink noise). Στη συνέχεια επιλέχθηκε Optimize για κάθε δέσμη κάλυψης ξεχωριστά και από το κεντρικό μενού έγινε μετάβαση στο Simulate.



Εικόνα 6.20 Θέση οθόνης για χρήση του χώρου για προβολή ταινίας

Για την μέτρηση, επιλέχθηκε να ελεγχθεί η στάθμη και να μετρηθεί σε dBC (broadband dBC). Στην εικόνα 6.21α φαίνεται η απόδοση του συστήματος σε συνεχή λειτουργία, με ρόζ θόρυβο χωρίς να έχει εφαρμοστεί μείωση κέρδους, όπως στην περίπτωση της συναυλίας. Στην εικόνα 6.21β φαίνεται η απόδοση του συστήματος μετά την προσθήκη των επιπλέον μονάδων σε κάθε συστοιχία.

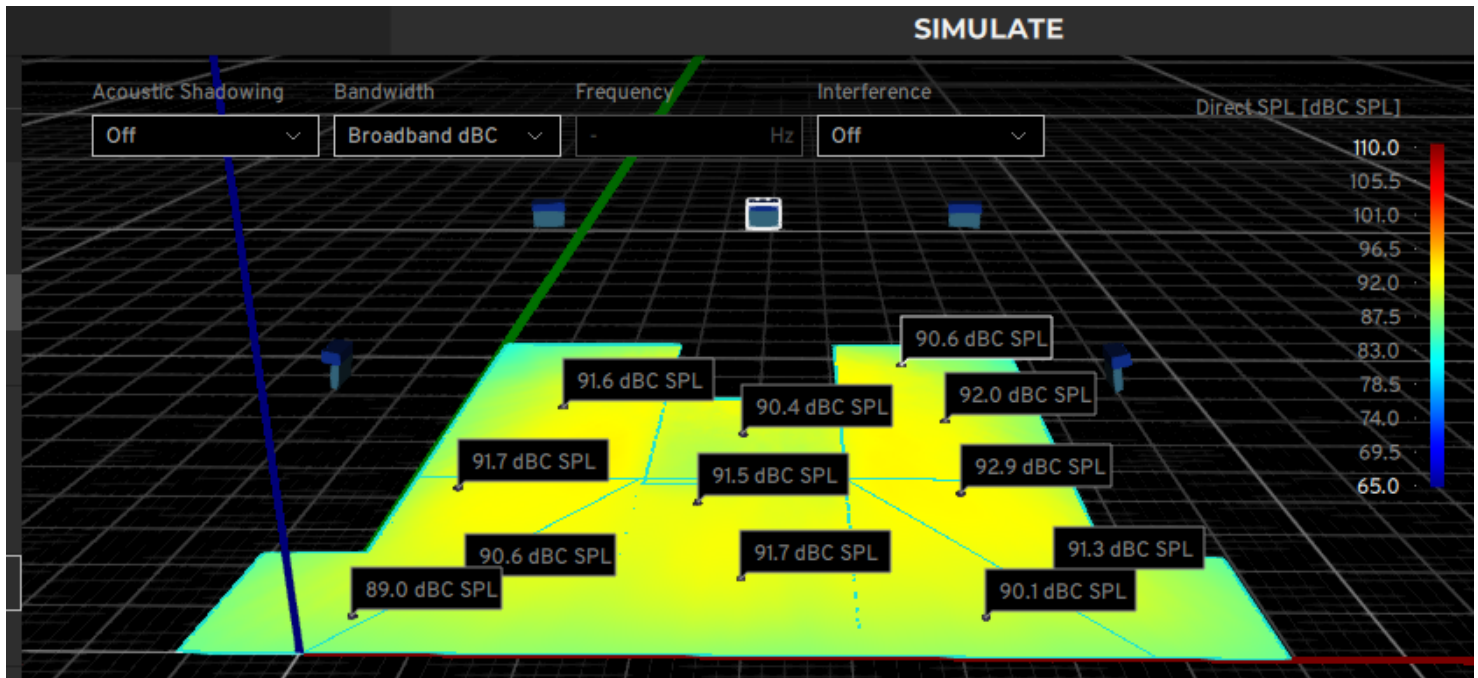




Εικόνα 6.21 Στάθμη συστήματος σε συνεχή λειτουργία, με ρόζ θόρυβο, σε dBC SPL, με μία στήλη ανά συστοιχία εικόνα α (πάνω) και με 3 στήλες ανά συστοιχία εικόνα β (κάτω), χωρίς μείωση κέρδους αναπαραγωγής.

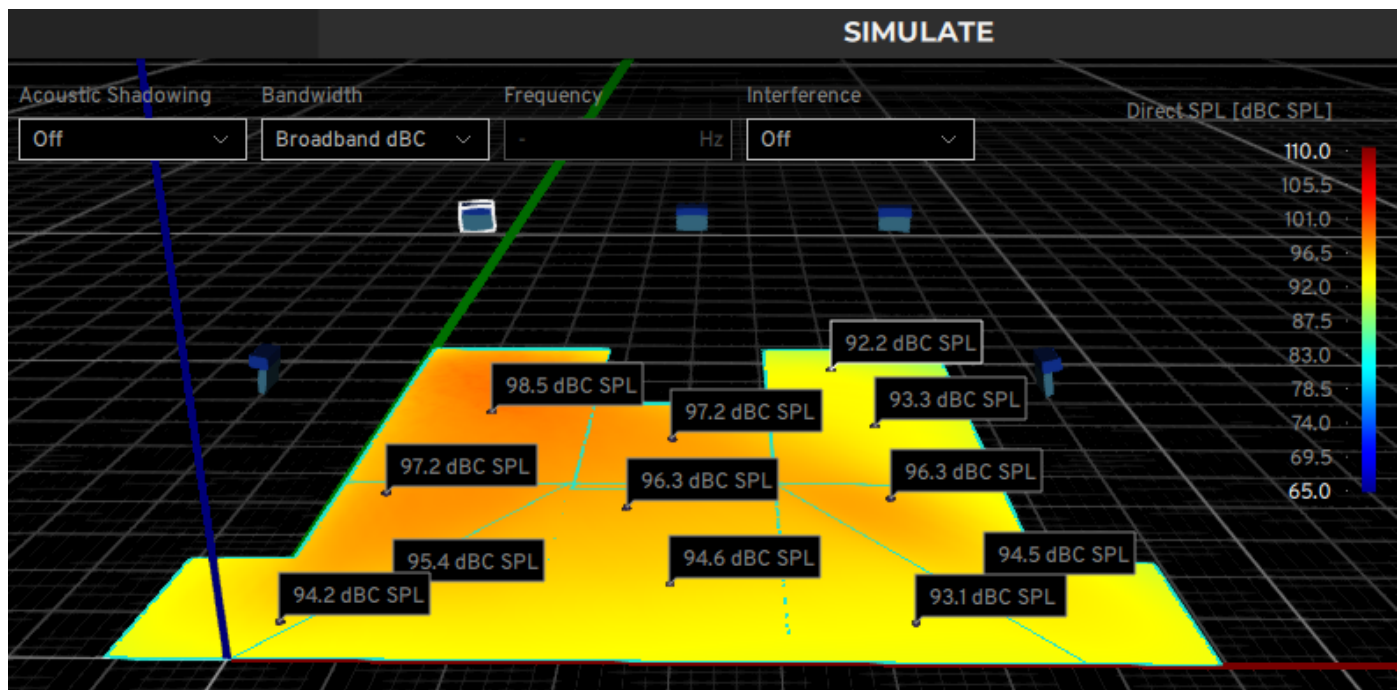
Προκειμένου να εξεταστεί η κάλυψη που παρέχει το σύστημα επιλέχθηκαν 12 σημεία και εξετάστηκαν συγκεκριμένες συστοιχίες, οι οποίες είναι με 3 στήλες, ως προς την απόδοσή τους, στο σύνολο του χώρου. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν η κεντρική συστοιχία (center), η αριστερή (left), η πίσω δεξιά (right back) και όλες μαζί (5 συστοιχίες).

Αρχικά εξετάστηκε η στάθμη της κεντρικής συστοιχίας (center) σε 12 σημεία και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.22.



Εικόνα 6.22 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην κεντρική συστοιχία (επιλεγμένη).

Στη συνέχεια εξετάστηκε η στάθμη της αριστερής συστοιχίας (left) σε 12 σημεία και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.23.



Εικόνα 6.23 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην αριστερή συστοιχία (επιλεγμένη).

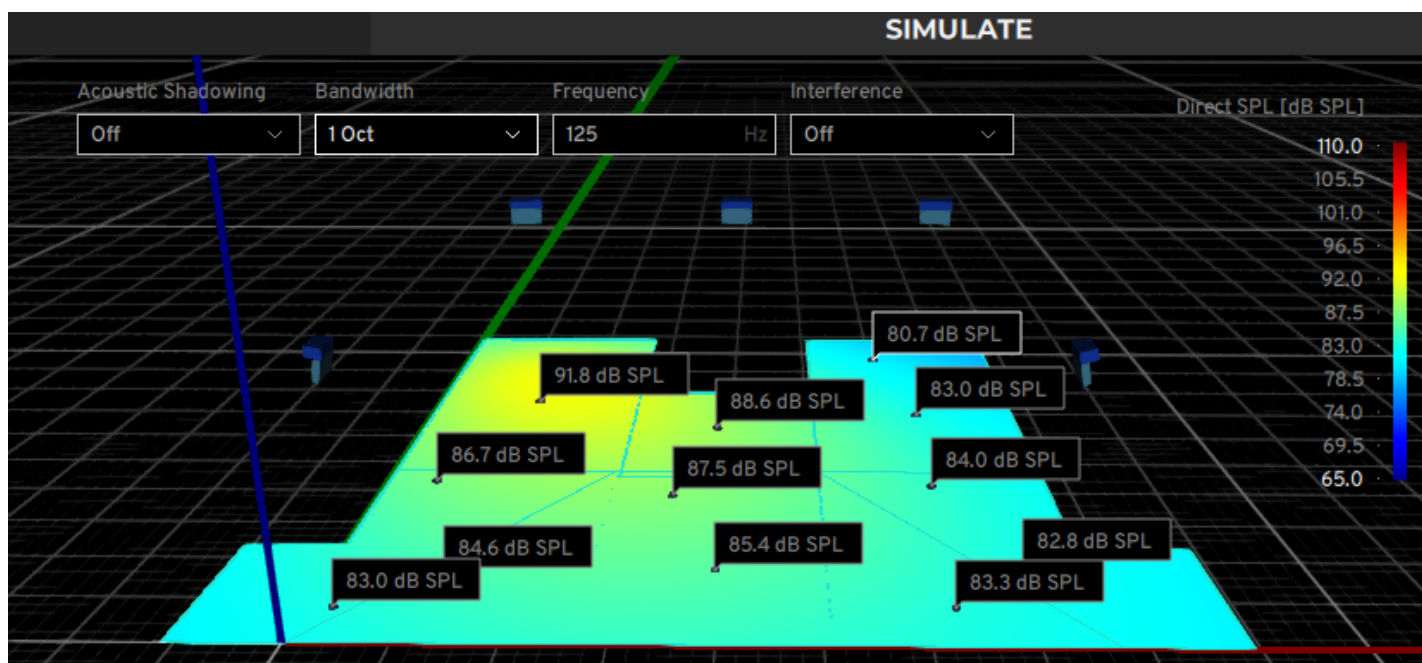
Οι τιμές έντασης σε dBC-SPL που προκύπτουν από την εξομοίωση του λογισμικού στην εικόνα 6.23 συγκεντρώθηκαν στον πίνακα 6.3 προκειμένου να υπολογιστεί η μέση τιμή τους και να ελεγχθεί αν πληροίτε το ποιοτικό κριτήριο της απόκλισης $\pm 3\text{dB}$ από την μέση τιμή, με μέγιστο $\pm 6\text{dB}$, στα διάφορα σημεία.

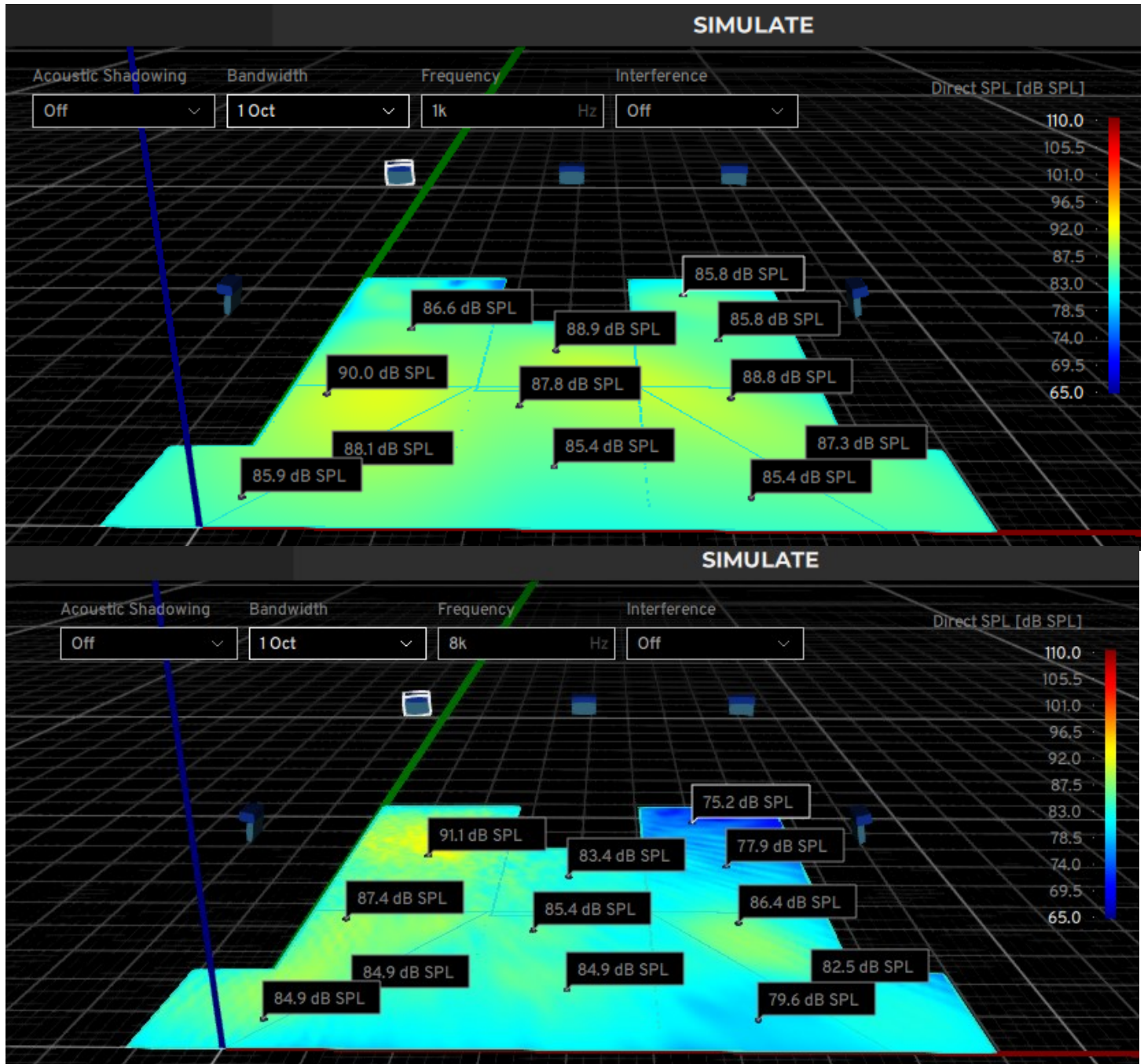
Στάθμη (dBC- SPL)(dB)	94.2	95.4	97.2	98.5	94.6	96.3	97.2	93.1	94.5	96.3	93.3	92.2
Μέση τιμή(dB)	95.2											

Πίνακας 6.3 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από την αριστερή συστοιχία.

Από τις τιμές του πίνακα φαίνεται ότι η κάλυψη είναι ομοιόμορφη και πληροίτε το κριτήριο της απόκλισης.

Επιπλέον για την αριστερή συστοιχία απεικονίστηκε η στάθμη στις κεντρικές συχνότητες των 125Hz, 1000Hz και 8000Hz, σε κλίμακα 1 οκτάβα και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.24.





Εικόνα 6.24 Στάθμη έντασης σε κλίμακα 1 οκτάβα για κεντρικές συχνότητες 125Hz, 1000Hz και 8000Hz στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην αριστερή συστοιχία (επιλεγμένη).

Οι αντίστοιχες τιμές στάθμης ανά κεντρική συχνότητα και η μέση τιμή τους φαίνεται στον πίνακα 6.4.

Κεντρική συχνότητα 125 Hz												
Στάθμη (dBC- SPL)(dB)	91.8	88.6	83	84.6	85.4	82.8	83.3	83	86.7	84	80.7	87.7
Μέση τιμή(dB)	85.1											

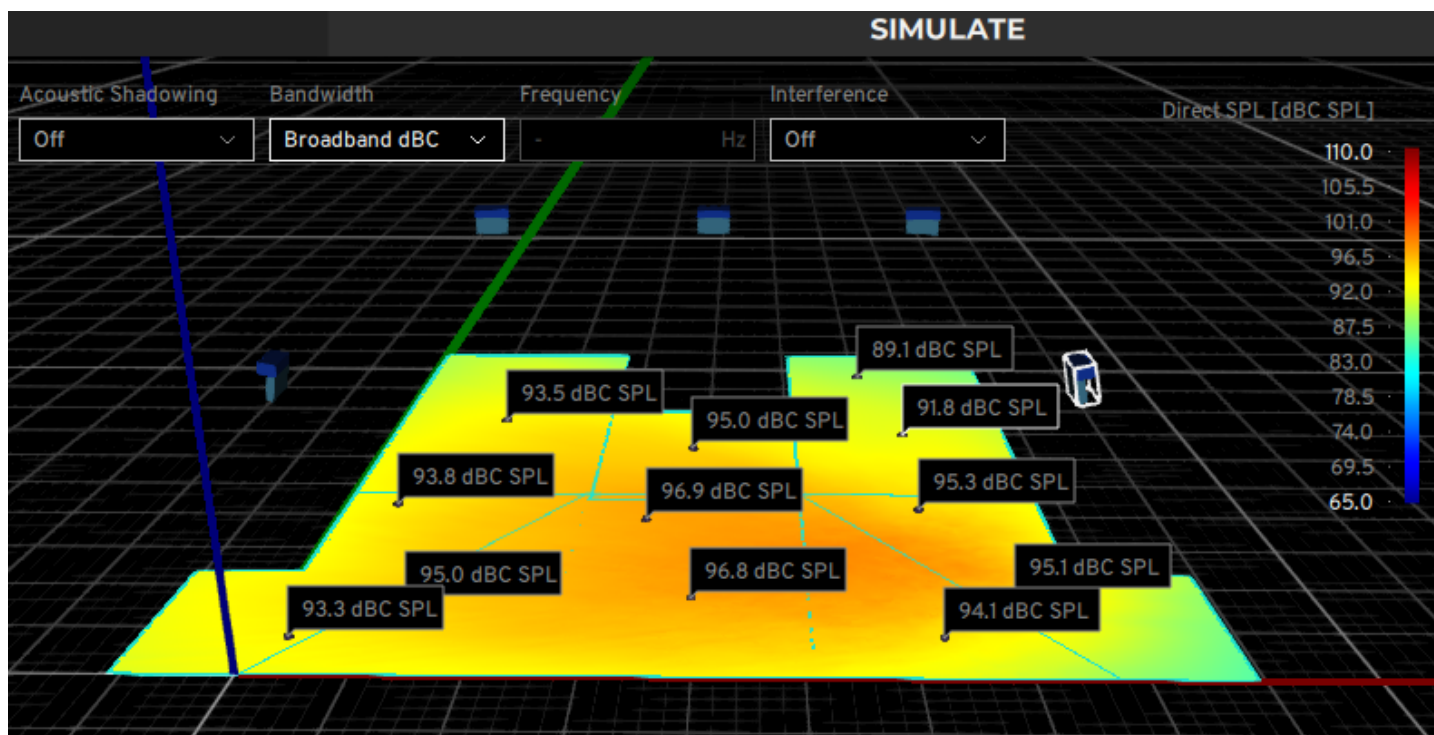
Κεντρική συχνότητα 1000 Hz												
Στάθμη (dBC- SPL)(dB)	86.6	88.9	85.8	88.1	85.4	87.3	85.4	85.9	90	88.8	85.8	87.8
Μέση τιμή(dB)	87.1											

Κεντρική συχνότητα 8000 Hz												
Στάθμη (dBC- SPL)(dB)	91.1	83.4	77.9	84.9	84.9	82.5	79.6	84.9	87.4	86.4	75.2	85.4
Μέση τιμή(dB)	83.6											

Πίνακας 6.4 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από την αριστερή συστοιχία ανά κεντρική συχνότητα 125Hz, 1000Hz, 8000Hz

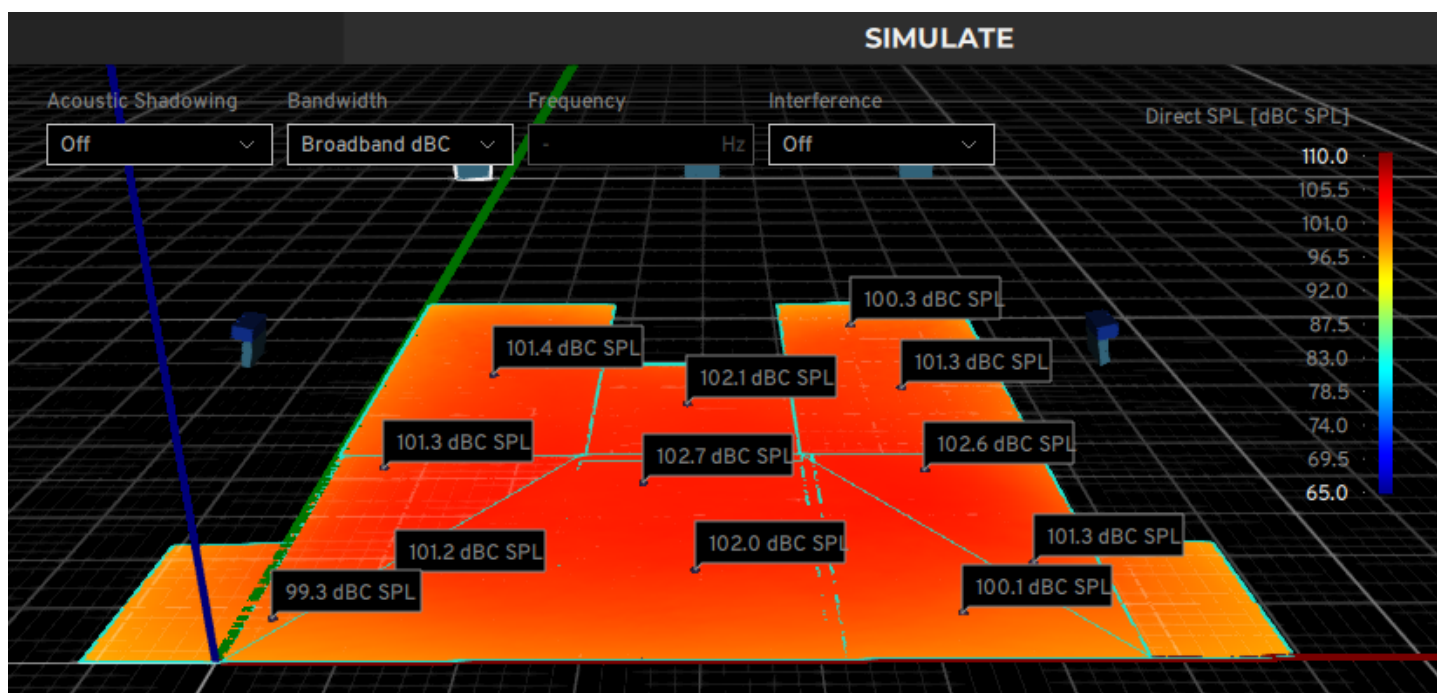
Από τον πίνακα 6.4 φαίνεται, μέσα στα όρια πάντα, μια μεγαλύτερη απόκλιση στις χαμηλές συχνότητες σε σχέση με το μέσο όρο, η οποία όμως δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η στάθμη της πίσω δεξιά συστοιχίας (back right) σε 12 σημεία και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.25.



Εικόνα 6.25 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται μόνο στην πίσω δεξιά συστοιχία (επιλεγμένη).

Τέλος εξετάστηκε η στάθμη σε dBC- SPL του συνόλου των συστοιχιών (5) σε 12 σημεία και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.26.



Εικόνα 6.26 Στάθμη έντασης σε dBC- SPL στο σύνολο του χώρου που οφείλεται στο σύνολο των συστοιχιών.

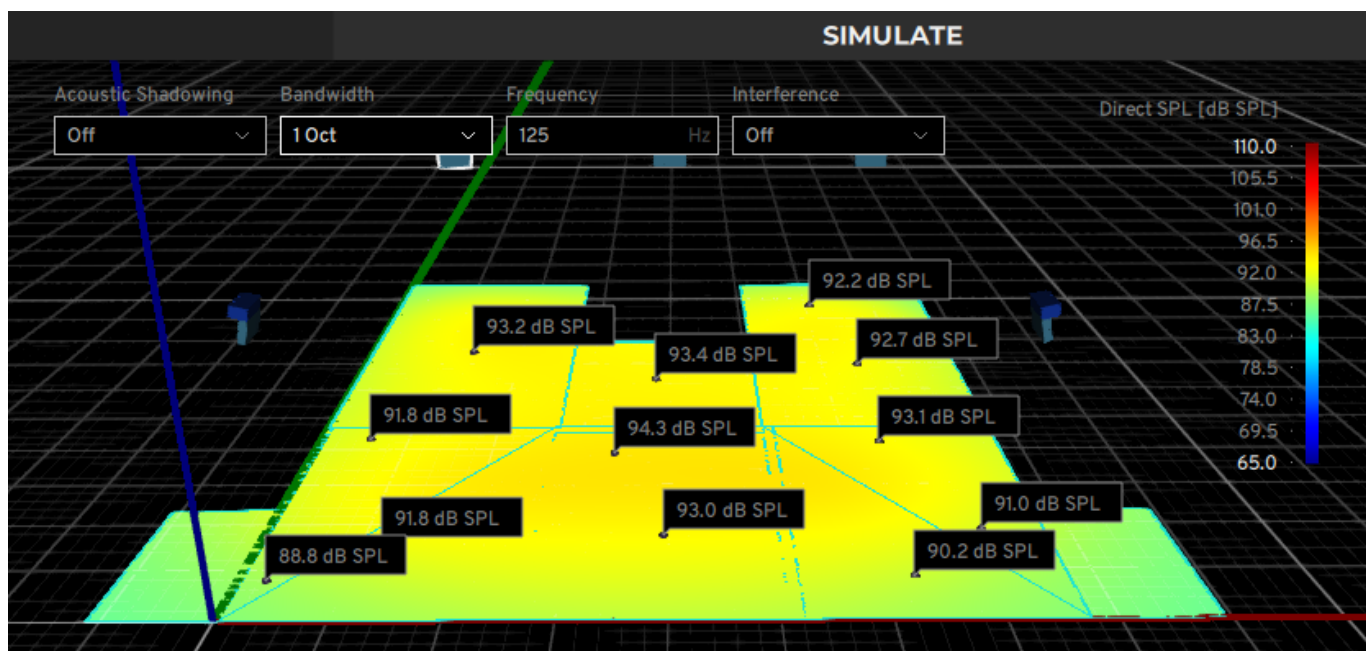
Οι τιμές έντασης σε dBC-SPL που προκύπτουν από την εξομοίωση του λογισμικού για το σύνολο των συστοιχιών, στην εικόνα 6.26 συγκεντρώθηκαν στον πίνακα 6.5 προκειμένου να υπολογιστεί η μέση τιμή τους και να ελεγχθεί αν πληροίτε το ποιοτικό κριτήριο της απόκλισης $\pm 3\text{dB}$ από την μέση τιμή, με μέγιστο $\pm 6\text{dB}$, στα διάφορα σημεία.

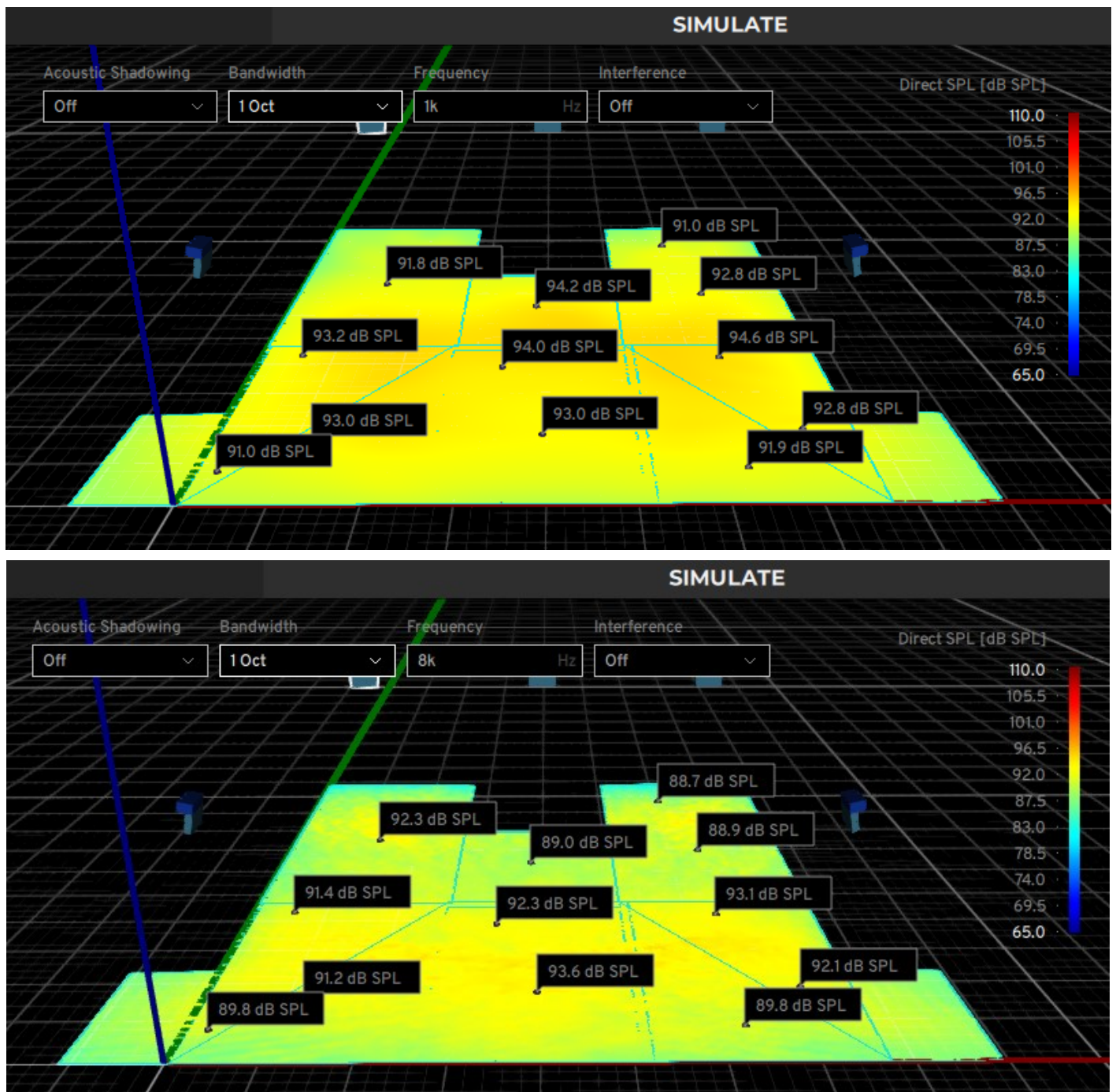
Στάθμη (dBC- SPL)(dB)	101,4	102,1	101,3	101,2	102	101,3	100,1	99,3	101,3	102,6	100,3	102,7
Μέση τιμή(dB)	102											

Πίνακας 6.5 Στάθμες έντασης στο σύνολο του χώρου από το σύνολο των συστοιχιών.

Από τις τιμές του πίνακα φαίνεται ότι η κάλυψη είναι ομοιόμορφη και πληροίτε το κριτήριο της απόκλισης.

Επιπλέον για το σύνολο των συστοιχιών απεικονίστηκε η στάθμη στις κεντρικές συχνότητες των 125Hz, 1000Hz και 8000Hz, σε κλίμακα 1 οκτάβα και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.27.

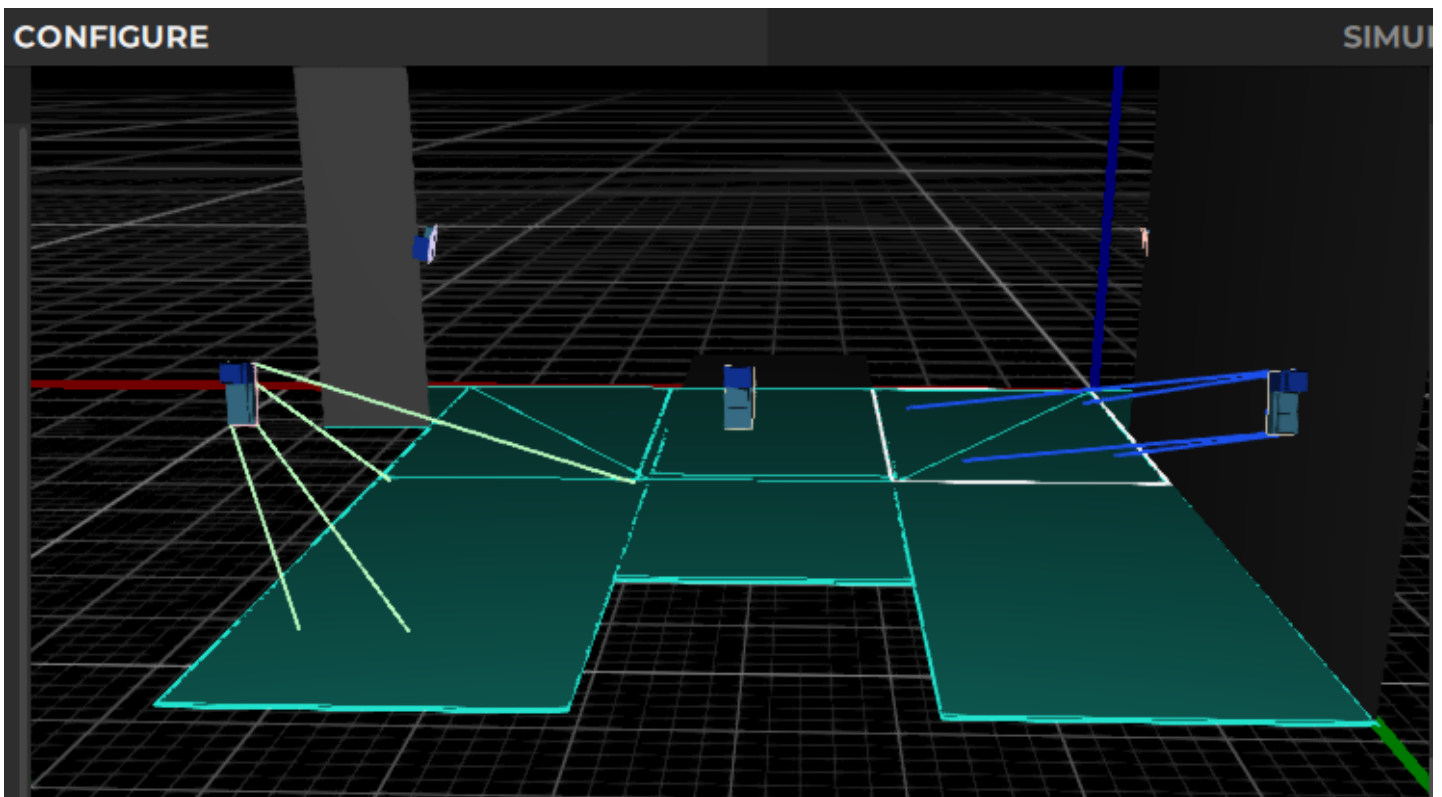


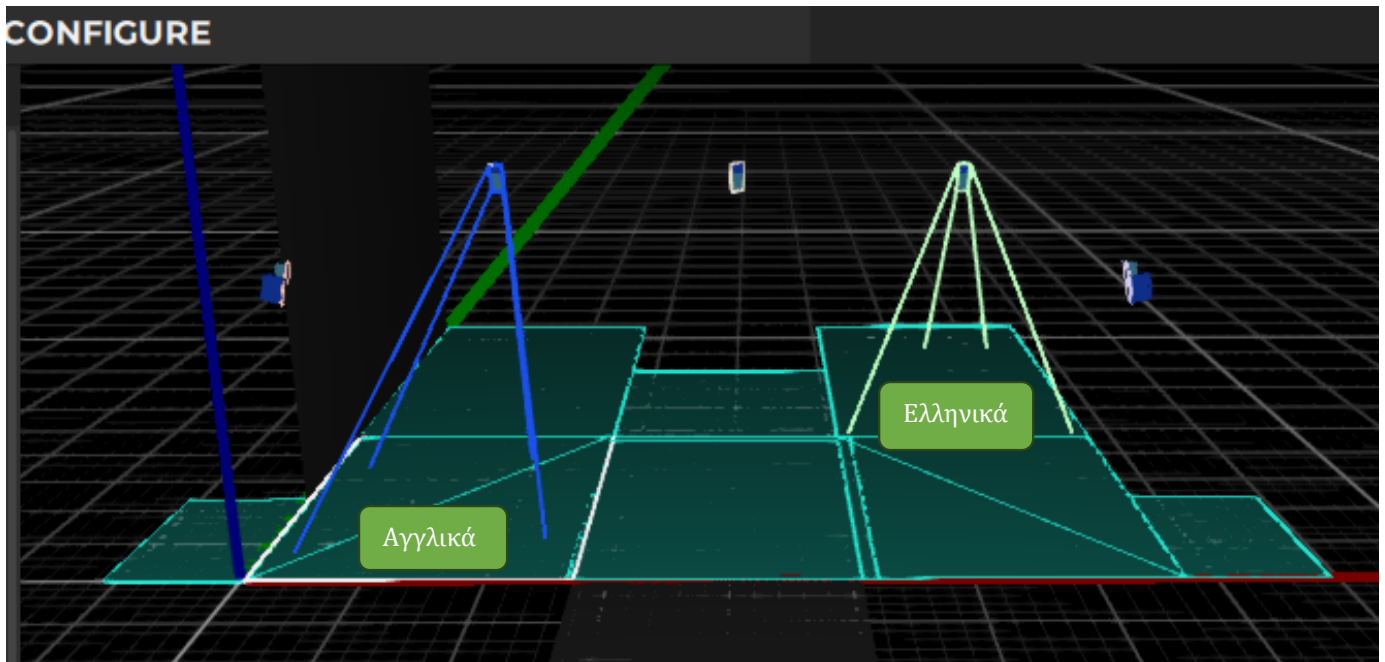


Εικόνα 6.27 Στάθμη έντασης σε κλίμακα 1 οκτάβα για κεντρικές συχνότητες 125Hz, 1000Hz και 8000Hz στο σύνολο του χώρου που οφείλεται στο σύνολο των συστοιχιών.

6.4.3 Χρήση του συστήματος για ομιλία

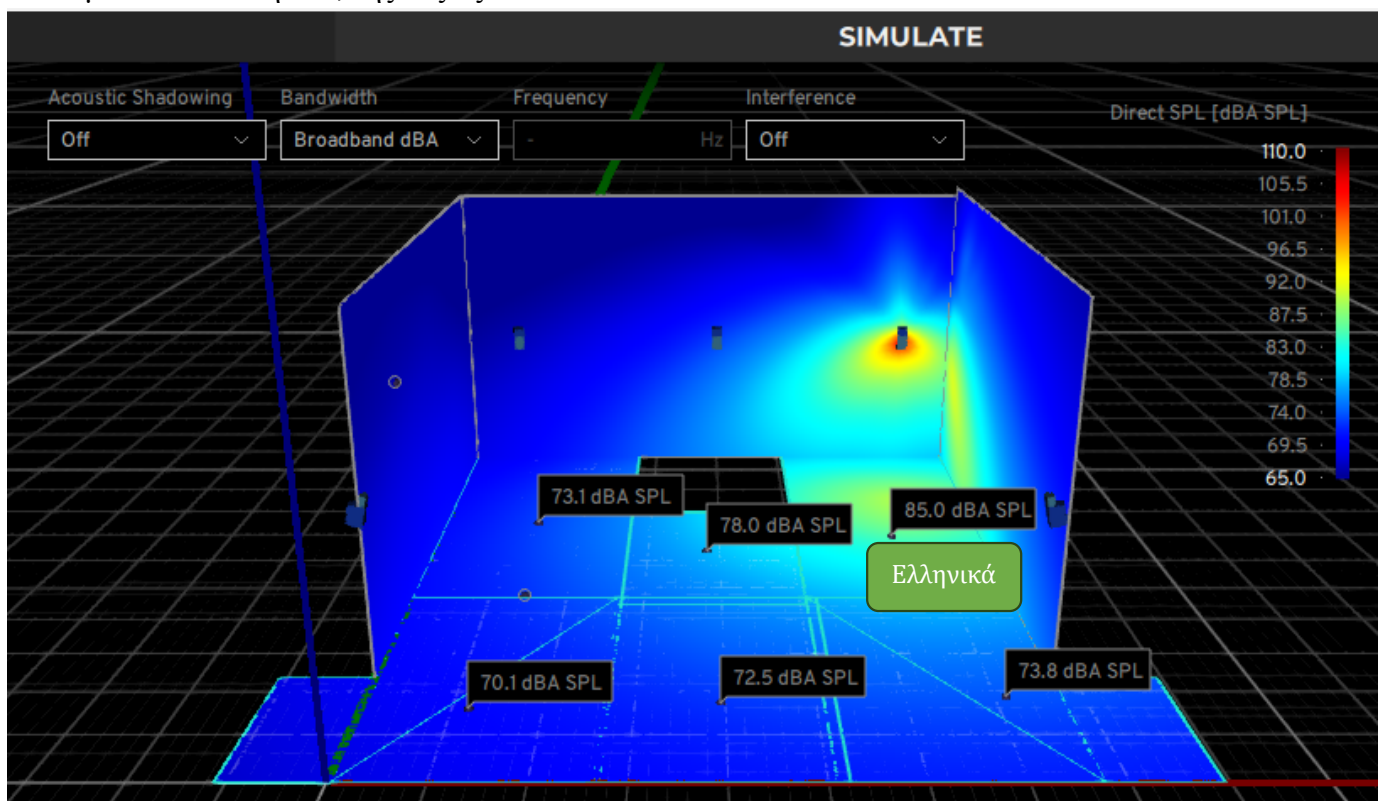
Για την εξέταση της χρήσης για ομιλία επιλέχθηκε το σενάριο όπου η ομιλία εκφωνείται σε μια γλώσσα π.χ. Ελληνικά και γίνεται ταυτόχρονη μετάφρασή της στα Αγγλικά. Για το σκοπό αυτό οι ακροατές οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο χώρο, θα μοιραστούν σε 2 γκρουπ ανάλογα με τη γλώσσα ακρόασης και θα κάθονται στο αντίστοιχο τμήμα. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 2 περιοχές μέσα από τον εξεταζόμενο χώρο και δημιουργήθηκαν για την κάλυψή τους παραμετρικές δέσμες ακτινών, στις οποίες δόθηκε το αντίστοιχο σχήμα για την κάλυψή των περιοχών, ενώ η κάθε γλώσσα μεταδίδεται στο δικό της κανάλι ήχου. Ο στόχος είναι, ενώ οι ακροατές είναι στον ίδιο χώρο αλλά σε διαφορετική περιοχή, ο ήχος να μην αναμιγνύεται και να ακούει ο καθένας την αντίστοιχη γλώσσα. Στην εικόνα 6.28 φαίνονται οι περιοχές που επιλέχθηκαν και οι αντίστοιχες παραμετρικές δέσμες ακτινών.

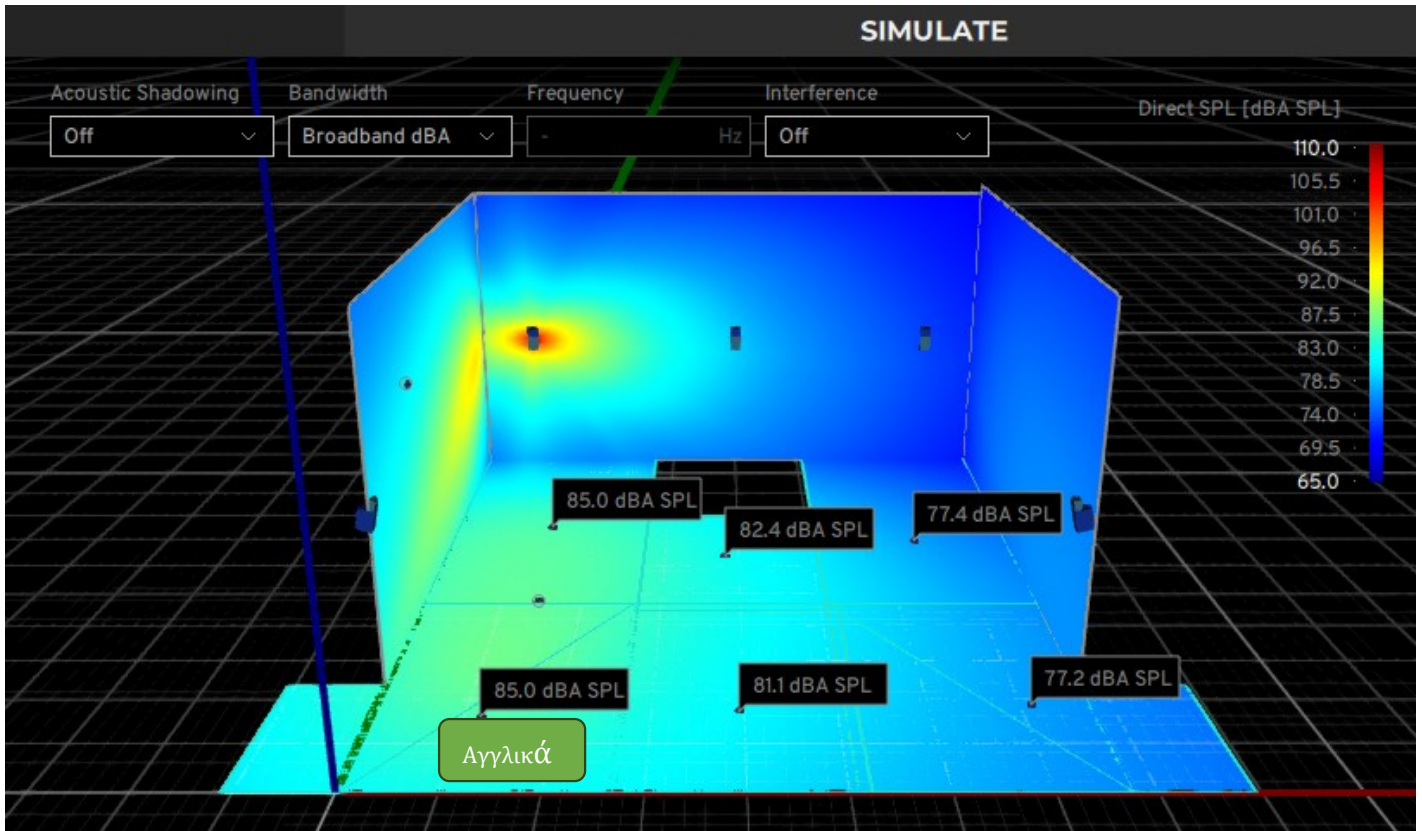




Εικόνα 6.28 Περιοχές κάλυψης για χρήση του χώρου για ομιλία και αντίστοιχες παραμετρικές δέσμες ακτινών, πίσω όψη (πάνω), μπροστά όψη (κάτω).

Κατά την εξομοίωση επιλέχθηκαν αρχικά ξεχωριστά οι δέσμες από την κάθε συστοιχία και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.29. Για την περιοχή όπου ακούγεται η ομιλία στα Αγγλικά, επιλέχθηκε η χρήση της αριστερής συστοιχίας και για την περιοχή που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά, της δεξιάς.

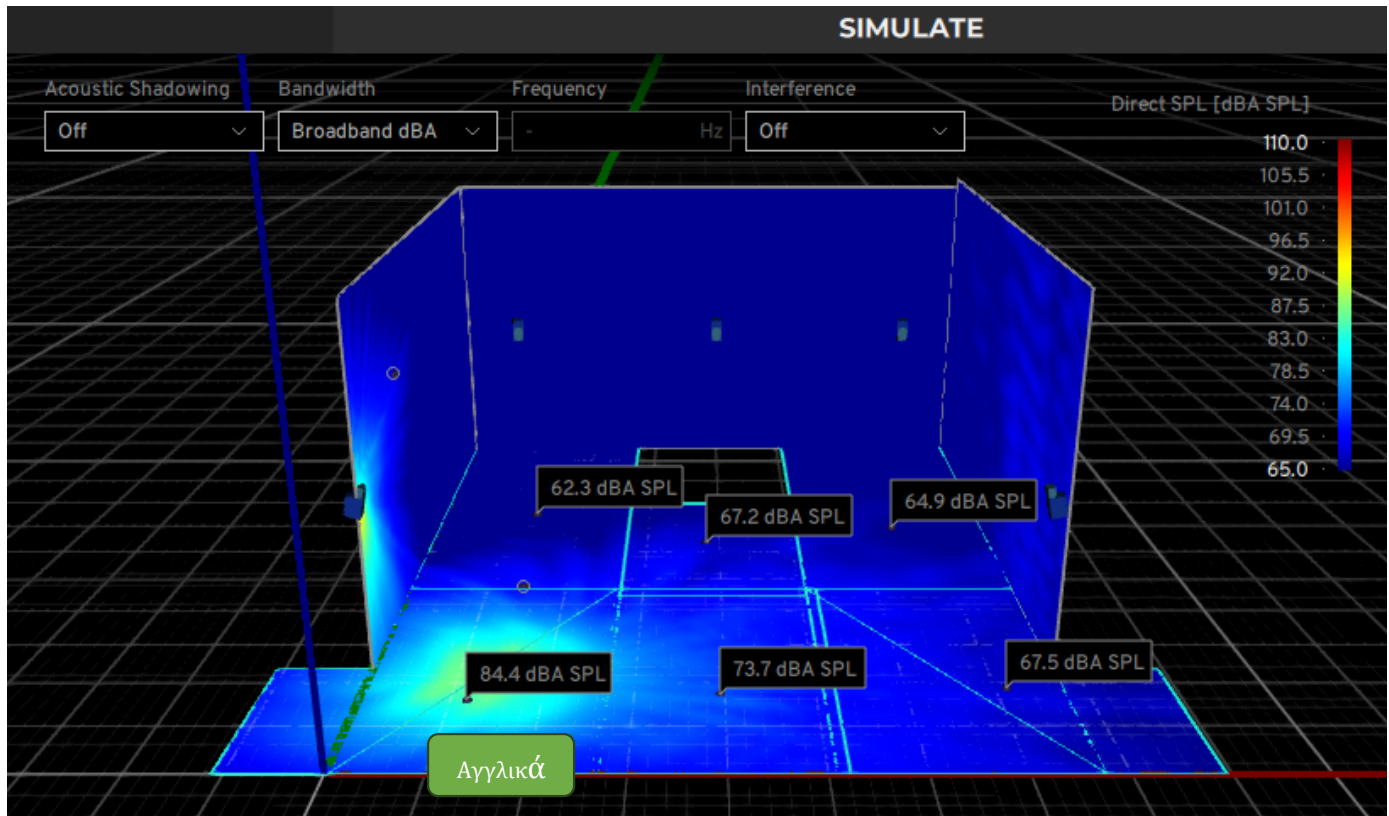




Εικόνα 6.29 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (κάτω), χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτίνων.

Τα αποτελέσματα από την εικόνα 6.29 δείχνουν για την περιοχή των Ελληνικών ότι υπάρχει μια ικανοποιητική διαφορά στάθμης με την αντίστοιχη των Αγγλικών (85-70,1 dB, πάνω εικόνα) ενώ αντίστροφα για την περιοχή των Αγγλικών η διαφορά στάθμης είναι μικρότερη (85-77,4dB, κάτω εικόνα) και οφείλεται στην μεγαλύτερη απόσταση της αριστερής συστοιχίας από την περιοχή κάλυψης, σε σχέση με την δεξιά.

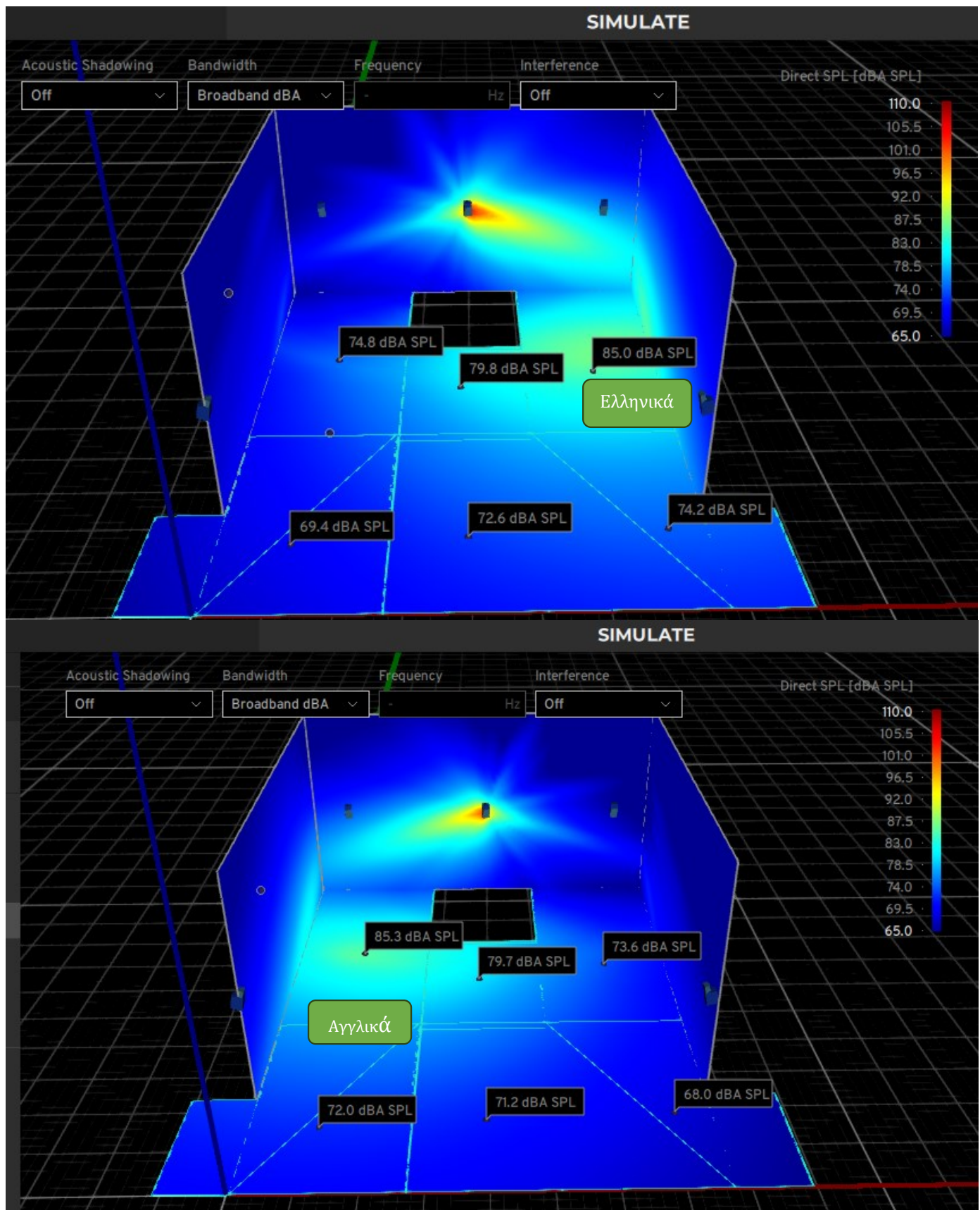
Για καλύτερα αποτελέσματα επιλέχθηκε η χρήση της πίσω αριστερής συστοιχίας, για την κάλυψη της περιοχής των Αγγλικών και το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 6.30.



Εικόνα 6.30 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στην περιοχή του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Αγγλικά, χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτινών, μέσω της πίσω αριστερής συστοιχίας.

Από την εικόνα 6.30 φαίνεται με τη χρήση της πίσω αριστερής συστοιχίας η διαφορά στάθμης στην περιοχή που ακούγεται η ομιλία στα Αγγλικά, με την αντίστοιχη περιοχή που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά είναι (84,4-64,9dB), πολύ καλύτερα από την προηγούμενη περίπτωση (εικόνα 6.29). Οι διαφορές στάθμης που παρατηρήθηκαν σε συνδυασμό με την διαφορετική γλώσσα εκπομπής της ομιλίας, πρακτικά δυσκολεύει τον ακροατή να αντιληφθεί και τους δύο ήχους, με αποτέλεσμα να ακούει τον σωστό ήχο.

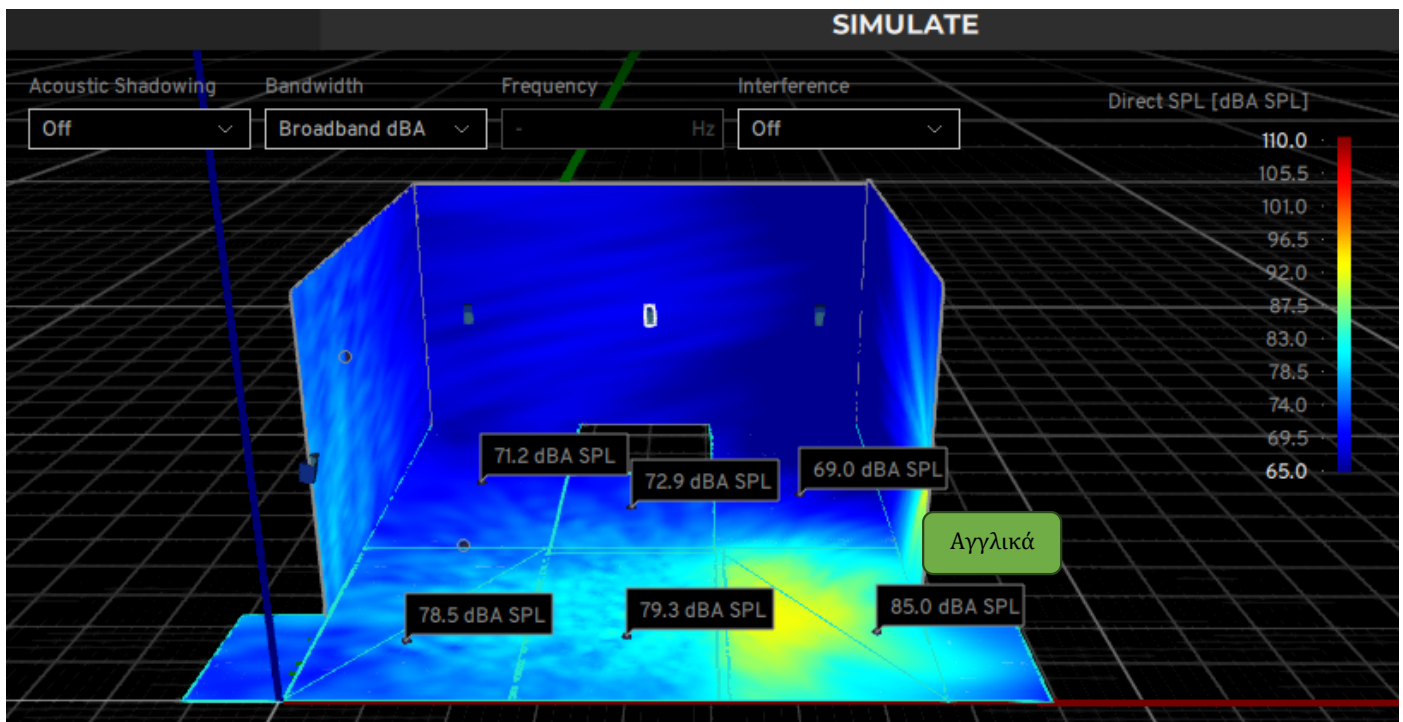
Εναλλακτικά στην περίπτωση που υπήρχε μόνο μία συστοιχία, για παράδειγμα η κεντρική, οι ακροατές θα μπορούσαν να μοιραστούν δεξιά και αριστερά της σκηνής και τα αποτελέσματα της έντασης σε dBA-SPL για ομιλία φαίνονται στην εικόνα 6.31.

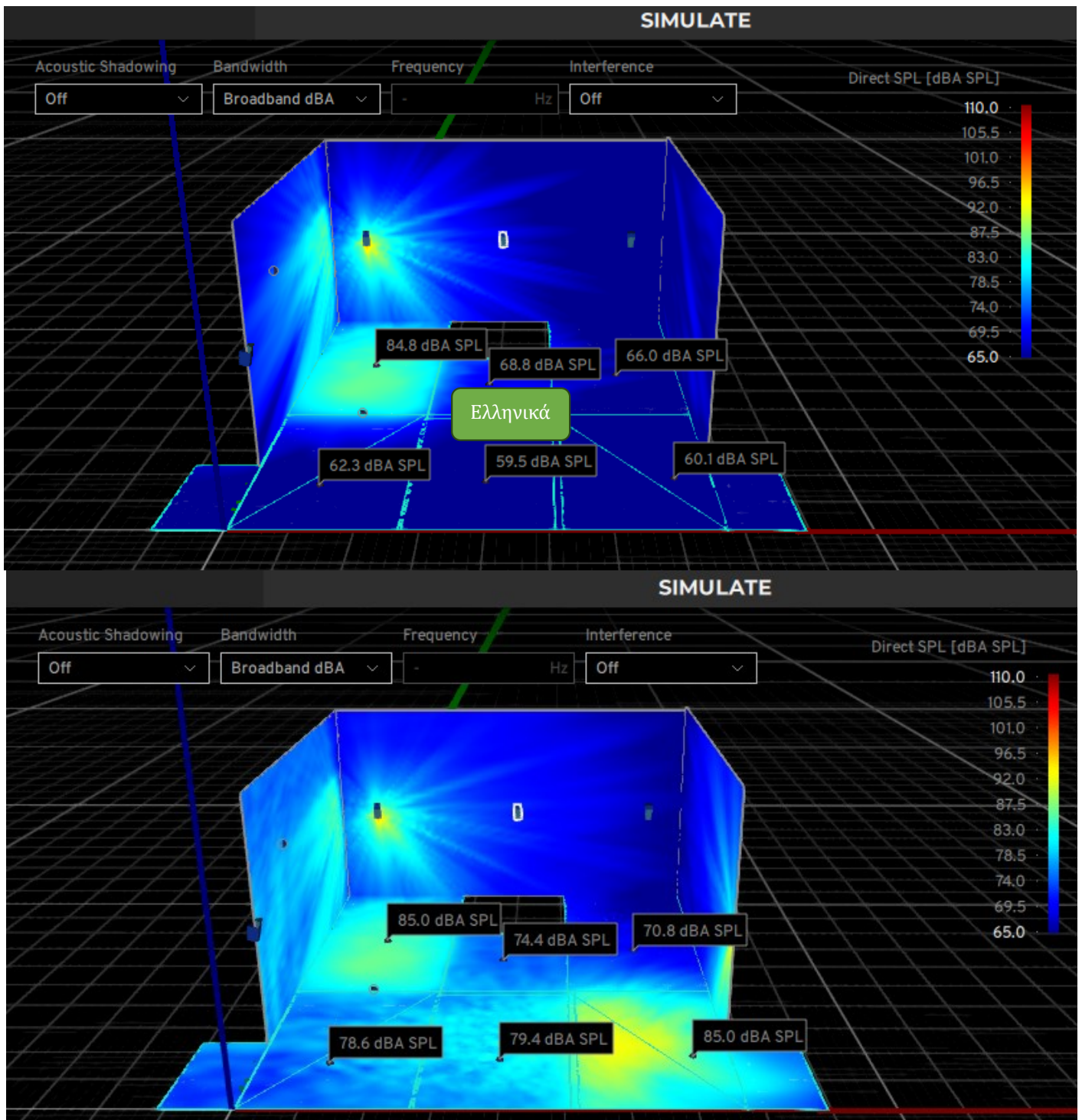


Εικόνα 6.31 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (κάτω), χρησιμοποιώντας παραμετρικές δέσμες ακτινών, που προέρχονται από την ίδια κεντρική συστοιχία.

Σαφώς χρησιμοποιώντας μόνο την κεντρική συστοιχία δεν προκύπτει το ίδιο καλό αποτέλεσμα, αλλά σε εφαρμογές με μικρότερο προϋπολογισμό, το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό.

Η κάλυψη περιοχών διαφορετικής ακρόασης ομιλίας επιλέχθηκε να γίνει και με τη χρήση δεσμών κάλυψης (Coverage beams) και αφού έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις, αντίστοιχα όπως στην περίπτωση της συναυλίας και ακολούθησε η διαδικασία optimise, προέκυψαν τα αποτελέσματα της εικόνας 6.32. Οι συστοιχίες που επιλέχθηκαν είναι η αριστερή και η πίσω δεξιά.





Εικόνα 6.32 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL στις περιοχές του χώρου που ακούγεται η ομιλία στα Ελληνικά (πάνω) και στα Αγγλικά (μεσαία), χρησιμοποιώντας δέσμες κάλυψης, που προέρχονται από την αριστερή και την πίσω δεξιά συστοιχία. Στην κάτω εικόνα φαίνονται και οι δυο δέσμες μαζί.

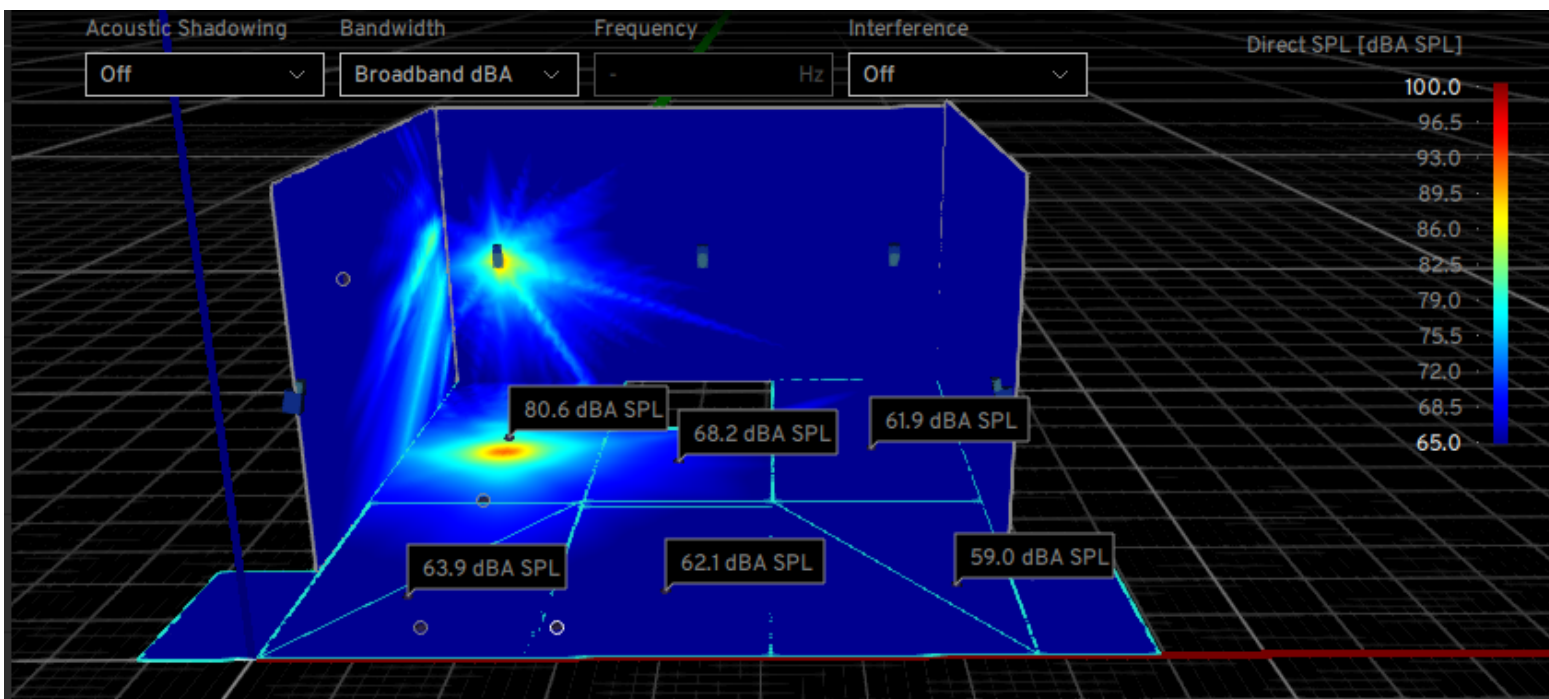
Τα αποτελέσματα είναι ακόμη καλύτερα από τη χρήση παραμετρικών ακτινών, αφού το λογισμικό παρέχει περισσότερες δυνατότητες ρύθμισης των δεσμών κάλυψης, ενώ τέλος η

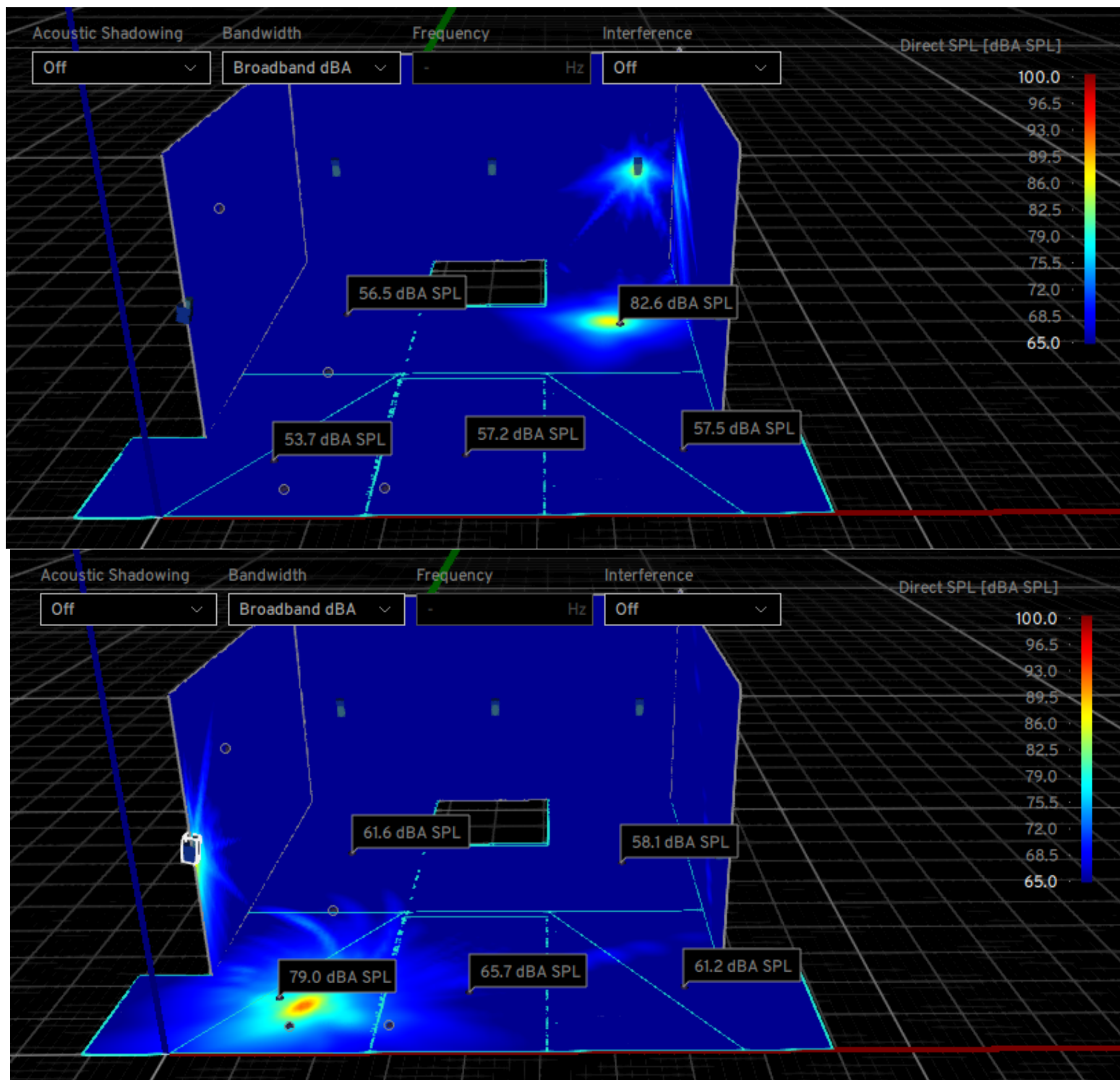
βελτιστοποίηση που παρέχεται μέσω διαδικτύου εξασφαλίζει το δυνατό καλύτερο αποτέλεσμα.

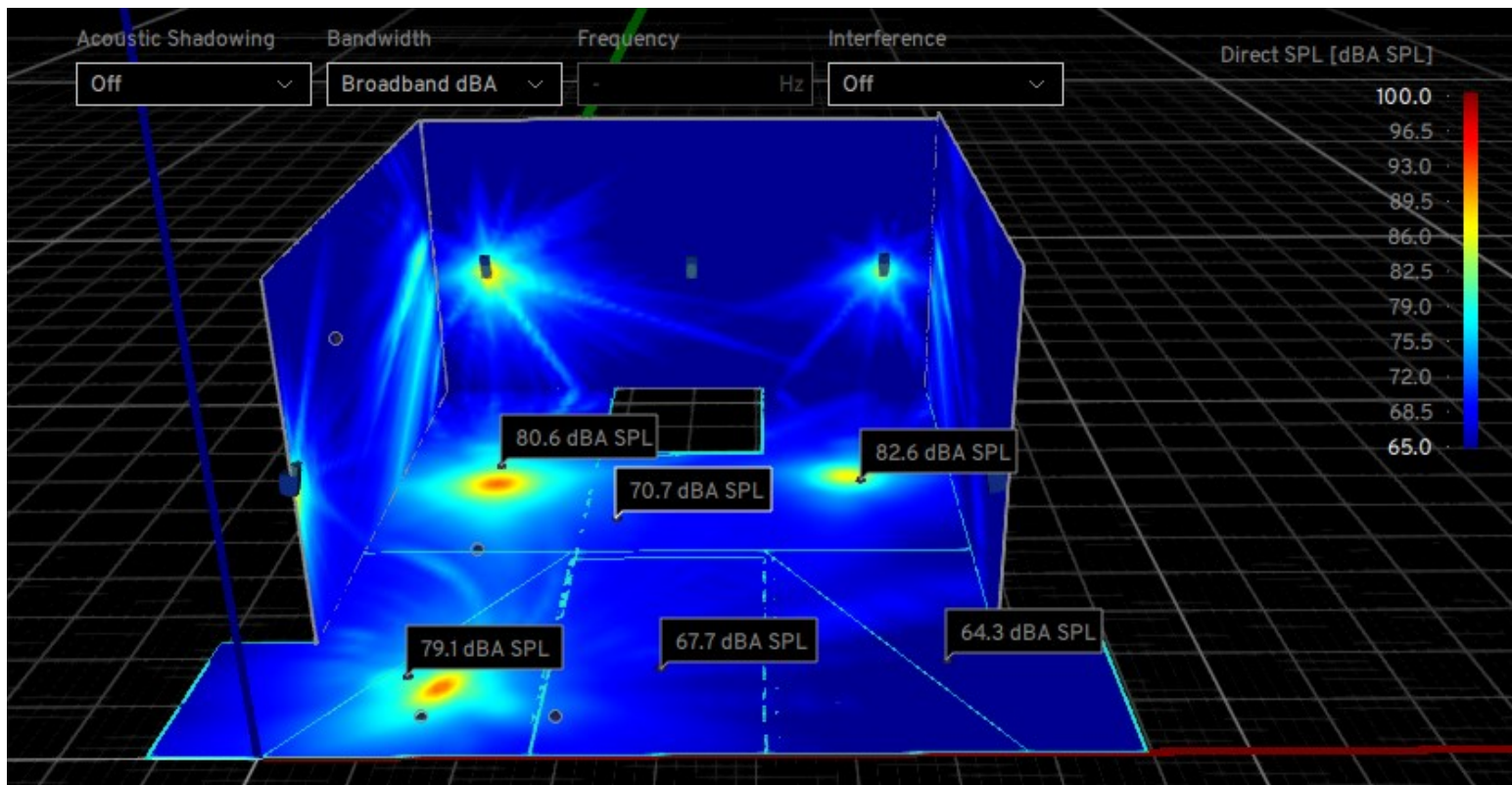
6.4.4 Χρήση του συστήματος για καλλιτεχνικό δρώμενο

Ο χώρος ενδείκνυται για αναπαράσταση καλλιτεχνικών δρώμενων και επαφίεται στη φαντασία του καλλιτέχνη και στην ικανότητα του χειριστή του συστήματος η απόδοση του. Ενδεικτικά εξετάζεται το σενάριο αναπαράστασης ενός χώρου στην Αρχαία Αθήνα όπου γνωστοί Έλληνες φιλόσοφοι αγορεύουν, ταυτόχρονα. Ο θεατής του δρώμενου μπορεί να κινείται στο χώρο και ανάλογα με το σημείο που βρίσκεται να ακούει τον αντίστοιχο φιλόσοφο. Το δρώμενο μπορεί να συμπληρωθεί με μια ολογραφική αναπαράσταση. Για την απόδοση του ήχου από τα συγκεκριμένα σημεία χρησιμοποιούνται εικονικές πηγές (virtual sources) μέσω του λογισμικού του συστήματος οι οποίες αναπαριστούν τους ομιλητές σε ύψος 1.70m από το έδαφος.

Επιλέχθηκαν 3 σημεία ακρόασης και η στάθμη έντασης σε dBA- SPL για το καθένα, αλλά και όλα μαζί φαίνεται στην εικόνα 6.33.







Εικόνα 6.33 Στάθμη έντασης σε dBA- SPL σε 3 σημεία του χώρου, όπου χρησιμοποιούνται εικονικές πηγές ήχου για την αναπαράσταση καλλιτεχνικού δρώμενου. Στην κάτω εικόνα φαίνεται η στάθμη και των 3 πηγών ταυτόχρονα.

Από την εικόνα 6.33 παρατηρείται ότι ενώ οι εικονικές πηγές ηχούν ταυτόχρονα, καθώς ο ακροατής κινείται, ο ήχος δεν αναμιγνύεται και η ακρόαση είναι φυσιολογική.

6.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε μερικές από τις δυνατότητες του συστήματος Holoplot. Ο υπό μελέτη χώρος του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος, μπορεί να αξιοποιηθεί και να αναδειχθεί με την εγκατάσταση του συστήματος, σε ένα πολυχώρο εξωτερικών εκδηλώσεων, υψηλής ηχητικής αισθητικής, δημιουργώντας μοναδικές ακουστικές εμπειρίες, χωρίς ιδιαίτερες παρεμβάσεις, οι οποίες θα ήταν επιβεβλημένες χρησιμοποιώντας συμβατικά συστήματα.

7 Σύνοψη – Τελικά συμπεράσματα

Ο αίθριος χώρος που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, στο Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος, συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα, όπως θέση, διαστάσεις, εύκολη πρόσβαση, όμορφο περιβάλλον, μεγάλη επισκεψιμότητα και επιλέχθηκε ώστε να διερευνηθεί η περεταίρω αξιοποίησή του ως χώρος εξωτερικών καλλιτεχνικών εκδηλώσεων, με διευρυμένες δυνατότητες, παρουσίασης καλλιτεχνικών δρώμενων, με ηχητικό περιεχόμενο εμβύθισης (immersive sound).

Αρχικά ανακτήθηκε ο χάρτης κυκλοφοριακού θορύβου της γύρω περιοχής (εικόνα 4.5) προκειμένου να εξεταστεί και να διαπιστωθεί, κατά πόσο τα επίπεδα όχλησης από τους παρακείμενους αυτοκινητόδρομους, σε σχέση βέβαια και με την απόσταση του χώρου από αυτούς, είναι σε χαμηλά επίπεδα (εικόνα 4.6).

Στη συνέχεια εξετάστηκαν φαινόμενα που σχετίζονται με τον ήχο και τη γεωμετρία του χώρου, όπως η αντήχηση, καθώς και διάφοροι ποιοτικοί δείκτες που σχετίζονται με την ποιότητα του ήχου π.χ. χρόνος αντήχησης, STI, RASTI. Προκειμένου να υπολογιστούν οι δείκτες αυτοί, σχεδιάστηκε ο χώρος στο λογισμικό Catt-Acoustic και έγινε εξομοίωση με συμβατικά ηχεία. Μετρώντας το δείκτη T-30 (εικόνα 5.2) και σε συνδυασμό με την κρουστική απόκριση σε επιλεγμένη θέση ακροατή, διαπιστώθηκε το φαινόμενο της αντήχησης αλλά και μία έντονη ανάκλαση στα 50 ms (εικόνα 5.3). Ταυτόχρονα οι δείκτες STI, C-50 (εικόνες 5.5 και 5.6) δεν είχαν ικανοποιητικές τιμές. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, υλοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού σενάρια παρεμβάσεων στο χώρο, χρησιμοποιώντας για τους πλευρικούς τοίχους είτε διαχυτικά υλικά, είτε απορροφητικά. Αρχικά καλύπτοντας τους πλευρικούς τοίχους, είτε κατά το ήμισυ, είτε εξ ολοκλήρου με απορροφητικό υλικό, βελτιώθηκαν οι μετρούμενοι δείκτες, διατηρώντας ελάχιστα μειωμένη την ανάκλαση στα 50 ms. Στη συνέχεια οι πλευρικοί τοίχοι καλύφθηκαν κατά το ήμισυ ή εξ ολοκλήρου με διαχυτικό υλικό το οποίο έδωσε ακόμα καλύτερες τιμές,

ενώ διέλυσε και σκόρπισε την ανάκλαση στα 50 ms. Συγκεκριμένα όταν καλύφθηκαν οι πλευρικοί τοίχοι κατά το ήμισυ, τα αποτελέσματα ήταν τα καλύτερα και από τα 4 σενάρια που εξετάστηκαν (εικόνες 5.23 έως 5.28).

Στη συνέχεια προκειμένου ο χώρος να μπορεί να αξιοποιηθεί για πολλαπλές εφαρμογές επιλέχθηκε να μελετηθεί η χρήση του συστήματος της εταιρίας Holoplot. Αφού σχεδιάστηκε ο χώρος στο λογισμικό Sketch up pro, έγινε εισαγωγή του σχεδίου στο λογισμικό της Holoplot, το οποίο χειρίζεται τις αντίστοιχες συστοιχίες ηχείων MD96 X1 και MD80-S. Οι χρήσεις του χώρου που εξετάστηκαν ήταν συναυλία, προβολή ταινίας, ομιλία και καλλιτεχνικό δρώμενο. Το σύστημα με την κατάλληλη παραμετροποίηση, κάθε φορά κατάφερε να ‘ανταποκριθεί’ στις απαιτήσεις χρήσης του, αναδεικνύοντας τα χαρακτηριστικά του και την νέα τεχνολογία που αντιπροσωπεύει. Ταυτόχρονα μέσω του 3D Audio Beamforming και Wave Field Synthesis δίνει τη δυνατότητα νέων εφαρμογών, χωρίς να χρειάζεται πάντα, την διαφορετική τοποθέτηση των συστοιχιών ανά εφαρμογή.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ξενόγλωσσες

Rumsey, F., (2001). *Spatial Audio*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford, OX, UK: Focal Press

Warren R. (2008). *Auditory Perception an Analysis and Synthesis*. Third Edition. Cambridge university press.

L de Santana (2017). *Fundamentals of acoustic beamforming*. NATO Educational Notes EN-AVT-287

A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel (1993). Acoustic control by wave field synthesis. Article in The Journal of the Acoustical Society of America.

Wu, Y. J. and Abahyapala, T. (2011). “Spatial Multizone Soundfield Reproduction:

Theory and Design.” IEEE Transactions on Audio, Speech, and

Language Processing 19(6), pp. 1711-1720.

Ελληνόγλωσσες

Κοντομίχος Φ., Ζαρούχας Θ., Χατζηαντωνίου Π. (2013). *Ακουστική χώρου*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Κώτσου Γ. (2019). *Ακουστική Βελτίωση Πανεπιστημιακών Χώρων Διδασκαλίας*.

(Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/44324>

Λελεδάκης Ι. (2012). *Δημιουργία εφαρμογής για χρήση με ακουστικά με σκοπό προσομοίωση του ακουστικού πεδίου που δημιουργείται στο ακουστικό κανάλι του αυτιού από τη χρήση ηχείων σε φυσικό ακουστικό χώρο*. Πτυχιακή εργασία.

Τσιφλίδης Α. (2013). *Ακουστική και Αρχιτεκτονική Β΄ τόμος*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Φλώρος Α. (2013). *Ήχος και Ακουστική στην Μουσική Α' Τόμος*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Τριποδάκης Π.(2011). *Η ηχητική σφαίρα*. Πτυχιακή εργασία.Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Κρήτης

Σκαρλάτος Δ. (2013). *Ηχομόνωση-Ηχοπροστασία Α' και Β' τόμος*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Παράρτημα 1: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων X1 MD96 X1 και MD80-S

X1 Modul 96

Two-way Audio Module

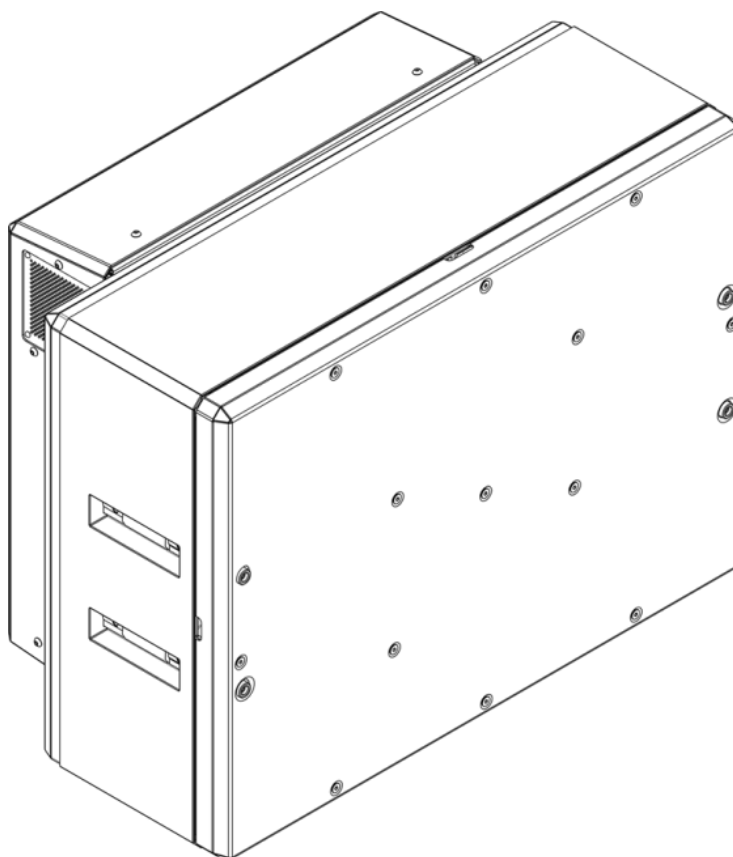
Configuration: Two-layer Matrix Arrangement

LF layer	18x 5-inch cone driver in individual dual-ported chambers
HF layer	78x 1.3-inch soft dome tweeter with integrated waveguides

Maximum SPL (one unit, optimized parallel beam configuration*)

LF layer	142 dB**
HF layer	152 dB**

* Max. SPL capabilities are dependent on beam configuration and array size, and should be assessed using HOLOPLOT Software Tools ** Peak level referred back to 1 m under free field conditions using band-limited pink noise with crest factor 4



Frequency

Frequency Resp. (± 3 dB)	100 - 18,000 Hz
Frequency Resp. (-10 dB)	85 - 20,000 Hz

Processing

Type	High-performance FPGA for advanced digital signal processing
DSP channels	96
Computation	7600 parametric EQ bands and more than 1100 Finite Impulse Response (FIR) filters with over 430000 filter taps

Beamforming capabilities: HOLOPLOT 3D Audio Beamforming Technology and Wave Field Synthesis

Number of beams	Up to 12 beams in parallel per X1 Matrix Array: <ul style="list-style-type: none"> 8 fully user-configurable parametric beams and virtual sources 4 beams providing optimized coverage over a predefined audience area
Vertical directivity	Steering angle and opening angle user adjustable (0.1° steps) / defined by HOLOPLOT Algorithm for optimized coverage
Horizontal directivity	Steering angle and opening angle user adjustable (0.1° steps) / defined by HOLOPLOT Algorithm for optimized coverage

Amplification

Type	6x 16-channel digital amplifier modules
Max. output power	HF: 78x 240 Wpk LF: 18x 500 Wpk

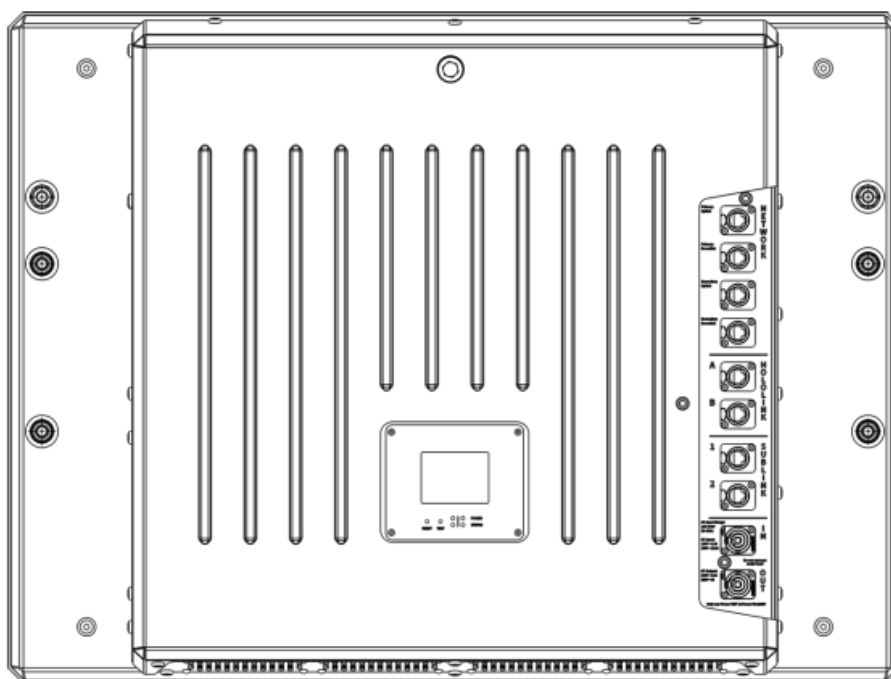
Peak power based on the maximum unclipped voltage the amplifier will produce into the nominal load impedance

Connectors

Control	etherCON for Control Network
Audio	etherCON for Audio-over-IP: Dante™, AES67
Power	AC Power IN (115 - 240 V AC, 50 - 60 Hz) AC Power OUT (208 - 240 V AC, 50 - 60 Hz)

Measurements

Dimensions	800 mm x 600 mm x 457 mm (±2.5 mm)
Weight	100 kg / 220 lb



X1 Modul 80-S

Three-way Audio Module

Configuration: Three-layer Matrix Arrangement

Sub layer	1x 18-inch sensor-controlled subwoofer with two high energy, high density neodymium-iron-boron magnets in a bandpass enclosure with air-flow optimised ports
LF layer	16x 5-inch cone driver in individual dual-ported chambers
HF layer	64x 1.3-inch soft dome tweeter with integrated waveguides

Maximum SPL (one unit, optimized parallel beam configuration*)

Sub layer	131 dB (full space) / 137 dB (half space)**
LF layer	142 dB**
HF layer	152 dB**

* Max. SPL capabilities are dependent on beam configuration and array size, and should be assessed using HOLOPLOT Software Tools ** Peak level referred back to 1 m under free field conditions using band-limited pink noise with crest factor 4

Amplification

Type	5x 16-channel digital amplifier modules 1x single-channel digital subwoofer amplifier module with differential pressure sensor and zero-latency-DSP for adaptive closed-loop processing of the subwoofer driver signal
Max. output power	Sub: 8,500 Wpk LF: 16x 500 Wpk HF: 64x 240 Wpk

Peak power based on the maximum unclipped voltage the amplifier will produce into the nominal load impedance

Connectors

Control	etherCON for Control Network
Audio	etherCON for Audio-over-IP: Dante™, AES67
Power	AC Power IN (115 - 240 V AC, 50 - 60 Hz) AC Power OUT (208 - 240 V AC, 50 - 60 Hz)

Measurements

Dimensions	800 mm x 600 mm x 981 mm (±2.5 mm)
Weight	160 kg / 353 lb

Frequency

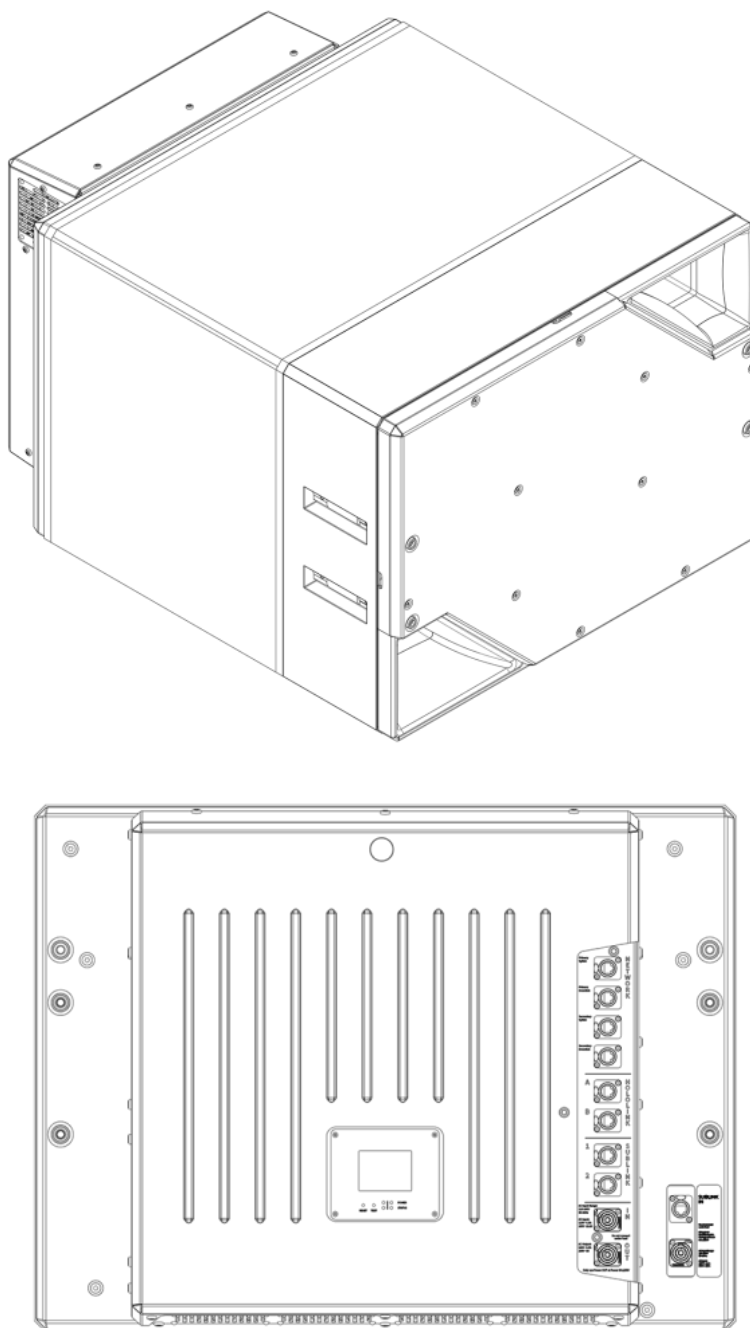
Frequency Resp. (± 3 dB)	30 - 18,000 Hz
Frequency Resp. (-10 dB)	26 - 20,000 Hz

Processing

Type	High-performance FPGA for advanced digital signal processing
DSP channels	81
Computation	7600 parametric EQ bands and more than 1100 Finite Impulse Response (FIR) filters with over 430000 filter taps

Beamforming capabilities: HOLOPLOT 3D Audio Beamforming Technology and Wave Field Synthesis

Number of beams	Up to 12 beams in parallel per X1 Matrix Array: <ul style="list-style-type: none"> 8 fully user-configurable parametric beams and virtual sources 4 beams providing optimized coverage over a predefined audience area
Vertical directivity	Steering angle and opening angle user adjustable (0.1° steps) / defined by HOLOPLOT Algorithm for optimized coverage
Horizontal directivity	Steering angle and opening angle user adjustable (0.1° steps) / defined by HOLOPLOT Algorithm for optimized coverage



Παράρτημα 2: Εικόνες

