ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού»

«Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος»

Διπλωματική Εργασία

Ακουστική και Ηλεκτρακουστική Μελέτη του αμφιθεάτρου του Κέντρου Πολιτισμού και Νεολαίας «Ιωνικό Κέντρο»

Δημήτρης Παπαφωτίου

Επιβλέπων καθηγητής: Θωμάς Ζαρούχας

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο 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 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 συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Ακουστική και Ηλεκτρακουστική Μελέτη του αμφιθεάτρου του Κέντρου Πολιτισμού και Νεολαίας «Ιωνικό Κέντρο»

Δημήτρης Παπαφωτίου

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Θωμάς Ζαρούχας

Δρ. Ηλ/γος Μηχανικός, Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων "Διόφαντος"

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Καλέρης

Δρ. Ηλ/γος Μηχανικός, Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Lasers του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ)

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Στη Δήμητρα

«[…] και ξανάπιαναν και οι τρεις το διάλογο που όρισε κάποτε ο Brahms και ο οποίος, έπειτα από εκατό ολόκληρα χρόνια, επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο αλλά κάθε φορά διαφορετικά, διότι διαφορετική είναι η ζωή εκείνου που τον ερμηνεύει και εκείνου που τον ακούει»

Η σκιά του ευνούχου, Jaume Cabré

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς του αμφιθεάτρου του συνεδριακού και πολιτιστικού κέντρου νεολαίας «Ιωνικό Κέντρο» στη Νέα Ιωνία. Το ενδιαφέρον εστιάζεται αρχικά στους τρόπους με τους οποίους μπορεί κανείς να εκτιμήσει τις ακουστικές παραμέτρους του χώρου, αρχικά με τις απλές στατιστικές μεθόδους που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία (Sabine, Norris-Eyring, Millington-Sette) και στη συνέχεια με χρήση κατάλληλου λογισμικού το οποίο επιτρέπει τόσο γρήγορες και ταχείς προσομοιώσεις του χώρου όσο και αναλυτικές εφαρμογές όπως αυτή της μεθόδου ανίχνευσης ή ιχνηλάτησης ακτίνων (ray tracing method). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι κατάλληλες ακουστικές μετρήσεις στο χώρο με σκοπό αφενός να ελέγξουμε την ακρίβεια των αρχικών εκτιμήσεων, αφετέρου να καταλήξουμε σε ένα τελικό συμπέρασμα όσον αφορά το ποια είναι η κατηγορία εφαρμογών για την οποία η συμπεριφορά του χώρου κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη. Σε τελική ανάλυση, η παραπάνω μεθοδολογία επιδιώκει να απαντήσει στο ερώτημα αν μπορεί κανείς να έχει αξιόπιστες εκτιμήσεις για το χώρο πριν την κατασκευή του, κάτι που γενικά είναι αρκετά σημαντικό καθώς μπορεί να δώσει αξιόπιστες και έγκυρες απαντήσεις σε ερωτήματα αρχιτεκτονικής αλλά και στην επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρακουστικού συστήματος.

Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιείται είναι το Ease (κυρίως η έκδοση 4.4, δευτερευόντως και για επιμέρους σημεία της εργασίας η έκδοση 5). Οι μετρήσεις αξιοποιούν το λογισμικό Room EQ Wizard (v5.31.3) αλλά και επαγγελματικό εξοπλισμό ακουστικών μετρήσεων (συγκεκριμένα, εξοπλισμό του κατασκευαστή NTi Audio).

Λέξεις – Κλειδιά

Χρόνος αντήχησης, ευκρίνεια, ακουστική προσομοίωση, μέθοδος ιχνηλάτησης ακτίνων

Acoustic and Electroacoustic Study of the Multi-Purpose Auditorium of the «Ionian Center» of the Holy Metropolis of Nea Ionia, Filadelfeia, Irakleio and Chalkidona

Dimitris Papafotiou

Abstract

The present thesis investigates the acoustic behavior of the multi-purpose auditorium of the «Ionian Center» of the Holy Metropolis of Nea Ionia, Filadelfeia, Irakleio and Chalkidona "Ionian Center" youth conference and cultural facility in Nea Ionia. The study begins by examining methods available for estimating the acoustic parameters of the venue, initially by using the classical statistical models commonly cited in the literature (Sabine, Norris–Eyring, Millington–Sette) and with the help of advanced acoustic simulation software, which enables both rapid preliminary predictions and more detailed, "ray tracing" analysis.

Secondly, the thesis includes acoustic measurements conducted in the venue. These measurements serve two purposes: a) evaluation of the accuracy of the initial theoretical estimation mentioned above and b) determination of the applications for which the venue is considered most appropriate. Ultimately, the methodology aims to address a broader question: whether reliable predictions of a venue's acoustic behavior can be obtained prior to its construction — an issue of particular importance for architectural decision making as well as for the design of the most appropriate electroacoustic system.

For the acoustic simulation, Ease software was used (primarily version 4.4, with version 5 used for specific parts of the analysis). The measurement process makes use of Room EQ Wizard (v5.31.3) in combination with professional acoustic measurement equipment, specifically instruments manufactured by NTi Audio.

Keywords

reverberation time, clarity, acoustic simulation, ray tracing method

Περιεχόμενα

Περίληψη **5**
Abstract **6**
Περιεχόμενα **7**
Κατάλογος Σχημάτων **9**
Κατάλογος Πινάκων **12**
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή **13**
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Μέρος & Ακουστικές Παράμετροι **15**
2.1 Χρόνος αντήχησης 15
2.2 Δείκτης Ευκρίνειας (clarity) C_{50} 18
2.3 Δείκτης Ευκρίνειας (clarity) C_{80} 21
2.4 Διακριτικότητα (definition) D_{50} 22
2.5 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI 22
Κεφάλαιο 3 Γενική Περιγραφή **25**
3.1 Χαρακτηριστικά του αμφιθεάτρου 25
3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά 25
3.1.2 Διαμόρφωση οροφής 26
3.1.3 Διαμόρφωση πλευρικών τοίχων 29
3.1.4 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελύφους 30
3.1.5 - Το φαινόμενο του πλαταγισμού 32
3.2 Τα υλικά του κελύφους 33
3.2.1 Ακουστικό Panel 35
3.2.2 Καθίσματα 39
3.2.3 Διάτρητη γυψοσανίδα 44
3.2.4 Κοινή γυψοσανίδα 47
3.2.5 LED Wall 52
3.2.6 Plexiglass 53
Κεφάλαιο 4 Ηλεκτρακουστικό Σύστημα **55**
4.1 Εξοπλισμός 55
4.1.1 Ηχείο Array 55
4.1.2 Ηχείο Front Fill 59
4.1.3 Subwoofer 61
4.1.4 Πλευρικές Ηχοστήλες 61
4.2 Παράμετροι ρύθμισης ηλεκτρακουστικού συστήματος 63
4.2.1 Ducker 64
4.2.2 Gate 65
4.2.3 Crossover 65
4.3 - Αποτελέσματα ακουστικής προσομοίωσης 66
Κεφάλαιο 5 Υπολογισμοί μέσω προσομοίωσης **69**
5.1 Standard mapping 70
4.1.1 Standard Mapping με ηχείο monitor 72
4.1.2 Standard Mapping με omni πηγή 73
5.2 Standard mapping with reflections 74
5.3 Στατιστικές εκτιμήσεις χρόνου αντήχησης 75
5.4 Ακουστική προσομοίωση (Ease Ray Tracing) 83
5.4.1 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης 85
5.4.2 Εκτίμηση δεικτών ευκρίνειας και καταληπτότητας 89
Κεφάλαιο 6 Εκτέλεση Μετρήσεων στο Χώρο **93**

6.1 Διαθέσιμος εξοπλισμός 93
6.1.1 Ηχόμετρο 93
5.1.2 Μικρόφωνο 94
6.1.3 Κάρτα Ήχου (Interface) 95
6.1.4 Λογισμικό REW V5.31.3 96
6.2 Περιγραφή διαδικασίας 97
6.2.1 Έναρξη – Καλιμπράρισμα κάρτας ήχου 97
6.2.2 Μετρήσεις με το λογισμικό REW 102
6.2.3 Μέτρηση θορύβου 105
6.2.4 Μέτρηση SPL 112
6.2.5 Μετρήσεις δεικτών ευκρίνειας C_{50} & C_{80} 115
6.2.6 Μετρήσεις χρόνου αντήχησης T_{20}, T_{30}, EDT 120
6.3 Μετρήσεις με το ηχόμετρο NTi Audio XL2 125
6.3.1 Μέτρηση STI με χρήση της πηγής monitor 125
6.3.2 Μέτρηση STI με χρήση ειδικού μετρητικού ηχείου 127
6.3.3 Μέτρησεις μέσω του ηλεκτρακουστικού συστήματος της αίθουσας 129
6.4 Λοιπές παρατηρήσεις 136
6.4.1 Φαινόμενο flutter echo 136
6.4.2 Ανακλάσεις από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου 141
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα 149
Βιβλιογραφία 153
Παράρτημα 1 Πιστοποιητικό ακουστικής απόδοσης panel 155
Παράρτημα 2 Πιστοποιητικό ακουστικής απόδοσης καθισμάτων 169
Παράρτημα 3 Προδιαγραφές διάτρητης γυψοσανίδας 183
Παράρτημα 4 Διάγραμμα AV συστήματος 190
Παράρτημα 5 Εκτιμήσεις, υπολογισμοί, μετρήσεις RT60 197
Ζώνη LL (Θέσεις LL_8, LL_6, LL_4, LL_2, LL_1) 198
Ζώνη L (Θέσεις L_8, L_6, L_4, L_2, L_1) 201
Ζώνη C (Θέσεις C_7, C_5, C_3, C_1) 204
Ζώνη R (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1) 206
Ζώνη RR (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1) 209
Παράρτημα 6 Μετρήσεις C_{50}, C_{80}, D_{50} 212
Ζώνη LL (Θέσεις LL_8, LL_6, LL_4, LL_2, LL_1) 213
Ζώνη L (Θέσεις L8, L6, L4, L2, L1) 214
Ζώνη C (C_7, C_5, C_3, C_1) 216
Ζώνη R (R_8, R_6, R_4, R_2, R_1) 217
Ζώνη RR (RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1) 219
Παράρτημα 7 Ray Tracing Reflectograms 221
Ζώνη LL (Θέσεις LL8, LL6, LL4, LL2, LL1) 221
Ζώνη L (Θέσεις L_8, L_6, L_4, L_2, L_1) 223
Ζώνη C (Θέσεις C_7, C_5, C_3, C_1) 225
Ζώνη (Θέσεις R_8, R_6, R_4, R_2, R_1) 227
Ζώνη (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1) 229
Παράρτημα 8 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης / Κρουστική απόκρουση 231
Ζώνη 8 (LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8) 231
Ζώνη 6 (LL6, L6, C5, R6, RR6) 232
Ζώνη 4 (LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4) 234
Ζώνη 2 (LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2) 236
Ζώνη 1 (LL_1, L_1, R_1, RR_1) 237
Μπαλκόνι (BL. BC, BR) 239

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1.5 Ομοιόμορφη δέσμη ανακλάσεων λόγω των βαθμίδων της οροφής 28
Διάγραμμα 3.2.7 Συντελεστής ηχοαπορρόφησης ακουστικού panel πλευρικών τοίχων 37
Διάγραμμα 3.2.9 Συντελεστής σκέδασης (S-Curve, εκτίμηση από το λογισμικό Ease) 38
Διάγραμμα 3.2.10 Συντελεστής σκέδασης ακουστικού panel πλευρικών τοίχων 39
Διάγραμμα 3.2.13 Συντελεστής απορρόφησης καθίσματος αμφιθεάτρου 40
Διάγραμμα 3.2.18 Συντελεστής σκέδασης καθίσματος αμφιθεάτρου 43
Διάγραμμα 3.2.22 Συντελεστής απορρόφησης διάτρητης γυψοσανίδας 46
Διάγραμμα 3.2.24 Συντελεστής σκέδασης διάτρητης γυψοσανίδας 47
Διάγραμμα 3.2.25 Συντελεστής απορρόφησης κοινής γυψοσανίδας 48
Διάγραμμα 3.2.27 Συντελεστής σκέδασης για γυψοσανίδα με επένδυση λείου καπλαμά 49
Διάγραμμα 3.2.29 Συντελεστής σκέδασης βαμμένης γυψοσανίδας 50
Διάγραμμα 3.2.33 Συντελεστής απορρόφησης επιφάνειας LED Wall 53
Διάγραμμα 3.2.34 Συντελεστής σκέδασης βαμμένης γυψοσανίδας 53
Διάγραμμα 3.2.35 Συντελεστής απορρόφησης και συντελεστής σκέδασης plexiglass 54
Σχήμα 4.1.2 Κάλυψη αμφιθεάτρου με array cluster (τομή) και συχνοτική απόκριση 56
Σχήμα 4.1.5 Κάλυψη αμφιθεάτρου (direct SPL, A-weighted) με array cluster 58
Σχήμα 4.1.6 Κάλυψη αμφιθεάτρου (direct SPL, A-Weighted) με array cluster και front fill 59
Διάγραμμα 4.3.1 Direct SPL, σενάριο λειτουργίας πλευρικών ηχοστηλών 66
Διάγραμμα 4.3.2 Total SPL, σενάριο λειτουργίας πλευρικών ηχοστηλών 67
Διάγραμμα 4.3.3 Direct SPL, σενάριο λειτουργίας main array ηχείων 67
Διάγραμμα 4.3.4 Total SPL, σενάριο λειτουργίας main array ηχείων 68
Διάγραμμα 5.1.4 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / monitor 72
Διάγραμμα 5.1.5 Κατανομή STI / monitor 72
Διάγραμμα 5.1.6 Ευκρίνεια C_{50} & C_{80} (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / monitor 72
Διάγραμμα 5.1.7 STI (μέση τιμή ± τυπική αποκλιση) / monitor 72
Διάγραμμα 5.1.8 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / omni πηγή 73
Διάγραμμα 5.1.9 Κατανομή STI / omni πηγή 73
Διάγραμμα 5.1.10 Ευκρίνεια C_{50} & C_{80} (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / omni πηγή 73
Διάγραμμα 5.1.11 Δείκτης STI (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / omni πηγή 73
Διάγραμμα 5.2.3 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / monitor 75
Διάγραμμα 5.2.4 Κατανομή total SPL (Non Weighted, Broad Band) / monitor 75
Διάγραμμα 5.2.5 Κατανομή STI / monitor 75
Διάγραμμα 5.3.7 Στατιστικές εκτιμήσεις RT_{60} (Sabine, Norris-Eyring, Millington-Sette) 81
Διάγραμμα 6.2.4 SPL κάρτας ήχου κατά τη δοκιμή (επίπεδη καμπύλη στην περιοχή 20Hz-20kHz) 99
Διάγραμμα 6.2.14 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη RR (RR_1, RR_2, RR_4, RR_6, RR_8) 105
Διάγραμμα 6.2.15 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη R (R_1, R_2, R_4, R_6, R_8) 105
Διάγραμμα 6.2.16 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη C (C_1, C_3, C_5, C_7, BL, BC, BR) 106
Διάγραμμα 6.2.17 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη L (L_1, L_2, L_4, L_6, L_8) 106
Διάγραμμα 6.2.18 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη LL (LL_1, LL_2, LL_4, LL_6, LL_8) 107
Διάγραμμα 6.2.19 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 8 (LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8) 107
Διάγραμμα 6.2.20 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 6 (LL_6, L_6, C_5, R_6, RR_6) 108
Διάγραμμα 6.2.21 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 4 (LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4) 108
Διάγραμμα 6.2.22 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 2 (LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2) 109
Διάγραμμα 6.2.23 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 1 (LL_1, L_1, BL, BC, BR, R_1, RR_1) 109
Διάγραμμα 6.2.24 Noise Floor όλων των σημείων & Μέση Τιμή 110
Διάγραμμα 6.2.25 Noise Floor όλων των σημείων & Μέση Τιμή (χωρίς τις 5 ακραίες τιμές) 110
Διάγραμμα 6.2.27 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8 (Ζώνη 8) 112
Διάγραμμα 6.2.28 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_6, L_6, C_5, R_6, RR_6 (Ζώνη 6) 112
Διάγραμμα 6.2.29 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4 (Ζώνη 4) 113
Διάγραμμα 6.2.30 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2 (Ζώνη 2) 113
Διάγραμμα 6.2.31 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_1, L_1, BL, BC, BR, R_1, RR_1 (Ζώνη 1) 114
Διάγραμμα 6.3.8 Μέτρηση $RT_{60(T30)}$ με ηχόμετρο XL2 (NTi Audio), πρώτη ομάδα μετρήσεων 131
Διάγραμμα 6.3.9 Μέτρηση $RT_{60(T30)}$ με ηχόμετρο XL2 (NTi Audio), δεύτερη ομάδα μετρήσεων 132
Διάγραμμα 6.4.8 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας στο σημείο LL_8 142

Διάγραμμα 6.4.9 Καμπύλες χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 8 143
Εικόνα 6.4.10 Απόσταση της κάθε ζώνης από το πίσω άκρο του αμφιθεάτρου (τομή) 144
Διάγραμμα 6.4.11 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 8 (smoothing στα 2msec) 144
Διάγραμμα 6.4.12 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 6 (smoothing στα 2msec) 145
Διάγραμμα 6.4.13 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 4 (smoothing στα 2msec) 146
Διάγραμμα 6.4.14 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 2 (smoothing στα 2msec) 147
Διάγραμμα 6.4.15 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 1 (smoothing στα 2msec) 147
Διάγραμμα Π5.1 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_8 198
Διάγραμμα Π5.2 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_6 198
Διάγραμμα Π5.3 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_4 199
Διάγραμμα Π5.4 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_2 199
Διάγραμμα Π5.5 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_1 200
Διάγραμμα Π5.6 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_8 201
Διάγραμμα Π5.7 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_6 201
Διάγραμμα Π5.8 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_4 202
Διάγραμμα Π5.9 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_2 202
Διάγραμμα Π5.10 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_1 203
Διάγραμμα Π5.11 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_7 204
Διάγραμμα Π5.12 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_5 204
Διάγραμμα Π5.13 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_3 205
Διάγραμμα Π5.14 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_1 205
Διάγραμμα Π5.15 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_8 206
Διάγραμμα Π5.16 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_6 206
Διάγραμμα Π5.17 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_4 207
Διάγραμμα Π5.18 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_2 207
Διάγραμμα Π5.19 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_1 208
Διάγραμμα Π5.20 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_8 209
Διάγραμμα Π5.21 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_6 209
Διάγραμμα Π5.22 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_4 210
Διάγραμμα Π5.23 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_2 210
Διάγραμμα Π5.24 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_1 211
Διάγραμμα Π6.1 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_8 213
Διάγραμμα Π6.2 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_6 213
Διάγραμμα Π6.3 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_4 213
Διάγραμμα Π6.4 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_2 214
Διάγραμμα Π6.5 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_1 214
Διάγραμμα Π6.6 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_8 214
Διάγραμμα Π6.7 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_6 215
Διάγραμμα Π6.8 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_4 215
Διάγραμμα Π6.9 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_2 215
Διάγραμμα Π6.10 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_1 216
Διάγραμμα Π6.11 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_7 216
Διάγραμμα Π6.12 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_5 216
Διάγραμμα Π6.13 Μετρήσεις D50 (%), C50 (dB), C80 (dB) / Θέση C3 217
Διάγραμμα Π6.14 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_1 217
Διάγραμμα Π6.15 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_8 217
Διάγραμμα Π6.16 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_6 218
Διάγραμμα Π6.17 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_4 218
Διάγραμμα Π6.18 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_2 218
Διάγραμμα Π6.19 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_1 219
Διάγραμμα Π6.20 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_8 219
Διάγραμμα Π6.21 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_6 219
Διάγραμμα Π6.22 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_4 220
Διάγραμμα Π6.23 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_2 220
Διάγραμμα Π6.24 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_1 220
Διάγραμμα Π7.1 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_8 221
Διάγραμμα Π7.2 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_6 221

Διάγραμμα Π7.3 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_4 222
Διάγραμμα Π7.4 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_2 222
Διάγραμμα Π7.5 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_1 222
Διάγραμμα Π7.6 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_8 223
Διάγραμμα Π7.7 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_6 223
Διάγραμμα Π7.8 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_4 223
Διάγραμμα Π7.9 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_2 224
Διάγραμμα Π7.10 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_1 224
Διάγραμμα Π7.11 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_7 225
Διάγραμμα Π7.12 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_5 225
Διάγραμμα Π7.13 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_3 226
Διάγραμμα Π7.14 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_1 226
Διάγραμμα Π7.15 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_8 227
Διάγραμμα Π7.16 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_6 227
Διάγραμμα Π7.17 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_4 227
Διάγραμμα Π7.18 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_2 228
Διάγραμμα Π7.19 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_1 228
Διάγραμμα Π7.20 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_8 229
Διάγραμμα Π7.21 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_6 229
Διάγραμμα Π7.22 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_4 229
Διάγραμμα Π7.23 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_2 230
Διάγραμμα Π7.24 Διάγραμμα Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_1 230
Διάγραμμα Π8.1 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_8 231
Διάγραμμα Π8.2 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_8 231
Διάγραμμα Π8.3 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_7 231
Διάγραμμα Π8.4 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_8 232
Διάγραμμα Π8.5 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_8 232
Διάγραμμα Π8.6 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_6 232
Διάγραμμα Π8.7 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_6 233
Διάγραμμα Π8.8 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_5 233
Διάγραμμα Π8.9 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_6 233
Διάγραμμα Π8.10 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_6 234
Διάγραμμα Π8.11 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_4 234
Διάγραμμα Π8.12 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_4 234
Διάγραμμα Π8.13 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_3 235
Διάγραμμα Π8.14 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_4 235
Διάγραμμα Π8.15 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_4 235
Διάγραμμα Π8.16 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_2 236
Διάγραμμα Π8.17 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_2 236
Διάγραμμα Π8.18 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_1 236
Διάγραμμα Π8.19 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_2 237
Διάγραμμα Π8.20 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_2 237
Διάγραμμα Π8.21 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_1 237
Διάγραμμα Π8.22 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_1 238
Διάγραμμα Π8.23 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_1 238
Διάγραμμα Π8.24 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_1 238
Διάγραμμα Π8.25 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BL 239
Διάγραμμα Π8.26 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BC 239
Διάγραμμα Π8.27 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BR 239

Κατάλογος Πινάκων

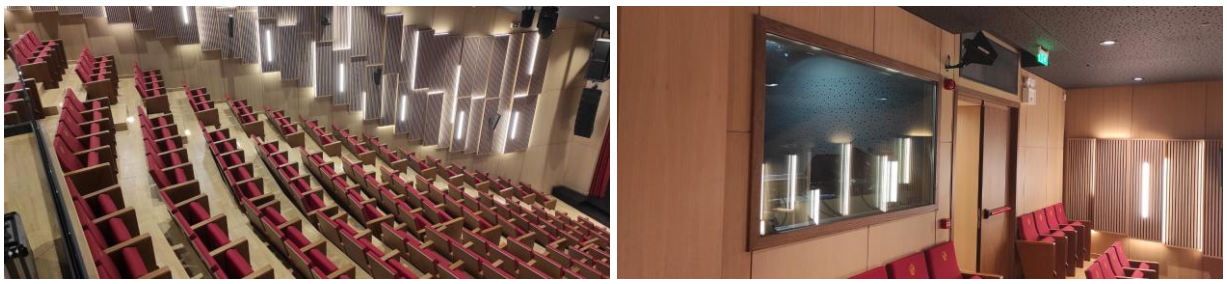
Πίνακας 2.5.1 Βαθμός αντιληπτότητας σύμφωνα με το δείκτη STI 24
Πίνακας 3.1.8 Ενδεδειγμένοι όγκοι χώρου ανά ακροατή 32
Πίνακας 3.2.1 Υλικά κελύφους αμφιθεάτρου 34
Πίνακας 3.2.2 Κάλυψη κελύφους για κάθε υλικό 35
Πίνακας 3.2.17 Συντελεστές απορρόφησης (βαριά-ελαφριά/άδεια-κατειλημμένα καθίσματα) 43
Πίνακας 4.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου array 55
Πίνακας 4.1.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου front fill 60
Πίνακας 4.1.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου subwoofer 61
Πίνακας 4.1.11 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλευρικής ηχοστήλης 63
Πίνακας 5.3.3 Λίστα επιφανειών μοντέλου Ease (αποσπάσματα) 77
Πίνακας 5.3.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας Συντελεστών Ηχοαπορροφητικότητας 77
Πίνακας 5.3.5 Μοντελοποίηση στο Ease. Επιφάνειες & συντελεστές ηχοαπορροφητικότητας 78
Πίνακας 5.3.6 Στατιστικές εκτιμήσεις RT_{60} (Sabine, Norris-Eyring, Millington-Sette) 81
Πίνακας 6.2.32 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 8 115
Πίνακας 6.2.33 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 6 116
Πίνακας 6.2.34 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 4 117
Πίνακας 6.2.35 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 2 118
Πίνακας 6.2.36 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 1 119
Πίνακας 6.2.37 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 8 120
Πίνακας 6.2.38 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 6 121
Πίνακας 6.2.39 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 4 122
Πίνακας 6.2.40 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 2 123
Πίνακας 6.2.41 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 1 124
Πίνακας 6.3.3 Δοκιμαστικά Σήματα (Test Signals) του TalkBox (NTI Audio) 126
Πίνακας 6.3.10 Μετρήσεις STI / ζώνη RR 133
Πίνακας 6.3.11 Μετρήσεις STI / ζώνη R 133
Πίνακας 6.3.12 Μετρήσεις STI / ζώνη C 134
Πίνακας 6.3.13 Μετρήσεις STI / ζώνη L 134
Πίνακας 6.3.14 Μετρήσεις STI / ζώνη LL 135
Πίνακας 6.3.15 Μετρήσεις STI / ζώνη σκηνής και μπαλκονιού 135

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της ακουστικής και ηλεκτρακουστικής συμπεριφοράς του αμφιθεάτρου του Ιωνικού Κέντρου της Ιεράς Μητροπόλεως Νέας Ιωνίας, Φιλαδελφείας, Ηρακλείου και Χαλκηδόνος. Ο χώρος, 360 θέσεων, σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και λειτουργεί από το 2026 ως ένας πολυχώρος εκδηλώσεων, προβολών, παραστάσεων και λοιπών δραστηριοτήτων απευθυνόμενος τόσο στην τοπική κοινωνία όσο και στην ευρύτερη επικράτεια. Η πολιτισμική ταυτότητα του χώρου επικεντρώνεται στη διατήρηση της ταυτότητας του Μικρασιατικού Ελληνισμού.



Εικόνα 1.1 Άποψη της εισόδου του Ιωνικού Κέντρου



Εικόνα 1.2 Απόψεις του αμφιθεάτρου (καθίσματα & παράθυρο του Control Room)



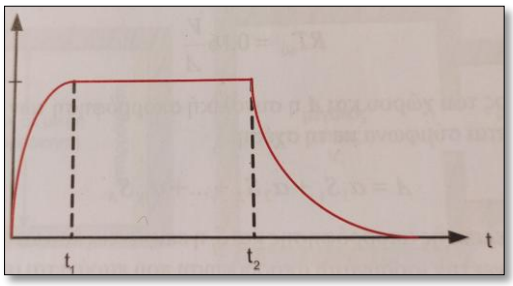
Εικόνα 1.3 Άποψη της σκηνής του Ιωνικού Κέντρου

Ο χώρος του Ιωνικού Κέντρου, εκτός από το προς μελέτη αμφιθέατρο, περιλαμβάνει εντευκτήριο, αίθουσες παρουσιάσεων, εστίες φιλοξενίας, παιδικό σταθμό, υπόγειο parking, έναν πλούσιο περιβάλλοντα χώρο, ενώ στο ίδιο οικοδομικό τετράγωνο θα λειτουργεί ναός ο οποίος σήμερα βρίσκεται υπό ανέγερση. Η μελέτη του κτιρίου εκπονήθηκε από την εταιρεία ΔΕΚΑΘΛΟΝ Α.Ε. Το έργο ανελήφθη από την Κοινοπραξία ΤΕΡΝΑ / ΕΚΤΕΡ Α.Ε. και παραδόθηκε προς χρήση την άνοιξη του 2026.

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Μέρος & Ακουστικές Παράμετροι

2.1 Χρόνος αντήχησης

Αρχικά θα αναφερθούμε στο χρόνο αντήχησης ως το μέγεθος στο οποίο θα βασιστούμε σε ένα μεγάλο μέρος της ανάλυσης που θα ακολουθήσει. Ως χρόνο αντήχησης RT_{60} ενός κλειστού χώρου ορίζουμε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εξασθένιση μιας ηχητικής διέγερσης κατά 60dB (ή, ισοδύναμα, κατά 1.000.000 φορές). Στο πιο κάτω σχήμα, η ηχητική πηγή εκπέμπει ήχο και ο κλειστός χώρος «γεμίζει» ηχητική ενέργεια τη στιγμή t_1. Η στάθμη σταθεροποιείται το διάστημα από t_1 έως t_2. Τη στιγμή t_2 η πηγή διακόπτεται και η εξασθένιση της ηχητικής ενέργειας στο χώρο λαμβάνει τη φθίνουσα παραβολική μορφή που παριστάνεται μετά τη στιγμή t_2.



Εικόνα 2.1.1 Η ηχητική ενέργεια σε κλειστό χώρο (Λουτρίδης, 2015, σ. 165)

Η παραβολική αυτή μορφή της ηχητικής ενέργειας αντιστοιχεί σε μια γραμμική μείωση της ενέργειας όταν αυτή εκφράζεται σε dB. Ο χρόνος αντήχησης είναι ένα κατ'έξοχήν μετρήσιμο μέγεθος καθώς υπάρχει η δυνατότητα, με κατάλληλα όργανα, να καταγράψει κανείς με λεπτομέρεια όλα τα χαρακτηριστικά της εξασθένισης ενός ήχου διέγερσης στο χώρο. Προϋπόθεση για μια τέτοια μέτρηση είναι το σήμα διέγερσης που χρησιμοποιείται (και του οποίου η εξασθένιση κατά 60dB και μας ενδιαφέρει) να βρίσκεται σε μια στάθμη της τάξης των 60 + 10 = 75dB πάνω από το θόρυβο υποβάθρου στο χώρο. Κάτι τέτοιο πολλές δεν είναι εφικτό με τα διαθέσιμα τεχνικά και σε περιπτώσεις θορύβου υποβάθρου της τάξης των 40 ή 50dB (NTi Audio, n.d.).

Αυτό το πρόβλημα οδήγησε σε συγκεκριμένες προβλέψεις αναφορικά με εναλλακτικές προσεγγίσεις μέτρησης του χρόνου αντήχησης, οι οποίες καταγράφονται ρητά στο πρότυπο ISO 3382-1 (International Organization for Standardization, 2009). Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι ένα απόλυτα διάχυτο ακουστικό πεδίο στο προς μελέτη χώρο (Λουτρίδης, 2015, σ. 165), διότι στην περίπτωση αυτή η κλίση της (λογαριθμισμένης, δηλαδή εκφρασμένης σε dB)

εξασθένισης της στάθμης είναι σταθερή και άρα μπορεί να εξαχθεί η εκτίμησή της χωρίς το φαινόμενο να ολοκληρώσει την πτώση των 60dB.

Συγκεκριμένα, ο χρόνος αντήχησης μπορεί να προκύψει από το διπλασιασμό του χρόνου εξασθένησης ενός σήματος διέγερσης κατά 30dB (ή, ισοδύναμα, κατά 1.000 φορές). Στην περίπτωση αυτή το μέγεθος παριστάνεται ως T_{30}. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι ότι απαιτείται ένα σήμα διέγερσης τουλάχιστον 30+15=45dB υψηλότερο από το θόρυβο υποβάθρου για να ληφθεί μια τέτοια μέτρηση (ISO, 2009, σ. 7). Μια τέτοια στάθμη είναι σαφώς εφικτή με συμβατικά μέσα. Ας σημειωθεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382 η αντιπροσωπευτική εξασθένιση κατά 30dB δεν μετριέται από τη στιγμή t=0 αλλά από τη στιγμή $t_{(-5dB)}$ (στιγμή κατά την οποία η εξασθένιση της αρχικής διέγερσης είναι -5dB) έως τη στιγμή $t_{(-35dB)}$ (στιγμή κατά την οποία η εξασθένιση έχει φτάσει στα -35dB).

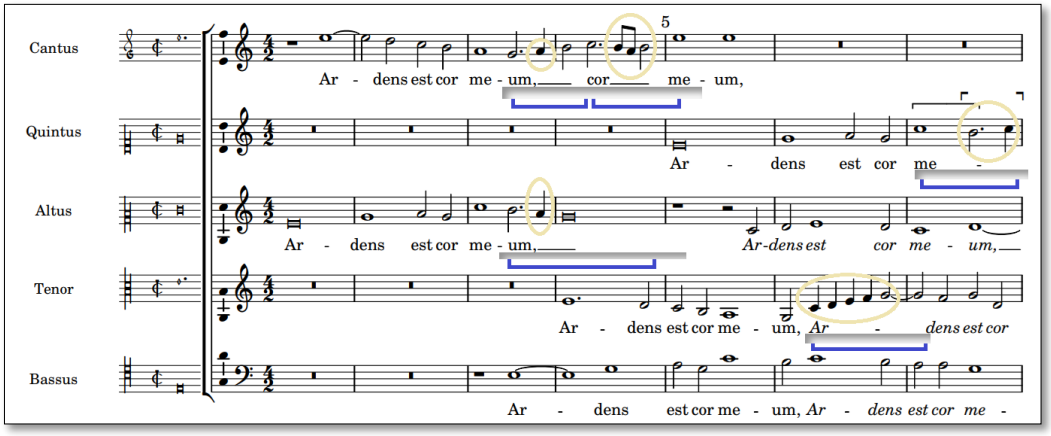
Μια ανάλογη προσέγγιση, απαραίτητη για συνθήκες υψηλότερου θορύβου υποβάθρου, είναι η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης τριπλασιάζοντας την εξασθένιση κατά 20dB (ή, ισοδύναμα, κατά 100 φορές). Στην περίπτωση αυτή το μέγεθος παριστάνεται ως T_{20}. Το περιθώριο (headroom) για τη στάθμη σήματος διέγερσης είναι 15+20=35dB πάνω από το θόρυβο υποβάθρου (ISO, 2009, σ. 2). Αντίστοιχα με τα παραπάνω, ως αντιπροσωπευτική πτώση δεν θεωρούμε τη μείωση κατά 20dB που μετριέται από τη στιγμή t=0 αλλά από τη στιγμή $t_{(-5dB)}$ (στιγμή κατά την οποία η εξασθένιση της αρχικής διέγερσης είναι -5dB) έως τη στιγμή $t_{(-25dB)}$ (στιγμή κατά την οποία η εξασθένιση έχει φτάσει στα -25dB).

Οι εκτιμήσεις RT_{60}, T_{30} και T_{20} θεωρούνται γενικά ισοδύναμες εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρονται στο ISO 3382-1. Ωστόσο, ανατρέχοντας πρόχειρα στις προϋποθέσεις αυτές γίνεται αντιληπτό ότι η ισοδυναμία αυτή βασίζεται σε ιδανικές συνθήκες και εξοπλισμό (για παράδειγμα, η πηγή διέγερσης επιβάλλεται να είναι παντοκατευθυντική, το πεδίο πλήρως διάχυτο κτλ).

Ο χρόνος αντήχησης επηρεάζει την καταληπτότητα ομιλίας καθώς παράμετροι όπως η σειρά ακρόασης φθόγγων και η χρονική απόσταση μεταξύ τους επηρεάζονται, με επιπτώσεις στη δυνατότητα του ακροατή να αντιληφθεί το περιεχόμενο ομιλίας.

Η επίδραση του χρόνου αντήχησης στην καταληπτότητα της ομιλίας έχει μελετηθεί ενδελεχώς από τον 19^{ο} αιώνα και έπειτα, ωστόσο ο ρόλος της απαντάται σε διάφορα πεδία. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα απαντάται στην εξέλιξη της πολυφωνικής (εκκλησιαστικής) μουσικής του 16^{ου} αιώνα. Με δεδομένους τους μεγάλους όγκους των καθολικών εκκλησιών

και των ιδιαίτερα ανακλαστικών επιφανειών του κελύφους τους, η σύνθεση *φωνητικής* εκκλησιαστικής μουσικής αντιμετώπισε σημαντικούς περιορισμούς που σχετίζονταν ευθέως με τους εξαιρετικά υψηλούς χρόνους αντήχησης στους χώρους αυτούς. Στο πλαίσιο αυτό, η μουσική φόρμα προσαρμόστηκε και τελειοποιήθηκε επί αυτού του ακουστικού («αρχιτεκτονικού» θα έλεγε κανείς) περιορισμού. Έτσι, οι *συνθέσεις εκκλησιαστικού οργάνου* της εποχής αξιοποιούν με πολλούς τρόπους τους υψηλούς χρόνους αντήχησης και την επιβλητικότητα που αυτοί εισφέρουν στο ακουστικό αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με γρήγορα δεξιοτεχνικά μέρη (τα οποία αναπόφευκτα «θολώνουν» σε ένα περιβάλλον υψηλής αντήχησης). Στον αντίποδα, οι *φωνητικές (πολυφωνικές)* εκκλησιαστικές συνθέσεις την εποχής εξελίσσουν το χαρακτήρα τους με βάση τις μεγάλες αξίες των φωνών, την αποφυγή πυκνών / ζωηρών σημείων, ενώ οι όποιες γρήγορες κινήσεις (μικρές αξίες) συνοδεύονται από κράτημα φωνηέντων και όχι από νέες συλλαβές, οι οποίες αν εκφέρονταν σε γρήγορα περάσματα δεν θα ήταν ακουστές (βλ. απόσπασμα παρτιτούρας που ακολουθεί). Με τον τρόπο αυτό η μουσική φόρμα υπηρετεί την αρχιτεκτονική ιδιαιτερότητα και χρησιμοποιεί το χρόνο αντήχησης για ένα επιβλητικό αποτέλεσμα που δεν θα λειτουργήσει εις βάρος της καταληπτότητας του κειμένου.



Εικόνα 2.1.2 Η εισαγωγή της μελοποίησης του «Ardens est cor mum» από τον Pieruili da Palestrina. Ακολουθεί πιστά τον κανόνα της χρήσης «γρήγορων» νοτών μόνο ως περάσματα. Η διατύπωση συλλαβών γίνεται μόνο με μεγάλες αξίες, μια προσαρμογή που επιβάλλεται όταν οι χρόνοι αντήχησης είναι εξαιρετικά υψηλοί (καθολικοί ναοί)

Ως μια ιστορική παρέκβαση, αξίζει να αναφέρουμε τη Σύνοδο του Τρέντο (1545-1563) η οποία αποτέλεσε και βασικό στοιχείο της καθολικής αντιμεταρρύθμισης χαράσσοντας τις αναγκαίες διαχωριστικές γραμμές απέναντι στην προτεσταντική μεταρρύθμιση. Η πολυφωνική μουσική βρέθηκε σε ένα κρίσιμο στάδιο, καθώς η Σύνοδος καταδίκαζε την παρακμή της εκκλησιαστικής πολυφωνικής μουσικής, δηλητηριασμένης από κοσμικές επιρροές της εποχής.

Η μελοποίηση εκκλησιαστικών κειμένων χαρακτηριζόταν από την αδυναμία ακρόασης των κειμένων από το εκκλησίασμα. Εφόσον δεν ευθύνονταν πάντα οι χορωδοί (τα μέλη δηλαδή της χορωδίας), οι υπαίτιοι έπρεπε να είναι οι ίδιοι οι συνθέτες. Σε κάθε περίπτωση, απαίτηση της Συνόδου ήταν τα μελοποιημένα εκκλησιαστικά κείμενα να έχουν στόχο όχι την κενή απόλαυση στο αυτί αλλά το να καταστήσουν τα ιερά λόγια αντιληπτά με σαφήνεια από όλους του πιστούς (Headington, 1994, σ. 104). Ο μύθος αναφέρει τη Λειτουργία του Πάπα Μάρκελλου του Giovanni Pierluigi da Palestrina (1525 - 1594) ως το κομμάτι που έπεισε τους καρδινάλιους ότι η πολυφωνική μουσική μπορούσε να επιτελέσει το θρησκευτικό της ρόλο στους χώρους λατρείας της εποχής (δηλαδή σε χώρους εξαιρετικά υψηλών χρόνων αντήχησης) και έτσι αποφεύχθηκε η καθολική απαγόρευση της πολυφωνικής εκκλησιαστικής μουσικής (οπ.π., σελ. 105).

2.2 Δείκτης Ευκρίνειας (clarity) C_{50}

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στο λεγόμενο δείκτη ευκρίνειας λόγου (Speech Clarity Index – C_{50}). Η χρήση αυτού του δείκτη βοηθά στην ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ της ενέργειας πρώιμων ανακλάσεων και όψιμων ανακλάσεων ενός σήματος που εξασθενεί εντός ενός αντηχητικού χώρου (Κοντομίχος, Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013, σσ. 150-151). Ο δείκτης αυτός μας δίνει πληροφορίες σχετικά με την ευκρίνεια και την καταληπτότητα της ανθρώπινης ομιλίας.

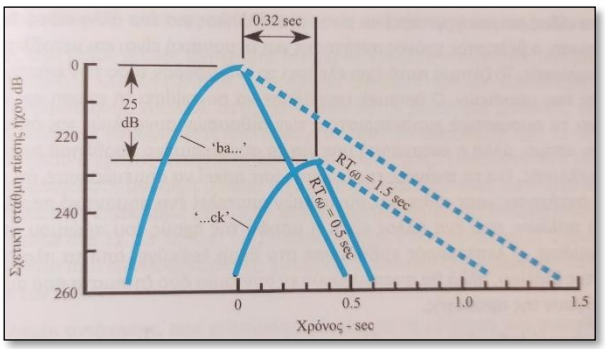
Συγκεκριμένα, ο δείκτης C_{50} ορίζεται ως το κλάσμα της ηχητικής ενέργειας που καταφτάνει στη θέση μέτρησης (ή θέση ακρόασης) τα πρώτα 50msec από την άφιξη προς την υπόλοιπη ενέργεια, που καταφτάνει δηλαδή μετά τα πρώτα αυτά 50msec. Η μαθηματική έκφραση του δείκτη αυτού γίνεται κατανοητή ξεκινώντας από την κρουστική απόκριση $h(t)$. Εφόσον το τετράγωνο της κρουστικής απόκρισης εκφράζει *τη στιγμιαία (οριακή) ακουστική ενέργεια* που φτάνει στη θέση του ακροατή, το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης από μια θέση t_1 έως μια θέση t_2 εκφράζει *την ενέργεια* ανάμεσα σε αυτές τις δύο χρονικές στιγμές. Ο παραπάνω λόγος ενεργειών εκφράζεται μαθηματικά με τον ακόλουθο τύπο:

$$C_{50} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{0\,ms}^{50\,ms} h(t)^2 dt}{\int_{50\,ms}^{\infty} h(t)^2 dt} \qquad \text{(Σχέση 2.1)}$$

Όπως βλέπουμε ο δείκτης παίρνει τη μορφή μεγέθους μετρούμενου σε dB εφόσον το κλάσμα λογαριθμίζεται και πολλαπλασιάζεται επί 10.

Η σχέση που εκφράζει ο δείκτης C_{50} μεταξύ πρώιμης ενέργειας (σχηματικά: προ των 50 msec) και όψιμης ενέργειας (σχηματικά: μετά τα 50msec) αφορά την αντιληπτική διάκριση (ή, ακριβέστερα, διακριτότητα, δηλαδή δυνατότητα διάκρισης) συλλαβών ή συμφώνων κατά την ομιλία. Μια υψηλή τιμή του C_{50} αντιστοιχεί σε μια «κυριαρχία» της πρώιμης ενέργειας σε σύγκριση με την όψιμη ενέργεια, κάτι που ευνοεί την ευκρίνεια και την καταληπτότητα του λόγου. Αντιθέτως, η κυριαρχία της όψιμης ενέργειας έναντι της πρώιμης συνεπάγεται αυξημένη «θολότητα» του ηχητικού πεδίου, η οποία επιδρά αρνητικά στην ευκρίνεια του λόγου.

Για να γίνει κατανοητό αυτό είναι πολύ χρήσιμο το παράδειγμα των Everest & Pohlmann (2011, σ. 236) για την επίδραση του χρόνου αντήχησης στην καταληπτότητα της λέξης «back», της οποίας ο αρχικός φθόγγος «ba~» βρίσκεται περίπου 25dB πάνω από την κατάληξη «~ck». Είναι σαφές ότι ο αρχικός φθόγγος είναι ήδη αρκετά δυνατότερος (διαφορά της τάξης των 25dB). Αν ο χρόνος αντήχησης είναι αρκετά υψηλός ώστε ο αρχικός φθόγγος να διατηρήσει την αρχική υψηλή στάθμη του, ο φθόγγος που έπεται, δηλαδή η κατάληξη «~ck», δεν θα ακουστεί. Αυτό, όπως είναι φυσικό, συνεπάγεται μη καταληπτότητα της λέξης καθώς πολλές άλλες λέξεις (bat, bass, bath κτλ) έχουν τον ίδιο αρχικό φθόγγο, την ίδια δομή και διαφοροποιούνται μόνο ως προς την κατάληξη (οπ.π.). Η περίπτωση αυτή περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα, όπου το σενάριο ενός χρόνου αντήχησης 1.5sec οδηγεί τον τελικό φθόγγο να βρίσκεται αρκετά dB κάτω από την αντήχηση του αρχικού φθόγγου. Αντιθέτως, με χρόνο χαμηλό αντήχησης (σχηματικά, της τάξης των 0.5sec στο παρακάτω διάγραμμα) η κατάληξη «~ck» αρθρώνεται σε συνθήκες εξασθενημένου αρχικού φθόγγου «ba…».



Σχήμα 2.2.1 Επίδραση RT στην καταληπτότητα. Η εκφορά της λέξης «back» (παρατίθεται σε: Everest & Pohlmann, 2011, σ. 237)

Επιστρέφουμε στην περιγραφή του δείκτη C_{50} και συγκεκριμένα στο ερώτημα: Τι εκφράζει το προαναφερθέν κατώφλι των 50msec; Πρόκειται για ένα όριο το οποίο έχει οριστεί με βάση τη

γνώση μας πάνω στην ψυχοακουστική. Σύμφωνα με αυτή, οι ανακλάσεις εντός του διαστήματος 0 έως 50 msec θεωρούνται *ενισχυτικές* ως προς την κατανόηση του λόγου διότι σε αυτή την περιοχή οι παρόντες φθόγγοι δεν αλληλεπικαλύπτονται από / με τους επόμενους. Αντιθέτως, η ενέργεια μετά από τα 50msec αποτελείται από όψιμες ανακλάσεις οι οποίες αποτελούν την *ηχητική ουρά* των φθόγγων, καταλήγουν σε αλληλοεπικάλυψη με τους επόμενους φθόγγους, οδηγούν σε σύγχυση και μείωση της ευκρίνειας.

Η όψιμη ενέργεια ενισχύεται σε χώρους με μεγάλο RT οδηγώντας σε σχετικά χαμηλότερη ευκρίνεια. Είναι προφανές ότι στο βαθμό που το RT ορίζεται στο πεδίο της συχνότητας, ο δείκτης C_{50} ορίζεται επίσης στο πεδίο της συχνότητας, είτε ανά οκτάβα είτε ανά τριτοκτάβα. Σύμφωνα με τον Τσινίκα (2018, σ. 120) η «διεθνώς αποδεκτή» τιμή του C_{50} για αίθουσες πολλαπλών χρήσεων είναι η περιοχή 0dB έως 4dB., ενώ για εφαρμογές «κινηματογράφου» η τιμή αυτή προτείνεται να κινείται στην περιοχή 3-4dB. Σε αίθουσες ομιλίας επιθυμητές θεωρούνται τιμές του C_{50} μεγαλύτερες από 2dB στην περιοχή της ομιλίας. Η καταληπτότητα γίνεται πολύ υψηλή για τιμές του δείκτη άνω των 4dB, ενώ πρόβλημα καταληπτότητας θεωρούμε ότι υπάρχει εφόσον ο δείκτης εμφανίζει αρνητικές τιμές (οπ.π.).

Ας δούμε τώρα μια μεθοδολογική λεπτομέρεια που είναι εξαιρετικά σημαντική για την οργάνωση μετρήσεων του χώρου και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων: Ο δείκτης C_{50} μοιράζεται κοινές ιδιότητες με το χρόνο αντήχησης. Από αυτό συνάγονται κάποιες σημαντικές διαπιστώσεις:

- Το C_{50}, όπως και το RT, *είναι ιδιότητα του χώρου* και όχι του ηλεκτρακουστικού συστήματος (ενισχυμένου ήχου) που χρησιμοποιείται. Ο δείκτης C_{50} περιγράφει τη μορφή της καμπύλης απόσβεσης ενός σήματος διέγερσης, όπως ακριβώς και ο χρόνος αντήχησης

- Το C_{50}, όπως και το RT, δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από το θόρυβο, αρκεί ο θόρυβος αυτός να είναι αρκούντως χαμηλότερος από το κύριο σήμα (όπως ακριβώς περιγράφεται στο ISO 3381-1)

- Το C_{50}, όπως και το RT, δεν επηρεάζεται ουσιωδώς από τη στάθμη του ηχείου που χρησιμοποιούμε για τη διέγερση του χώρου. Ο λόγος πρώιμης και όψιμης ενέργειας παραμένει σχετικά σταθερός όταν ρυθμίζεις τη στάθμη του ηχείου εντός λογικών πλαισίων (όχι πολύ ψηλά σε σημείο παραμόρφωσης, όχι πολύ χαμηλά σε σημείο που να κυριαρχεί ο θόρυβος περιβάλλοντος).

2.3 Δείκτης Ευκρίνειας (clarity) C_{80}

Κατ' αναλογία ορίζεται ο δείκτης ευκρίνειας μουσικής (Music Clarity Index - C_{80}). Όπως και πριν, έτσι και εδώ ο δείκτης ποσοτικοποιεί το λόγο μεταξύ της ενέργειας πρώιμων και όψιμων ανακλάσεων, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο πληροφορίες αναφορικά με την ακουστική ποιότητα σε χώρους ακρόασης, την καθαρότητα και την ευκρίνεια της μουσικής αναπαραγωγής.

Συγκεκριμένα, ο δείκτης C_{80} συνίσταται στο κλάσμα ο αριθμητής του οποίου εκφράζει την ηχητική ενέργεια που καταφτάνει στο σημείο ενδιαφέροντος (θέση ακροατή) τα πρώτα 80mec από την άφιξη και ο παρονομαστής την υπόλοιπη ενέργεια, που καταφτάνει δηλαδή μετά τα πρώτα αυτά 80msec. Η μαθηματική έκφραση του δείκτη περιλαμβάνει, όπως συμβαίνει και με τον C_{50}, την κρουστική απόκριση $h(t)$:

$$C_{80} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{0\ ms}^{80\ ms} h(t)^2 dt}{\int_{80\ ms}^{\infty} h(t)^2 dt} \qquad \text{(Σχέση 2.2)}$$

Εξυπακούεται (προκύπτει εξ ορισμού) ότι το C_{80} είναι πάντα μεγαλύτερο του C_{50}, ωστόσο περιγράφουν δύο διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και άρα η ερμηνεία του καθενός από τους δύο αυτούς δείκτες είναι ανεξάρτητη. Το «όριο» των 80msec έχει και εδώ τεθεί στα πλαίσια ψυχοακουστικών παρατηρήσεων αναφορικά με το χρονικό σημείο που χωρίζει τις ανακλάσεις και πρώιμες και όψιμες, αυτή τη φορά με γνώμονα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της μουσικής στη θέση ακρόασης. Συγκεκριμένα, εντός των 80msec οι πρώιμες ανακλάσεις ενισχύουν την καθαρότητα και την ευκρίνεια των μουσικών φράσεων, επιτρέποντας την καλύτερη διάκριση μεταξύ των επιμέρους μουσικών στοιχείων. Η όψιμη ενέργεια (late energy), που φτάνει μετά τα 80 ms και η ποσότητά της εξαρτάται από την αντήχηση του χώρου και συμβάλλει στη δημιουργία της αίσθησης πληρότητας και συνέχειας του ήχου. Ωστόσο, πέρα από ένα σημείο (που σημαίνει: κάτω από μια τιμή του δείκτη C_{80}) μπορεί να προκαλέσει θόλωση και αλλοίωση του μουσικού-συχνοτικού περιεχομένου καθώς και εδώ έχουμε το φαινόμενο της αλληλεπικάλυψης και της «σύγχυσης» με τους επόμενους τόνους (αν και στην περίπτωση της μουσικής η «σύγχυση» είναι κάτι αρκετά πιο αφηρημένο από το αποτέλεσμα της αλληλεπικάλυψης δύο φωνημάτων ομιλίας).

Η σχέση όψιμης και πρώιμης ενέργειας είναι και εδώ άμεση συνάρτηση του RT, ενώ όπως και το RT έτσι και το C_{80} ορίζεται με τιμές στο πεδίο της συχνότητας. Τιμές άνω των 8dB υποδηλώνουν πολύ «ξηρό» ήχο (συνδεόμενες άλλωστε με πολύ χαμηλή αντήχηση) ενώ τιμές

κάτω των 0dB σχετίζονται με πολύ αντηχητικό πεδίο και συνεπάγονται μειωμένη καθαρότητα και μειωμένη μουσική ευκρίνεια. Δεν υπάρχει ωστόσο καμία «αντικειμενική» κλίμακα τιμών του δείκτη C_{80} και η αξιολόγηση της τιμής γίνεται ανάλογα με το είδος της μουσικής για την οποία προορίζεται ο χώρος (Τσινίκας, 2018, σ. 121).

2.4 Διακριτικότητα (definition) D_{50}

Ο δείκτης ευκρίνειας D_{50} (Definition Index) αποτελεί μια παραλλαγή έκφρασης του C_{50}, έχει το ίδιο περιεχόμενο και αξιολογεί τα ίδια χαρακτηριστικά. Η παραλλαγή συνίσταται στο ότι εκφράζει, ως ποσοστό αυτή τη φορά, την ηχητική ενέργεια που φτάνει στον ακροατή εντός των πρώτων 50 χιλιοστών του δευτερολέπτου (msec) από την άφιξη του άμεσου ήχου, σε σχέση με τη συνολική ηχητική ενέργεια που λαμβάνεται. Η μαθηματική του έκφραση είναι η ακόλουθη:

$$D_{50} = \frac{\int_{0\,ms}^{50\,ms} h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt} \qquad \text{(Σχέση 2.3)}$$

δηλαδή ο παρονομαστής περιέχει το σύνολο της ενέργειας και ο αριθμητής το κλάσμα του που αφορά την ενέργεια έως τα 50msec. Είναι προφανής η ευθεία εξαγωγή του δείκτη D_{50} από το δείκτη C_{50} και αντίστροφα, μέσω των σχέσεων:

$$C_{50} = 10 \cdot \log_{10} \frac{D_{50}}{1-D_{50}} \qquad \text{(Σχέση 2.4)}$$

και

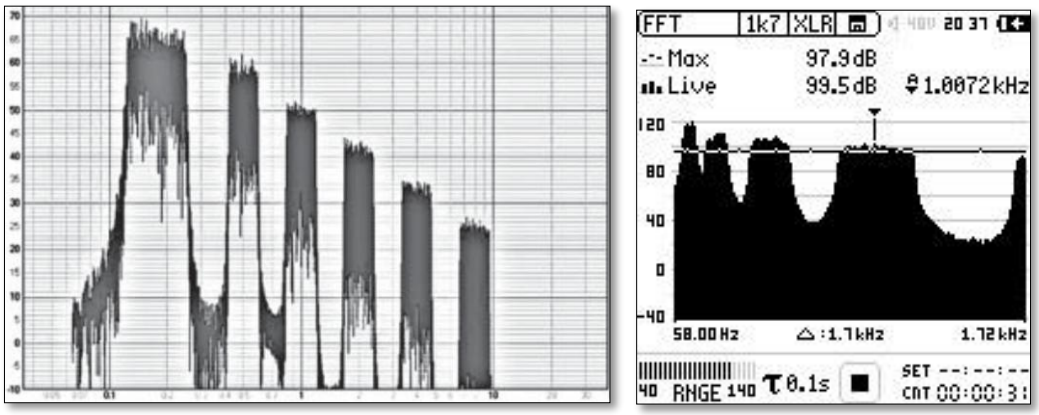
$$D_{50} = \frac{10^{C_{50}/10}}{1+10^{C_{50}/10}} \qquad \text{(Σχέση 2.5)}$$

2.5 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI

Μια σημαντική παράμετρος η οποία θα μας επιτρέψει να αξιολογήσουμε το χώρο του αμφιθεάτρου σε εφαρμογές ομιλίας είναι ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index - STI), ο οποίος ποσοτικοποιεί την επικάλυψη του απευθείας σήματος ομιλίας από το αντηχητικό πεδίο, δηλαδή το φαινόμενο που ήδη περιγράφτηκε πιο πάνω και που παριστάνεται στο Σχήμα 2.2.1. Η ιδιαιτερότητα του δείκτη STI είναι ότι δεν βασίζεται στη διέγερση του χώρου με ένα απλό σήμα όπως αυτό που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης και των παράγωγων παραμέτρων (C_{50}, C_{50}, C_{80}, D_{50} κτλ) αλλά βασίζεται σε ένα ειδικό σήμα θορύβου που έχει κατασκευαστεί ειδικά για να προσομοιώνει το δυναμικό συχνοτικό περιεχόμενο της ανθρώπινης ομιλίας. Οι παράμετροι της μέτρησης του STI

προβλέπονται από τον αντίστοιχο κανονισμό μέτρησης καταληπτότητας IEC 60268-16:2011 (International Electrotechnical Commission, 2011) και είναι ενσωματωμένες στο ηχόμετρο που θα χρησιμοποιήσουμε (NTi Audio, 2026, σσ. 118-134). Το ηχητικό σήμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του STI θα πρέπει να προκύπτει από ειδική πιστοποιημένη συσκευή η οποία θα εξασφαλίζει τη χωρίς διακοπές συνεχή αναπαραγωγή του σήματος, ενώ θα προσεγγίζει και άλλες παραμέτρους της ανθρώπινης ομιλίας, όπως πχ την κατευθυντικότητα ενός ομιλούντος ατόμου (Balou, 2008, σ. 155). Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιείται, όπως θα δούμε πιο κάτω, ειδικό μετρητικό ηχείο-γεννήτρια σήματος (βλ. πίνακα 5.3.3)

Το σήμα ελέγχου συνίσταται σε ένα σήμα συχνοτικού περιεχομένου με συχνότητες διαμόρφωσης στην περιοχή από 630Hz έως 12.5kHz, με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας για την ακριβέστερη προσομοίωση της ανθρώπινης ομιλίας. Η μορφή του σήματος αυτού στο πεδίο του χρόνου έχει την ακόλουθη μορφή, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία αλλά και από τον έλεγχο που πραγματοποιήσαμε συνδέοντας το μετρητικό μας ηχείο απευθείας στην είσοδο του ηχομέτρου για να έχουμε μια πρόχειρη εικόνα της διαμόρφωσης του σήματος.



Εικόνα 2.5.1 Μετρητικό σήμα για τη μέτρηση STI
Αριστερά: βιβλιογραφία (Ballou, 2008, 156), δεξιά: μέτρηση με τα όργανά μας

Σύμφωνα με τον Σκαρλάτο (2015) οι τιμές του δείκτη STI και ο αντίστοιχος βαθμός αντιληπτότητας παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα:

Εύρος τιμής STI	Αντιληπτότητα
0-0.3	Κακή
0.3-0.45	Φτωχή
0.45-0.6	Καλή
0.6-0.75	Πολύ καλή
0.75-1	Εξαιρετική

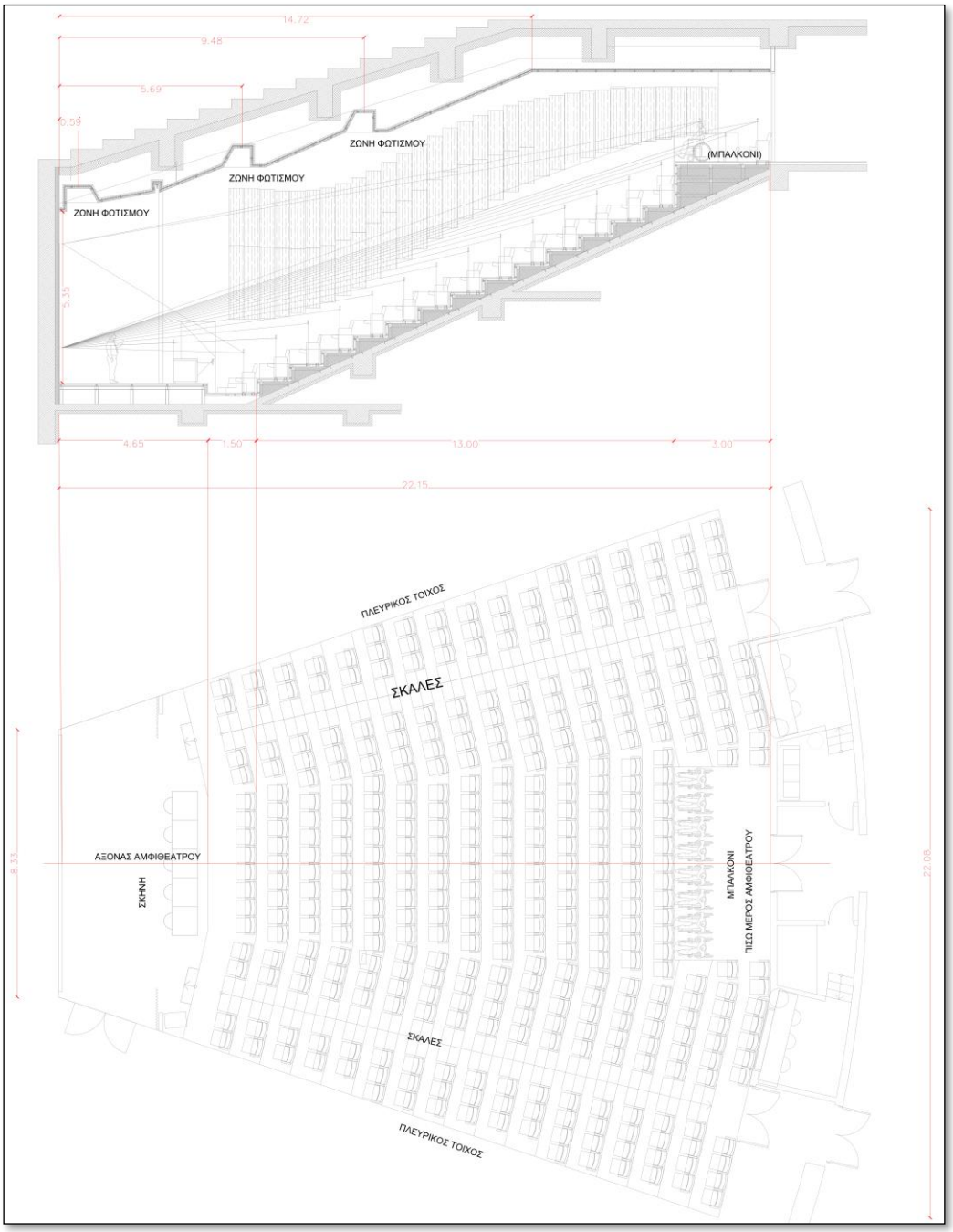
Πίνακας 2.5.2 Βαθμός αντιληπτότητας σύμφωνα με το δείκτη STI (οπ.π., σ. 182)

Κεφάλαιο 3 Γενική Περιγραφή

3.1 Χαρακτηριστικά του αμφιθεάτρου

3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

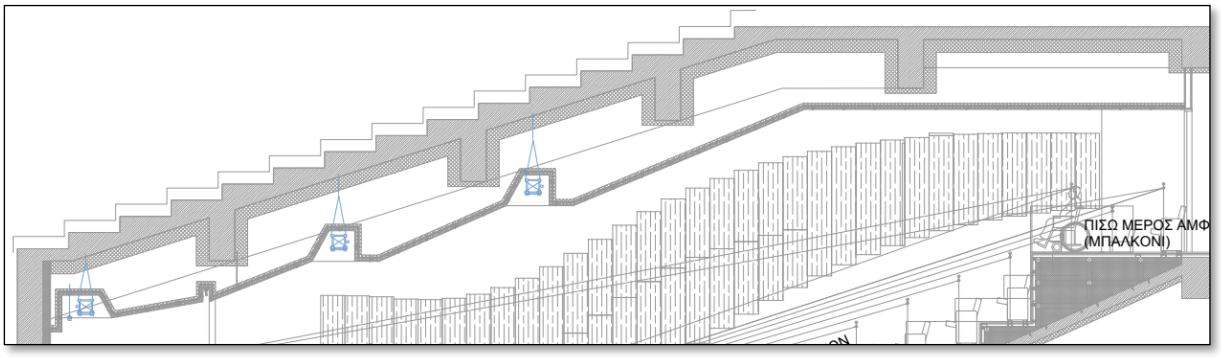
Ο χώρος του αμφιθεάτρου του Ιωνικού Κέντρου διαθέτει 360 καθίσματα θεατών και είναι ενιαίος, δηλαδή δεν υπάρχουν διαχωριστικά, θεωρεία / εξώστες, εμπόδια ή κολώνες. Παρουσιάζει μια τυπική συμμετρία επί του άξονά του, ενώ τα καθίσματα είναι συμμετρικά, ομοιόμορφα, σε κεκλιμένη διάταξη (αναβαθμοί). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του χώρου αποτελεί η σχετικά απότομη κλίση του, η οποία συνεπάγεται σημαντικές ιδιομορφίες σε επίπεδο ακουστικού σχεδιασμού αλλά ταυτόχρονα εξασφαλίζει αποτελεσματικές γωνίες θέασης για ένα σημαντικό μέρος των θεατών.



Εικόνα 3.1.1 Τομή και κάτοψη αμφιθεάτρου με διαστάσεις

3.1.2 Διαμόρφωση οροφής

Ο σχεδιασμός της οροφής βασίζεται στις ιδιότητες μιας σύνθετης κεκλιμένης γεωμετρίας. Κατά μήκος του άξονα του αμφιθεάτρου η οροφή παρουσιάζει μια διαδοχικά και ανά ζώνες μεταβαλλόμενη κλίση.

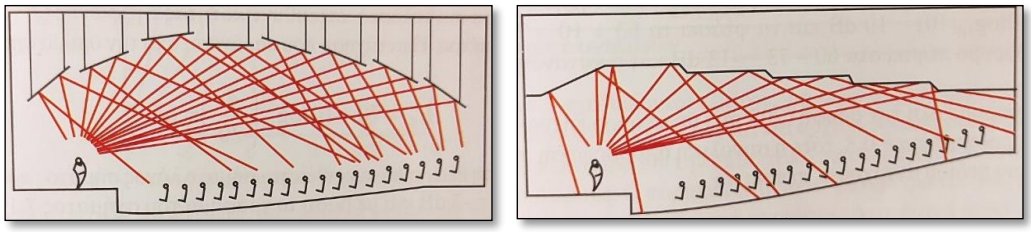


Εικόνα 3.1.2 Διαμόρφωση οροφής (τομή)

Η μορφή αυτή εξασφαλίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά από πλευράς ακουστικού σχεδιασμού:

Διάχυση της πρώιμης ενέργειας. Με τη μορφή αυτή η οροφή δεν παρουσιάζει ενιαίες ανακλαστικές επιφάνειες μεγάλου εμβαδού και άρα αποφεύγονται κατευθυνόμενες ανακλάσεις προς το κοινό. Η μεταβαλλόμενη ανά ζώνες κλίση της οροφής επιτρέπει την ανάκλαση και την αποτελεσματική διάχυση της ενέργειας προς διάφορες κατευθύνσεις.

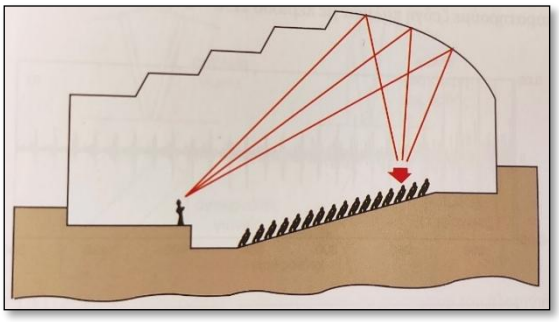
Η καθ'ύψος διαβάθμιση της οροφής αποτελεί μια συνήθη πρακτική για την *καθοδήγηση της ηχητικής ενέργειας στο χώρο του ακροατηρίου* και συχνά υποκαθιστά τη χρήση ανακλαστήρων που μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον ίδιο σκοπό (Λουτρίδης, 2015, σ. 213).



Εικόνα 3.1.3 Καθοδήγηση ηχητικής ενέργειας
α) με χρήση ανακλαστήρων, β) με οροφή διαβαθμισμένου ύψους (Λουτρίδης, 2015, σ. 213)

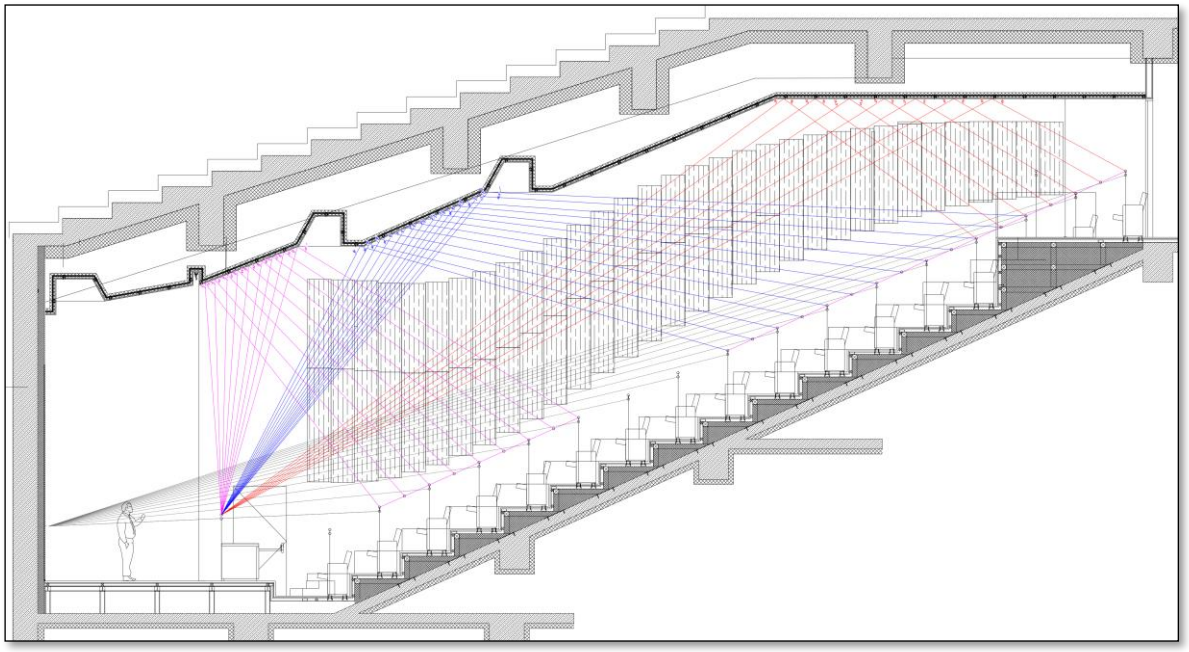
Η διαβάθμιση της οροφής σε διαδοχικές (παράλληλες) επιφάνειες θεωρείται γενικά ένα μέσο άμεσου και δραστικού ελέγχου της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας. Αντιθέτως, ο έλεγχος της ηχητικής ενέργειας δεν μπορεί να επιτευχθεί εύκολα σε διαμορφώσεις οι οποίες οδηγούν εξ ορισμού από τη γεωμετρία τους σε πυκνώσεις και αραιώσεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ύπαρξη κοίλων επιφανειών σε ένα χώρο (τόξα κυκλικών, ελλειπτικών ή ωοειδών τμημάτων). Οι επιφάνειες αυτές εξ ορισμού (δηλαδή εκ κατασκευής, από τη γεωμετρία τους) συνεπάγονται σημεία του χώρου τα οποία αποτελούν κέντρα σχεδιασμού τους (κέντρο κύκλους, εστίες έλλειψης κτλ). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι κοίλες επιφάνειες εξ ορισμού κατευθύνουν τις ανακλώμενες ακτίνες προς συγκεκριμένα τέτοια κέντρα

δημιουργώντας εστίες τις οποίες στη συνέχεια μπορούμε να ελέγξουμε μόνο με πρόσθετες παρεμβάσεις.



Εικόνα 3.1.4 Εστίαση ήχου σε σημεία λόγω καμπυλότητας της οροφής (Λουτρίδης, 2015, σ. 205)

Συνεπώς, η διαβάθμιση της οροφής του αμφιθεάτρου του Ιωνικού Κέντρου επιτρέπει την εκπομπή ενέργεια η οποία ανακλάται κατάλληλα και έτσι «προωθείται» στις πίσω θέσεις του αμφιθεάτρου. Οι πρώιμες ανακλάσεις εκτείνονται με αυτό τον τρόπο ομοιόμορφα μέχρι τις τελευταίες θέσεις των θεατών. Αποφεύγεται η παραλληλία σε οριζόντιες επιφάνειες και έτσι περιορίζονται σημαντικά οι κατακόρυφες εντοπισμένες «παγιδεύσεις» ανακλάσεων και τα συνακόλουθα ακουστικά φαινόμενα όπως πχ flutter echo. Εξαίρεση αποτελεί το «μπαλκόνι» στη γαλαρία του αμφιθεάτρου όπου η παραλληλία δαπέδου και οροφής είναι υπαρκτή, κατά συνέπεια αναμένουμε «ιδιαιτερότητες» σε αυτή τη θέση (όπου προβλέπεται η άφιξη και παραμονή θεατών που κάνουν χρήση αναπηρικού καροτσιού).



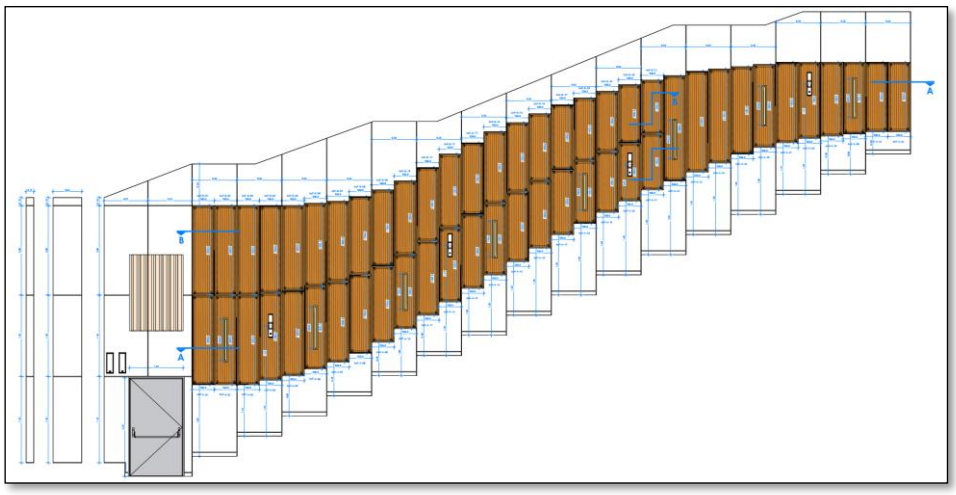
Σχήμα 3.1.5 Ομοιόμορφη δέσμη ανακλάσεων λόγω των βαθμίδων της οροφής

Στο παραπάνω σχήμα χαράσσονται ακτίνες/οδεύσεις της ηχητικής ενέργειας, σύμφωνα με το γνωστό νόμο της ανάκλασης κυμάτων, κατά τον οποίο η γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας με κυματικά χαρακτηριστικά είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης (Φλώρος, 2013, σσ. 38-39). Βλέπουμε το ομοιόμορφο αποτέλεσμα και την αποφυγή εστιάσεων. Αντίστοιχες ανακλάσεις μπορούν να χαραχθούν για οποιαδήποτε άξονα θεατών.

Σε ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, η ύπαρξη των 3 ζωνών φωτισμού (βλ. εικόνα 3.1.2), πέρα από την αρμονική ενσωμάτωσή τους σε κατάλληλες εσοχές της οροφής, επιδρούν και ως διαχυτές για την εκπεμπόμενη ενέργεια.

3.1.3 Διαμόρφωση πλευρικών τοίχων

Οι πλευρικοί τοίχοι (βλ. Εικόνα 3.1.1) εμφανίζουν τη χαρακτηριστική αποκλίνουσα (μη παράλληλη) αμφιθεατρική διάταξη (αποφυγή οριζόντιας παραλληλίας), ενώ ταυτόχρονα ακολουθούν την κλίση των καθισμάτων.



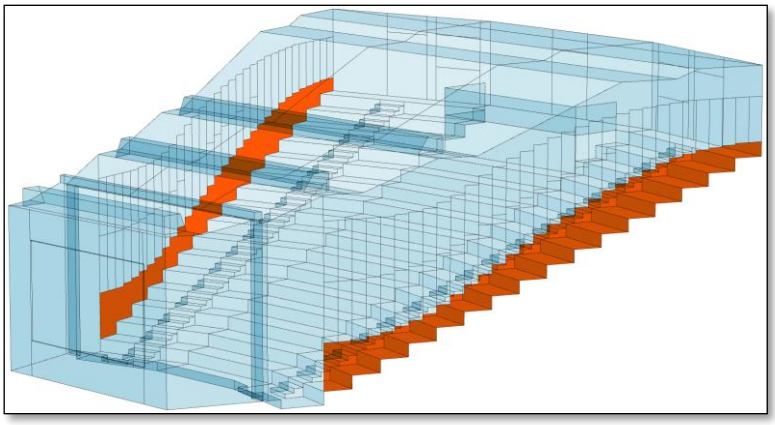
Εικόνα 3.1.6 Ανάπτυγμα πλευρικού τοίχου (χρήση ηχοαπορροφητικών panel σε κατάλληλη διάταξη)

Η γεωμετρία αυτή συνεπάγεται συγκεκριμένα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου λόγω των ακόλουθων ιδιοτήτων:

1) *Απουσία παράλληλων επιφανειών*. Αποτρέπεται η ανάπτυξη οριζόντων στάσιμων κυμάτων, φαινομένων flutter echo κτλ λόγω ανακλάσεων ανάμεσα σε οριζόντιες επιφάνειες.
2) *Πλευρικές πρώιμες ανακλάσεις*. Η γωνία μεταξύ των πλευρικών τοίχων επιτρέπει τις πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις και τις δέσμες εκπεμπόμενης ενέργειας να φτάνουν στο ακροατήριο πιο ομοιόμορφα, ενισχύοντας τη χωρική αντίληψη του ακροατή.

3) Καθώς οι τοίχοι «ανοίγουν» προς τα πίσω (πάνω), η ανακλώμενη ενέργεια διαχέεται σε ολοένα και μεγαλύτερη διατομή και έτσι *αποφεύγεται η συγκέντρωση ενέργειας* σε σημεία, ενισχύοντας την ακουστική ομοιομορφία.

Σχολιάζοντας ένα στοιχείο που θα παρατεθεί αναλυτικότερα σε επόμενες παραγράφους, παρατηρούμε ότι οι πλευρικοί τοίχοι εισφέρουν ένα σημαντικό ποσοστό ηχοαπορροφητικότητας λόγω των ηχοαπορροφητικών panel που έχουν προβλεφθεί σε κατάλληλη διάταξη (βλ. εικόνα 3.1.7). Ωστόσο τα πάνελ αυτά βρίσκονται σε ένα minimum ύψος περίπου 1μ. Κάτω από αυτά τα πάνελ ο τοίχος είναι ανακλαστικός.



Εικόνα 3.1.7 Ανακλαστικές επιφάνειες χαμηλά στους πλευρικούς τοίχους, στο ύψος των ακροατών

Οι επιφάνειες αυτές σε μεγάλο βαθμό υποδέχονται τις πρώιμες ανακλάσεις των ομιλητών (ή άλλων πηγών πάνω στη σκηνή), συνεπώς εισφέρουν σημαντικά στη διαμόρφωση της απόκρισης στα πρώτα msec.

3.1.4 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελύφους

Τα χαρακτηριστικά του κελύφους του αμφιθεάτρου είναι τα ακόλουθα:

Όγκος χώρου:

$$V = 1.739{,}58m^3 \qquad \text{(Σχέση 3.1)}$$

Επιφάνεια χώρου:

$$S = 1.236{,}33m^2 \qquad \text{(Σχέση 3.2)}$$

Από τα δύο παραπάνω μεγέθη μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path length)

$$\lambda = \frac{4 \cdot V}{S} = \frac{4 \cdot 1.739{,}58\mathrm{m}^3}{1.236{,}33\mathrm{m}^2} = 5{,}63\mathrm{m} \qquad \text{(Σχέση 3.3)}$$

Το μέγεθος αυτό μας δίνει και μια πρώτη αίσθηση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου. Η τιμή υποδηλώνει ότι ο ήχος (συγκεκριμένα: η κάθε «διαδρομή» ήχου) διανύει κατά μέσο όρο 5,63m πριν συναντήσει μια επιφάνεια. Αντίστοιχα, μια «ακτίνα» ήχου θα ανακλάται κατά μέσο όρο 340/5,63=60 φορές ανά δευτερόλεπτο. Ένα πρώτο σχόλιο για αυτό το μέγεθος είναι ότι με δεδομένο το πλάτος (από 8,33m στη σκηνή έως 22,08m στην τελευταία σειρά θεατών) και το μήκος του αμφιθεάτρου (22m σε οριζόντια διεύθυνση), φαίνεται ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή αντιστοιχεί σε μήκος συγκρίσιμο με αυτό του ύψους του αμφιθεάτρου. Θα πρέπει λοιπόν να σημειώσουμε ότι η *αντιπροσωπευτική για την ακουστική συμπεριφορά του χώρου διάσταση είναι το ύψος του αμφιθεάτρου* και *η αντιπροσωπευτική διαδρομή είναι η κατακόρυφη ανάκλαση*. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, ένα μεγάλο μέρος του δαπέδου καλύπτεται από καθίσματα σχετικά υψηλής ηχοαπορροφητικότητας και ένα μέρος της οροφής από διάτρητη γυψοσανίδα με επίσης ηχοαπορροφητικά χαρακτηριστικά. Το γεγονός ότι η κατακόρυφη διεύθυνση είναι αυτή που κυριαρχεί και που ορίζει εν πολλοίς τη μέση ελεύθερη διαδρομή σημαίνει ότι αναμένουμε το μεγάλο μέρος των ανακλάσεων να αφορά την κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτό εξηγεί και το γιατί αναμένουμε χαμηλότερες τιμές χρόνου αντήχησης από αυτές που μας δίνουν οι κλασικές προσεγγίσεις Sabine & Norris-Eyring (αναλυτικά, βλ. υποκεφάλαιο 5.3).

Ως προς το ηχητικό πεδίο του χώρου, είναι χρήσιμη η προσέγγιση μέσω της λεγόμενης συχνότητας Schroeder, η οποία προσδιορίζει ένα γενικό όριο τιμής συχνότητας πάνω από την οποία επικρατούν φαινόμενα διάχυσης και κάτω από την οποία η στατιστική-γεωμετρική προσέγγιση δεν δίνει πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα. Στην περιοχή αυτή το πεδίο θεωρείται διάχυτο, ο χώρος χαρακτηρίζεται «μεγάλος» και μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη στατιστική και γεωμετρική θεώρηση του ηχητικού πεδίου (Κοντομίχος, Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013, σ. 27). Το όριο κατά Schroeder για την περιοχή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = 2000\sqrt{\frac{RT}{V}} \qquad \text{(Σχέση 3.4)}$$

και θα εξεταστεί πιο κάτω (υποκεφάλαιο 5.3 & σχέση 5.5), χρησιμοποιώντας μια πρώτη προσέγγιση του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα.

Συνεχίζοντας την αρχική αυτή γενική προσέγγιση για το χώρο μας, ας δούμε τα στοιχεία του παρακάτω Πίνακα, όπου παρατίθενται ενδεικτικές (ή και ενδεδειγμένες) τιμές όγκου χώρου ανά άτομο για τις διαφορετικές χρήσεις του:

Είδος χώρου ακρόασης	**Όγκος / Άτομο**
Συναυλιακοί χώρου (Concert Halls)	6-9m^3/άτομο
Χώροι για ομιλία	3-5m^3/άτομο
Χώροι πολλαπλών χρήσεων	5-7m^3/άτομο
Κινηματογράφοι – θέατρα (με θεωρεία)	3m^3/άτομο
Κινηματογράφοι – θέατρα (χωρίς θεωρεία)	4m^3/άτομο

Πίνακας 3.1.8 Ενδεδειγμένοι όγκοι χώρου ανά ακροατή (Κοντομίχος, Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013, σ. 198)

Ο προς μελέτη χώρος έχει λόγο όγκου ανά θεατή 1739,58m^3/360 άτομα = *4,83m^3/άτομο*. Αυτή η τιμή μας φέρνει εντός των ορίων που προβλέπονται για χώρο προοριζόμενο για ομιλία, ενώ πλησιάζει και τη χρήση ενός χώρου πολλαπλών χρήσεων, κάτι που συνάδει με τον αρχικό στόχο κατασκευής του αμφιθεάτρου. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από πίνακες τιμών σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές (Τσινίκας, 2018, σ. 91). Επίσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Κοντομίχος, Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013, σ. 197), για μια τέτοια τιμή m^3/άτομο προβλέπεται μια σημαντική επίδραση στην ακουστική συμπεριφορά του χώρου όταν υπάρχει παρουσία κοινού. Αυτό είναι εύκολο να το αντιληφθεί κανείς διαισθητικά καθώς το αμφιθέατρο καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από καθίσματα και άρα η παρουσία κοινού επηρεάζει μια μεγάλη επιφάνεια του κελύφους του αμφιθέατρου. Επιπλέον, όσον αφορά την επίδραση του κοινού, τα καθίσματα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο χώρο κατηγοριοποιούνται ως «ελαφριά», κάτι που συνεπάγεται σημαντική επίδραση του παριστάμενου κοινού στο συνολικό χρόνο αντήχησης (για το σημείο αυτό βλ. επίσης υποκεφάλαιο 3.2.2 & πίνακα 3.2.1.17).

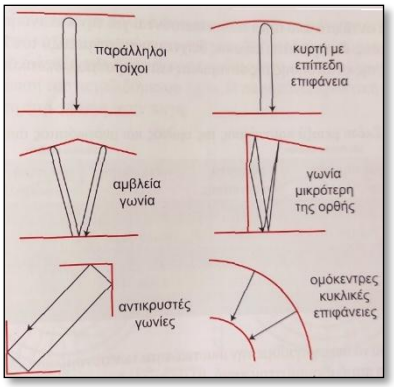
Η πρωτογενής αυτή ανάλυση αφορά το κέλυφος και τη γεωμετρία του χώρου σε συνάρτηση με κάποιες διαπιστώσεις σε ένα ποιοτικό επίπεδο αναφορικά με τα κύρια ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε μια μελέτη των υλικών που έχουν επιλεγεί για την κάλυψη του κελύφους και της συνεισφοράς που αυτά έχουν στη συνολική ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου. Πριν από αυτό όμως θα παραθέσουμε κάποια στοιχεία για το φαινόμενο του flutter echo που θα είναι χρήσιμα για τη γενική αξιολόγηση του αμφιθεάτρου του Ιωνικού Κέντρου.

3.1.5 - Το φαινόμενο του πλαταγισμού

Η επιλογή της γεωμετρίας και των υλικών κάλυψης κατά τη σχεδίαση του χώρου οδηγεί δυνητικά στο «σχεδιαστικό κίνδυνο» του πλαταγισμού (ή, αλλιώς, flutter echo). Σε περίπτωση που μια ακτίνα διάδοσης ηχητικής ενέργειας «εγκλωβιστεί» ανάμεσα σε δύο παράλληλες

επιφάνειες τότε το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία συνεχόμενων ανακλάσεων και μια σειρά από παλμούς (κρότους ή «φτερουγίσματα») που ακούγονται μετά την απόσβεση της κυρίως ενέργειας (Λουτρίδης, 2015, σ. 205). Όσο πιο ανακλαστικές είναι οι παράλληλες επιφάνειες τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο.

Ο πλαταγισμός περιγράφεται ως το φαινόμενο εγκλωβισμού ενέργειας ανάμεσα σε δύο παράλληλες επιφάνειες, ωστόσο η γεωμετρία ενός χώρου μπορεί να παράξει τέτοια φαινόμενα συνδυάζοντας διάφορες (μη παράλληλες) επιφάνειες του χώρου οι οποίες οδηγούν τις τροχιές του ήχου στο να «εγκλωβίζονται» σε συγκεκριμένες, πιο σύνθετες τροχιές.



Εικόνα 3.1.9 Περιπτώσεις μη παράλληλων επιφανειών όπου μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο του πλαταγισμού (futter-echo) (Λουτρίδης, 2015, σ. 207)

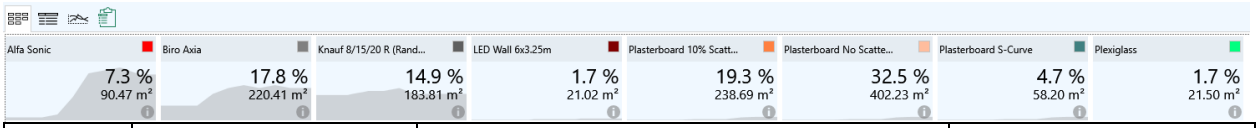
3.2 Τα υλικά του κελύφους

Για την επένδυση του κελύφους έχουν επιλεγεί α) ειδικά ακουστικά panel σε κατάλληλη διάταξη στους πλευρικούς τοίχους και β) δύο μεγάλες και αξονικά συμμετρικές ζώνες διάτρητης γυψοσανίδας στην οροφή του αμφιθεάτρου. Μια τρίτη εξίσου σημαντική παράμετρος με σημαντικές ακουστικές επιπτώσεις είναι τα καθίσματα του αμφιθεάτρου τα οποία εισφέρουν ένα σημαντικό ποσό ηχοαπορροφητικότητας στο χώρο όχι μόνο λόγω της μεγάλης κάλυψης αλλά και λόγω των υψηλών συντελεστών απορρόφησης και διάχυσης που εισφέρουν στο συνολικό ακουστικό αποτέλεσμα. Αυτό θα πρέπει να συνδυαστεί με την εκτίμηση ότι η πιο αντιπροσωπευτική διεύθυνση διάδοσης και ανάκλασης του ήχου είναι η κατακόρυφη (βλ. σχόλια στο υποκεφάλαιο 3.1.4). Τα καθίσματα αναμένεται λοιπόν να συνεισφέρουν στο συνολικό αποτέλεσμα με έναν «ειδικό συντελεστή βαρύτητας» και να υπερεκπροσωπούνται στον πραγματικό χρόνο αντήχησης του χώρου.

α/α	Υλικό	Μοντέλο (Κατασκευαστής)	Link	Τύπος	Τοποθέτηση σε:
1	Ακουστικό panel	Alfa Sonic (ALFA WOOD GROUP AEBE)	Alfa Sonic Link	Panel με λωρίδες ξύλου, με MDF και καπλαμά, τοποθετημένα σε πολυεστερικό panel	Πλευρικούς τοίχους
2	Καθίσματα	Axial (BIRO)	Biro Axial Link	Κάθισμα με ξύλινο σκελετό, αναδιπλούμενο	Περιοχή κοινού, τοποθετημένα σε βαθμίδες
3	Διάτρητη γυψοσανίδα	8/15/20 R (KNAUF INSULATION)	Knauf Insulation Link	Διάτρητη γυψοσανίδα, ηχοαπορροφητική, με τυχαία (“random”) διάτρηση	Οροφή, ζώνες εκατέρωθεν του άξονα
4	Γυψοσανίδα (κοινή)	Σειρά K711 (KNAUF)	Knauf Link	Κοινή γυψοσανίδα επενδυμένη με λείο καπλαμά ή με απλή βαφή μαύρου χρώματος	Οροφή, αξονική ώνη, πλευρικοί τοίχοι εκτός ακουστικών panel (1), διάδρομοι, σκηνή, γαλαρία
		Σειρά K711 (KNAUF)		Κοινή γυψοσανίδα, όχι απολύτως λεία, με απλή βαφή μαύρου χρώματος	
5	LED Wall	DHI-PHSIA1.5-CH – 6μ x 3.25μ (DAHUA)	Dahua Security Link	Πάνελ Flip-COB LED 1.5 mm, με επίστρωση προστασίας COB	Πλάτη σκηνής
6	Plexiglass	-	-	Plexiglass	«Μπαλκόνι» γαλαρίας
-	Κουφώματα, λοιπές επιφάνειες	Διάφορα	-	Διάφορα	Παράθυρα μεταφραστών και ηχολήπτη/χειριστή, πόρτες εισόδου από φουαγιέ, πόρτα προς καμαρίνια

Πίνακας 3.2.1 Υλικά κελύφους αμφιθεάτρου

Για λόγους απλούστευσης της προσομοίωσης όλες οι επιφάνειες υπό την περιγραφή «κουφώματα, λοιπές επιφάνειες» (α/α 7) θα αντιμετωπιστούν ως υψηλά ανακλαστικά υλικά και θα μοντελοποιηθούν ως επιφάνειες κοινής γυψοσανίδας (α/α 4). Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να προβλέψουμε είναι αυτό του συντελεστή διάχυσης των επιφανειών (scattering coefficient). Ο συντελεστής διάχυσης, οριζόμενος και αυτός ανά συχνότητα όπως και ο συντελεστής απορροφητικότητας, δεν συνοδεύεται από επίσημη πιστοποιημένη μέτρηση ανά υλικό, ενώ δεν είναι εύκολη η εύρεση εκτιμήσεών του στη βιβλιογραφία. Στο βαθμό που επιθυμούμε να ληφθεί υπόψη η παράμετρος της διάχυσης, έστω στα γενικά πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας, θα βασιστούμε στη δυνατότητα εκτίμησής του μέσω του λογισμικού Ease. Πριν την ανάλυση που ακολουθεί, παραθέτουμε την κάλυψη (τιμή & ποσοστό κάλυψης) όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται.

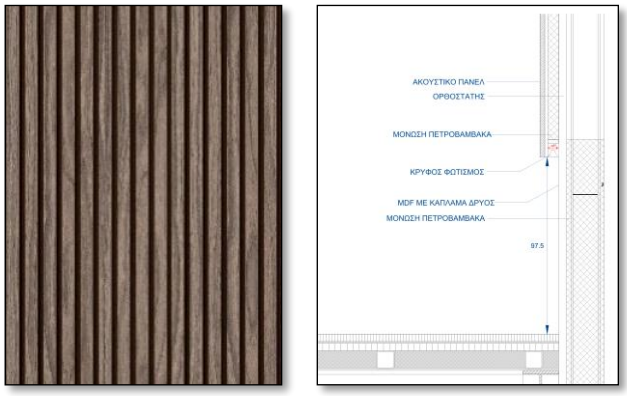


α/α	Υλικό	Εμβαδό (m2)		Ποσοστό Εμβαδού (%)	
1	Ακουστικό panel	90.47		7.3%	
2	Καθίσματα	220.41		17.8%	
3	Διάτρητη γυψοσανίδα	183.81		14.9%	
4	Γυψοσανίδα (κοινή)	699.12	402.23 - 0% scattering 238.69 - 10% scattering 58.2 - High scattering	56.5%	32.53% 19.31% 4.71%
5	LED Wall	21.02		1.7%	
6	Plexiglass	21.5		1.7%	
	Σύνολο	**1236.33**		**100.0%**	

Πίνακας 3.2.2 Κάλυψη κελύφους για κάθε υλικό

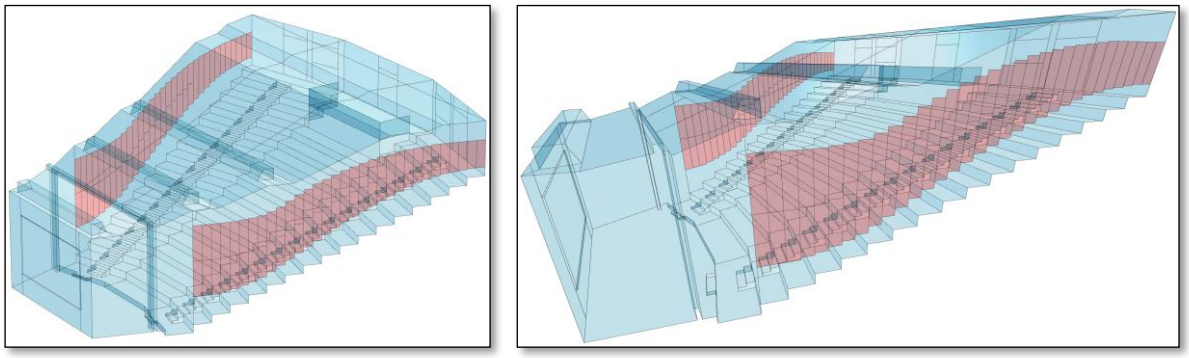
3.2.1 Ακουστικό Panel

Τύπος: Alfa Sonic (Κατασκευαστής: Alfa Wood Group)

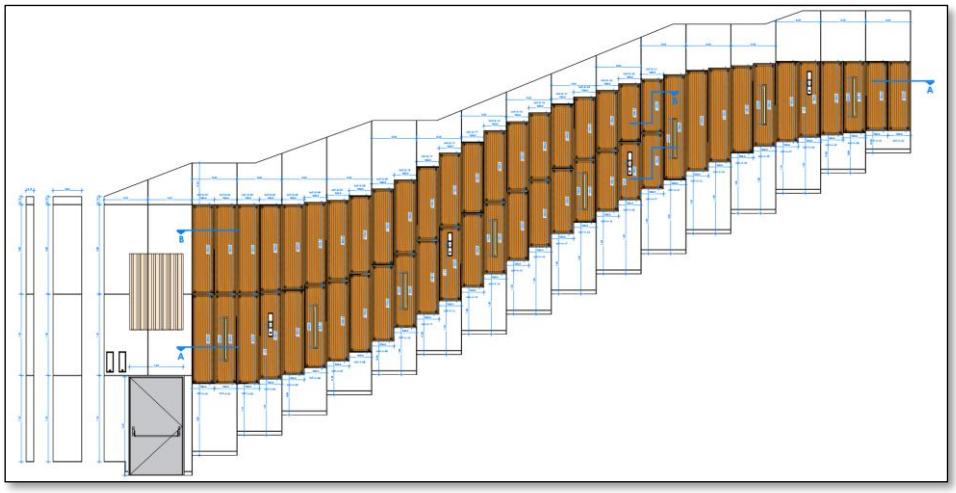


Εικόνα 3.2.3 Ακουστικό panel (αριστερά) και λεπτομέρεια τοποθέτησης (δεξιά)

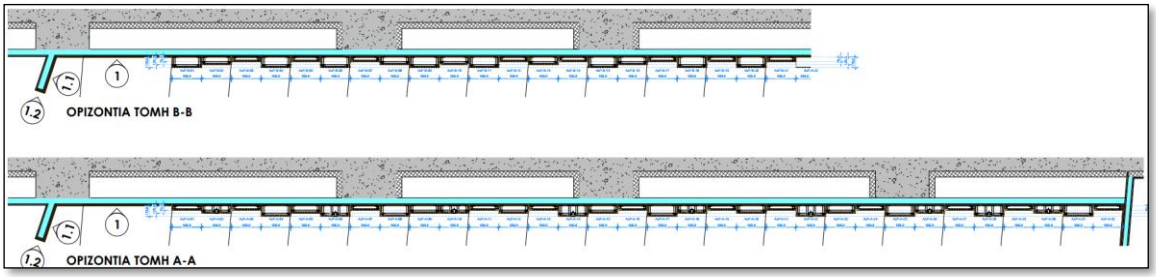
Το panel καλύπτει μια κρίσιμη επιφάνεια στους πλευρικούς τοίχους του αμφιθεάτρου. Αποτελείται από κατακόρυφες λωρίδες MDF πλάτους 1cm, με κενά μεταξύ τους, στερεωμένες πάνω σε ένα φιλμ πολυεστέρα. Τα ακουστικά panel τοποθετούνται σε διάταξη μεταβλητού βάθους (variable-depth array), με διαφορετικές αποστάσεις από τον φέροντα τοίχο (βλ. εικόνα 3.2.6), μια λεπτομέρεια που εμπλουτίζει το συχνοτικό εύρος απορρόφησης και ταυτόχρονα δίνει στην επιφάνεια πιο έντονα διαχυτικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 3.2.4 Κάλυψη αμφιθεάτρου από ακουστικό panel ALFA SONIC



Εικόνα 3.2.5 Κάλυψη πλευρικού τοίχου με panel ALFA SONIC



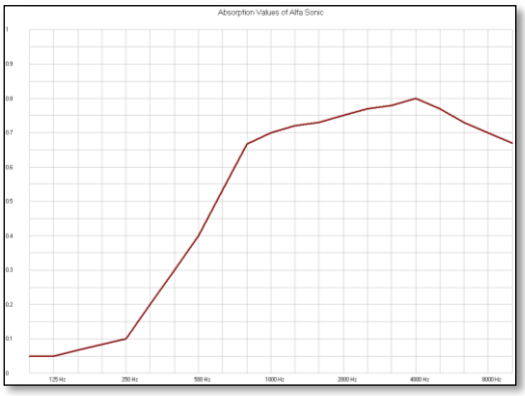
Εικόνα 3.2.6 Κάτοψη-Λεπτομέρεια διαμόρφωσης ακουστικού panel ALFA SONIC στους πλευρικούς τοίχους

Από τις τομές Α-Α & Β-Β βλέπουμε ότι τα panel προβλέπονται σε διάφορες αποστάσεις από τον τοίχο, σχηματίζοντας μια ανομοιόμορφη διάταξη η οποία λειτουργεί σαν διαχυτής της προσπίπτουσας ενέργειας. Το panel *καλύπτει το 7.3% (90.47m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου*.

Συντελεστής απορρόφησης (Absorption Coefficient) ακουστικού panel

Το panel συνοδεύεται από το επίσημο τεύχος μέτρησης και πιστοποίησης του συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας (βλ. παράρτημα 1). Παρατηρούμε ότι στην οκτάβα με κέντρο τη συχνότητα 2kHz η μέτρηση της ηχοαπορροφητικότητας δίνει τιμή άνω του 1, κάτι που δεν αποτελεί σφάλμα αλλά μια περίπτωση η οποία εμφανίζεται σε τέτοιες περιπτώσεις μέτρησης ηχοαπορροφησης σε πολύ ειδικές εργαστηριακές συνθήκες. Η εργαστηριακή μέτρηση ενός τέτοιου συντελεστή προκύπτει έμμεσα από την ποσοτικοποίηση της μεταβολής που προκαλεί η προσθήκη δεδομένου ηχοαπορροφητικού panel σε ένα χώρο γνωστού χρόνου αντήχησης.

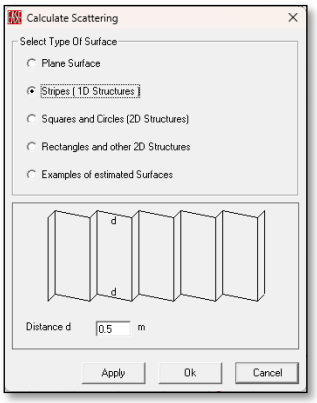
Εισάγουμε τις τιμές της τελευταίας στήλης στο Ease και αφήνουμε το πρόγραμμα να προσαρμόσει μια αυτόματη παρεμβολή στις ενδιάμεσες τιμές συχνότητας.



Διάγραμμα 3.2.7 Συντελεστής ηχοαπορρόφησης ακουστικού panel πλευρικών τοίχων

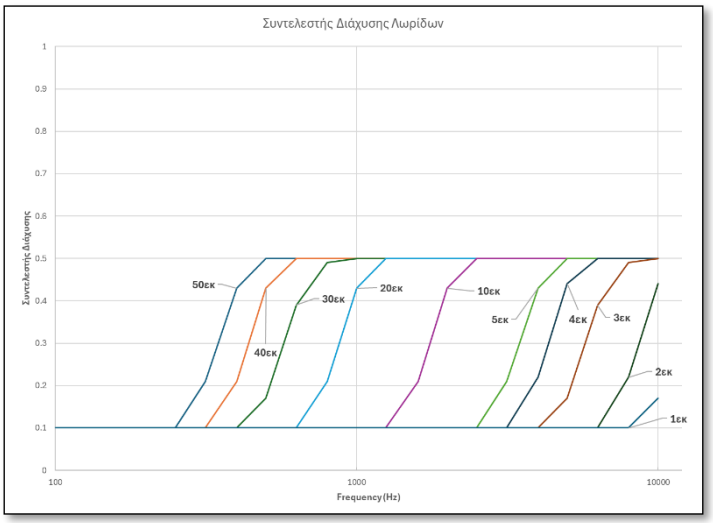
Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) ακουστικού panel

Ως προς το συντελεστή σκέδασης, μια ρεαλιστική προσέγγιση μπορεί να μας δώσει το λογισμικό Ease, επιτρέποντας την εξαγωγή τυπικών ενδεικτικών τιμών ή, ακριβέστερα, τυπικών κατανομών συντελεστών σκέδασης στο πεδίο της συχνότητας. Η εκτίμηση αυτή βρίσκεται στο module “Ease 4.4 material Base”, στο μενού Edit→ Calculate Scattering.



Εικόνα 3.2.8 Παράθυρο εκτίμησης συντελεστή σκέδασης στο Ease 4.4

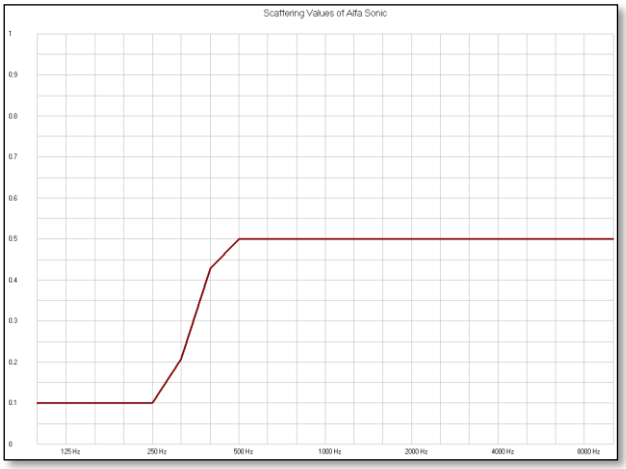
Στο παράθυρο αυτό μπορούμε να ορίσουμε το πλάτος του ακουστικού panel (0.5m) και το πρόγραμμα μας επιστρέφει μια καμπύλη τύπου S (S-Curve) η μορφή της οποίας είναι τυπική για τέτοιες αδρές εκτιμήσεις σκέδασης. Η λεγόμενη "S-Curve" επί της ουσίας παίρνει ως δεδομένο ότι υπάρχει ένα όριο συχνότητας κάτω από το οποίο το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο από τη γεωμετρική διαμόρφωση (το μήκος) που αντιστοιχεί στο όριο αυτό. Κάτω από αυτή τη συχνότητα η επιφάνεια θεωρείται λοιπόν λεία, με έναν χαμηλό ενδεικτικό συντελεστή σκέδασης 10%. Πάνω από το όριο αυτό το μήκος κύματος είναι μικρότερο από τις γεωμετρικές διαμορφώσεις και άρα τίθεται μια υψηλή τιμή συντελεστή σκέδασης. Η μετάβαση από τη μια τιμή στην άλλη γίνεται με μια σχετικά απότομη αύξηση από τη χαμηλή στην υψηλή τιμή συντελεστή σκέδασης η οποία δίνει την καμπύλη μια σιγμοειδή μορφή Οι τιμές που μας δίνει το module για τα διάφορα μήκη είναι οι ακόλουθες:



Διάγραμμα 3.2.9 Συντελεστής σκέδασης (S-Curve, εκτίμηση από το λογισμικό Ease)

Ας δούμε τώρα τι συνεπάγεται αυτή η προσέγγιση για τα ηχοαπορροφητικά panel. Το πλάτος τους είναι 50cm και αυτό αντιστοιχεί σε ένα κύμα συχνότητας 340m / 0,5m = 680 sec^{-1} =

680Hz. Επιπλέον, τα panel έχουν τη μορφή κατακόρυφων λωρίδων MDF πλάτους 1cm, με κενά (αυλακώσεις) ανάμεσά τους της τάξης του 1cm. Η διάταξη αυτή λωρίδων εγκοπών μπορεί και αυτή να θεωρηθεί μια διαμόρφωση τύπου διαχυτή διάστασης 1cm. Βλέπουμε ωστόσο από το προηγούμενο διάγραμμα ότι το Ease δεν θεωρεί ότι υπάρχει επίπτωση αυτής της διαμόρφωσης εντός του συχνοτικού πεδίου που μελετά το λογισμικό. Συνεπώς η καμπύλη σκέδασης του ηχοαπορροφητικού panel διαμορφώνεται ως εξής:

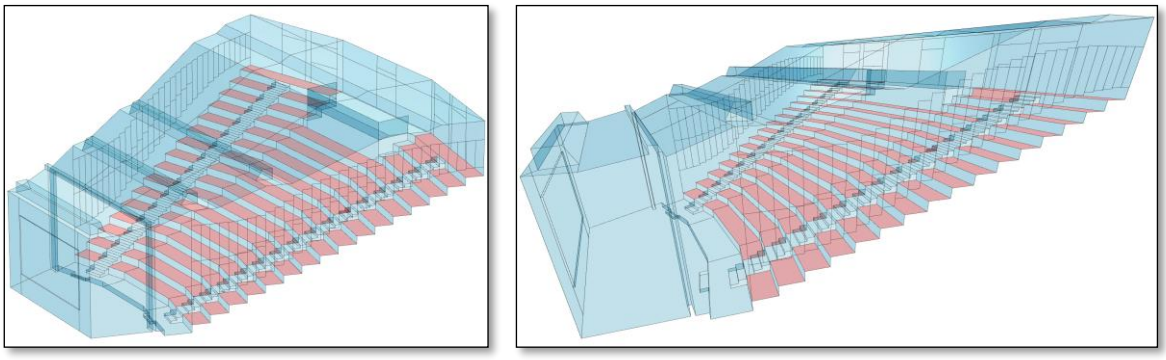


Διάγραμμα 3.2.10 Συντελεστής σκέδασης ακουστικού panel πλευρικών τοίχων

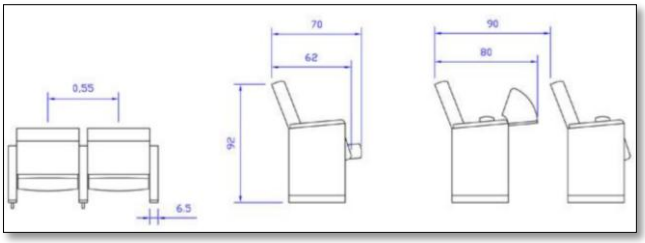
3.2.2 Καθίσματα

Τύπος: ΑΧΙΑ (Κατασκευαστής: BIRO HELLAS)

Το κάθισμα καλύπτει όλη την περιοχή των θεατών.



Εικόνα 3.2.11 Κάλυψη αμφιθεάτρου από καθίσματα

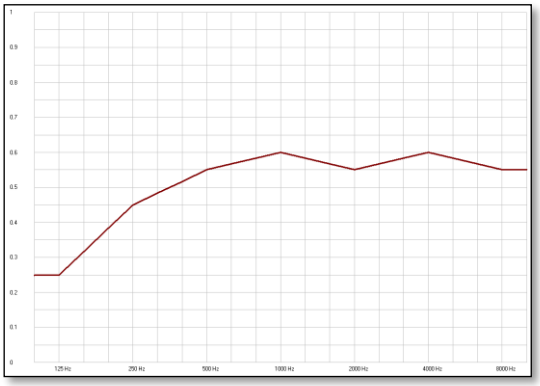


Εικόνα 3.2.12 Οι διαστάσεις των καθισμάτων του αμφιθεάτρου

Η διάταξη των καθισμάτων διαμορφώνεται σε αναβαθμούς μέσα στο αμφιθέατρο. Διαθέτοντας αναδιπλούμενες βάσεις με ποικίλες απορροφητικές ιδιότητες αλλά και μια πλούσια γεωμετρία και μικρογεωμετρία, η ηχοαπορροφητικότητα αλλά και η διάχυση που θα συνεισφέρουν αναμένονται να είναι αρκετά υψηλές. Τα καθίσματα *καλύπτουν το 17.8% (220.41m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθέατρου*.

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης (Absorption Coefficient) καθισμάτων

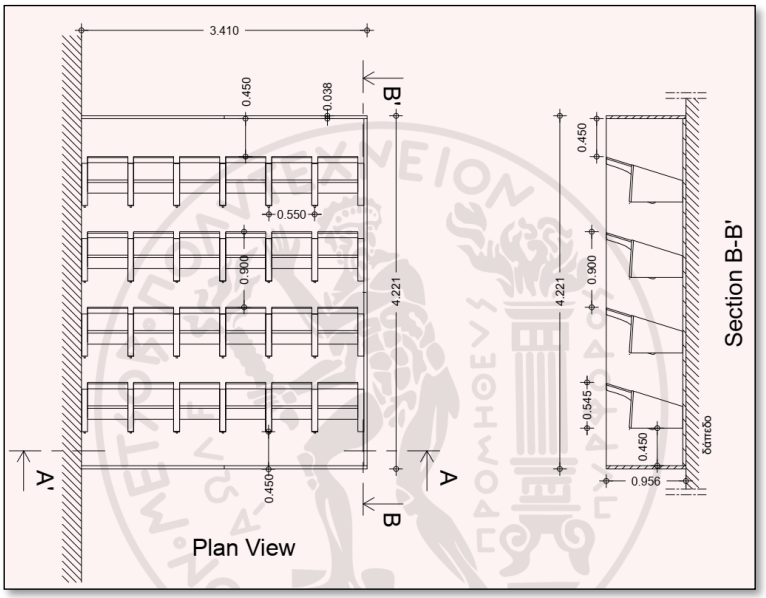
Το panel συνοδεύεται από το επίσημο τεύχος μέτρησης και πιστοποίησης του συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας (βλ. παράρτημα 2).



Freq f Hz	T1 RT s	T2 RT s	α_s	α_p
100	8.61	4.47	0.30	
125	8.89	4.95	0.25	0.25
160	8.60	4.69	0.27	
200	8.11	3.77	0.40	
250	8.17	3.62	0.43	0.45
315	6.94	2.97	0.54	
400	5.82	2.77	0.53	
500	5.91	2.68	0.57	0.55
630	5.80	2.58	0.60	
800	5.79	2.58	0.60	
1000	5.35	2.50	0.60	0.60
1250	4.83	2.40	0.59	
1600	4.38	2.29	0.58	
2000	3.73	2.15	0.55	0.55
2500	3.11	1.87	0.59	
3150	2.51	1.65	0.58	
4000	1.99	1.40	0.60	0.60
5000	1.62	1.23	0.57	

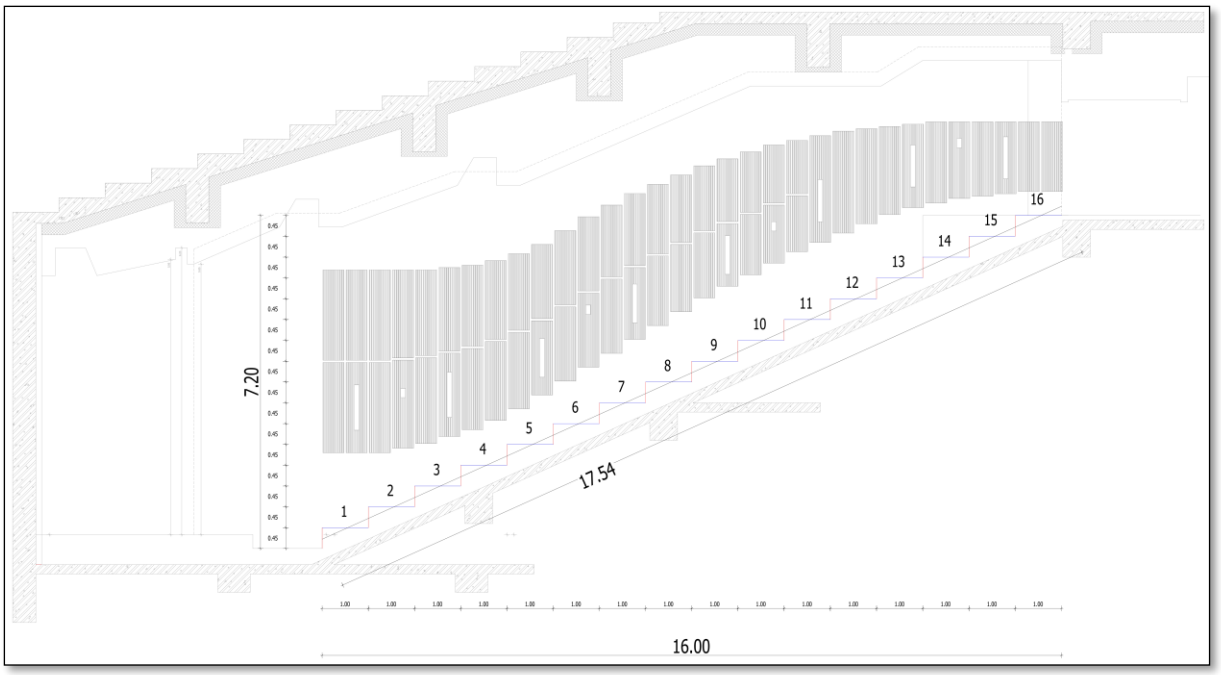
Διάγραμμα 3.2.13 Συντελεστής απορρόφησης καθίσματος αμφιθεάτρου (δεξιά: απόσπασμα από επίσημο πιστοποιητικό, βλ. παράρτημα 2)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργαστηριακή μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης έχει γίνει χρησιμοποιώντας ως δείγμα μια διάταξη 24 καθισμάτων σε 4 σειρές εμβαδού 4.2 x 3.4 μέτρων με ενδιάμεσα κενά ανάμεσα σε κάθε σειρά.



Εικόνα 3.2.14 Απόσπασμα πιστοποιητικού ακουστικής απόδοσης καθίσματος αμφιθεάτρου (βλ. παράρτημα 2)

Η διάταξη αυτή αναφέρεται σε μια οριζόντια τοποθέτηση καθισμάτων. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση του κελύφους του αμφιθεάτρου περιλαμβάνει αναβαθμούς με οριζόντιο πάτημα (μήκους 1 μέτρου) και ρίχτι (ύψους 0,45 μέτρων).



Εικόνα 3.2.15 Τομή αμφιθεάτρου, περίγραμμα καθισμάτων

Αναλύοντας το ζήτημα γεωμετρικά, βλέπουμε ότι μπορεί κανείς να προσεγγίσει το θέμα με δύο τρόπους:

α) Τα καθίσματα μπορούν να προσεγγιστούν ως ένα ομαλό κεκλιμένο επίπεδο μήκους 17,54m

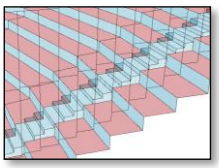
β) Τα καθίσματα προσεγγίζονται ως οριζόντιες λωρίδες, με την καθεμία να αντιστοιχεί στο πάτημα του κάθε αναβαθμού μήκους 1m έκαστο. Στην περίπτωση αυτή τα καθίσματα καταλαμβάνουν ένα μήκος 16m, ενώ υπάρχει και ένα μήκος 16 x 0,45m / ρίχτι = 7,2m για το οποίο δεν έχουμε καμία ασφαλή εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς του.

Αντιμετωπίζοντας τις δύο εναλλακτικές για τη μοντελοποίησή μας, σχολιάζουμε τα ακόλουθα:

Στο σενάριο α: Θεωρώντας ότι τα καθίσματα διατάσσονται ως ένα ομαλό κεκλιμένο επίπεδο μήκους 17,54m παραβιάζουμε την προϋπόθεση χρήσης του δοσμένου πιστοποιημένου συντελεστή απορρόφησης του καθίσματος καθώς η μέτρηση έχει γίνει για οριζόντια καθίσματα και όχι για διάταξή τους σε αναβαθμούς.

Στο σενάριο β: Σε περίπτωση που θεωρήσουμε ότι τα 7,2m κάθετης επιφάνειας αποτελούν και αυτά κάθισμα τότε θα έχουμε σίγουρα υπερεκτιμήσει την επίδραση των καθισμάτων στο χώρο διότι θα έχουμε υπολογίσει ένα μήκος καθισμάτων 16+7,2=23,2m.

Για το λόγο αυτό επιλέγουμε τη λύση β, δεχόμενοι ότι οι κατακόρυφες επιφάνειες δεν μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια, αλλά επίσης δεν μπορούν να θεωρηθούν επιφάνειες καθισμάτων.



Εικόνα 3.2.16 Λεπτομέρεια μοντελοποίησης επιφανειών καθισμάτων

Επιπλέον, στη βιβλιογραφία εντοπίζουμε ένα γενικό διαχωρισμό μεταξύ «βαριών» και «ελαφριών» καθισμάτων. Η διαφορά τους, σύμφωνα με τον Λουτρίδη (2015, σ. 143), είναι ότι τα βαριά καθίσματα παρουσιάζουν υψηλότερη απορροφητικότητα και με αυτό τον τρόπο καθίσταται δευτερεύουσα και μη καθοριστική στη συνολική ηχοαπορροφητικότητα του χώρου η παρουσία ή μη ακροατών. Αντιθέτως, στην περίπτωση ενός «ελαφριού» καθίσματος η παρουσία ακροατών οδηγεί σε αύξηση της συνολικής ηχοαπορροφητικότητας.

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Βαρύ κάθισμα άδειο	0,70	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81
Βαρύ κάθισμα με ακροατή	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90
Ελαφρύ κάθισμα άδειο	0,36	0,47	0,57	0,62	0,62	0,6
Ελαφρύ κάθισμα με ακροατή	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83

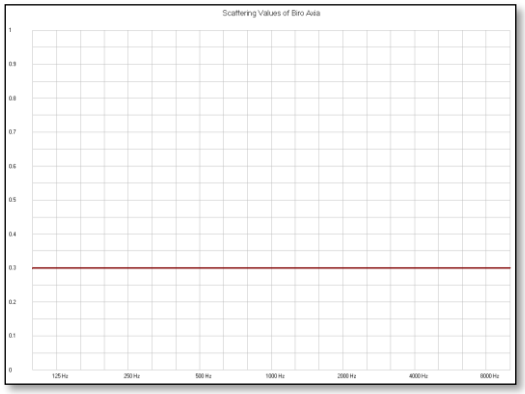
Πίνακας 3.2.17 Συντελεστές απορρόφησης (βαριά-ελαφριά/άδεια-κατειλημμένα καθίσματα) (Λουτρίδης, 2015, σ. 143)

Στην περίπτωση του αμφιθεάτρου που μελετούμε είναι σαφές ότι έχουμε μια *περίπτωση «ελαφριού» καθίσματος και άρα αναμένουμε η συνολική ηχοαπορροφητική συμπεριφορά του χώρου να είναι ουσιωδώς διαφορετική με ακροατές και απουσία ακροατών*. Η πρόσθετη ηχοαπορροφητικότητα που προσθέτει η παρουσία κοινού (αναλογικά στο εμβαδό καθισμάτων που καταλαμβάνει) σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 0,15-0,20.

Σημειώνουμε ότι μελετώντας μια διαφορετική παράμετρο πιο πάνω (υποκεφάλαιο 2.1.1.3, Πίνακας 2.1.8), αυτή του όγκου ανά θεατή, σχολιάσαμε επίσης το ότι η ακουστική συμπεριφορά του χώρου θα επηρεάζεται από την παρουσία (ή την απουσία) κοινού.

Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) καθισμάτων

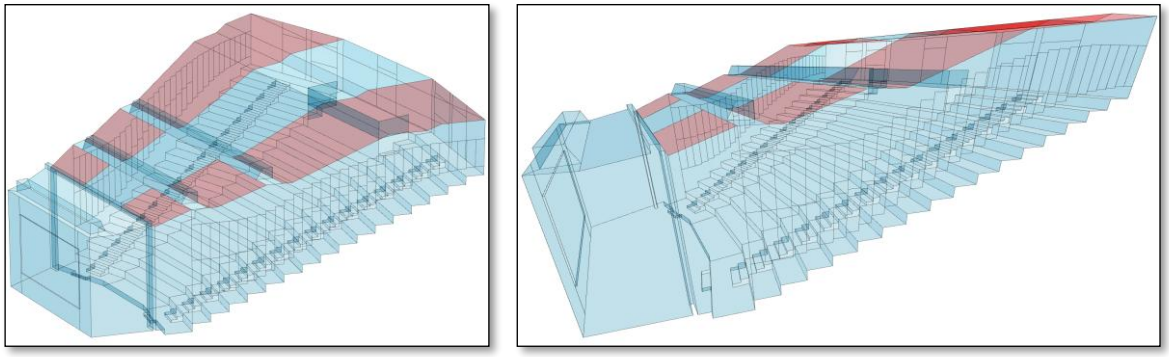
Το Ease δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής ενός ενδεικτικού συντελεστής σκέδασης για καθίσματα χωρίς θεατές (“unoccupied seats”). Η εκτίμηση που το Ease θέτει είναι μια σταθερή τιμή σκέδασης 30%.



Διάγραμμα 3.2.18 Συντελεστής σκέδασης καθίσματος αμφιθεάτρου

3.2.3 Διάτρητη γυψοσανίδα

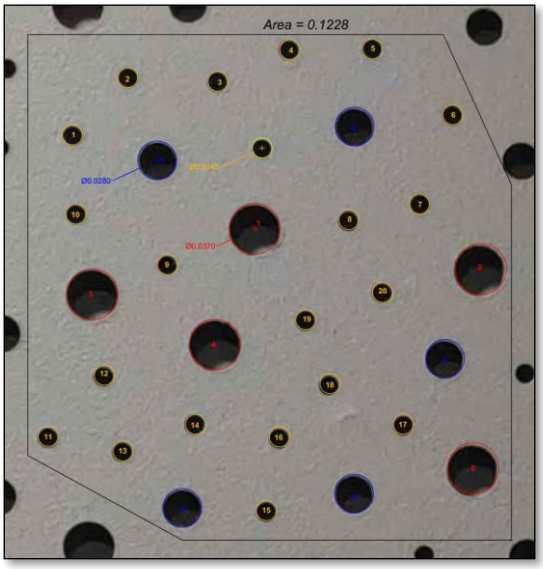
Τύπος: 8/15/20 R [Random Perforation] (Κατασκευαστής: KNAUF INSULATION)



Εικόνα 3.2.19 Κάλυψη αμφιθεάτρου από διάτρητη γυψοσανίδα

Η διάτρητη γυψοσανίδα καλύπτει δύο ανεξάρτητες και συμμετρικές ζώνες εκατέρωθεν του άξονα του αμφιθεάτρου στην οροφή, *καλύπτοντας το 14.9% (τα 183.81m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου)*.

Κατά την καταγραφή των υλικών παρατηρήθηκε μια ασάφεια ως προς το ποιός είναι ο ακριβής τύπος της διάτρητης γυψοσανίδας που χρησιμοποιήθηκε (καθώς τοποθετήθηκαν διαφόρων τύπων αντίστοιχες γυψοσανίδες και σε άλλους χώρους του κτιρίου). Για το λόγο αυτό φωτογραφήθηκε η πρόσοψη της γυψοσανίδας και έπειτα από την προφανή διαπίστωση ότι πρόκειται για διάτρηση τυχαίας διάταξης (random perforation) εκτιμήθηκε ο ακριβής τύπος από τον κατάλογο του κατασκευαστή KNAUF INSULATION.

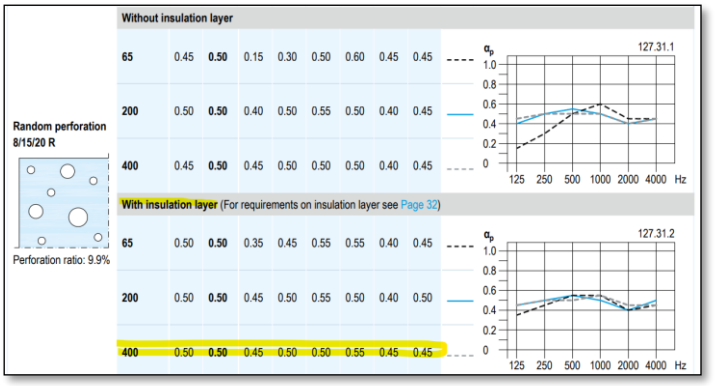


Εικόνα 3.2.20 Σκαρίφημα για τον υπολογισμό του ποσοστού διάτρησης

Σε ένα αρχείο autocad «κυκλώνουμε» μια περιοχή με ένα πολύπλευρο του οποίου το εμβαδό σημειώνουμε (0,1228 – αδιάστατο). Αντίστοιχα, μετρούμε τις διαμέτρους των μικρών, των μεσαίων και των μεγάλων οπών (0,0145 / 0,028 / 0,037 – αδιάστατα). Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές αυτές x551 προκύπτει η τριάδα τιμών 7,989 / 15,428 / 20,387, η οποία παραπέμπει στην τυποποιημένη αναλογία 8 / ~15 / ~20 η οποία εμφανίζεται στο μοντέλο διάτρητης γυψοσανίδας 8/15/20 R της KNAUF INSULATION (βλ. παράρτημα 3). Επαληθεύοντας τα παραπάνω, υπολογίζουμε το ποσοστό διάτρησης της γυψοσανίδας με βάση το πλήθος οπών ενός γνωστού τμήματος που ορίζουμε και του οποίου το εμβαδό γνωρίζουμε (βλ. εικόνα 3.2.20):

$$\frac{21\pi\cdot\left(\frac{0.0145}{2}\right)^2+5\pi\cdot\left(\frac{0.028}{2}\right)^2+5\pi\cdot\left(\frac{0.037}{2}\right)^2}{0{,}1228}=0.09708901\cong 9{,}7\% \qquad \text{(Σχέση 3.5)}$$

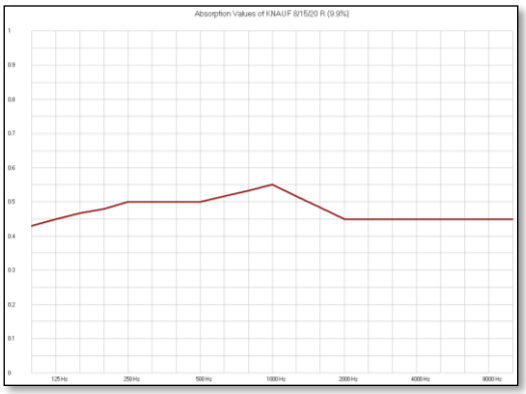
Η τιμή βρίσκεται πολύ κοντά στο συντελεστή διάτρησης 9,9% (perforation ratio) του κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο 8/15/20 R. Λεπτομέρειες για το συγκεκριμένο υλικό παίρνουμε από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή (βλ. παράρτημα 3).



Εικόνα 3.2.21 Απόσπασμα τεχνικού φυλλαδίου διάτρητης γυψοσανίδας (βλ. παράρτημα 3)

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης (Absorption Coefficient) διάτρητης γυψοσανίδας

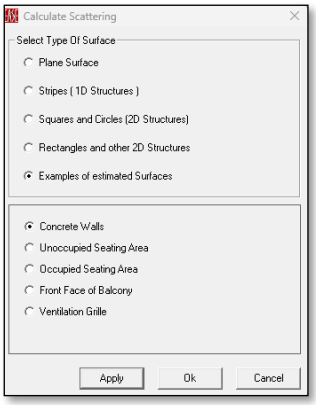
Εισάγουμε τις τιμές ηχοαπορροφητικότητας του κατασκευαστή στο λογισμικό Ease.



Διάγραμμα 3.2.22 Συντελεστής απορρόφησης διάτρητης γυψοσανίδας

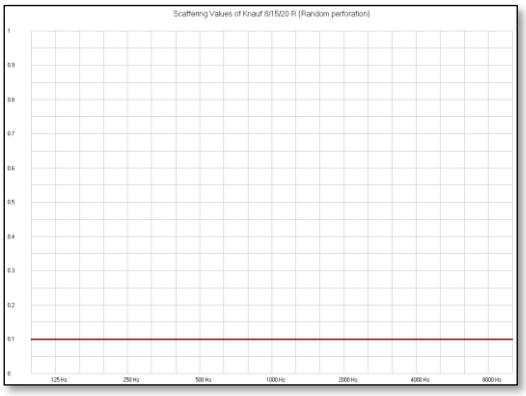
Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) διάτρητης γυψοσανίδας

Σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν ήδη σχετικά με την εκτίμηση του συντελεστή σκέδασης που προσφέρει το Ease, οι διαμορφώσεις που είναι μικρότερες των 2 εκατοστών δεν επηρεάζουν επί της ουσίας τη δυνατότητα που έχει το υλικό να διαχέει συχνότητες στην προς μελέτη συχνοτική περιοχή (έως τα 10kHz). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε μια απλή εκτίμηση σκέδασης μιας επίπεδης επιφάνειας, βαμμένης με απλή μπογιά.



Εικόνα 3.2.23 Παράμετροι εκτίμησης συντελεστή σκέδασης (γυψοσανίδα)

Με βάση την εκτίμηση για το υλικό “Concrete Wall” η τιμή που προκύπτει είναι 10%.



Διάγραμμα 3.2.24 Συντελεστής σκέδασης διάτρητης γυψοσανίδας

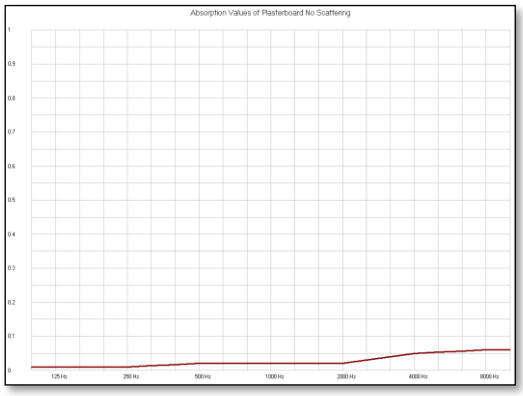
3.2.4 Κοινή γυψοσανίδα

Τύπος: GKB 71 (Κατασκευαστής: KNAUF)

Με το υλικό "plasterboard" θα προσομοιώσουμε αφενός όλες τις επιφάνειες χωρίς ηχοαπορροφητικές ιδιότητες οι οποίες έχουν κατασκευαστεί από την παραπάνω γυψοσανίδα (σκηνή, μπαλκόνι/γαλαρία), αφετέρου τα λοιπά υλικά με ανακλαστική συμπεριφορά για τα οποία χρειαζόμαστε μια απλή και γενική προσέγγιση χωρίς περαιτέρω λεπτομέρειες. Τέτοια υλικά είναι τα παράθυρα χειριστή και μεταφραστή, οι πόρτες του αμφιθεάτρου, η σκηνή συμπεριλαμβανομένου του δαπέδου της και τα σκαλιά του αμφιθεάτρου. Οι επιφάνειες αυτές *καλύπτουν συνολικά το 56,5% του συνολικού κελύφους τους αμφιθεάτρου (669,12m^2 από τα 1.236,33m^2 του αμφιθεάτρου)*.

Συντελεστής απορρόφησης (Absorption Coefficient) κοινής γυψοσανίδας

Η γυψοσανίδα KNAUF GKB που χρησιμοποιείται δεν διαθέτει καταγεγραμμένα και πιστοποιημένα ακουστικά δεδομένα, κάτι που επιβεβαιώθηκε έπειτα από επικοινωνία με τους κατασκευαστές KNAUF και KNAUF INSULATION. Η πληροφόρηση που προέκυψε από αυτές τις επικοινωνίες και η οποία επιβεβαιώθηκε σε κάθε διαδικτυακή αναζήτηση είναι ότι αυτού του τύπου οι γυψοσανίδες γενικά και η συγκεκριμένα ειδικά είναι «φτωχές» ακουστικά, πρακτικά ανακλαστικές σε όλο το συχνοτικό πεδίο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τους δείκτες απορρόφησης του υλικού "concretes" από τη βιβλιοθήκη του Ease, ως μιας λείας απλής επιφάνειας χωρίς κανένα ειδικό ηχοαπορροφητικό ή άλλο ακουστικό χαρακτηριστικό.

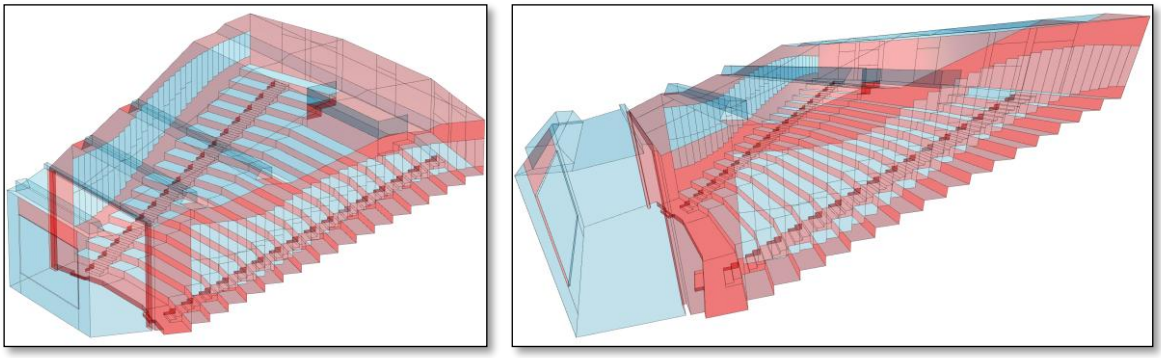


Διάγραμμα 3.2.25 Συντελεστής απορρόφησης κοινής γυψοσανίδας

Ο συντελεστής σκέδασης ωστόσο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι και εξηγούνται αμέσως πιο κάτω.

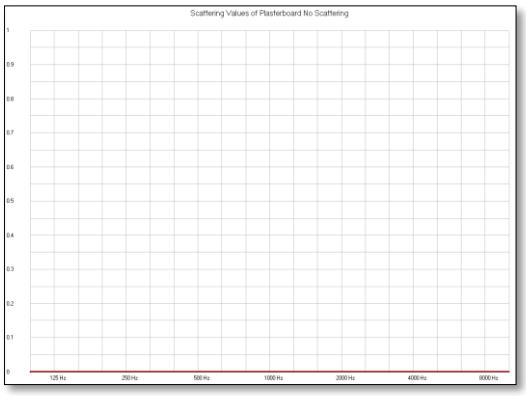
Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) γυψοσανίδας με επένδυση λείου καπλαμά

Ένα μέρος της εγκατεστημένης απλής γυψοσανίδας του κελύφους του αμφιθεάτρου θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ως επιφάνεια μηδενικής σκέδασης. Ο λόγος είναι ότι σε συγκεκριμένες περιοχές η γυψοσανίδα είναι επενδυμένη με λείο καπλαμά. Οι περιοχές είναι αυτές είναι α) οι πλευρικές επιφάνειες που δεν έχουν επενδυθεί με ηχοαπορροφητικά panel, β) όλη η «πλάτη» του αμφιθεάτρου (συμπεριλαμβανομένων και παραθύρων μεταφραστή / χειριστή, πορτών εισόδου / εξόδου από / προς φουαγιέ) και γ) οι διάδρομοι καθόδου προς σκηνή ανάμεσα στα καθίσματα (λείες επιφάνειες, δάπεδο, τυπικά όχι γυψοσανίδα αλλά με μηδενική συμπεριφορά σε σκέδαση σε κάθε περίπτωση).



Εικόνα 3.2.26 Κάλυψη αμφιθεάτρου από γυψοσανίδα με επένδυση λείου καπλαμά

Το υλικό αυτό καταχωρείται ως “plasterboard no scattering” και έχει μηδενικό συντελεστή σκέδασης.

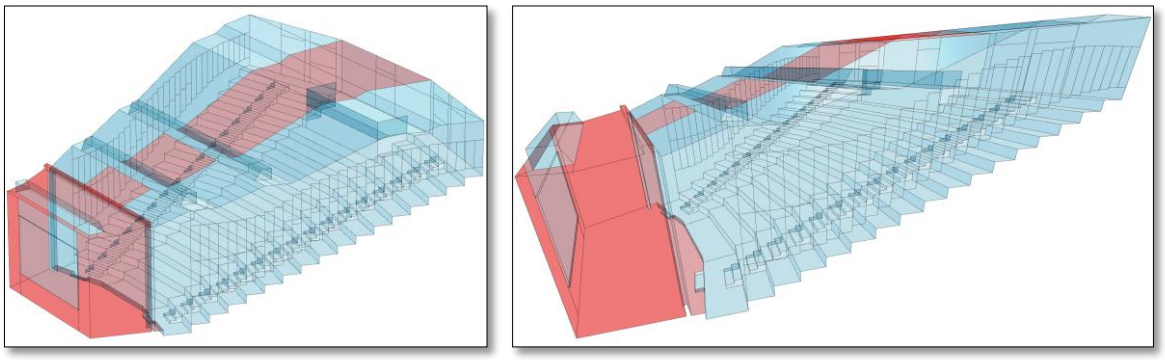


Διάγραμμα 3.2.27 Συντελεστής σκέδασης για γυψοσανίδα με επένδυση λείου καπλαμά

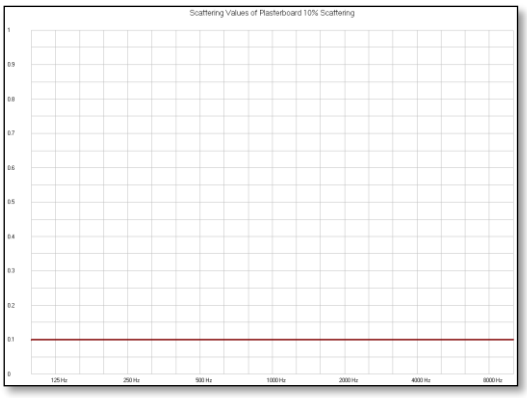
Οι επιφάνειες αυτές «αμελητέας» σκέδασης αντιστοιχούν στα 400.23m^2 από τα 699.12m^2 της κοινής γυψοσανίδας του κελύφους του αμφιθεάτρου και άρα *καλύπτουν το 32.5% (400.23m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου.*

Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) βαμμένης γυψοσανίδας

Η σκηνή και ο κεντρικός άξονας της οροφής έχουν βαφτεί με μια απλή μπογιά η οποία δίνει στην επιφάνεια μια πιο άγρια υφή και σίγουρα διαφέρει ουσιωδώς ως προς τη σκέδασή του από τον λείο καπλαμά που αναφέρθηκε πιο πάνω. Πρόκειται για περίπτωση αντίστοιχη αυτής της διάτρητης γυψοσανίδας και για αυτό το λόγο, με βάση τα όσα έχουν ειπωθεί στην αντίστοιχη παράγραφο, ορίζουμε ως συντελεστή σκέδασης της τιμή 10% και ονομάζουμε αυτό το υλικό “plasterboard 10% scattering”.



Εικόνα 3.2.28 Κάλυψη αμφιθεάτρου από βαμμένη γυψοσανίδα



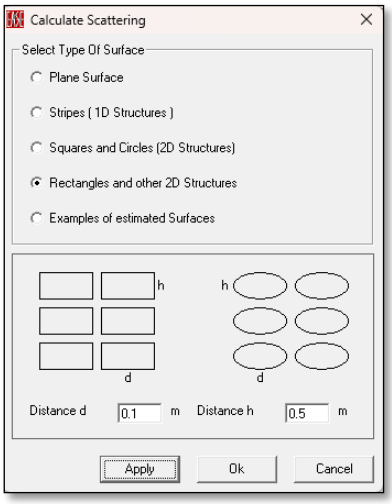
Διάγραμμα 3.2.29 Συντελεστής σκέδασης βαμμένης γυψοσανίδας

Οι επιφάνειες αυτές εκτιμώμενου συντελεστή σκέδασης 10% αντιστοιχούν στα 238.69m^2 από τα 699.12m^2 της κοινής γυψοσανίδας του κελύφους του αμφιθεάτρου και άρα *καλύπτουν το 19.31% (238.69m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου*.

Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) σε ζώνες υψηλής διάχυσης

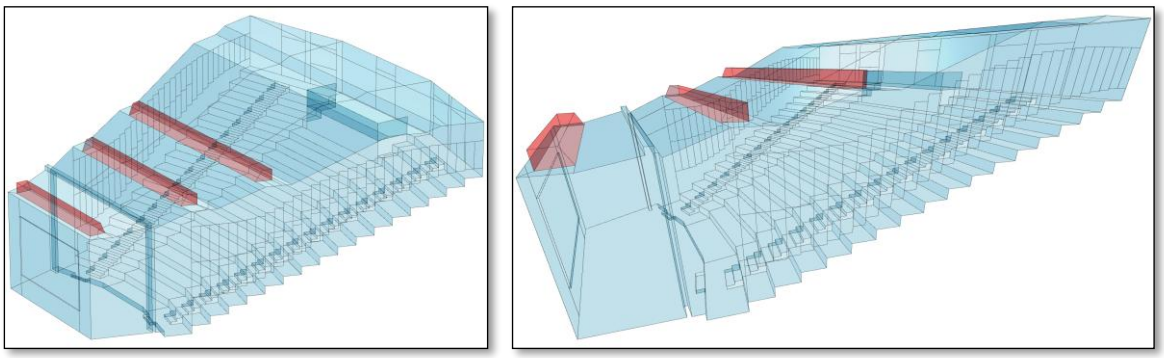
Η οροφή έχει κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές στις οποίες τοποθετείται εξοπλισμός θεατρικού φωτισμού (με καλωδίωση και λοιπά εξαρτήματα), στερεωμένος σε μεταλλικές τράσες, πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα τα οποία με τη σειρά τους καταλήγουν βιδωμένα στην οροφή του αμφιθεάτρου. Χάριν ακρίβειας και πληρότητας του μοντέλου οι περιοχές αυτές θα πρέπει να μοντελοποιηθούν ως έντονα διαχυτικές, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας εσωτερικά τους και της παρουσίας πολλών μικροεμποδίων, εσοχών και πτυχώσεων.

Ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το πλάτος της εσοχής (0,9m) και θεωρώντας ότι αυτό το πλάτος παρεμβάλλεται ως μια λωρίδα με μεταβλητή απόσταση από τον τοίχο σε σχέση με τις γειτονικές λωρίδες, λαμβάνουμε μια πρόχειρη εκτίμηση συντελεστή σκέδασης από το Ease επιλέγοντας στο module Ease 4.4 Material Base: Edit→Calculate Scattering [Παράθυρο Calculate Scattering]→Rectangles and other 2D Structures→Distance d=0.1m & Distance h=0.5m.



Εικόνα 3.2.30 Παράμετροι εκτίμησης συντελεστή σκέδασης (ζώνες υψηλής διάχυσης)

Θεωρούμε δηλαδή ότι η περιοχή εκείνη περιέχει διαμορφώσεις μακρόστενου σχήματος, πλάτους 10cm και μήκους μισού μέτρου, επιχειρώντας έτσι να δώσουμε στο πρόγραμμα μια αδρή εικόνα του τι σώματα αποτελούν τη γεωμετρία του εσωτερικού του (τράσες, μπάρες, κουτιά σύνδεσης κτλ). Είναι σαφές ότι πρόκειται για μια αμιγώς ποιοτική και εμπειρική προσέγγιση η οποία ωστόσο δεν θα επηρεάσει καθοριστικά τα αποτελέσματα του μοντέλου καθώς οι επιφάνειες αυτές αποτελούν μόλις το 4.7% του συνολικού κελύφους (58.20m^2).



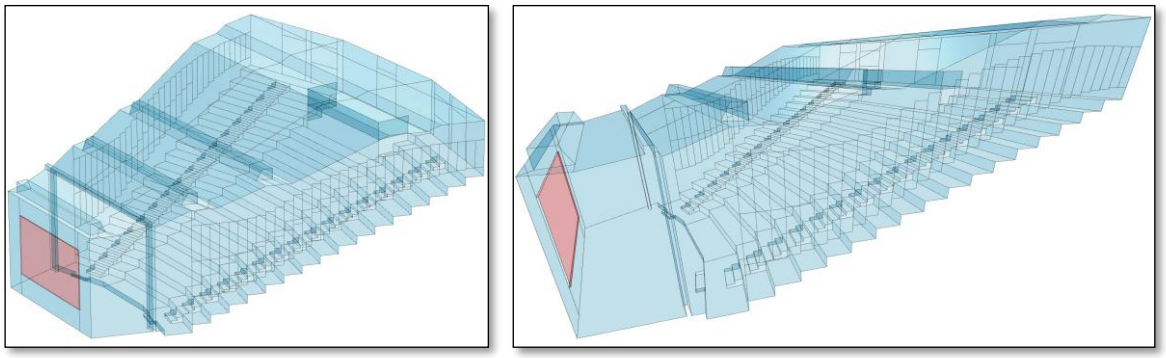
Εικόνα 3.2.31 Κάλυψη αμφιθεάτρου από τις ζώνες «υψηλής σκέδασης»

Οι επιφάνειες αυτές «υψηλής σκέδασης» αντιστοιχούν στα 58.20m^2 από τα 699.12m^2 της κοινής γυψοσανίδας του κελύφους του αμφιθεάτρου και άρα *καλύπτουν το 4.71% (58.20m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου*.

3.2.5 LED Wall

Τύπος: DHI-PHSIA1.5-CH (Κατασκευαστής: DAHUA)

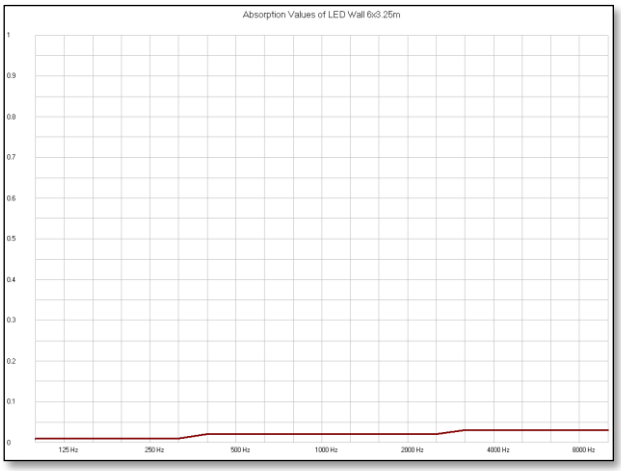
Το LED Wall είναι τοποθετημένο στην πλάτη της σκηνής, καλύπτοντας μια επιφάνεια πλάτους 6m και ύψους 3.25m. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί ένα κάδρο ίδιας υφής που πλαισιώνει την οθόνη και που έχει τοποθετηθεί για αισθητικούς λόγους και για λόγους απόκρυψης καλωδίων. Η επιφάνεια του LED Wall είναι ανακλαστική και λεία, καθώς τα συγκεκριμένα led panel διαθέτουν μια επίστρωση από ρητίνη για να εξασφαλίζεται μια πρόσθετη ανθεκτικότητα (αναγκαία από τη στιγμή που η οθόνη είναι άμεσα εκτεθειμένη στους παριστάμενους στη σκηνή). Το LED Wall *καλύπτει το 1.7% (21.2m^2 από τα 1236.33m^2) της συνολικής επιφάνειας του αμφιθεάτρου* και η επίδρασή του εκτιμάται ότι θα είναι αμελητέα όσον αφορά τις γενικές ακουστικές παραμέτρους με τις οποίες θα ασχοληθούμε πιο κάτω.



Εικόνα 3.2.32 Κάλυψη αμφιθεάτρου από επιφάνεια LED Wall

Συντελεστής απορρόφησης (Absorption Coefficient) LED Wall

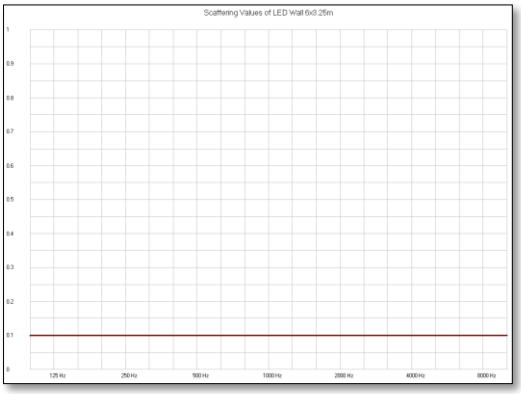
Για το υλικό αυτό έχουν τεθεί τιμές συντελεστή απορρόφησης ενδεικτικές, πολύ χαμηλές, οι οποίες ορίστηκαν έπειτα από έρευνα στο διαδίκτυο προς συλλογή ποιοτικών στοιχείων ή απόψεων σχετικά με τα ακουστικά χαρακτηριστικά τέτοιων LED Wall. Η προσέγγιση του LED Wall ως ξεχωριστού δομικού στοιχείου του αμφιθεάτρου και η διαφοροποιήσή του από την κοινή γυψοσανίδα που συναντούμε στο μεγαλύτερο μέρος του αμφιθεάτρου (και για την οποία θα μιλήσουμε αμέσως μετά) γίνεται για λόγους πληρότητας της μοντελοποίησης.



Διάγραμμα 3.2.33 Συντελεστής απορρόφησης επιφάνειας LED Wall

Συντελεστής σκέδασης (Scattering Coefficient) LED Wall

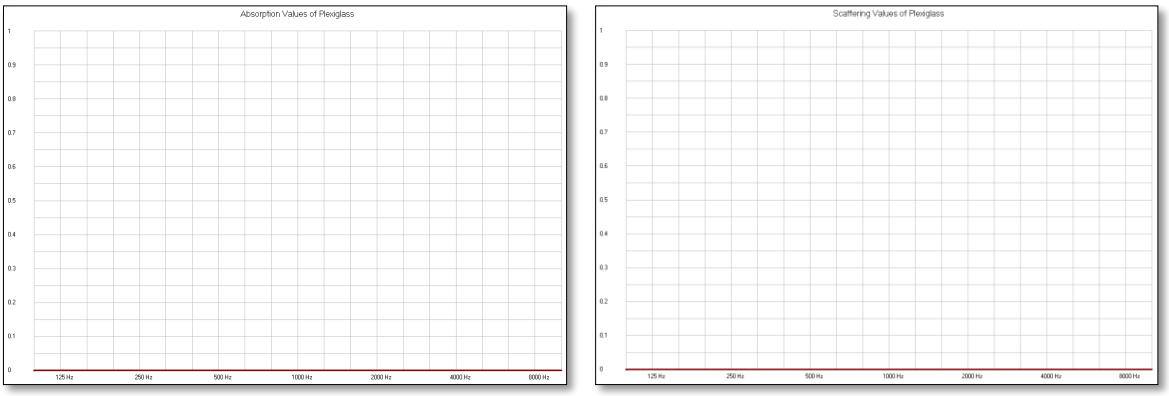
Με τον ίδιο τρόπο χειριζόμαστε και το ζήτημα της σκέδασης. Εφόσον πρόκειται για μια απλή matt λεία επιφάνεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και εδώ την προσέγγιση του "concrete wall" που μας δίνει έτοιμη το Ease, όπως συνέβη και με άλλες περιπτώσεις που ερευνήσαμε πιο πάνω.



Διάγραμμα 3.2.34 Συντελεστής σκέδασης βαμμένης γυψοσανίδας

3.2.6 Plexiglass

Η κεντρική είσοδος του αμφιθεάτρου καταλήγει σε ένα «μπαλκόνι» που δίνει τη δυνατότητα μιας γενικής εικόνας του χώρου. Στο σημείο αυτό δεν προβλέπονται καθίσματα. Είναι σημείο όπου μπορούν να σταθούν επισκέπτες με αναπηρικό καροτσάκι. Το μπαλκόνι αυτό αποτελείται από μια διαμόρφωση σχήματος «Π» από plexiglass την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε επιφάνεια μηδενικής απορρόφησης και σκέδασης.



Διάγραμμα 3.2.35 Συντελεστής απορρόφησης και συντελεστής σκέδασης plexiglass

Κεφάλαιο 4 Ηλεκτρακουστικό Σύστημα

4.1 Εξοπλισμός

4.1.1 Ηχείο Array

Το κύριο ηχείο που θα χρησιμοποιηθεί στο αμφιθέατρο είναι τύπου array, ενεργό, δηλαδή αυτοενισχυόμενο (με ενσωματωμένο ενισχυτή). Διαθέτει διπλό woofer 6 ιντσών με driver νεοδυμίου 2 ιντσών και tweeter 1 ίντσας με driver νεοδυμίου 1.75 ιντσών. Η οριζόντια γωνία εκπομπής του είναι 100 μοίρες, ενώ η κατακόρυφη γωνία εκπομπής του είναι 10 μοίρες. Ως γνωστό η κατακόρυφη γωνία εκπομπής των ηχείων τύπου array προκύπτει ως το άθροισμα πολλών τέτοιων ηχείων σε κατακόρυφη διάταξη. Η συχνότητα crossover (crossover frequency) του ηχείου είναι 900Hz. Η θερμότητα του ηχείου απάγεται με συναγωγή και όχι με ανεμιστήρες, που σημαίνει ότι δεν παράγει μηχανικό θόρυβο σε κανένα mode λειτουργίας.

Το συγκεκριμένο ηχείο διαθέτει επιπλέον πλεονεκτήματα όπως μικρό μέγεθος (προϋπόθεση για την αρμονική ενσωμάτωσή του στο σκηνικό) και σχετικά ελαφριά κατασκευή.

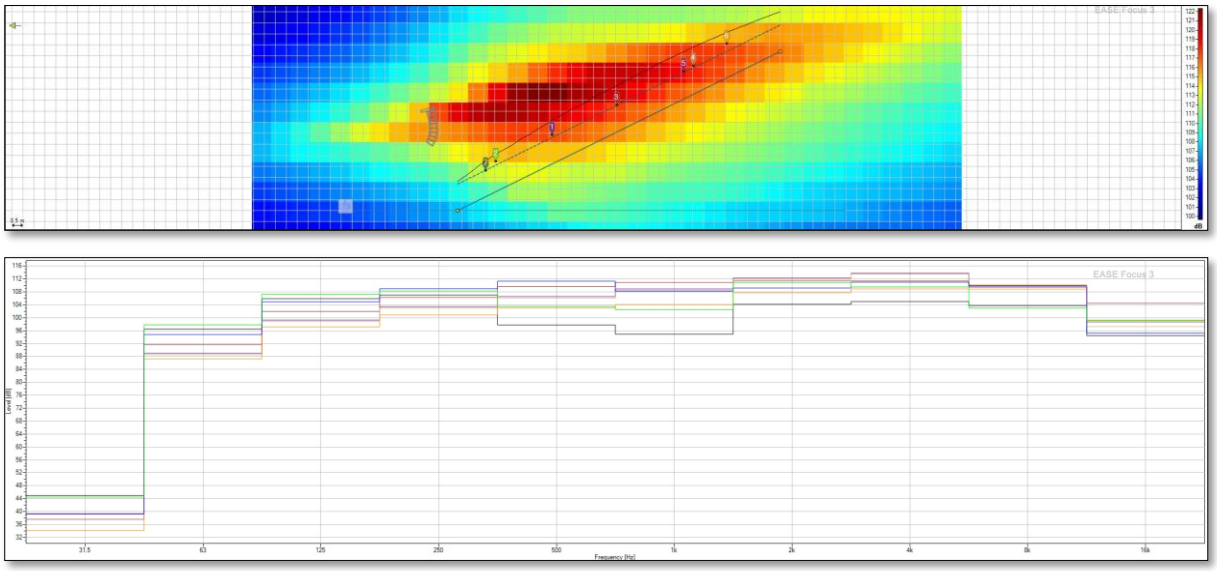
Μοντέλο	HDL-6A (13000496)
Κατασκευαστής	RCF SpA
Τύπος ηχείου	Αυτοενισχυόμενο line array δύο δρόμων
Μέγεθος woofer	2x6’’ με driver νεοδυμίου 2’’
Μέγεθος tweeter	1’’ με driver νεοδυμίου 1.75’’
Απόκριση συχνότητας	65Hz-20khz
Μέγιστο SPL	131dB@1m
Οριζόντια γωνία εκπομπής	100 μοίρες
Κατακόρυφη γωνία εκπομπής	10 μοίρες
Ισχύς (RMS)	700W
Ισχύς (Peak)	1400W
Διαστάσεις (ΠxYxB)	~47x24x38εκ
Βάρος	11,6Kg

Πίνακας 4.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου array[1]

Το πλήθος των array που πρέπει να τοποθετηθούν κατακόρυφα σε κάθε πλευρά (Left & Right) μπορεί να υπολογιστεί αξιοποιώντας το λογισμικό Ease Focus για μια απλή και γρήγορη διδιάστατη προσομοίωση. Το λογισμικό Ease Focus είναι ιδανικό για τέτοιες απλές προκαταρτικές προσεγγίσεις (preliminary design) καθώς δίνει τη δυνατότητα μιας αμιγώς ηλεκτρακουστικής προσομοίωσης, χωρίς να απαιτούνται στοιχεία της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου (στο λογισμικό δεν υπεισέρχεται κανένας παράγοντας αντηχητικού

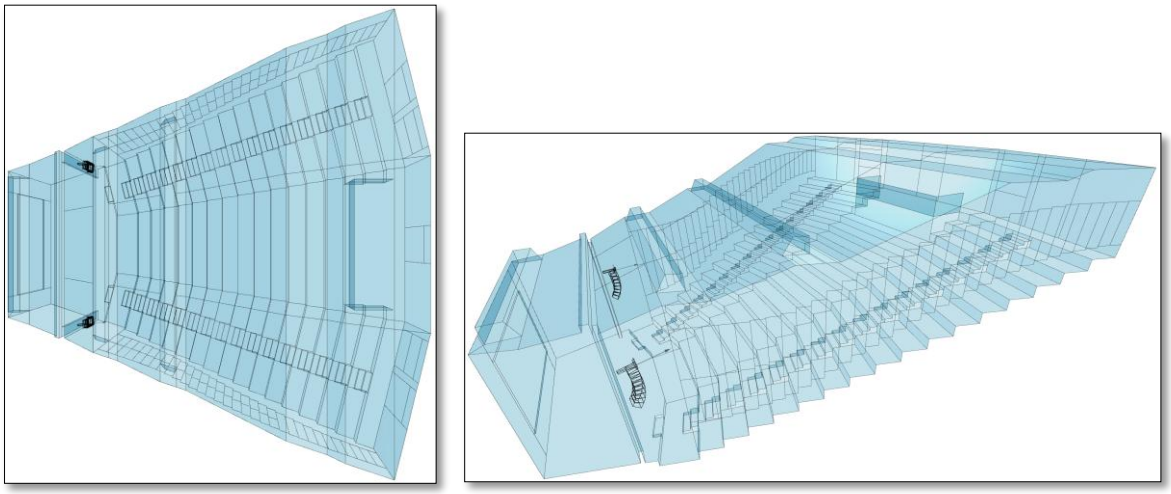
[1] Τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή. Περισσότερα στο ακόλουθο link: https://www.rcf.it/en/products/product-detail/hdl-6-a (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)

πεδίου). Αντιθέτως, το Ease Focus υπολογίζει αποκλειστικά direct SPL (A-Weighted ή Z-Weighted) που προκύπτει από την εκπομπή ηχείων πάνω σε δεδομένες επιφάνειες ελέγχου, χωρίς ορισμό επιφανειών κελύφους και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη ανακλάσεις.



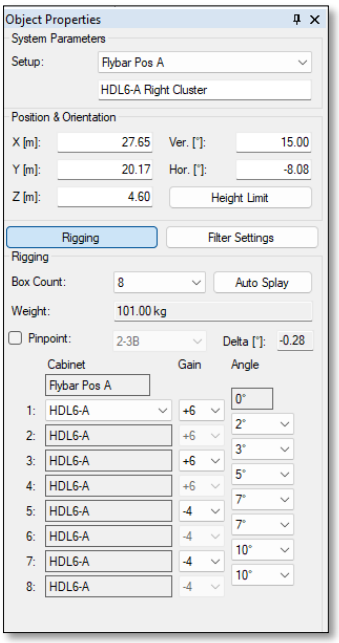
Σχήμα 4.1.2 Κάλυψη αμφιθεάτρου με array cluster (τομή) και συχνοτική απόκριση

Έπειτα από απλές δοκιμές καταγράφουμε ότι η επιθυμητή ομοιομορφία μπορεί να επιτευχθεί με cluster των 8 array στην κάθε πλευρά (Left & Right).



Εικόνα 4.1.3 Οι θέσεις των κεντρικών line array ηχείων

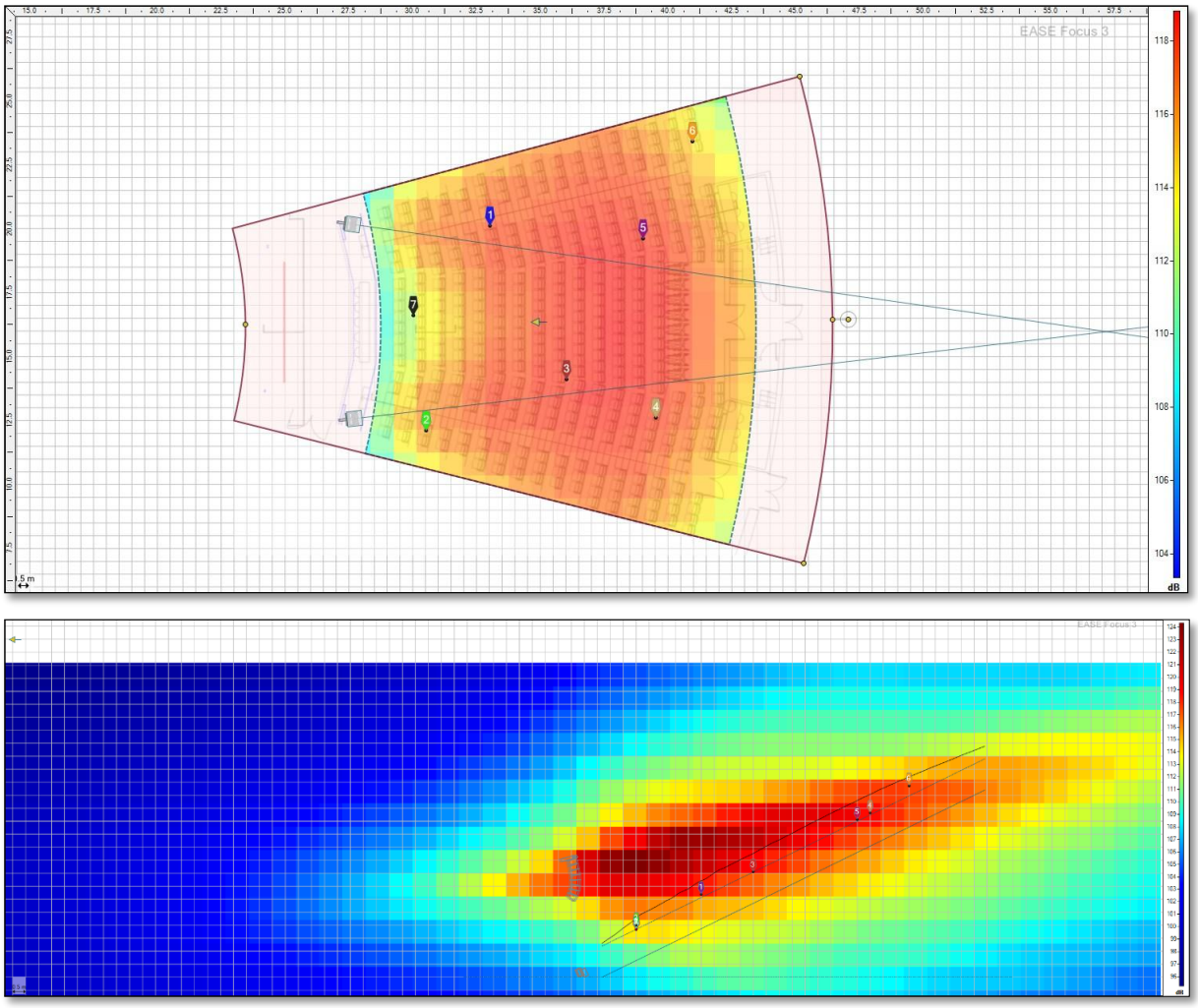
Επιπλέον, από τις δοκιμές προκύπτει μια πρώτη εικόνα των κατακόρυφων γωνιών που θα επιλεγούν, της γωνίας του frame του cluster (~15 μοίρες) καθώς και ενδεικτικών τιμών gain που θα πρέπει να εφαρμοστούν ανά ηχείο.



Εικόνα 4.1.4 Γωνίες array cluster

Παρατηρούμε ότι στην προσπάθεια να εξασφαλίσουμε ένα σχετικά ομαλό direct SPL (A-Weighted) καταλήγουμε σε μια διαφορά gain μεταξύ της άνω τετράδας (1, 2, 3, 4) και της κάτω τετράδας (5, 6, 7, 8) της τάξης των 10dB (+6dB / -4dB). Λόγω της υφιστάμενης καλωδίωσης σκοπεύουμε να οδηγήσουμε την πρώτη τετράδα ηχείων με ένα κοινό σήμα line audio και τη δεύτερη τετράδα με ένα δεύτερο κοινό σήμα line audio. Για το λόγο αυτό οι ρυθμίσεις του gain ήδη σε αυτό το preliminary στάδιο λαμβάνουν υπόψη την ομαδοποίηση του cluster αυτού σε 2 υπο-cluster / τετράδες ηχείων διότι η κάθε τετράδα θα οδηγείται από το δικό της line σήμα με κοινό gain.

Ήδη από αυτή την προσομοίωση διακρίνουμε μια ζώνη καθισμάτων η οποία δεν καλύπτεται επαρκώς. Πρόκειται για καθίσματα που είναι πολύ κοντά στη σκηνή, κάτω από την εκπομπή των array clusters, τα οποία όμως προορίζονται για επίσημους επισκέπτες και άρα απαιτείται μια διόρθωση της κάλυψης.

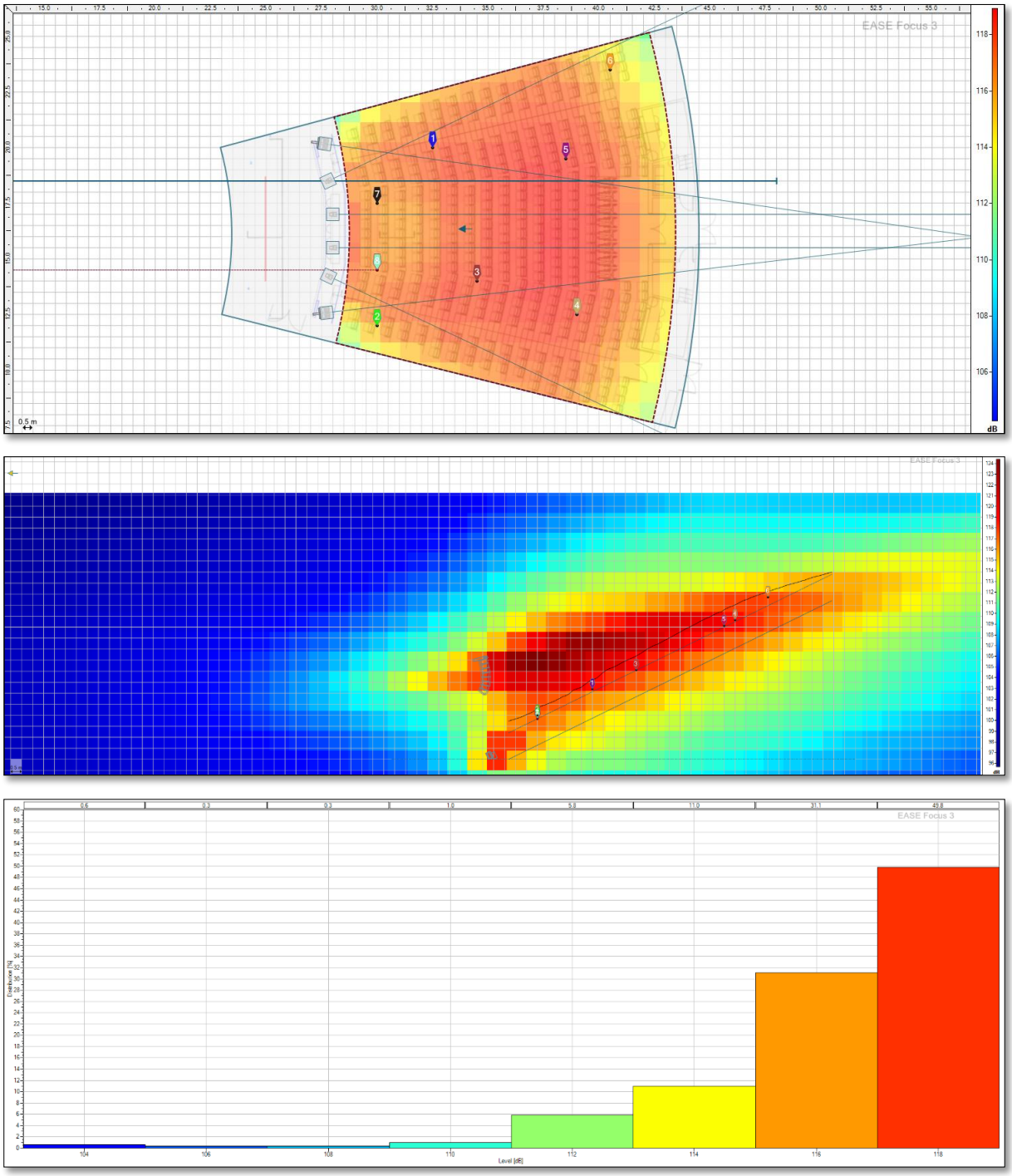


Σχήμα 4.1.5 Κάλυψη αμφιθεάτρου (direct SPL, A-weighted) με array cluster

Η κάλυψη αυτών των καθισμάτων με τον καλύτερο δυνατό τρόπο επιβάλλει την προσθήκη στο σύστημα ηχείων Front Fill τα οποία θα μπορούν να τοποθετηθούν στη σκηνή και να σημαδεύουν το κοινό, δίνοντας επιπλέον και μια σωστότερη αίσθηση του ακουστικού ειδώλου από αυτή που θα μπορούν να δώσουν τα array σε εκείνες τις θέσεις (το array επί της ουσίας βρίσκεται πάνω από τις σειρές αυτές). Σε αμφιθέατρα όπου υπάρχει σκηνή σε μεγάλο ύψος τέτοια ηχεία μπορούν να χωνευτούν στο μέτωπο της σκηνής. Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου αμφιθεάτρου όμως είναι ότι η σκηνή βρίσκεται μόλις δύο σκαλιά πάνω από τα μπροστινά καθίσματα και άρα τα ηχεία front fill μπορούν να τοποθετούνται μόνο πάνω στη σκηνή. Συνεπώς μπορούμε να μιλάμε μόνο για φορητά επιδαπέδια front fill που θα χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση.

4.1.2 Ηχείο Front Fill

Επιλέγεται ένα απλό παθητικό ηχείο, μικρό και διακριτικό, σχετικά βαρύ για να είναι ασφαλέστερη και σταθερότερη η στήριξή του. Σύμφωνα με το λογισμικό, τα 4 front fill ηχεία βελτιώνουν σημαντικά την κάλυψη στις πρώτες σειρές, όπως φαίνεται στην παρακάτω κάτοψη.

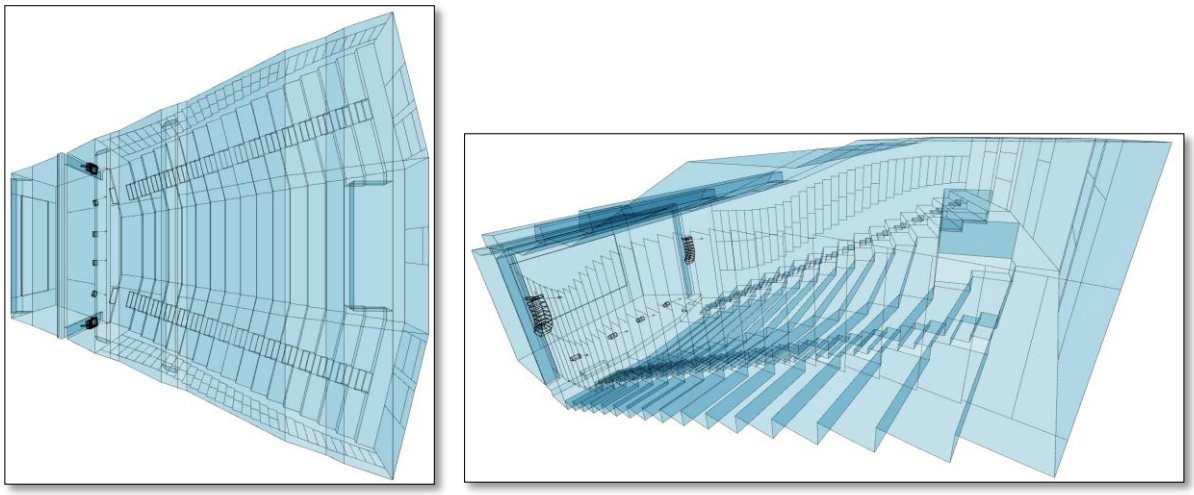


Σχήμα 4.1.6 Κάλυψη αμφιθεάτρου (direct SPL, A-Weighted) με array cluster και front fill

Πρόκειται για ένα ηχείο δύο δρόμων, μικρού μεγέθους, με woofer 6 ιντσών και tweeter 1 ίντσας, το οποίο μπορεί να αποδώσει μια ικανοποιητική στάθμη σε μικρή απόσταση και σε συνδυασμό με τα κύρια ηχεία του αμφιθεάτρου. Προβλέπεται η επιδαπέδια τοποθέτησή του στη σκηνή, με προσανατολισμό προς τις πρώτες σειρές των θεατών και σε ακτινική (ως προς τη σκηνή) διάταξη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ηχείο είναι αρκετά χαμηλότερης κατηγορίας από πλευράς στάθμης, σε σχέση με τα υπόλοιπα ηχεία του χώρου.

Μοντέλο	COMPACT M 06 (13000582)
Κατασκευαστής	RCF SpA
Τύπος ηχείου	Παθητικό ηχείο 2 δρόμων
Μέγεθος woofer	6’’
Μέγεθος tweeter	1’’
Απόκριση συχνότητας	60Hz-20khz
Ευαισθησία	90dB@1W/1m
Μέγιστο SPL	116dB@max W/1m
Οριζόντια γωνία εκπομπής	120 μοίρες
Κατακόρυφη γωνία εκπομπής	80 μοίρες
Ισχύς (RMS)	100W
Ισχύς (Peak)	400W
Διαστάσεις (ΠxYxB)	~26x37x24cm
Βάρος	5,5Kg

Πίνακας 4.1.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου front fill[2]



Εικόνα 4.1.8 Προσθήκη front fill ηχείων

[2] Τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή: https://www.rcf.it/en/products/product-detail/compact-m-06 (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)

4.1.3 Subwoofer

Οι διάφοροι αρχιτεκτονικοί περιορισμοί, σχετιζόμενοι με το διαθέσιμο πλάτος τοποθέτησης του array cluster, επιβάλλουν την τοποθέτηση ενός στενού (από πλευράς γεωμετρίας της καμπίνας του) subwoofer 15’’. Επιλέγεται ένα ηχείο από διαφορετική προϊοντική σειρά και κατηγορία, το SUB-15AX, το οποίο διαθέτει presets για διάφορα mode λειτουργίας που σχετίζονται με άλλες εφαρμογές, όμως είναι απολύτως επαρκές στο βαθμό που όλη η επεξεργασία του σήματος ήχου θα γίνει από εξωτερικό επεξεργαστή.

Μοντέλο	SUB-15AX
Κατασκευαστής	RCF SpA
Τύπος ηχείου	Αυτοενισχυόμενο subwoofer
Μέγεθος woofer	15’’
Απόκριση συχνότητας	35Hz-120hz
Μέγιστο SPL	133dB@max W/1m
Ισχύς (RMS)	1100W
Ισχύς (Peak)	2200W
Διαστάσεις (ΠxYxB)	~42x59x59cm
Βάρος	31,4Kg

Πίνακας 4.1.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου subwoofer[3]

4.1.4 Πλευρικές Ηχοστήλες

Στους πλευρικούς τοίχους τοποθετούνται ηχοστήλες για την καλύτερη κάλυψη και ευελιξία σε εκδηλώσεις διαφόρων τύπων. Η ηχοστήλη που επιλέγεται είναι η CBT50LA-LS (JBL PRO), η οποία διαθέτει δύο mode λειτουργίας ρυθμιζόμενα με κουμπί πάνω στο ηχείο («Speech” / “Music”). Τα δύο αυτά mode αντιστοιχούν με ελαφρώς διαφορετικά EQ (ρυθμιζόμενα με «χειροκίνητο», παθητικό τρόπο) τα οποία είναι κατάλληλα για ομιλία και για μουσική αντίστοιχα.

[3] Τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή: https://www.rcf.it/en/products/product-detail/sub-15-ax (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)



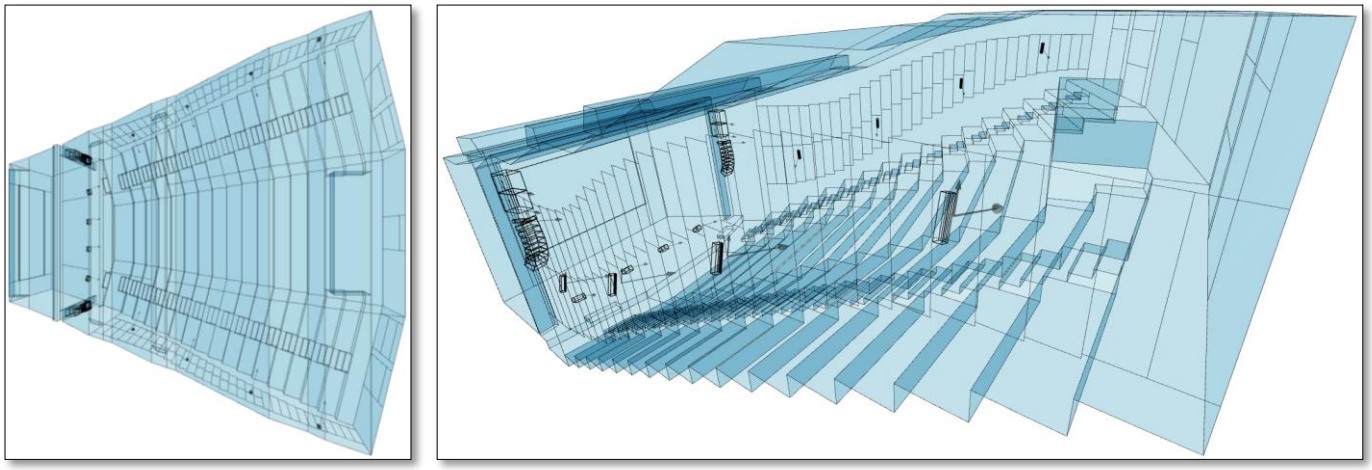
Εικόνα 4.1.10 Πλευρική ηχοστήλη. Ρύθμιση σε "Music" Mode και υπό γωνία tilt -15 μοιρών

Το ηχείο τύπου ηχοστήλης παρουσιάζει μεγάλη οριζόντια γωνία εκπομπής και πολύ στενή κατακόρυφη γωνία εκπομπής. Με άλλα λόγια η κατακόρυφη δέσμη του είναι κατευθυντική, στέλνοντας όλη την ηχητική ενέργεια στο κοινό και μην αφήνοντας την εκπομπή να κατευθυνθεί προς την οροφή και να επιστρέψει με τη μορφή ανάκλασης. Αντιθέτως, η πολύ ευρεία οριζόντια εκπομπή του είναι χρήσιμη καθώς καλύπτει μεγάλη περιοχή του ακροατηρίου. Γενικά οι ηχοστήλες πετυχαίνουν τη συγκεκριμένη γεωμετρία εκπομπής ηχητικής ενέργειας αξιοποιώντας κατακόρυφες συστοιχίες μεγαφώνων (εν προκειμένω μιας οκτάδας μεγαφώνων 2 ιντσών έκαστο). Η διάταξη αυτή περιορίζει σημαντικά τη διάμετρο των woofer (χρησιμοποιούνται γενικά μικρά woofer), μην καλύπτοντας τις πολύ χαμηλές συχνοτικές περιοχές. Για το λόγο αυτό οι ηχοστήλες είναι ηχεία που προορίζονται κατά κύριο λόγο για εφαρμογές ομιλίας, για τυπική αναπαραγωγή μουσικής ή ως ένα «συμπλήρωμα» σε συστήματα ενισχυμένου ήχου όπως αυτό του αμφιθεάτρου που εξετάζουμε.

Η ηχοστήλη διαθέτει επιπλέον και πιστοποίηση EN54-24, αποτελώντας με αυτό τον τρόπο μέρος του συστήματος αναγγελιών του κτιρίου. Οι αναγγελίες εκκένωσης εκτελούνται από τα πλευρικά ηχεία και ταυτόχρονα διακόπτεται η εκπομπή ήχου από τα κυρίως ηχεία, μια αυτόματη διαδικασία η οποία εξασφαλίζεται από τον επεξεργαστή ήχου του αμφιθεάτρου.

Μοντέλο	CBT 50LA-LS
Κατασκευαστής	JBL PRO
Τύπος ηχείου	Παθητική Ηχοστήλη
Πιστοποίηση	EN54-24 για αναγγελία σε περίπτωση εκκένωσης του κτιρίου
Συχνοτικό εύρος	80Hz-20kHz (-10dB)
Ευαισθησία	89dB (300Hz-18kHz, "music" mode)
Εμπέδηση λειτουργίας	8Ω
Ισχύς	100W RMS (400W peak), 100 hrs
Μέγιστο SPL	111 dB continuous average (117dB peak)
Βάρος	4,1Kg

Πίνακας 4.1.11 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλευρικής ηχοστήλης[4]

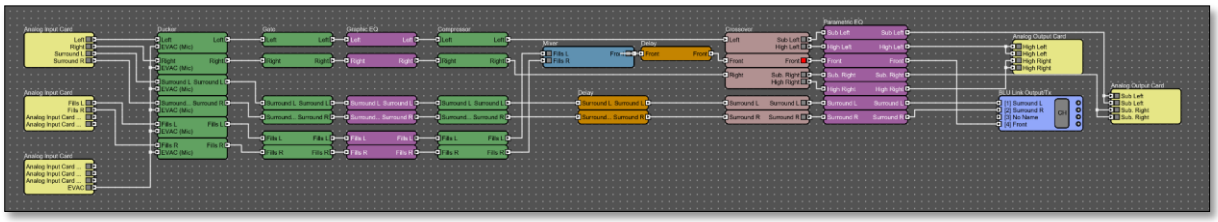


Εικόνα 4.1.12 Προσθήκη front fill και surround ηχείων

4.2 Παράμετροι ρύθμισης ηλεκτρακουστικού συστήματος

Οι παραπάνω προκαταρτικές εκτιμήσεις ορίζουν τα ηχεία, τις θέσεις και τις γωνίες τους. Εντάσσουμε τώρα το σύστημα αυτό ηχείων στο γενικό σύστημα διανομής και διαχείρισης σημάτων ήχου. Όλη η διαχείριση του συστήματος ήχου γίνεται μέσα από το λογισμικό Audio Architect, από το οποίο ελέγχουμε την ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων ήχου.

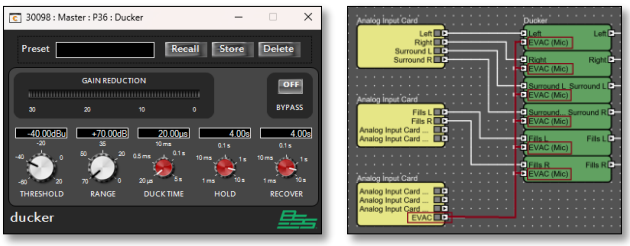
[4] Τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή: https://www.rcf.it/en/products/product-detail/sub-15-ax (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)



Εικόνα 4.2.1 Απόσπασμα από το λογισμικό Audio Architect. Επεξεργαστής ήχου με 12 αναλογικές εισόδους (αριστερά) και 8 αναλογικές εξόδους (δεξιά)

Ας εξετάσουμε ενδεικτικά κάποια από τα στάδια επεξεργασίας, εξηγώντας το ρόλο τους και την παραμετροποίησή τους.

4.2.1 Ducker



Εικόνα 4.2.2 Απόσπασμα από το λογισμικό Audio Architect. Παράμετροι του block "Ducker"

Σε όλο το σύστημα ενισχυμένου ήχου πλην των subwoofer έχει τεθεί ένα «ducker». Όταν λαμβάνεται ένα φωνητικό ή ηχητικό σήμα (μήνυμα) αναγγελίας από το σύστημα εκκένωσης του κτιρίου (Public Address Voice Alarm - EVAC), το σήμα αυτό εμφανίζεται ως αναλογική είσοδος στο σύστημα (βλ. 4^{η} είσοδο του Analog Input Card) και στη συνέχεια περνά μέσα από το ducker. Όταν η στάθμη του σήματος EVAC ξεπερνά το κατώφλι των -40dBu τότε το σήμα μουσικής ή ομιλίας του αμφιθεάτρου στο συγκεκριμένο ηχείο χαμηλώνει αυτόματα κατά 70dB (παράμετρος “range»), δίνοντας κατά κάποιο τρόπο «προτεραιότητα» στο μήνυμα εκκένωσης. Για λόγους ολοκληρωμένης και σωστής ακρόασης του μηνύματος εκκένωσης, η μεταγωγή αυτή γίνεται στιγμιαία, όπως ορίζεται και από την πολύ σύντομη διάρκεια του “duck time” (20μsec). Η προτεραιότητα του μηνύματος EVAC έναντι του τοπικού σήματος του αμφιθεάτρου παραμένει ενεργή και αναιρείται μόνο όταν το σήμα EVAC βρεθεί κάτω από το κατώφλι (“threshold”) των -40dBu για τουλάχιστον 4 δευτερόλεπτα (“hold”). Στην περίπτωση αυτή το τοπικό σήμα μουσικής ή ομιλίας επανέρχεται όχι ακαριαία αλλά σταδιακά, με ένα fade-in που διαρκεί 4 δευτερόλεπτα. Σε διαφορετική περίπτωση (αν δηλαδή το hold ήταν ρυθμισμένο σε μια τιμή της τάξης μερικών msec) το ducker θα ενεργοποιείται ανάμεσα σε κάθε λέξη της αναγγελίας, προκαλώντας ανεπιθύμητες διακοπές (chatter) και καθιστώντας το σήμα ακατάληπτο.

Το ducker αφορά όλα ανεξαιρέτως τα ηχεία του χώρου, καθώς η αναγγελία πρέπει να ακουστεί κατά προτεραιότητα. Επίσης, σε περίπτωση που δεν λειτουργεί το σύστημα ενισχυμένου ήχου τη στιγμή της αναγγελίας, τα surround ηχεία θα παίξουν το σήμα EVAC καθώς αποτελούν μέρος του (πιστοποιημένου κατά τη νόρμα EN54) συστήματος αναγγελιών του κτιρίου.

4.2.2 Gate

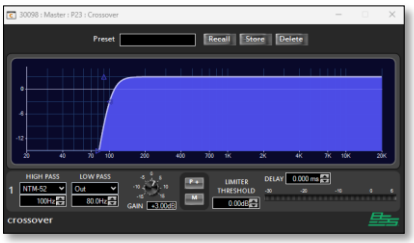


Εικόνα 4.2.3 Απόσπασμα από το λογισμικό Audio Architect. Παράμετροι του block "Gate"

Το module Gate τίθεται μετά το ducker, άρα αφορά κάθε σήμα που καταλήγει στο κάθε ηχείο, είτε τοπικό είτε από το σύστημα αναγγελιών. Το gate αφορά την αποκοπή χαμηλής στάθμης ανεπιθύμητων σημάτων και αν ρυθμιστεί σωστά ενεργοποιείται όταν δεν υπάρχει ενεργή και χρήσιμη audio είσοδος στο ηχείο. Αν το σήμα εισόδου είναι κάτω από το κατώφλι ("threshold") των -60dBu το gate «μηδενίζει» αυτό το σήμα μειώνοντάς το κατά 70dB ("range"). Εφόσον εμφανιστεί σήμα άνω του κατωφλιού, δηλαδή «χρήσιμο» σήμα, ενεργοποιείται ακαριαία (όπως ορίζει η διάρκεια 1msec που ορίζεται στο "attack"). Το gate δεν ενεργοποιείται αν δεν εμφανιστεί ξανά σήμα εισόδου κάτω από το κατώφλι των -60dBu για τουλάχιστον 3 δευτερόλεπτα ("hold"), έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα τύπου chatter, όπως περιγράφεται και στην προηγούμενη παράγραφο. Η ενεργοποίηση του gate μετά τα 3 αυτά δευτερόλεπτα δεν γίνεται ακαριαία αλλά εφαρμόζοντας το attenuation των 70dB που έχουμε ορίσει σταδιακά, μέσα σε 3 δευτερόλεπτα ("release").

4.2.3 Crossover

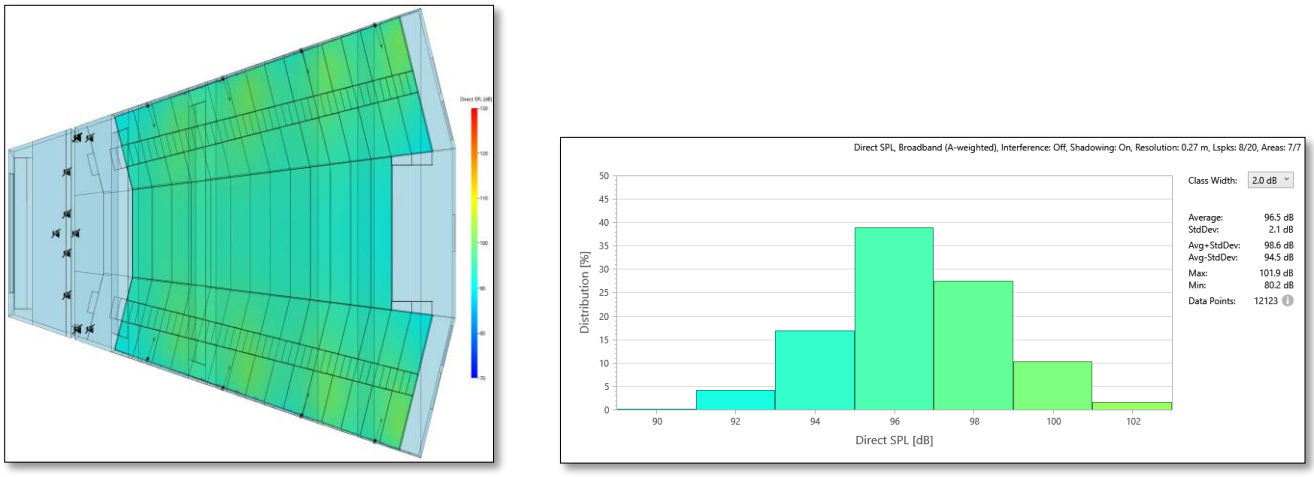
Το επόμενο module που χρησιμοποιούμε είναι αυτό που ορίζει τις crossover συχνότητες των ηχείων. Για τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν μας ενδιαφέρει το crossover των surround ηχείων. Από τα 150Hz και κάτω ενεργεί ένα υψιπερατό φίλτρο, το οποίο είναι ρυθμισμένο στα 100Hz. Το φίλτρο έχει τεθεί έτσι ώστε το ηχείο να δέχεται σήμα εντός του συχνοτικού εύρους λειτουργίας του (80Hz-20kHz όπως αναφέρθηκε πιο πάνω).



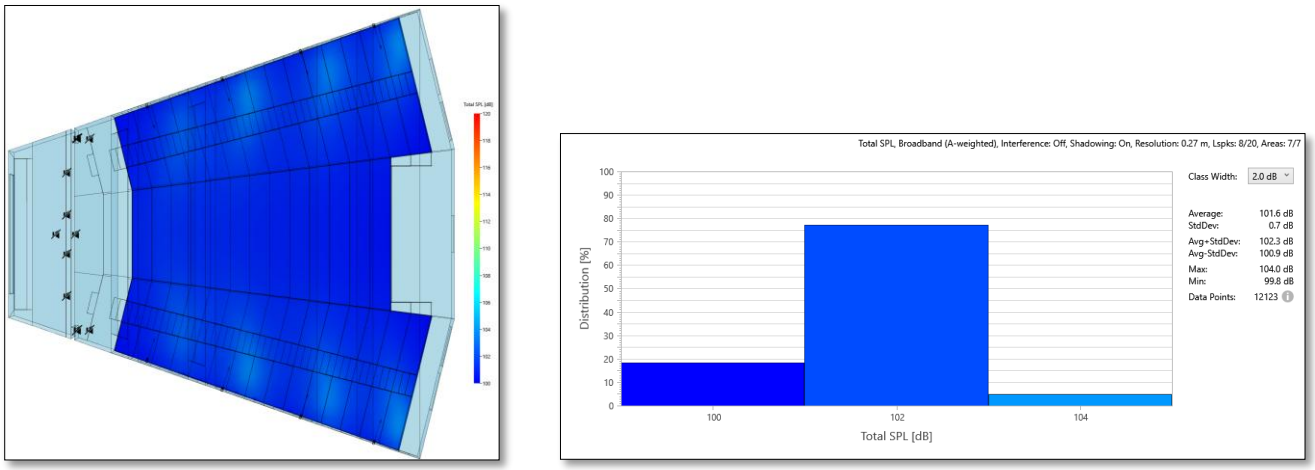
Εικόνα 4.2.4 Απόσπασμα από το λογισμικό Audio Architect. Παράμετροι του block "Crossover"

4.3 - Αποτελέσματα ακουστικής προσομοίωσης

Θα δούμε τώρα με ποιο τρόπο και σε ποιο βαθμό επιτυγχάνεται η κάλυψη στάθμης του χώρου με τη χρήση των κεντρικών ηχείων και με τη χρήση των πλευρικών ηχοστηλών. Οι πλευρικές ηχοστήλες προσφέρουν μια ομοιόμορφη κάλυψη σε ένα επαρκές επίπεδο στάθμης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ομιλία. Ο χώρος κατανέμεται ομοιόμορφα, η ευκρίνεια είναι αρκετά ικανοποιητική (όπως θα δειχθεί σε επόμενα κεφάλαια). Το ακουστικό είδωλο σε αυτή την περίπτωση δεν συμπίπτει με την πλευρά όπου βρίσκεται ο ομιλητής (δηλαδή με τη σκηνή) αλλά μετακινείται στις πλευρές. Κάτι τέτοιο θα ήταν μη επιθυμητό σε περιπτώσεις όπου διενεργούσαμε μια θεατρική παράσταση. Στις περιπτώσεις όμως παρουσιάσεων και ομιλιών η απουσία αυτής σωστής «χωρικής» τοποθέτησης του ακουστικού ειδώλου είναι επιτρεπτή καθώς προτεραιότητα έχει η καταληπτότητα, η καθαρότητα της ομιλίας και η ομοιομορφία στην κατανομή της στάθμης.

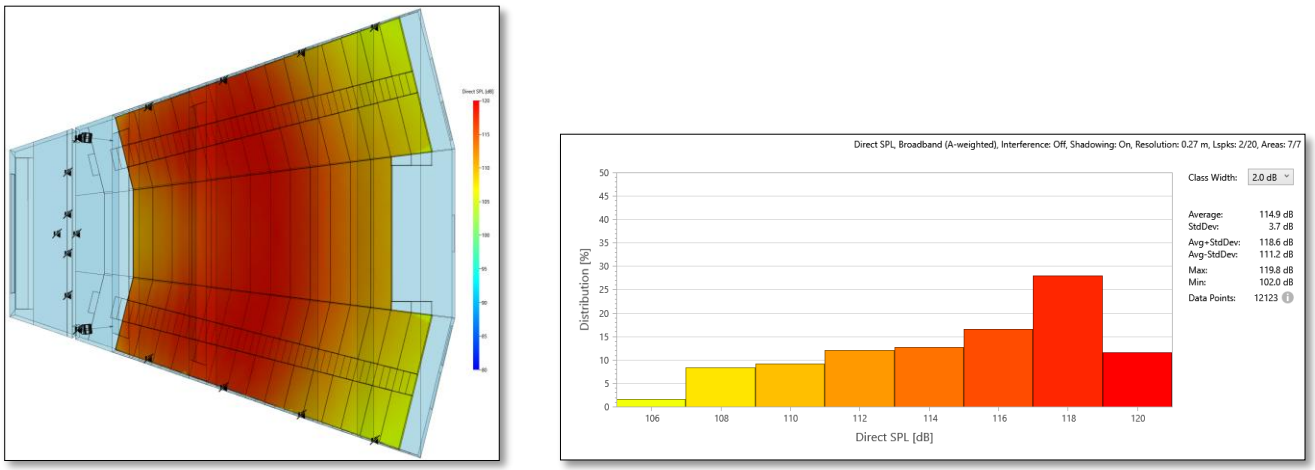


Διάγραμμα 4.3.1 Direct SPL, σενάριο λειτουργίας πλευρικών ηχοστηλών

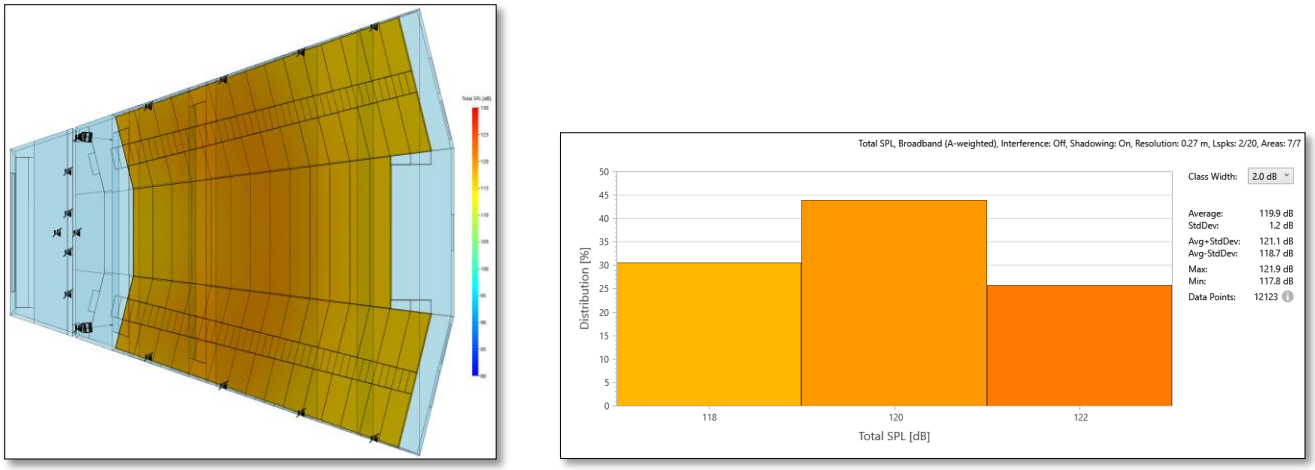


Διάγραμμα 4.3.2 Total SPL, σενάριο λειτουργίας πλευρικών ηχοστηλών

Το δεύτερο σενάριο αφορά τη λειτουργία των κεντρικών array ηχείων. Στο σενάριο αυτό επιδιώκουμε υψηλότερες στάθμες, η συχνοτική απόκριση υπερκαλύπτει όλες τις δυνατές εφαρμογές (τόσο τα διάφορα είδη μουσικής όσο και ομιλίες) ενώ το ακουστικό είδωλο συμπίπτει με τη διεύθυνση της φυσικής προέλευσης του ήχου, κάτι που διευρύνει και τα είδη εκδηλώσεων που το σενάριο αυτό μπορεί να υποστηρίξει. Η ρύθμιση της πάνω τετράδας στα +6dB και της κάτω τετράδας στα -4dB οδηγεί στην επίτευξη της επιθυμητής ομοιομορφίας στάθμης στο χώρο.



Διάγραμμα 4.3.3 Direct SPL, σενάριο λειτουργίας main array ηχείων



Διάγραμμα 4.3.4 Total SPL, σενάριο λειτουργίας main array ηχείων

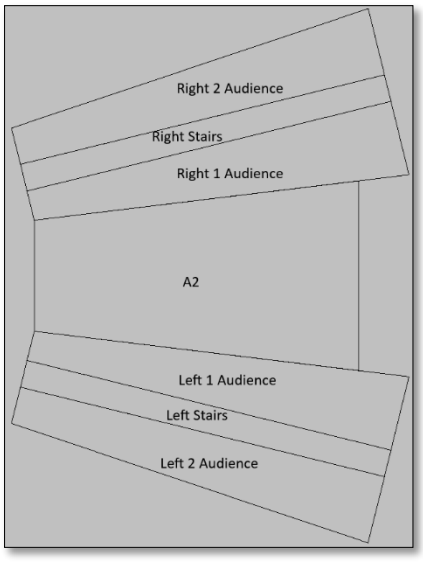
Κεφάλαιο 5 Υπολογισμοί μέσω προσομοίωσης

Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε τη δυνατότητα που μας δίνει το λογισμικό Ease για μια πρώτη προσέγγιση κάποιων ακουστικών μεγεθών, εκτίμηση την οποία στη συνέχεια θα συγκρίνουμε με μετρήσεις που θα πραγματοποιήσουμε για να αξιολογήσουμε αν αυτή η αρχική προσομοίωση δίνει όντως χρήσιμα συμπεράσματα για την ακουστική συμπεριφορά του χώρου. Η έκδοση του Ease που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η 4.4, ενώ θα κάνουμε χρήση και της έκδοσης 5 σε επιμέρους σημεία (θα μας βοηθήσει κυρίως σε ζητήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων). Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν και για λόγους που θα γίνουν κατανοητοί πιο κάτω υποθέτουμε ότι χρησιμοποιούνται μια από τις εξής δύο πηγές ήχου:

α) κατευθυντικό αυτοενισχυόμενο ηχείο stage monitor (JBL PRX812W) καθώς αυτό το ηχείο χρησιμοποιείται στη συνέχεια στις μετρήσεις που θα πραγματοποιήσουμε. Το ηχείο αυτό θα το ονομάζουμε στο εξής *monitor*, είτε αναφερόμαστε στην προσομοίωση είτε στις πραγματικές μετρήσεις.

β) ιδανική παντοκατευθυντική (σφαιρική) πηγή υψηλής έντασης, η οποία είναι θεωρητικά κατάλληλη για τη διέγερση του χώρου και την εκτίμηση του χρόνου αντήχησης. Το ηχείο αυτό θα το ονομάζουμε στο εξής *omni πηγή* και θα αφορά τη χρήση του στις προσομοιώσεις (καθώς δεν διαθέτουμε τέτοιο ηχείο στο σκέλος των μετρήσεων που θα πραγματοποιήσουμε).

Το αμφιθέατρο χωρίζεται σε συγκεκριμένες επιφάνειες ελέγχου (Areas) που αντιστοιχούν στους χώρους κοινού. Σε αυτές τις περιοχές θα επιδιώξουμε να έχουμε συγκεκριμένες εκτιμώμενες τιμές ακουστικών παραμέτρων.

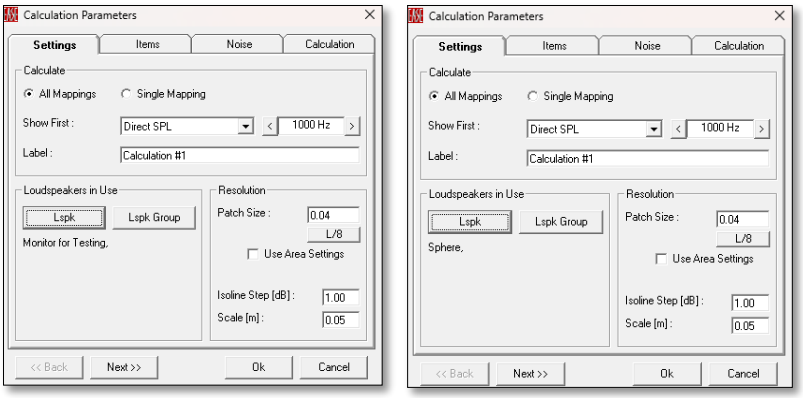


Εικόνα 5.1 Επιφάνειες ελέγχου στο λογισμικό Ease ("Areas")

5.1 Standard mapping

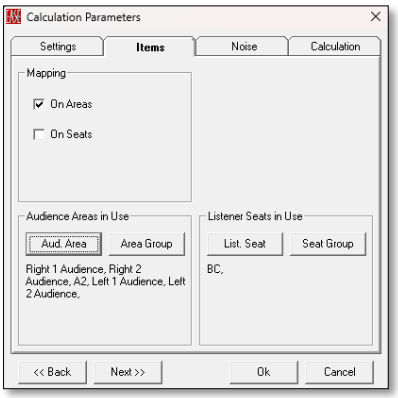
Η πρώτη προσέγγιση που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι αυτή του module "Ease 4.4 Standar Mapping" επιλέγοντας Mapping→Standard. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιούμε μια γρήγορη μέθοδο του Ease η οποία συνδυάζει τα δεδομένα εκπομπής του εκάστοτε ηχείου (διαμορφώνοντας την "direct" συνιστώσα του εκτιμώμενου ηχητικού πεδίου του χώρου) με κατάλληλη επεξεργασία των στατιστικών δεδομένων του χώρου (στοιχεία απορροφητικότητας, εμβαδά, στατιστικά εκτιμώμενος χρόνος αντήχησης κτλ τα οποία εισφέρουν στην εκτίμηση της "reverberant" συνιστώσας του ηχητικού πεδίου). Η μέθοδος είναι σχετικά σύντομη (καθώς δεν υπεισέρχεται στις λεπτομέρειες της εκπομπής ηχητικής ενέργειας με τον τρόπο που το κάνει πχ μια ray tracing μέθοδος), για αυτό το λόγο αυτό επιτρέπεται μια πυκνή σάρωση των επιφανειών ελέγχου (βήματος 4 εκατοστών όπως θα δούμε αμέσως πιο κάτω) χωρίς ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος και χρόνο εκτέλεσης.

Στο πρώτο menu που εμφανίζεται για το Standard Mapping επιλέγουμε αφενός την πηγή που θα χρησιμοποιηθεί, αφετέρου τις διάφορες παραμέτρους της εκτέλεσης.



Εικόνα 5.1.1 Γενικές παράμετροι μεθόδου Standard Mapping με monitor (αριστερά) ή με omni πηγή (δεξιά)

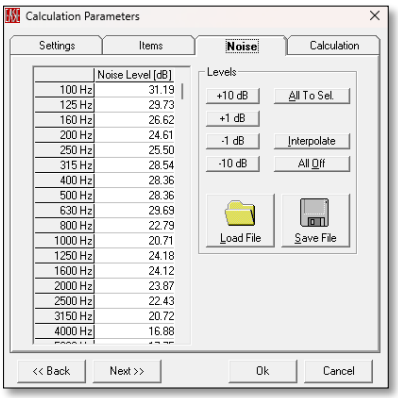
Όπως βλέπουμε, επιλέγουμε βήμα 4 εκατοστών, που αποτελεί και την «πυκνότερη» δυνατή σάρωση που επιτρέπει το λογισμικό. Οι παράμετροι "Isoline Step" και "Scale" αφορούν τον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων και οι τιμές διατηρούνται όπως εξαρχής ορίζονται by default από το λογισμικό. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι ότι στην πρώτη περίπτωση (αριστερά) προσομοιώνουμε τη λειτουργία ενός monitor τοποθετημένου στη σκηνή ενώ στη δεύτερη περίπτωση τη λειτουργία μιας omni πηγής που το Ease περιλαμβάνει στη βιβλιοθήκη του. Ανεξαρτήτως του τι ηχείου «τρέχουμε» κάθε φορά, τα επόμενα βήματα (παράθυρα) είναι κοινά.



Εικόνα 5.1.2 Παράθυρο "Item": εκτέλεση του μοντέλου σε επιλεγμένες επιφάνειες ελέγχου ("Areas")

Επιλέγουμε τις επιφάνειες για τις οποίες θα τρέξει το μοντέλο (“On Areas”), ενώ αγνοούμε προς το παρόν την εκτέλεση επί συγκεκριμένων σημείων θεατών (“On Seats”).

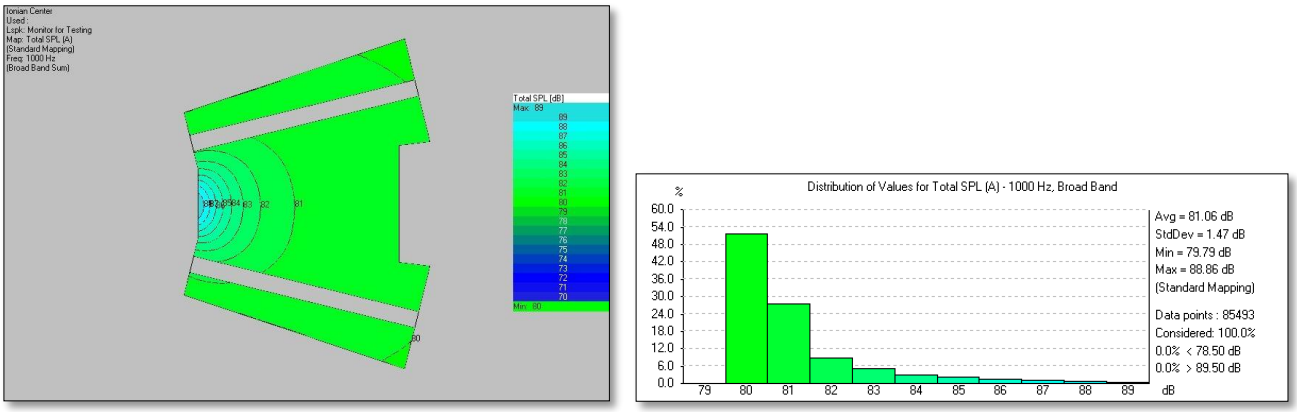
Στο επόμενο παράθυρο ορίζουμε το προφίλ θορύβου υποβάθρου. Εισάγουμε ένα συγκεκριμένο προφίλ μέσου θορύβου, ενώ σε επόμενο κεφάλαιο θα δούμε με ποιο τρόπο έχει προκύψει αυτό το προφίλ θορύβου από τις μετρήσεις μας στο χώρο.



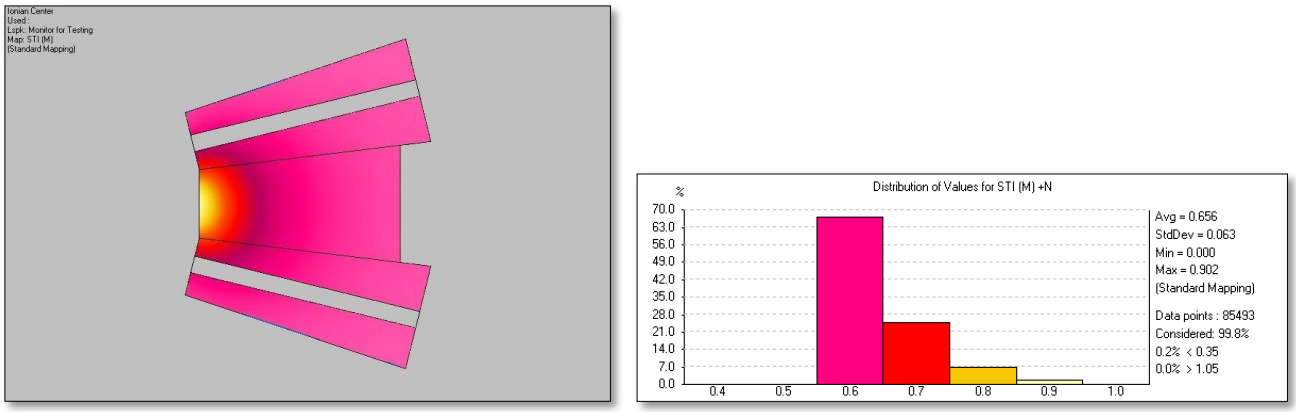
Εικόνα 5.1.3 Προφίλ ήχου υποβάθρου που εισάγεται «χειροκίνητα» στο Ease 4.4

Εκτελούμε το Module πατώντας «Ok» και λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτέλεσμα για *monitor* και για omni πηγή.

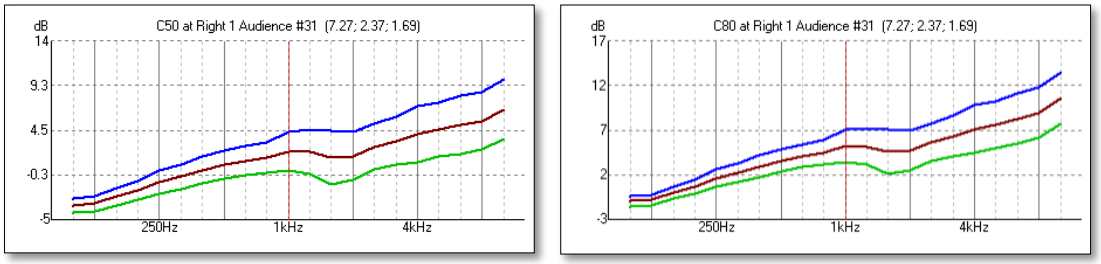
5.1.1 Standard Mapping με ηχείο monitor



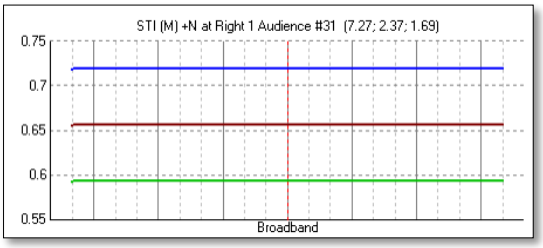
Διάγραμμα 5.1.4 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / monitor



Διάγραμμα 5.1.5 Κατανομή STI / monitor



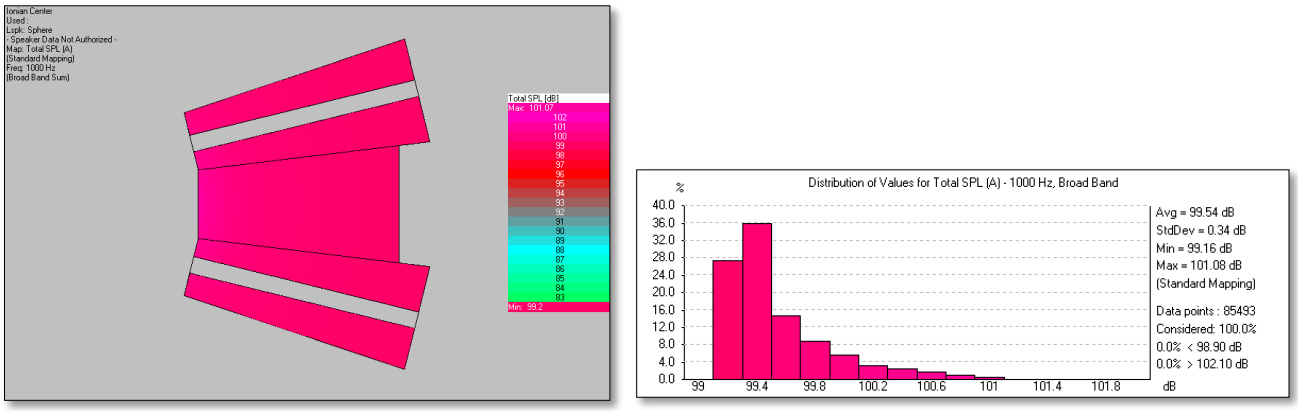
Διάγραμμα 5.1.6 Ευκρίνεια C_{50} & C_{80} (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / monitor



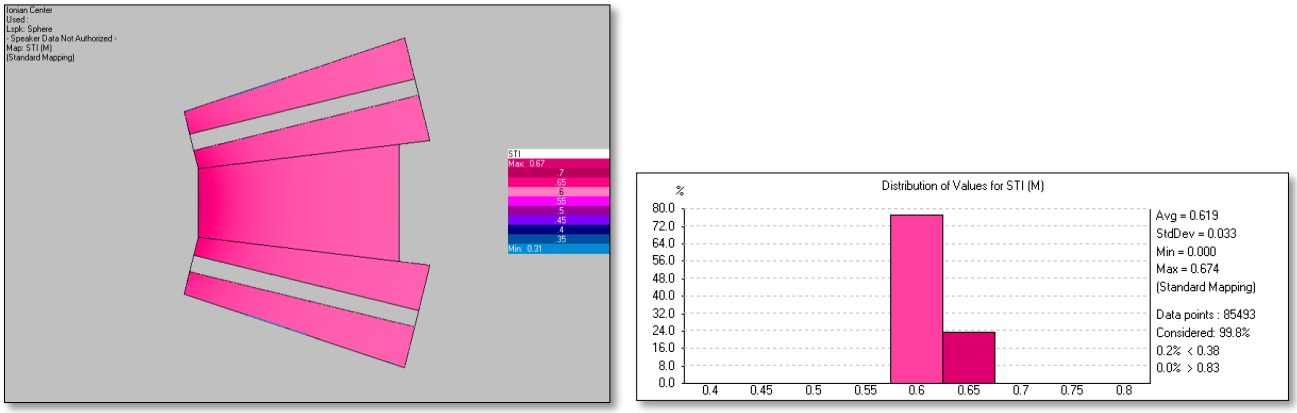
STI	Average	Avg + StdDev	Avg - StdDev
100 Hz	0.656	0.719	0.592
125 Hz	0.656	0.719	0.592
160 Hz	0.656	0.719	0.592
200 Hz	0.656	0.719	0.592
250 Hz	0.656	0.719	0.592
315 Hz	0.656	0.719	0.592
400 Hz	0.656	0.719	0.592
500 Hz	0.656	0.719	0.592

Διάγραμμα 5.1.7 STI (μέση τιμή ± τυπική αποκλιση) / monitor

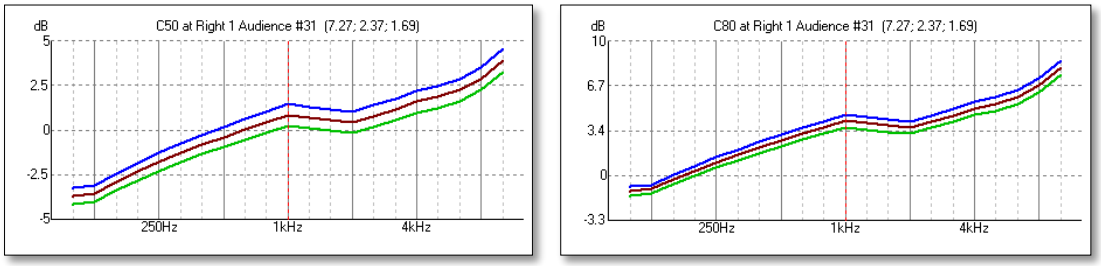
5.1.2 Standard Mapping με omni πηγή



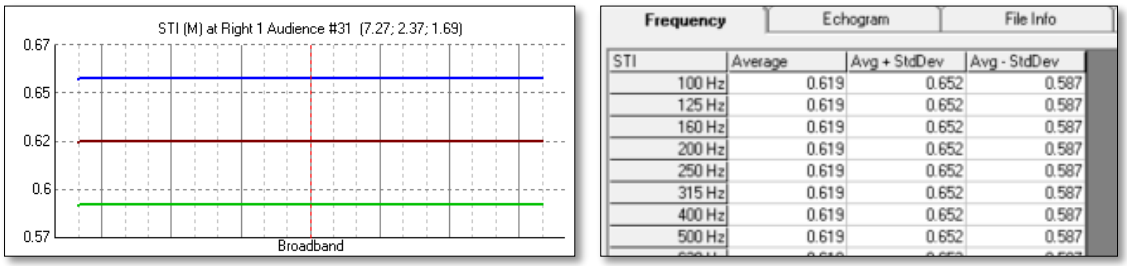
Διάγραμμα 5.1.8 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / omni πηγή



Διάγραμμα 5.1.9 Κατανομή STI / omni πηγή



Διάγραμμα 5.1.10 Ευκρίνεια C_{50} & C_{80} (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / omni πηγή

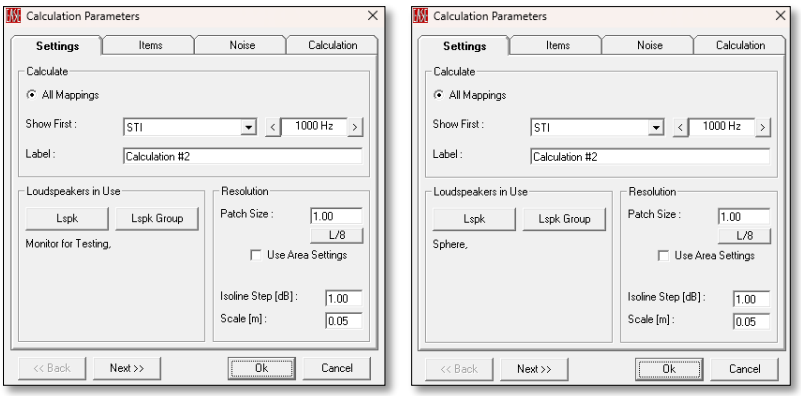


STI	Average	Avg + StdDev	Avg - StdDev
100 Hz	0.619	0.652	0.587
125 Hz	0.619	0.652	0.587
160 Hz	0.619	0.652	0.587
200 Hz	0.619	0.652	0.587
250 Hz	0.619	0.652	0.587
315 Hz	0.619	0.652	0.587
400 Hz	0.619	0.652	0.587
500 Hz	0.619	0.652	0.587

Διάγραμμα 5.1.11 Δείκτης STI (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) / omni πηγή

5.2 Standard mapping with reflections

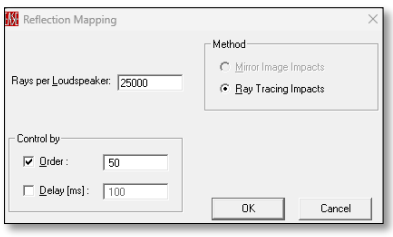
Στη συνέχεια εκτελούμε μια πιο εκλεπτυσμένη παραλλαγή του Room Mapping, επιλέγοντας «Mapping with Reflections». Η εκτέλεση αυτή συνδυάζει τα ακουστικά χαρακτηριστικά του ηχείου-πηγής με μια διαδικασία ray tracing, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για μια πιο δυναμική προσέγγιση σε σχέση με τη «στατική» στατιστική προσέγγιση η οποία βασίζεται στο στατιστικά εξαγόμενο RT Sabine, το οποίο προφανώς είναι σταθερό στο χώρο και άρα δεν διαφοροποιείται στα διάφορα σημεία ελέγχου. Το ray tracing προσθέτει σημαντικό υπολογιστικό φορτίο στον υπολογιστή μας και για το λόγο αυτό επιλέγεται μια αρκετά πιο «αραιή» ανάλυση των επιφανειών ελέγχου.



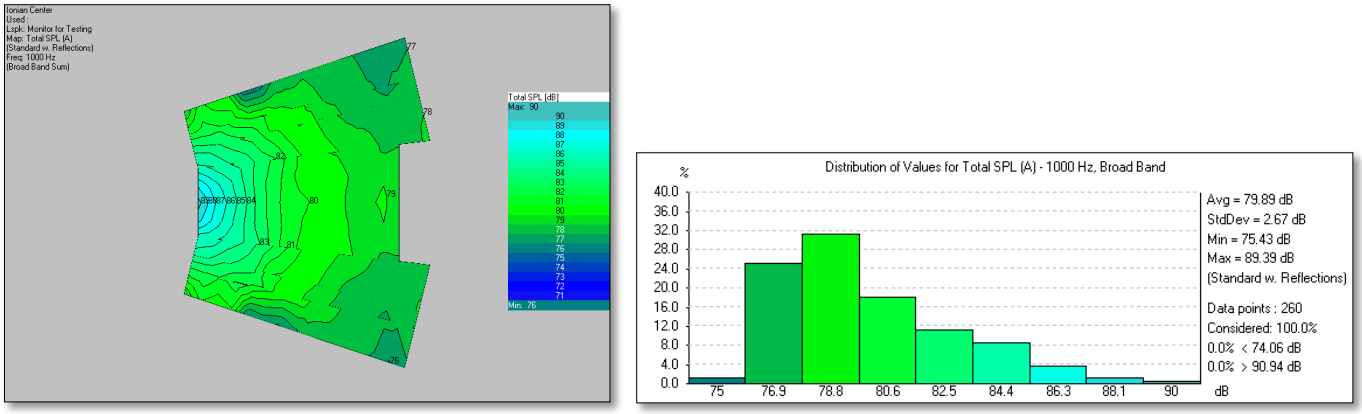
Εικόνα 5.2.1 Γενικές παράμετροι μεθόδου Standard Mapping with reflections με monitor (αριστερά) ή με omni πηγή (δεξιά)

Τα υπόλοιπα βήματα είναι τα ίδια με την απλή μέθοδο «Standard Mapping». Στο τέλος όμως προστίθεται ένα επιπλέον βήμα, το παράθυρο «Reflection mapping» στο οποίο επιλέγονται οι παράμετροι της συμπληρωματικής ray tracing διαδικασίας προσομοίωσης. Από τη στιγμή που σαρώνουμε όλο το χώρο με ένα βήμα πυκνότητας 1m κατά τον άξονα x και y το λογισμικό το ray tracing δεν μπορεί να είναι πολύ αναλυτικό, αν θέλουμε να παραμείνουμε εντός ρεαλιστικών ορίων διάρκειας της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε:

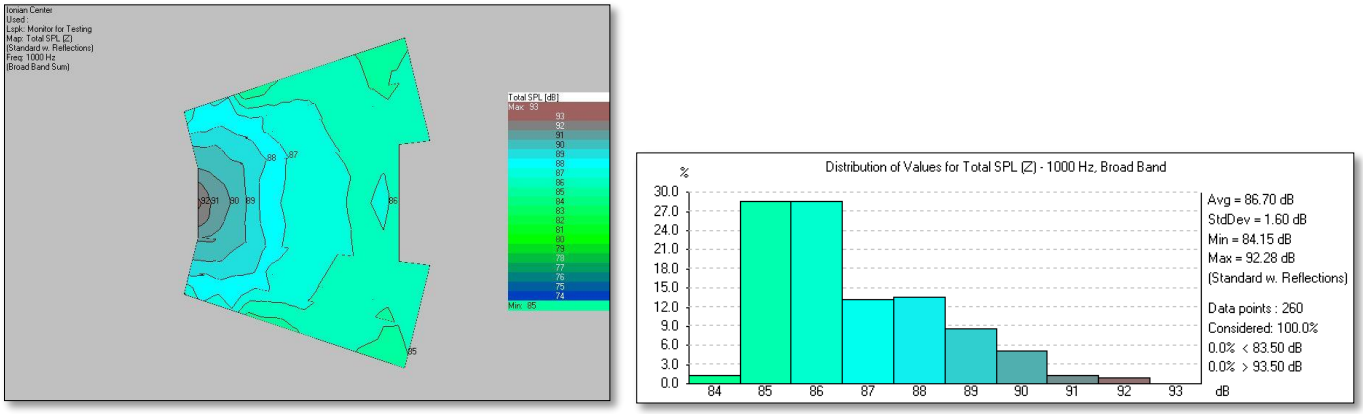
Πλήθος ακτίνων (Rays per Loudspeaker) = 25000
Πλήθος ανακλάσεων (Order) = 50



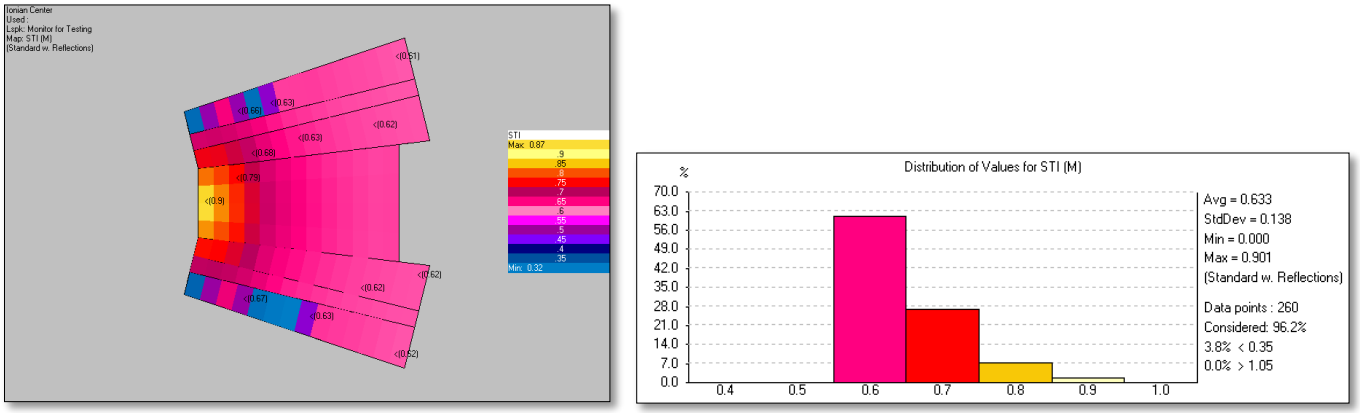
Εικόνα 5.2.2 Παράμετροι Ray Tracing (στα πλαίσια του Mapping with reflections)



Διάγραμμα 5.2.3 Κατανομή total SPL (A-Weighted, Broad Band) / monitor



Διάγραμμα 5.2.4 Κατανομή total SPL (Non Weighted, Broad Band) / monitor



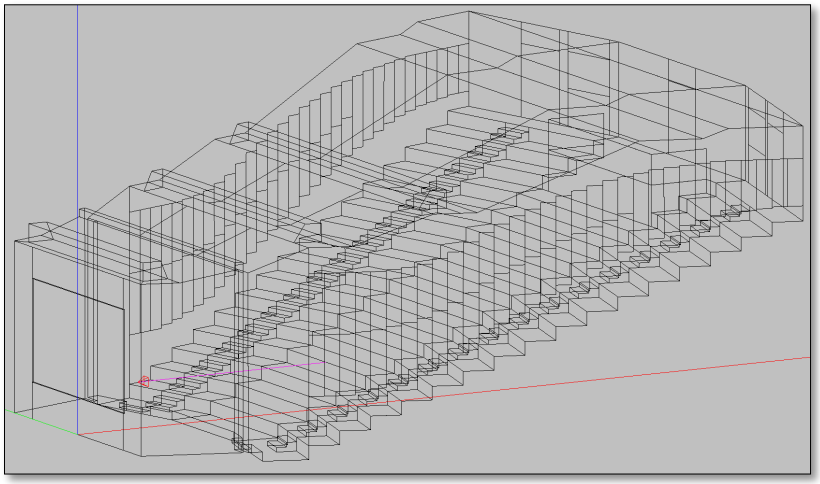
Διάγραμμα 5.2.5 Κατανομή STI / monitor

5.3 Στατιστικές εκτιμήσεις χρόνου αντήχησης

Προχωρούμε τώρα σε μια ανάλυση των διαθέσιμων στατιστικών εκτιμήσεων του χρόνου αντήχησης, με τη βοήθεια του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει στο Ease, το οποίο πριν τη βασική του χρήση (προσομοίωση του χώρου) μας προσφέρει και μια αναλυτική καταγραφή

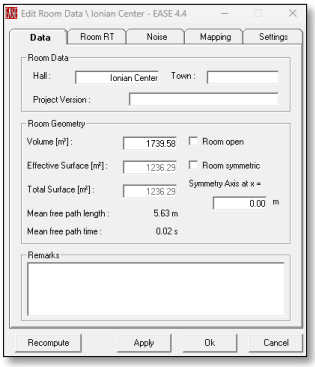
όλων των επιφανειών την οποία μπορούμε σε ένα φύλλο Excel να αξιοποιήσουμε για να εμβαθύνουμε.

Ανοίγουμε το μοντέλο στο Ease και στη συνέχεια πατώντας Edit→Project Data εμφανίζεται η προσομοίωση του αμφιθεάτρου.



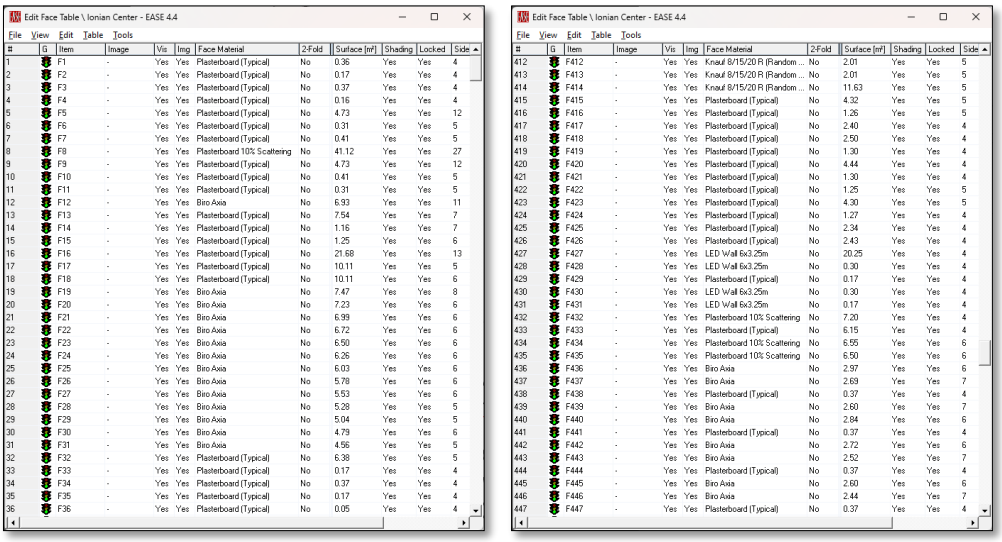
Εικόνα 5.3.1 Προσομοίωση του χώρου μέσω της μοντελοποίησης στο Ease

Πατώντας δεξί κλικ και επιλέγοντας «Room Data» το λογισμικό μας δίνει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:



Εικόνα 5.3.2 Γενικές παράμετροι εξαγόμενες από το μοντέλο στο Ease

Στη συνέχεια επιλέγοντας Edit→Tables→Faces εμφανίζεται μια αλφαβητικά κατανεμημένη λίστα όλων των επιφανειών του χώρου με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.



Πίνακας 5.3.3 Λίστα επιφανειών μοντέλου Ease (αποσπάσματα)

Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται, σε ένα φύλλο Excel καταγράφουμε αναλυτικά τους ηχοαπορροφητικούς συντελεστές ανά συχνότητα.

Σημείωση: Για λόγους διευκόλυνσης της παρουσίασης οι συχνότητες που θα παρατίθενται σε πίνακες θα είναι μόνο οι πιο χαρακτηριστικές (100Hz - **125Hz** - 160Hz - 200Hz - **250Hz** - 315Hz - 400Hz - **500Hz** - 630Hz – 800Hz - **1kHz** - 1.25kHz - 1.6kHz - **2kHz** - 2.5kHz - 3.15kHz - **4kHz** - 5kHz - 6.3kHz - **8kHz** - 10kHz), ενώ οι υπόλοιπες που χρησιμοποιούνται από τους υπολογισμούς του Ease και του Excel δεν θα εμφανίζονται παρά μόνο κατά την παράθεση διαγραμμάτων συναρτήσει της συχνότητας.

ΥΛΙΚΑ & ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ																				
Face Material	**125Hz**	**160Hz**	**200Hz**	**250Hz**	**315Hz**	**400Hz**	**500Hz**	**630Hz**	**800Hz**	**1kHz**	**1.25kHz**	**1.6kHz**	**2kHz**	**2.5kHz**	**3.15kHz**	**4kHz**	**5kHz**	**6.3kHz**	**8kHz**	**10kHz**
Alfa Sonic	0.05	0.07	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.53	0.67	0.8	0.82	0.83	0.85	0.87	0.88	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Biro Axia	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.42	0.45	0.47	0.48	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Knauf 8/15/20 R (Random perforation)	0.45	0.47	0.48	0.5	0.5	0.5	0.5	0.52	0.53	0.55	0.52	0.48	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
LED Wall 6x3.25m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
Plasterboard 10% Scattering	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
Plasterboard S-Curve	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.3.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας Συντελεστών Ηχοαπορροφητικότητας

Στη συνέχεια αντιγράφουμε, επικολλούμε και μορφοποιούμε την προηγούμενη λίστα κατάλληλα σε ένα Excel, αντιστοιχίζοντας παράλληλα και σε κάθε σειρά τις ηχοαπορροφητικότητες του κάθε υλικού της κάθε επιφάνειας.

#	Item	Face Material	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Surface [m2]	Sides
1	F1	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.36	4
2	F2	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.17	4
3	F3	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.37	4
4	F4	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.16	4
5	F5	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	4.73	12
6	F6	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.31	5
7	F7	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.41	5
8	F8	Plasterboard 10% Scattering	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	41.12	27
9	F9	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	4.73	12
10	F10	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.41	5
11	F11	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.31	5
12	F12	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.93	11
13	F13	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	7.54	7
14	F14	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	1.16	7
15	F15	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	1.25	6
16	F16	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	21.68	13
17	F17	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	10.11	5
18	F18	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	10.11	6
19	F19	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	7.47	8
20	F20	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	7.23	6
21	F21	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.99	6
22	F22	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.72	6
23	F23	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.5	6
24	F24	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.26	6
25	F25	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	6.03	6
26	F26	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	5.78	6
27	F27	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	5.53	6
28	F28	Biro Axia	0.25	0.35	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	5.28	5

...

627	F627	Plasterboard S-Curve	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	6.89	8
628	F628	Plasterboard S-Curve	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	8.74	8
629	F629	Plasterboard S-Curve	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	6.44	8
630	F630	Plasterboard S-Curve	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	7.82	8
631	F631	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	6.75	4
632	F632	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	2	4
633	F633	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	2	4
634	F634	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.6	4
635	F635	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.24	4
636	F636	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.48	4
637	F637	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.3	4
638	F638	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.19	4
639	F639	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	1.35	4
640	F640	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.3	4
641	F641	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.6	4
642	F642	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.24	6
643	F643	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.48	4
644	F644	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.19	4
645	F645	Plasterboard (Typical)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	1.35	4
646	F646	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	6.75	4
647	F647	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	2	4
648	F648	Plexiglass	0	0	0	0	0	0	0	2	6
				ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ							1236.62	

Πίνακας 5.3.5 Μοντελοποίηση στο Ease. Επιφάνειες & συντελεστές ηχοαπορροφητικότητας

Έχουμε τώρα συγκεντρωμένες όλες τις τιμές που απαιτούνται για μια εκτίμηση του χρόνου αντήχησης βάσει των διαφόρων στατιστικών εκτιμήσεων που βρίσκουμε στη βιβλιογραφία. Οι εκτιμήσεις αυτές βασίζονται στην παραδοχή ότι οι ηχητικές ακτίνες διαχέονται ομοιόμορφα στο χώρο και προσκρούουν σε επιφάνειες οι οποίες προκαλούν διαδοχικές μειώσεις ενέργειας γνωστού ύψους (μέσω του συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας) ενώ ο ρυθμός προσκρούσεων (ανακλάσεων) εκτιμάται με βάση τη μέση ελεύθερη διαδρομή που έχει εξαρχής υπολογιστεί με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου.

Οι εκτιμήσεις που θα χρησιμοποιήσουμε είναι τρεις και εφαρμόζονται για κάθε συχνότητα (Neubauer & Kostek, 2001):

Εκτίμηση κατά Sabine:

$$RT = 0.161 \cdot \frac{V}{\sum S_i a_i} \qquad \text{(Σχέση 5.1)}$$

Εκτίμηση κατά Norris-Eyring:

$$RT = 0.161 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\bar{a})} \qquad \text{(Σχέση 5.2)}$$

Εκτίμηση κατά Millington-Sette:

$$RT = 0.161 \cdot \frac{V}{-\sum s_i \cdot \ln(1-a_i)} \qquad \text{(Σχέση 5.3)}$$

Η πρώτη προσέγγιση, αυτή του Sabine, εκφράζει το χρόνο αντήχησης ως μέγεθος ανάλογο του όγκου του χώρου και αντιστρόφως ανάλογο της συνολικής ηχοαπορροφητικότητας των επιφανειών του κελύφους. Τη δεύτερη αυτή συσχέτιση εκφράζει ο παρονομαστής $A = \sum S_i a_i$ που αποτελεί τη συνολική απορρόφηση του χώρου (Κοντομίχος, Ζαρούχας & Χατζηαντωνίου, 2013, σ. 54). Η απλοϊκή μορφή της σχέσης που υπολογίζει το RT_{Sabine} απορρέει από την επίσης απλουστευτική παραδοχή ότι οι απορροφητικές ιδιότητες των επιφανειών είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα μέσα στον κλειστό χώρο (Ballou, 2008, σ. 394), ότι όλο το ηχητικό πεδίο είναι πλήρως διάχυτο και ότι η διάδοση του ηχητικού πεδίου είναι ισότροπη, δηλαδή εξελίσσεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις (οπ.π., σ. 317).

Η δεύτερη προσέγγιση, αυτή των Norris-Eyring, υποθέτει ότι το ηχητικό πεδίο διαμορφώνεται ως ένα ομοιόμορφο ηχητικό μέτωπο διαδιδόμενο προς όλες τις κατευθύνσεις, του οποίου το κάθε τμήμα ανακλάται σε διάφορα σημεία του κελύφους και χάνει ένα ποσοστό της ενέργειάς του. Σε χρόνο t η κάθε «ακτίνα» διανύει απόσταση $c \cdot t$ η οποία ισούται με n φορές τη μέση ελεύθερη διαδρομή (βλ. σχέση 2.3). Η σχέση Norris-Eyring συγκλίνει ως προς τα

αποτελέσματά της με τη σχέση Sabine σε περιπτώσεις πολύ ανακλαστικών επιφανειών. Αντιθέτως, η σχέση Norris-Eyring δίνει χαμηλότερους (και πιο σωστούς) χρόνους αντήχησης όταν οι ηχοαπορροφητικές του χώρου υπερβαίνουν την τιμή 0,3 (οπ.π., σ. 317).

Οι σχέσεις Sabine και Norris-Eyring δεν μπορούν να ενσωματώσουν χαρακτηριστικά του χώρου όπως το γεωμετρικό του σχήμα, καθώς ο όγκος V μπορεί να αφορά είτε χώρους με πολύ ανομοιόμορφες διαστάσεις πλάτους, ύψους, μήκους είτε ένα χώρο σχήματος κύβου, με ίδια διάσταση πλάτους, ύψους, μήκους. Επίσης αδυνατούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια χώρους με ανομοιόμορφα κατανεμημένες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες (οπ.πρ., σ. 317). Για το λόγο αυτό εισάγουμε στους υπολογισμούς μας την τρίτη εκτίμηση χρόνου αντήχησης, αυτή των Millington-Sette. Η προσέγγιση αυτή είναι η πλέον κατάλληλη για τον υπό μελέτη χώρο για δύο λόγους.

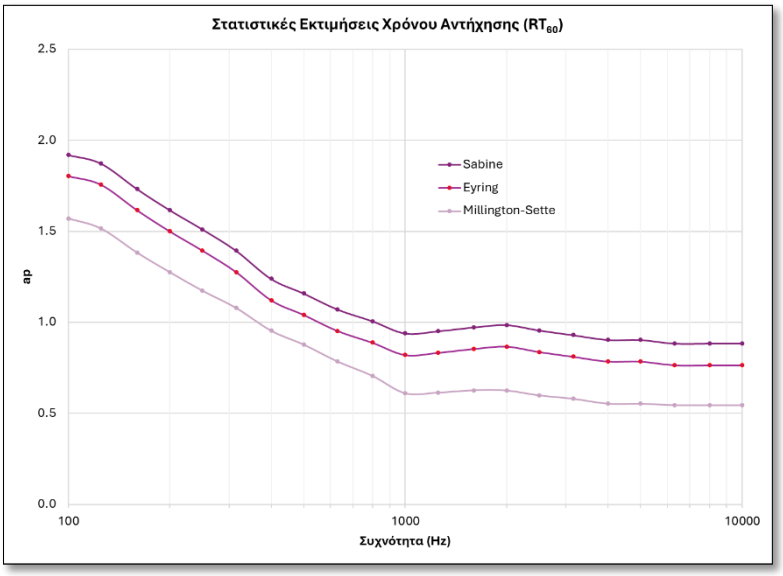
α) Κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη για περιπτώσεις χώρων που περιέχουν υλικά με συντελεστή απορρόφησης >0,63 (Σκαρλάτος, 2015, σ. 584). Η αίθουσα του Ιωνικού Κέντρου αποτελεί ένα παράδειγμα τέτοιου χώρου, όπως αναλύεται στα υποκεφάλαια 3.2.1 & 3.2.2)

β) Δίνει τόσο ακριβέστερα αποτελέσματα όσο πιο ανομοιόμορφα κατανεμημένες είναι οι διάφορες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες στο χώρο (Ballou, 2008, σ. 317). Η ανομοιομορφία αυτή είναι έντονη στην περίπτωση του υπό μελέτη αμφιθεάτρου. Ενδεικτικά, τέτοιες ανομοιομορφίες παρουσιάζονται μεταξύ του δαπέδου που καλύπτεται από μια επιφάνεια των καθισμάτων (βλ. εικόνα 3.2.11) και των τμημάτων της οροφής που καλύπτονται από κοινή γυψοσανίδα (βλ. εικόνα 3.2.19). Επιπλέον, πολλές ανακλάσεις του ήχου ενδέχεται να προσπίπτουν διαδοχικά σε έντονα ανακλαστικές επιφάνειες (καθίσματα, ακουστικά panel) και σε ανακλαστικές επιφάνειες (κοινή γυψοσανίδα), κάτι που έμμεσα συνεπάγεται περαιτέρω ανομοιομορφία.

Το Ease υπολογίζει ήδη αυτόματα $RT60_{Sabine}$ και $RT60_{Norris\text{-}Eyring}$. Εμείς θα πραγματοποιήσουμε ξεχωριστά σε ένα Excel τις 2+1 εκτιμήσεις και θα αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα.

	Μέση ηχοαπορροφητικότητα	RT (1)	RT (2)	RT(3)
	average a	RT Sabine	RT Eyring	RT Millington-Sette
100Hz	0.12	1.92	1.81	1.57
125Hz	0.12	1.88	1.76	1.52
160Hz	0.13	1.74	1.62	1.38
200Hz	0.14	1.62	1.51	1.28
250Hz	0.15	1.52	1.40	1.17
315Hz	0.16	1.40	1.28	1.08
400Hz	0.18	1.24	1.13	0.95
500Hz	0.19	1.16	1.04	0.88
630Hz	0.21	1.07	0.96	0.79
800Hz	0.22	1.01	0.89	0.71
1kHz	0.24	0.94	0.82	0.61
1.25kHz	0.24	0.95	0.84	0.61
1.6kHz	0.23	0.98	0.86	0.63
2kHz	0.23	0.99	0.87	0.63
2.5kHz	0.24	0.96	0.84	0.60
3.15kHz	0.24	0.93	0.81	0.58
4kHz	0.25	0.91	0.79	0.55
5kHz	0.25	0.91	0.79	0.55
6.3kHz	0.26	0.89	0.77	0.55
8kHz	0.26	0.89	0.77	0.55
10kHz	0.26	0.89	0.77	0.55

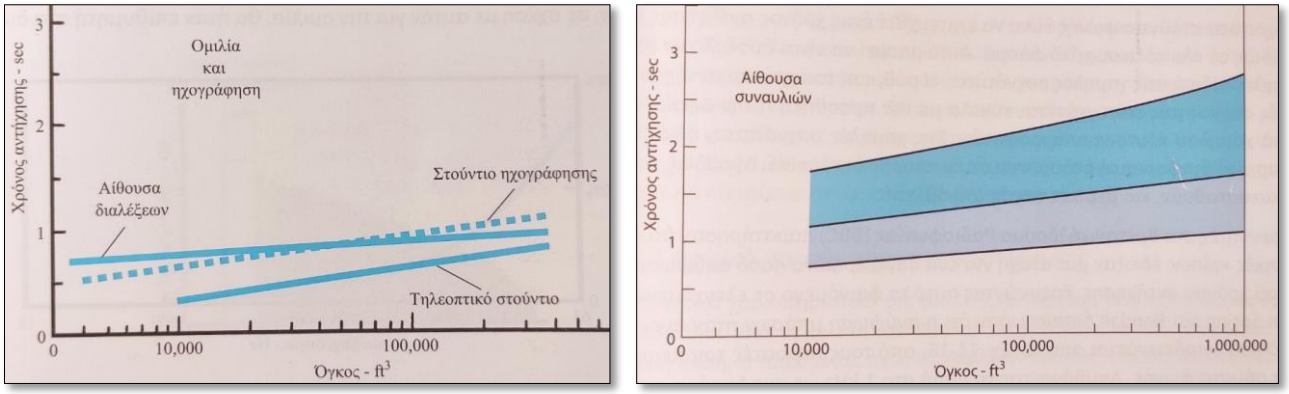
Πίνακας 5.3.6 Στατιστικές εκτιμήσεις RT_{60} (Sabine, Norris-Eyring, Millington-Sette)



Διάγραμμα 5.3.7 Στατιστικές εκτιμήσεις RT_{60} (Sabine, Norris-Eyring, Millington-Sette)

Από το παραπάνω διάγραμμα καθίσταται σαφής η υποεκτίμηση της συνολικής ηχοαπορροφητικότητας του χώρου από τις εκτιμήσεις Sabine και Norris-Eyring. Αναμένουμε η εκτίμηση Millington-Sette να βρίσκεται πιο κοντά στα ευρήματα που θα προκύψουν από τις μετρήσεις μας στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Όσον αφορά μια πρώτη αξιολόγηση των τιμών RT60 που βρήκαμε πιο πάνω, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα ενδεικτικά εύρη βέλτιστου χρόνου αντήχησης σε αντιστοίχιση με τη χρήση για την οποία προορίζεται ο χώρος, γνωρίζοντας ότι ο όγκος του χώρου είναι 1.739,58m^3 ή ~60.000ft^3.



Εικόνα 5.3.8 Ενδεικτικοί χρόνοι αντήχησης για TV studio, studio ηχογράφησης, αίθουσα διαλέξεων και αίθουσα συναυλιών (Everest & Pohlmann, 2015, σ. 241)

Για τον όγκο των 60.000ft^3 ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για διάλεξη και εκδηλώσεις ομιλίας (αριστερά διάγραμμα) είναι ~0,70-0,75sec ενώ για εφαρμογές μουσικής (δεξιά διάγραμμα) ξεκινά από 0,80-0,85sec και φτάνει έως τα 1,5-2,0sec.

Στο σημείο αυτό μπορούμε αναδρομικά να ελέγξουμε την υπόθεση περί διάχυτου πεδίου, όπως περιγράφτηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Ο μαθηματικός τύπος είναι:

$$f = 2000\sqrt{\frac{RT}{V}} \qquad \text{(Σχέση 5.4)}$$

και κάνοντας χρήση του υψηλότερου εκτιμώμενο χρόνου αντήχησης που εμφανίζεται στον προηγούμενο πίνακα (Sabine, 100Hz →1.92sec) ο παραπάνω τύπος δίνει:

$$f = 2000\sqrt{\frac{1,92}{1739,58}} = 66,4Hz \qquad \text{(Σχέση 5.5)}$$

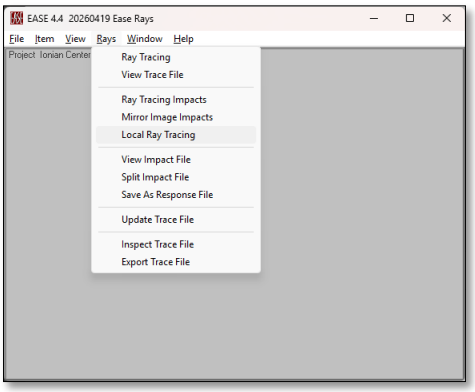
Συμπερασματικά, η συχνότητα Schroeder είναι πολύ χαμηλή και άρα ο χώρος μπορεί να θεωρηθεί μεγάλος, το ηχητικό πεδίο είναι διάχυτο και η ανάλυσή μας ακολουθεί πλήρως τη στατιστική και γεωμετρική θεώρηση του ηχητικού πεδίου. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να λάβουμε υπόψη τις παρατηρήσεις του Τσινίκα (2018, σ. 53-54) όσον αφορά τη γεωμετρική ακουστική, η οποία σε αντίθεση με την πιο αναλυτική κυματική ανάλυση δεν μπορεί να εξηγήσει (ή και να προβλέψει) παραμέτρους όπως οι διακυμάνσεις του χρόνου αντήχησης για

κάθε θέση του χώρου ή η μη απόλυτα λογαριθμική πτώση (ή γραμμική, εκφρασμένη σε db) της ηχητικής ενέργειας.

5.4 Ακουστική προσομοίωση (Ease Ray Tracing)

Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε μια απαιτητική υπολογιστικά προσομοίωση ανίχνευσης πορείας ηχητικών ακτίνων (στο εξής: ray tracing). Και πάλι θα επικεντρωθούμε στη χρήση μιας παντοκατευθυντικής πηγής («sphere») και ενός κατευθυντικού monitor (JBL PRX812W) καθώς από αυτές τις δύο πηγές μπορούμε να αντλήσουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Η πιο κάτω διαδικασία θα πραγματοποιηθεί εις διπλούν, μια για κάθε τύπο αυτών των ηχείων.

Αρχικά ανοίγουμε το module “Ease 4.4 Ray Tracing” και στο menu “Rays” πληροφορούμαστε για τις διάφορες επιλογές που μας δίνει το Ease 4.4 αναφορικά με το Ray Tracing.



Εικόνα 4.4.1 Παράθυρο του module "Ease 4.4 Ray Tracing"

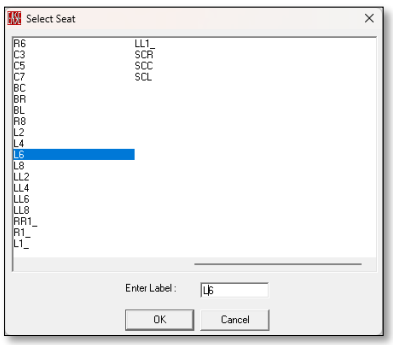
Σε ένα πρώτο επίπεδο μπορούμε να εκτελέσουμε το module με την επιλογή “Ray Tracing”. Στην περίπτωση αυτή επιλέγουμε τα ηχεία που θα λειτουργήσουν (δηλ. που θα εκπέμψουν) και το λογισμικό προσομοιώνει αυτή την εκπομπή προς όλες τις κατευθύνσεις, με πυκνότητα ακτίνων που αφενός εξαρτάται από τις παραμέτρους που θα θέσουμε, αφετέρου από την κατευθυντικότητα του ίδιου του ηχείου. Το αποτέλεσμα αυτής της εκτέλεσης είναι ένα αρχείο που αφορά αποκλειστικά την κατεύθυνση των ακτίνων (trace file - .trc) και δεν σχετίζεται με κανένα συγκεκριμένο σημείο (δηλαδή δέκτη-θέση ακροατή) του χώρου. Σε αυτό το επίπεδο προσομοιώνονται οι διαδρομές των ακτίνων και οι χρόνοι που αυτές προσκρούουν και ανακλώνται στις διάφορες επιφάνειες του χώρου. Οι ακτίνες είναι μονοδιάστατες τροχιές, χωρίς «ενεργειακό περιεχόμενο», συνεπώς η απουσία ενέργειας συνεπάγεται και απουσία ηχοαπορρόφησης. *Τα μόνα στοιχεία που καταγράφονται στο επίπεδο του Ray Tracing είναι καθαρά γεωμετρικά.*

Σε ένα δεύτερο επίπεδο μπορούμε να εκτελέσουμε το module με την επιλογή "Ray Tracing Impacts", το οποίο εκκινεί είτε από τη δημιουργία ενός αρχείου .trc (trace file) είτε από την ανάγνωση ενός υφιστάμενου αρχείου .trc. Το module αυτό καταγράφει τις συγκρούσεις των ακτίνων με μια συγκεκριμένη επιφάνεια ελέγχου ή με ένα συγκεκριμένο σημείο ακρόασης στο χώρο. Το αρχείο που παράγεται (impact file - .mpc) περιέχει όλη τη γεωμετρική πληροφορία που αφορά τη σύγκρουση των ακτίνων με το σημείο ελέγχου (ποιες ακτίνες προσκρούουν, υπό ποια γωνία και ποια στιγμή). Κατά την εκτέλεση του βήματος αυτού μας ζητείται να επιλέξουμε για ποια σημεία ελέγχου (ακρόασης) επιθυμούμε να λάβουμε impact file. Και σε αυτή την περίπτωση τα στοιχεία που αποθηκεύονται για το σημείο ακρόασης είναι καθαρά γεωμετρικά.

Το τρίτο βήμα είναι η εκτέλεση της επιλογής "Save Response File", με την οποία χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο impact file εξάγουμε ένα Response File για κάθε σημείο ακρόασης (ελέγχου) που μας ενδιαφέρει.

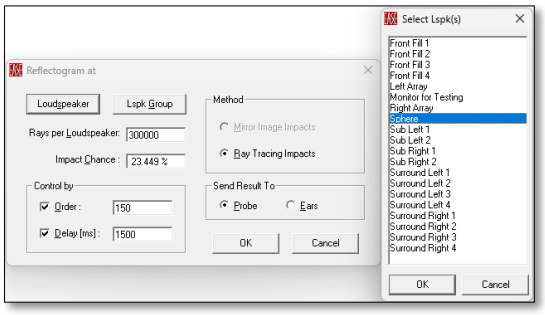
Για λόγους καλύτερης εποπτείας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων κάθε σημείου επιλέγουμε την εξής διαδικασία: Η επιλογή "Local Ray Tracing" επιτρέπει στο χρήστη να εκτελέσει ένα Ray Tracing του χώρου και εξαγάγει απευθείας ένα Response File εκτελώντας και την ενδιάμεση διαδικασία (αυτή του impact file) χωρίς την αποθήκευση ενός .mpc file. Η διαδικασία αυτή είναι πιο χρονοβόρα αλλά επιτρέπει επαναλήψεις ανά σημείο, καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα ήταν πιο ακριβή με μια παραλλαγή των αρχικών παραμέτρων (πχ μικρή αύξηση των ray ή του πλήθους του πλήθους ανακλάσεων). Σε κάθε περίπτωση, μια αντιπροσωπευτική εκτέλεση του Local Ray Tracing περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα.

Το πρώτο παράθυρο ζητά να επιλεγεί το μεμονωμένο σημείο ακρόασης για το οποίο θέλουμε να εξαγάγουμε το Response File.



Εικόνα 5.4.2 Επιλογή θέσης για την εξαγωγή Response File (Επιλογή Local Ray Tracing)

Ακολούθως επιλέγουμε στο επόμενο παράθυρο τις παραμέτρους του Ray Tracing.



Εικόνα 5.4.3 Ορισμός παραμέτρων ray Tracing

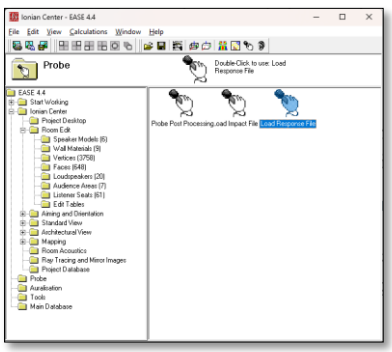
Επιλέγεται ένα μεγάλο πλήθος (300.000) ακτινών καθώς έπειτα από δοκιμές προέκυψε ότι μόνο σε ένα τέτοιο επίπεδο πυκνότητας ακτινών τα αποτελέσματα είναι συνεκτικά και αξιόπιστα. Επίσης επιλέγουμε μια μεγάλη διάρκεια προσομοίωσης ορίζοντας 150 ανακλάσεις και διάρκεια φαινομένου 1,5 δευτερολέπτων.

Η εκτέλεση αυτή γίνεται για κάθε σημείο και για τις δύο διαφορετικές πηγές που έχουμε ήδη ορίσει, ένα κατευθυντικό monitor (“monitor for testing”) και μια omni πηγή (“sphere”).

5.4.1 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης

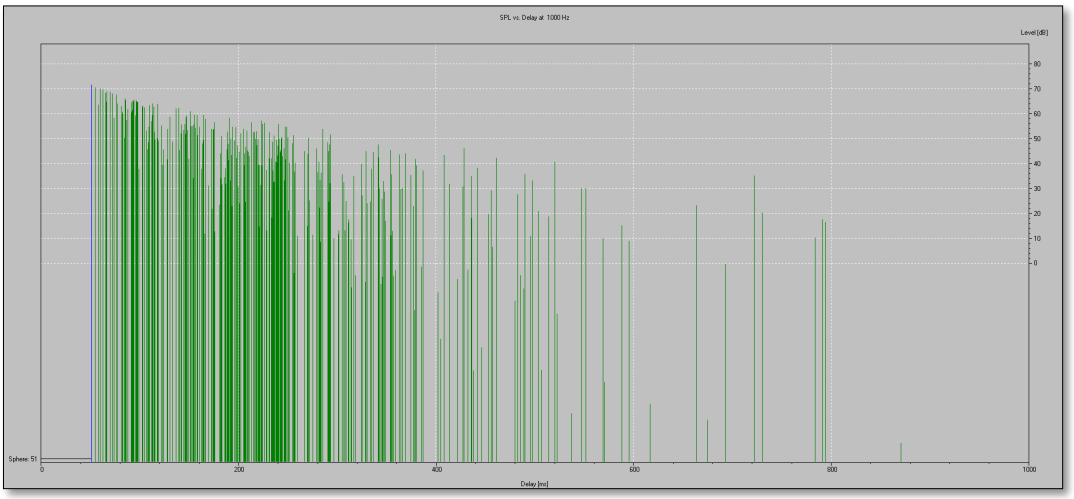
Το πρώτο αποτέλεσμα που μας ενδιαφέρει είναι η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης RT_{60} που μπορεί να μας δώσει η μέθοδος. Θα δούμε πώς μπορούμε να πάρουμε μια εκτίμηση του χρόνου αντήχησης, χρησιμοποιώντας τη θέση L_2 και έχοντας ως πηγή διέγερση την omni σφαιρική πηγή (“sphere”).

Αρχικά, ανοίγουμε το Response file που αντιστοιχεί στη θέση L_2 και για το σενάριο σφαιρικής omni πηγής.



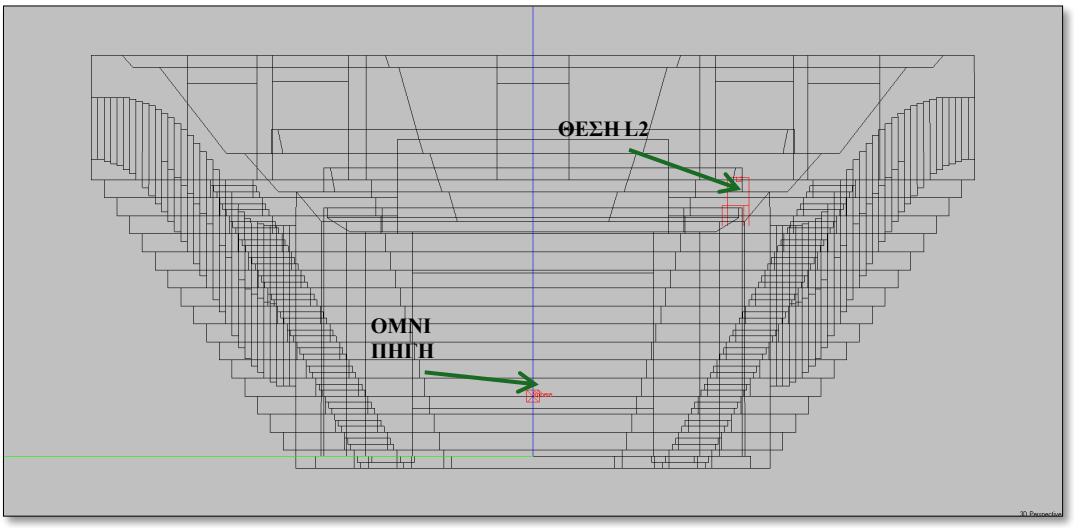
Εικόνα 5.4.1 Εκτέλεση του Module "Probe". Άνοιγμα του Response File

Ανοίγοντας το αρχείο για τη θέση L_2 μπορούμε, ενδεικτικά, να δούμε τα αποτελέσματα.

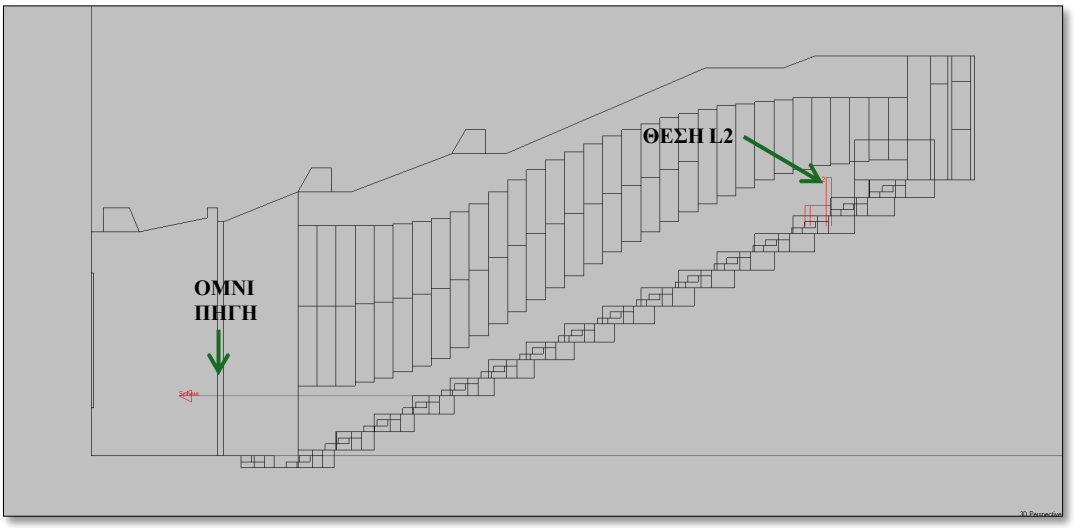


Εικόνα 5.4.2 Reflectogram στη θέση L_2 / omni πηγή στη σκηνή

Στο πιο πάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η πρώτη ακτίνα φτάνει στη θέση L_2 σε 51msec, που αντιστοιχεί σε ένα μήκος 17,34m. Η πρόσκρουση αυτή αντιστοιχεί την απευθείας εκπομπή της ακτίνας (χωρίς δηλαδή ανακλάσεις), καθώς αυτό επαληθεύεται από τις συντεταγμένες των δύο σημείων.



Εικόνα 5.4.3 Η θέση L_2 σε σχέση με τη θέση της omni πηγής (Τομή 1)



Εικόνα 5.4.4 Η θέση L_2 σε σχέση με τη θέση της omni πηγής (Τομή 1)

Οι συντεταγμένες της omni πηγής είναι:

x_1=2.2m

y_1=0m

z_1=1.5m

ενώ οι συντεταγμένες της θέσης L_2 είναι:

x_2=18.18m

y_2=5.09m

z_2=6.86m.

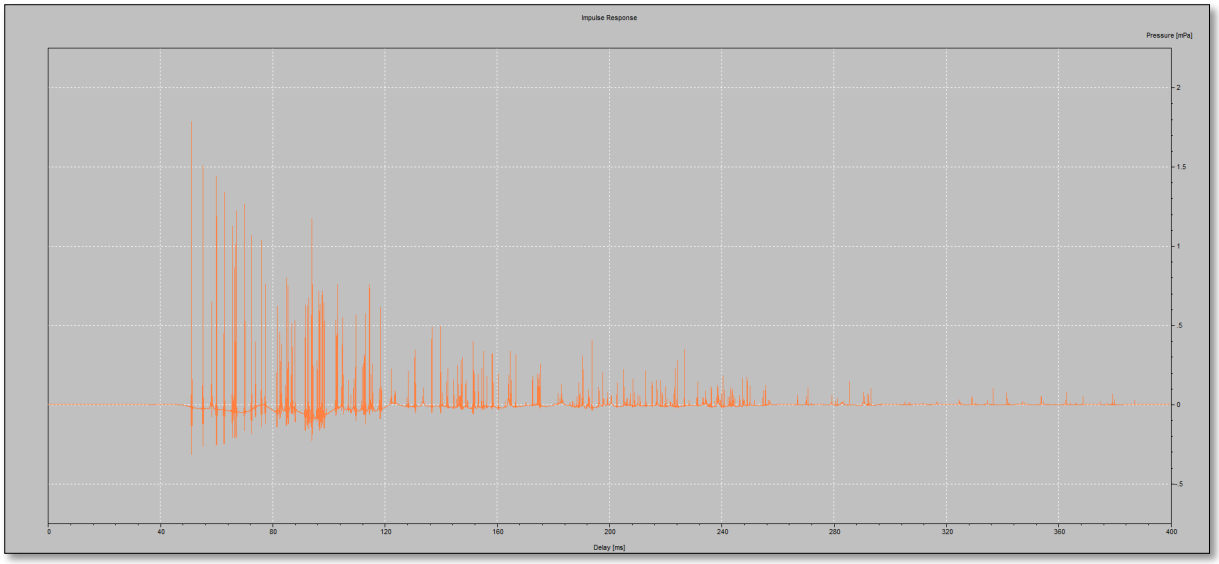
Η απόσταση των δύο σημείων υπολογίζεται ως εξής:

$$d = \sqrt[2]{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} =$$

$$= \sqrt[2]{(18{,}18 - 2{,}2)^2 + (5{,}09 - 0)^2 + (6{,}86 - 1{,}5)^2} = 17.61\text{m} \qquad \text{(Σχέση 5.6)}$$

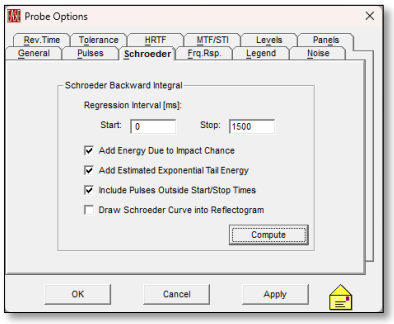
Αυτή η τιμή είναι πολύ κοντά στην απόσταση που υπολογίσαμε πιο πάνω.

Η επόμενη χρήσιμη εκτίμηση που μας δίνει αυτή η μέθοδος είναι ο χρόνος αντήχησης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη λεγόμενη αντίστροφη ολοκλήρωση Schroeder επί της καμπύλης κρουστικής απόκρισης για να εξαγάγει μια εκτίμηση του χρόνου αντήχησης.



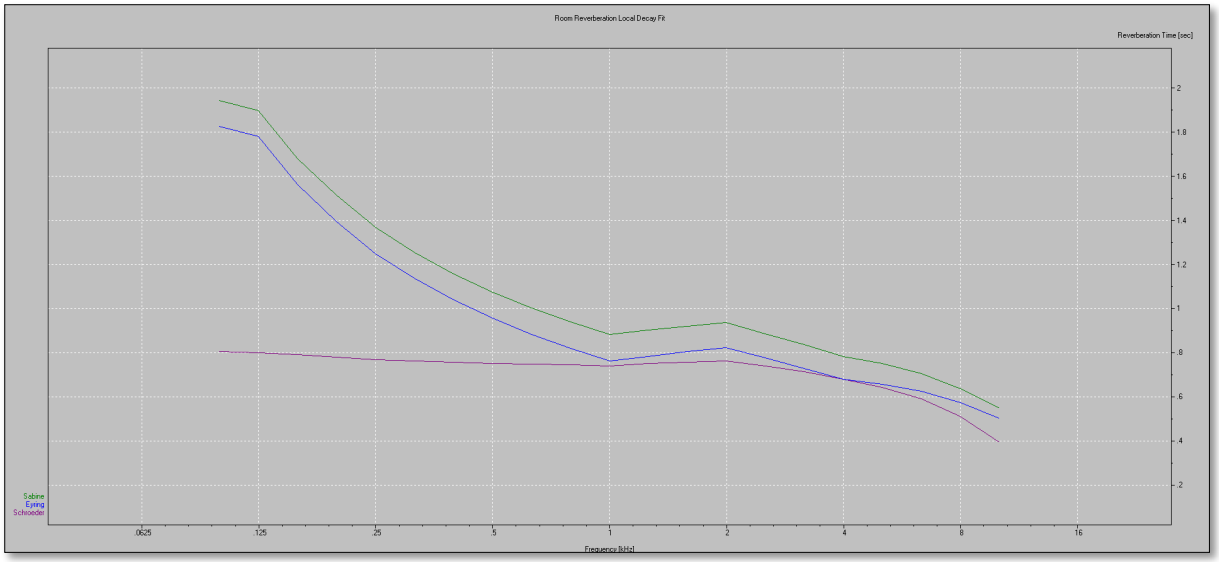
Εικόνα 5.4.5 Κρουστική Απόκριση (Impulse Response) στη θέση L_2 / omni πηγή

Πατώντας δεξί κλικ πάνω στο διάγραμμα μπορούμε να ελέγξουμε τις παραμέτρους της ολοκλήρωσης Schroeder.



Εικόνα 5.4.6 Παράθυρο παραμέτρων αντίστροφης ολοκλήρωσης Schroeder

Ορίζουμε (στο σημείο L_2 αλλά και σε κάθε άλλο σημείο που θα μελετήσουμε) ως χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης το σημείο 0 ως 1500msec, για να είμαστε πάντα σίγουροι ότι περιλαμβάνονται όλες οι ανακλάσεις που έχουν καταγραφεί στο Response File (καθώς 1500msec ήταν και η διάρκεια προσομοίωσης που ορίσαμε αρχικά στη μέθοδο Ray Tracing).



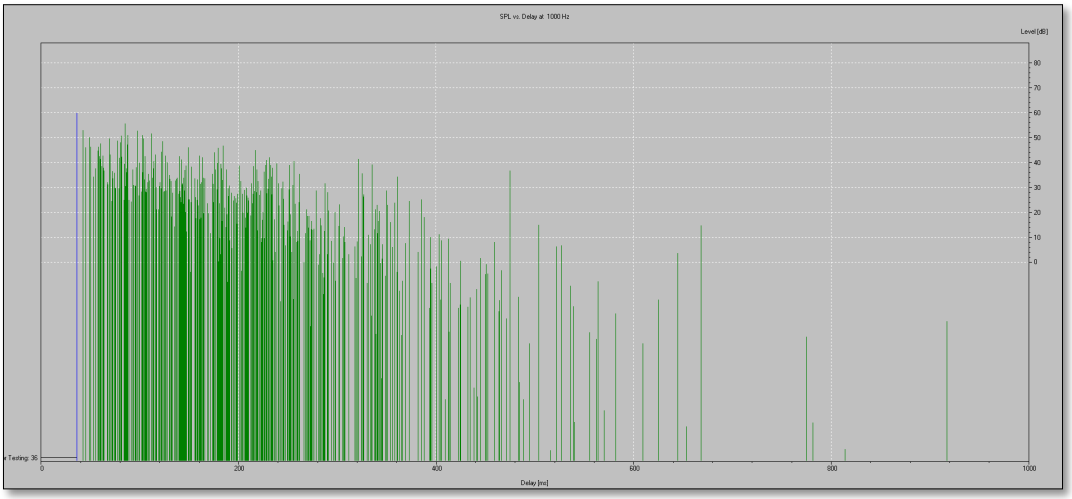
Εικόνα 5.4.7 Εκτίμηση χρόνου αντήχησης (ολοκλήρωση Schroeder) & σύγκριση με στατιστικές εκτιμήσεις Sabine & Norris-Eyring

Στο συγκεκριμένο σημείο φαίνεται ότι η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης βρίσκεται κάτω από την εκτίμηση του Eyring στην περιοχή 700Hz-10kHz, ωστόσο στην περιοχή κάτω από 700Hz η εκτίμηση Schroeder δίνει μια πολύ διαφορετική κατανομή του χρόνου αντήχησης, σταθερή για όλη τη χαμηλή συχνοτική περιοχή. Σε αυτό το σημείο θα επανέλθουμε πιο κάτω, όταν θα ελέγξουμε αυτό το εύρημα με τις μετρήσεις μας.

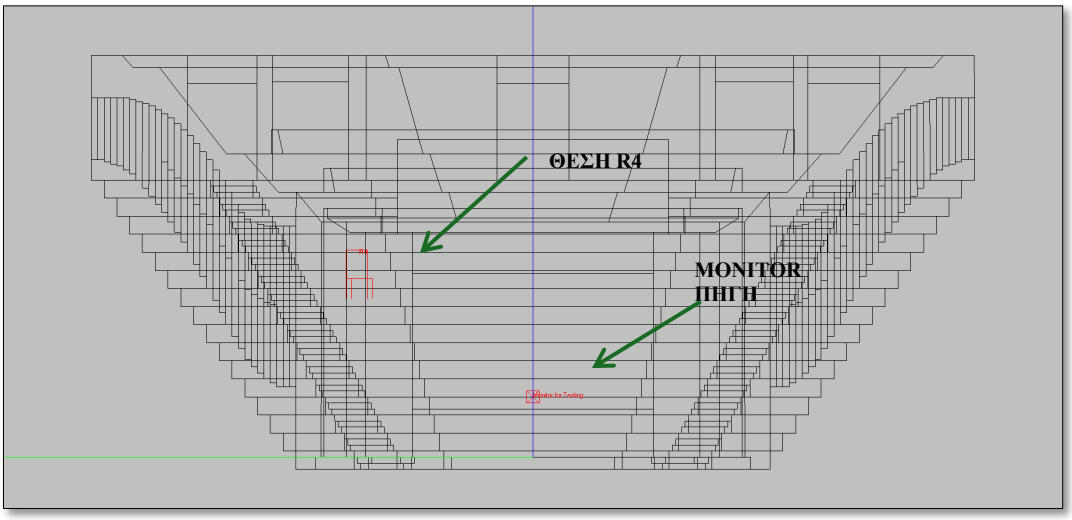
5.4.2 Εκτίμηση δεικτών ευκρίνειας και καταληπτότητας

Πηγαίνουμε τώρα στην προσομοίωση σε μια άλλη θέση, την R_4, αυτή το φορά με το ηχείο monitor. Το πλεονέκτημα αυτού του ηχείου είναι ότι είναι το ίδιο με αυτό που θα πραγματοποιήσουμε μετρήσεις στο επόμενο στάδιο. Ως εκ τούτου, είναι ένα ηχείο κατάλληλο για σύγκριση της εκτίμησης του Ease με την μέτρησή μας, κάτι που θα αξιοποιήσουμε για να συγκρίνουμε αφενός δείκτες ευκρίνειας C_{50} & C_{80}, αφετέρου το δείκτη καταληπτότητας STI.

Παράγουμε το Response File της θέσης R_4 για εκπομπή από την πηγή (monitor) που είναι τοποθετημένη στη σκηνή. Από το Response File και μέσα από το module “Probe” μπορούμε να εξαγάγουμε το αντίστοιχο Reflectogram.



Εικόνα 5.4.8 Reflectogram στη θέση L_2 / πηγή monitor



Εικόνα 5.4.9 Η θέση R_4 σε σχέση με τη θέση της πηγής monitor



Εικόνα 5.4.10 Η θέση R_4 σε σχέση με τη θέση της πηγής monitor (Τομή)

Επαναλαμβάνουμε τον ίδιο υπολογισμό επαλήθευσης με πριν. Η πρώτη ακτίνα φτάνει στη θέση R_4 σε 36msec και από αυτό υπολογίζουμε μια διαδρομή πρώτης ακτίνας ίση με $36 \cdot 10^{-3} sec \cdot 340 \frac{m}{sec} = 12{,}24m$. Οι συντεταγμένες της monitor πηγής είναι:

x_1=3,2m

y_1=0m

z_1=1,5m

ενώ οι συντεταγμένες της θέσης L_2 είναι:

x_2=14,24m

y_2=4,33m

z_2=5,05m

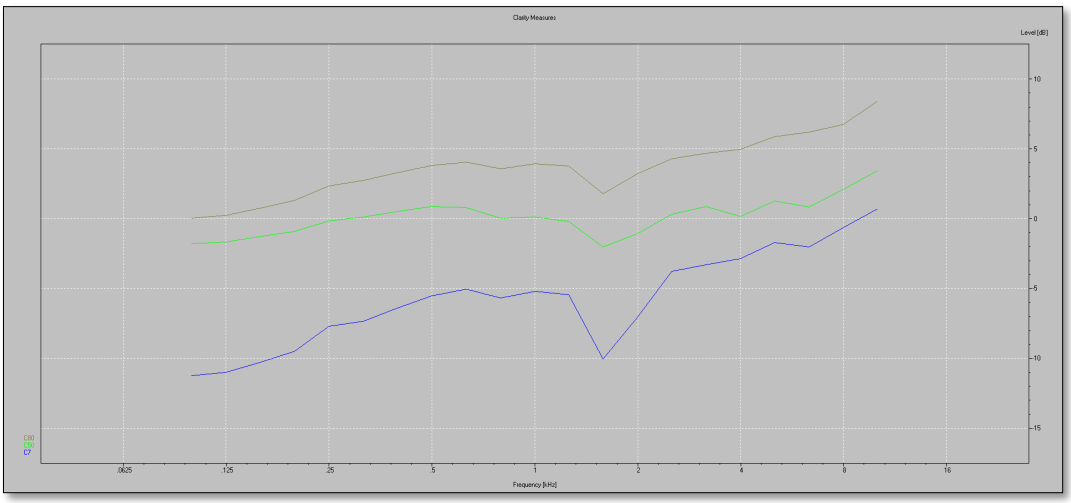
Η απόσταση των δύο σημείων υπολογίζεται ως εξής:

$$d = \sqrt[2]{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} =$$

$$= \sqrt[2]{(14{,}24 - 3{,}2)^2 + (4{,}33 - 0)^2 + (5{,}05 - 1{,}5)^2} = 12{,}37\text{m} \qquad \text{(Σχέση 5.7)}$$

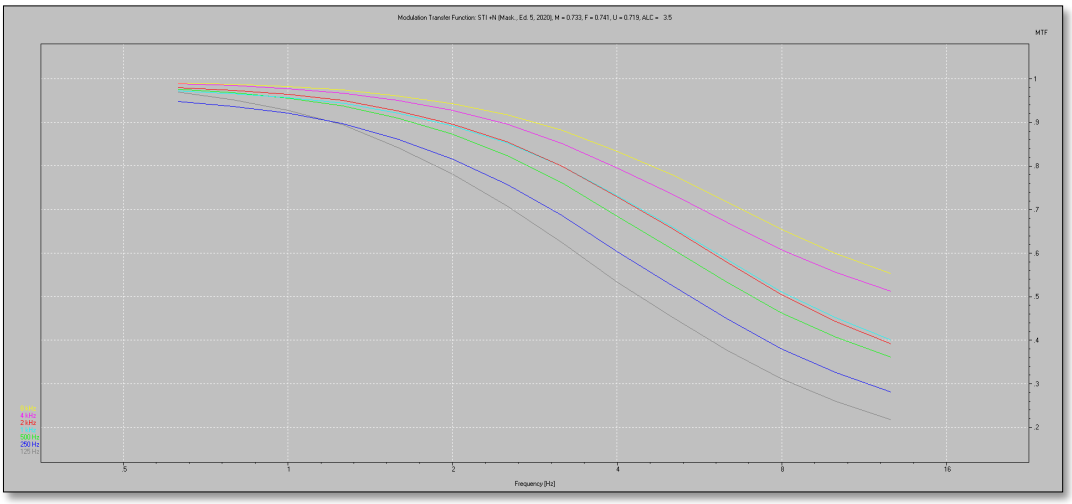
Αυτή η τιμή είναι πολύ κοντά στην απόσταση που υπολογίσαμε πιο πάνω.

Η εκτίμηση των δεικτών C_{50} και C_{80} για τη θέση R_4 που μας δίνει η προσομοίωση Ray tracing είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 5.4.11 Εκτίμηση δεικτών ευκρίνειας C_7, C_{50} & C_{80}

Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να εξαγάγουμε τον υπολογισμό των τιμών STI.



Εικόνα 5.4.12 Εκτίμηση δείκτη καταληπτότητας STI

Η παραπάνω εκτίμηση του STI γίνεται από το Ease σύμφωνα με το πρότυπο IEC60268-16 (Edition 5, 2020), ενώ οι αναλυτικές τιμές STI δίνονται από το διάγραμμα αυτό ως εξής:

STI_{Male}=0.733

STI_{Female}=0.741

$STI_{Unweighted}$=0.719

$STIPa_{Male}$=0.740

$STIPa_{Female}$=0.747

RaSTI=0.716.

Ένα σύντομο σχόλιο για τα παραπάνω: Οι δείκτες ευκρίνειας προκύπτουν από την προσομοίωση μέτριοι, με τον δείκτη C_{50} να κινείται κοντά σε μια μέση τιμή 0dB ή ελάχιστα θετική. Αντιθέτως, οι εκτιμήσεις των STI οδηγούν σε καλές τιμές καταληπτότητας.

Κεφάλαιο 6 Εκτέλεση Μετρήσεων στο Χώρο

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται το Σάββατο 4 Απριλίου 2026. Η επιλογή γίνεται σε μια προσπάθεια να αποκλείσουμε κάποιες από τις πηγές θορύβου της καθημερινής λειτουργίας του κτιρίου καθώς και να μην συμπέσουν οι μετρήσεις με τη λειτουργία του εργοταξίου που είναι μόνιμα εγκατεστημένο και δραστηριοποιούμενο σε γειτονικό χώρο (ναός Ιωνικού Κέντρου, υπό ανέγερση). Σκοπός μας είναι να λάβουμε τιμές για διάφορες παραμέτρους της ακουστικής του χώρου εφαρμόζοντας μια μέτρηση για κάθε σημείο. Εφόσον αυτή η μέθοδος προετοιμαστεί σωστά η επανάληψη της μέτρησης για κάθε σημείο γίνεται εύκολα και άρα μπορούμε να «σαρώσουμε» το χώρο αποτελεσματικά σε πολλές και πυκνά κατανεμημένες θέσεις.

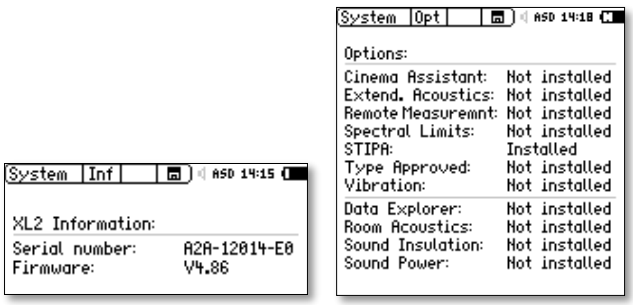
6.1 Διαθέσιμος εξοπλισμός

6.1.1 Ηχόμετρο

Για τις μετρήσεις ακουστικής στάθμης, καλιμπραρίσματος και δείκτη STI χρησιμοποιείται το ηχόμετρο NTi Audio XL2, Serial Number A2A-12014-E0. Firmware V4.86. Το ηχόμετρο έχει εγκατεστημένο το πρόσθετο option μέτρησης του δείκτη STIPA.



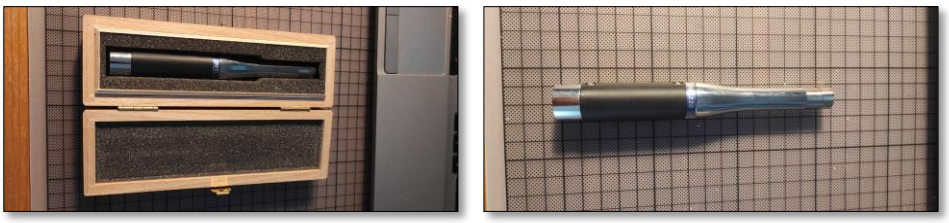
Εικόνα 6.1.1 Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε: XL2 (NTi Audio)



Εικόνα 6.1.2 Αποσπάσματα οθόνης ηχομέτρου (Serial Number, τρέχουσα έκδοση Firmware, διαθεσιμότητα module STIPA)

5.1.2 Μικρόφωνο

Για τη λήψη των ακουστικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το ειδικό μετρητικό μικρόφωνο της NTi Audio (IEC 61672 / ANSI S1.4).



Εικόνα 6.1.3 Το μετρητικό μικρόφωνο που χρησιμοποιείται

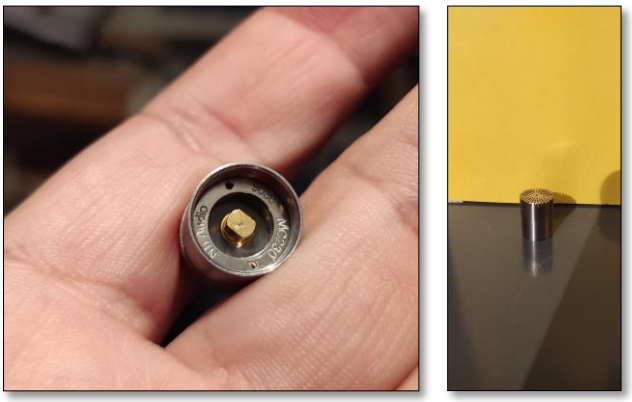
Αποτελείται από δύο μέρη:

- Προενισχυτής. Κωδικός MA220, Serial Number 6235.



Εικόνα 6.1.4 Μετρητικό μικρόφωνο. Διακρίνεται το μοντέλο και το serial number

- Κάψα. Κωδικός MC230. Serial Number 9030



Εικόνα 6.1.5 Κάψα Μετρητικού Μικροφώνου. Διακρίνεται το μοντέλο και το serial number

Η κάψα MC230 είναι πυκνωτική (1/2 electret condenser) και παντοκατευθυντική (omnidirectional). Ο προενισχυτής MA220 έχει δυνατότητα είτε απευθείας σύνδεσης πάνω στο ηχόμετρο της NTi Audio είτε σύνδεσης μέσω καλωδίου XLR προέκτασης ως πηγή του audio interface, αρκεί να υπάρχει phantom power. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η σχεδόν απόλυτα γραμμική (flat) συχνοτική απόκριση, η οποία στα τεχνικά φυλλάδια αναφέρεται ότι ανέρχεται στα 5Hz-20kHz (±1dB)[5]. Η ευαισθησία του είναι ιδιαίτερα υψηλή (27.5 dBV/Pa ±2 dB (42 mV/Pa) ενώ ο εσωτερικός (intrinsic) θόρυβος του ενισχυτή ανέρχεται στα 16 dB(A), γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για μετρήσεις στάθμης περιβάλλοντος θορύβου με αρκετή ακρίβεια.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη πίεσης φτάνει τα 137 dB SPL, καθιστώντας το μικρόφωνο κατάλληλο και για εφαρμογές υψηλής ηχητικής ενέργειας χωρίς να εμφανίζεται παραμόρφωση.

6.1.3 Κάρτα Ήχου (Interface)

Για τη λήψη και επεξεργασία των ακουστικών μετρήσεων χρησιμοποιείται το audio interface SCARLETT 4i4 (3rd Generation) του κατασκευαστή FOCUSRITE. Η κάρτα ήχου διαθέτει δύο mic προενισχυτές με πολύ χαμηλή ισοδύναμη στάθμη θορύβου (EIN: equivalent input noise) −128 dBu (A-weighted) και ολική αρμονική παραμόρφωση (THD: total harmonic distortion) <0,0012%. Διαθέτει υψηλή δυναμική περιοχή (111dB A-Weighted) εξασφαλίζοντας επαρκές headroom για ένα μεγάλο εύρος στάθμης για τις μετρήσεις μας[6]. Η μέγιστη στάθμη εξόδου είναι +15,5 dBu και άρα είναι κατάλληλη για να οδηγήσει τα ηχεία που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις μας. Όλες οι είσοδοι και έξοδοι είναι balanced και άρα περιορίζουν σημαντικά τις πιθανότητες να υπάρχει θόρυβος από παρεμβολές στα καλώδια που θα χρησιμοποιήσουμε. Η λεπτομέρεια αυτή έχει σημασία καθώς το καλώδιο που

[5] Όλα τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή. Περισσότερα στο ακόλουθο link: https://www.nti-audio.com/wp-content/uploads/download-manager-files/Measurement-Microphones-Specifications.pdf (Ανακτήθηκε στις 9 Ιουνίου 2026)

[6] Όλα τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή. Περισσότερα στο ακόλουθο link: https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/downloads/Scarlett%204i4%203rd%20Gen%20User%20Guide%20V2.pdf (Ανακτήθηκε στις 14 Ιουνίου 2026)

χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση του μικροφώνου με την κάρτα ήχου είχε μήκος 30 μέτρων (για να είναι εύκολη η μεταφορά του στα πιο απομακρυσμένα σημεία της αίθουσας).



Εικόνα 6.1.6 Το Audio Interface που χρησιμοποιήθηκε (FOCUSRITE Scarlett 4i4 3rd Gen)

Η κάρτα ήχου παρέχει phantom power +48V για πυκνωτικά μικρόφωνα όπως το μετρητικό NTi MA220 που θα χρησιμοποιήσουμε στις μετρήσεις μας. Θα πρέπει επίσης να διατηρήσουμε όσο πιο «επίπεδη» γίνεται την είσοδο στην οποία θα συνδέσουμε (αναλογικά) το μετρητικό μας μικρόφωνο. Για το λόγο αυτό προσέχουμε τα εξής στην κάρτα:

Επιλογή INST στην αναλογική είσοδο. Η επιλογή INST αλλάζει την αναλογική είσοδο σε υψηλής αντίστασης (Hi-Z, της τάξης του 1MΩ), μετατρέποντάς τη σε είσοδο κατάλληλη για συγκεκριμένες κατηγορίες μουσικών οργάνων. Προσέχουμε να έχουμε απενεργοποιήσει την επιλογή INST στην είσοδο όπου θα συνδέσουμε το μετρητικό μας μικρόφωνο

Επιλογή AIR στην αναλογική είσοδο. Η επιλογή AIR τίθεται σε προενισχυτές ειδικά της σειράς Scarlett και αποτελεί μια αναλογική προσομοίωση της χροιάς των προσενισχυτών ISA του κατασκευαστή FOCUSRITE. Επιλέγοντας AIR ενεργοποιούμε ένα αναλογικό κύκλωμα το οποίο τροποποιεί ελαφρά την αντίσταση στην είσοδο, επιβάλλει μια ήπια ανύψωση στις υψηλές συχνότητας και συνακόλουθα τη χροιά ορισμένων μικροφώνων. Προφανώς προσέχουμε και εδώ να έχουμε απενεργοποιήσει την επιλογή AIR στην είσοδο όπου θα συνδέσουμε το μετρητικό μας μικρόφωνο.

Επιλογή PAD στην αναλογική είσοδο. Η επιλογή αυτή ενεργοποιεί την «εξασθένιση» (attenuation) του σήματος κατά -10dB για να αποφεύγονται περιπτώσεις υπερφόρτωσης του ενισχυτή, clipping ή παραμόρφωσης ότι η κάρτα ήχου λαμβάνει πολύ υψηλό σήμα line ή mic. Και εδώ θα φροντίσουμε να μην «χρειαστεί» pad attenuation, θέτοντας το σωστό gain structure στο όλο σύστημα.

6.1.4 Λογισμικό REW V5.31.3

Για την εκτέλεση, καταγραφή και ανάλυση των μετρήσεων χρησιμοποιούμε το λογισμικό Room EQ Wizard (REW), ένα εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης ακουστικών μετρήσεων το

οποίο έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση της ακουστικής συμπεριφοράς τόσο χώρων όσο και συστημάτων ενισχυμένου ήχου. Είναι χαρακτηριστικό ότι παρέχεται δωρεάν για το σύνολο των διαθέσιμων λειτουργιών του και για αυτό το λόγο είναι εξαιρετικά δημοφιλές για κάθε βαθμίδα δυσκολίας ακουστικών και ηλεκτρακουστικών μετρήσεων. Εξίσου σημαντική για τη διάδοσή του είναι και η συμβατότητα με το σύνολο σχεδόν του διαθέσιμου επαγγελματικού εξοπλισμού. Τέλος, δεν θα πρέπει να αγνοηθεί το εξαιρετικά εύχρηστο και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας του, με την άριστη οπτικοποίηση των παραμέτρων, είτε για μεμονωμένες μετρήσεις είτε για ομάδες μετρήσεων που πρέπει να αντιπαρατεθούν / συγκριθούν σε κοινά διαγράμματα.

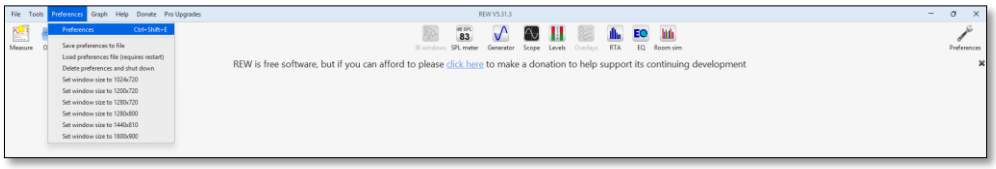
Το REW επιτρέπει τη λήξη μετρήσεων SPL, RT60, frequency response, impulse response, waterfall, spectrogram, καθώς και ανάλυση 1/1 και 1/3-octave. Διαθέτει, τέλος, μια ευέλικτη και παραμετροποιήσιμη γεννήτρια ηχητικών σημάτων ελέγχου (logarithmic sine sweeps, pink noise, white noise και band-limited noise), επιτρέποντας την ακριβή αξιολόγηση της απόκρισης συχνότητας και του χρόνου αντήχησης ενός χώρου.

Πλέον του λογισμικού REW, χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά και το Open Sound Meter (v1.5.2) για real time εποπτεία στο χώρο. Η real-time εποπτεία του ήχου μπορεί να είναι βοηθητική ακόμα και αν το Open Sound Meter λειτουργεί απλώς με το μικρόφωνο που έχει ενσωματωμένο το laptop, αν και τα αποτελέσματά του σε αυτή την περίπτωση δεν μπορούν να καλιμπραριστούν με ακρίβεια όσον αφορά τη στάθμη.

6.2 Περιγραφή διαδικασίας

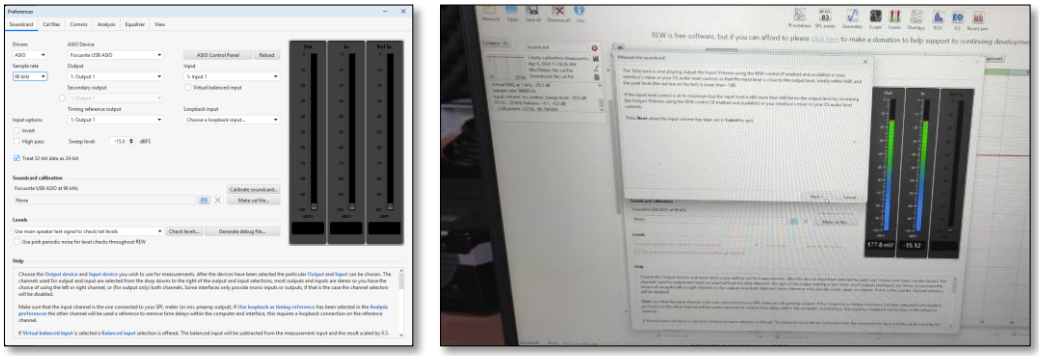
6.2.1 Έναρξη – Καλιμπράρισμα κάρτας ήχου

Συνδέουμε με ένα καλώδιο TRS / XLR την αναλογική έξοδο 1 της κάρτας ήχου στην αναλογική είσοδο 1, επίσης της κάρτας ήχου. Απαιτείται προσοχή να μην χρησιμοποιηθεί καλώδιο TS / TS (που συχνά είναι πιο εύκολα διαθέσιμο σε τέτοιες περιπτώσεις), διότι με αυτό τον τρόπο θα έχουμε unbalanced και όχι balanced έξοδο, κάτι που έχει επίπτωση όχι μόνο στο ότι δεν θα υπάρχει η επιθυμητή αφαίρεση (αναίρεση) του θορύβου (που είναι και ο κύριος λόγος της ύπαρξης της balanced σύνδεσης) αλλά και ότι η στάθμη που θα ήταν σε αυτή την περίπτωση 6dB χαμηλότερη. Εκκινούμε το REW και πηγαίνουμε στις αρχικές ρυθμίσεις / προτιμήσεις:



Εικόνα 6.2.1 Λογισμικό Room EQ Wizard - Εκκίνηση διαδικασίας

Στο ακόλουθο παράθυρο επιλέγουμε ASIO Driver, την κάρτα ήχου μας, την αναλογική έξοδο 1 και την αναλογική είσοδο 1. Επίσης θέτουμε Sweep Level -15dBFS, που είναι το σήμα εξόδου στην αναλογική είσοδο. Θέτουμε αυτή την τιμή μετά από διάφορες δοκιμές καθώς θέλουμε η κάρτα να δίνει ένα υψηλό σήμα στην έξοδό της (το οποίο σήμα στη συνέχεια το αυτοενισχυόμενο ηχείο θα παραλαμβάνει και θα ενισχύει χωρίς παραμορφώσεις).



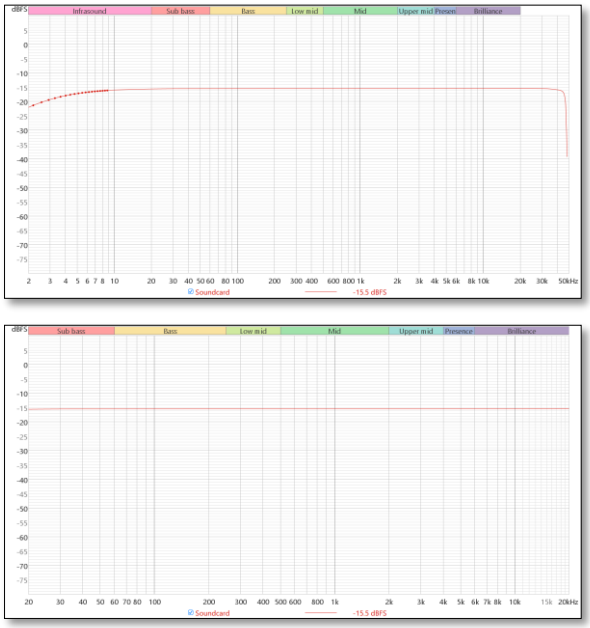
Εικόνα 6.2.2 Ορισμός Sweep Level, καλιμπράρισμα Gain & Volume

Η διαδικασία επιβάλλει να ρυθμίσουμε τη στάθμη εισόδου με τρόπο που τα dBFS στην έξοδο να ισούνται με τα dBFS στην είσοδο και για το λόγο αυτό ρυθμίζουμε αφενός το Gain της εισόδου, αφετέρου το volume control της κάρτας για να πετύχουμε ακριβώς αυτή την εξίσωση. Αν στο καλιμπράρισμα «συμμετέχει» πολύ το Gain, το κυκλικό led γύρω από το κουμπί θα κοκκινίσει. Προσπαθούμε να θέσουμε το Gain κάτω από το όριο του να ανάβει το φως του και το υπόλοιπο level το παίρνουμε από το volume της κάρτας. Τις δύο αυτές θέσεις του Gain 1 και του Volume τις κρατάμε αμετάβλητες καθ'όλη τη διάρκεια των μετρήσεων της ημέρας.



Εικόνα 6.2.3 Η κάρτα ήχου μετά την τελική της ρύθμιση

Η μέτρηση αυτή μας οδηγεί στο ακόλουθο διάγραμμα SPL που περιγράφει τη δρομολόγηση της (καλιμπραρισμένης πια) αναλογικής εξόδου της κάρτας στην είσοδό της.



Διάγραμμα 6.2.4 SPL κάρτας ήχου κατά τη δοκιμή (επίπεδη καμπύλη στην περιοχή 20Hz-20kHz)

Στο παραπάνω SPL διάγραμμα βλέπουμε την απολύτως γραμμική συμπεριφορά της κάρτας ήχου, με το «-15dBFS» να έχει εφαρμοστεί σωστά στην έξοδο, το loopback να μην έχει θόρυβο ή παραμόρφωση.

Επόμενο βήμα είναι το καλιμπράρισμα στάθμης. Χωρίς να αλλάξουμε το gain structure της κάρτας συνδέουμε το αυτοενισχυόμενο ηχείο που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις μας. Το ηχείο αυτό είναι το PRX812W του κατασκευαστή JBL.



Εικόνα 6.2.5 Το ηχείο (stage monitor) που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις

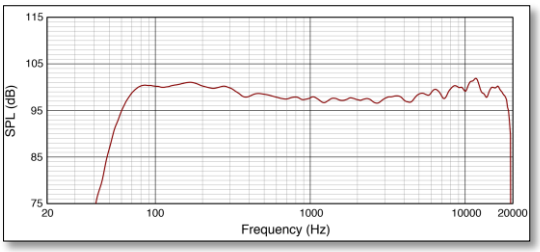
Συνδέουμε την τροφοδοσία 230V και το καλώδιο TRS/XLR της αναλογικής εξόδου της FOCUSRITE SCARLETT 2i2 στην Combo XLR είσοδο 1 του ηχείου. Προσέχουμε και εδώ

να μην παρεμβάλλονται φίλτρα ή άλλες παράμετροι που παραμορφώνουν το σήμα μας. Συγκεκριμένα:

- Δεν ενεργοποιούμε τίποτα από την εφαρμογή PRX Connect mobile app διότι τα EQ θα τροποποιούσαν το σχεδόν flat σήμα που έχουμε εξασφαλίσει από την κάρτα ήχου

- Εξασφαλίζουμε (με παρατεταμένο πάτημα του κουμπιού «Mic» της εισόδου 1) ότι η είσοδος θα λαμβάνει σήμα line (διότι line σήμα είναι αυτό που στέλνει η έξοδος της κάρτας ήχου). Σε διαφορετική περίπτωση η είσοδος θα διαβάσει το σήμα εισόδου (της τάξης των 0dBu, καθώς το max της κάρτας θα είναι 15,5dB peak) ως mic σήμα (δηλαδή στο μικροφωνικό επίπεδο της τάξης των 40-30dBu) σήμα. Η διαφορά αυτή των 40dB θα οδηγήσει αμέσως σε clipping και παραμορφωμένο ήχο.

- Με το αντίστοιχο κουμπί επιλέγουμε ως mode το “Main” και όχι το “Monitor” διότι αυτή είναι η πιο «φυσική» (flat) καμπύλη από τις δύο. Η απόκριση συχνότητας του ηχείου σε Main Mode είναι, σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή, η ακόλουθη:



Εικόνα 6.2.6 Απόκριση συχνότητας ηχείου[7]

Το ηχείο σε Main Mode σημειώνεται ότι επιτυγχάνει:

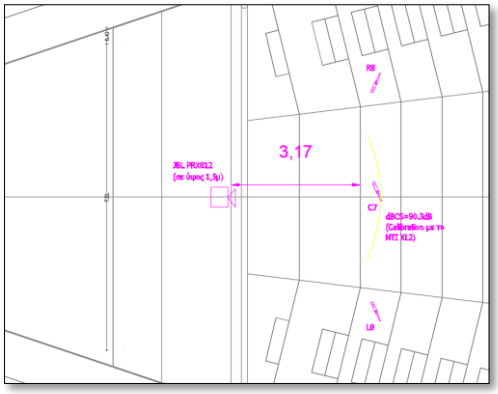
Frequency Range (-10dB) / Main: 44.8 Hz – 20 kHz
Frequency Response (±3 dB) / Main: 55.7 Hz – 20 kHz

Επίσης θα πρέπει να σχολιάσουμε ότι με δεδομένη την απολύτως επίπεδη καμπύλη τόσο του μετρητικού μας μικροφώνου όσο και της κάρτας ήχου, η απόκριση συχνότητας του ηχείου είναι η μόνη «πηγή» μη γραμμικότητας.

Επόμενο βήμα το καλιμπράρισμα της στάθμης. Δίνουμε σήμα στο ηχείο, το ανάβουμε και το δυναμώνουμε σε μια στάθμη κατάλληλη για να μπορεί να ακουστεί αρκετά έως το κέντρο του αμφιθεάτρου. Για πρακτικούς λόγους επιλέγουμε ως σημείο αναφοράς για το καλιμπράρισμα

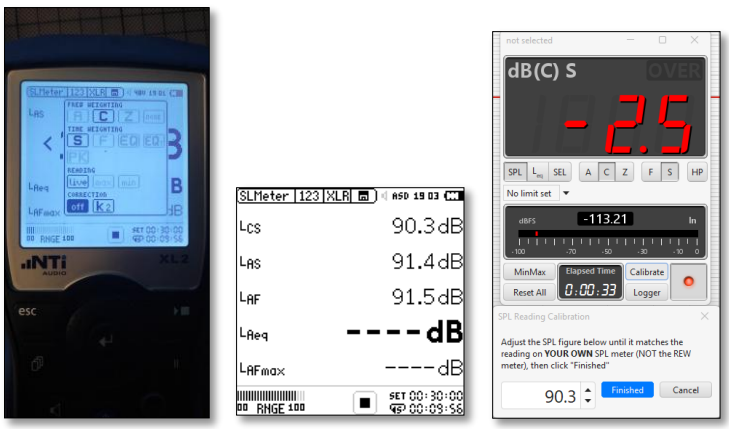
[7] Όλα τα στοιχεία ελήφθησαν από το επίσημο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή. Περισσότερα στο ακόλουθο link: https://jblpro.com/ar/site_elements/jbl-professional-prx812-spec-sheet (Ανακτήθηκε στις 9 Ιουνίου 2026)

τη δεύτερη σειρά των καθισμάτων, στον άξονα του αμφιθεάτρου, δηλαδή στον άξονα του ηχείου. Αυτή είναι η θέση C_7 και βρίσκεται σε μια οριζόντια απόσταση 3,17 μέτρων. Όντας στον άξονα και σε κοντινή απόσταση γνωρίζουμε ότι μετρούμε ένα σήμα με πολύ υψηλό λόγο D/R (Direct-to-Reverberant field).



Εικόνα 6.2.7 Θέση για καλιμπράρισμα στάθμης ηχείου

Προχωράμε τώρα με το καλιμπράρισμα στάθμης μέσω του REW. Το REW μας ανοίγει ένα παράθυρο μέτρησης στάθμης και μας ζητά να καλιμπράρουμε, δηλαδή να μετρήσουμε με το δικό μας ηχόμετρο τη στάθμη σε μια θέση και στην ίδια ακριβώς θέση να τοποθετήσουμε το μετρητικό μας μικρόφωνο θέτοντας χειροκίνητα την τιμή στάθμης που μας έδωσε το ηχόμετρο. Η ιδιαιτερότητα εδώ είναι ότι το REW επιβάλλει η τιμή αυτή να είναι C-Weighted και Slow time weighting (Αργή απόκριση), δηλαδή την τιμή L_{CS}. Ρυθμίζουμε το ηχόμετρό μας έτσι ώστε να μετρήσει επίσης στάθμη L_{CS} και παίρνουμε την τιμή 90.3dB στη θέση C_7 την οποία και θέτουμε στο REW, ολοκληρώνοντας το καλιμπράρισμα.



Εικόνα 6.2.8 Στάθμη Lcs. Παραμετροποίηση στο ηχόμετρο, μέτρηση, calibration λογισμικού REW

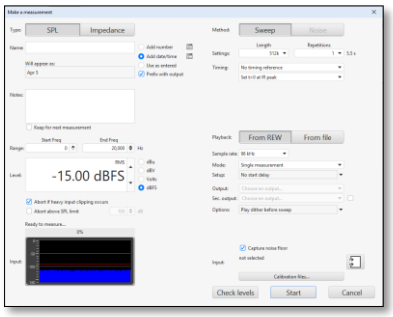
Στο σημείο αυτό πρέπει να σχολιαστεί το εξής: Το REW «υποχρεώνει» το χρήστη να καλιμπράρει με βάση το L_{CS} (Slow Time Weighting). Ωστόσο θα περίμενε κανείς να δίνεται η

δυνατότητα καλιμπραρίσματος με βάση τη στάθμη L_{ZS}, δηλαδή Z-Weighted (=No-Weighted), διότι εδώ μετράμε την αντικειμενική στάθμη (ή την αντικειμενική ακουστική πίεση) και όχι μια υποκειμενική στάθμη (όπως C-Weighted ή A-Weighted) που λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα υποκειμενικά ψυχοακουστικά «φίλτρα». Δεχόμαστε όμως ότι αυτή η σημαντική μεθοδολογικά λεπτομέρεια δεν έχει καμία ουσιαστική επίπτωση στις μετρήσεις μας.

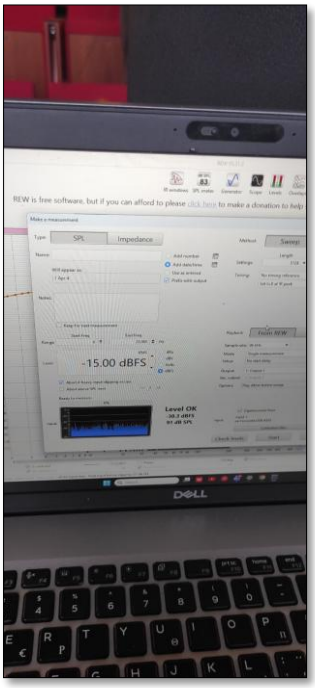
6.2.2 Μετρήσεις με το λογισμικό REW

Είμαστε τώρα σε θέση να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις. Πατώντας το κουμπί "Measure" στο REW μας ανοίγει ένα παράθυρο για παραμετροποίηση του σήματος διέγερσης των μετρήσεών μας. Θέλουμε ένα sweep tone από 20Hz έως 20kHz. Με διάφορες δοκιμές διαπιστώνουμε ότι:

- Η διάρκεια sweep των 5 δευτερολέπτων φαίνεται επαρκής για μια ικανοποιητική διέγερση του χώρου
- Οι μετρήσεις πρόκειται να μας δώσουν τιμές ακουστικών παραμέτρων (και) για την περιοχή <80Hz στην οποία το ηχείο αποδίδει ελλιπώς (διότι το ηχείο είναι full range αλλά όχι subwoofer). Το σημείο αυτό θα σχολιαστεί στη συνέχεια, όταν θα μετρήσουμε με το ηχόμετρο της NTi Audio το οποίο, όπως θα δούμε, θέτει πιο αυστηρά κριτήρια για τη λήψη των ακουστικών μετρήσεων.
- Δοκιμάζοντας "Repeated Measurements", δηλαδή την αυτόματη επανάληψη Sweep tone όχι μια αλλά n φορές παρατηρούμε ότι το REW δεν συνδυάζει αυτά τα sweep για να βγάλει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, να αναιρέσει ενδεχομένως μη συστηματικές διαταραχές, κάνοντας average του θορύβου κτλ Οι n επαναλήψεις σημαίνει απλώς n ανεξάρτητες καμπύλες για κάθε σημείο μέτρησης. Για λόγους απλότητας (για να έχουμε δηλαδή ένα sweep για κάθε θέση και να μην αυξηθεί εκθετικά ο χρόνος επεξεργασίας των στοιχείων) αποφασίζουμε να κάνουμε μόνο ένα sweep σε κάθε θέση
- Επιλέγουμε Capture Noise Floor διότι μας ενδιαφέρει το κάθε sweep να καταγράψει το noise floor για να μπορούμε να το αξιολογήσουμε. Οι μετρήσεις που θα πραγματοποιήσουμε θα είναι λοιπόν και μετρήσεις θορύβου, τις οποίες και θα απομονώσουμε και θα σχολιάσουμε ξεχωριστά.
- Προσέχουμε το input level να είναι ρυθμισμένο στα -15dBFS έτσι ώστε να ισχύει ό,τι έχουμε ήδη ορίσει στη φάση calibration κάρτας ήχου και στάθμης ηχείου.



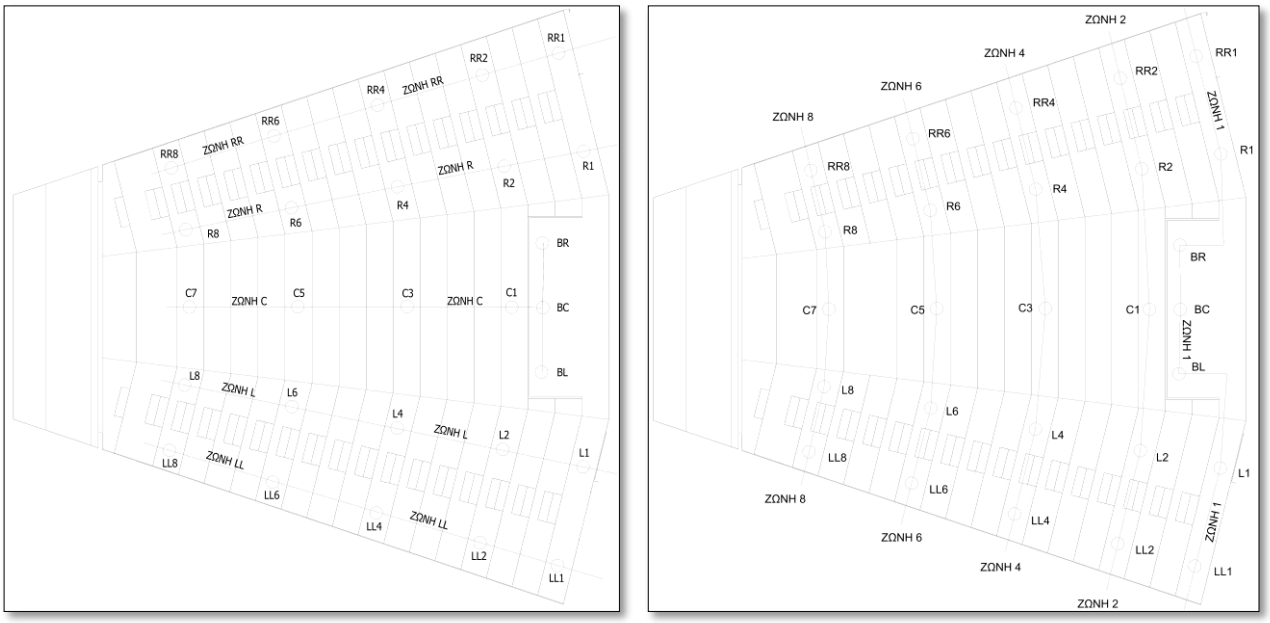
Εικόνα 6.2.11 Προετοιμασία μέτρησης. Παραμετροποίηση του test signal που θα χρησιμοποιήσουμε



Εικόνα 6.2.12 Δοκιμές στην πρώτη θέση (C_7)

Οι μετρήσεις μας καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος θέσεων του αμφιθεάτρου. Είναι μια «πολυτέλεια« που έχουμε εξασφαλίσει έχοντας αποφασίσει single measurement, δηλαδή ένα sweep δευτερολέπτων σε κάθε θέση, κάτι που εξασφαλίζει οικονομία χρόνου. Η επίσπευση των μετρήσεων είναι πολύ σημαντική καθώς γνωρίζουμε ότι υπάρχουν δραστηριότητες στο κτίριο οι οποίες μπορεί να μεταβάλουν σημαντικά το noise floor. Όσο συντομεύουμε τον κάθε «κύκλο» μετρήσεων τόσο πιο αξιόπιστα και συγκρίσιμα μεταξύ τους είναι τα αποτελέσματα της μέτρησης ανά θέση.

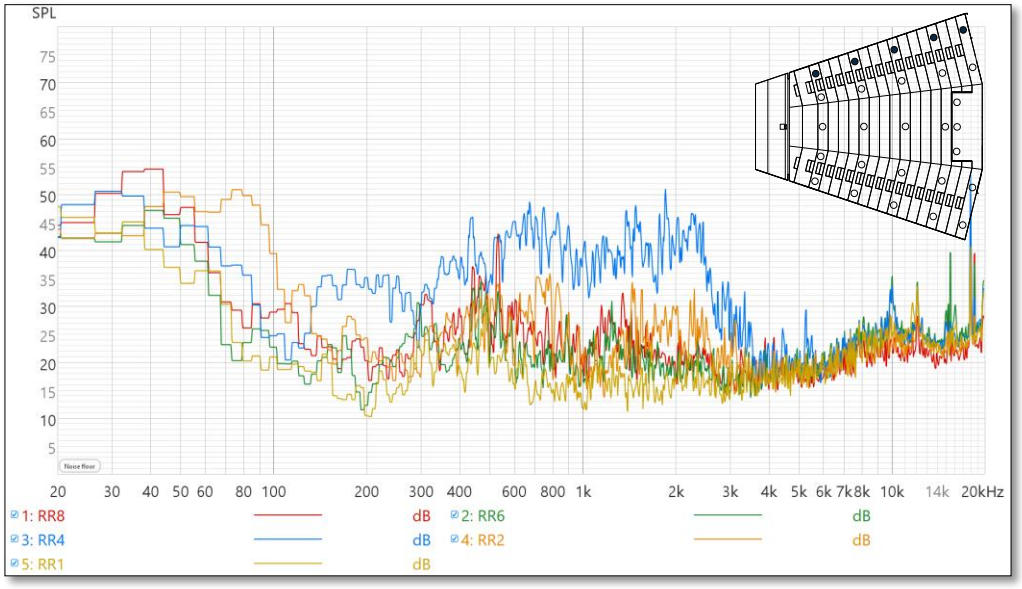
Τα σημεία στα οποία κάνουμε μέτρηση είναι αυτά που απεικονίζονται στις επόμενες εικόνες. Για να έχουμε καλύτερη εποπτεία διατάσσουμε τα σημεία αξονικά σε 5 ζώνες RR, R, C, L, LL και ακτινικά σε 5 ζώνες 8, 6, 4, 2 & 1.



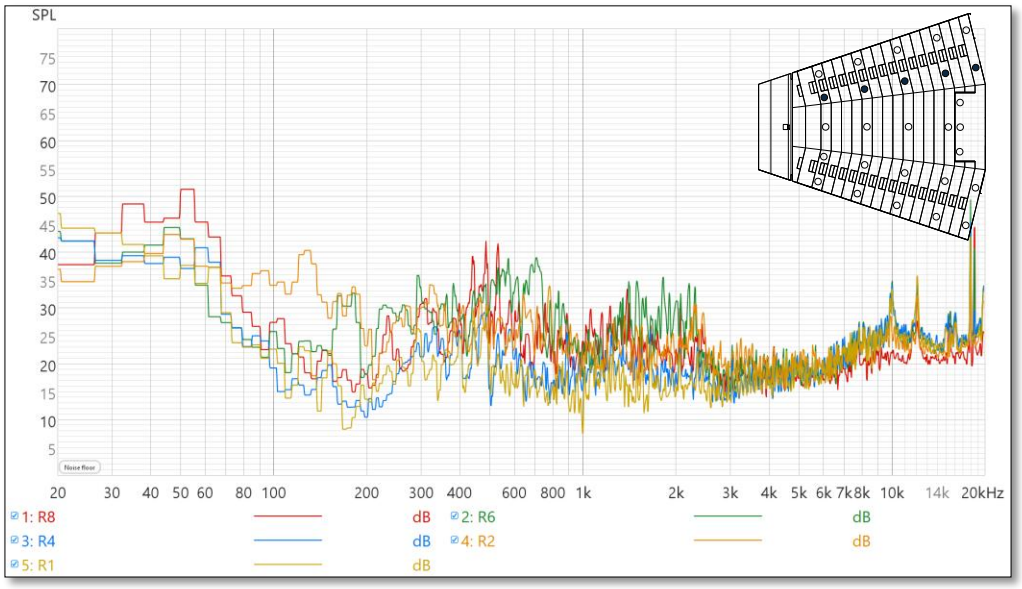
Εικόνα 6.2.13 Χωρισμός αμφιθεάτρου σε επιμέρους ζώνες, «αξονικά» (αριστερά) και «ακτινικά» (δεξιά)

6.2.3 Μέτρηση θορύβου

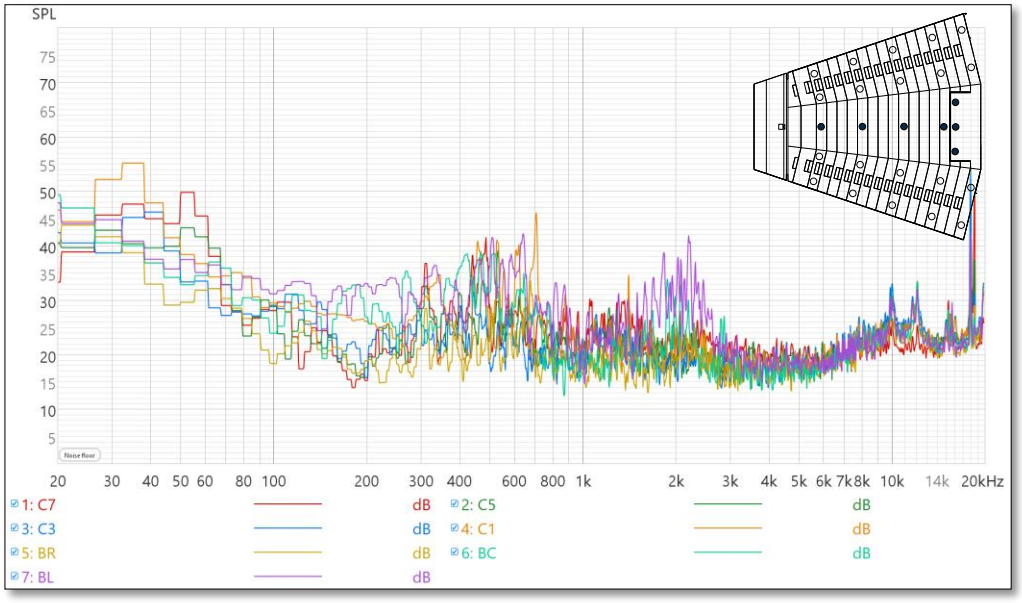
Πριν την εξέταση των διαφόρων μετρήσεων ακουστικών παραμέτρων που μας δίνει το REW απομονώνουμε τις τιμές θορύβου που ηχογραφήθηκαν στα διάφορα σημεία και τις συγκεντρώνουμε σε κοινά διαγράμματα ανά «ακτινικές» και «αξονικές» ζώνες μετρήσεων όπως τις ορίσαμε πιο πάνω.



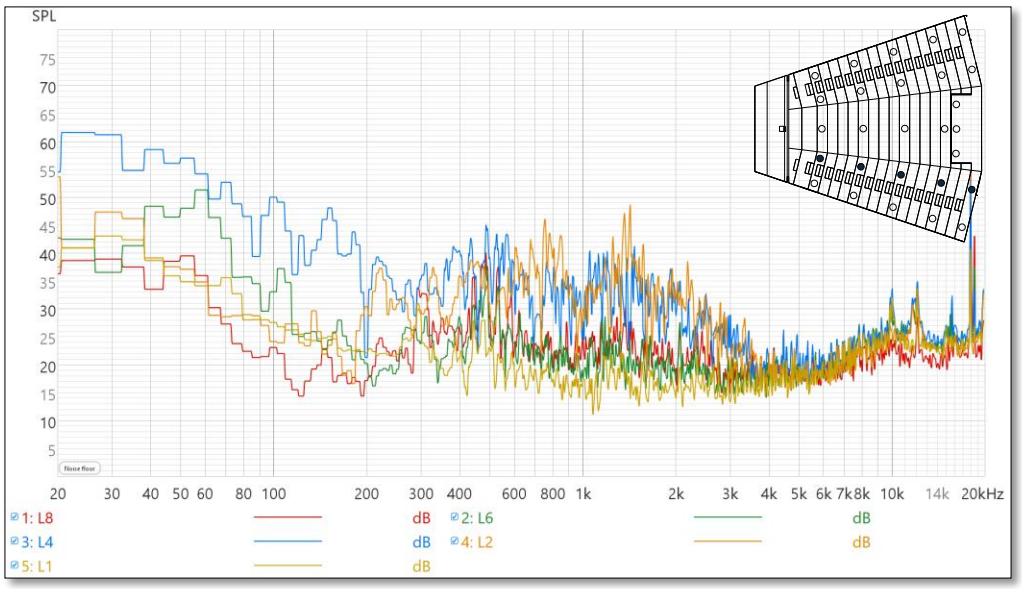
Διάγραμμα 6.2.14 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη RR (RR_1, RR_2, RR_4, RR_6, RR_8)



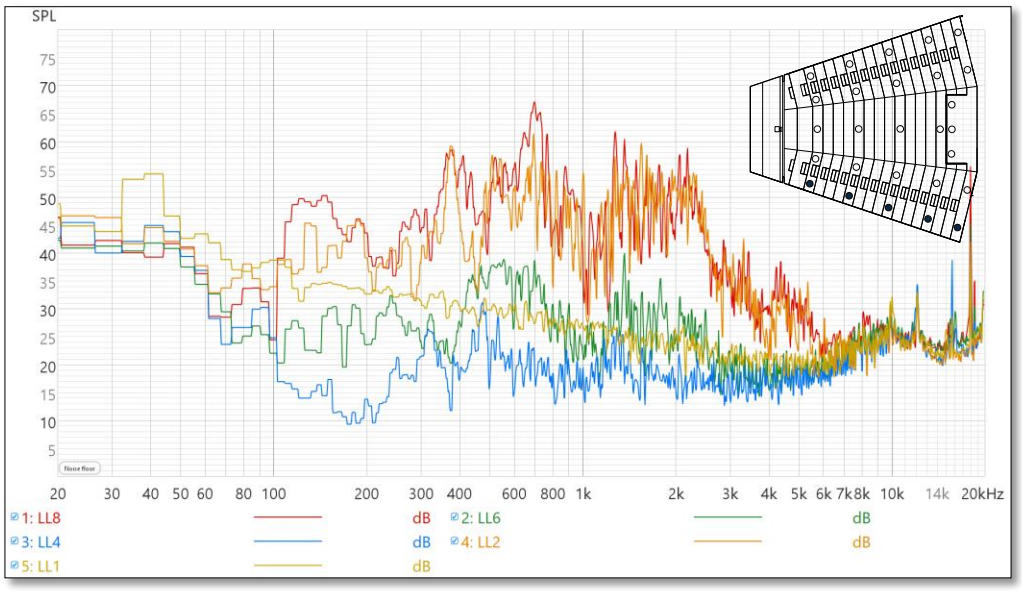
Διάγραμμα 6.2.15 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη R (R_1, R_2, R_4, R_6, R_8)



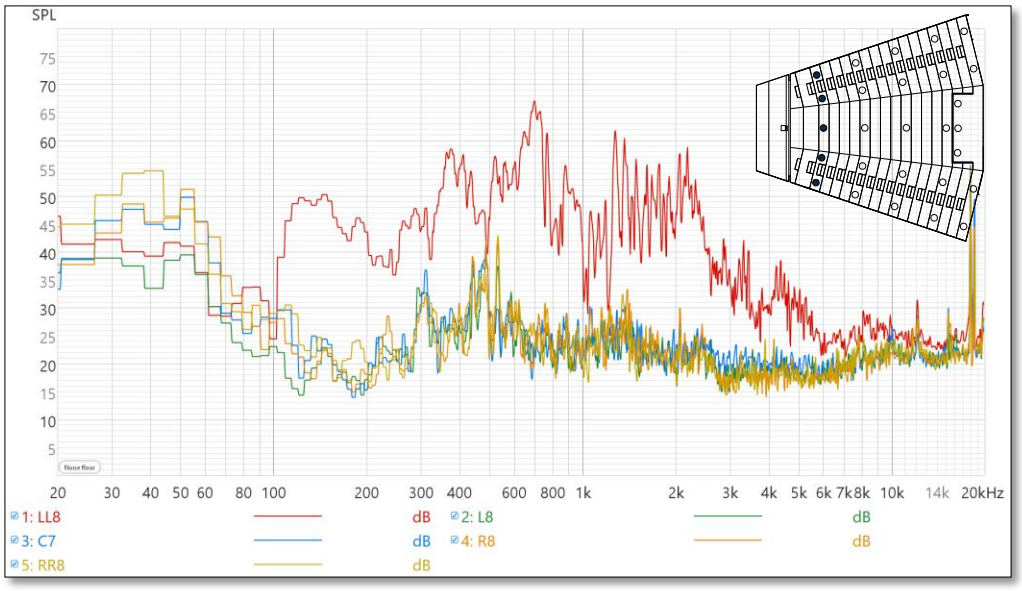
Διάγραμμα 6.2.16 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη C (C_1, C_3, C_5, C_7, BL, BC, BR)



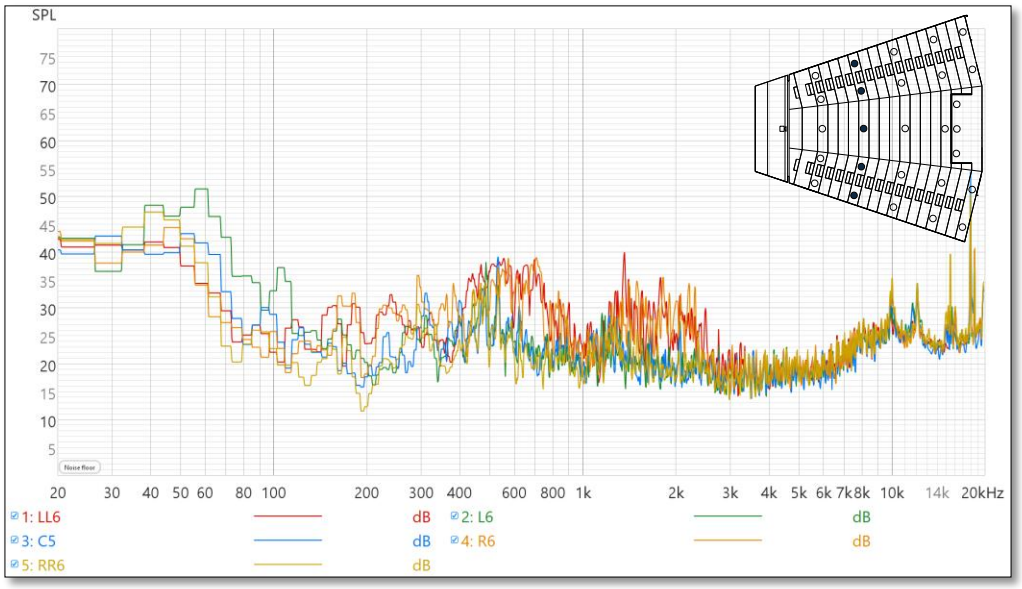
Διάγραμμα 6.2.17 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη L (L_1, L_2, L_4, L_6, L_8)



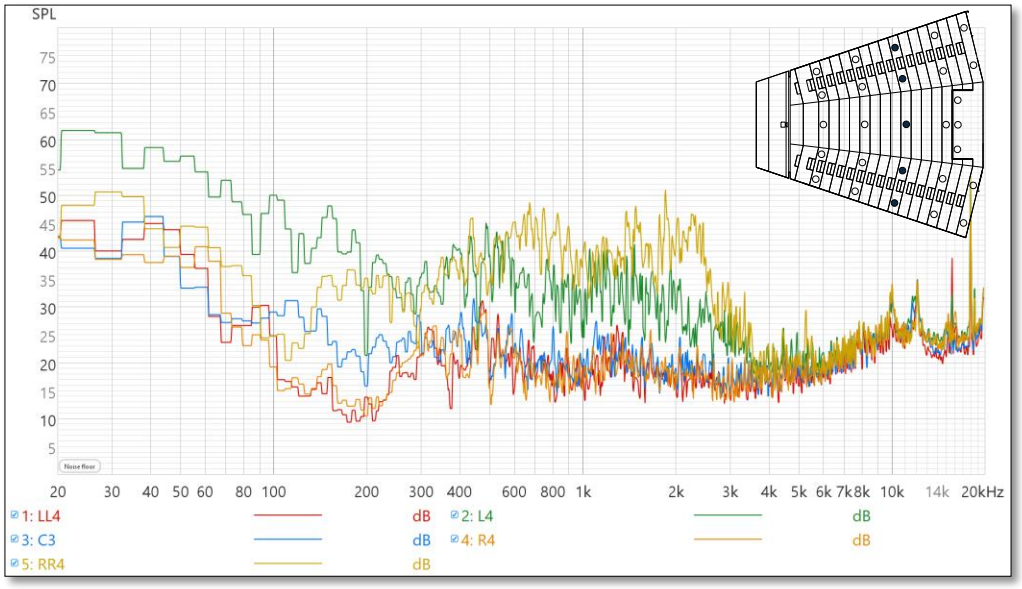
Διάγραμμα 6.2.18 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη LL (LL_1, LL_2, LL_4, LL_6, LL_8)



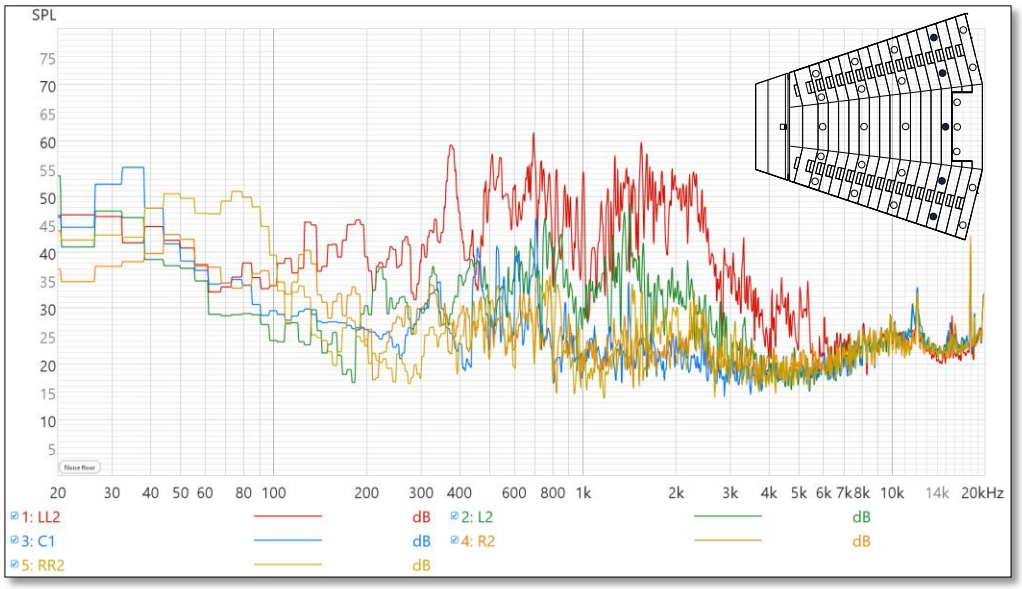
Διάγραμμα 6.2.19 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 8 (LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8)



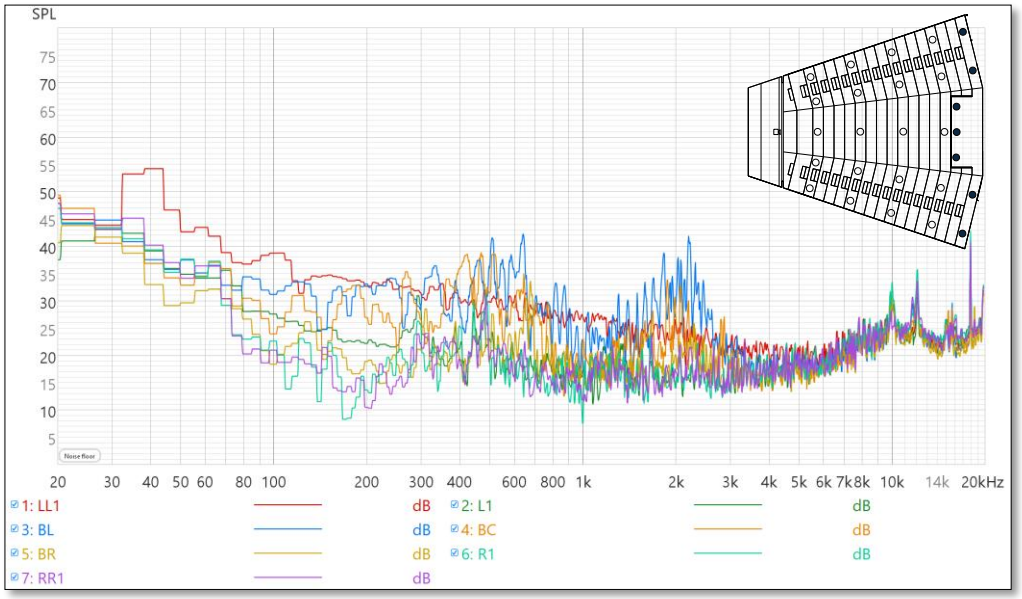
Διάγραμμα 6.2.20 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 6 (LL_6, L_6, C_5, R_6, RR_6)



Διάγραμμα 6.2.21 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 4 (LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4)



Διάγραμμα 6.2.22 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 2 (LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2)



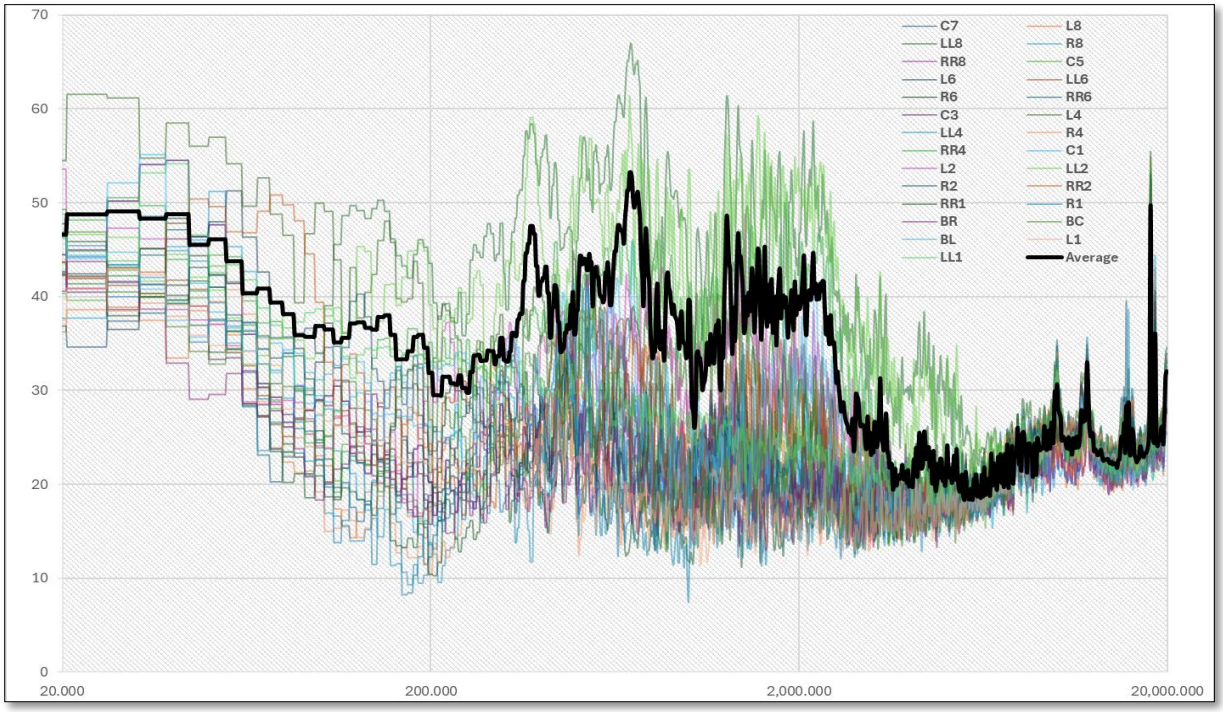
Διάγραμμα 6.2.23 Μέτρηση θορύβου (dB SPL), ζώνη 1 (LL_1, L_1, BL, BC, BR, R_1, RR_1)

Παρατηρούμε διάφορες αποκλίσεις – εξάρσεις θορύβου οι οποίες μάλιστα δεν έγιναν αντιληπτές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Δεν υπάρχει ασφαλής τρόπος να αξιολογήσουμε τις μετρήσεις αυτές, για το λόγο αυτό θα εξαγάγουμε μια γενική καμπύλη θορύβου του χώρου, την οποία θα εισαγάγουμε και στο λογισμικό Ease ως μια ρεαλιστική εκτίμηση του θορύβου του χώρου. Η γενική αυτή καμπύλη θα προκύψει ως μέσος όρος των τιμών ανά συχνότητα.

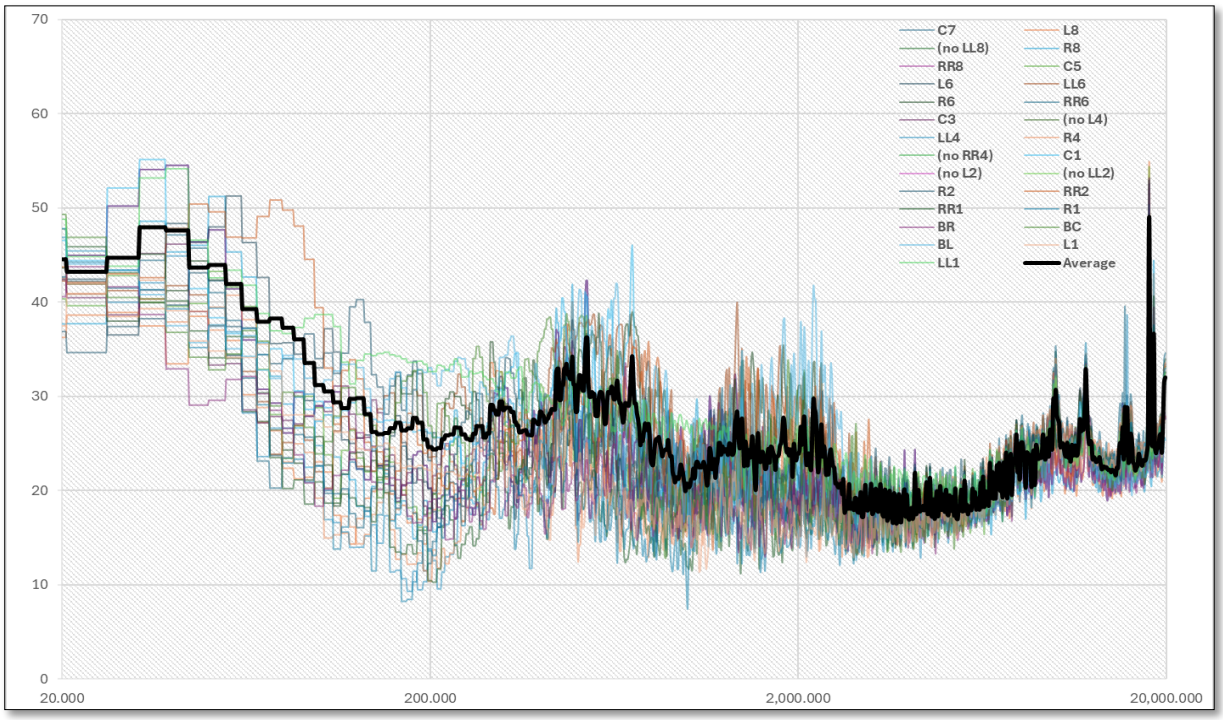
Σε ένα φύλλο Excel συγκεντρώνουμε όλες τις τιμές θορύβου και εφαρμόζοντας για κάθε συχνότητα τον τύπο της μέσης στάθμης:

$$L = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum 10^{L/10}\right) \qquad \text{(Σχέση 6.1)}$$

Εφαρμόζουμε τον τύπο για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις (όλες οι μετρήσεις θορύβου και όλες πλην των 5 που αποκλίνουν σημαντικά).

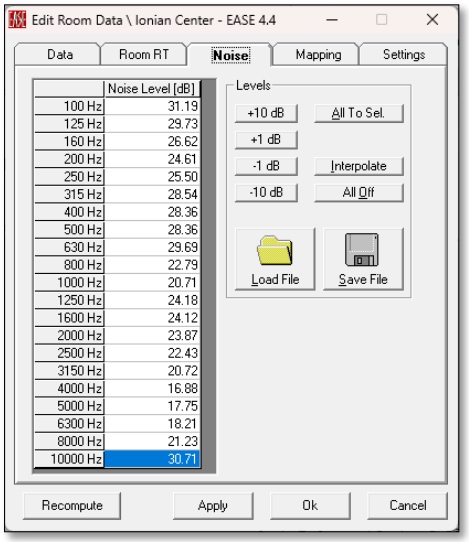


Διάγραμμα 6.2.24 Noise Floor όλων των σημείων & Μέση Τιμή



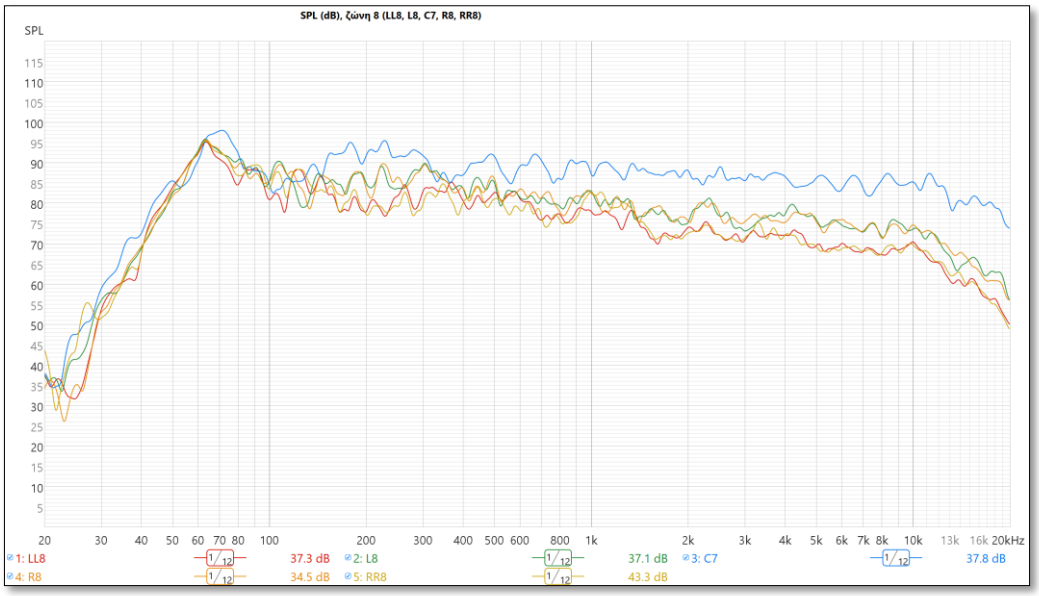
Διάγραμμα 6.2.25 Noise Floor όλων των σημείων & Μέση Τιμή (χωρίς τις 5 ακραίες τιμές)

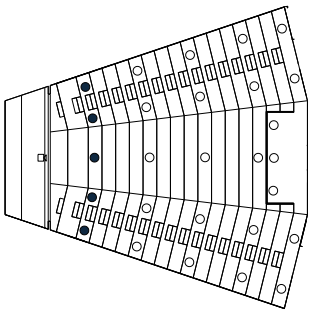
Θα θεωρήσουμε ότι οι 5 μεγαλύτερες τιμές θορύβου προέκυψαν από τυχαία συμβάντα και θα τα αφαιρέσουμε από τον υπολογισμό του μέσου θορύβου, καθώς βλέπουμε πιο πάνω το πόσο μεγάλη επίδραση έχουν στη μέση τιμή του θορύβου. Το διάγραμμα 6.2.25 παρουσιάζει την μέση καμπύλη θορύβου την οποία καταγράφουμε και εισάγουμε στο αντίστοιχο παράθυρο του Ease.



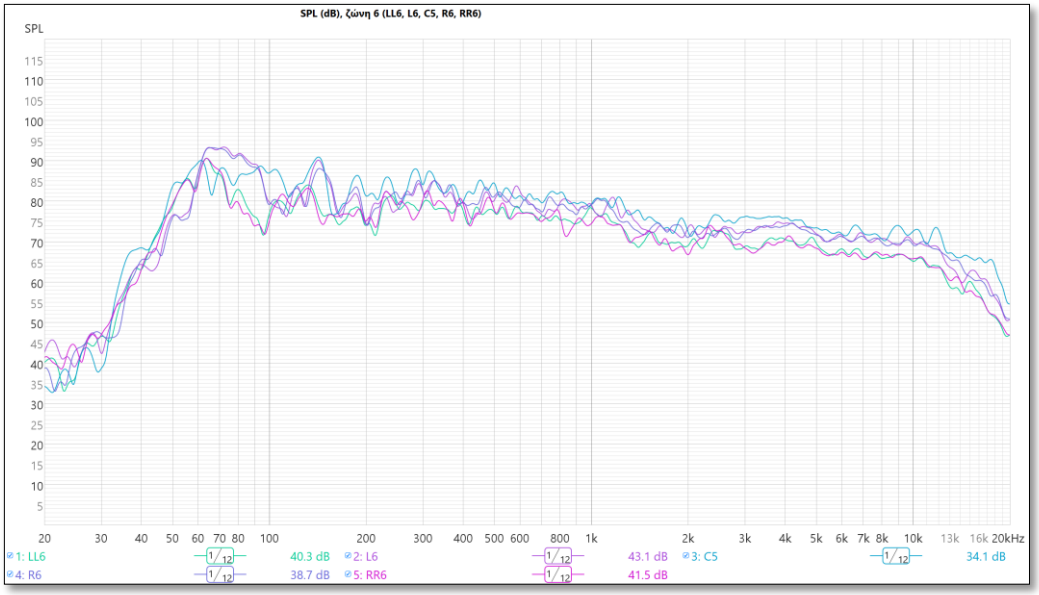
Εικόνα 6.2.26 Εισαγωγή μέσης τιμής του μετρούμενου θορύβου στο Ease

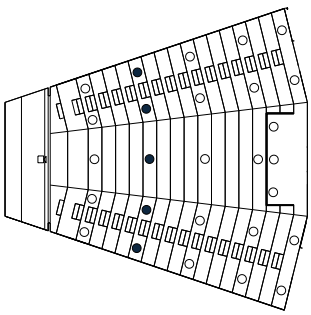
6.2.4 Μέτρηση SPL





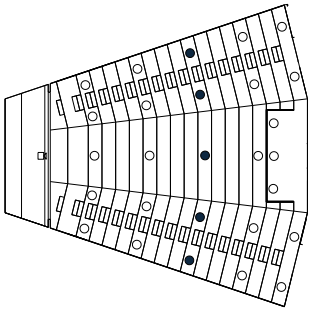
Διάγραμμα 6.2.27 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8 (Ζώνη 8)



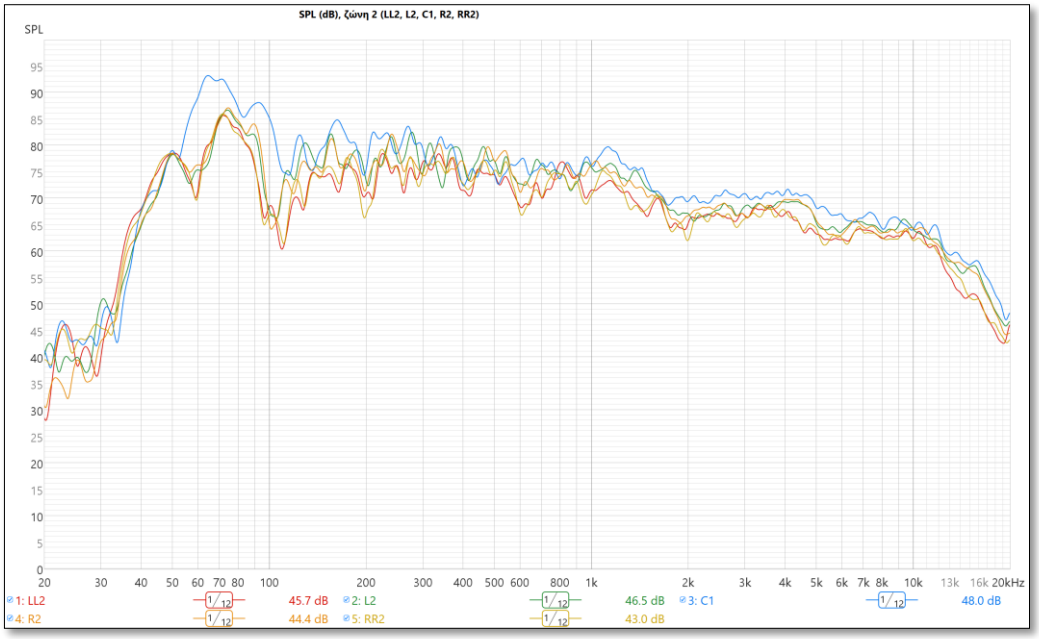


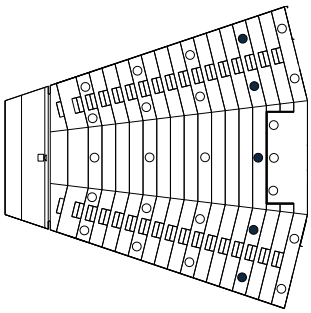
Διάγραμμα 6.2.28 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_6, L_6, C_5, R_6, RR_6 (Ζώνη 6)





Διάγραμμα 6.2.29 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4 (Ζώνη 4)





Διάγραμμα 6.2.30 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2 (Ζώνη 2)

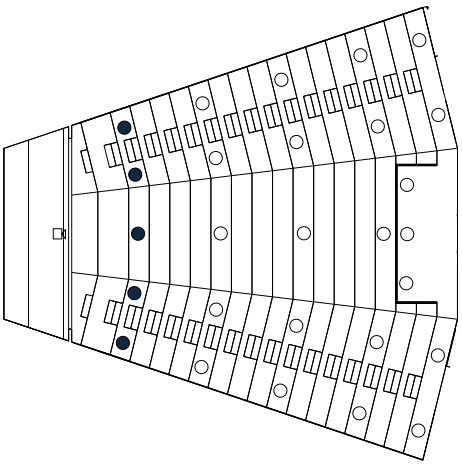


Διάγραμμα 6.2.31 Μέτρηση SPL (dB) για τα σημεία LL_1, L_1, BL, BC, BR, R_1, RR_1 (Ζώνη 1)

6.2.5 Μετρήσεις δεικτών ευκρίνειας C_{50} & C_{80}

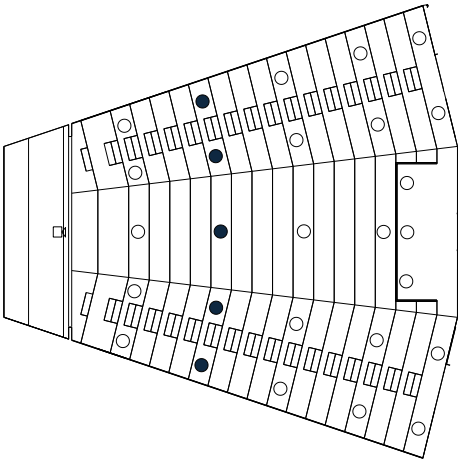
RR_8	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	8.85	5.68	2.77	1.7	5.05	5.77	4.04	2.8	4.83	5.37
	C_{80}(dB)	19.64	13.11	6.73	5.69	8	8.5	6.44	5.7	8.09	9.27
R_8	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	10.3	5.25	-0.72	7.86	6.31	6.72	7.85	7.43	9.7	9.54
	C_{80}(dB)	16.53	13	4.78	11.5	8.62	9.69	11.08	9.88	12.49	13.06
C_7	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	8.92	6.69	9.11	9.99	13.6	13.09	18.17	17.57	21.36	21.74
	C_{80}(dB)	12.38	14.88	12.09	12.46	16.13	16.01	20.45	20.15	24.34	24.49
L_8	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	9.79	5.31	0.34	6.19	6.76	6.79	7.58	8.73	10.15	9.76
	C_{80}(dB)	15.3	12.31	7.25	8.16	8.5	8.34	9.91	11.37	13.05	13.03
LL_8	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	8.15	5.16	3.48	1.32	4.94	1.61	3.32	4.14	4.49	5.7
	C_{80}(dB)	20.18	12.06	9.54	3.58	7.25	3.03	6.53	6.98	7.84	8.62

Πίνακας 6.2.32 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 8



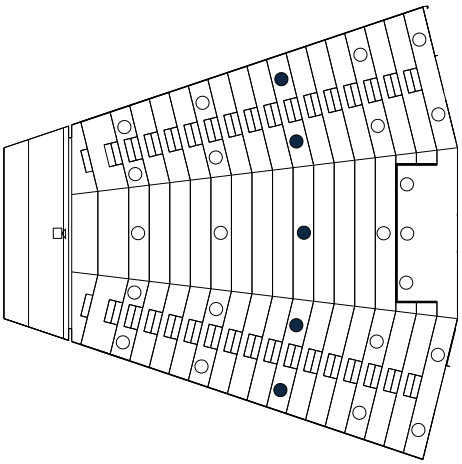
RR_6	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	3.36	2.37	5.54	3.94	8.16	3.14	2.08	4.1	4.5	4.35
	C_{80}(dB)	7.25	6.39	13.31	5.67	10.83	5.32	5.69	7.75	8.89	8.23
R_6	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	4.98	3.45	2.64	4.65	5.92	4.2	3.83	6.54	6.91	7.22
	C_{80}(dB)	5.88	10.6	11.54	7.92	7.1	6.21	5.87	9.92	10.86	11.41
C_5	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	3.54	-0.15	2.17	7.72	6.28	4.92	6.18	7.81	8.97	9.79
	C_{80}(dB)	10.88	1.85	5.54	9.03	7.16	7.04	9.12	10.77	13.69	13.85
L_6	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	7	4.2	0.87	5.62	6.74	3.96	4.01	7.3	6.73	6.57
	C_{80}(dB)	7.98	11.12	9.85	9.36	8.69	7.16	6.48	9.76	10.12	10.53
LL_6	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	3.94	2.83	5.18	3.58	4.44	3.63	3	3.75	5.03	4.56
	C_{80}(dB)	7.84	6.64	14.83	4.99	6.34	5.26	5.1	7.38	8.59	7.56

Πίνακας 6.2.33 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 6



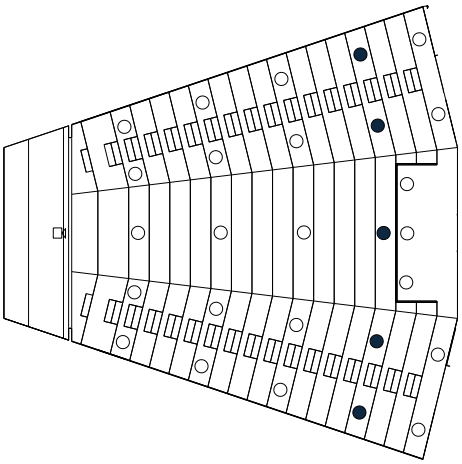
RR_4	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	0.28	3.13	0.35	5.58	5.58	6.99	2.38	3.22	5.27	2.57
	C_{80}(dB)	2.21	7.28	3.6	8.07	8.57	12.61	8.47	8.38	9.54	9.77
R_4	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	-2.35	-0.3	-0.06	6.62	2.44	3.74	2.78	5.51	3.4	3.95
	C_{80}(dB)	-1.57	4.89	3.48	8.33	11.17	8.8	7.21	10.96	10.59	11.33
C_3	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	6.46	2.29	0.34	0.39	3.66	5.81	3.7	4.99	7.38	7.6
	C_{80}(dB)	11.71	9.27	3.63	5.96	10.25	10.29	7.46	8.88	11.25	12.09
L_4	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	-4.37	-0.15	-0.15	4.47	1.81	3.43	2.02	4.86	4.22	5.83
	C_{80}(dB)	-2.66	5.21	3.86	5.96	10.68	8.97	6.45	9.09	9.88	10.97
LL_4	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	2.1	3.32	1.71	2.4	6.02	4.64	3.78	4.47	4.83	3.43
	C_{80}(dB)	4.09	7.31	5.15	6.62	9.81	9.51	8.17	8.63	10.14	9.64

Πίνακας 6.2.34 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 4



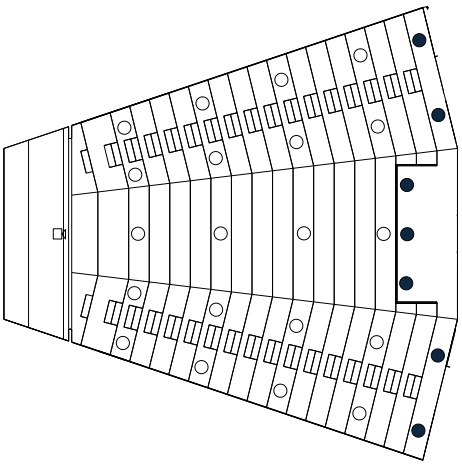
RR_2	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	0.55	1.23	-1	5.51	6.42	4.71	1.38	5.76	5.78	6.04
	C_{80}(dB)	9.31	9.41	-0.42	8.3	9.02	8.46	5.29	9.41	9.98	9.85
R_2	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	0.19	-1.37	-2.58	5.98	8.13	6.34	2.66	7.16	6.07	6.04
	C_{80}(dB)	7.74	10.1	5.95	8.8	10.73	8.76	5.98	9.65	9.57	9.93
C_1	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	6.17	2.74	-5.77	-1.61	2.38	6.37	3.58	6.33	7.13	7.64
	C_{80}(dB)	9.92	12.56	-1.09	8.12	8.36	9.34	7.15	9.39	9.99	10.72
L_2	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	0	-1.62	-4.47	4.56	8.04	6.03	2.6	6.94	5.91	6.85
	C_{80}(dB)	6.43	8.26	1.14	7.31	10.23	9.25	6.21	9.93	9.71	10.54
LL_2	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	0.73	1.85	1.02	3.24	5.4	5.16	2.9	6.13	5.8	6.28
	C_{80}(dB)	9.21	9.19	2.39	6.71	8.73	7	5.67	8.8	9.79	10.3

Πίνακας 6.2.35 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 2



RR_1	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	4.77	2.73	-6.02	11.64	7.31	5.31	4.29	6.2	5.67	6.12
	C_{80}(dB)	14.01	4.97	0.34	13.96	9.03	9.44	7.3	9.52	10.34	11.09
R_1	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	1.67	-8.2	-0.49	14.73	6.89	5.37	5.27	6.25	6.8	7.81
	C_{80}(dB)	13.22	1.85	1.12	16.55	10.51	9.39	7.57	10.18	10.09	11.38
BR	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	4.05	3.41	4.43	7.52	5.85	4.3	4.03	3.97	5.03	6.53
	C_{80}(dB)	11.96	13.98	6.38	10.9	7.74	5.78	7.11	7.17	8.55	9.81
BC	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	6.12	-1.19	-6.31	-0.49	2.44	5.18	3.82	4.73	5.74	5.92
	C_{80}(dB)	12.24	6.23	0	6.37	5.1	6.77	6.27	7.02	8.74	9.73
BL	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	3.65	4.22	2.05	8.15	7.78	3.44	3.44	3.61	5.09	6.21
	C_{80}(dB)	10.44	12.91	3.57	12.35	9.6	6.25	6.96	7.15	8.74	10.39
L_1	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	2.36	-8.11	-1.92	11.23	5.7	5.39	6.04	6.51	6.2	7.73
	C_{80}(dB)	14.32	1.17	1.03	13.7	8	8.75	8.91	9.3	9.34	10.77
LL_1	**Hz**	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	C_{50}(dB)	5.2	3.49	-5.34	11.33	7.74	8.75	5	7.45	7.16	7.51
	C_{80}(dB)	12.97	6.56	-2.48	13.93	11.59	11.44	8.54	10.37	10.61	11.73

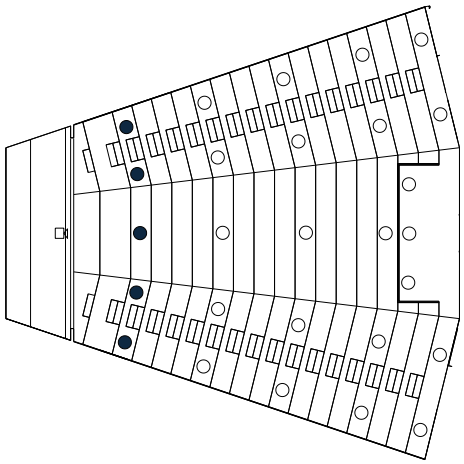
Πίνακας 6.2.36 Δείκτες Ευκρίνειας C_{50} & C_{80} (dB) για τα σημεία της ζώνης 1



6.2.6 Μετρήσεις χρόνου αντήχησης T_{20}, T_{30}, EDT

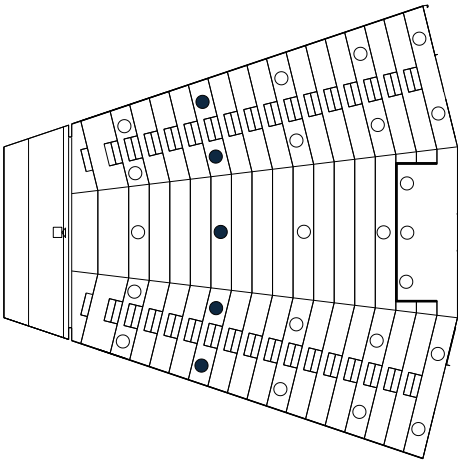
	Hz	50	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
	EDT(sec)	0.757	0.791	0.746	0.98	0.747	0.708	0.82	0.769	0.61	0.535
RR8	T_{20}(sec)	0.411	0.771	0.597	0.647	0.668	0.631	0.632	0.593	0.553	0.5
	T_{30}(sec)	0.751	0.576	0.6	0.639	0.66	0.654	0.672	0.618	0.55	0.518
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.698	0.762	0.847	0.503	0.616	0.5	0.545	0.58	0.464	0.434
R_8	T_{20}(sec)	0.646	0.957	0.623	0.663	0.555	0.719	0.612	0.621	0.557	0.499
	T_{30}(sec)	0.599	0.693	0.694	0.665	0.6	0.658	0.673	0.624	0.555	0.493
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.707	0.705	0.429	0.35	0.078	0.076	0.058	0.011	0.005	0.006
C_7	T_{20}(sec)	0.715	0.83	1.065	0.654	0.714	0.644	0.597	0.655	0.476	0.432
	T_{30}(sec)	0.775	0.696	0.87	0.612	0.676	0.673	0.668	0.66	0.544	0.514
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.702	0.757	0.678	0.846	0.605	0.709	0.613	0.438	0.436	0.433
L_8	T_{20}(sec)	0.775	0.903	0.852	0.69	0.628	0.681	0.721	0.625	0.566	0.561
	T_{30}(sec)	0.586	0.673	0.847	0.642	0.592	0.67	0.683	0.602	0.558	0.506
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.788	0.76	0.621	0.989	1.002	1.049	0.748	0.697	0.616	0.599
LL_8	T_{20}(sec)	0.353	0.728	0.81	0.54	0.594	0.587	0.636	0.641	0.558	0.495
	T_{30}(sec)	0.355	0.555	0.841	0.608	0.629	0.641	0.677	0.639	0.563	0.499

Πίνακας 6.2.37 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 8



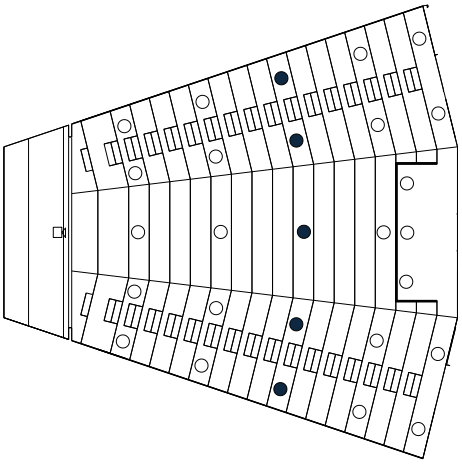
	Hz	50	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
	EDT(sec)	0.952	0.81	0.521	0.697	0.419	0.759	0.902	0.775	0.659	0.715
RR_6	T_{20}(sec)	0.521	0.606	0.52	0.633	0.752	0.635	0.652	0.651	0.557	0.511
	T_{30}(sec)	0.614	0.603	0.715	0.649	0.735	0.649	0.653	0.637	0.566	0.519
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.79	0.844	0.647	0.933	0.743	0.764	0.893	0.736	0.841	0.834
R_6	T_{20}(sec)	1.067	0.88	0.806	0.641	0.651	0.625	0.671	0.621	0.566	0.535
	T_{30}(sec)	0.776	0.857	0.79	0.665	0.616	0.621	0.669	0.639	0.577	0.533
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.916	1.202	0.766	0.513	0.835	0.811	0.621	0.904	0.857	0.724
C_5	T_{20}(sec)	0.741	0.76	0.748	0.904	0.571	0.643	0.721	0.688	0.587	0.553
	T_{30}(sec)	0.591	0.625	0.771	0.784	0.557	0.639	0.706	0.636	0.575	0.532
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.68	0.788	0.77	0.53	0.66	0.737	0.891	0.853	0.902	1.046
L_6	T_{20}(sec)	0.877	0.554	0.781	0.792	0.617	0.587	0.66	0.677	0.562	0.533
	T_{30}(sec)	0.858	0.806	0.811	0.754	0.667	0.649	0.657	0.641	0.554	0.517
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.923	0.827	0.547	0.864	1.024	0.811	0.897	0.756	0.67	0.746
LL_6	T_{20}(sec)	0.571	0.553	0.796	0.582	0.619	0.635	0.672	0.632	0.572	0.533
	T_{30}(sec)	0.578	0.583	0.845	0.645	0.64	0.651	0.697	0.632	0.573	0.521

Πίνακας 6.2.38 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 6



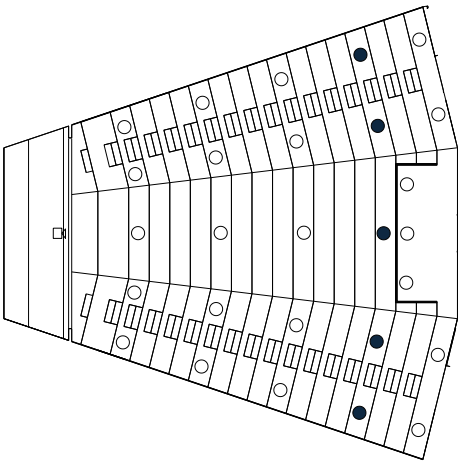
	Hz	50	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
	EDT(sec)	1.345	0.864	0.983	0.645	0.578	0.455	0.551	0.65	0.594	0.577
RR_4	T_{20}(sec)	0.704	0.898	0.773	0.694	0.66	0.591	0.742	0.661	0.579	0.515
	T_{30}(sec)	0.73	0.78	0.664	0.663	0.629	0.613	0.698	0.653	0.572	0.535
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.317	1.045	0.946	0.641	0.538	0.575	0.65	0.704	0.587	0.633
R_4	T_{20}(sec)	0.903	0.682	0.822	0.677	0.749	0.607	0.717	0.673	0.576	0.533
	T_{30}(sec)	1.092	0.666	0.716	0.702	0.745	0.634	0.704	0.65	0.574	0.525
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.745	0.846	0.906	0.807	0.565	0.558	0.638	0.661	0.737	0.625
C_3	T_{20}(sec)	0.794	0.642	0.747	0.739	0.681	0.595	0.657	0.617	0.605	0.528
	T_{30}(sec)	0.768	0.698	0.746	0.776	0.68	0.639	0.639	0.628	0.576	0.546
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.572	1.009	0.894	0.881	0.52	0.637	0.718	0.716	0.608	0.682
L_4	T_{20}(sec)	0.891	0.569	0.891	0.715	0.714	0.634	0.671	0.625	0.548	0.569
	T_{30}(sec)	0.805	0.603	0.825	0.772	0.681	0.634	0.723	0.635	0.565	0.539
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.171	0.828	0.812	0.752	0.441	0.504	0.604	0.624	0.628	0.6
LL_4	T_{20}(sec)	0.599	0.708	0.835	0.537	0.688	0.642	0.741	0.646	0.551	0.51
	T_{30}(sec)	0.654	0.648	0.828	0.632	0.637	0.646	0.68	0.646	0.554	0.519

Πίνακας 6.2.39 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 4



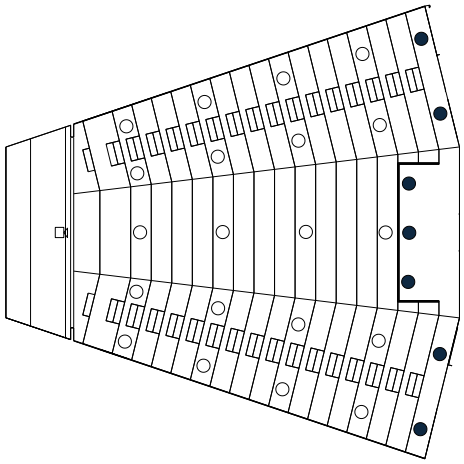
	Hz	50	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
	EDT(sec)	1.089	0.919	1.413	0.576	0.512	0.701	0.799	0.573	0.538	0.487
RR_2	T_{20}(sec)	0.439	0.641	0.574	0.604	0.7	0.701	0.679	0.669	0.593	0.559
	T_{30}(sec)	0.549	0.675	0.581	0.666	0.642	0.665	0.7	0.652	0.593	0.55
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.015	1.047	0.723	0.55	0.324	0.561	0.696	0.563	0.565	0.505
R_2	T_{20}(sec)	0.597	0.566	0.955	0.734	0.654	0.78	0.733	0.692	0.61	0.544
	T_{30}(sec)	0.602	0.715	0.987	0.779	0.631	0.664	0.729	0.668	0.602	0.542
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.71	0.929	1.37	0.553	0.589	0.578	0.634	0.627	0.594	0.517
C_1	T_{20}(sec)	0.843	0.606	0.831	0.731	0.674	0.666	0.664	0.671	0.602	0.585
	T_{30}(sec)	0.742	0.561	0.724	0.683	0.673	0.653	0.7	0.665	0.585	0.566
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.045	0.985	1.068	0.654	0.35	0.523	0.758	0.55	0.544	0.521
L_2	T_{20}(sec)	0.728	0.735	0.795	0.617	0.716	0.705	0.721	0.711	0.595	0.579
	T_{30}(sec)	0.747	0.674	0.922	0.627	0.68	0.67	0.701	0.674	0.583	0.557
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	1.07	0.834	1.155	0.621	0.549	0.751	0.69	0.634	0.559	0.48
LL_2	T_{20}(sec)	0.324	0.613	0.639	0.755	0.704	0.706	0.713	0.646	0.586	0.538
	T_{30}(sec)	0.558	0.579	0.702	0.67	0.648	0.684	0.69	0.64	0.595	0.531

Πίνακας 6.2.40 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 2



	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.976	0.977	0.986	0.203	0.564	0.534	0.682	0.661	0.572	0.515
RR_1	T_{20}(sec)	0.802	0.894	0.572	0.701	0.769	0.581	0.713	0.655	0.575	0.543
	T_{30}(sec)	0.649	0.756	0.762	0.691	0.74	0.639	0.704	0.642	0.582	0.549
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.996	1.338	1.12	0.252	0.452	0.605	0.661	0.517	0.5	0.432
R_1	T_{20}(sec)	0.498	0.445	0.683	0.706	0.698	0.75	0.74	0.67	0.621	0.567
	T_{30}(sec)	0.742	0.781	0.622	0.711	0.782	0.696	0.71	0.662	0.618	0.563
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.879	0.871	0.686	0.414	0.601	1.061	0.703	0.805	0.586	0.545
BR	T_{20}(sec)	0.686	0.386	0.606	0.716	0.735	0.678	0.741	0.702	0.618	0.586
	T_{30}(sec)	0.973	0.596	0.845	0.74	0.721	0.678	0.795	0.735	0.624	0.569
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.713	0.967	1.182	0.661	0.813	0.656	0.697	0.738	0.577	0.542
BC	T_{20}(sec)	0.865	0.397	0.684	0.641	0.676	0.671	0.826	0.751	0.636	0.569
	T_{30}(sec)	0.819	0.686	0.793	0.682	0.712	0.7	0.842	0.77	0.617	0.568
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.886	0.827	0.883	0.377	0.452	0.74	0.653	0.75	0.546	0.474
BL	T_{20}(sec)	0.597	0.477	0.527	0.835	0.827	0.681	0.784	0.717	0.626	0.566
	T_{30}(sec)	0.728	0.77	0.712	0.802	0.792	0.692	0.898	0.728	0.62	0.564
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.957	1.305	1.005	0.207	0.644	0.594	0.604	0.575	0.614	0.507
L_1	T_{20}(sec)	0.187	0.255	0.65	0.771	0.713	0.673	0.721	0.64	0.597	0.582
	T_{30}(sec)	0.67	0.718	0.829	0.617	0.685	0.655	0.696	0.654	0.59	0.554
	Hz	**50**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**10000**
	EDT(sec)	0.935	0.876	1.064	0.174	0.46	0.357	0.588	0.57	0.526	0.456
LL_1	T_{20}(sec)	0.761	0.831	0.745	0.765	0.65	0.665	0.781	0.682	0.605	0.552
	T_{30}(sec)	0.872	0.783	0.757	0.682	0.689	0.638	0.755	0.688	0.593	0.551

Πίνακας 6.2.41 Χρόνοι Αντήχησης T_{20}, T_{30} & EDT για τα σημεία της ζώνης 1



6.3 Μετρήσεις με το ηχόμετρο NTi Audio XL2

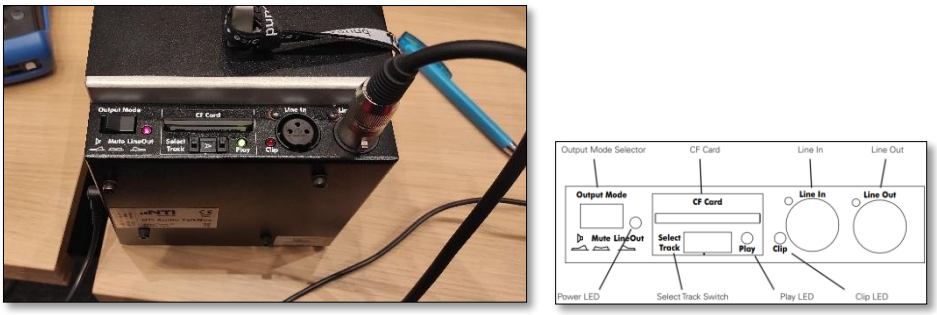
Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στο δείκτη STIPA καθώς διαθέτουμε τον κατάλληλο εξοπλισμό για λεπτομερέστερες μετρήσεις που θα μας δώσουν αξιόπιστη πληροφορία αναφορικά με το γενικό επίπεδο καταληπτότητας της αίθουσας.

6.3.1 Μέτρηση STI με χρήση της πηγής monitor

Αποσυνδέουμε και απομακρύνουμε την κάρτα ήχου, χωρίς να αλλάξουμε τίποτα στη ρύθμιση του ηχείου monitor που χρησιμοποιούμε ή στη θέση του. Στη θέση της κάρτας ήχου θα χρησιμοποιήσουμε μια πρότυπη πηγή για μέτρηση καταληπτότητας ομιλίας (STI). Ως πρότυπη πηγή θα χρησιμοποιήσουμε το ηχείο TalkBox της NTi Audio, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το στάδιο ως γεννήτρια ήχου.



Εικόνα 6.3.1 Το ηχείο TalkBox της Nti Audio



Εικόνα 6.3.2 Χρήση TalkBox ως γεννήτρια σήματος ήχου

Στο παραπάνω setup το TalkBox δεν λειτουργεί ως ηχείο αλλά ως γεννήτρια ήχου η οποία δίνει ένα σήμα line στην XLR έξοδό του (βλ. ρύθμιση Output Mode Selector). Το ηχείο διαθέτει μια Compact Flash κάρτα (CF card) η οποία περιέχει διάφορα πρότυπα σήματα ήχου. Με δύο κουμπιά (switch) μπορούμε να περιηγηθούμε στις διάφορες διαθέσιμες επιλογές σημάτων ήχου και η επιλογή δείχνεται σε μια αναλογικού τύπου ένδειξη («Α» στην εικόνα). Τα σύμβολα και τα αντίστοιχα σήματα ήχου παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

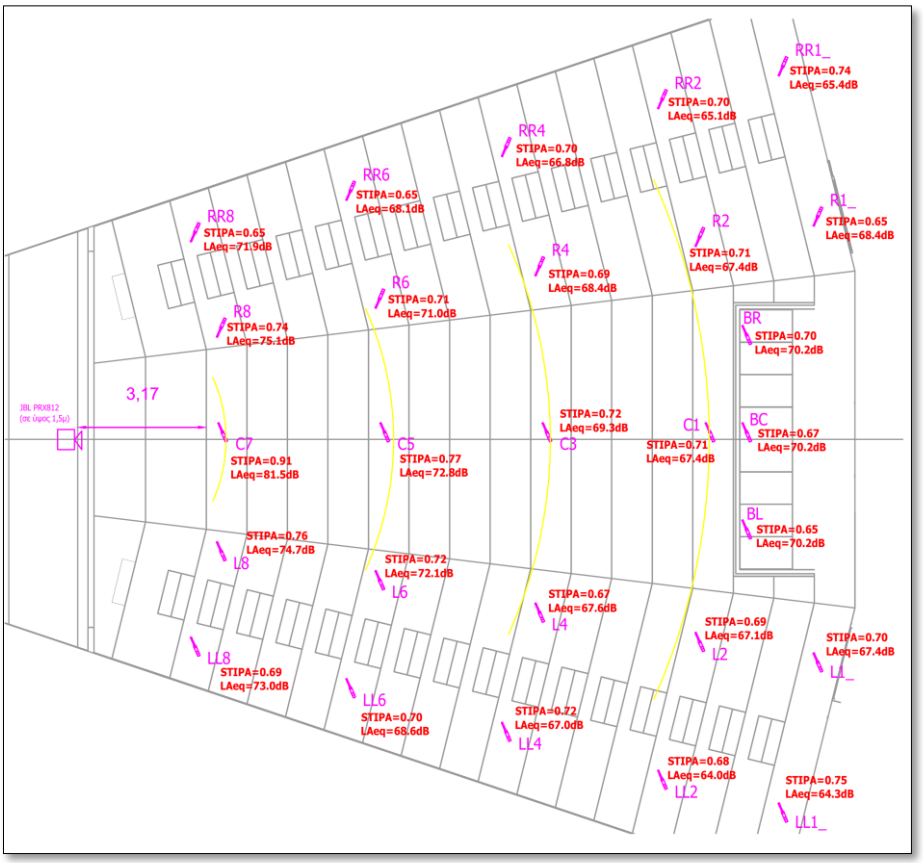
1	STIPA (Standard, edition 5)	60 dBA @ 1 m
2	Pink Noise	60 dBA @ 1 m
3	White Noise	60 dBA @ 1 m
4	Sine 1 kHz	60 dBA @ 1 m
5	Male Speaker (German)	60 dBA @ 1 m
6	Male Speaker (English)	60 dBA @ 1 m
7	Delay Test Chirp	
8	Fast Pink Noise 1 sec	60 dBA @ 1 m
9	Fast Pink Noise 4 sec	60 dBA @ 1 m
A	STIPA (Lombard, edition 5)	70 dBA @ 1 m
B	Pink Noise	70 dBA @ 1 m
C	White Noise	70 dBA @ 1 m
D	Sine 1 kHz	70 dBA @ 1 m
E	Male Speaker (German)	70 dBA @ 1 m
F	Male Speaker (English)	70 dBA @ 1 m

Πίνακας 6.3.3 Δοκιμαστικά Σήματα (Test Signals) του TalkBox (NTi Audio)

Το σήμα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το «1» (STIPA, Standard, edition 5), ωστόσο δεν παίζει ρόλο η επιλογή ανάμεσα στο σήμα αυτό και στο σήμα «A» (STIPA, Standard, edition 5) καθώς ο έλεγχος της στάθμης γίνεται από το ηχείο monitor. Στην επόμενη παράγραφο (6.3.2), στη φάση δηλαδή κατά την οποία το TalkBox θα χρησιμοποιηθεί όχι ως γεννήτρια line σήματος αλλά ως ηχείο, θα εξηγηθεί η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών modes λειτουργίας.

Από το line out του TalkBox / γεννήτριας στέλνουμε το δοκιμαστικό σήμα στο monitor, το οποίο αναπαράγει τον ήχο χωρίς καμία αλλαγή στο level που έχουμε ρυθμίσει στο πίσω μέρος του ηχείου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με το ηχόμετρο XL2 της NTi Audio.

Το ηχόμετρο πραγματοποιεί μέτρηση διάρκειας 15 δευτερολέπτων, μετά την οποία ειδοποιεί το χρήστη ότι ολοκληρώθηκε η διαδικασία, καταγράφοντας παράλληλα το $L_{A,eq}$, δηλαδή τη χρονικά σταθμισμένη στάθμη του κύκλου αυτού των 15 δευτερολέπτων. Οι μετρήσεις είναι οι παρακάτω. Σε κάθε σημείο σημειώνουμε επίσης την ένδειξη του $L_{A,eq}$.



Εικόνα 6.3.4 Μετρήσεις καταληπτότητας (STI) και στάθμης / ηχείο monitor

6.3.2 Μέτρηση STI με χρήση ειδικού μετρητικού ηχείου

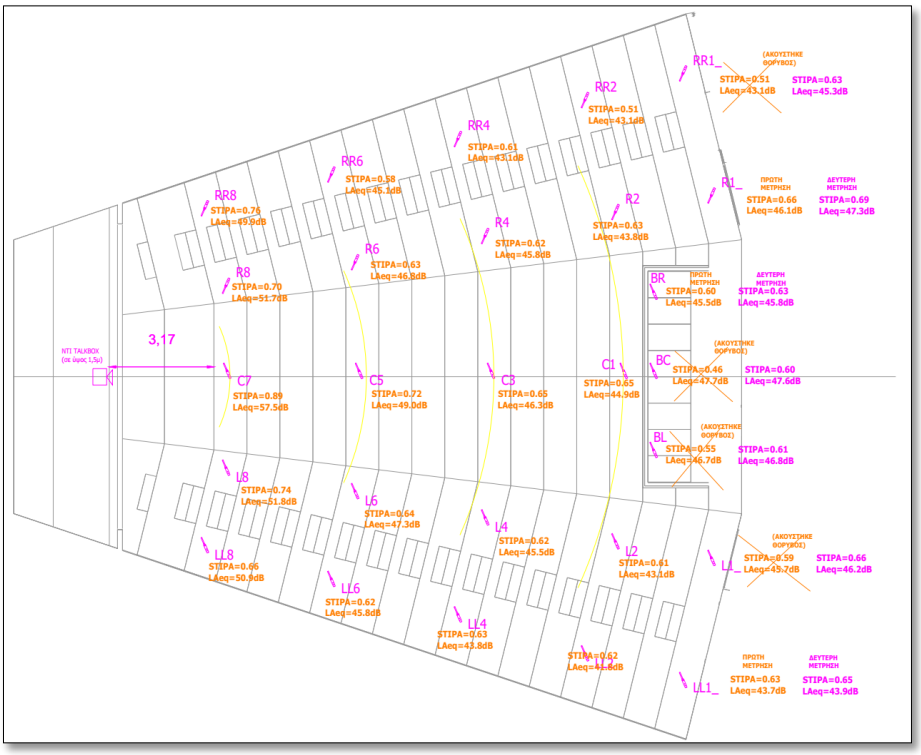
Μια εύλογη παρατήρηση των προηγούμενων μετρήσεων STI είναι η εξής: Παράμετροι όπως ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζουν μια ανεξαρτησία από τη στάθμη του ήχου διέγερσης (με άλλα λόγια, μπορούμε να υποθέσουμε σε γενικές γραμμές ότι ανεξαρτήτως του σήματος διέγερσης που χρησιμοποιούμε – θέση πηγής, στάθμη πηγής, τύπος σήματος διέγερσης κτλ - ο μετρούμενος χρόνος αντήχησης είναι σχετικά παρόμοιος). Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για μεγέθη που σχετίζονται με την καταληπτότητα και την ευκρίνεια, όπως το C_{50}, το C_{80} ή το STI διότι αυτά εξαρτώνται από το θόρυβο υποβάθρου και ειδικότερα από το λόγο σήματος προς θόρυβο. Οι ίδιες διεγέρσεις στο χώρο παρουσιάζουν δραστικά χαμηλότερες τιμές C_{50}, C_{80} και STI όταν αυξάνεται σημαντικά ο θόρυβος περιβάλλοντος ή όταν η στάθμη του σήματος ελέγχου μειώνεται.

Τίθεται λοιπόν το ερώτημα: Τι είναι αυτό που προσομοιώνει το monitor που χρησιμοποιούμε για την αναπαραγωγή σήματος ελέγχου στη σκηνή του αμφιθεάτρου; Όσον αφορά μεγέθη που αφορούν το χρόνο αντήχησης (T_{20}, T_{30} ή RT) το ηχείο έχει το ρόλο ενός διεγέρτη του χώρου

σε στάθμη κατάλληλη για να λάβουμε έγκυρες μετρήσεις του χρόνου αντήχησης. Όσον αφορά όμως στο STI το ηχείο αυτό δεν προσομοιώνει ούτε ένα ηλεκτρακουστικό σύστημα αναπαραγωγής ομιλίας (διότι υπό κανονικές συνθήκες δεν λειτουργεί ένα τέτοιο ηχείο στη σκηνή κατά τη διάρκεια μιας ομιλίας) αλλά ούτε και μια πραγματική ομιλία καθώς το ηχείο είναι κατευθυντικό με τρόπο πολύ διαφορετικό από αυτό μιας ανθρώπινης ομιλίας, ενώ και η στάθμη του είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή της μέσης ανθρώπινης ομιλίας. Για να ελέγξουμε την καταληπτότητα ομιλίας στη θέση της σκηνής χρειαζόμαστε ένα πρότυπο σήμα ομιλίας τόσο σε συχνοτικό περιεχόμενο όσο και σε στάθμη. Ένα τέτοιο σήμα ομιλίας μας εξασφαλίζει το ηχείο TalkBox το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε όχι ως γεννήτρια line σήματος αλλά ως ένα πρότυπο ηχείο αναπαραγωγής συχνοτικού περιεχομένου που προσιδιάζει σε ανθρώπινη ομιλία.

Το πρότυπο σήμα που θα χρησιμοποιήσουμε για τη μέτρηση του STIPA είναι το αποθηκευμένο σήμα «A»: STIPA, Standard, edition 5 (70dBA/1m) (βλ. πίνακα 6.3.3). Όταν το σήμα αυτό αναπαράγεται απευθείας από το TalkBox, προσομοιώνεται το συχνοτικό περιεχόμενο της ανθρώπινης ομιλίας σε μια στάθμη (70dBA/1m) που αντιστοιχεί σε ομιλητή ο οποίος μιλά δυνατά, κάτι που αποτελεί το προβλεπομενο πραγματικό σενάριο σε έναν τέτοιο αμφιθεατρικό χώρο και για μια τέτοια κλίμακα έκτασης ακροατηρίου.

Στα πίσω σημεία πραγματοποιείται διπλή μέτρηση λόγω ανεπιθύμητων θορύβων που προέκυψαν ξαφνικά κατά τα 15 δευτερόλεπτα της μέτρησης.



Εικόνα 6.3.5 Μετρήσεις καταληπτότητας (STI) και στάθμες / μετρητικό ηχείο TalbBox (NTi Audio)

6.3.3 Μέτρησεις μέσω του ηλεκτρακουστικού συστήματος της αίθουσας

Περνάμε τώρα στη μέτρηση της καταληπτότητας με χρήση του ηλεκτρακουστικού συστήματος του χώρου. Το σενάριο που θα ελέγξουμε είναι αυτό της λειτουργίας των πλευρικών ηχοστηλών, καθώς πρόκειται για ένα σενάριο αρκετά πιθανό να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εκδηλώσεων που θα πραγματοποιηθούν.

Θα πραγματοποιήσουμε τώρα τις αντίστοιχες μετρήσεις για την αντήχηση του χώρου χρησιμοποιώντας το ηλεκτρακουστικό σύστημα της αίθουσας. Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η μέτρηση του χρόνου αντήχησης τυπικά προϋποθέτει τη διέγερση από ένα σημείο και από μια πηγή. Ιδανικά αυτή η πηγή θα πρέπει να είναι παντοκατευθυντική, ωστόσο είναι συχνή η πρακτική χρησιμοποίησης κατευθυντικής πηγής με δεδομένα χαρακτηριστικά στάθμης και συχνοτικής απόκρισης, κάτι που σαφώς δεν συμφωνεί αυστηρά με τις προϋποθέσεις της νόρμας ISO 3382, αποτελεί ωστόσο μια ελεγχόμενη απόκλιση από αυτές.

Η ταυτόχρονη χρήση ωστόσο του συστήματος πλευρικών ηχοστηλών αποκλίνει ουσιωδώς από τη νόρμα ISO 3382 και μπορεί να μας δώσει μόνο μια μέτρηση της αντήχησης όπως αυτή παράγεται από το συγκεκριμένο σύστημα ηχείων. Μια τέτοια μέτρηση λοιπόν έχει ουσιαστικό

περιεχόμενο (καθώς αφορά την αντήχηση επί πραγματικών συνθηκών αναπαραγωγής ήχου) αλλά όχι χαρακτηριστικά που μπορούν να την καταστήσουν συγκρίσιμη με το τυπικό RT60 της αίθουσας.

Οι πλευρικές ηχοστήλες, όπως έχει ήδη σημειωθεί, έχουν ρυθμιστεί με βάση συγκεκριμένες τιμές delay, συνεπώς σε κάθε θέση καταφτάνει εκπεμπόμενος ήχος ασύγχρονα από τις 8 ηχοστήλες όχι μόνο λόγω των διαφορετικών αποστάσεων του κάθε σημείου ακρόασης από την καθεμία ηχοστήλη αλλά και λόγω της χρονικής διαφοράς του σήματος μεταξύ των ηχοστηλών.

Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιούμε το module «7» (*Delay Test Chirp*) της γεννήτριας του ηχείου TalkBox (βλ. πίνακα 6.3.3).



Εικόνα 6.3.6 Το Talkbox συνδέεται με το κεντρικό σύστημα ήχου του αμφιθεάτρου

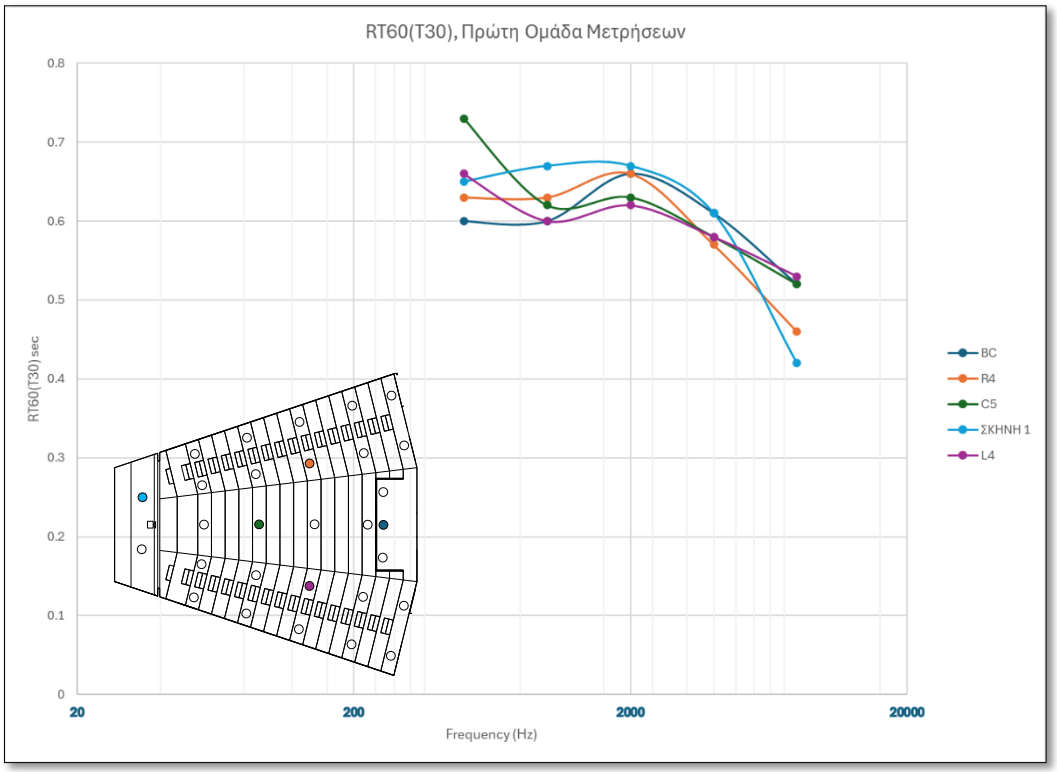
Το σημαντικό που παρατηρούμε έπειτα από κάποιες δοκιμές είναι ότι το ηχόμετρο δεν μας δίνει τιμές χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες (63Hz, 125Hz, 250Hz).



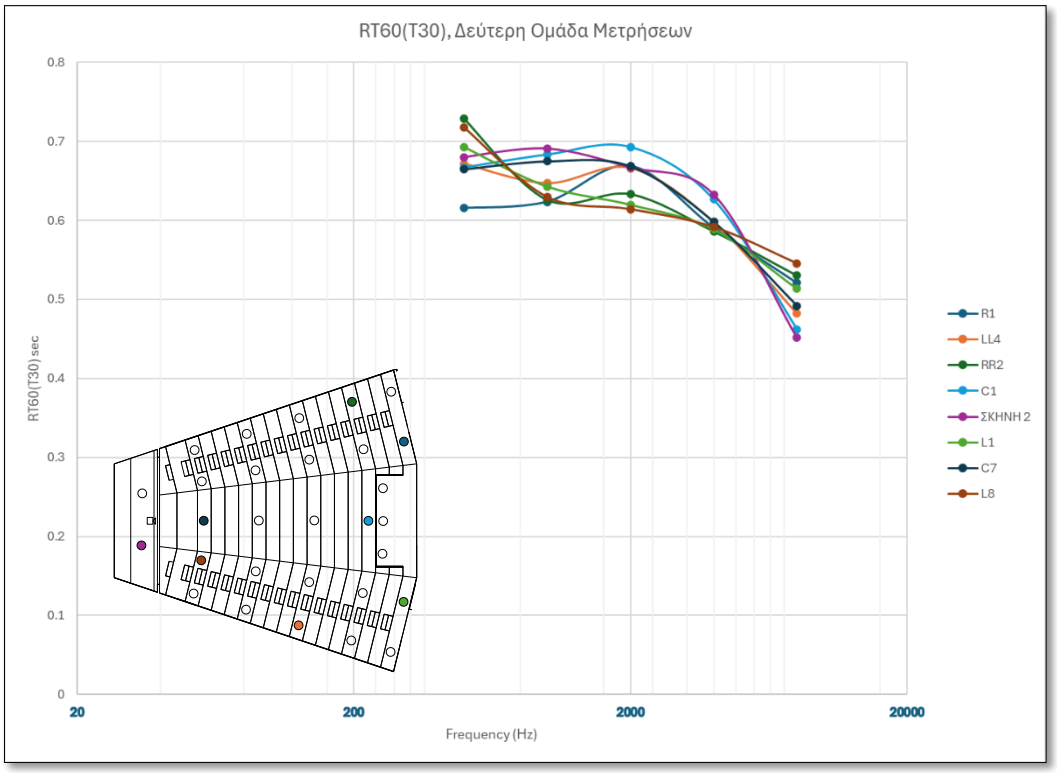
Εικόνα 6.3.7 Το ηχόμετρο δεν λαμβάνει οριστικές μετρήσεις στη συχνοτική περιοχή 63Hz-250Hz

Ο λόγος που το ηχόμετρο δεν ολοκληρώνει τη μέτρηση στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων οφείλεται στο αυστηρό πλαίσιο εκτέλεσης της μέτρησης του ηχομέτρου, τις συχνότητες σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382. Όπως διαβάζουμε από το manual του ηχομέτρου, η μέτρηση του T30 (από το διπλασιασμό τους οποίου προκύπτει η μέτρηση του $RT60_{(T30)}$ προϋποθέτει μια διαφορά τουλάχιστον 45dB μεταξύ της μέτρησης και του θορύβου υποβάθρου. Όπως είδαμε ήδη από μετρήσεις του θορύβου υποβάθρου του χώρου (βλ. διάγραμμα 6.2.25) ο θόρυβος εμφανίζεται αυξημένος στην περιοχή <200Hz. Επιπλέον, στην παράγραφο 4.2.3 είδαμε ότι εφαρμόζεται high pass φίλτρο που επηρεάζει το σήμα στην περιοχή 150Hz και κάτω. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με το ότι η στάθμη δεν ανέβηκε πάνω από ένα δεδομένο σημείο για να αποφευχθούν φαινόμενα clipping, δεν επιτρέπουν στο ηχόμετρο να λάβει μια έγκυρη μέτρηση στις συχνότητες 63Hz, 125Hz και 250Hz.

Οι μετρήσεις χρόνου αντήχησης σε αυτή την περίπτωση γίνονται σε λιγότερα σημεία και αποτυπώνονται στο πιο κάτω διάγραμμα. Αντίστοιχα εκτελούμε μετρήσεις καταληπτότητας, επίσης με το ηχόμετρο XL2 της NTi Audio.



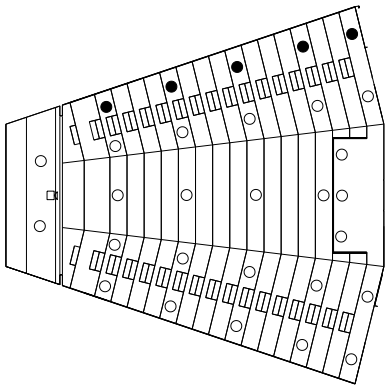
Διάγραμμα 6.3.8 Μέτρηση $RT_{60(T30)}$ με ηχόμετρο XL2 (NTi Audio), πρώτη ομάδα μετρήσεων



Διάγραμμα 6.3.9 Μέτρηση $RT_{60(T30)}$ με ηχόμετρο XL2 (NTi Audio), δεύτερη ομάδα μετρήσεων

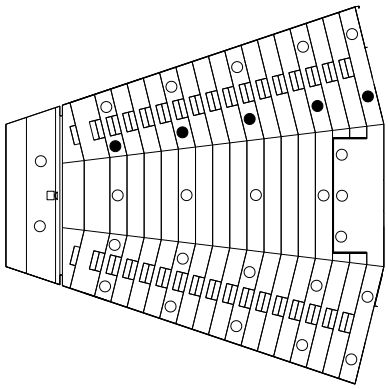
Πίνακας 6.3.10 Μετρήσεις STI / ζώνη RR

	RR_8	RR_6	RR_4	RR_2	RR_1
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	0.65	0.65	0.7	0.7	0.74
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	71.9	68.1	66.8	65.1	65.4
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	0.76	0.58	0.61	0.51	0.63
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	49.9	45.1	43.1	43.1	45.3
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	0.723	0.734	0.72	0.737	0.757
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)		0.63		0.67	



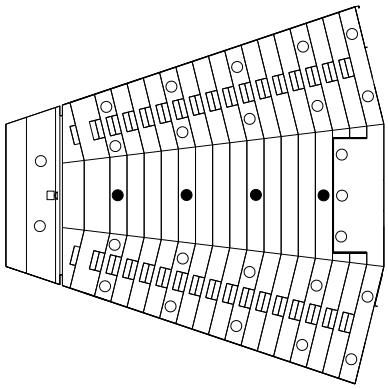
Πίνακας 6.3.11 Μετρήσεις STI / ζώνη R

	R_8	R_6	R_4	R_2	R_1
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	0.74	0.71	0.69	0.71	0.65
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	75.1	71	68.4	67.4	68.4
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	0.7	0.63	0.62	0.63	0.69
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	51.7	46.8	45.8	43.8	47.3
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	0.771	0.738	0.74	0.715	0.716
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)	0.69			0.71	



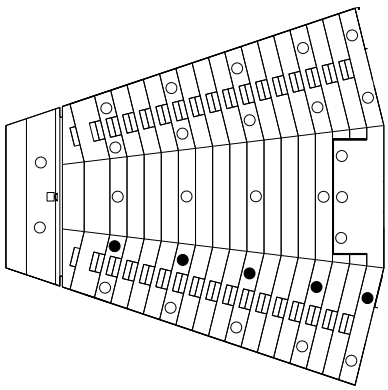
Πίνακας 6.3.12 Μετρήσεις STI / ζώνη C

	C_7	C_5	C_3	C_1	
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	0.91	0.77	0.72	0.71	
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	81.5	72.8	69.3	67.4	
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	0.89	0.72	0.65	0.65	
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	57.5	49	46.3	44.9	
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	0.883	0.742	0.714	747	
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)	0.64		0.71	0.70	



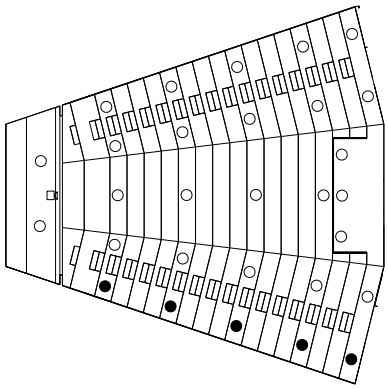
Πίνακας 6.3.13 Μετρήσεις STI / ζώνη L

	L_8	L_6	L_4	L_2	L_1
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	0.76	0.72	0.67	0.69	0.7
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	74.7	72.1	67.6	67.1	67.4
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	0.74	0.64	0.62	0.61	0.66
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	51.8	47.3	45.5	43.1	46.2
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	0.796	0.759	0.746	0.74	0.746
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)	0.7		0.73	0.7	0.73



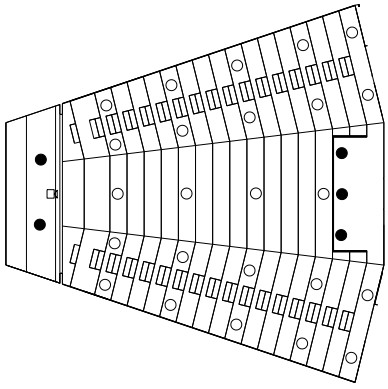
Πίνακας 6.3.14 Μετρήσεις STI / ζώνη LL

	LL_8	LL_6	LL_4	LL_2	LL_1
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	0.69	0.7	0.72	0.68	0.75
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	73	68.6	67	64	64.3
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	0.66	0.62	0.63	0.62	0.65
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	50.9	45.8	43.8	41.6	43.9
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	0.692	0.748	0.728	0.76	0.693
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)		0.62		0.64	



Πίνακας 6.3.15 Μετρήσεις STI / ζώνη σκηνής και μπαλκονιού

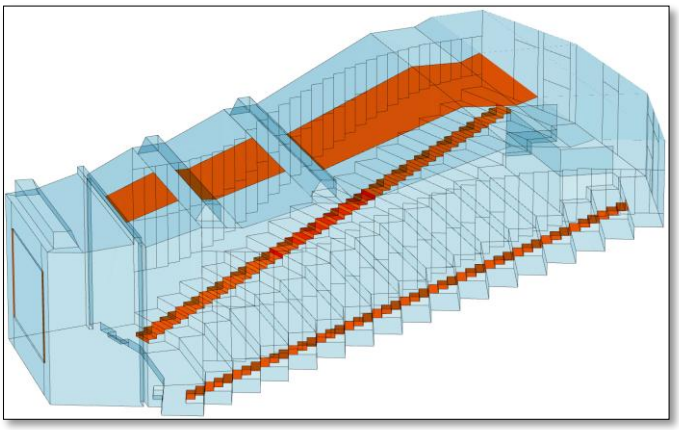
	SCR	SCL	BL	BC	BR
Μέτρηση με PRX στη σκηνή	-	-	0.65	0.67	0.70
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)	-	-	70.2	70.2	70.2
Μέτρηση με TalkBox στη σκηνή	-	-	0.61	0.60	0.63
(μέτρηση στάθμης L_{Aeq} dB)			46.8	47.6	45.8
Εκτίμηση μέσω Ray Tracing (STIPa Male)	-	-	-	-	-
Μέτρηση STIPA (λειτουργία 8 surround)	0.66	0.66	0.63	0.63	-



6.4 Λοιπές παρατηρήσεις

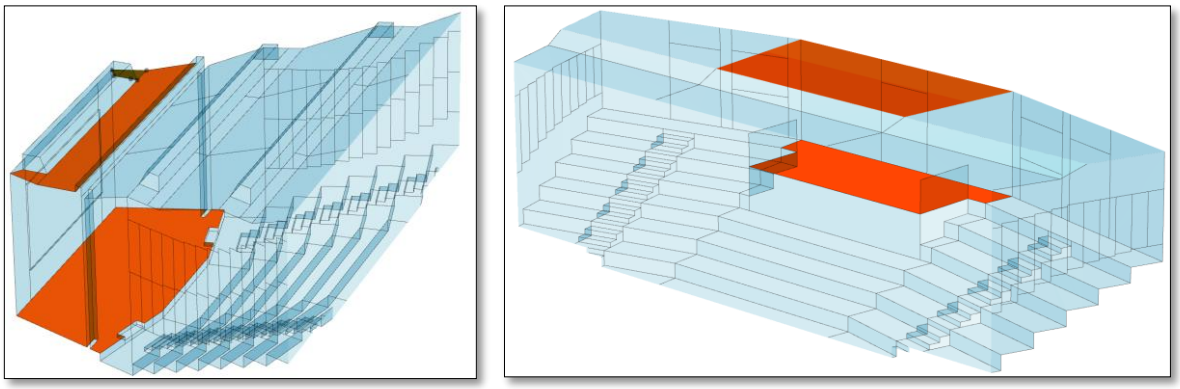
6.4.1 Φαινόμενο flutter echo

Μια σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από την παρουσία στο χώρο είναι ότι στον κυρίως χώρο του αμφιθεάτρου (περιοχή θεατών) η εμφάνιση flutter echo (ειδικά με γεμάτο από θεατές αμφιθέατρο) δεν είναι πιθανή και δεν εντοπίστηκε στην πράξη κατά την παρουσία μας στο αμφιθέατρο. Οι λόγοι είναι δύο: α) οι πλευρικοί τοίχοι δεν είναι παράλληλοι και β) στην κατακόρυφη διεύθυνση και στην περιοχή του κοινού οι ανακλαστικές επιφάνειες δεν είναι ευθέως παραλληλιζόμενες διότι δεν είναι «αντικριστές».



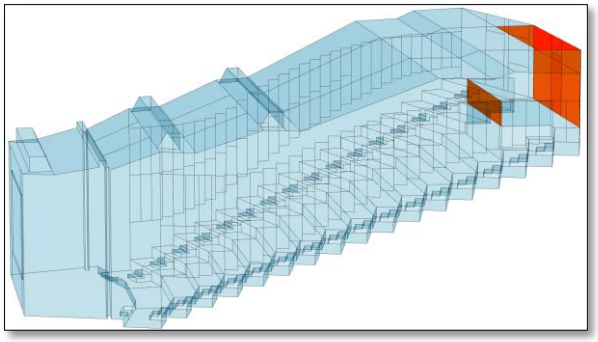
Εικόνα 6.4.1 Περίπτωση γεμάτου αμφιθεάτρου. Οι ανακλαστικές επιφάνειες δεν είναι αντικριστές κατά την κατακόρυφη διεύθυνση

Αντιθέτως, κατά την παρουσία μας στο αμφιθέατρο εντοπίζουμε ένα σχετικά «ήπιο» flutter echo φαινόμενο σε σημεία της σκηνής και ένα πολύ έντονο flutter echo φαινόμενο σε όλο το μπαλκόνι της εισόδου του αμφιθεάτρου. Ο πιο απλός τρόπος για να εντοπιστεί αυτό το φαινόμενο είναι ένας κρότος (πχ παλαμάκι) στο σημείο που μας ενδιαφέρει. Το αποτέλεσμα είναι μια αντηχητική «ουρά» του ήχου που όμως αποτελείται από πυκνούς αλλά διακριτούς αποσβενόμενους κρότους. Ωστόσο ακόμα και αν η πηγή του κρότου είναι το δοκιμαστικό ηχείο της σκηνής, το flutter echo είναι και πάλι έντονο καθώς υπάρχουν διαδρομές του ήχου που καταλήγουν να εγκλωβίζονται ανάμεσα στις παράλληλες επιφάνειες (οι οποίες ειδικά στο σημείο του μπαλκονιού είναι ανακλαστικές). Οι πιο σημαντικές «παραλληλίες» στο χώρο μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών είναι οι ακόλουθες.



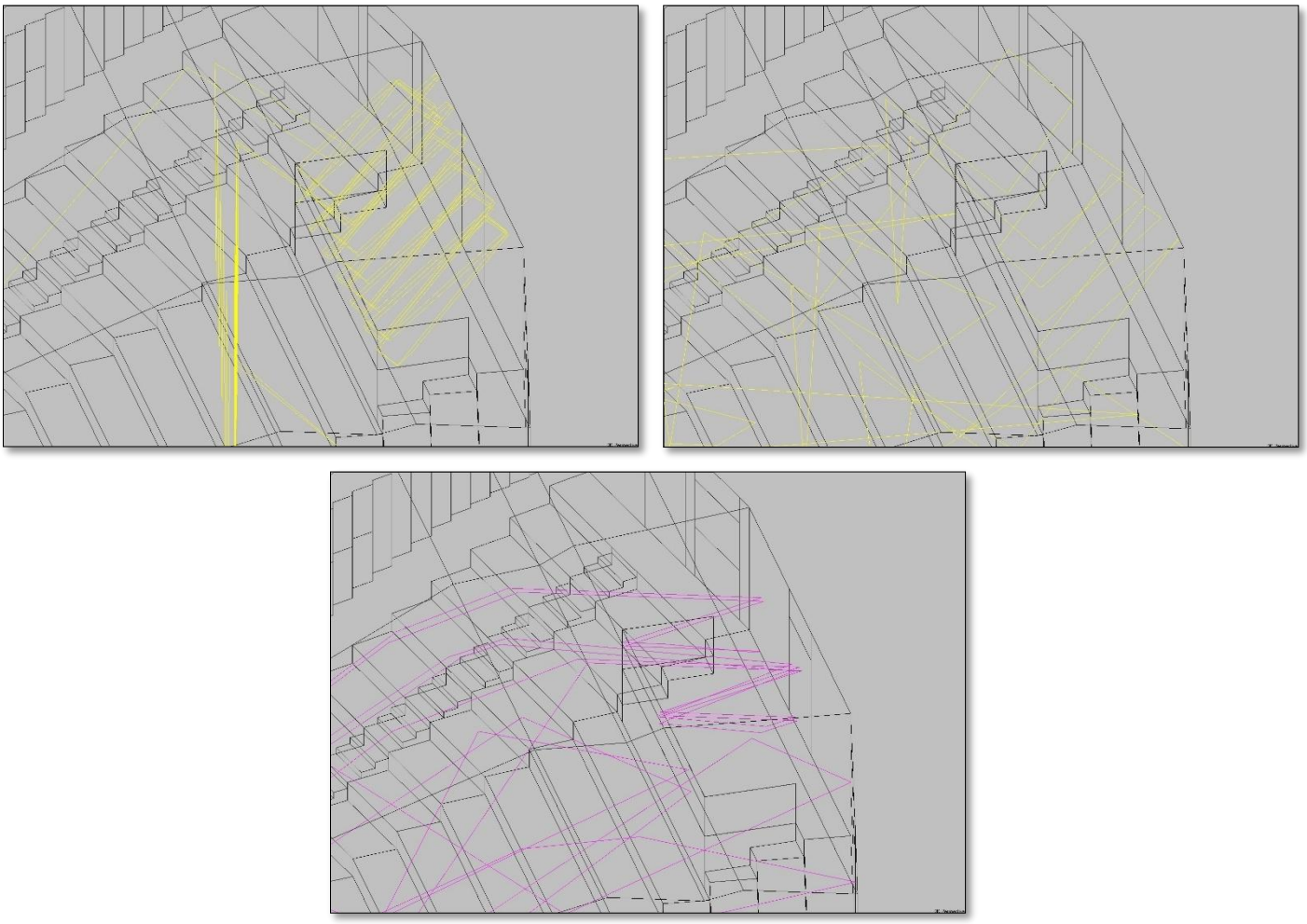
Εικόνα 6.4.2 Παραλληλίες μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών στη σκηνή και στο πίσω μέρος του αμφιθεάτρου

Επιπλέον, στο μπαλκόνι παρατηρούνται διατάξεις που εγκλωβίζουν ακτίνες γωνιακά αλλά και σε οριζόντια διεύθυνση.



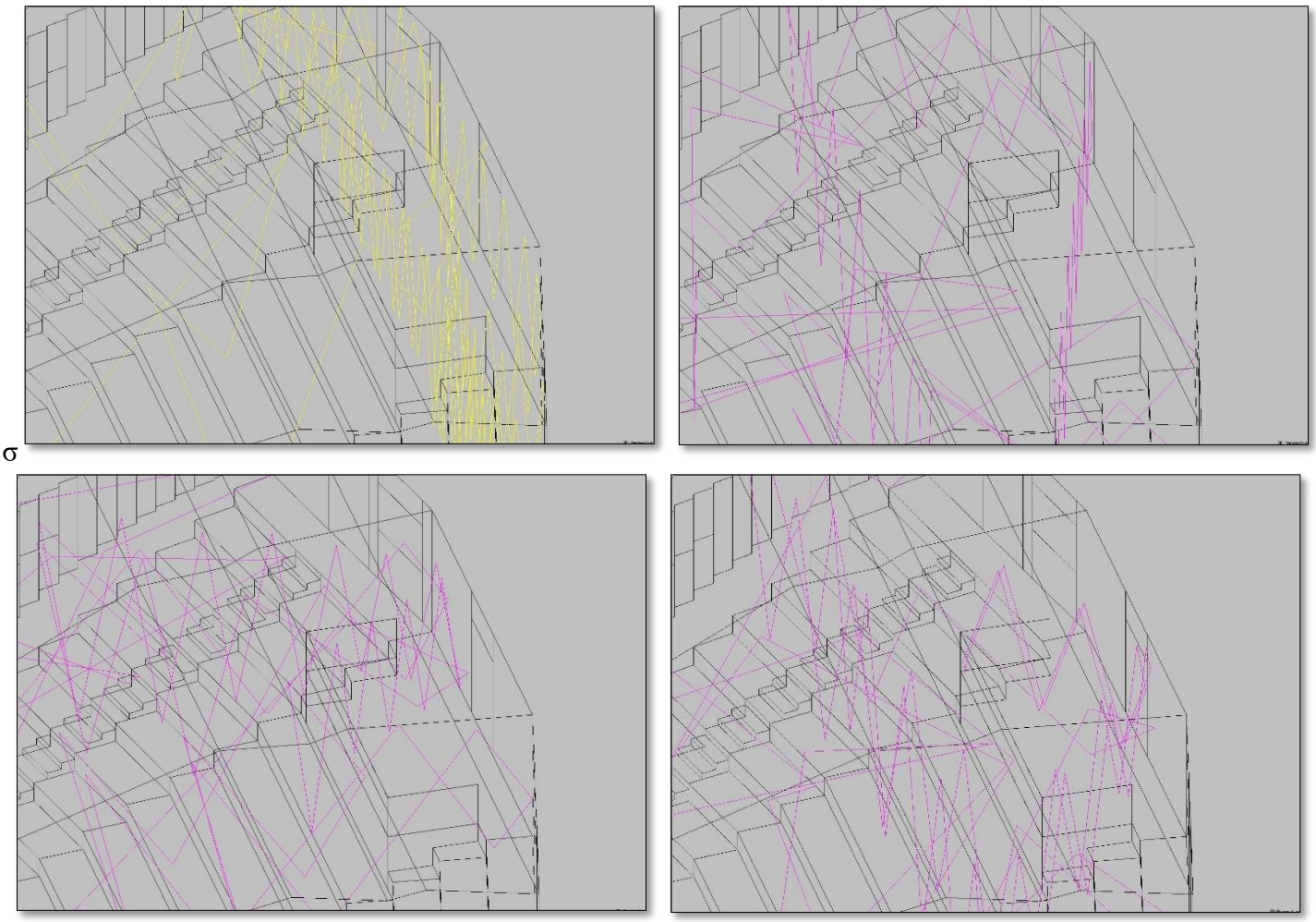
Εικόνα 6.4.3 Περίπτωση οριζόντιας παραλληλίας και αντικρυστών γωνιών (σε λοξή κατακόρυφη διεύθυνση)

Ο «εγκλωβισμός» των ακτινών εντοπίζεται και από το αρχείο ray tracing της προσομοίωσης. Ακολουθούν ενδεικτικά αποσπάσματα που σταχυολογήθηκαν κατά την περιήγηση στις διάφορες τροχιές ακτινών από τη σκηνή προς όλες τις κατευθύνσεις της αίθουσας.

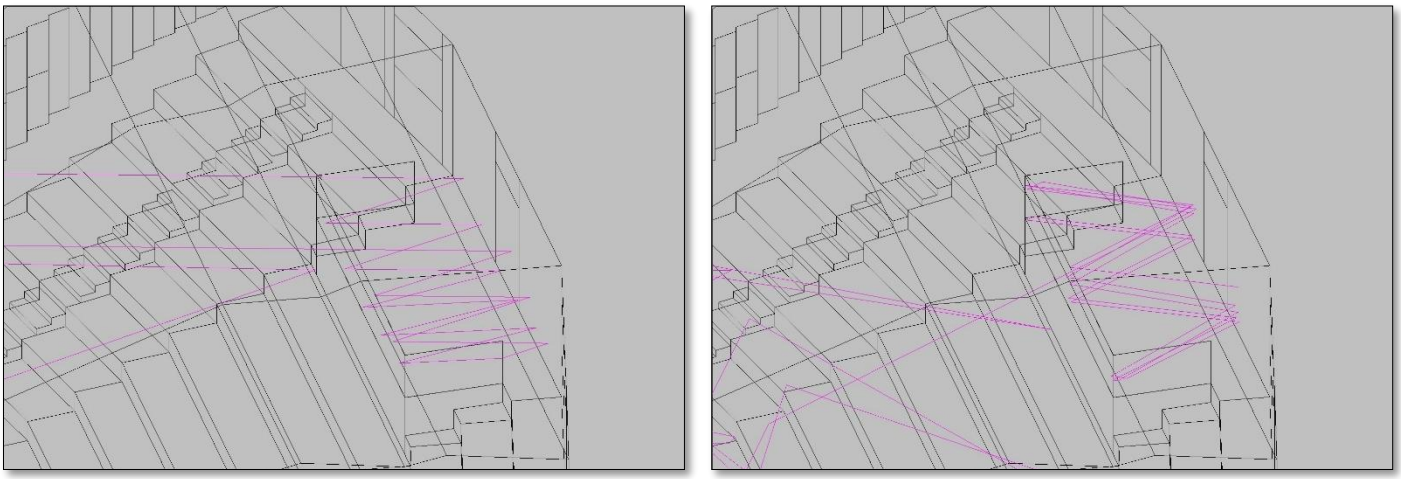


Εικόνα 6.4.4 Flutter echo (αντικριστές γωνίες)

σ



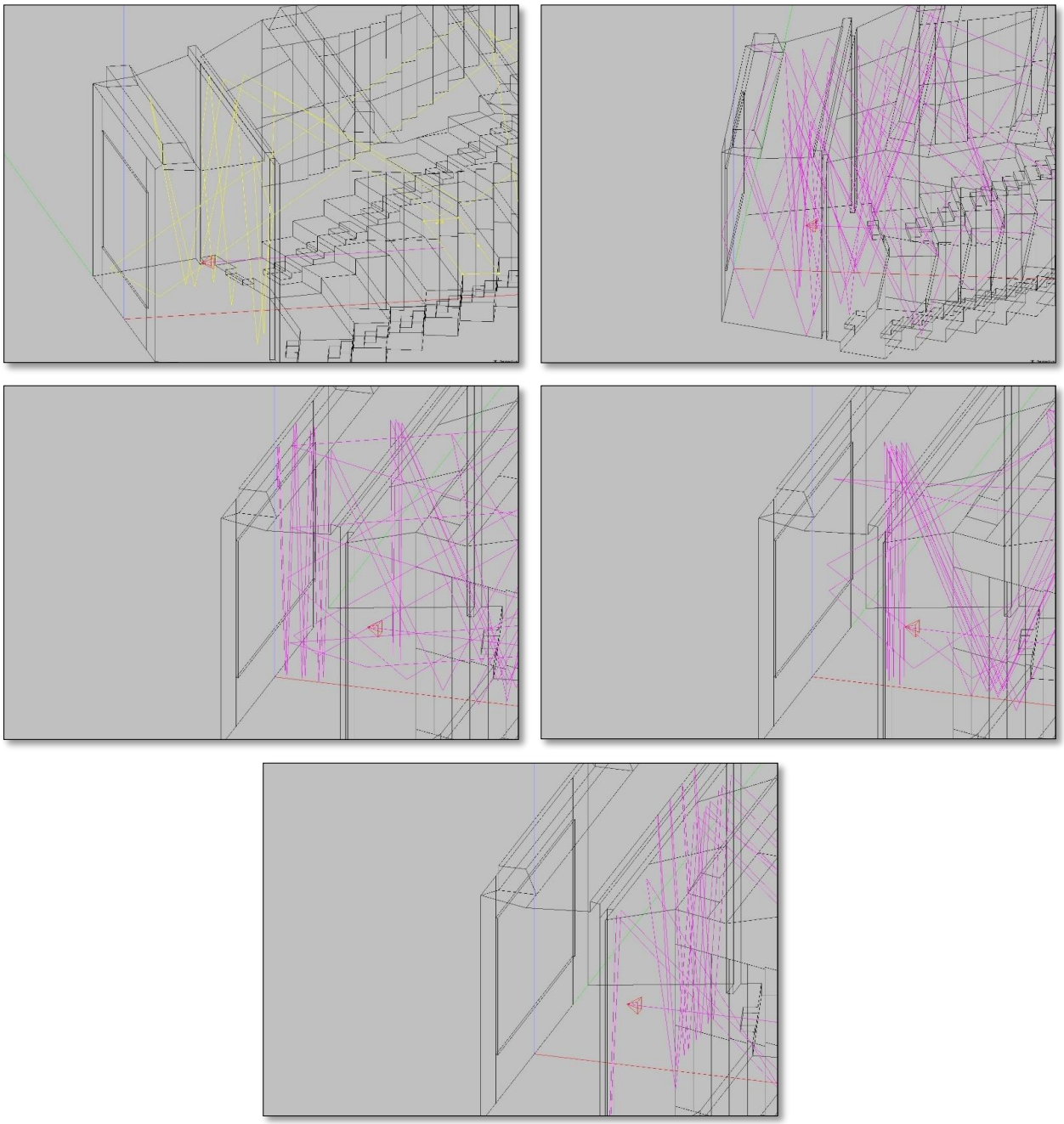
Εικόνα 6.4.5 Flutter echo - (παραλληλία δαπέδου-οροφής)



Εικόνα 6.4.6 Flutter echo - (οριζόντια παραλληλία μπαλκονιού – κάθετου τοίχου)

Οι παραπάνω «εγκλωβισμένες» ακτίνες ήχου ανακλώνται διαδοχικά σε επιφάνειες οι οποίες δεν έχουν ηχοαπορροφητικές ιδιότητες και για το λόγο αυτό ακόμα και χαμηλής στάθμης κύματα αναμένεται να εγκλωβίζονται και να έχουν ακουστό αποτέλεσμα.

Αντίστοιχα ευρήματα με το ray tracing υπάρχουν και για τη σκηνή, επιβεβαιώνοντας το πρόβλημα από την παραλληλία επιφανειών που επίσης σημειώθηκε πιο πάνω. Είναι ωστόσο χαρακτηριστική η δυσκολία να εντοπίσει κανείς τα ακριβή σημεία όπου το φαινόμενο γίνεται αισθητό (η εμφάνισή του είναι αισθητή με ακρίβεια κάποιων εκατοστών, όπως διαπιστώθηκε από διάφορες επί τόπου δοκιμές). Και εδώ το ray tracing μπορεί να μας δώσει μια ιδέα των διαδρομών που οδηγούν σε flutter echo, με δεδομένο πάλι ότι οι επιφάνειες της σκηνής είναι ανακλαστικές και δεν αποσβένουν τις διαδοχικές ανακλάσεις όταν αυτές συμβαίνουν.

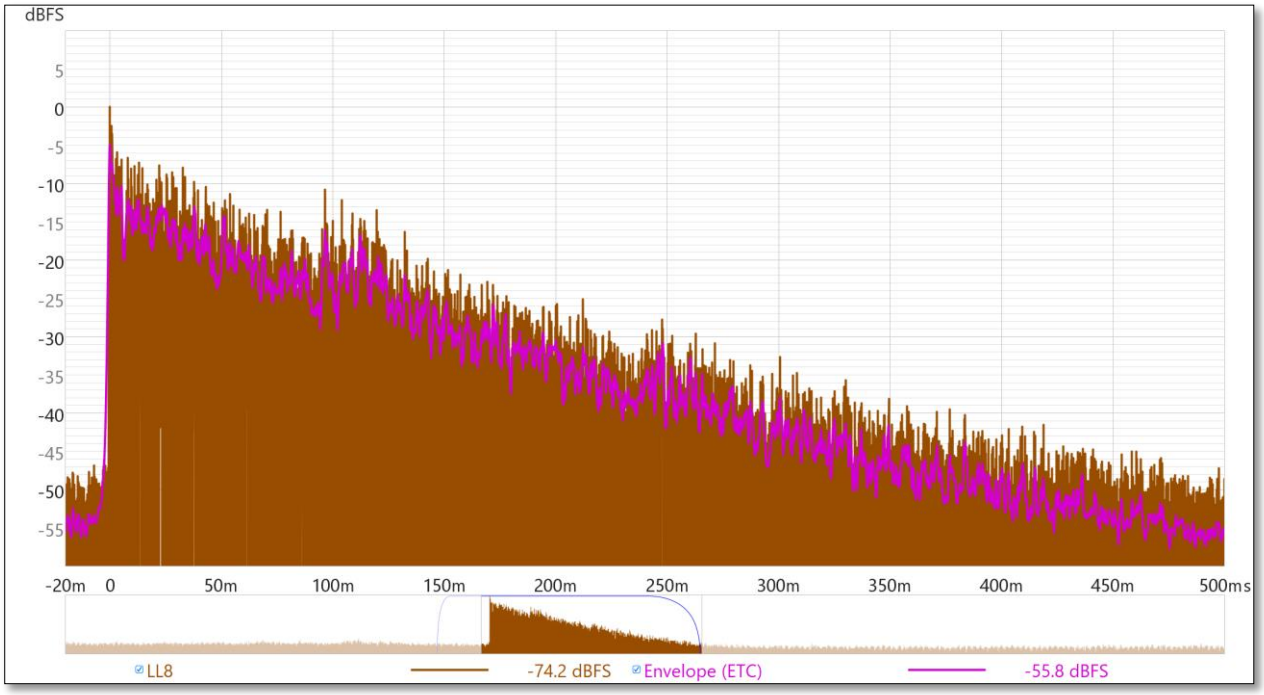


Εικόνα 6.4.7 Περιπτώσεις ανακλάσεων στη σκηνή που σχετίζονται με το φαινόμενο flutter echo

6.4.2 Ανακλάσεις από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου

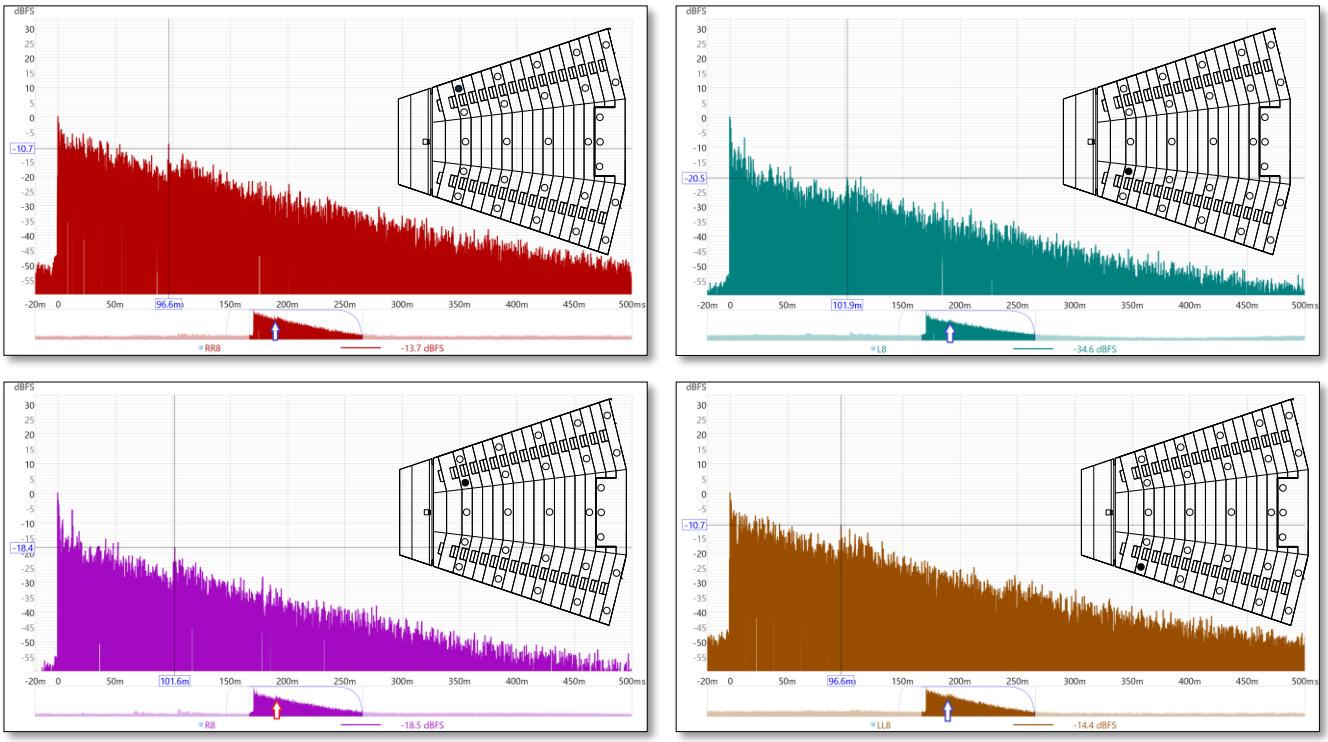
Θα εστιάσουμε τώρα στις κρουστικές αποκρίσεις που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Η πηγή μας βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής και θα μελετήσουμε τα σημεία ανά ζώνη, από την πιο κοντινή έως την πιο μακρινή (δηλαδή διαδοχικά τις ζώνες 8, 6, 4, 2 & 1). Επιπλέον, για την καλύτερη εποπτεία των καμπυλών κρουστικής απόκρισης δεν θα χρησιμοποιήσουμε την αναλυτική και πυκνή παρουσίαση που μας δίνει το REW αλλά την «εξομάλυνση» (smoothing)

που μας προσφέρει το λογισμικό χρησιμοποιώντας την «περιβάλλουσα» (envelope) (με παράγοντα smoothing τα 2msec).



Διάγραμμα 6.4.8 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας στο σημείο LL_8

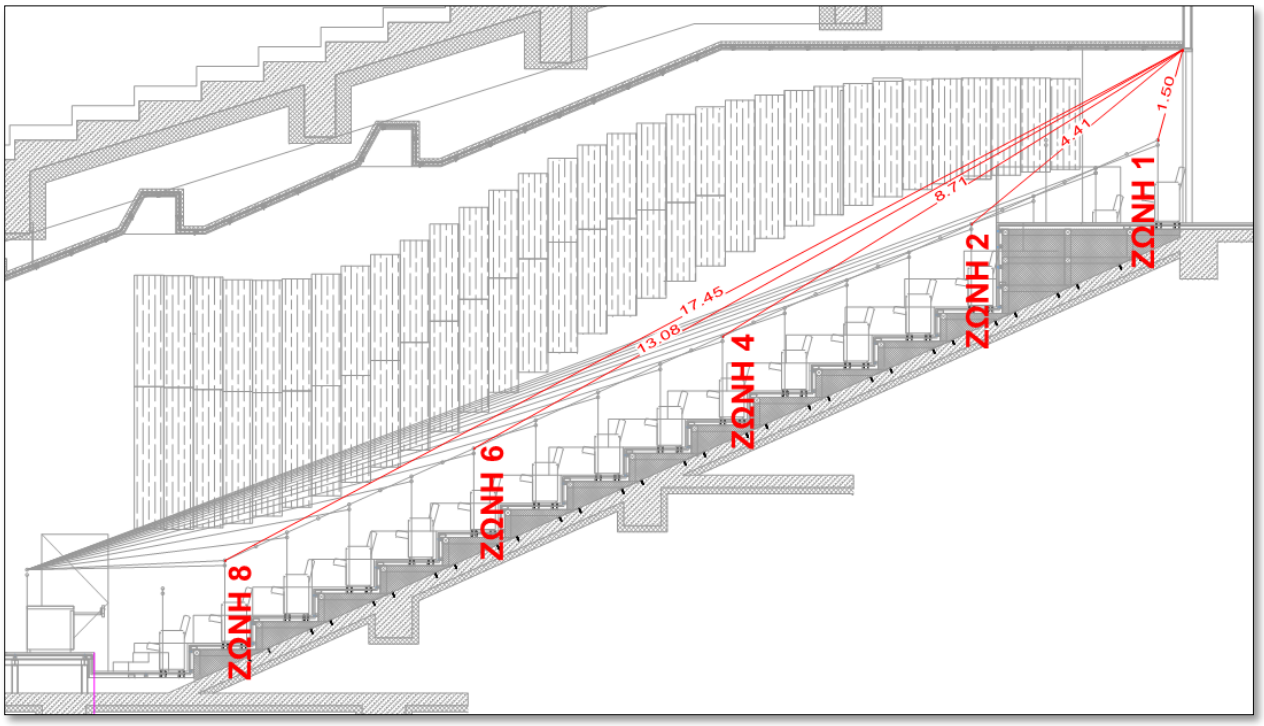
Θα παραθέσουμε τώρα τις κρουστικές αποκρίσεις των σημείων της πρώτης σειράς (ζώνη 8).



Διάγραμμα 6.4.9 Καμπύλες χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 8

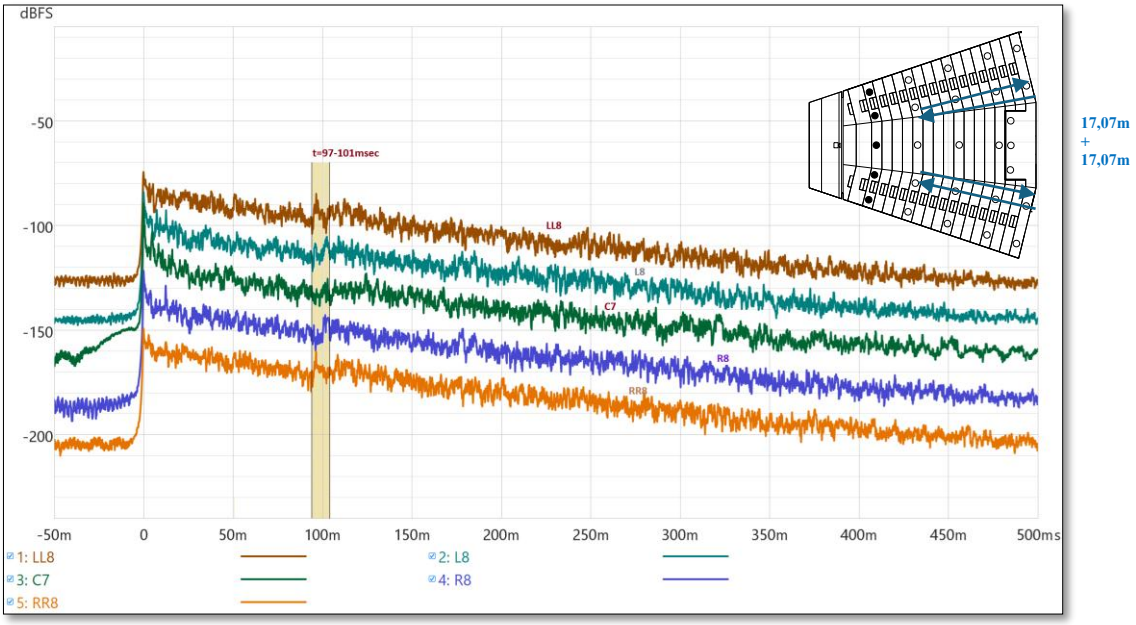
Όπως βλέπουμε, υπάρχει πάντα ένα χρονικό σημείο t από την αρχική διέγερση όπου καταφτάνει μια ισχυρή αντήχηση και ακολουθεί μια αύξηση που οφείλεται στην άφιξη ενός ισχυρού ανακλώμενου πεδίου, το οποίο όμως δεν διαφοροποιεί την κλίση της καμπύλης. Σημειώνουμε λοιπόν εξαρχής ότι δεν πρόκειται για περίπτωση όπου παρατηρούνται δύο διαφορετικές κλίσεις / χρόνοι αντήχησης (οι περιπτώσεις αυτές είναι: α) χώροι με πολύ ανακλαστικές αντικρυστές παράλληλες επιφάνειες και β) χώροι αποτελούμενοι από δύο ή περισσότερους συζευγμένους χώρους διαφορετικών χώρων, βλ. Λουτρίδης, 2015, σελ. 166-167).

Μελετώντας τα δεδομένα στις διάφορες ζώνες καθισμάτων (στις οποίες θα αναφερθούμε πιο κάτω), προκύπτει ότι το χρονικό σημείο t από την αρχική διέγερση αντιστοιχεί στο χρόνο διάδοσης του ήχου από το σημείο της ζώνης έως το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου και τη διαδρομή επιστροφής του ήχου από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου πίσω στη ζώνη. Θυμίζουμε ότι το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου είναι έντονα ανακλαστικό. Ας δούμε αναλυτικά τις διαστάσεις αυτές, υπό τον περιορισμό ότι αρκούμαστε, για το επίπεδο ανάλυσής μας, σε μια δισδιάστατη ανάλυση.



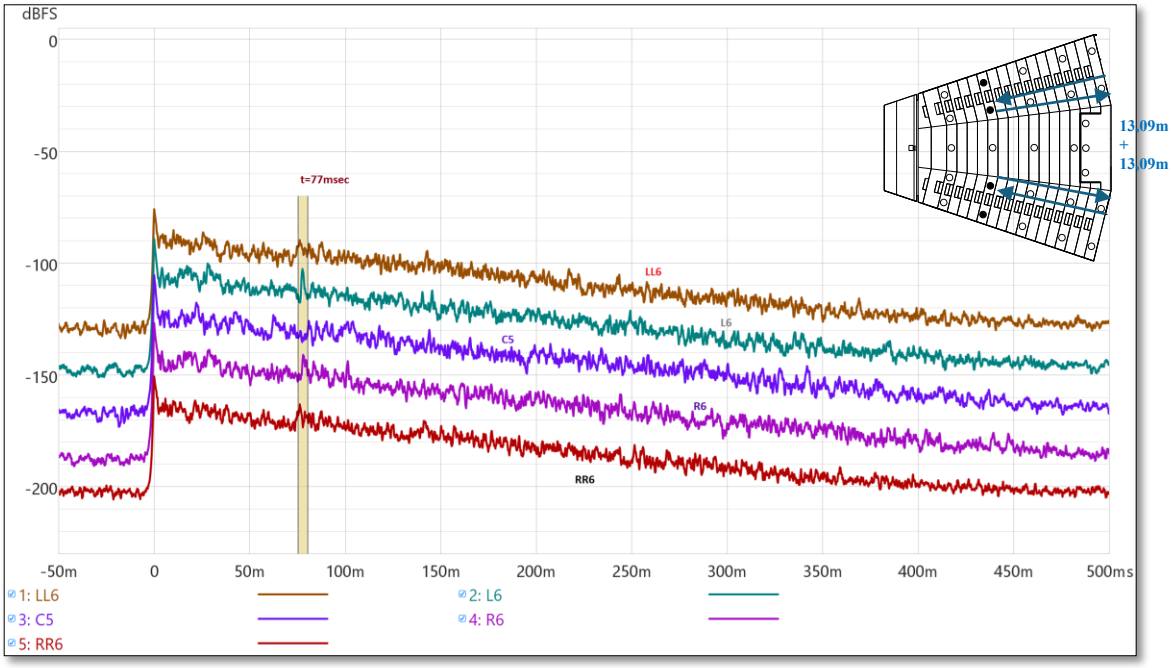
Εικόνα 6.4.10 Απόσταση της κάθε ζώνης από το πίσω άκρο του αμφιθεάτρου (τομή)

Συγκεντρώνουμε τις κρουστικές αποκρίσεις σε ένα κοινό διάγραμμα στο οποίο η κατακόρυφη διάσταση είναι καθαρά ποιοτική (οι τιμές που αναγράφονται δεν είναι πραγματικές διότι οι καμπύλες διατάσσονται σε κατάλληλη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ τους χάριν παρουσίασης), ενώ οριζόντια ο άξονας του χρόνου είναι κοινός.



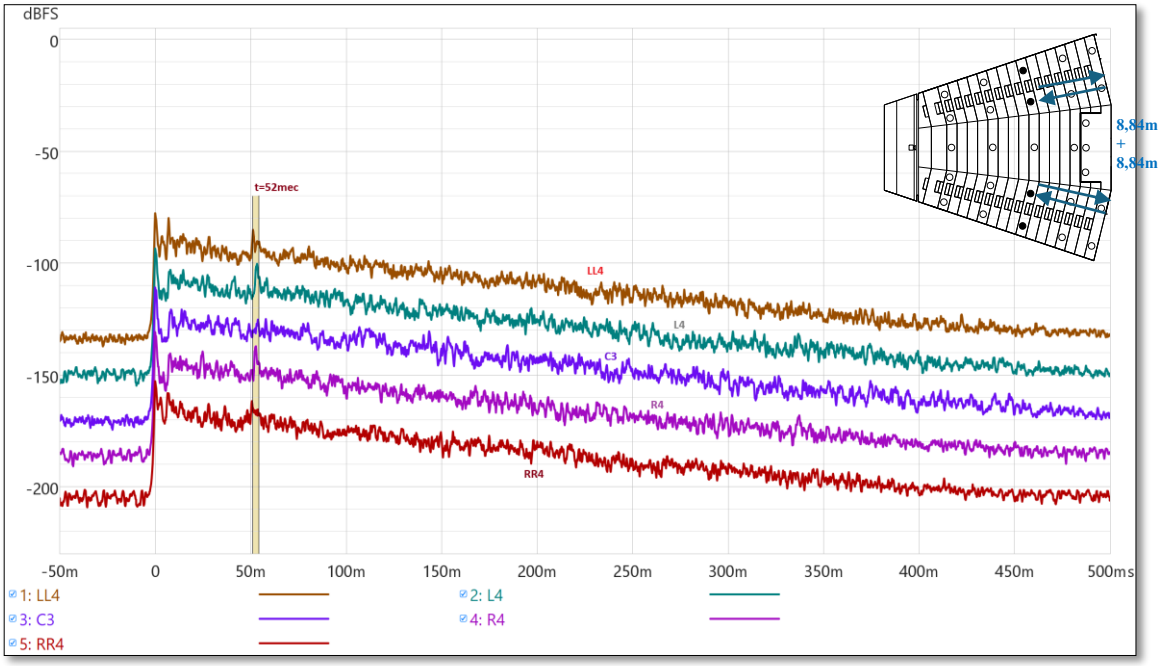
Διάγραμμα 6.4.11 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 8 (smoothing στα 2msec)

Το αντηχητικό αυτό πεδίο μπορεί να ερμηνευτεί μετατρέποντας τις παραπάνω χρονικές στιγμές σε αποστάσεις διάδοσης ήχου. Τα ~101msec αντιστοιχούν σε μια απόσταση 0,101sec * 340m/sec=34,34m. Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί σε μια διαδρομή ~17,17m+17,17m, η οποία αντιστοιχεί στο διπλάσιο της απόστασης της ζώνης 8 από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου (βλ. εικόνα 6.4.10).



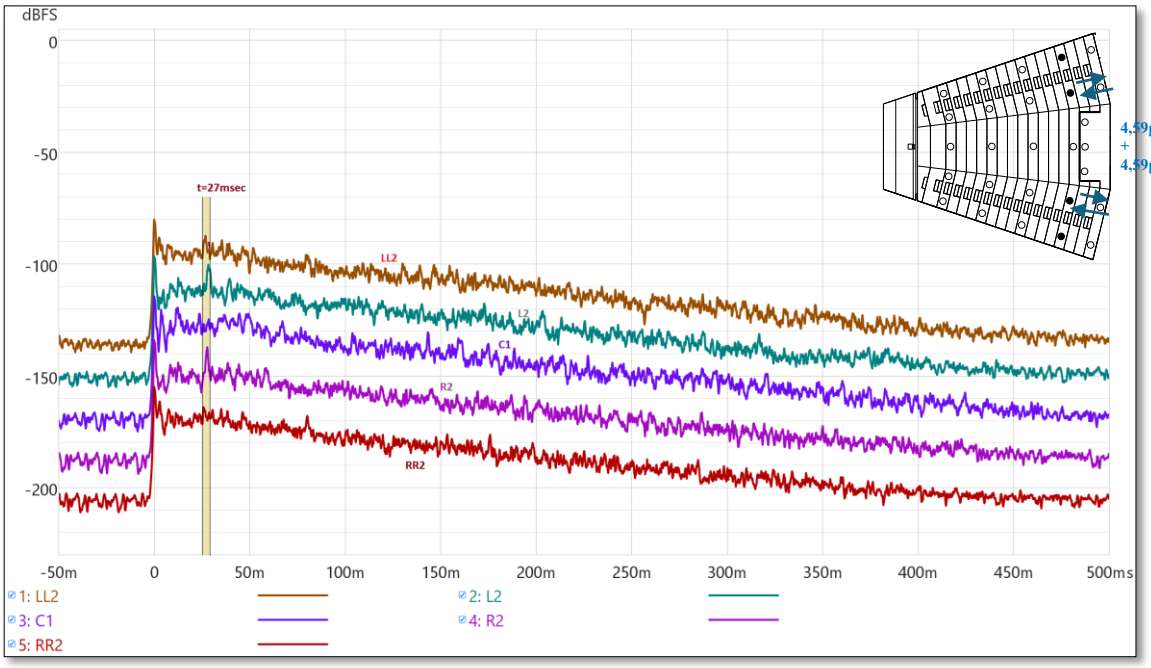
Διάγραμμα 6.4.12 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 6 (smoothing στα 2msec)

Στη ζώνη 6 η καθυστέρηση της ανάκλασης είναι 77msec, που αντιστοιχεί σε μια διαδρομή 340*0.077=26,18m (διαδρομή 13,09m από τη ζώνη 6 έως το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου + 13,09m για την ανάκλαση από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου έως πίσω στη ζώνη 6). Παρατηρούμε ότι στο σημείο του άξονα C_5 δεν εμφανίζεται το φαινόμενο καθώς στη διαδρομή από και προς το σημείο C_5 παρεμβάλλεται το μπαλκόνι.



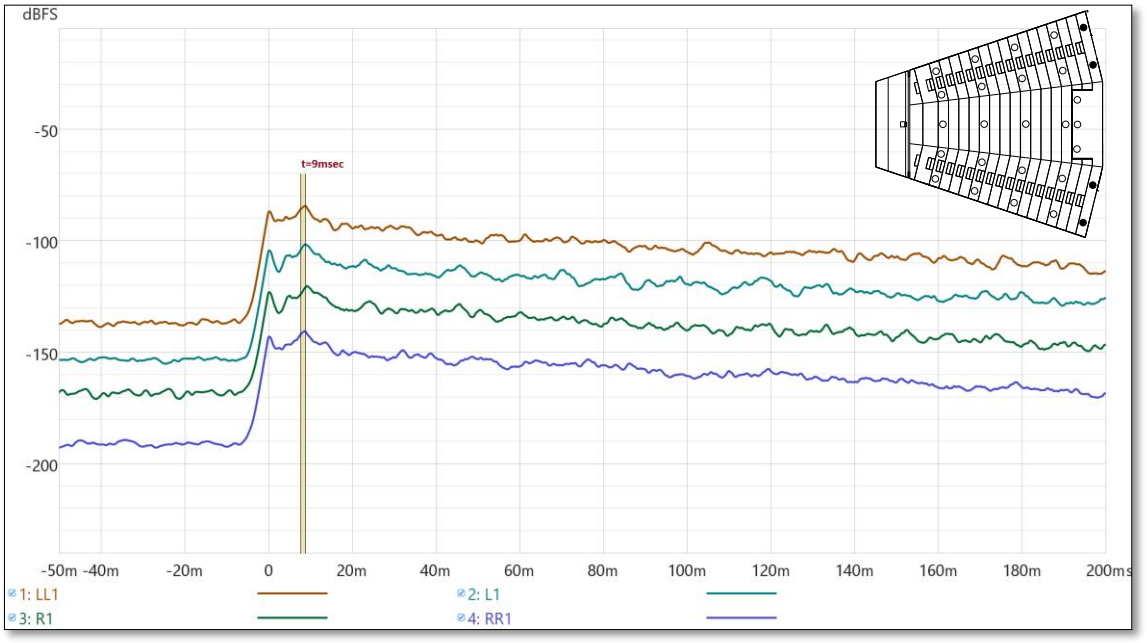
Διάγραμμα 6.4.13 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 4 (smoothing στα 2msec)

Στη ζώνη 4 η καθυστέρηση της ανάκλασης είναι 52msec, που αντιστοιχεί σε μια διαδρομή 340*0.052=17,68m (διαδρομή 8,84m από τη ζώνη 4 έως το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου + 8,84m για την ανάκλαση από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου έως πίσω στη ζώνη 4). Και εδώ το κεντρικό σημείο C_3 δεν εμφανίζει το φαινόμενο που περιγράφουμε, δεν δέχεται ανάκλαση από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου διότι η διαδρομή του ήχου «σκιάζεται» από την ύπαρξη του μπαλκονιού.



Διάγραμμα 6.4.14 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 2 (smoothing στα 2msec)

Στη ζώνη 2 η καθυστέρηση της ανάκλασης είναι 27msec, που αντιστοιχεί σε μια διαδρομή 340*0.027=9,18m (διαδρομή 4,59m από τη ζώνη 2 έως το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου + 4,59m για την ανάκλαση από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου έως πίσω στη ζώνη 2).



Διάγραμμα 6.4.15 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης ενέργειας, ζώνη 1 (smoothing στα 2msec)

Στις πίσω θέσεις (ζώνη 1) η απόσταση με το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου είναι 340*0,009=3,06m που αντιστοιχεί σε μια διαδρομή 1,53m έως το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου + 1,53m για την ανάκλαση από το πίσω μέρος του αμφιθεάτρου έως πίσω στη ζώνη 2.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Αξιολόγηση στατιστικών εκτιμήσεων χρόνου αντήχησης

Αρχικά διαπιστώνουμε ότι η αρχική εκτίμηση του χρόνου αντήχησης μέσω των κλασικών τύπων Sabine & Norris-Eyring οδηγεί σε *ουσιωδώς αποκλίνουσες τιμές χρόνου αντήχησης σε σύγκριση με τις πραγματικές που εκτιμώνται από το μοντέλο προσομοίωσης του χώρου και που επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε*. Το σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει λοιπόν είναι ότι αν κανείς μείνει στην πρώτη εκτίμηση Sabine & Norris-Eyring όχι μόνο οδηγείται σε μια υπερεκτίμηση του χρόνου αντήχησης αλλά και σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση του χώρου. Συγκεκριμένα, ο χώρος κρίνεται πολύ ικανοποιητικός για εφαρμογές ομιλίας, συμπέρασμα στο οποίο δεν μας οδηγεί η απλή χρήση των τύπων του Sabine ή των Norris-Eyring, οι οποίοι οδηγούν σε μια χρήση του χώρου μεταξύ ομιλίας και εφαρμογών μουσικής. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία από τα πρώτα κιόλας στάδια της μελέτης η εμβάθυνση στα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου, κατ'ελάχιστο αναζητώντας τις κατάλληλες στατιστικές εκτιμήσεις του χρόνου αντήχησης (όπως συμβαίνει στην παρούσα εργασία με την αρκετά πιο ακριβή και αξιόπιστη εκτίμηση χρόνου αντήχησης κατά Millington-Sette) αλλά και προχωρώντας σε ακουστική και ηλεκτρακουστική μοντελοποίηση του χώρου με τα κατάλληλα εργαλεία-λογισμικά.

Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν *την ορθότητα της εκτίμησης Millington-Sette* και ένα χρόνο αντήχησης χαμηλότερο από αυτό των κλασικών εκτιμήσεων Sabine και Norris-Eyring. Για να το ερμηνεύσουμε αυτό θα πρέπει να επιστρέψουμε σε μια από τις αρχικές μας παρατηρήσεις, ότι δηλαδή η μέση ελεύθερη διαδρομή του χώρου υπολογίζεται πολύ κοντά στη διάσταση του ύψους και είναι κατά πολύ μικρότερη των υπολοίπων δύο διαστάσεων (μήκος, πλάτος). Αυτό σημαίνει ότι η *αντιπροσωπευτική ανάμεσα σε ανακλάσεις διαδρομή του ήχου είναι αυτή της κατακόρυφης διεύθυνσης*. Με άλλα λόγια έχουμε ένα ηχητικό πεδίο το οποίο ανακλάται διαδοχικά ανάμεσα σε οροφή και δάπεδο συχνότερα και πυκνότερα απ'ό,τι στις άλλες δύο διευθύνσεις. Τα δύο τρίτα της οροφής (διάτρητη γυψοσανίδα) και το δάπεδο (καθίσματα) παρουσιάζουν έντονα ηχοαπορροφητικά χαρακτηριστικά και άρα έχουν αυξημένη βαρύτητα («υπερεκπροσωπούνται») στο τελικό αποτέλεσμα του χρόνου αντήχησης.

Φαινόμενα flutter echo που σχετίζονται με το σχεδιασμό της αίθουσας

Διαπιστώνεται με απλά εμπειρικά μέσα η προβληματική συμπεριφορά του χώρου αφενός στη σκηνή, αφετέρου στο μπαλκόνι του πίσω μέρους του αμφιθεάτρου (*εμφάνιση flutter echo*). Παρατηρώντας τις ανακλαστικές επιφάνειες στα δύο αυτά σημεία μπορεί εύκολα να εντοπίσει τις παραλληλίες που προκαλούν το έντονο flutter echo στο μπαλκόνι, ενώ συμβουλευόμενοι και τη θεωρία μπορούμε επίσης να ερμηνεύσουμε την εμφάνιση flutter echo στη σκηνή (αντικριστές επιφάνειες, αμβλείες γωνίες). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκες διαχυτών σε κατάλληλα σημεία για να αποφεύγεται ο εγκλωβισμός των ηχητικών ακτίνων σε δεδομένες τροχιές.

Θόρυβος και επίδοση χώρου για εφαρμογές ομιλίας

- Με βάση τις μετρήσεις θορύβου στο χώρο (σε συνθήκες χαμηλού θορύβου περιβάλλοντος) όλες οι μετρήσεις καταληπτότητας δίνουν ένα ικανοποιητικό και ομοιόμορφο αποτέλεσμα μέσα στο αμφιθέατρο. Σε συνθήκες υψηλότερης στάθμης θορύβου περιβάλλοντος το υφιστάμενο σύστημα ενισχυμένου ήχου μπορεί να καλύψει τις ανάγκες που θα προκύψουν για καταληπτή και ευκρινή ομιλία σε όλα τα σημεία του αμφιθεάτρου.

Το ερώτημα της ηχοαορροφητικότητας στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων

Ένα χαρακτηριστικό εύρημα των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε με το λογισμικό Room EQ Wizard είναι ότι ο μετρούμενος χρόνος αντήχησης στην περιοχή κάτω από 200Hz αποκλίνει σημαντικά όχι μόνο από τις στατιστικές εκτιμήσεις Sabine και Norris-Eyring αλλά ακόμα και από τη σχετικά ακριβέστερη προσέγγιση Millington-Sette (βλ. πίνακα 5.3.6). Στο Παράρτημα Α παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα όλες οι εκτιμήσεις και μετρήσεις που έχουν αναφερθεί πιο πάνω και αποδεικνύεται η παραπάνω απόκλιση μεταξύ μετρήσεων και εκτιμήσεων στις χαμηλές συχνότητες.

Το Room EQ Wizard είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που προσφέρει εκτιμήσεις των ακουστικών παραμέτρων στον χρήση, δεν αποτελεί όμως μια επαγγελματική και πιστοποιημένη μετρητική διάταξη όπως είναι το ηχόμετρο και το μετρητικό μικρόφωνο που χρησιμοποιήσαμε (κατασκευαστής NTi Audio). Θα πρέπει να θυμηθούμε ότι στην παράγραφο 6.3.3 (και στην

εικόνα 6.3.7) αναφέραμε ότι η διάταξη της NTi Audio δεν έδωσε τελικά αποτελέσματα για το χρόνο αντήχησης στις συχνότητες 63Hz, 125Hz και 250Hz. Θα πρέπει να λοιπόν να σκεφτούμε το ενδεχόμενο να έχουμε διεγείρει ανεπαρκώς το χώρο σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων (κάτι που όπως εξηγήσαμε πιο πάνω μπορεί να οφείλεται στη συχνοτική απόκριση των ηχείων που χρησιμοποιήσαμε) και άρα τα αποτελέσματα του Room EQ Wizard να πρέπει να θεωρηθούν μη αξιόπιστα για τις χαμηλές αυτές συχνότητες.

Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα του σημείου αυτού πραγματοποιήσαμε κάποιες πρόχειρες μετρήσεις χρόνου αντήχησης χρησιμοποιώντας το αριστερό cluster subwoofer & array ηχείου. Χρησιμοποιήσαμε τη διάταξη της NTi Audio σε διάφορα σημεία του χώρου. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί δοκιμαστική καθώς η χρήση ενός άκρως κατευθυντικού ηχείου όπως είναι το cluster 8 ηχείων σε array διάταξη προφανώς δεν μπορεί να οδηγήσει σε επίσημες μετρήσεις του χρόνου αντήχησης. Επιπλέον, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη στάθμη μέτρησης του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες υπερβαίνοντας τον περιορισμό στάθμης που αναφέρεται στην παράγραφο 6.3.3 έπρεπε να φτάσουμε σε εντάσεις που απαιτούσαν ωτοασπίδες, τις οποίες δεν διαθέταμε κατά τις συγκεκριμένες μετρήσεις. Επίσης ο θόρυβος ήταν μη αποδεκτός από τους χειριστές του κτιρίου.

Οι δοκιμαστικές αυτές διεγέρσεις του χώρου στις χαμηλές συχνότητες έδιναν αποτελέσματα χρόνου αντήχησης στην οθόνη του ηχομέτρου της τάξης του 1-1,2sec, ψηλότερα δηλαδή από τις συμβατικές μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε με το Room EQ Wizard. Ωστόσο, οι τιμές αυτές παραμένουν χαμηλότερες από τις εκτιμήσεις Millington-Sette στην περιοχή κάτω από 200-250Hz (πίνακας 5.3.6). Πως ερμηνεύεται αυτή η απόκλιση;

Η απάντηση βρίσκεται στο γεγονός ότι οι εκτιμήσεις χρησιμοποιούν το συντελεστή ηχοαπορρόφησης *α* ο οποίος συνδέεται με το μηχανισμό απορρόφησης λόγω τριβής, ο οποίος αφορά πορώδη υλικά, υλικά με συγκεκριμένες διαμορφώσεις ή με κατάλληλη διάτρηση (Λουτρίδης, 2015, σσ. 133-143) *τα οποία θεωρούνται άκαμπτα*. Ο συντελεστής *α* δεν μπορεί όμως να προσομοιώσει ιδιότητες ηχοαπορρόφησης που βασίζονται σε φαινόμενα συντονισμού διότι οι ιδιότητες αυτές προκύπτουν από το συνδυασμό υλικών, της επένδυσης πίσω από τα υλικά, της διάταξης του μεταλλικού φέροντος σκελετού και της σύνδεσης των υλικών σε αυτόν. Μια εξήγηση λοιπόν είναι ότι λόγω της κατασκευής του κελύφους, του φέροντος σκελετού, των στηρίξεων, των κενών πίσω από τις γυψοσανίδες και του πετροβάμβακα που έχει τοποθετηθεί, τμήματα του κελύφους μπορεί να προσιδιάζουν σε *απορροφητές τύπου μεμβράνης*, προκαλώντας συντονισμούς και ταλαντώσεις κατάλληλες για την απόσβεση ενός μικρούς

μέρους της ηχητικής ενέργειας (οπ.π., σσ. 144-145). Μια τέτοια εξήγηση θα δικαιολογούσε την υποεκτίμηση της ηχοαπορρόφησης από τη μέθοδο Millington-Sette στις χαμηλές συχνότητες, ενώ θα μπορούσε να επιβεβαιώσει την αξιοπιστία των ευρημάτων μας μέσω των δοκιμών μέτρησης με το ηχόμετρο XL2 της NTi Audio έναντι των μετρήσεων μέσω του Room EQ Wizard, τα οποία ενδεχομένως να πραγματοποιήθηκαν με ηχητικές πηγές ακατάλληλες για τις συγκεκριμένες χαμηλές συχνοτικές περιοχές. Το ζήτημα της ιδιαίτερης ακουστικής συμπεριφοράς υλικών όπως η γυψοσανίδα και της αυξημένης ηχοαπορροφητικότητας οφειλόμενης στους διάφορους τρόπους στήριξης και στις διαμορφούμενες κοιλότητες απαντάται σε διάφορα άρθρα στο διαδίκτυο (Veinbergs et al., 2021), (Caniato & Bettarello, 2025) & (Healey et al., 2014).

Βιβλιογραφία

Κοντομίχος Φ., Ζαρούχας Θ., & Χατζηαντωνίου Π. (2013). *Ακουστική Χώρου - Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτηριακή Ακουστική*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Λουτρίδης, Σ. (2015). *Ακουστική Αρχές και Εφαρμογές*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

Σκαρλάτος Δ. (2015). *Εφαρμοσμένη ακουστική 4η Έκδοση*. Πάτρα: Εκδόσεις GOTSIS.

Τσινίκας, Ν. Π. (2018). *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων*. University Studio Press.

Φλώρος Α. (2013). *Ήχος και ακουστική στη μουσική*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Alfawood. (n.d.). Acoustic panel [PDF]. https://alfawood.gr/files/certifications/ACOUSTIC%20PANEL.pdf (Ανακτήθηκε τις 4 Ιουνίου 2026)

Ballou, G. (Ed.). (2008). *Handbook for sound engineers (4th ed.)*. Focal Press.

Caniato, M., & Bettarello, F. (2025). *From theory to reality: Assessing predictive models for reverberation time in built environments*. Proceedings of Forum Acusticum 2025, 1–12. https://dael.euracoustics.org/confs/fa2025/data/articles/000418.pdf (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)

Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2011). *Εγχειρίδιο ακουστικής* (5η Εκδοση). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

Headington, C. (1994). *Ιστορία της δυτικής μουσικής: από την αρχαιότητα ως τις μέρες μας* (Μ. Φ. Δραγούμης, μτφρ.). Αθήνα: Gutenberg

Healey, R., Butler, K., Patrick, I., & Quigley, S. (2014). *Investigations into the sound absorbing properties of gypsum wall board*. The Journal of the Acoustical Society of America, 135(S1), 2204. https://doi.org/10.1121/1.4877761

International Organization for Standardization. (2009). *ISO 3382-1:2009 Acoustics—Measurement of room acoustic parameters—Part 1: Performance spaces*. https://www.iso.org/standard/40979.html (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)

International Electrotechnical Commission. (2011). *IEC 60268-16:2011 – Sound system equipment: Part 16. Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. IEC.

Knauf. (n.d.). *Knauf Cleaneo Acoustic Board Ceilings. Cleaneo Classic [PDF]*. http://profilbaultd.com/pdf/Knauf%20Cleneo.pdf (Ανακτήθηκε στις 4 Ιουνίου 2026)

National Technical University of Athens, Acoustics Research & Simulation Lab. (2023). *Certificate of acoustic performance: Sound absorption coefficients laboratory test (Certificate Serial Number AWG WP aw 74-2023)*. NTUA School of Architecture.

National Technical University of Athens, Acoustics Research & Simulation Lab. (2025). *Certificate of acoustic performance: Sound absorption coefficients laboratory test (Certificate Serial Number BIR S aw 104-2025)*. NTUA School of Architecture.

Neubauer, R., & Kostek, B. (2001). *Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed sound absorption*. Archives of Acoustics, 26(3), 183–201.

NTi Audio. (n.d.). *Reverberation time*. Retrieved May 23, 2026, from https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/reverberation-tim

NTi Audio. (2026). *XL2 operating manual: Handheld audio and acoustic analyzer (Firmware V4.93, Version 4.93.02)*. NTi Audio. Retrieved 13 June 2026, from https://www.nti-audio.com/wp-content/uploads/XL2-Manual.pdf

Veinbergs, A., Vilnītis, M., Rubene, S., & Zabrauskis, A. (2021). *Influence of standard gypsum board cladding on room acoustic parameters*. Journal of Civil Engineering and Architecture, 15(11), 505–512.

Παράρτημα 1 Πιστοποιητικό ακουστικής απόδοσης panel

(NTUA, Acoustics Research & Simulation Lab, 2023)





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ACOUSTICS RESEARCH & SIMULATION LAB

School of Architecture

9 Iroon Politechneiou, Zografou Campus, 157 80 Athens, tel: 210-7721394, Fax 1393

Certificate of acoustic performance
Sound absorption coefficients laboratory test

a_w | Sound Absorption Class | NRC

ISO 354
Measurement of sound absorption in a reverberation room

ISO 11654
Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption

ASTM C423
Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

Certificate Serial Number: *AWG WP aw 74-2023*

Total Pages: *13*

Contractor: *Alfa Wood Group AEBE*

Test Element Type: *Composite Soundabsorbing Panels*

Contractor's Test Element ID : *Alfa Sonic*

Measurement Location: *NTUA Acoustics Laboratory - Zografou Campus, Athens-Greece*

Transaction Details: *1182612083 NBG iBank Electronic Payment*

Issue Date: *20 - 06 - 2023*

NOMENCLATURE

T20 - Reverberation Time

The time, in seconds, that would be required for the sound pressure level to decrease by 20 dB after the sound source has stopped.

T1 - Empty Chamber Reverberation Time

The reverberation time per 1/3 octave band of the test room prior to the installation of the test item and without the presence of people or other factors that can modify the reverberation time measurement results.

T2 - Reverberation Time with the test object installed

The reverberation time per 1/3 octave band of the test room after the installation of the test item and without the presence of people or other factors that can modify the reverberation time measurement results.

S - Surface Area

The area of the floor or wall covered by the test specimen in m^2.

α_s - 1/3 Octave Band Absorption Coefficient

The ratio of the equivalent sound absorption area of a test specimen divided by the area of the test specimen for the frequency range of 100 Hz - 5000 Hz .

α_{pi} - Practical Absorption Coefficient

Frequency-dependent value of the sound absorption coefficient which is based on measurements on 1/3 octave bands in accordance with ISO 354 and which is calculated in octave bands in accordance with ISO 11654:1997

α_w - Weighted Absorption Coefficient

The value of the shifted reference curve at 500 Hz, calculated using the method described in ISO 11654:1997 .

Absorption Class

The classification of the absorptive performance of the test item based on its weighted absorption coefficient.

NRC - Noise Reduction Coefficient

The arithmetic average, rounded to the nearest multiple of 0.05, of the absorption coefficients determined at the octave band centre frequencies of 250, 500, 1000 and 2000 Hz.

Mounting Type

Defines how the test item is arranged/fixed in the test room according to the methods described in Appendix B of ISO 354:2003

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

DESCRIPTION OF THE MEASUREMENT PROCESS

The present report describes the process of measuring and assessing the sound absorption performance indices of the test item in subject.

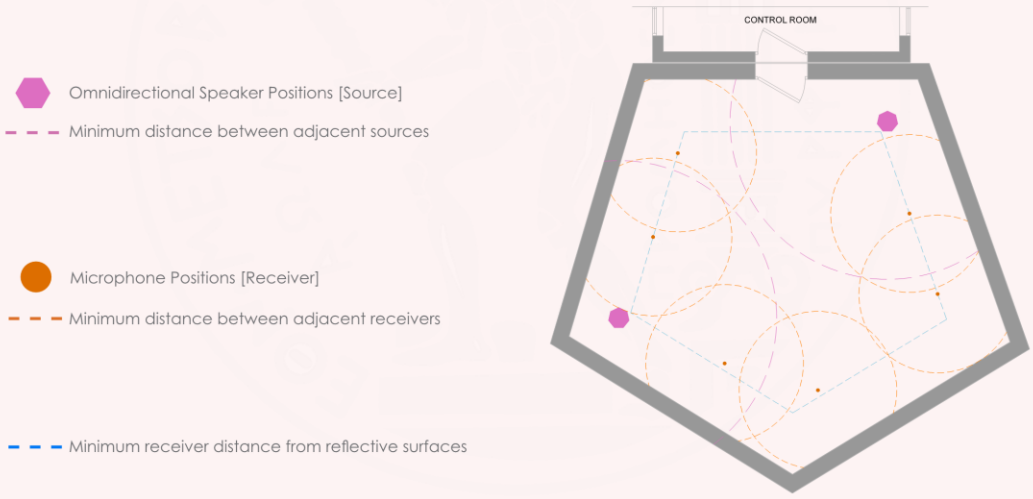
The measurements were carried out based on the guidelines of the International Organization for Standardization and in particular according to:

ISO 354

Measurement of sound absorption in a reverberation room

The acoustic tests were executed in the reverberation chamber of the Acoustics Laboratory - National Technical University of Athens, Greece.

The test room has a volume of 242.8 m^3 and its floor plan is illustrated below. The ceiling of the test room is relatively inclined, compared to the ground level. The diffuse field is further enhanced by the permanently installed ceiling diffusers. Additional diffusive elements are placed diametrically opposed two of the corners of the chamber in order to eliminate potential standing waves.



As depicted from the drawing above, an omnidirectional source (dodecahedron speaker) and a point receiver (microphone) were placed into the reverberation chamber in order to achieve a combination of 12 measuring positions as directed by the ISO 354:2003. The measurements were executed in 1/3 octave band analysis (Lz Weighting) follwing the precision method.

For each receiver position the following parameters were sampled:

i) The average background sound pressure level of the test room [Sound Source Off]

ii) The reverberation time with the test item installed in the test room [Interrupted Noise Method]

iii) The reverberation time without the test item in the test room [Interrupted Noise Method]

(Note: The dismantling of the test item has been completed within 10 minutes)

CALCULATION METHODOLOGY

Following the measurement procedure, the absorption coefficient per 1/3 octave band is calculated according to the method also described in:

ISO 354

Measurement of sound absorption in a reverberation room

The absorption curve of the test item was extracted from the 1/3 octave band values [a_s].

For the calculation of a_s for each 1/3 octave band between 100 Hz - 5000 Hz the following formula was used:

The sound absorption coefficient of the test item per 1/3 octave band [Sabine]

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

The surface area of test item [m²]

The equivalent sound absorption area of the test specimen [m²] is calculated from the following formula:

$$A_T = A_2 - A_1$$

The equivalent sound absorption area of the reverberation room w/o a test specimen (A1) and w/ the test item installed (A2) [m²] is calculated respectively as follows:

$$A_{1,2} = \frac{55,3\ V}{c_{1,2}\ T_{1,2}} - 4\ V\ m_{1,2}$$

The speed of sound [m/s] both before and after the installation of the test item is calculated respectively by the formula:

$$c = (331 + 0{,}6t\,/\,°C)$$

The measured reverberation time for each case [Seconds]

The power attenuation coefficient, in reciprocal metres, calculated according to ISO 9613-1. It can be calculated from the attenuation coefficient, "a", which is used in ISO 9613-1 according to the formula:

$$m_{1,2} = \frac{a}{10\ log(e)}$$

RATING METHODOLOGY

After the completion of the calculations stage, the following ISO standard was used for rating and defining the absorption performance of the test item:

ISO 11654

Sound absorbers in buildings
Rating of sound absorption

The calculation of the a_w absorption coefficient was executed by shifting the reference curve, using the method described in paragraph 4.2 of the aforementioned ISO Standard.

The sound absorber was classified using the following correlation matrix (Appendix B | ISO 11654:1997) :

SOUND ABSORPTION CLASS	a_w
A	0,90 | 0,95 | 1,00
B	0,80 | 0,85
C	0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75
D	0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55
E	0,25 | 0,20 | 0,15
Not Classified	0,10 | 0,05 | 0,00

In addition to the above, the Noise Reduction Coefficient was also calculated for the test element in subject, according to the stipulations delineated by the American Society for Testing and Materials (ASTM) and in particular as described in:

ASTM C423
Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

The Noise Reduction Coefficient calculation formula is shown below:

$$NRC = \frac{[a_{s\ (250\ Hz)} + a_{s\ (500\ Hz)} + a_{s\ (1000\ Hz)} + a_{s\ (2000\ Hz)}]}{4}$$

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

MEASUREMENT EQUIPMENT

NTi XL2 Frequency Analyser

M2210 Class I Microphone

NTi Minirator MR-PRO Signal Generator

Bruel & Kjaer Type 4231 Sound Calibrator

Bruel & Kjaer Type 4292-L Omnipower Sound Source

Lab Gruppen - Lab 300 Sound Amplifier

Gitzo Tripods

Rotronic BL-1D Thermometer - Hygrometer-Atmospheric Pressure
(Precision 0.15 °C | 1.1 % RH | 0.3 hPa)

Bosch PLR 50 Professional Laser Range Finder

XLR & SPEAKON Cables

MEASUREMENT CONDITIONS

	Chamber w/o Test Item	Chamber w/ Test Item
Average Temp.	16.0 °C	16.1 °C
Relative Humidity	62.0 %	62.0 %
Atmospheric Pressure	99200 Pa	99200 Pa

TECHNICAL DESCRIPTION

According to the manufacturer's data sheet, the test item installed by the contractor consists of the following components:

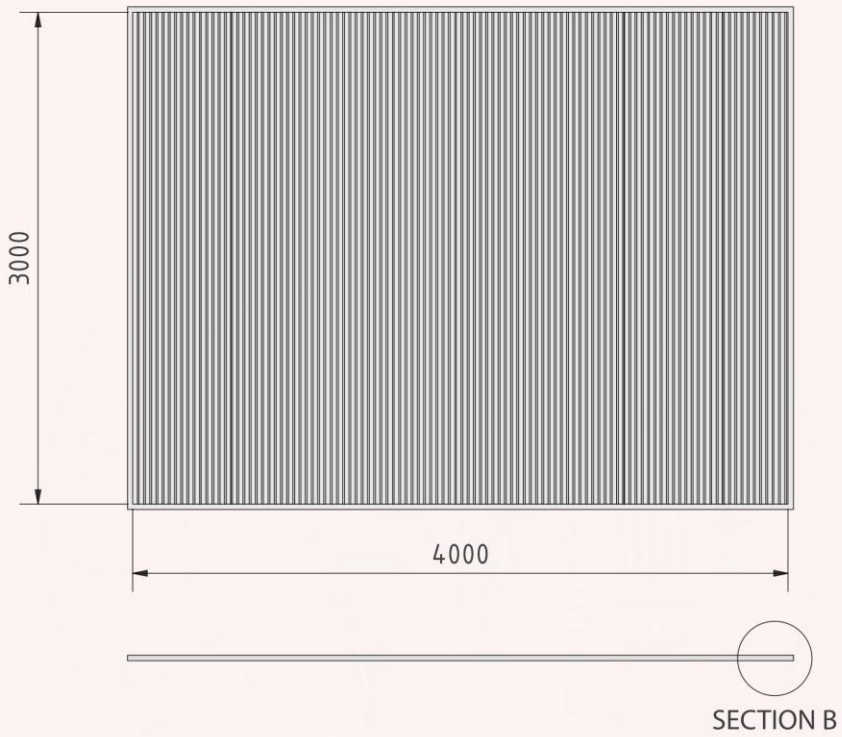
The panels are made of a layer of black PET polyester (back side) 12 mm, density 203 kg/m³ on which 27 mm wide and 10 mm thickness veneered black MDF (L.A.F.) strips are placed.

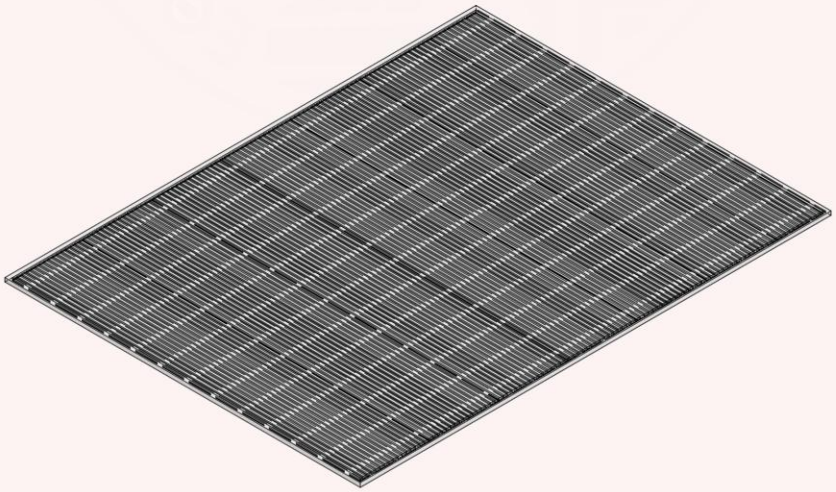
The strips are attached to the polyester sheet at a (nominal) distance of 13 mm from each other thus creating acoustic channels.

The panels have dimensions of 2400 x 600 x 22 mm or 3000 x 600 x22 mm with a total thickness of 22 mm

TECHNICAL DRAWINGS

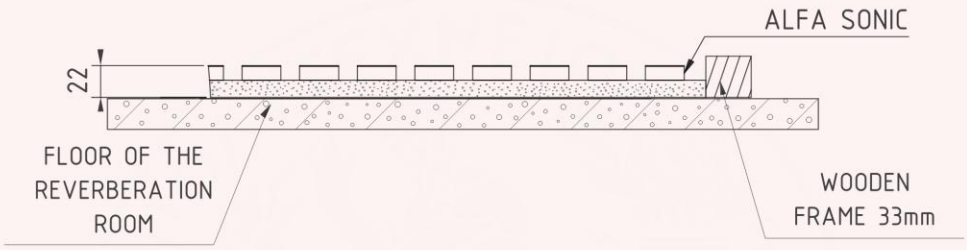
The technical drawings provided by the contractor are illustrated below:



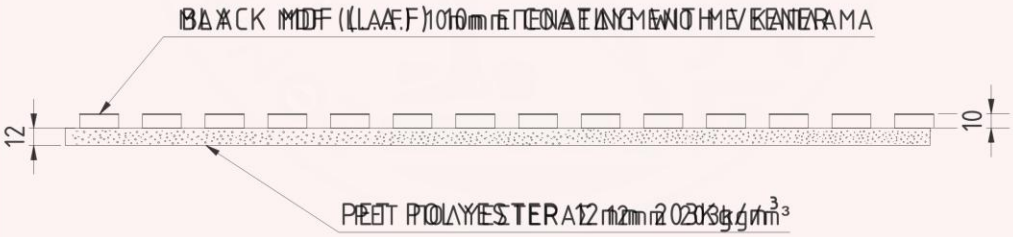


TECHNICAL DRAWINGS

SECTION B



SECTION ALFA SONIC



N.T.U.A - School of Architecture

Acoustics Laboratory

TEST SETUP - INSTALLATION WITHIN THE REVERB CHAMBER



Overview

N.T.U.A - School of Architecture

Acoustics Laboratory

TEST SETUP - INSTALLATION WITHIN THE REVERB CHAMBER



Surface close-up detail

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

REVERBERATION TIME CURVES

The RT60 curves of the chamber before (T1) and after (T2) the installation of the test item are illustrated in the following graph:

Frequency [Hz]	T1 [s]	T2 [s]
100	15.28	14.02
125	12.54	11.33
160	12.79	10.71
200	13.22	10.15
250	13.95	9.70
315	12.31	8.02
400	10.08	6.01
500	10.53	5.09
630	9.99	4.16
800	9.39	3.42
1000	8.71	2.89
1250	7.90	2.58
1600	6.72	2.35
2000	5.57	2.16
2500	4.37	1.98
3150	3.42	1.82
4000	2.66	1.59
5000	2.20	1.48



● **T1** - RT60 curve prior the installation of the test item [Empty Reverberation Chamber]

▲ **T2** - RT60 curve after the installation of the test item

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

MEASUREMENT RESULTS

The performance indices and spectral analysis for the predescribed test item are as follows :

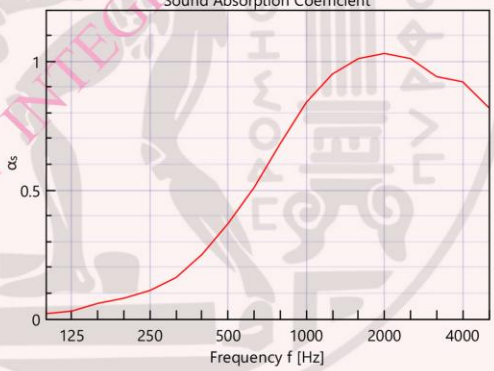
Sound absorption according to ISO 354:2003
Measurement of sound absorption in a reverberation room

Client: Alfa Wood Group Date of test: 10/3/2023
Object: Composite Sound Absorbing Panel | As per manufacturer's description & technical drawings [Attached]
Type-A Mounting

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΝ
ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΛΙΔΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΑΝ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ

Room Volume: 242.8 m³ Specimen Area: 10.8 m²
T1 Temperature: 16 °C Humidity: 62 % Pressure: 99.2 kPa
T2 Temperature: 16.1 °C Humidity: 62 % Pressure: 99.2 kPa

Freq f Hz	T1 RT s	T2 RT s	α_s	α_p
100	15.28	14.02	0.02	
125	12.54	11.33	0.03	0.05
160	12.79	10.71	0.06	
200	13.22	10.15	0.08	
250	13.95	9.70	0.11	0.10
315	12.31	8.02	0.16	
400	10.08	6.01	0.25	
500	10.53	5.09	0.37	0.40
630	9.99	4.16	0.51	
800	9.39	3.42	0.68	
1000	8.71	2.89	0.84	0.80
1250	7.90	2.58	0.95	
1600	6.72	2.35	1.01	
2000	5.57	2.16	1.03	1.00
2500	4.37	1.98	1.01	
3150	3.42	1.82	0.94	
4000	2.66	1.59	0.92	0.90
5000	2.20	1.48	0.82	



Rating in accordance with ISO 11654:1997:
α_w = 0.40 (MH) Class D

Rating in accordance with ASTM C423-17:
NRC = 0.60 SAA = 0.58

Παράρτημα 2 Πιστοποιητικό ακουστικής απόδοσης καθισμάτων

(NTUA, Acoustics Research & Simulation Lab, 2025)





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ACOUSTICS RESEARCH & SIMULATION LAB

School of Architecture

9 Iroon Politechneiou, Zografou Campus, 157 80 Athens, tel: 210-7721394, Fax 1393

Certificate of acoustic performance
Sound absorption coefficients laboratory test

α_w | Sound Absorption Class | NRC

ISO 354
Measurement of sound absorption in a reverberation room

ISO 11654
Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption

ASTM C423
Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

Certificate Serial Number: *BIR S aw 104-2025*

Total Pages: *13*

Contractor: *BIRO Hellas*

Test Element Type: *Seats*

Contractor's Test Element ID : *Biro Type Axia*

Measurement Location: *NTUA Acoustics Laboratory - Zografou Campus, Athens-Greece*

Transaction Details: *1457614028 NBG iBank Electronic Payment]*

Issue Date: *01 - 06 - 2025*

NOMENCLATURE

T20 - Reverberation Time

The time, in seconds, that would be required for the sound pressure level to decrease by 20 dB after the sound source has stopped.

T1 - Empty Chamber Reverberation Time

The reverberation time per 1/3 octave band of the test room prior to the installation of the test item and without the presence of people or other factors that can modify the reverberation time measurement results.

T2 - Reverberation Time with the test object installed

The reverberation time per 1/3 octave band of the test room after the installation of the test item and without the presence of people or other factors that can modify the reverberation time measurement results.

S - Surface Area

The area of the floor or wall covered by the test specimen in m^2.

α_s - 1/3 Octave Band Absorption Coefficient

The ratio of the equivalent sound absorption area of a test specimen divided by the area of the test specimen for the frequency range of 100 Hz - 5000 Hz .

α_{pi} - Practical Absorption Coefficient

Frequency-dependent value of the sound absorption coefficient which is based on measurements on 1/3 octave bands in accordance with ISO 354 and which is calculated in octave bands in accordance with ISO 11654:1997

α_w - Weighted Absorption Coefficient

The value of the shifted reference curve at 500 Hz, calculated using the method described in ISO 11654:1997 .

Absorption Class

The classification of the absorptive performance of the test item based on its weighted absorption coefficient.

NRC - Noise Reduction Coefficient

The arithmetic average, rounded to the nearest multiple of 0.05, of the absorption coefficients determined at the octave band centre frequencies of 250, 500, 1000 and 2000 Hz.

Mounting Type

Defines how the test item is arranged/fixed in the test room according to the methods described in Appendix B of ISO 354:2003

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

DESCRIPTION OF THE MEASUREMENT PROCESS

The present report describes the process of measuring and assessing the sound absorption performance indices of the test item in subject.

The measurements were carried out based on the guidelines of the International Organization for Standardization and in particular according to:

ISO 354

Measurement of sound absorption in a reverberation room

The acoustic tests were executed in the reverberation chamber of the Acoustics Laboratory - National Technical University of Athens, Greece.

The test room has a volume of 242.8 m^3 and its floor plan is illustrated below. The ceiling of the test room is relatively inclined, compared to the ground level. The diffuse field is further enhanced by the permanently installed ceiling diffusers. Additional diffusive elements are placed diametrically opposed two of the corners of the chamber in order to eliminate potential standing waves. As depicted from the below drawings, an omnidirectional source (dodecahedron speaker) and a point receiver (microphone) were placed into the reverberation chamber in order to achieve a combination of 12 measuring positions as directed by the ISO 354:2003. The measurements were executed in 1/3 octave band analysis (Lz Weighting) following the precision method.

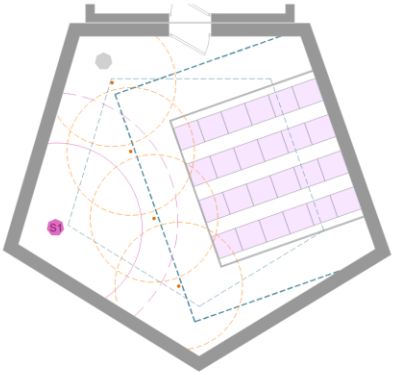
For each receiver position the following parameters were sampled:

i) The average background sound pressure level of the test room [Sound Source Off]

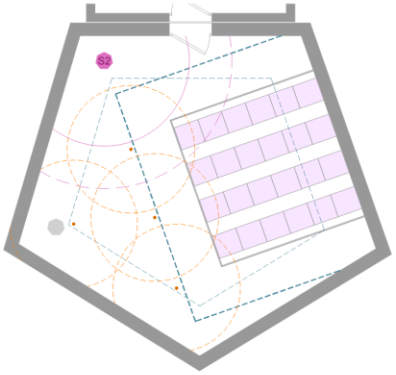
ii) The reverberation time with the test item installed in the test room [Interrupted Noise Method]

iii) The reverberation time without the test item in the test room [Interrupted Noise Method]

Source 1 test Setup



Source 2 test setup



Omnidirectional Speaker Positions [Source]

Inactive Omnidirectional Speaker

Minimum distance between adjacent sources

Minimum distance between active source & receivers

Microphone Positions [Receiver]

Minimum distance between adjacent receivers

Minimum receiver distance from reflective surfaces, including the test element's perimetrical barrier

CALCULATION METHODOLOGY

Following the measurement procedure, the absorption coefficient per 1/3 octave band is calculated according to the method also described in:

ISO 354

Measurement of sound absorption in a reverberation room

The absorption curve of the test item was extracted from the 1/3 octave band values [a_s].

For the calculation of a_s for each 1/3 octave band between 100 Hz - 5000 Hz the following formula was used:

The sound absorption coefficient of the test item per 1/3 octave band [Sabine]

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

The surface area of test item [m²]

The equivalent sound absorption area of the test specimen [m²] is calculated from the following formula:

$$A_T = A_2 - A_1$$

The equivalent sound absorption area of the reverberation room w/o a test specimen (A1) and w/ the test item installed (A2) [m²] is calculated respectively as follows:

$$A_{1,2} = \frac{55,3 \cdot V}{c_{1,2} \cdot T_{1,2}} - 4 \cdot V \cdot m_{1,2}$$

The speed of sound [m/s] both before and after the installation of the test item is calculated respectively by the formula:

$$c = (331 + 0,6t/°C)$$

The measured reverberation time for each case [Seconds]

The power attenuation coefficient, in reciprocal metres, calculated according to ISO 9613-1. It can be calculated from the attenuation coefficient, "a", which is used in ISO 9613-1 according to the formula:

$$m_{1,2} = \frac{a}{10 \cdot \log(e)}$$

RATING METHODOLOGY

After the completion of the calculations stage, the following ISO standard was used for rating and defining the absorption performance of the test item:

ISO 11654

Sound absorbers in buildings
Rating of sound absorption

The calculation of the a_w absorption coefficient was executed by shifting the reference curve, using the method described in paragraph 4.2 of the aforementioned ISO Standard.

The sound absorber was classified using the following correlation matrix (Appendix B | ISO 11654:1997) :

SOUND ABSORPTION CLASS	a_w
A	0,90 | 0,95 | 1,00
B	0,80 | 0,85
C	0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75
D	0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55
E	0,25 | 0,20 | 0,15
Not Classified	0,10 | 0,05 | 0,00

In addition to the above, the Noise Reduction Coefficient was also calculated for the test element in subject, according to the stipulations delineated by the American Society for Testing and Materials (ASTM) and in particular as described in:

ASTM C423
Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

The Noise Reduction Coefficient calculation formula is shown below:

$$NRC = \frac{[a_{s\ (250\ Hz)} + a_{s\ (500\ Hz)} + a_{s\ (1000\ Hz)} + a_{s\ (2000\ Hz)}]}{4}$$

MEASUREMENT EQUIPMENT

NTi XL2 Frequency Analyser

M2210 Class I Microphone

NTi Minirator MR-PRO Signal Generator

Bruel & Kjaer Type 4231 Sound Calibrator

Bruel & Kjaer Type 4292-L Omnipower Sound Source

Lab Gruppen - Lab 300 Sound Amplifier

Gitzo Tripods

Rotronic BL-1D v 4.0 Thermometer - Hygrometer-Atmospheric Pressure
(Precision ±0.3°C, ±3.0% , ±3 hPa)

Bosch PLR 50 Professional Laser Range Finder

XLR & SPEAKON Cables

MEASUREMENT CONDITIONS

	Chamber w/o Test Item	Chamber w/ Test Item
Average Temp.	16.4 °C	16.1 °C
Relative Humidity	47 %	48 %
Atmospheric Pressure	100000 Pa	100000 Pa

TECHNICAL DESCRIPTION

According to the manufacturer's data sheet, the test item installed by the contractor consists of the following components:

GENERAL INFORMATION

The chair can be installed in straight or curved lines.

It consists of seat, backrest, and side supporting frame (leg) with armrest. The side supporting frame (leg) with the arm is inserted between two successive seats and the end of each row finishes with an additional side frame (leg).

BACKREST

Backrest is made of shaped plywood 18-19 mm thicknesses. Backrest's cushion is made of anatomical shaped polyurethane foam 4 - 8cm thickness and it is upholstered with flame retardant fabric (according to manufacturer's declaration)

SEAT

Seat's cushion with internal metal frame is made of cold-moulded polyurethane foam anatomically shaped and upholstered with flame retardant fabric (according to manufacturer's declaration)

At the bottom there is a perforated wooden cover. Its total thickness is 110 mm.

It is equipped with automatic seat - raising system.

SIDE SUPPORTING FRAME (LEG)

The chair's lateral leg system consists of wooden frame. It is varnished.
A special (almost hidden) foot blade ensures exceptional stability.

Armrest made of solid oak wood is placed on the top of the frame.

ANTI-PANIC WRITING TABLET:

Anti-Panic writing tablet concealed in the side frame (leg). It operates based on an anti-panic inclination system with aluminum bracket and steel mechanism. While the writing tablet is not in use, it is covered inside the frame.

FABRIC:

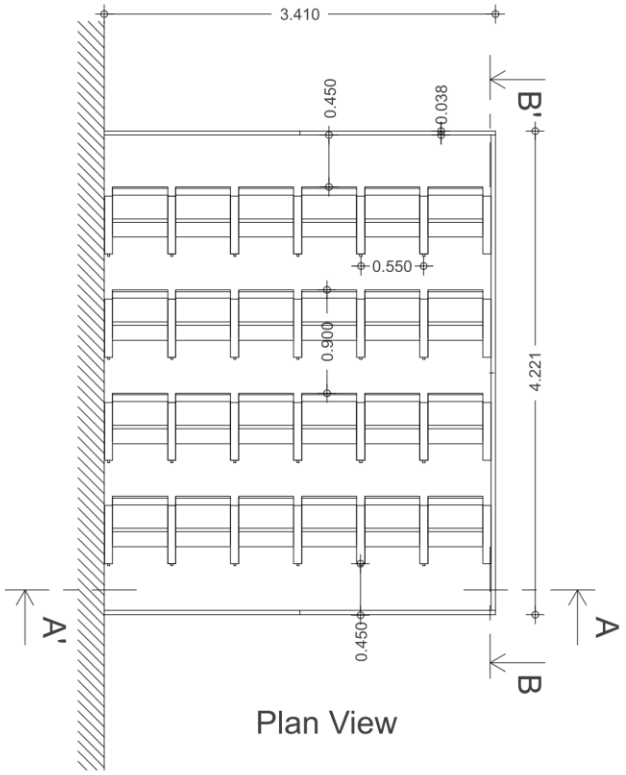
The fabric for the seat and backrest is a high strength and flame retardant fabric (according to manufacturer's declaration) from BRAVO series certificated according to the BS 5852 Crib N°5 , EN 1021 Part 1-2 , 1 IM (UNI 9175) and also certificated for abrasion according to the UNI EN ISO 12947 standard for 100.000 Martindale cycles.

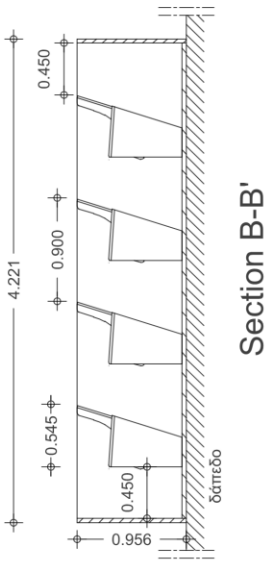
N.T.U.A - School of Architecture

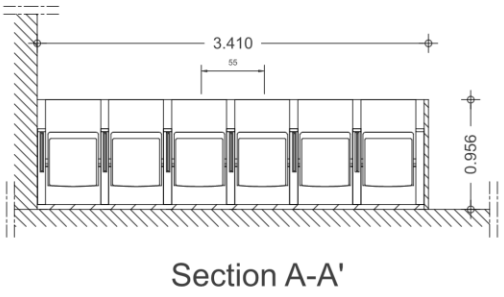
Acoustics Laboratory

TECHNICAL DRAWINGS

The technical drawings provided by the contractor are illustrated below:







BIRO Chairs Type Axia

Scale 1:50 @ A4 (Non-Fit printing)

N.T.U.A - School of Architecture

Acoustics Laboratory

TEST SETUP - INSTALLATION WITHIN THE REVERB CHAMBER



N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

TEST SETUP - INSTALLATION WITHIN THE REVERB CHAMBER



N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

TEST SETUP - INSTALLATION WITHIN THE REVERB CHAMBER



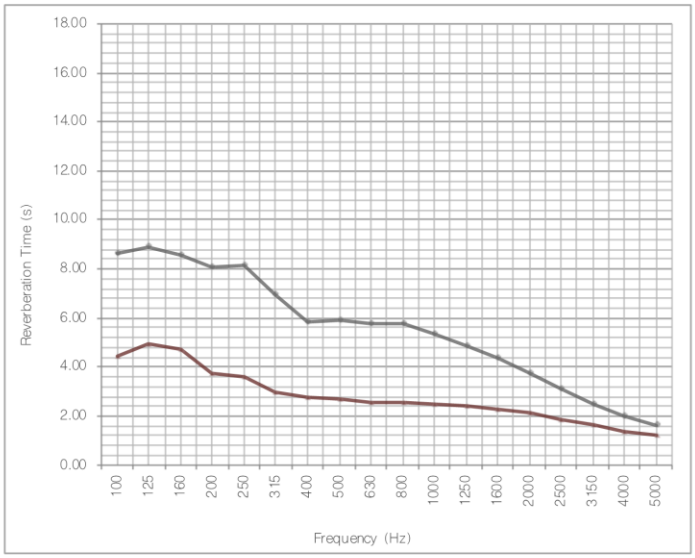
N.T.U.A - School of Architecture

Acoustics Laboratory

REVERBERATION TIME CURVES

The RT60 curves of the chamber before (T1) and after (T2) the installation of the test item are illustrated in the following graph:

Frequency [Hz]	T1 [s]	T2 [s]
100	8.61	4.47
125	8.89	4.95
160	8.60	4.69
200	8.11	3.77
250	8.17	3.62
315	6.94	2.97
400	5.82	2.77
500	5.91	2.68
630	5.80	2.58
800	5.79	2.58
1000	5.35	2.50
1250	4.83	2.40
1600	4.38	2.29
2000	3.73	2.15
2500	3.11	1.87
3150	2.51	1.65
4000	1.99	1.40
5000	1.62	1.23



T1 - RT60 curve prior the installation of the test item [Empty Reverberation Chamber]

T2 - RT60 curve after the installation of the test item

N.T.U.A - School of Architecture Acoustics Laboratory

MEASUREMENT RESULTS

The performance indices and spectral analysis for the predescribed test item are as follows :

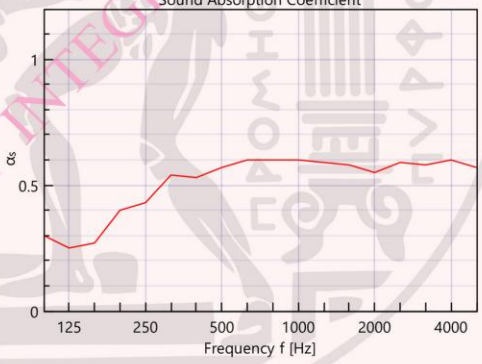
Sound absorption according to ISO 354:2003
Measurement of sound absorption in a reverberation room

Client: BIRO Hellas Date of test: 8/4/2025
Object: Seats | Model "Axia" | As per manufacturer's description & technical drawings [Attached]
Type J | Well Approach

MEASUREMENT RESULTS PAGE
AS AN INTEGRAL PART OF THE CERTIFICATE

Room Volume: 242.8 m³ Specimen Area: 14.1 m²
T1 Temperature: 16.4 °C Humidity: 47 % Pressure: 100 kPa
T2 Temperature: 16.1 °C Humidity: 48 % Pressure: 100 kPa

Freq f Hz	T1 RT s	T2 RT s	α_s	α_p
100	8.61	4.47	0.30	
125	8.89	4.95	0.25	0.25
160	8.60	4.69	0.27	
200	8.11	3.77	0.40	
250	8.17	3.62	0.43	0.45
315	6.94	2.97	0.54	
400	5.82	2.77	0.53	
500	5.91	2.68	0.57	0.55
630	5.80	2.58	0.60	
800	5.79	2.58	0.60	
1000	5.35	2.50	0.60	0.60
1250	4.83	2.40	0.59	
1600	4.38	2.29	0.58	
2000	3.73	2.15	0.55	0.55
2500	3.11	1.87	0.59	
3150	2.51	1.65	0.58	
4000	1.99	1.40	0.60	0.60
5000	1.62	1.23	0.57	



Rating in accordance with ISO 11654:1997:
α_w = 0.60 Class C

Rating in accordance with ASTM C42317:
NRC = 0.55 SAA = 0.55

Παράρτημα 3 Προδιαγραφές διάτρητης γυψοσανίδας

Απόσπασμα (Knauf, n.d.)



Knauf Cleaneo Acoustic Board Ceilings

Cleaneo Classic

D127.de – Knauf Cleaneo Acoustic Board Ceiling
D124.de – Knauf Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceiling
D126U.de – Knauf Cleaneo Acoustic Board Ceiling UFF for Acoustical Plaster
D137.de – Knauf Free-Spanning Cleaneo Acoustic Board Ceiling
D134.de – Knauf Free-Spanning Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceiling

Note on English translation / Hinweise zur englischen Fassung

This is a translation of the system data sheet valid in Germany.
All stated details and properties are in compliance with the regulations of the German standards and building regulations. They are only applicable for the specified products, system components, application rules, and construction details in connection with the specifications of the respective certificates and approvals.
Knauf Gips KG denies any liability for applications outside of Germany as this requires changes acc. to the respective national standards and building regulations.

Dies ist eine Übersetzung des in Deutschland gültigen Detailblattes. Alle angegebenen Werte und Eigenschaften entsprechen den in Deutschland gültigen Normen und bauaufsichtlichen Regelungen. Sie gelten nur bei Verwendung der angegebenen Produkte, Systemkomponenten, Anwendungsregeln und Konstruktionsdetails in Verbindung mit den Vorgaben der bauaufsichtlichen Nachweise.
Die Knauf Gips KG lehnt jegliche Haftung für Einsatz und Anwendung außerhalb Deutschlands ab, da in diesem Fall eine Anpassung an nationale Normen und bauaufsichtliche Regelungen notwendig ist.

Contents

Introduction

Usage instructions I General instructions ... 4
- Usage instructions ... 4
- Notes on the document ... 4
- References to other documents ... 4
- Intended use of Knauf Systems ... 4
- General instructions ... 4

Rating principles I Certificates of Usability ... 5

System overview ... 6

Data for planning

D127.de Cleaneo Acoustic Board Ceiling ... 8

D124.de Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceiling ... 10

D126U.de Cleaneo Acoustic Board Ceilings UFF for Acoustical Plaster ... 12

D137.de Free-Spanning Cleaneo Acoustic Board Ceiling ... 14

D134.de Free-Spanning Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceiling ... 16

Edge designs ... 18

Board design ... 21

Ball impact safety ... 29

Airborne and impact sound insulation ... 30

Sound absorption – Fundamentals ... 34

D127.de Sound absorption ... 37

D124.de Sound absorption ... 48

D126U.de Sound absorption ... 50

D134.de Sound absorption ... 52

D134.de/D137.de Sound absorption ... 53

Suspenders ... 54

Construction heights – suspended ceilings ... 56

Planning of joints ... 58

Anchoring of loads ... 59

Construction details

D127.de Cleaneo Acoustic Board Ceiling ... 60

D124.de Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceilings ... 64

D126U.de Cleaneo Acoustic Board Ceiling UFF for Acoustical Plaster ... 66

D137.de Free-Spanning Cleaneo Acoustic Board Ceiling ... 68

D134.de Free-Spanning Cleaneo Acoustic Fire Protection Ceiling ... 69

Special details ... 70

Special details

Multi-Level Ceiling System ... 74

Installation and application

Grid – suspended ceilings 75
Grid – free-spanning ceiling 76
Insulation layer 78
Top side covering layer I Cladding 79
Cladding 80
Jointing 82
Coatings and linings 83

Material requirement

Cleaneo Acoustic board ceilings – suspended 84
Cleaneo Acoustic board ceilings – free-spanning 86

Information on sustainability

Knauf Cleaneo Acoustic Board Ceilings 88

KNAUF

Data for planning

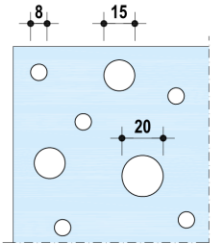
Board design

Cleaneo Classic boards – continuous perforation

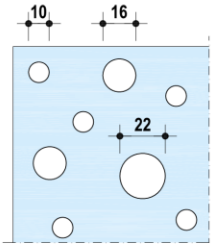
Scheme drawings I Face side I Dimensions in mm

Design	Perforation	Perforation ratio (board) %	Board dimensions (standard sizes) Width mm	Length mm	Furring channel Maximum spacings (b) mm	Edge designs 4SK	UFF	linear
Random perforation	8/15/20 R	9.9	1200	2000	333.3	●	●	–
	10/16/22 R	12.6	1200	2000	333.3	–	●	–
	12/20/35 R	9.8	1200	1875	312.5	–	●	–
Random perforation RE	–	13.6	1199	1999	333.3	–	●	–

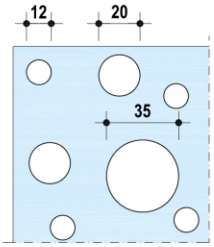
Random perforation 8/15/20 R



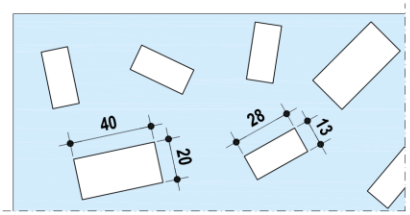
Random perforation 10/16/22 R



Random perforation 12/20/35 R



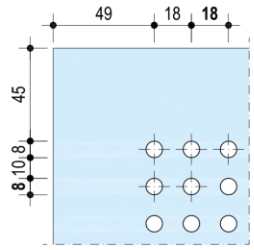
Random perforation RE



Cleaneo Classic boards – Complete

Design	Perforation	Perforation ratio (board) %	Board dimensions (standard sizes) Width mm	Length mm	Furring channel Maximum spacings (b) mm	Edge designs 4FK
Standard circular perforation	8/18 R	12.6	620	1250	250	●

Standard circular perforation 8/18 R



Axial spacings of the furring channel (b): With case related manufacturing (e.g. according to installation plan) the axial spacings must be adapted to the board dimensions (observe the maximum permissible axial spacings).

Other variants or customized designs with Cleaneo Classic boards on request.

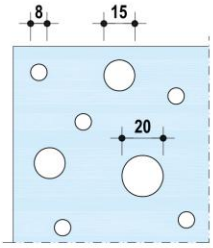
D127.de
D124.de
D126U.de
D137.de
D134.de

Cleaneo Classic boards – continuous perforation

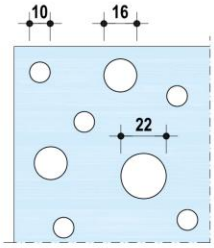
Scheme drawings I Face side I Dimensions in mm

Design	Perforation	Perforation ratio (board) %	Board dimensions (Standard sizes) Width mm	Length mm	Furring channel Maximum spacings (b) mm	Edge designs 4SK	UFF	linear
Random perforation	8/15/20 R	9.9	1200	2000	333.3	●	●	–
	10/16/22 R	12.6	1200	2000	333.3	●[1)]	●	–
	12/20/35 R	9.8	1200	2000	333.3	–	●	–
Random perforation RE	–	13.6	1199	1999	333.3	●[1)]	●	–

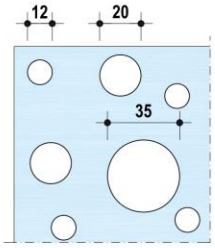
Random perforation 8/15/20 R



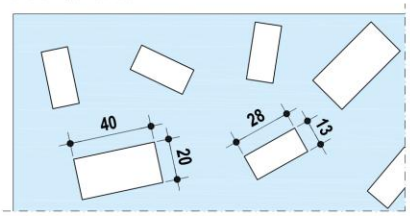
Random perforation 10/16/22 R



Random perforation 12/20/35 R



Random perforation RE



D127.de
D124.de
D126U.de
D137.de

1) *Edge type only with Cleaneo Tape Board*

Axial spacings of the furring channel (b): With case related manufacturing (e.g. according to installation plan) the axial spacings must be adapted to the board dimensions (observe the maximum permissible axial spacings).

Other variants or customized designs with Cleaneo Classic boards on request.

Note Refer to the product data sheets for the permissible bending radius for the Cleaneo Classic boards.

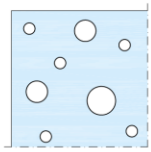
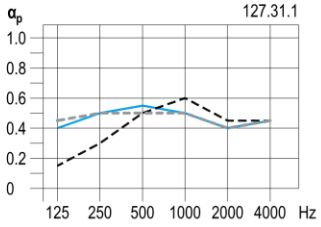
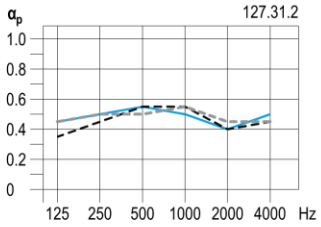
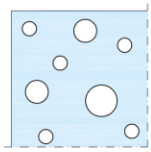
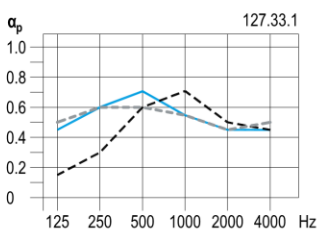
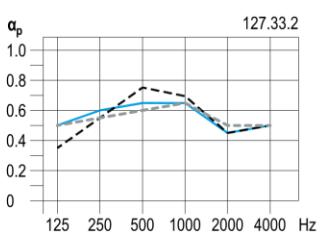
Data for planning

D127.de Sound absorption

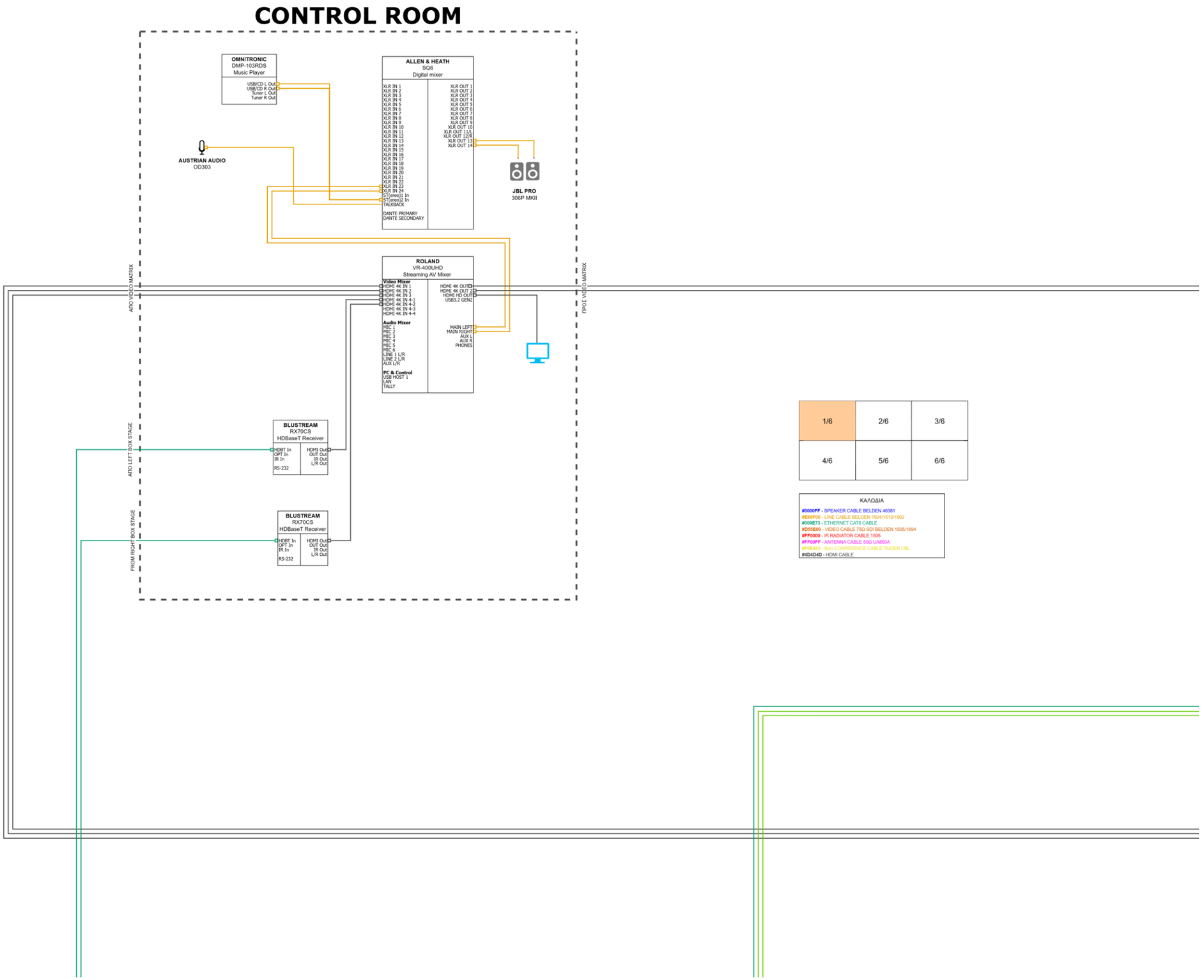
KNAUF

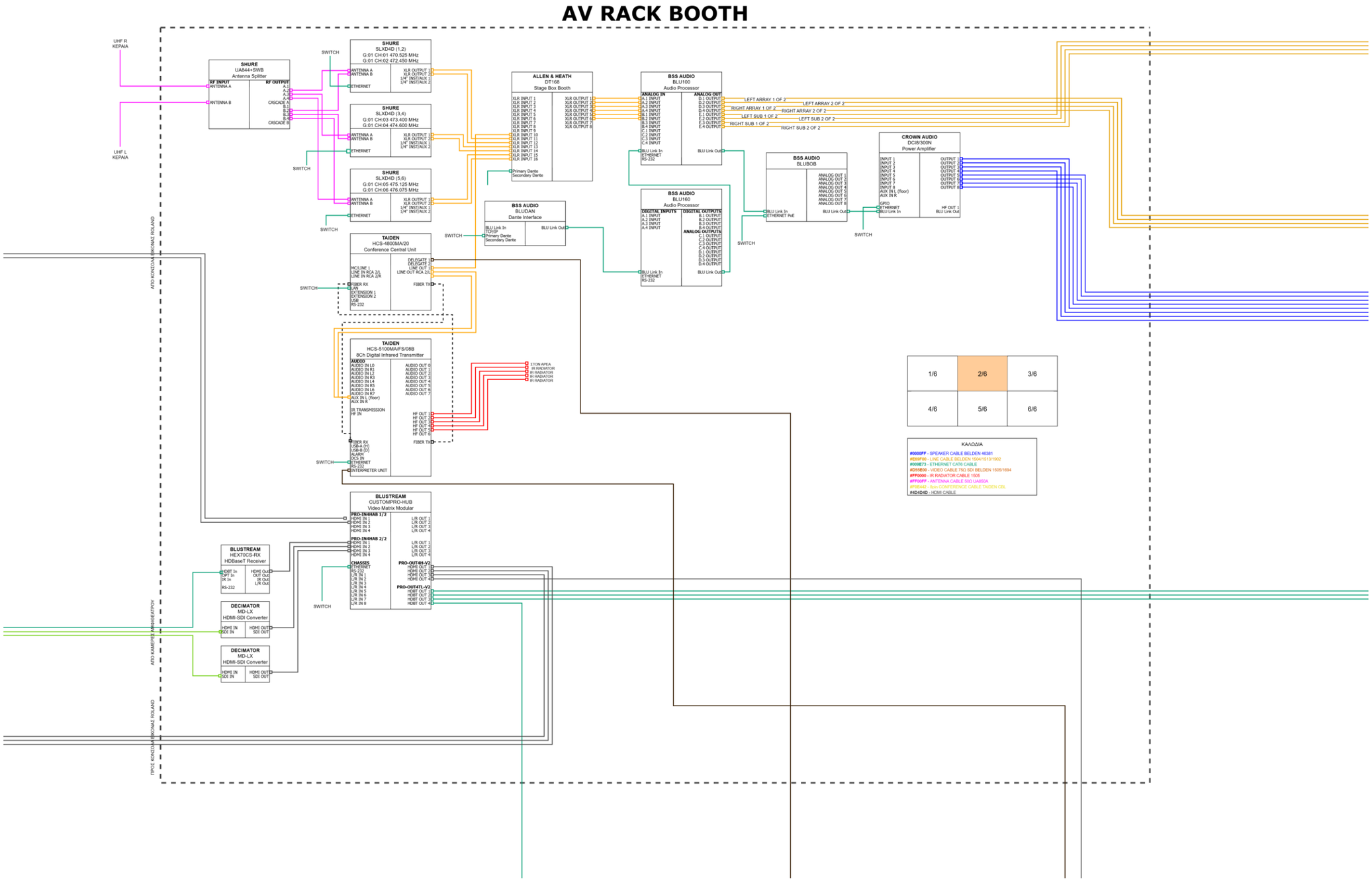
D127.de Cleaneo Acoustic Board Ceiling

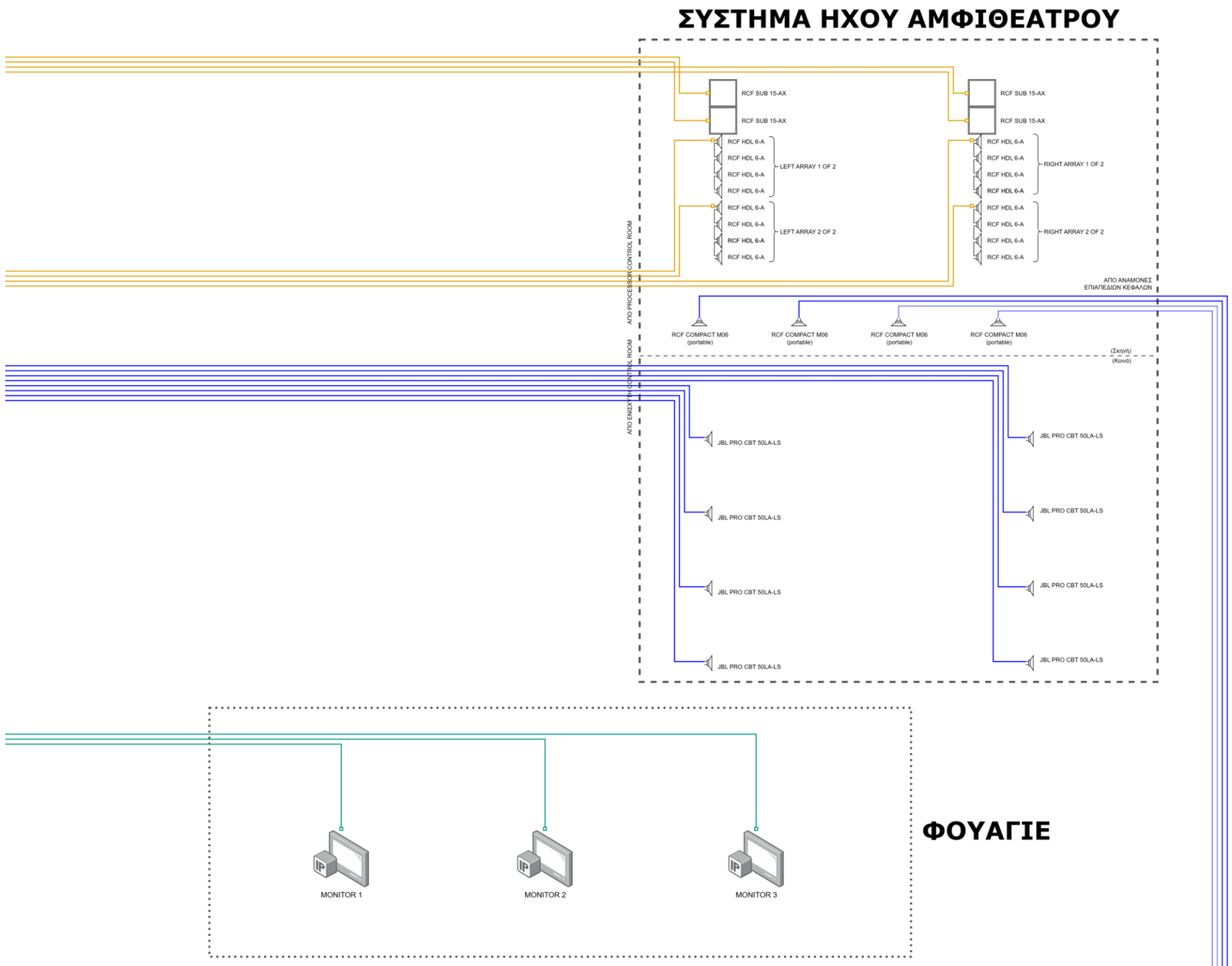
12.5 mm Cleaneo Classic Boards with Acoustical Fleece

Perforation pattern	Total construction height mm	NRC	α_w	Frequency-dependent absorption coefficient α_p 125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
	Without insulation layer									
Random perforation 8/15/20 R  Perforation ratio: 9.9%	**65**	0.45	**0.50**	0.15	0.30	0.50	0.60	0.45	0.45	
	200	0.50	**0.50**	0.40	0.50	0.55	0.50	0.40	0.45	
	400	0.45	**0.50**	0.45	0.50	0.50	0.50	0.40	0.45	
	With insulation layer (For requirements on insulation layer see Page 32)									
	65	0.50	**0.50**	0.35	0.45	0.55	0.55	0.40	0.45	
	200	0.50	**0.50**	0.45	0.50	0.55	0.50	0.40	0.50	
	400	0.50	**0.50**	0.45	0.50	0.50	0.55	0.45	0.45	
	Without insulation layer									
Random perforation 10/16/22 R  Perforation ratio: 12.6%	**65**	0.50	**0.55**	0.15	0.30	0.60	0.70	0.50	0.45	
	200	0.55	**0.55**	0.45	0.60	0.70	0.55	0.45	0.45	
	400	0.55	**0.55 (L)**	0.50	0.60	0.60	0.55	0.45	0.50	
	With insulation layer (For requirements on insulation layer see Page 32)									
	65	0.60	**0.55 (L)**	0.35	0.55	0.75	0.70	0.45	0.50	
	200	0.60	**0.55 (L)**	0.50	0.60	0.65	0.65	0.45	0.50	
	400	0.55	**0.60**	0.50	0.55	0.60	0.65	0.50	0.50	

Παράρτημα 4 Διάγραμμα AV συστήματος


CONTROL ROOM
OMNITRONIC
DMP-103RDS
Music Player
USB/CD L Out
USB/CD R Out
Tuner L Out
Tuner R Out
AUSTRIAN AUDIO
OD303
ALLEN & HEATH
SQ6
Digital mixer
XLR IN 1
XLR IN 2
XLR IN 3
XLR IN 4
XLR IN 5
XLR IN 6
XLR IN 7
XLR IN 8
XLR IN 9
XLR IN 10
XLR IN 11
XLR IN 12
XLR IN 13
XLR IN 14
XLR IN 15
XLR IN 16
XLR IN 17
XLR IN 18
XLR IN 19
XLR IN 20
XLR IN 21
XLR IN 22
XLR IN 23
XLR IN 24
ST(ereo)1 In
ST(ereo)2 In
TALKBACK
DANTE PRIMARY
DANTE SECONDARY
XLR OUT 1
XLR OUT 2
XLR OUT 3
XLR OUT 4
XLR OUT 5
XLR OUT 6
XLR OUT 7
XLR OUT 8
XLR OUT 9
XLR OUT 10
XLR OUT 11/L
XLR OUT 12/R
XLR OUT 13
XLR OUT 14
JBL PRO
306P MKII
ROLAND
VR-400UHD
Streaming AV Mixer
Video Mixer
HDMI 4K IN 1
HDMI 4K IN 2
HDMI 4K IN 3
HDMI 4K IN 4-1
HDMI 4K IN 4-2
HDMI 4K IN 4-3
HDMI 4K IN 4-4
Audio Mixer
MIC 1
MIC 2
MIC 3
MIC 4
MIC 5
MIC 6
LINE 1 L/R
LINE 2 L/R
AUX L/R
PC & Control
USB HOST 1
LAN
TALLY
HDMI 4K OUT1
HDMI 4K OUT 2
HDMI HD OUT
USB3.2 GEN2
MAIN LEFT
MAIN RIGHT
AUX L
AUX R
PHONES
ΑΠΟ VIDEO MATRIX
ΠΡΟΣ VIDEO MATRIX
ΑΠΟ LEFT BOX STAGE
FROM RIGHT BOX STAGE
BLUSTREAM
RX70CS
HDBaseT Receiver
HDBT In
OPT In
IR In
RS-232
HDMI Out
OUT Out
IR Out
L/R Out
BLUSTREAM
RX70CS
HDBaseT Receiver
HDBT In
OPT In
IR In
RS-232
HDMI Out
OUT Out
IR Out
L/R Out
1/6
2/6
3/6
4/6
5/6
6/6
ΚΑΛΩΔΙΑ
#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1504/1513/1902
#009E73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 1505
#FF00FF - ANTENNA CABLE 50Ω UA850A
#F0E442 - 8pin CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE

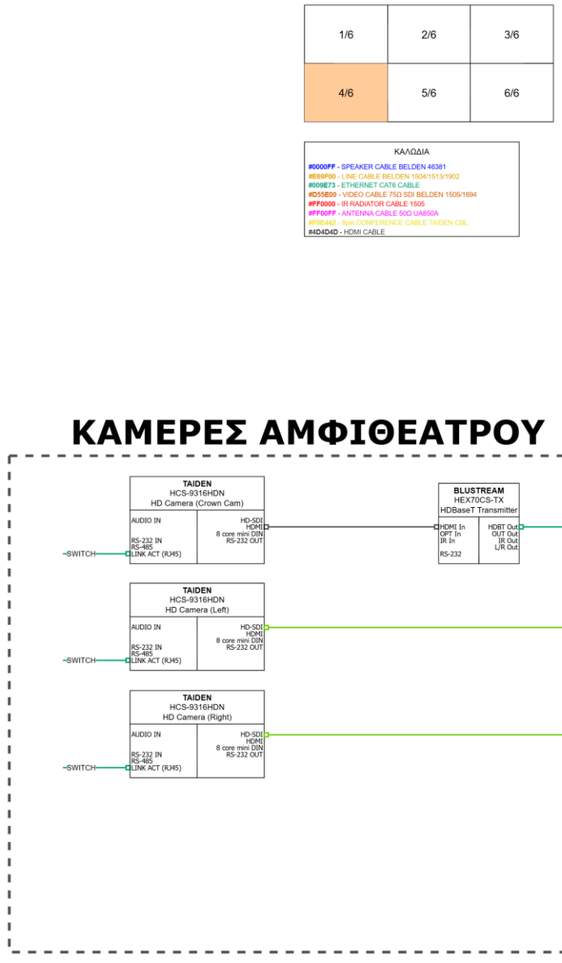

AV RACK BOOTH
UHF R ΚΕΡΑΙΑ
UHF L ΚΕΡΑΙΑ
SHURE
UA844+SWB
Antenna Splitter
SHURE
SLXD4D (1,2)
G 01 CH 01 470.525 MHz
G 01 CH 02 472.450 MHz
SHURE
SLXD4D (3,4)
G 01 CH 03 473.400 MHz
G 01 CH 04 474.600 MHz
SHURE
SLXD4D (5,6)
G 01 CH 05 475.125 MHz
G 01 CH 06 476.075 MHz
SWITCH
ETHERNET
TAIDEN
HCS-4800MA/20
Conference Central Unit
TAIDEN
HCS-5100MA/IFS/08B
8Ch Digital Infrared Transmitter
BLUSTREAM
CUSTOMPRO-HUB
Video Matrix Modular
BLUSTREAM
HEX70CS-RX
HDBaseT Receiver
DECIMATOR
MD-LX
HDMI-SDI Converter
DECIMATOR
MD-LX
HDMI-SDI Converter
ALLEN & HEATH
DT168
Stage Box Booth
BSS AUDIO
BLU100
Audio Processor
BSS AUDIO
BLUDAN
Dante Interface
BSS AUDIO
BLU160
Audio Processor
BSS AUDIO
BLUBOB
CROWN AUDIO
DCi8/300N
Power Amplifier
ΑΠΟ ΚΟΝΣΟΛΑ ΕΙΚΟΝΑΣ ROLAND
ΑΠΟ ΚΑΜΕΡΕΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΠΡΟΣ ΚΟΝΣΟΛΑ ΕΙΚΟΝΑΣ ROLAND
1/6
2/6
3/6
4/6
5/6
6/6
ΚΑΛΩΔΙΑ
#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1504/1513/1902
#009E73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 1505
#FF00FF - ANTENNA CABLE 50Ω UA850A
#F0E442 - 8xAU CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE

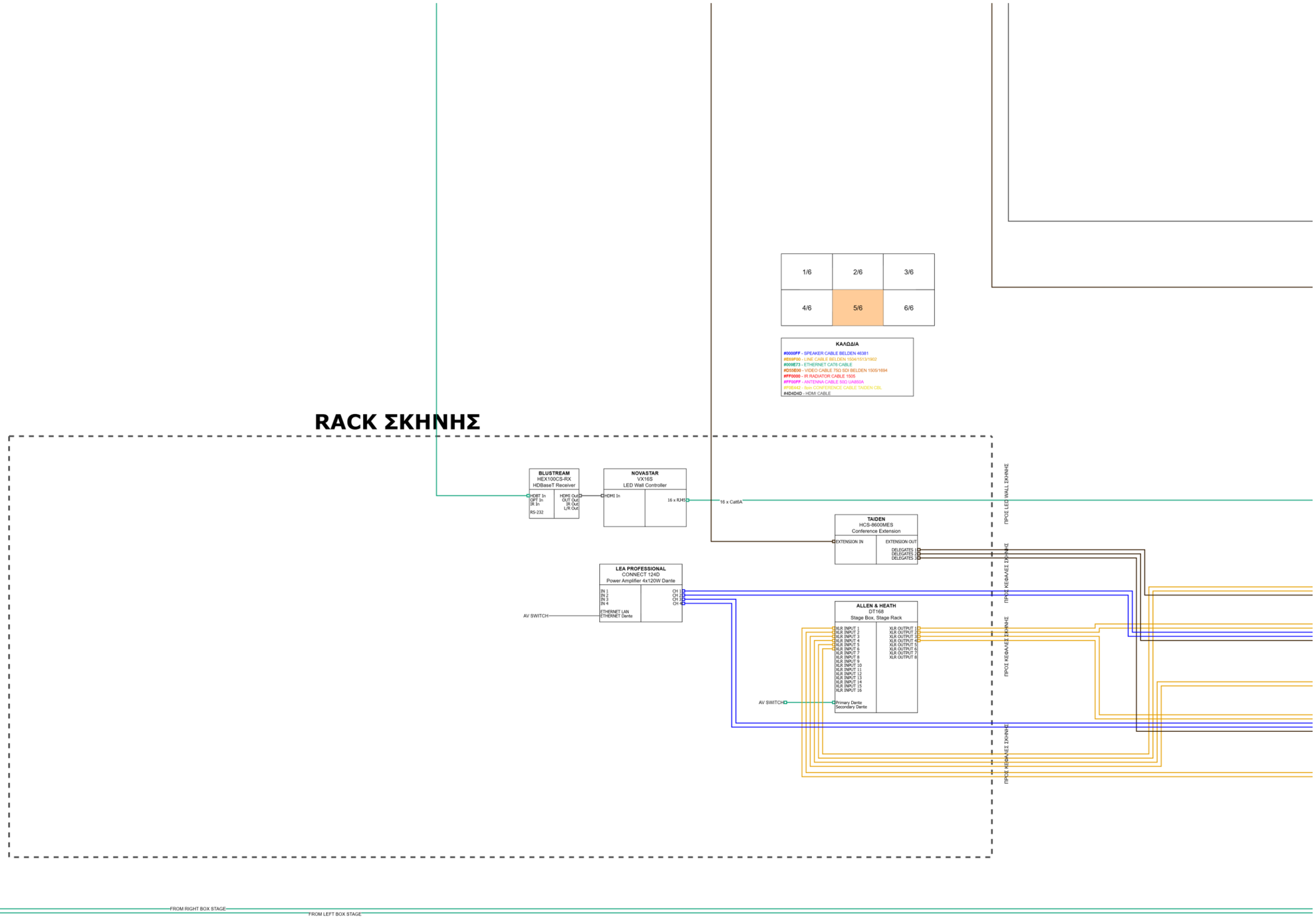


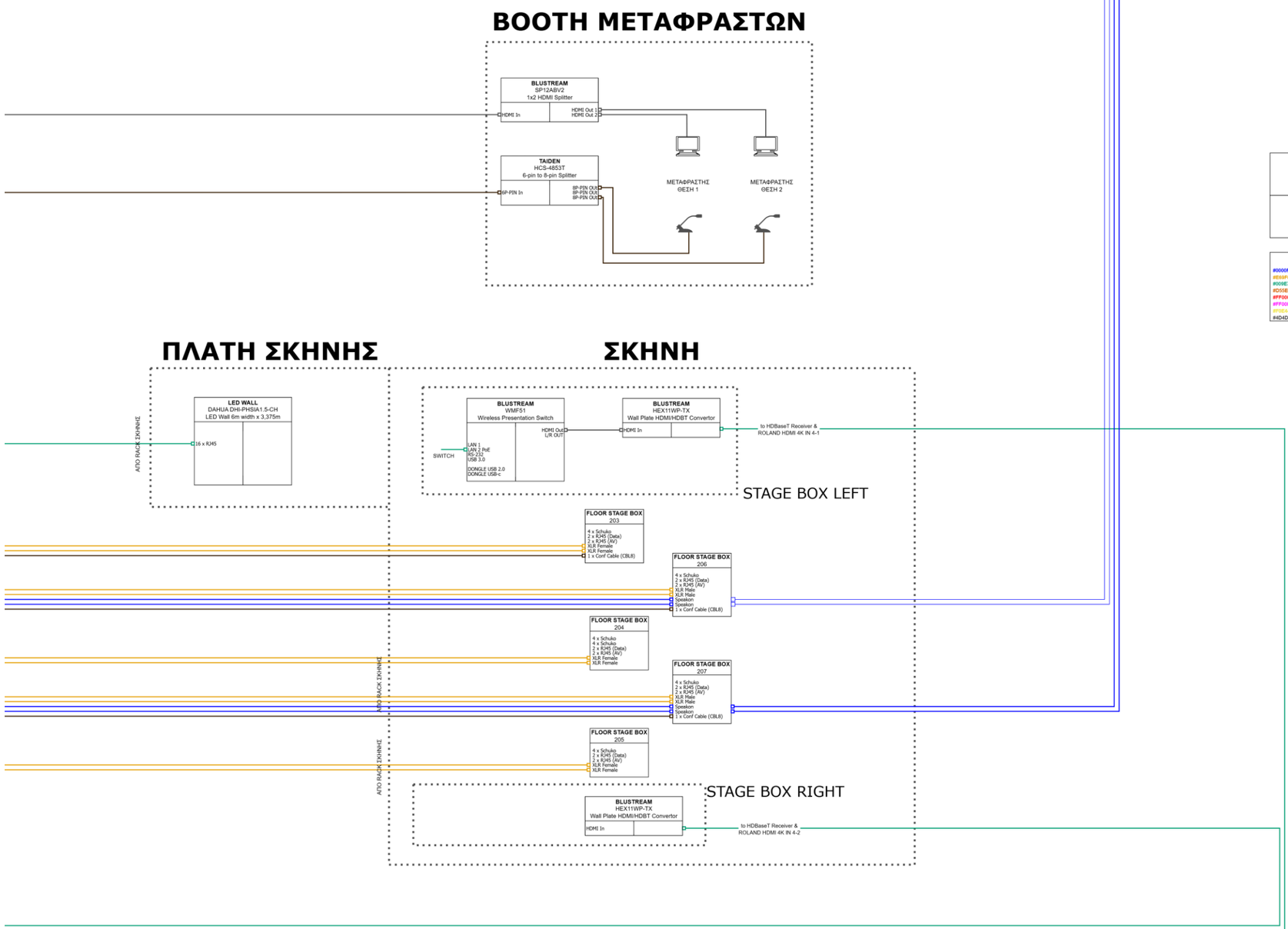
1/6	2/6	3/6
4/6	5/6	6

ΚΑΛΩΔΙΑ

#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1604/1513/1902
#009E73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 150ft
#FF00FF - ANTENNA CABLE 50Ω UA850A
#F0E442 - DMX CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE


1/6
2/6
3/6
4/6
5/6
6/6
ΚΑΛΩΔΙΑ
#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1504/1513/1902
#009E73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 1505
#FF00FF - ANTENNA CABLE SDI UA850A
#F0E442 - 8pin CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE
ΚΑΜΕΡΕΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
TAIDEN
HCS-9316HDN
HD Camera (Crown Cam)
AUDIO IN
RS-232 IN
RS-485
LINK ACT (RJ45)
SWITCH
HD-SDI
HDMI
8 core mini DIN
RS-232 OUT
BLUSTREAM
HEX70CS-TX
HDBaseT Transmitter
HDMI In
OPT In
IR In
RS-232
HDBT Out
OUT Out
IR Out
L/R Out
ΠΡΟΣ VIDEO MATRIX
TAIDEN
HCS-9316HDN
HD Camera (Left)
TAIDEN
HCS-9316HDN
HD Camera (Right)


1/6
2/6
3/6
4/6
5/6
6/6
ΚΑΛΩΔΙΑ
#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1504/1513/1902
#00AE73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 1506
#FF00FF - ANTENNA CABLE 50Ω UA850A
#F0E442 - 3pin CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE
RACK ΣΚΗΝΗΣ
BLUSTREAM
HEX100CS-RX
HDBaseT Receiver
HDBT In
OPT In
IR In
RS-232
HDMI Out
OUT Out
IR Out
L/R Out
NOVASTAR
VX16S
LED Wall Controller
HDMI In
16 x RJ45
16 x Cat6A
TAIDEN
HCS-8600MES
Conference Extension
EXTENSION IN
EXTENSION OUT
DELEGATES 1
DELEGATES 2
DELEGATES 3
LEA PROFESSIONAL
CONNECT 124D
Power Amplifier 4x120W Dante
IN 1
IN 2
IN 3
IN 4
ETHERNET LAN
ETHERNET Dante
CH 1
CH 2
CH 3
CH 4
AV SWITCH
ALLEN & HEATH
DT168
Stage Box, Stage Rack
XLR INPUT 1
XLR INPUT 2
XLR INPUT 3
XLR INPUT 4
XLR INPUT 5
XLR INPUT 6
XLR INPUT 7
XLR INPUT 8
XLR INPUT 9
XLR INPUT 10
XLR INPUT 11
XLR INPUT 12
XLR INPUT 13
XLR INPUT 14
XLR INPUT 15
XLR INPUT 16
XLR OUTPUT 1
XLR OUTPUT 2
XLR OUTPUT 3
XLR OUTPUT 4
XLR OUTPUT 5
XLR OUTPUT 6
XLR OUTPUT 7
XLR OUTPUT 8
AV SWITCH
Primary Dante
Secondary Dante
ΠΡΟΣ LED WALL ΣΚΗΝΗΣ
ΠΡΟΣ ΚΕΦΑΛΕΣ ΣΚΗΝΗΣ
ΠΡΟΣ ΚΕΦΑΛΕΣ ΣΚΗΝΗΣ
ΠΡΟΣ ΚΕΦΑΛΕΣ ΣΚΗΝΗΣ
FROM RIGHT BOX STAGE
FROM LEFT BOX STAGE



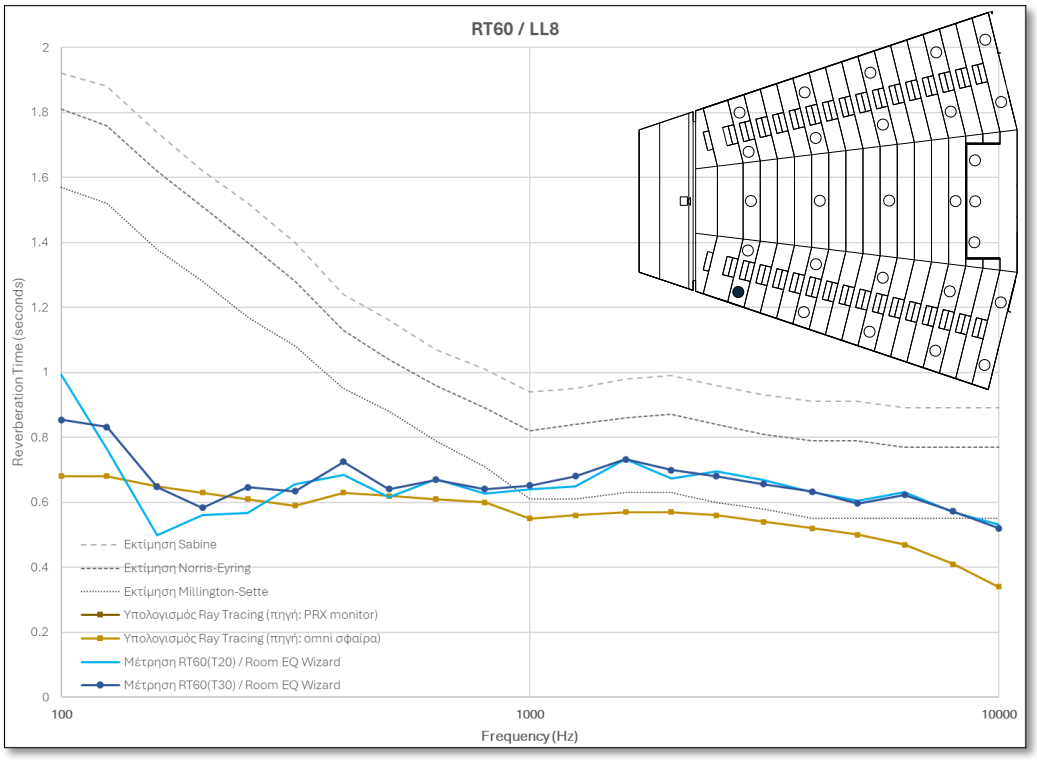
1/6	2/6	3/6
4/6	5/6	6/6

ΚΑΛΩΔΙΑ

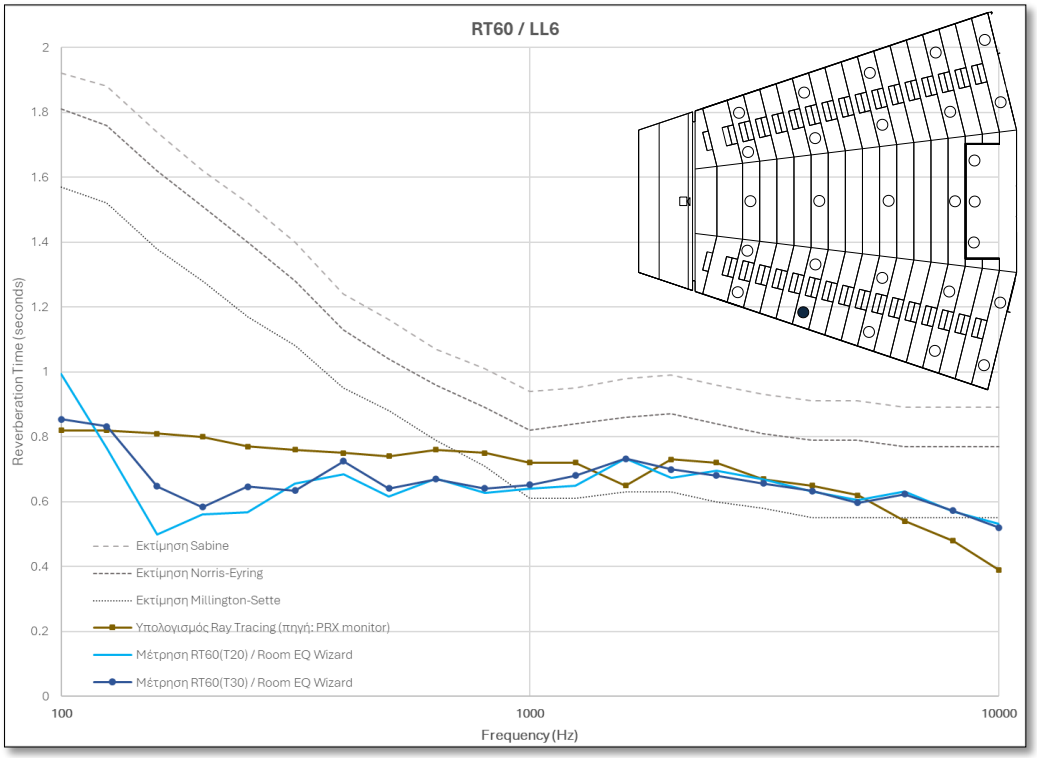
#0000FF - SPEAKER CABLE BELDEN 46381
#E69F00 - LINE CABLE BELDEN 1504/1513/1902
#009E73 - ETHERNET CAT6 CABLE
#D55E00 - VIDEO CABLE 75Ω SDI BELDEN 1505/1694
#FF0000 - IR RADIATOR CABLE 1505
#FF00FF - ANTENNA CABLE SDI UA650A
#F0E442 - fiber CONFERENCE CABLE TAIDEN CBL
#4D4D4D - HDMI CABLE

Παράρτημα 5 Εκτιμήσεις, υπολογισμοί, μετρήσεις RT60

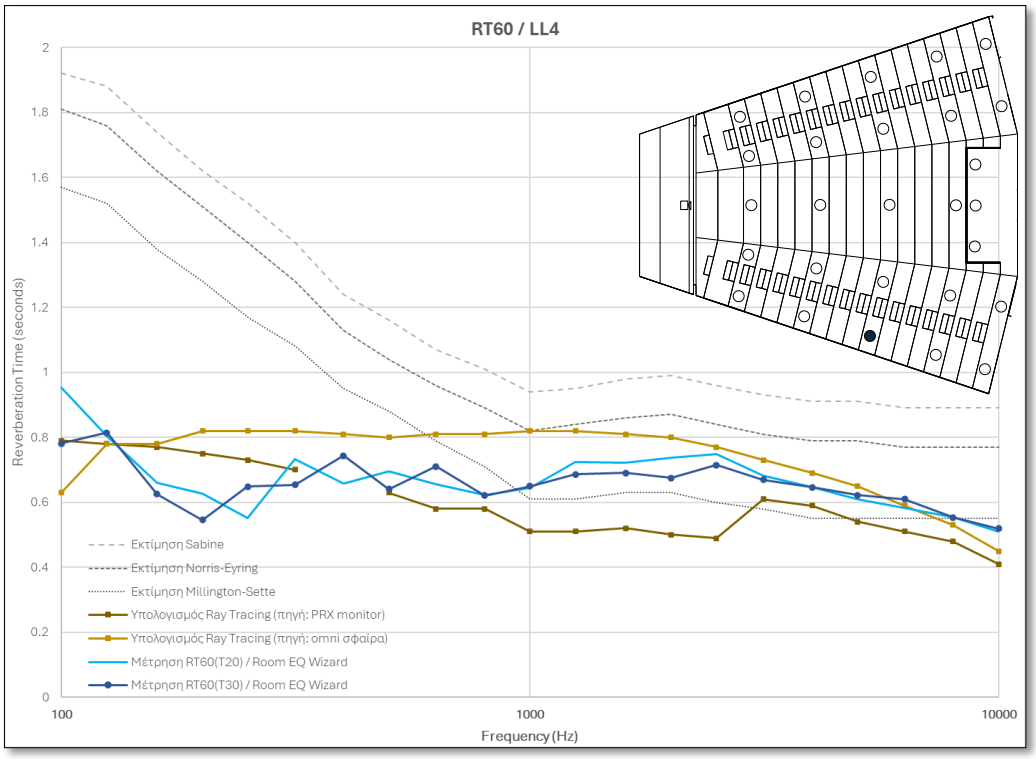
Ζώνη LL (Θέσεις LL_8, LL_6, LL_4, LL_2, LL_1)



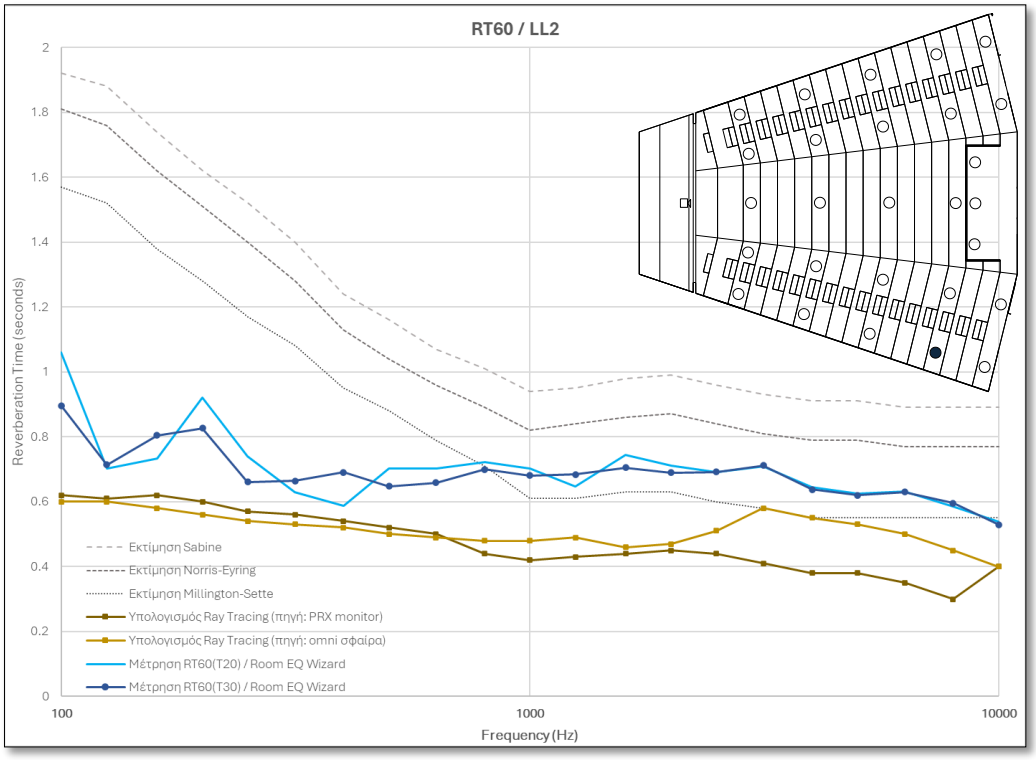
Διάγραμμα Π5.1 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_8



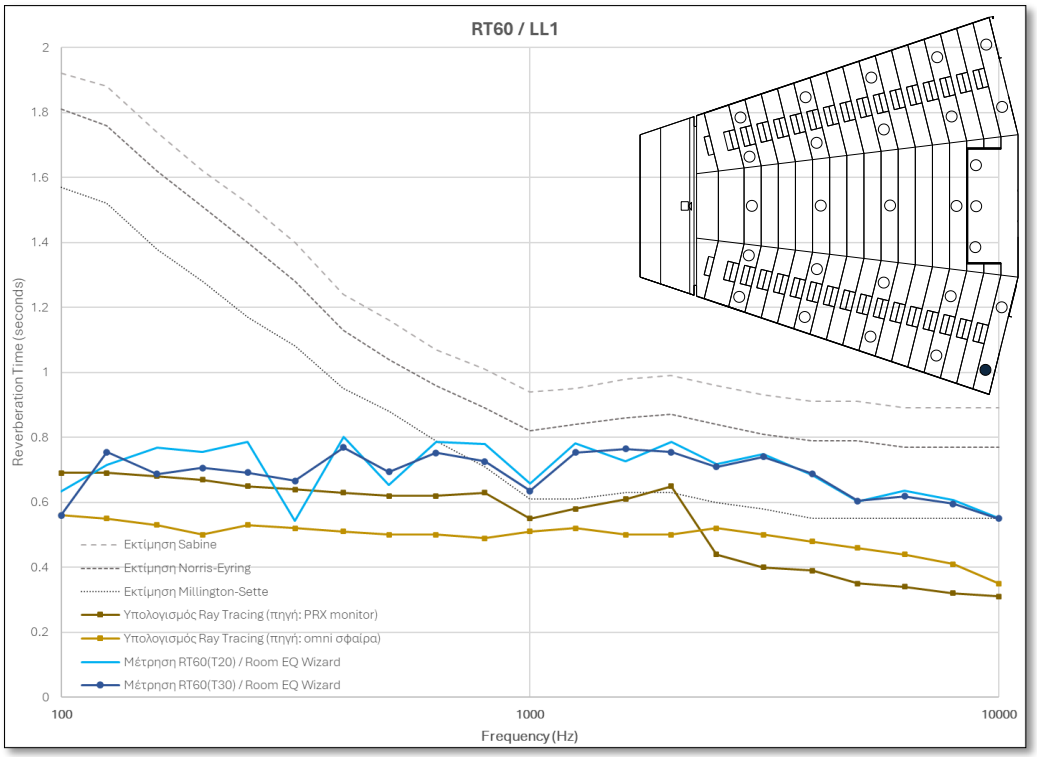
Διάγραμμα Π5.2 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_6



Διάγραμμα Π5.3 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_4

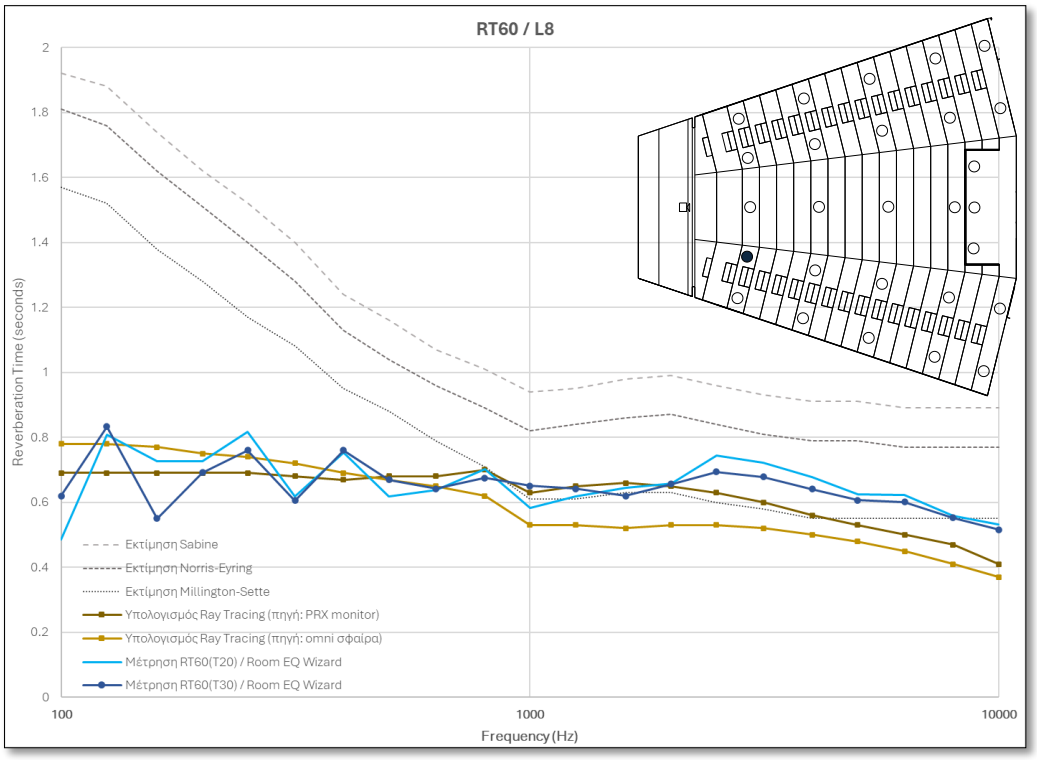


Διάγραμμα Π5.4 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_2

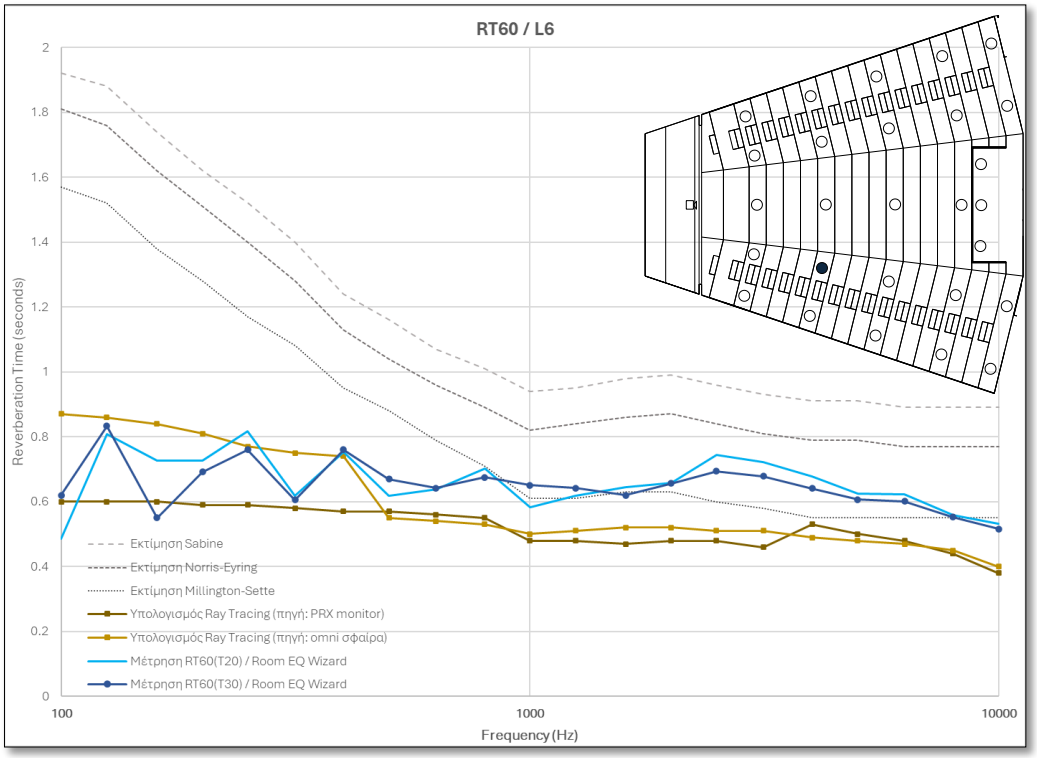


Διάγραμμα Π5.5 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση LL_1

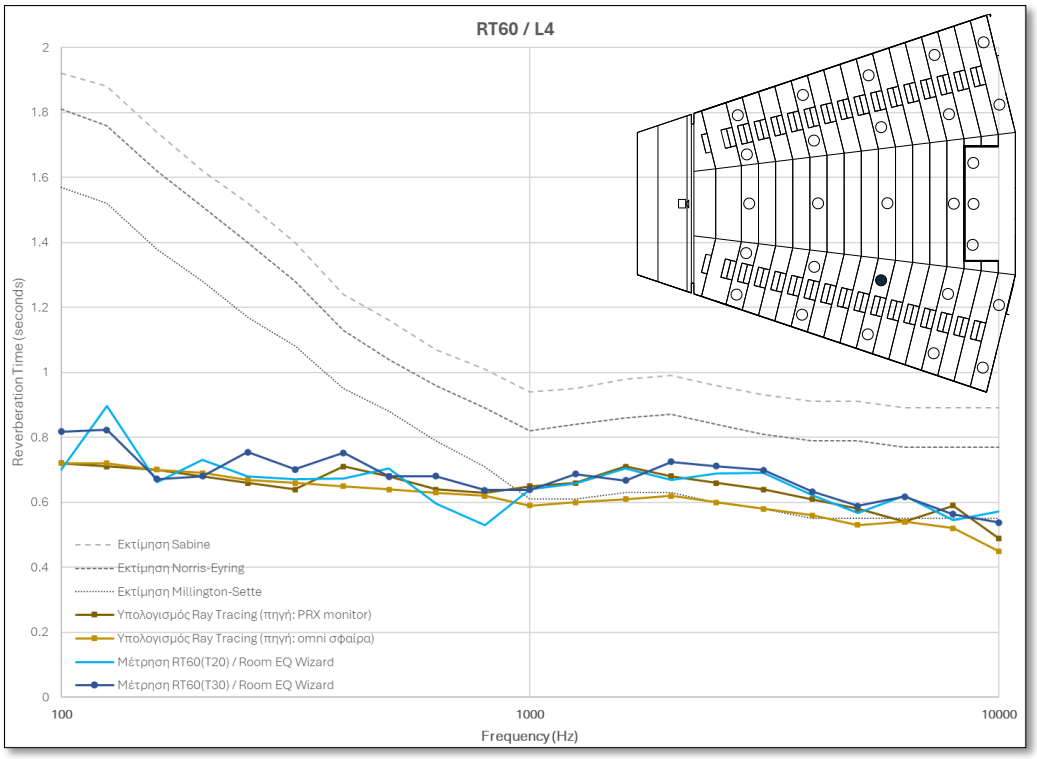
Ζώνη L (Θέσεις L_8, L_6, L_4, L_2, L_1)



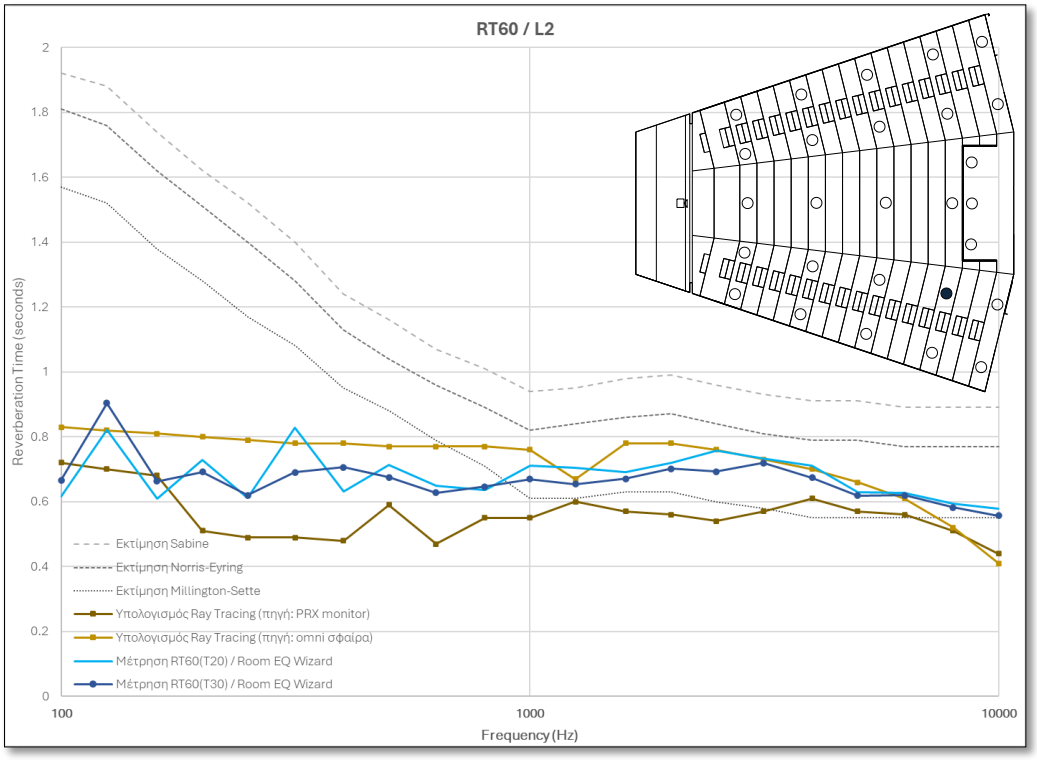
Διάγραμμα Π5.6 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_8



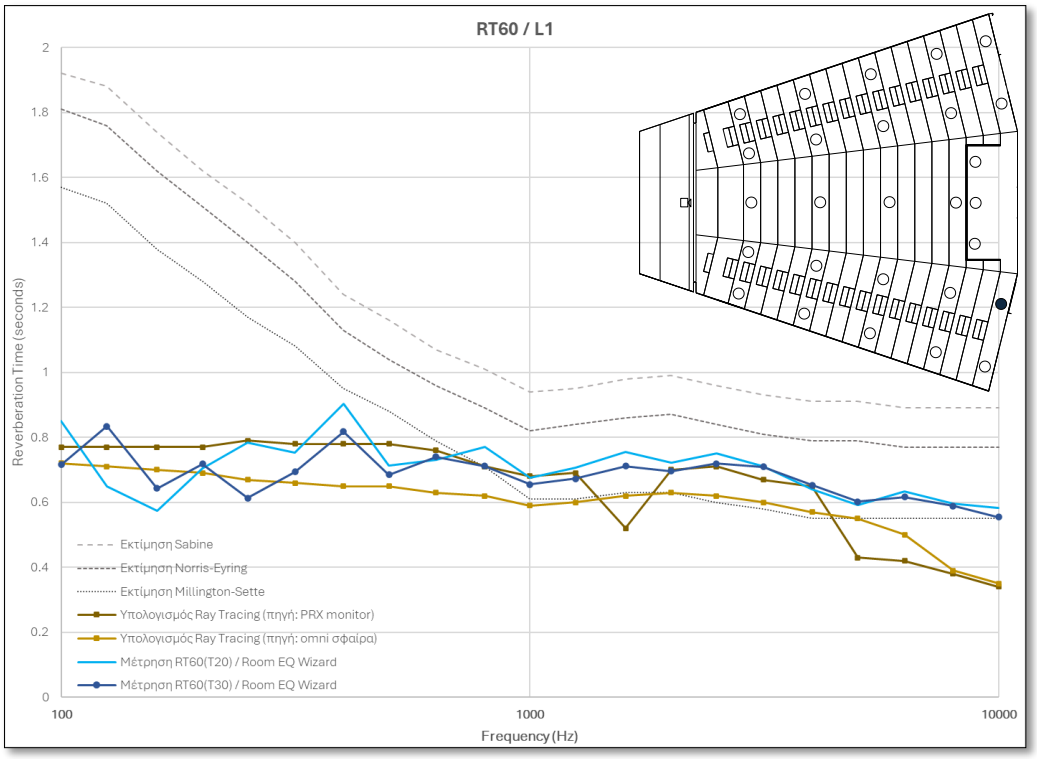
Διάγραμμα Π5.7 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_6



Διάγραμμα Π5.8 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_4

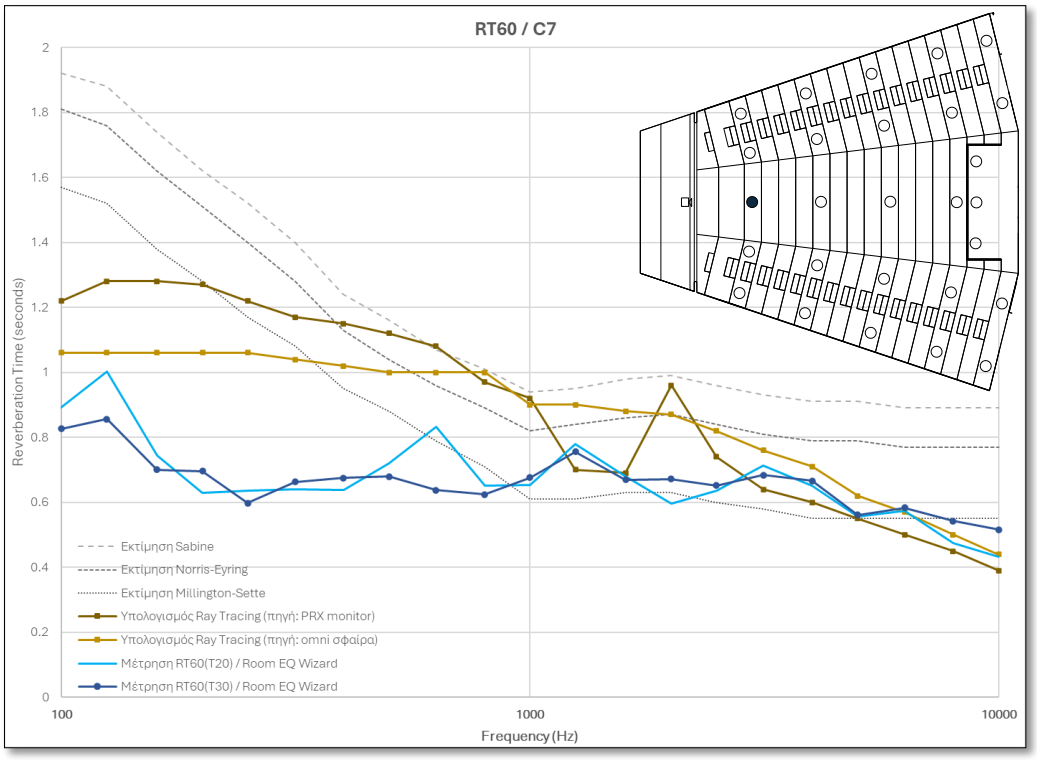


Διάγραμμα Π5.9 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_2

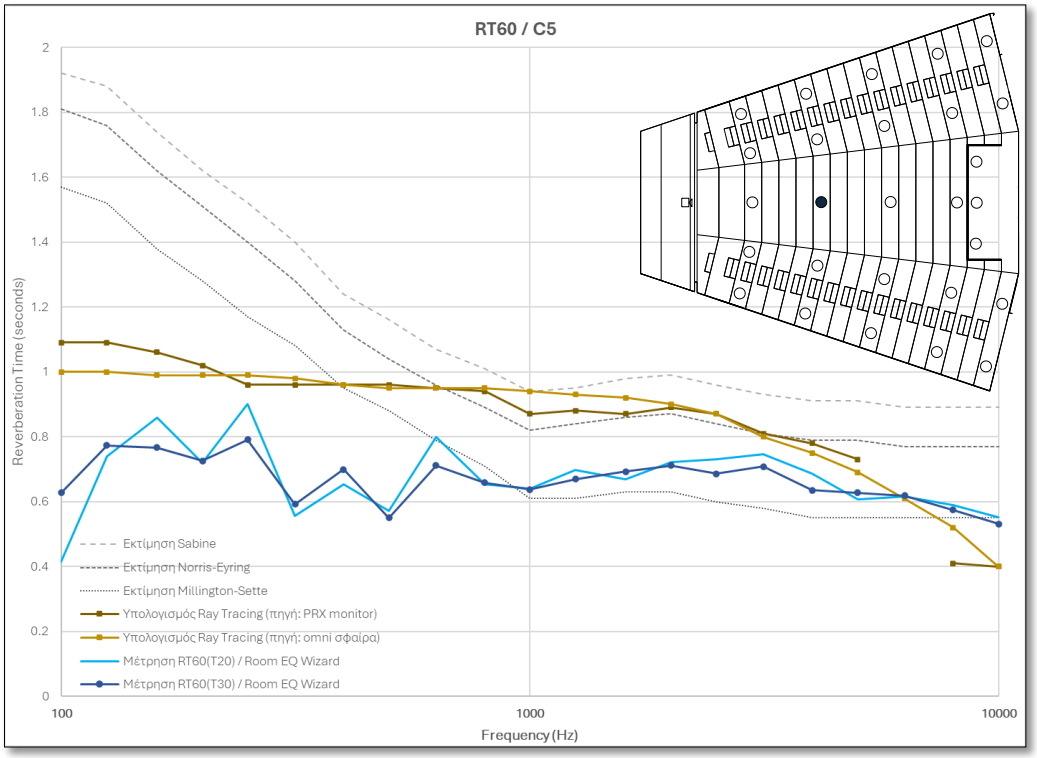


Διάγραμμα Π5.10 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση L_1

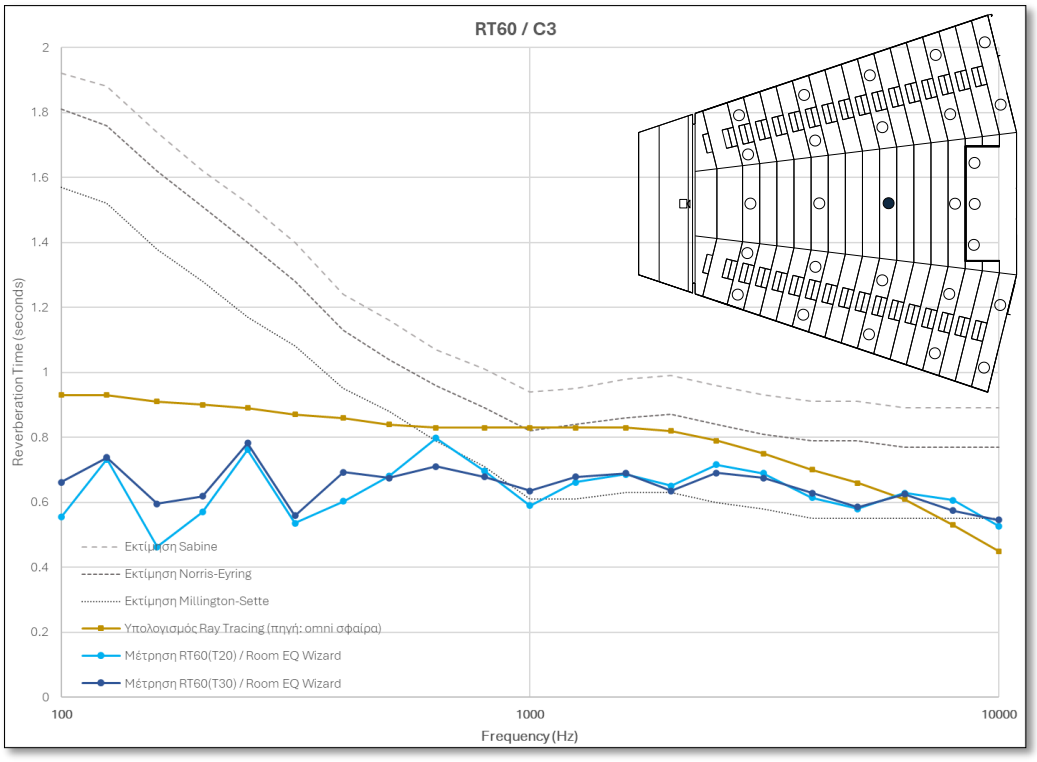
Ζώνη C (Θέσεις C_7, C_5, C_3, C_1)



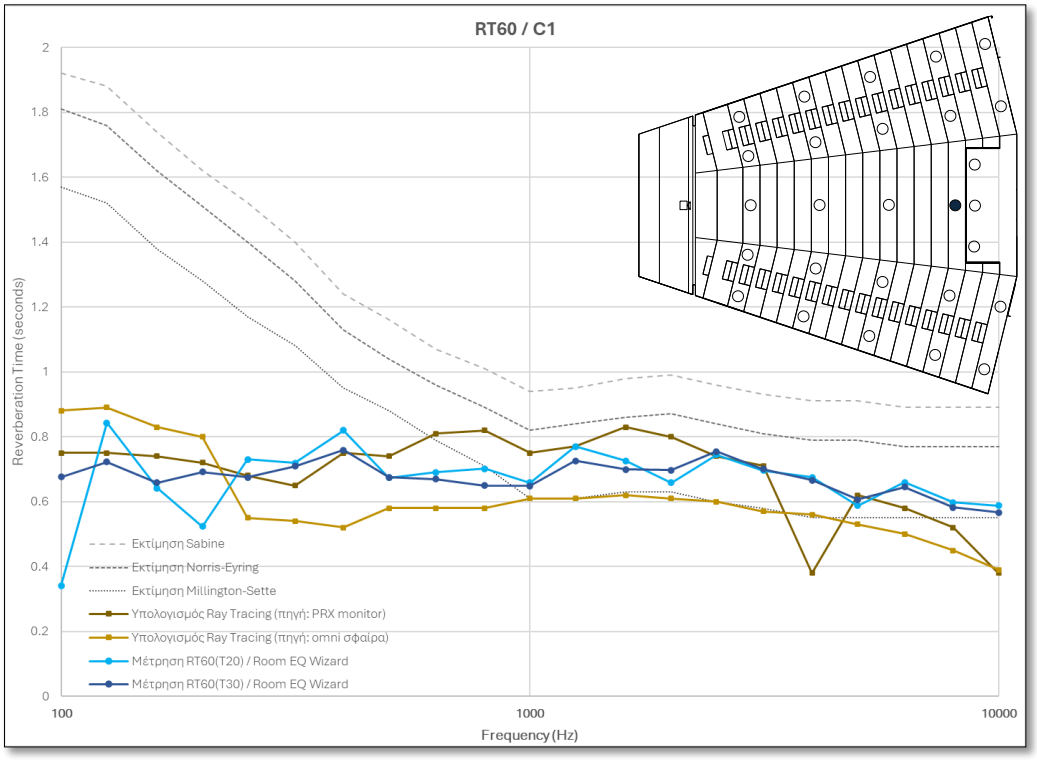
Διάγραμμα Π5.11 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_7



Διάγραμμα Π5.12 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_5

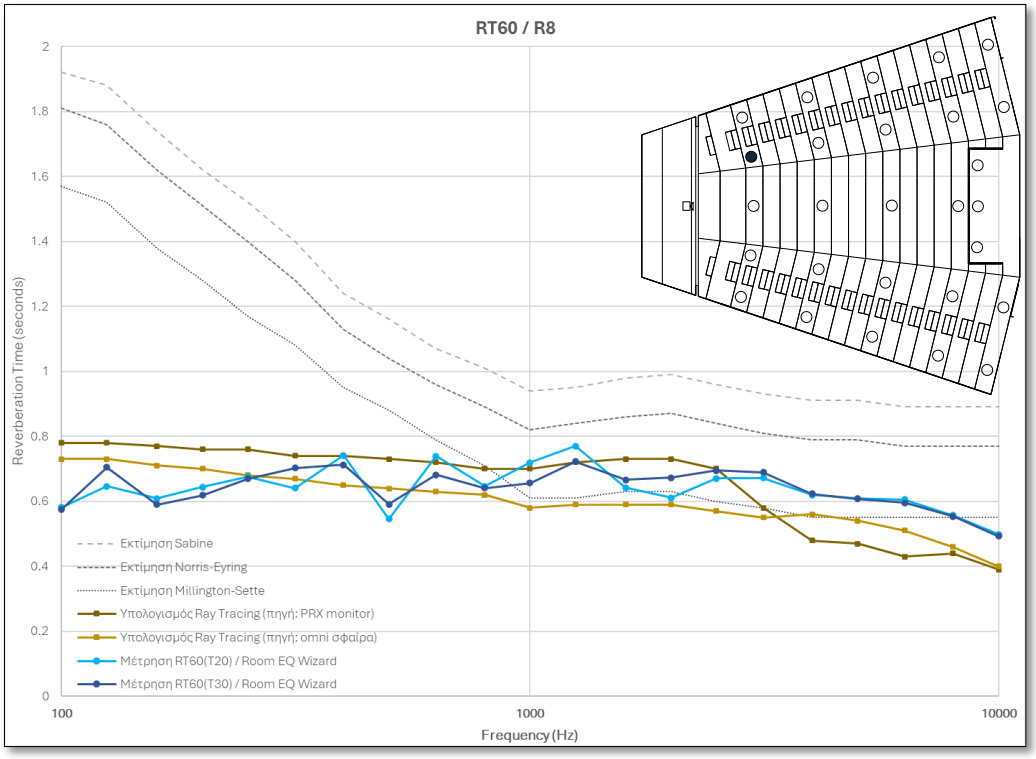


Διάγραμμα Π5.13 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_3

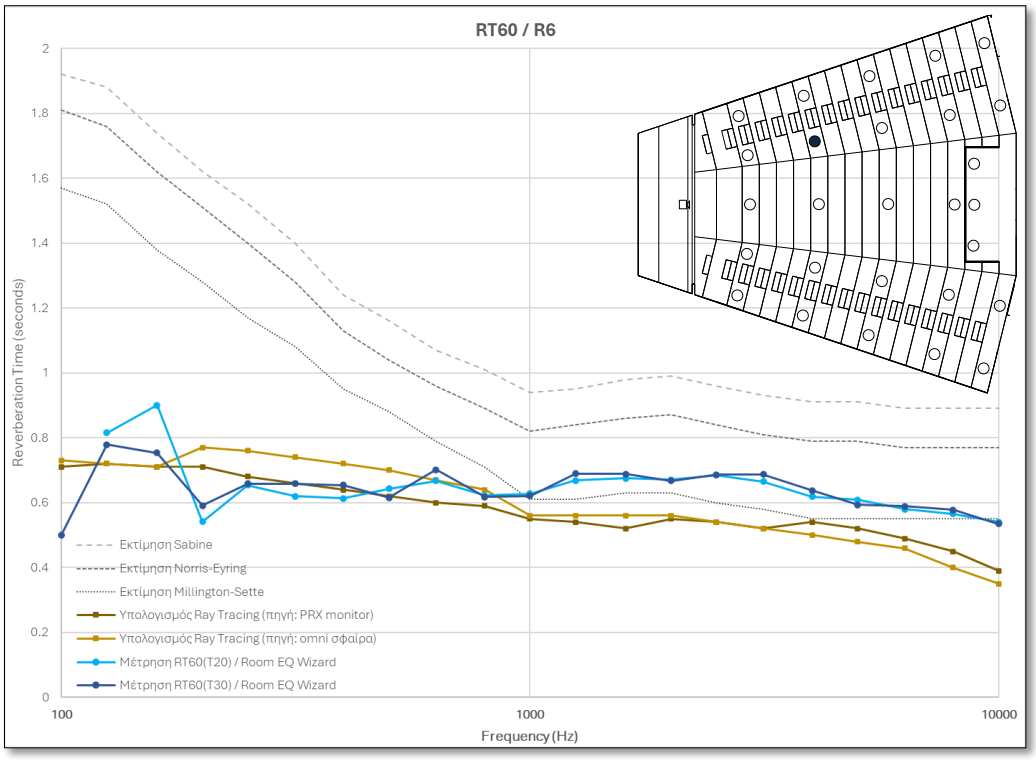


Διάγραμμα Π5.14 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση C_1

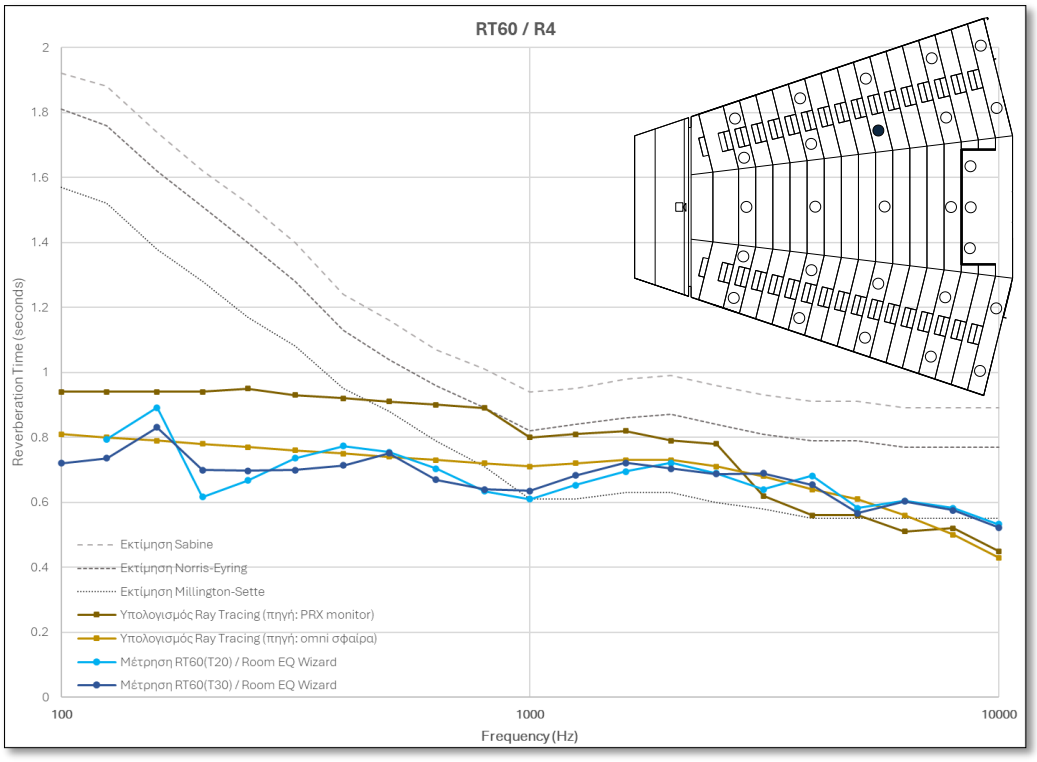
Ζώνη R (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1)



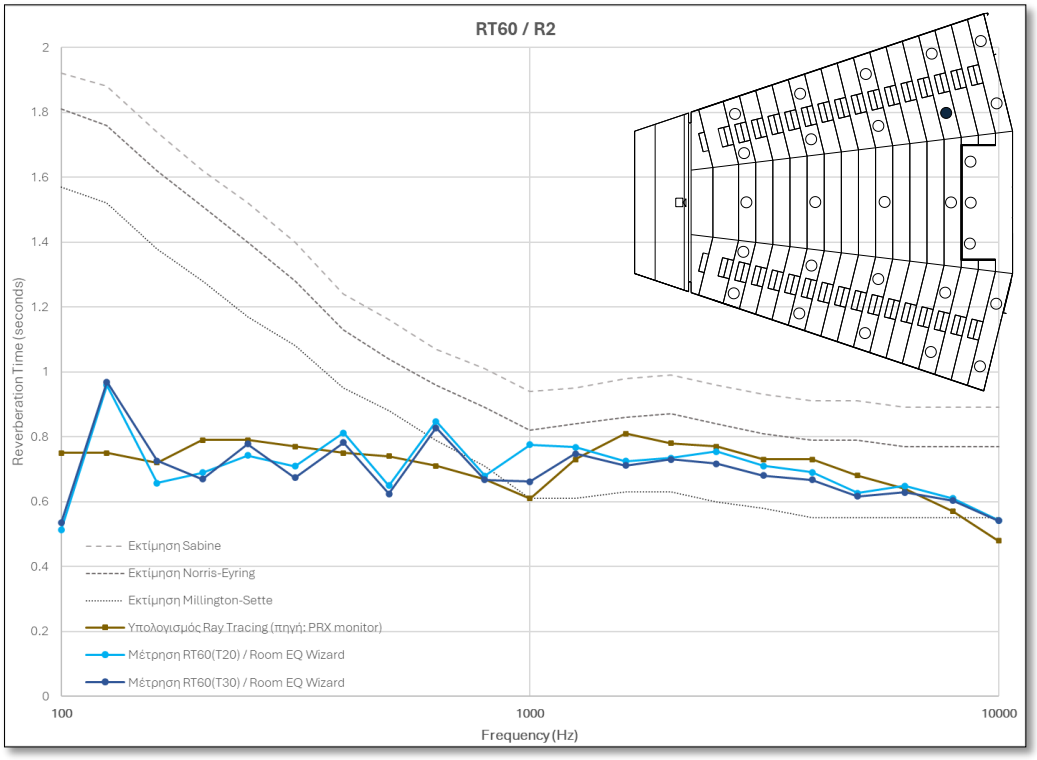
Διάγραμμα Π5.15 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_8



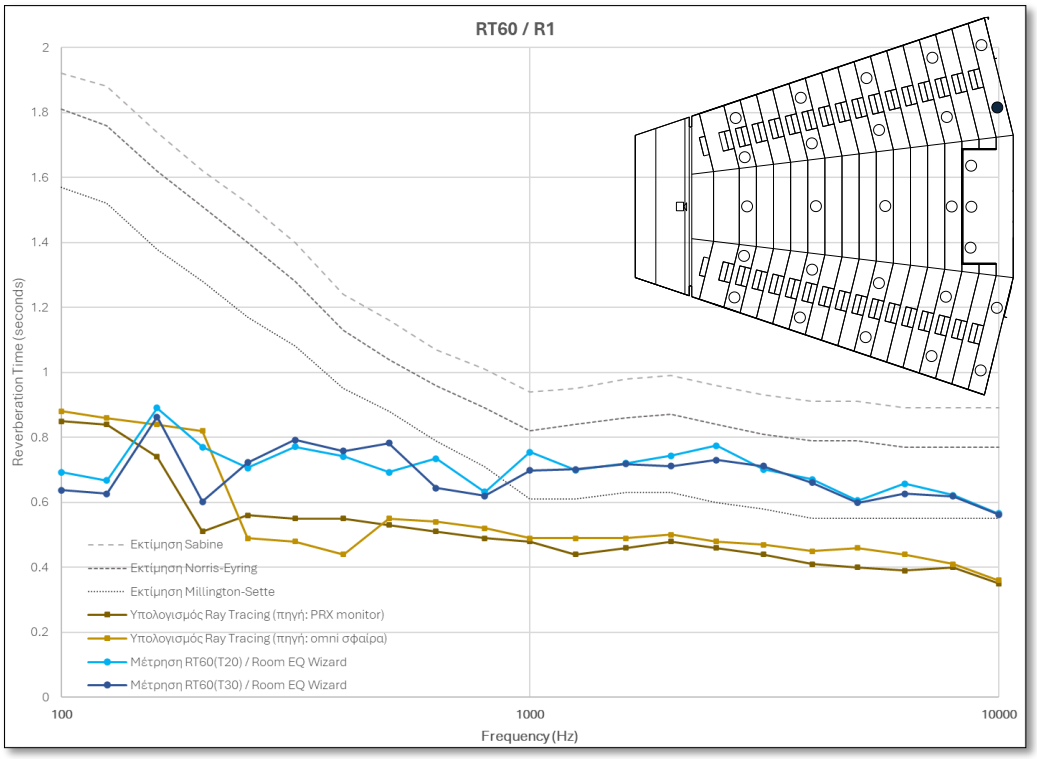
Διάγραμμα Π5.16 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_6



Διάγραμμα Π5.17 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_4

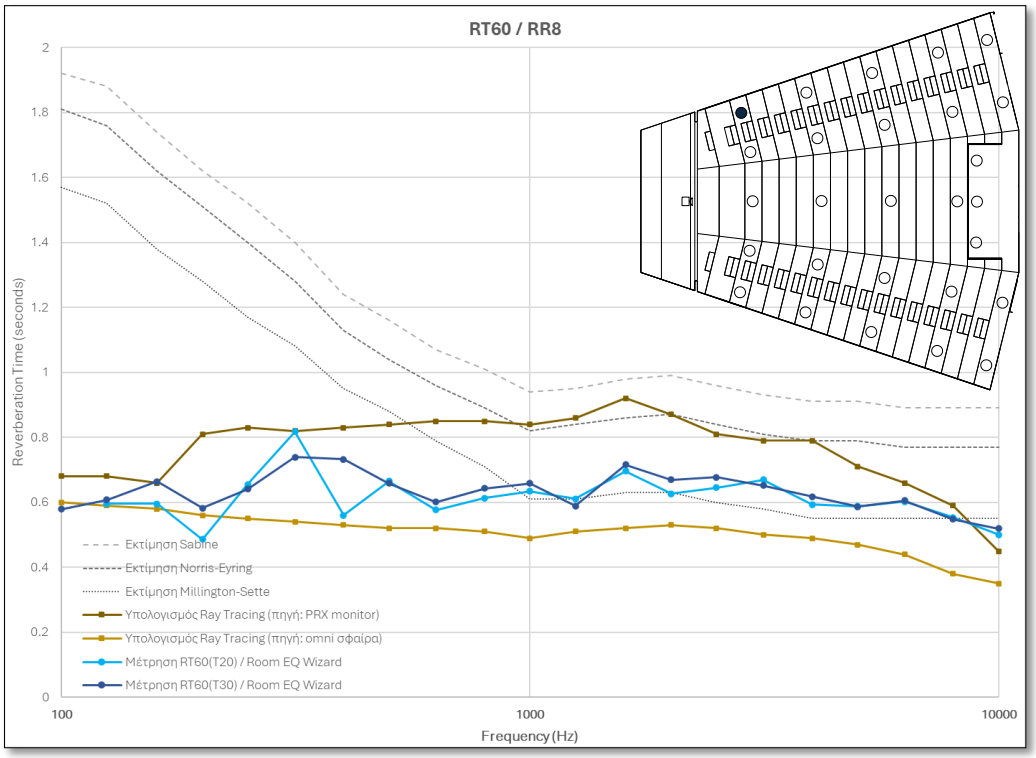


Διάγραμμα Π5.18 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_2

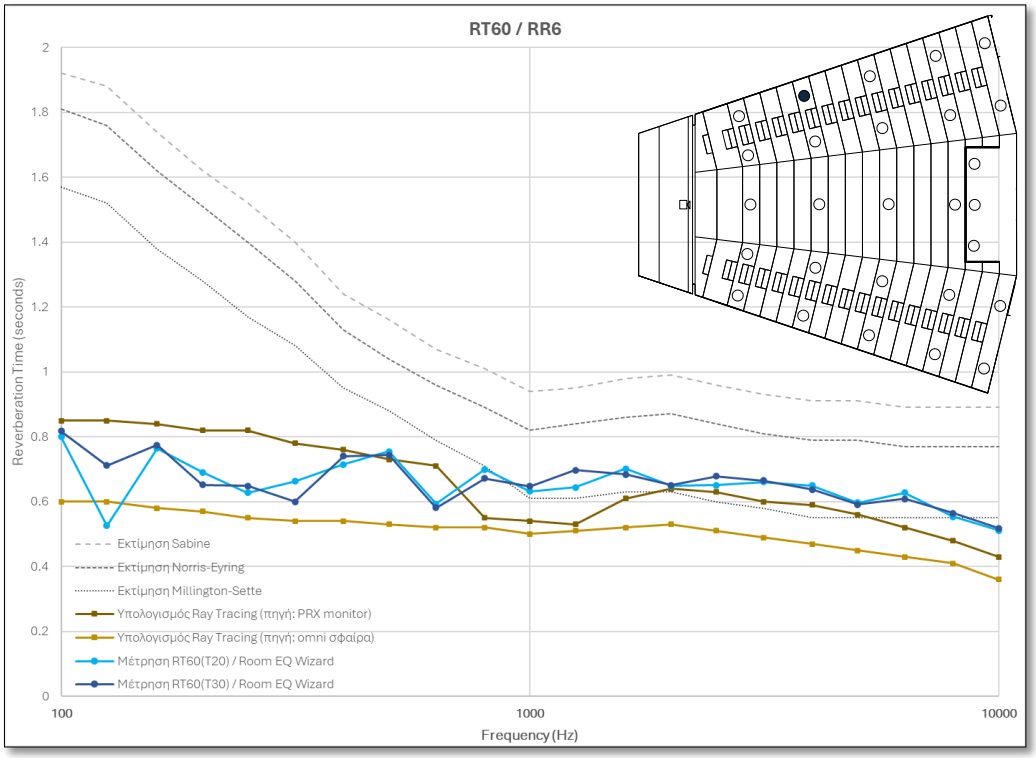


Διάγραμμα Π5.19 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση R_1

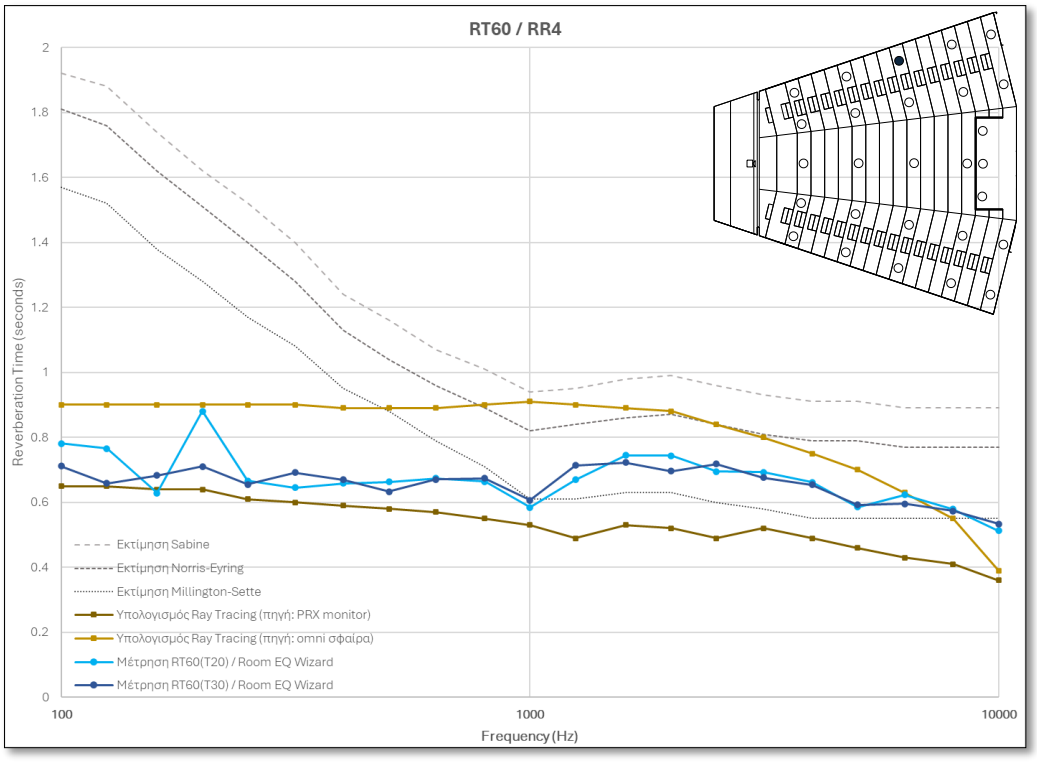
Ζώνη RR (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1)



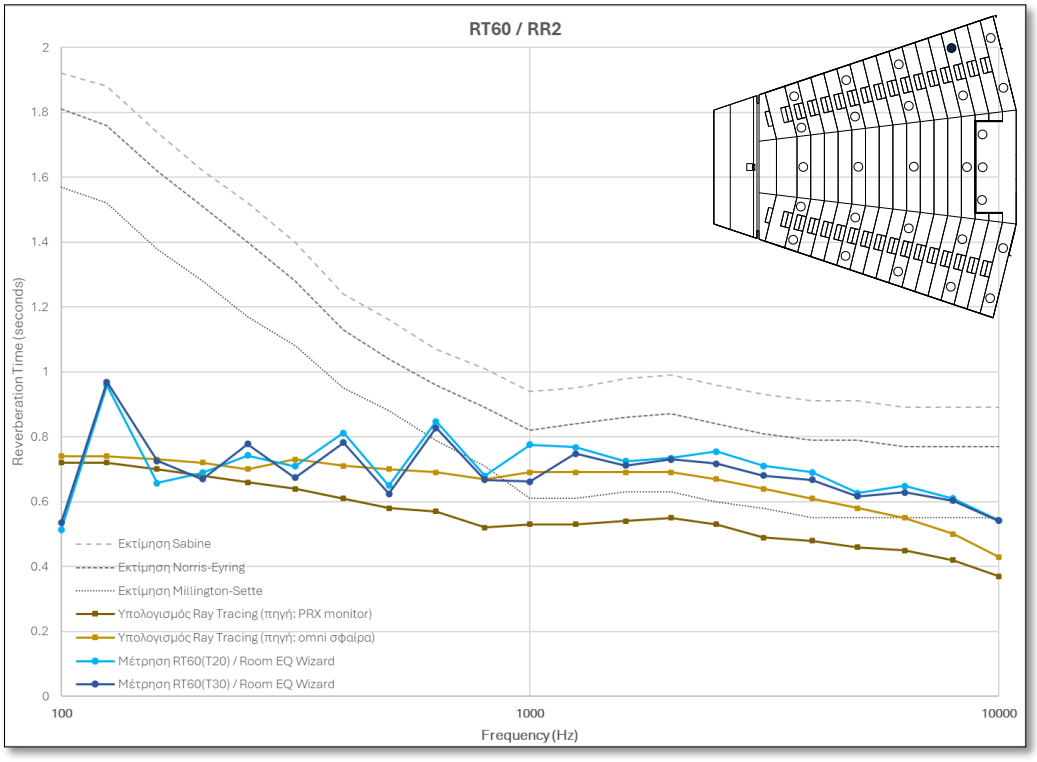
Διάγραμμα Π5.20 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_8



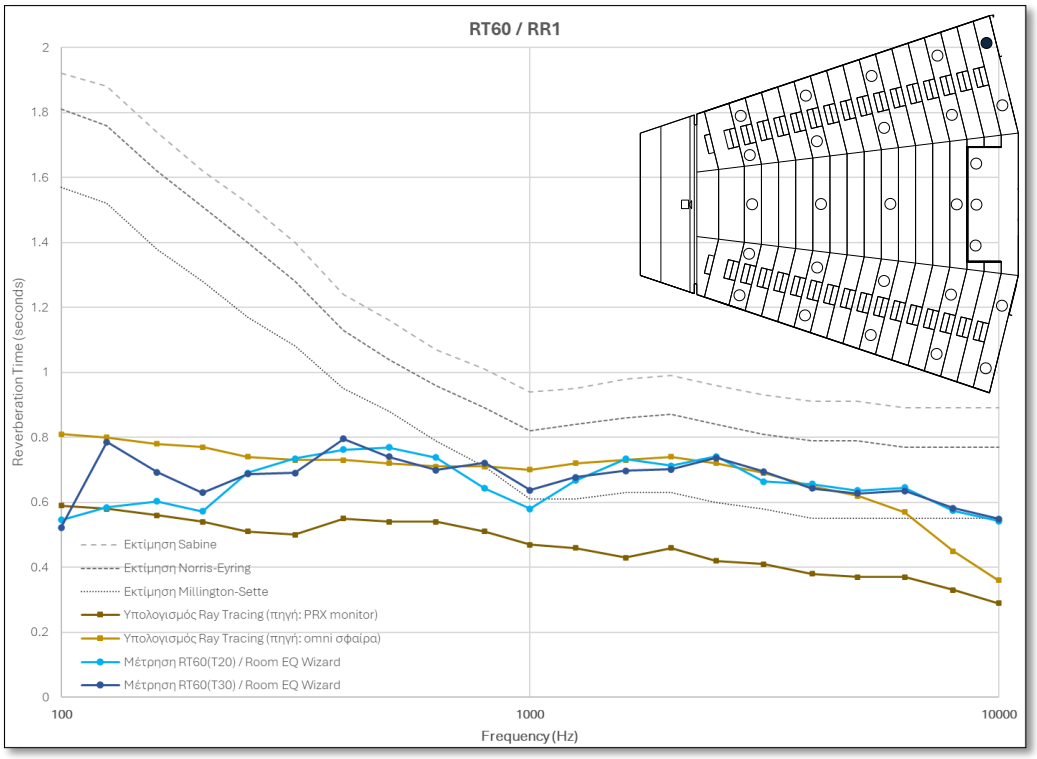
Διάγραμμα Π5.21 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_6



Διάγραμμα Π5.22 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_4



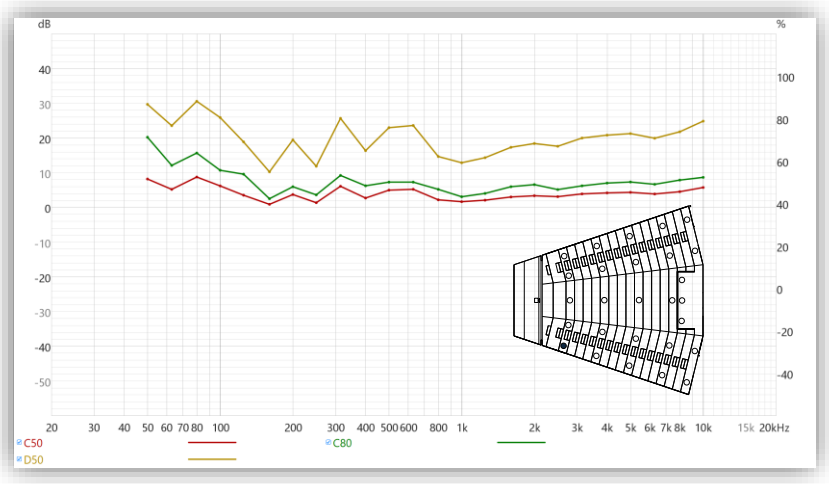
Διάγραμμα Π5.23 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_2



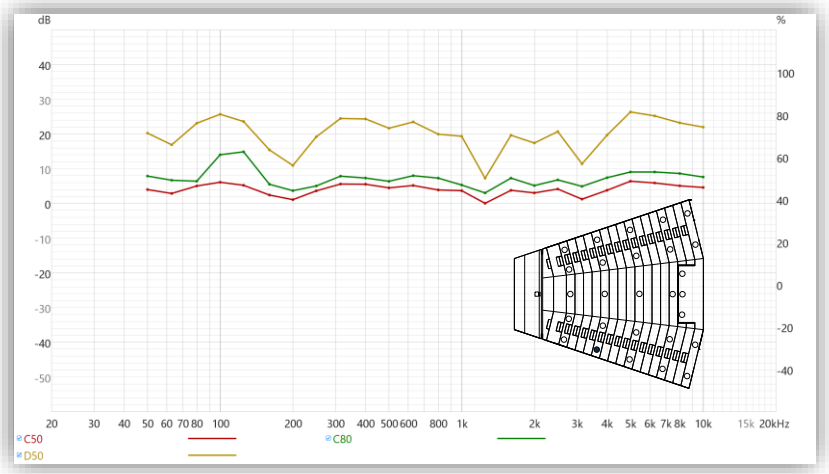
Διάγραμμα Π5.24 RT_{60}: Στατιστικές Εκτιμήσεις, Υπολογισμοί Ray Tracing και Μετρήσεις / Θέση RR_1

Παράρτημα 6 Μετρήσεις C_{50}, C_{80}, D_{50}

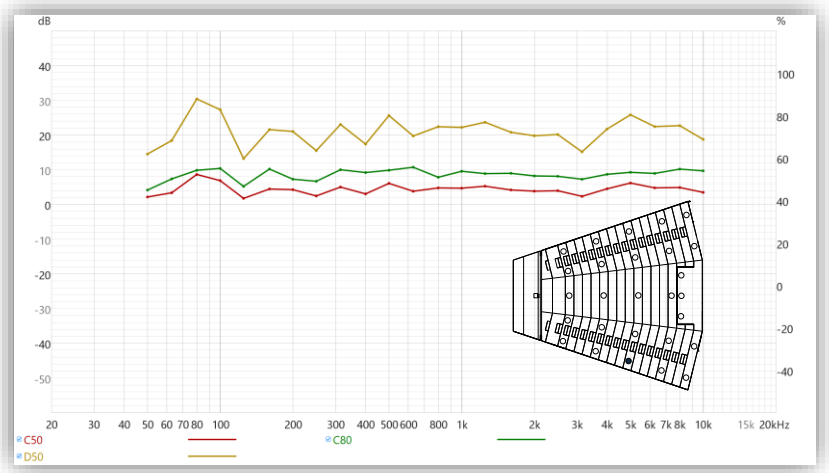
Ζώνη LL (Θέσεις LL_8, LL_6, LL_4, LL_2, LL_1)



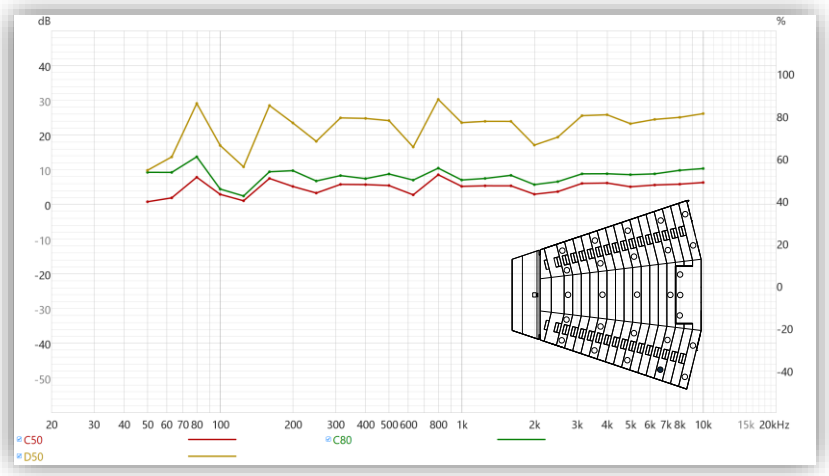
Διάγραμμα Π6.1 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_8



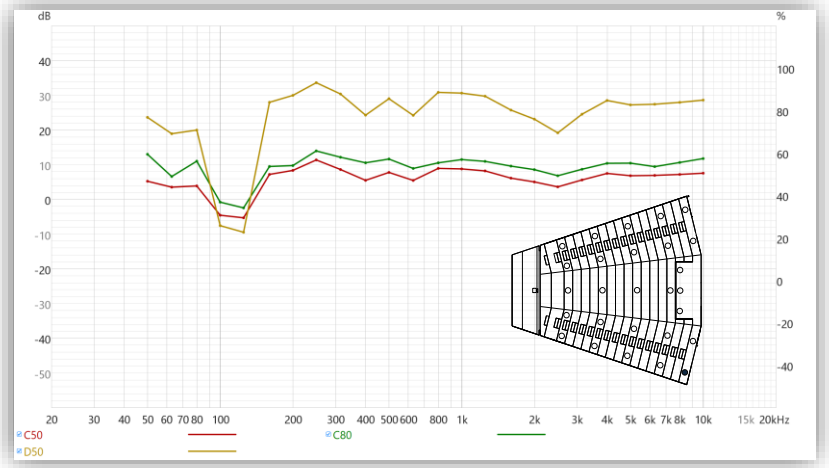
Διάγραμμα Π6.2 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_6



Διάγραμμα Π6.3 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_4

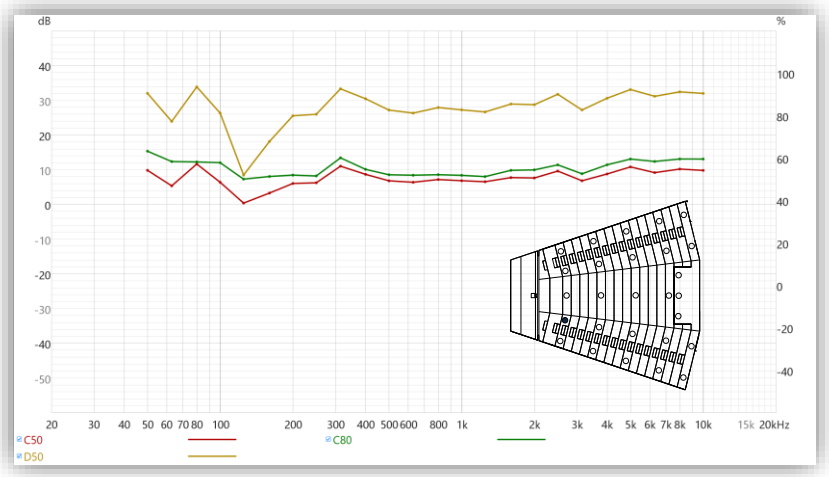


Διάγραμμα Π6.4 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_2

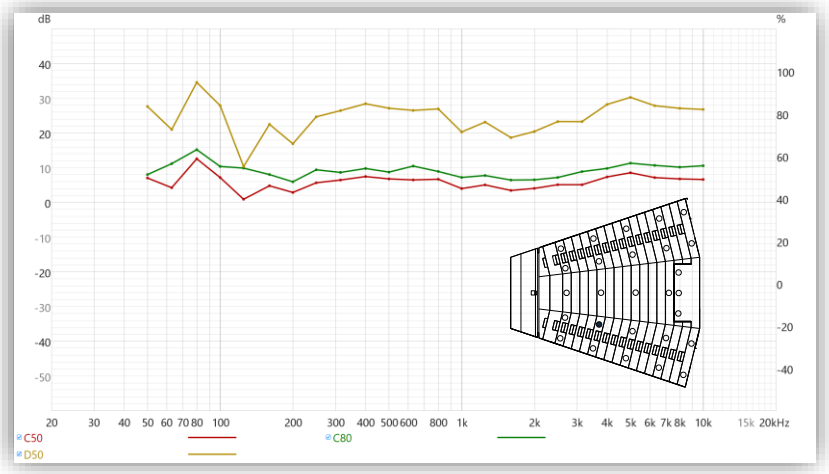


Διάγραμμα Π6.5 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση LL_1

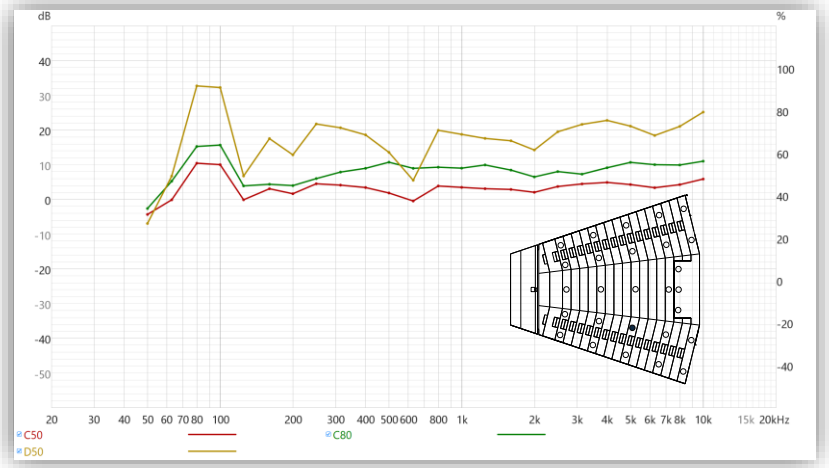
Ζώνη L (Θέσεις L8, L6, L4, L2, L1)



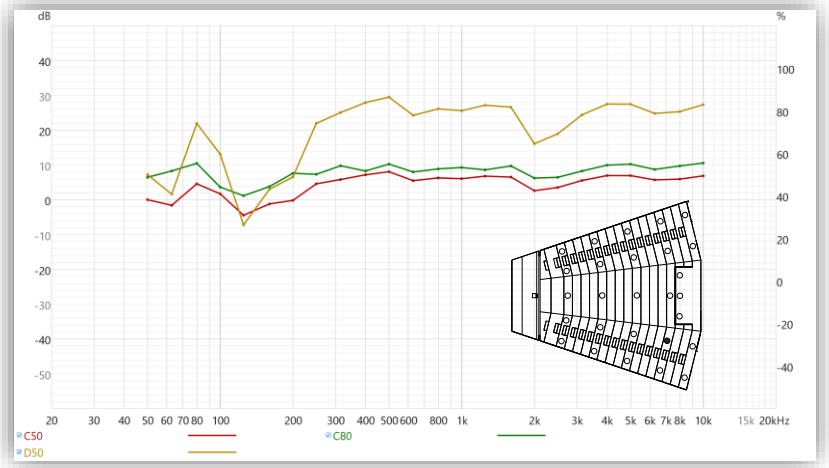
Διάγραμμα Π6.6 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_8



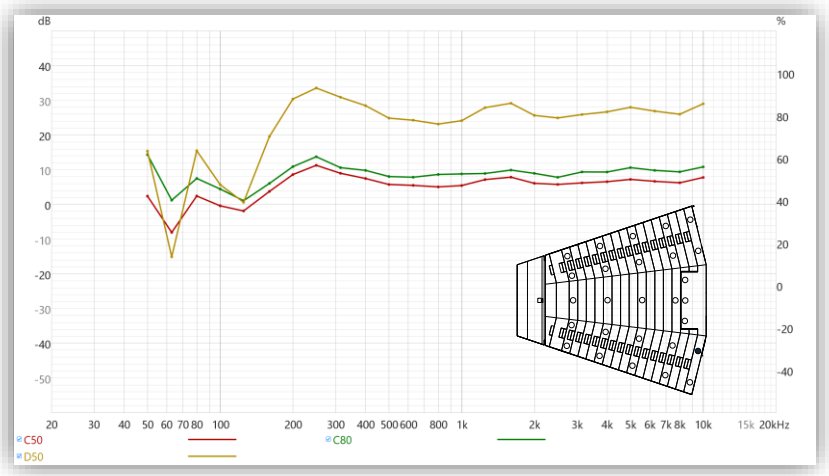
Διάγραμμα Π6.7 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_6



Διάγραμμα Π6.8 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_4

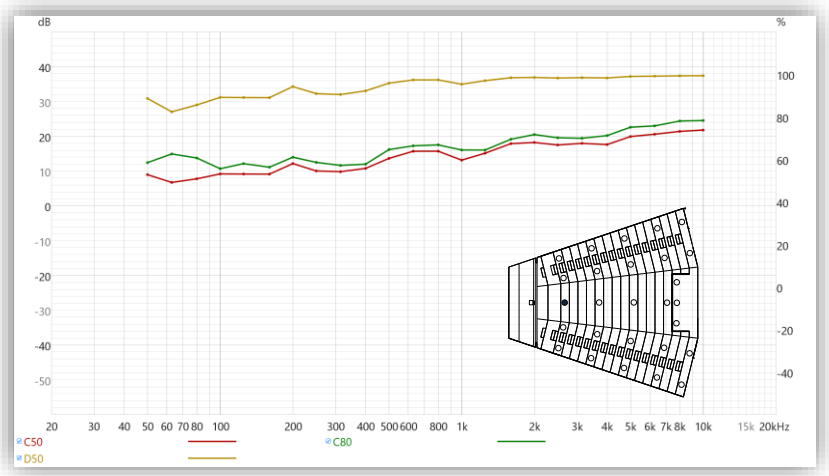


Διάγραμμα Π6.9 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_2

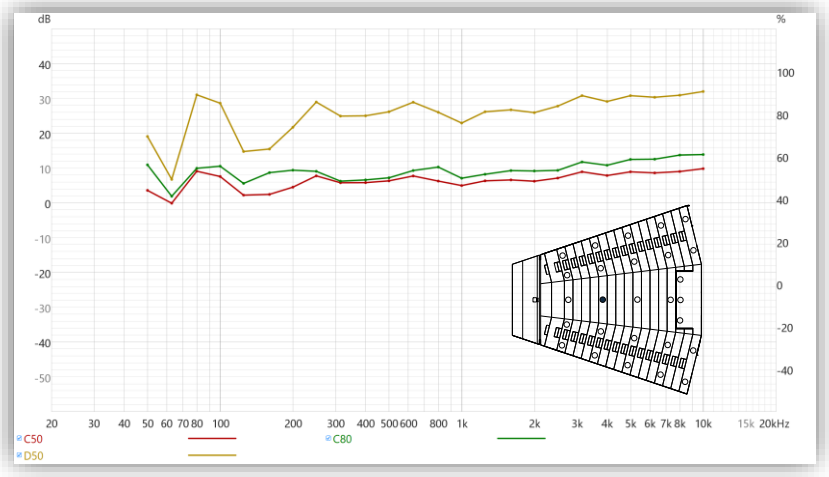


Διάγραμμα Π6.10 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση L_1

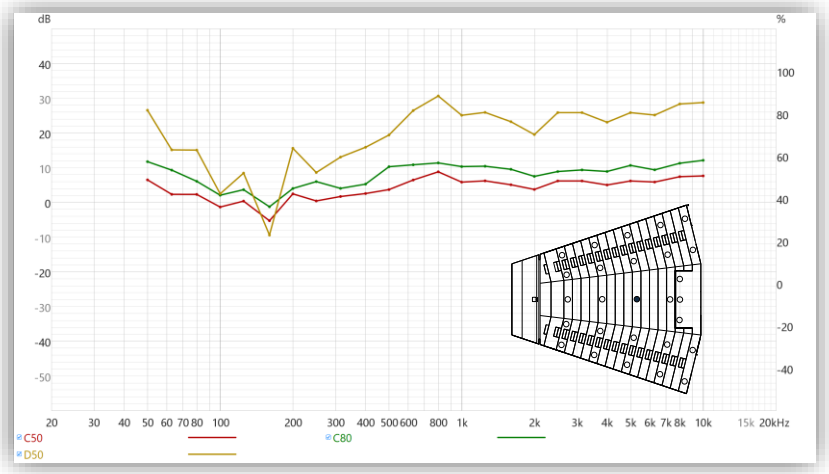
Ζώνη C (C_7, C_5, C_3, C_1)



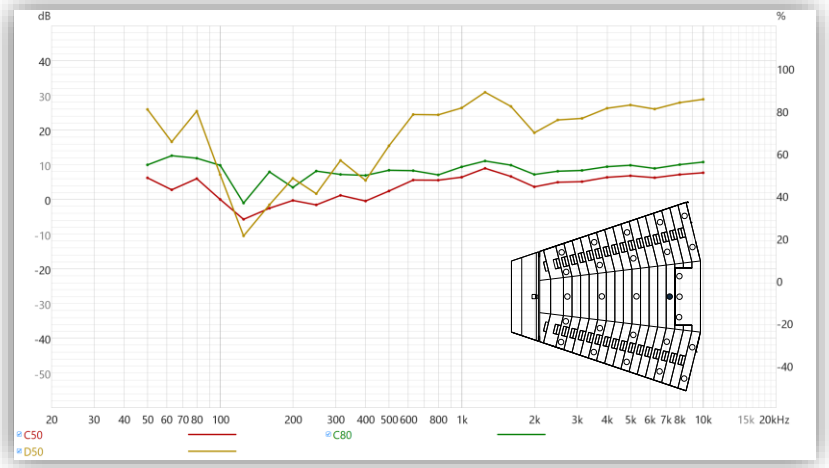
Διάγραμμα Π6.11 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_7



Διάγραμμα Π6.12 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_5

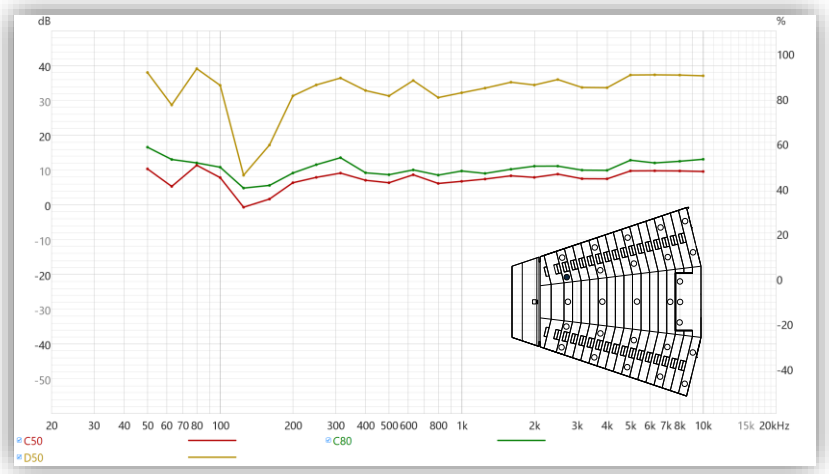


Διάγραμμα Π6.13 Μετρήσεις D50 (%), C50 (dB), C80 (dB) / Θέση C3

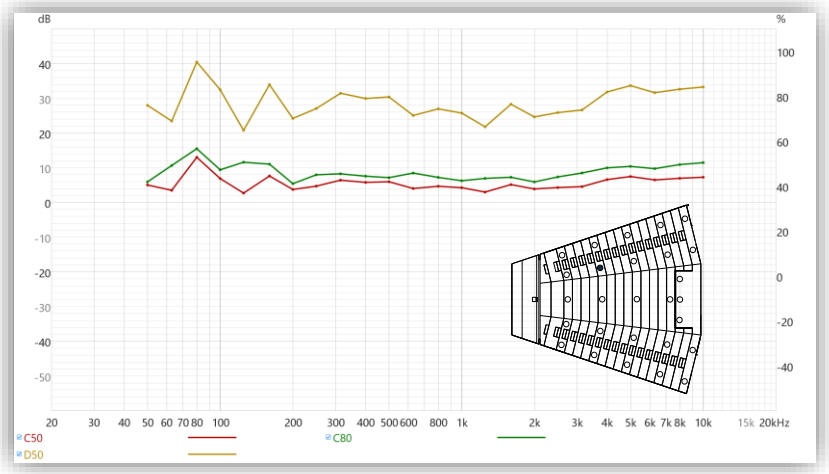


Διάγραμμα Π6.14 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση C_1

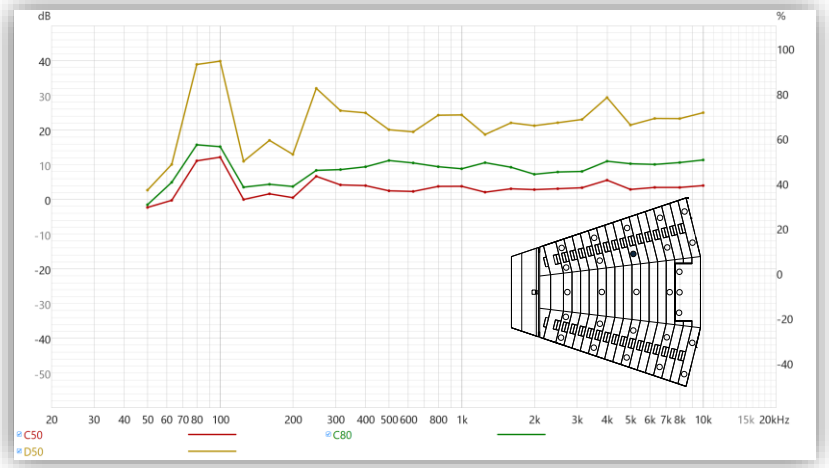
Ζώνη R (R_8, R_6, R_4, R_2, R_1)



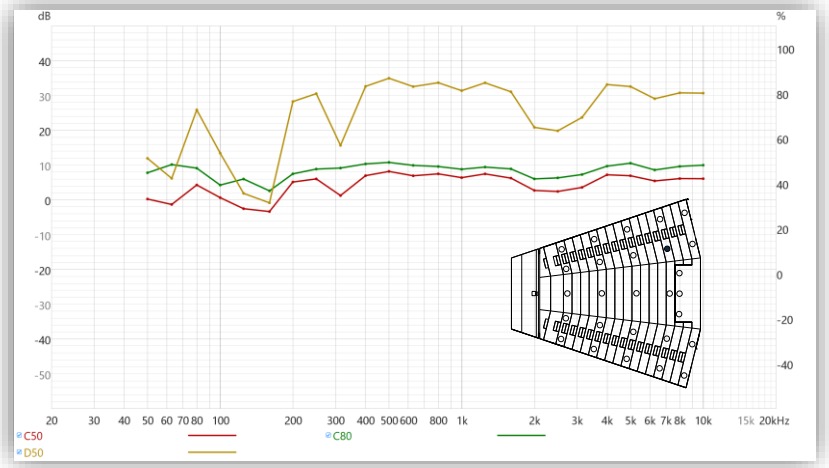
Διάγραμμα Π6.15 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_8



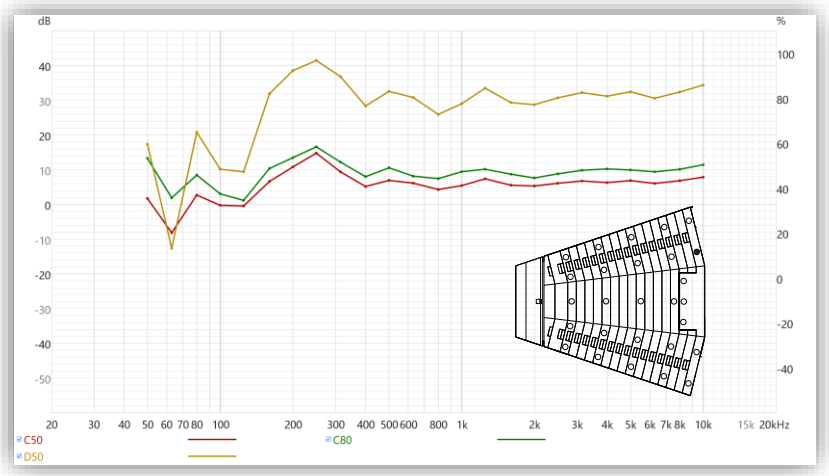
Διάγραμμα Π6.16 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_6



Διάγραμμα Π6.17 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_4

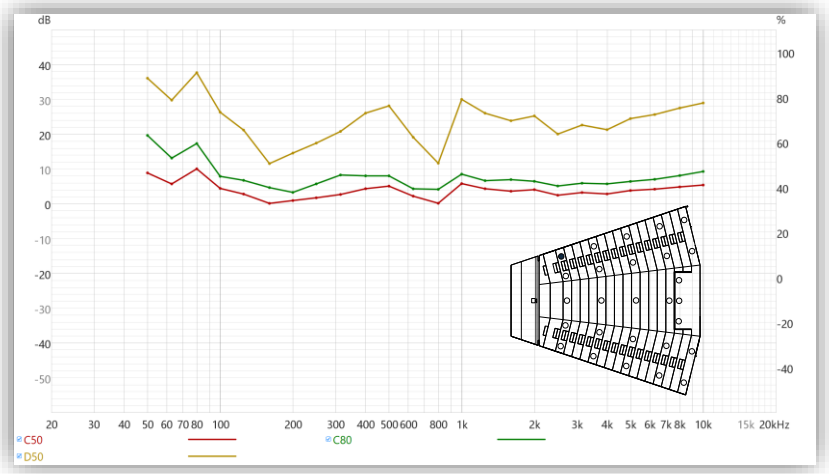


Διάγραμμα Π6.18 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_2

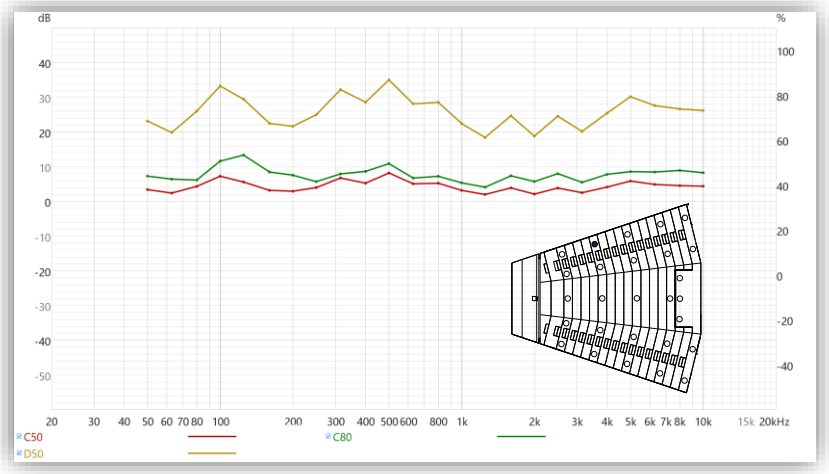


Διάγραμμα Π6.19 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση R_1

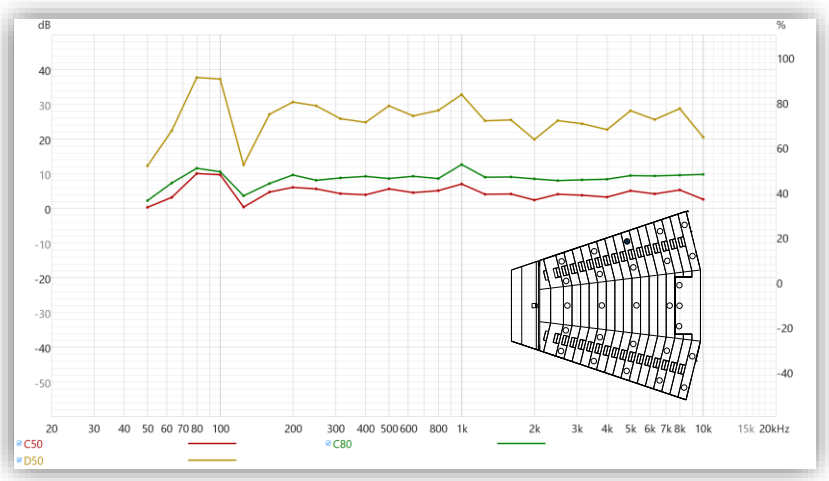
Ζώνη RR (RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1)



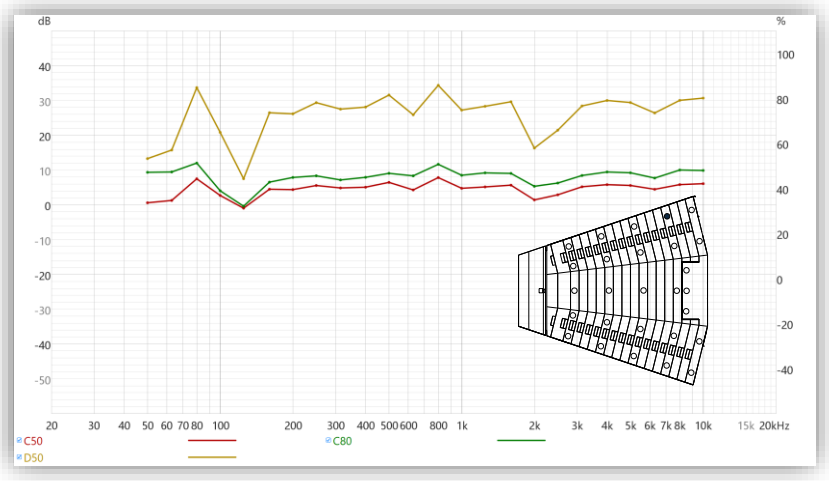
Διάγραμμα Π6.20 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_8



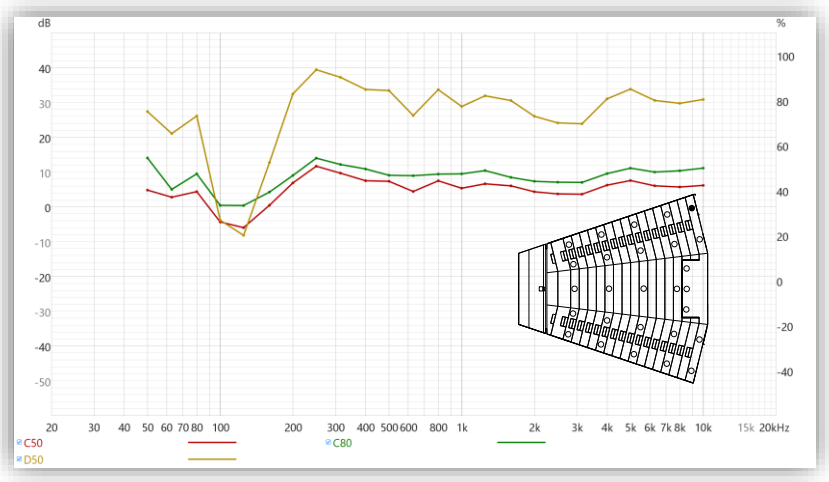
Διάγραμμα Π6.21 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_6



Διάγραμμα Π6.22 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_4



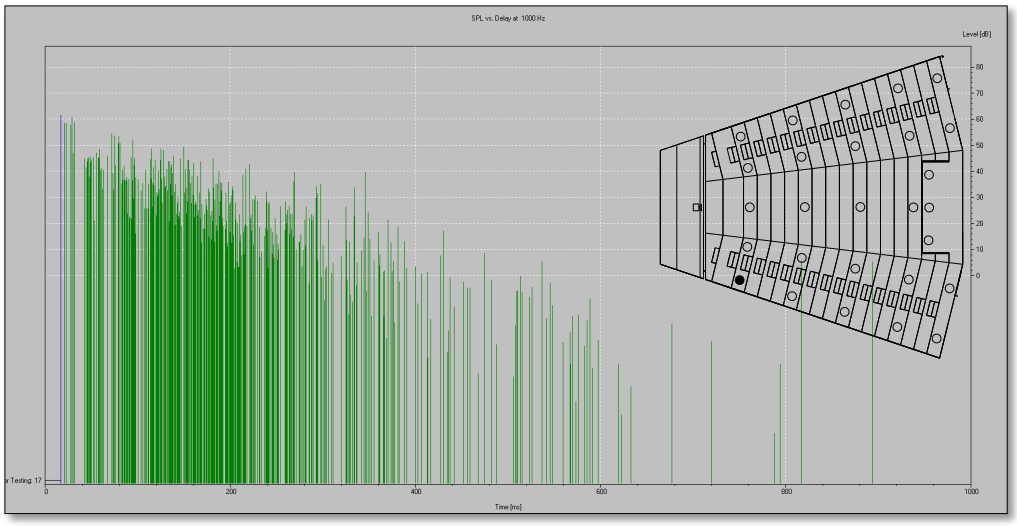
Διάγραμμα Π6.23 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_2



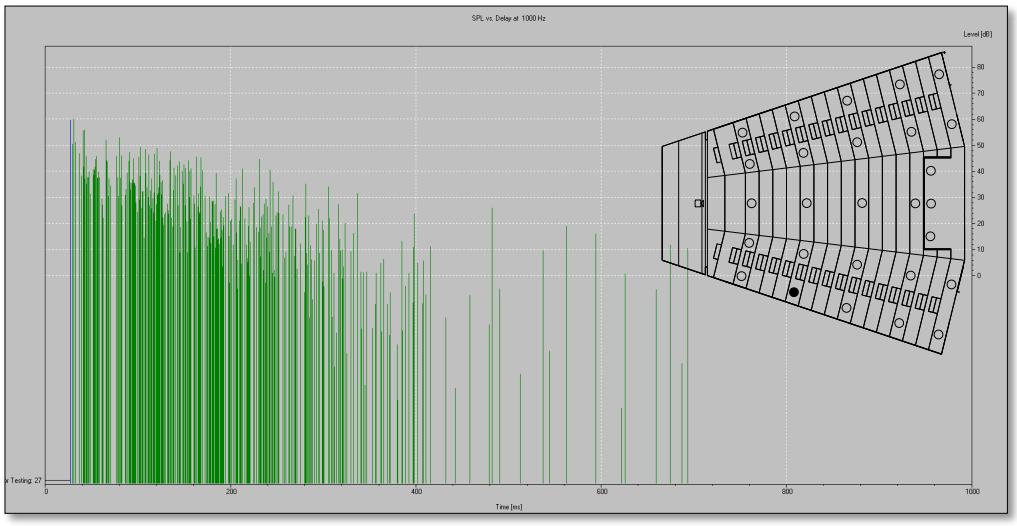
Διάγραμμα Π6.24 Μετρήσεις D_{50} (%), C_{50} (dB), C_{80} (dB) / Θέση RR_1

Παράρτημα 7 Ray Tracing Reflectograms

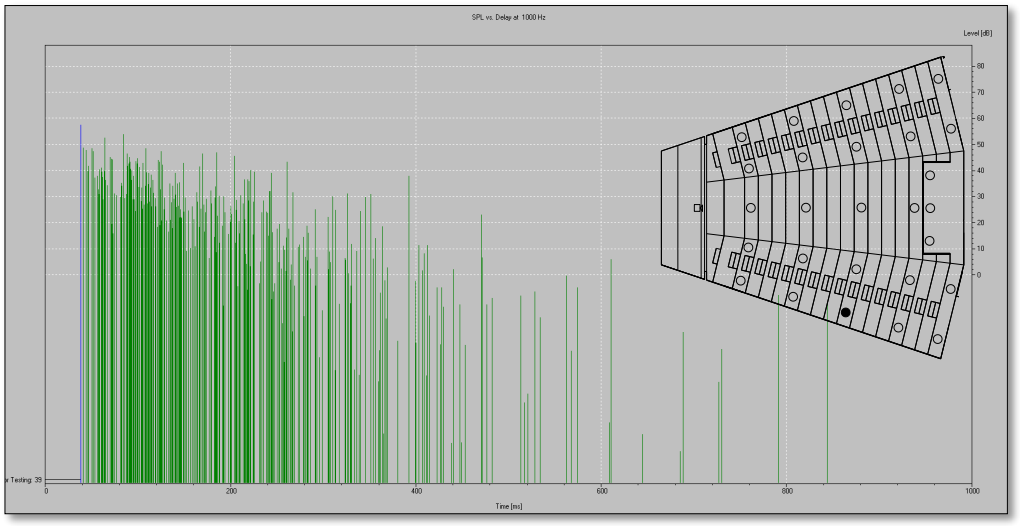
Ζώνη LL (Θέσεις LL8, LL6, LL4, LL2, LL1)



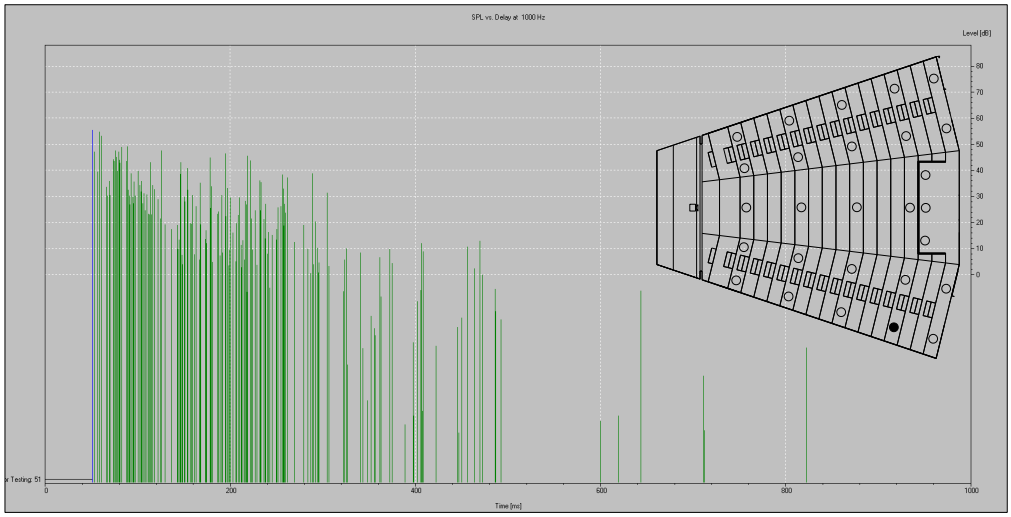
Διάγραμμα Π7.1 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_8



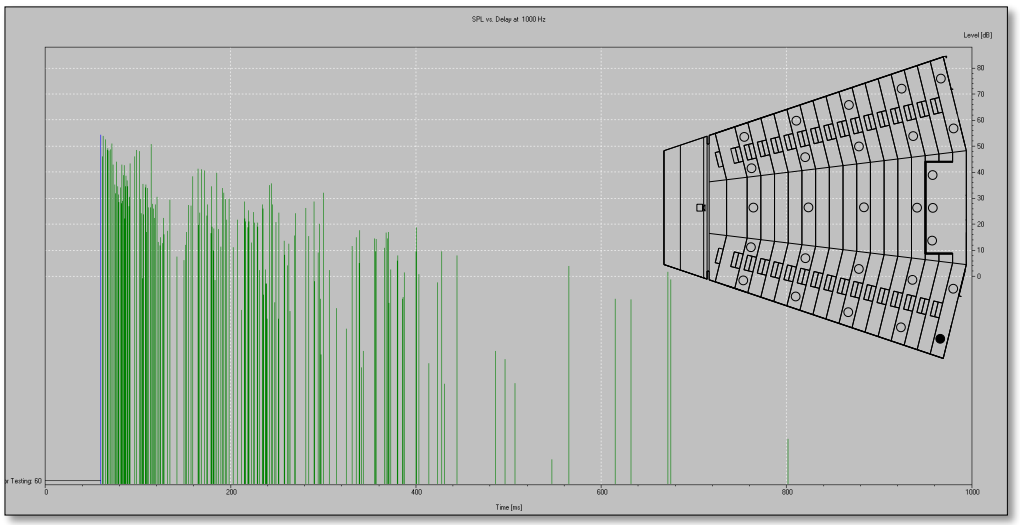
Διάγραμμα Π7.2 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_6



Διάγραμμα Π7.3 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_4

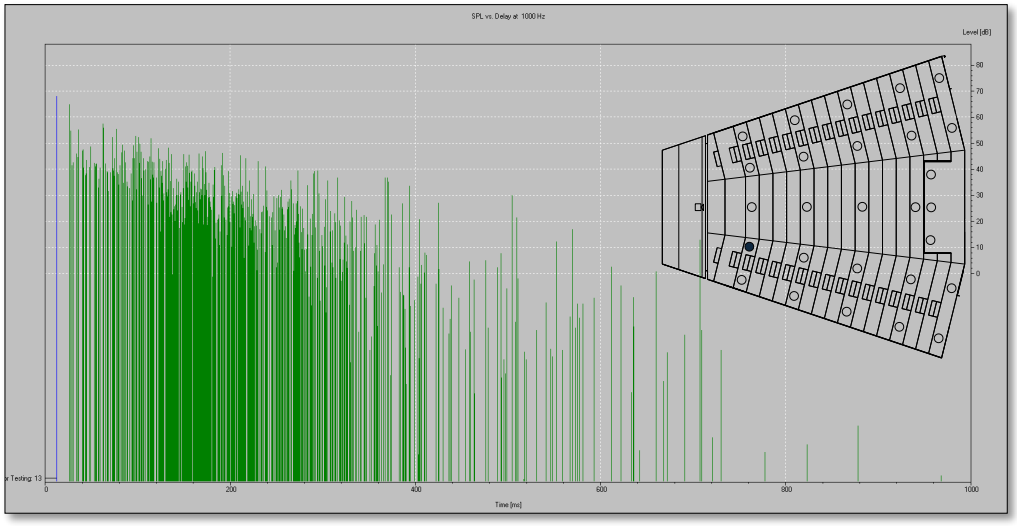


Διάγραμμα Π7.4 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_2

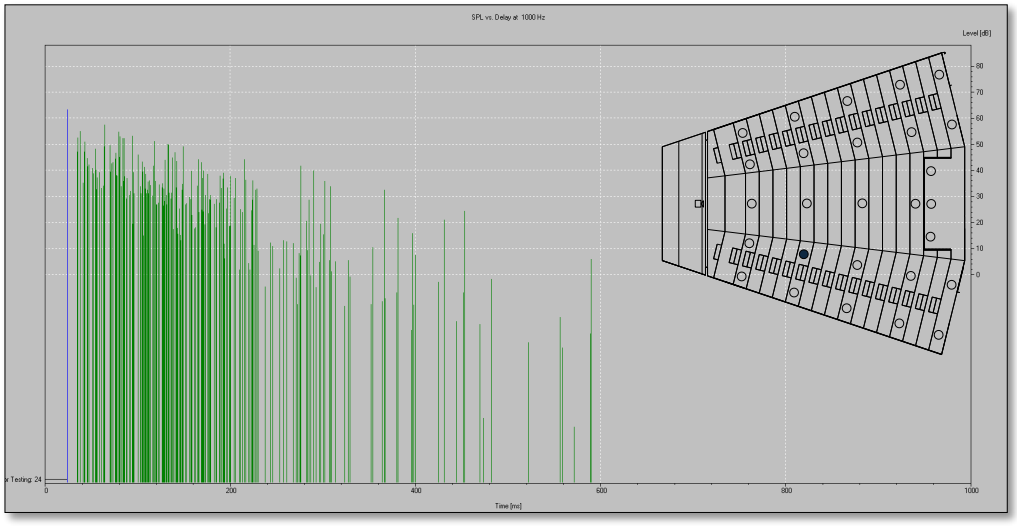


Διάγραμμα Π7.5 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση LL_1

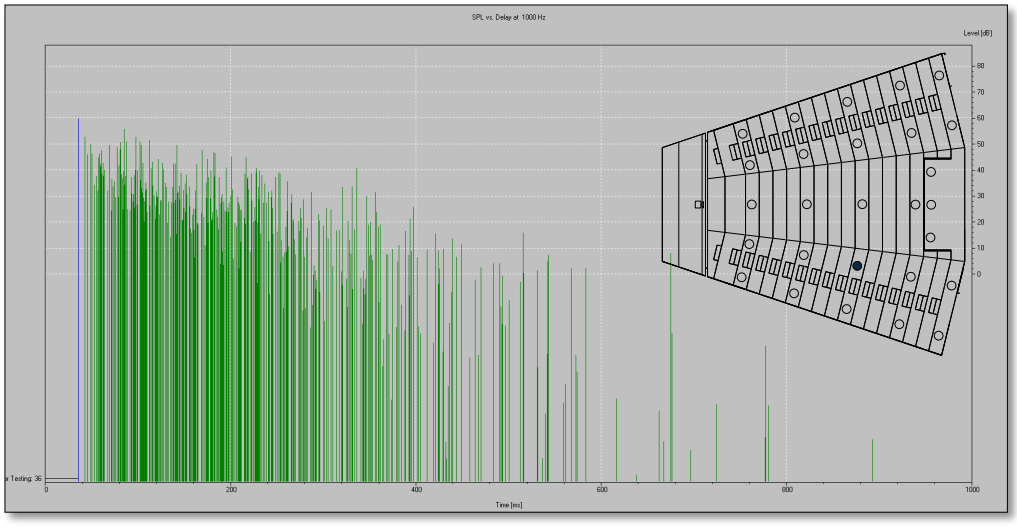
Ζώνη L (Θέσεις L_8, L_6, L_4, L_2, L_1)



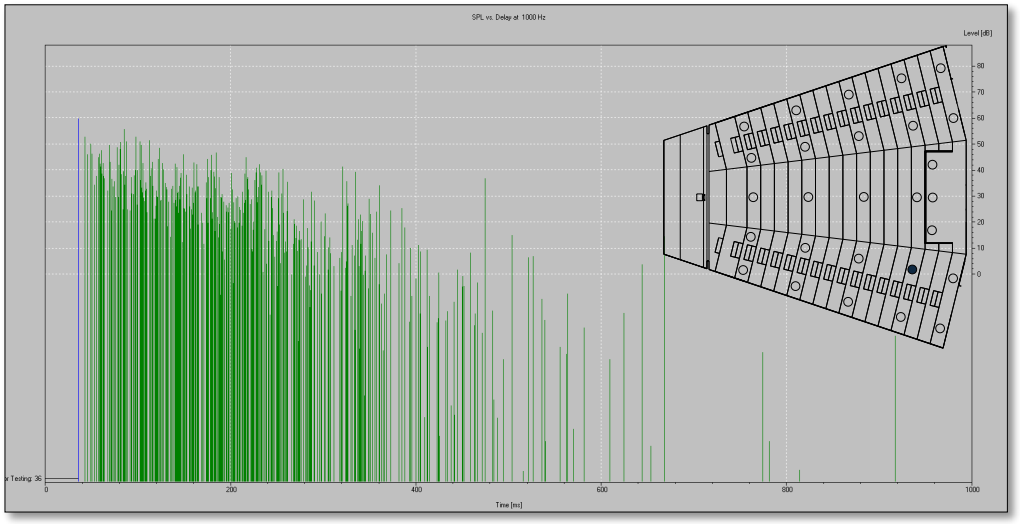
Διάγραμμα Π7.6 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_8



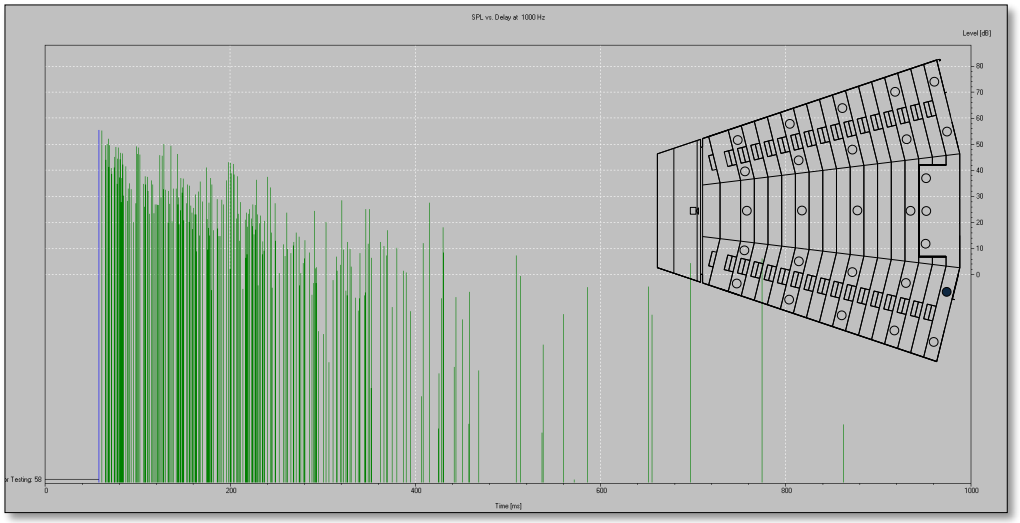
Διάγραμμα Π7.7 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_6



Διάγραμμα Π7.8 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_4

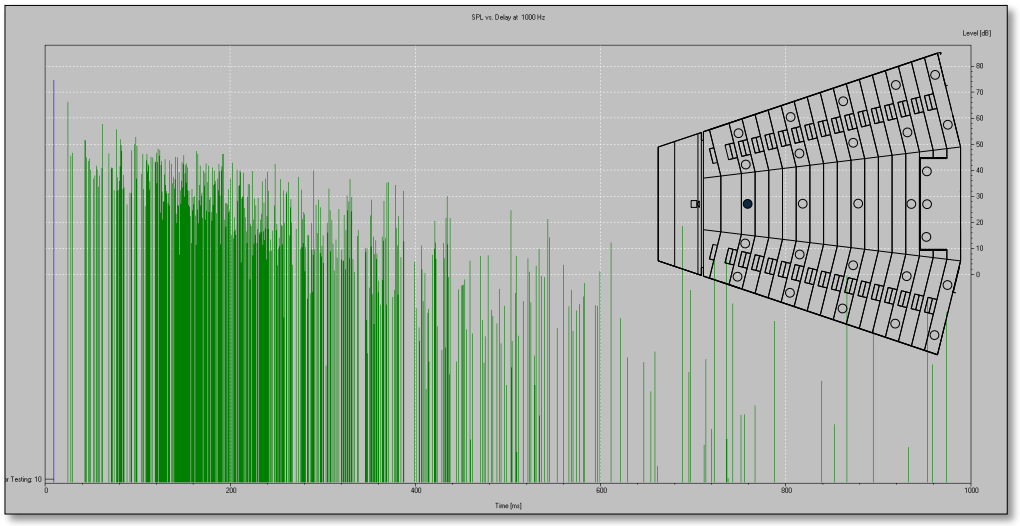


Διάγραμμα Π7.9 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_2

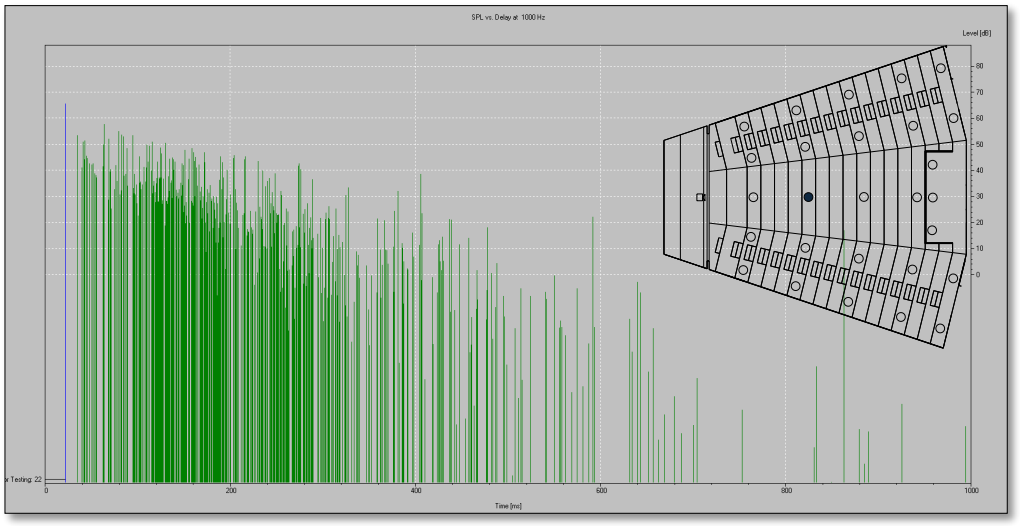


Διάγραμμα Π7.10 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση L_1

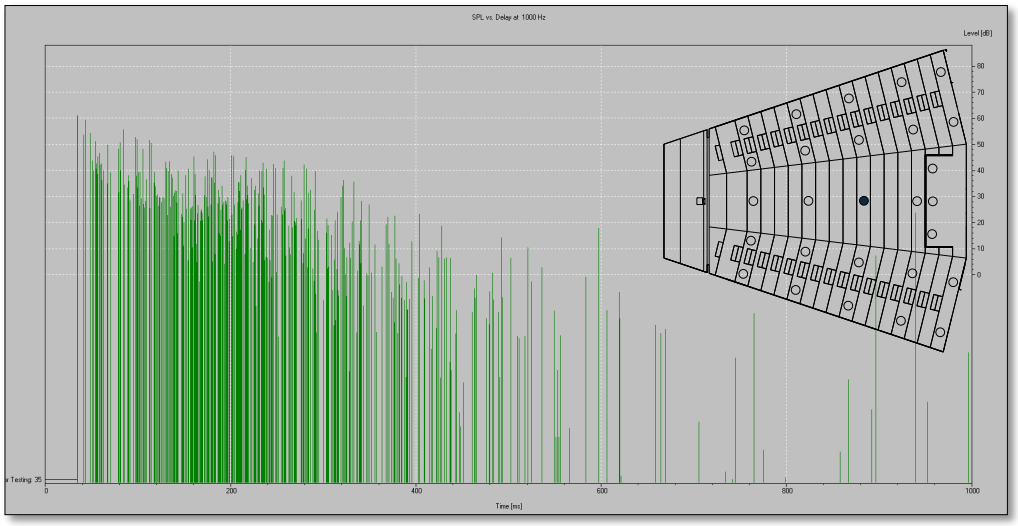
Ζώνη C (Θέσεις C_7, C_5, C_3, C_1)



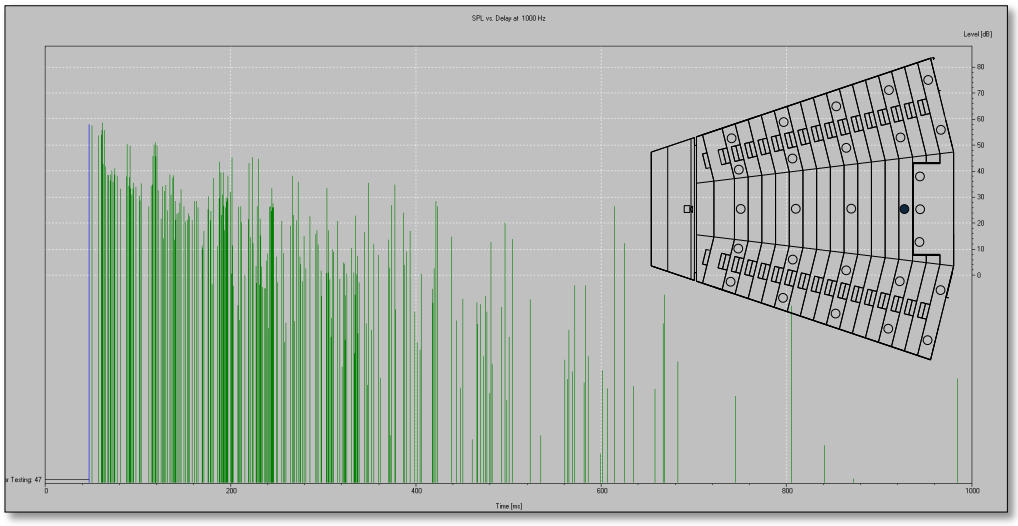
Διάγραμμα Π7.11 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_7



Διάγραμμα Π7.12 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_5

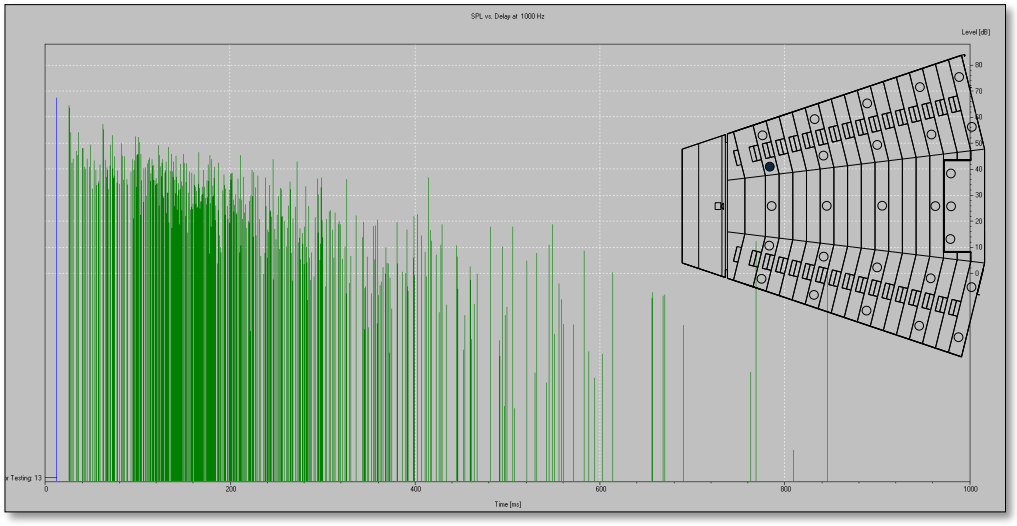


Διάγραμμα Π7.13 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_3

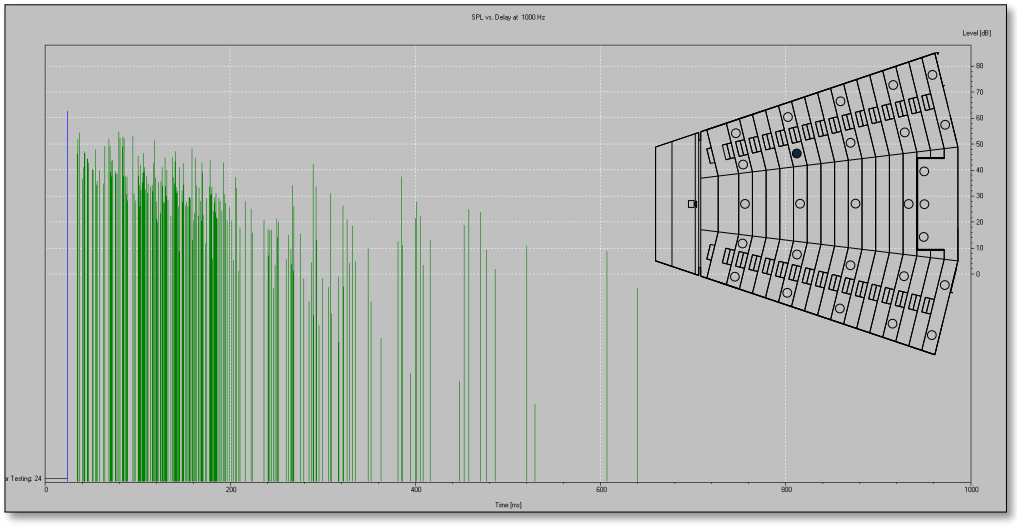


Διάγραμμα Π7.14 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση C_1

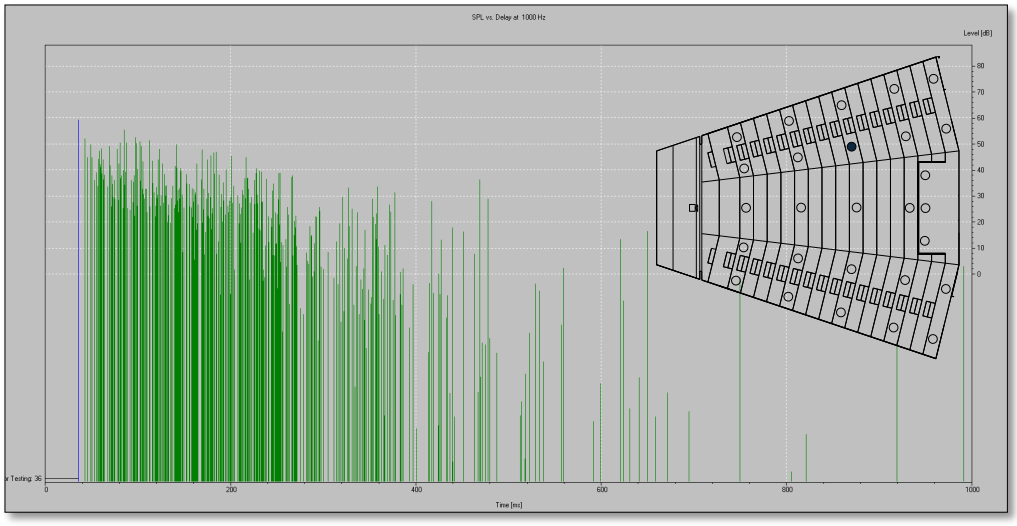
Ζώνη (Θέσεις R_8, R_6, R_4, R_2, R_1)



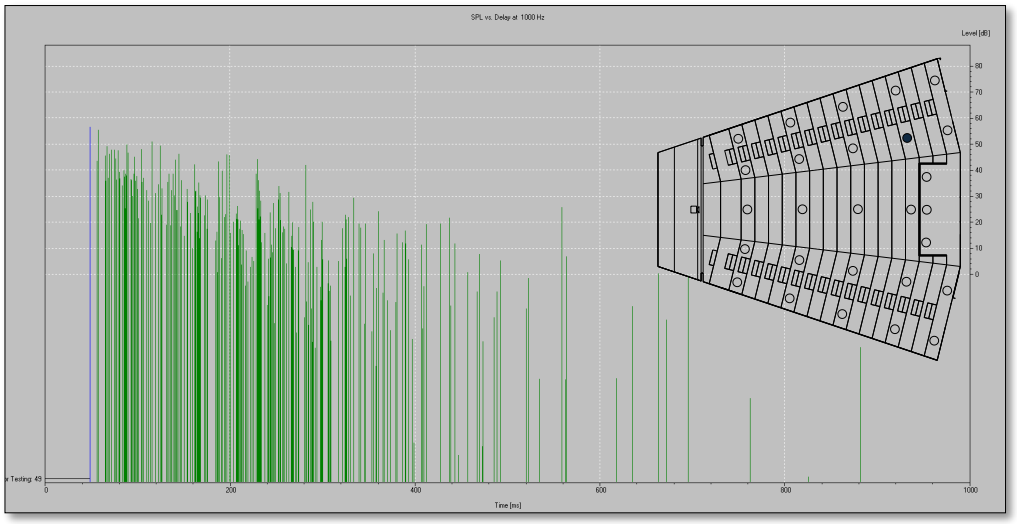
Διάγραμμα Π7.15 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_8



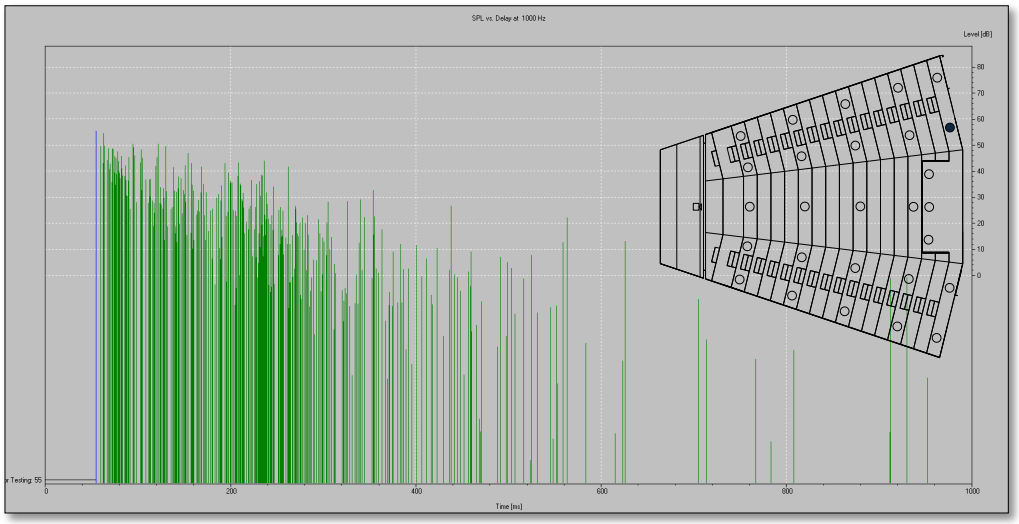
Διάγραμμα Π7.16 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_6



Διάγραμμα Π7.17 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_4

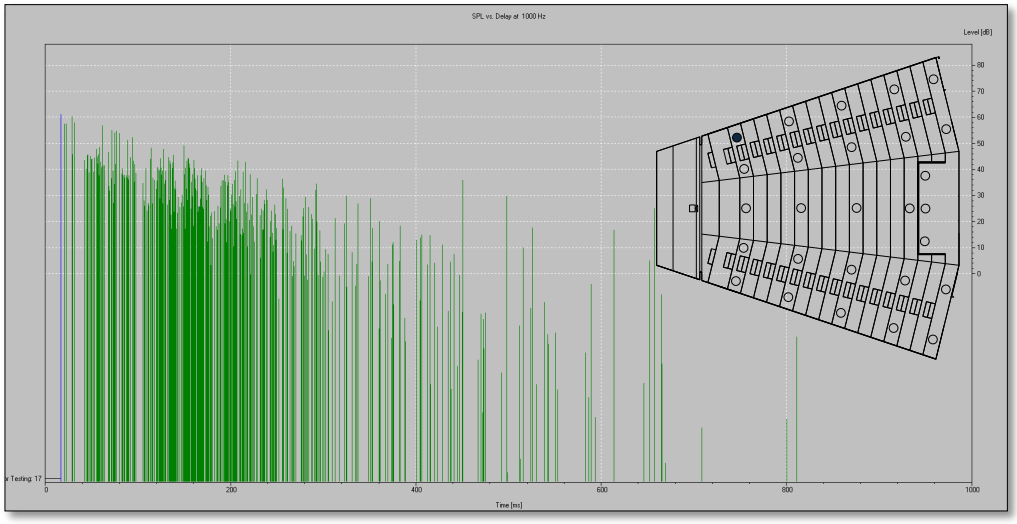


Διάγραμμα Π7.18 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_2

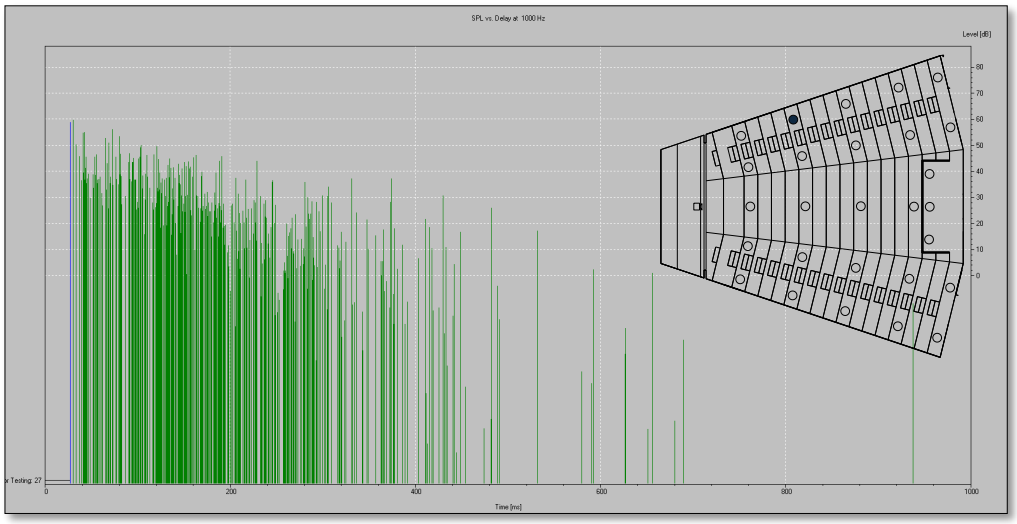


Διάγραμμα Π7.19 Ray Tracing, reflectogram, πηγή monitor / Θέση R_1

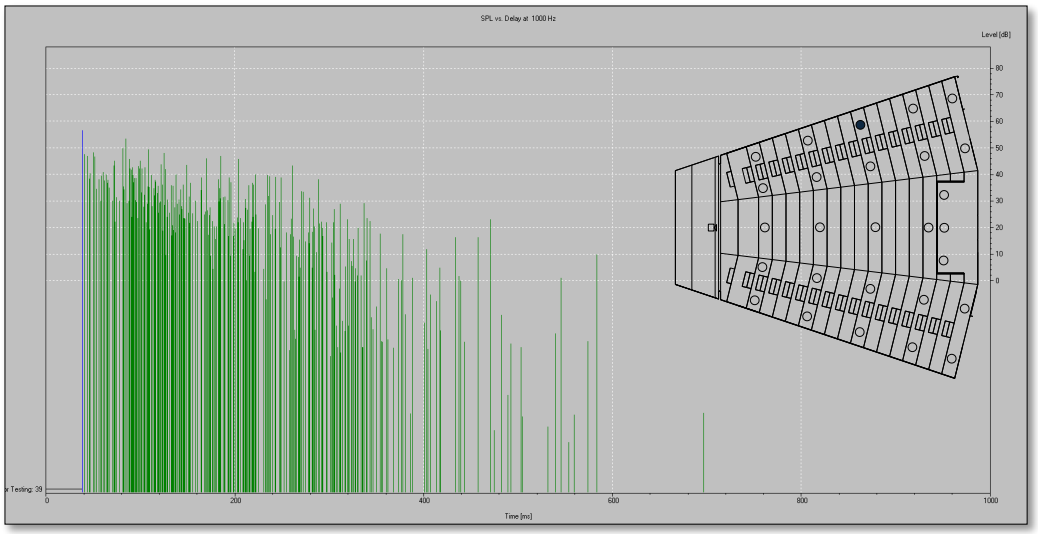
Ζώνη (Θέσεις RR_8, RR_6, RR_4, RR_2, RR_1)



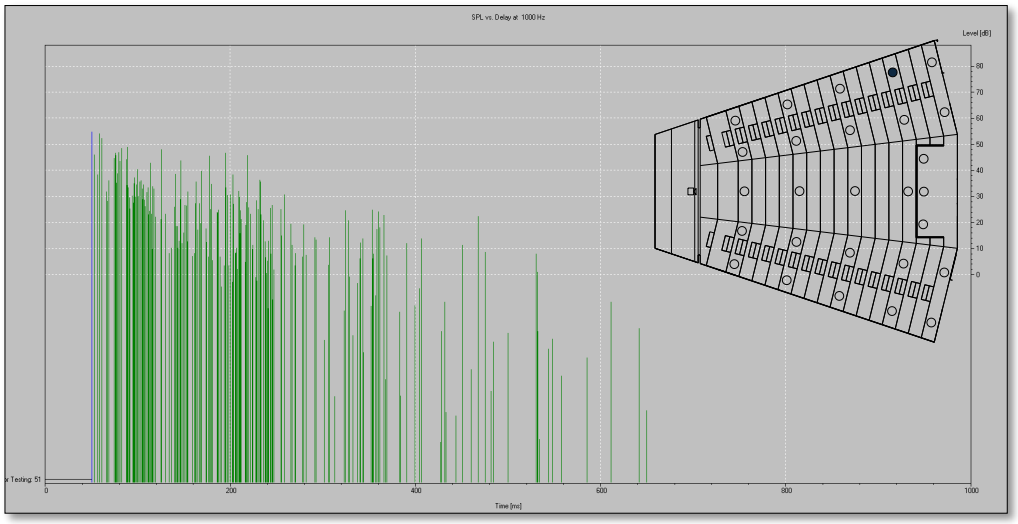
Διάγραμμα Π7.20 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_8



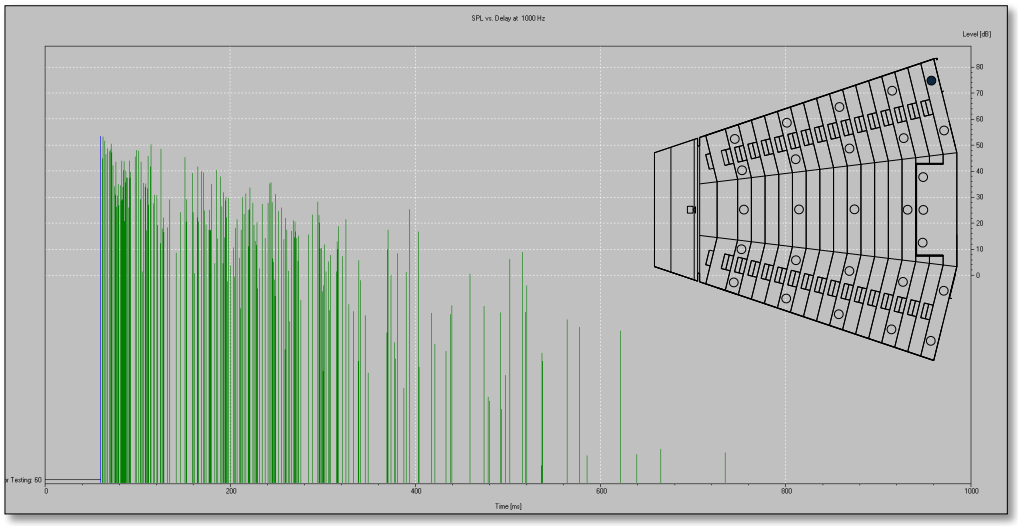
Διάγραμμα Π7.21 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_6



Διάγραμμα Π7.22 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_4



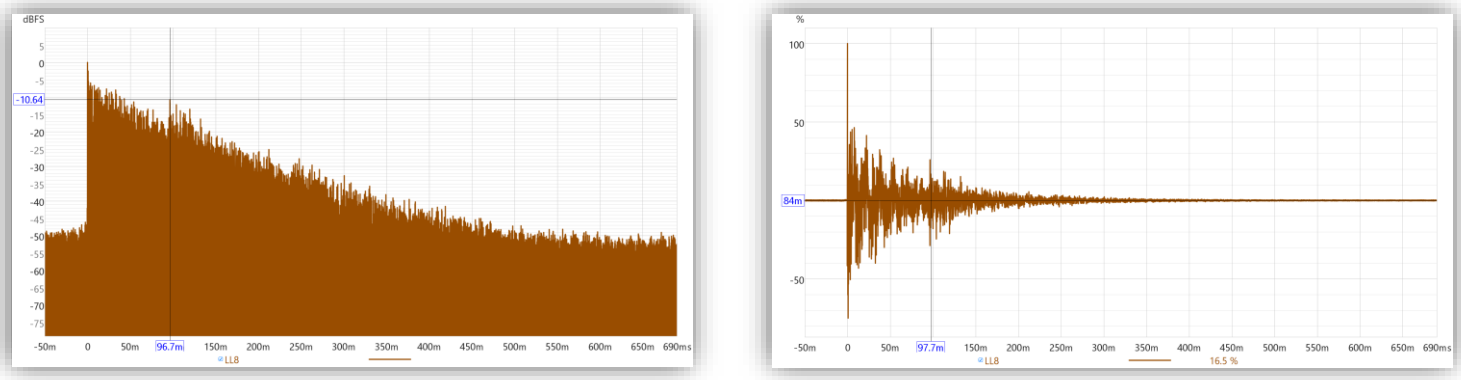
Διάγραμμα Π7.23 Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_2



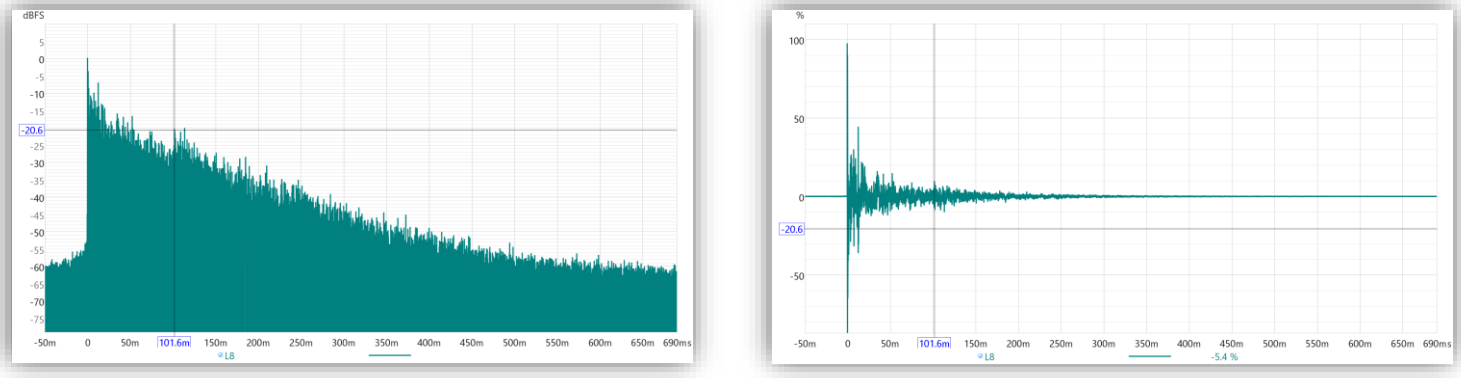
Διάγραμμα Π7.24 Διάγραμμα Ray Tracing, reflectogram / Θέση RR_1

Παράρτημα 8 Καμπύλη χρονικής απόσβεσης / Κρουστική απόκρουση

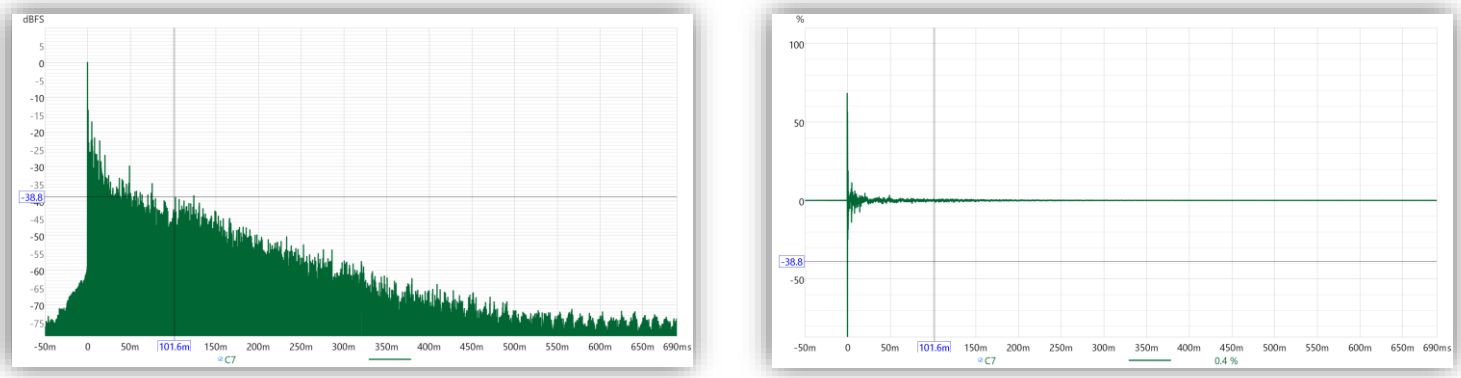
Ζώνη 8 (LL_8, L_8, C_7, R_8, RR_8)



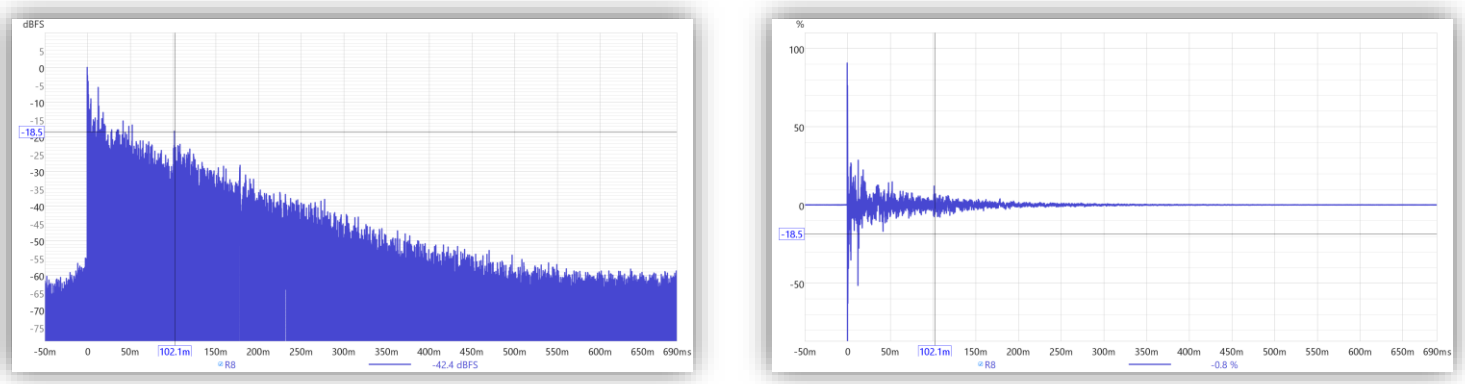
Διάγραμμα Π8.1 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_8



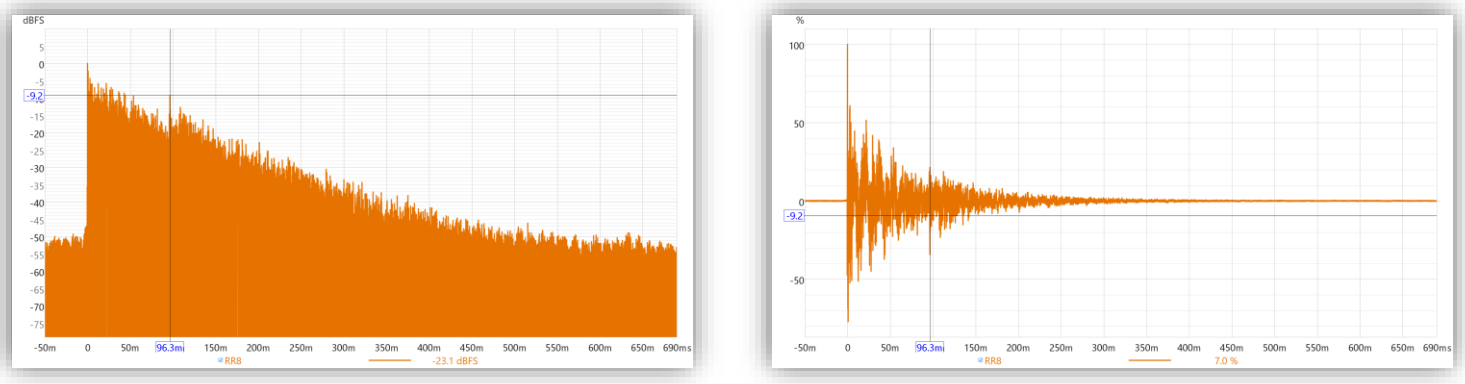
Διάγραμμα Π8.2 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_8



Διάγραμμα Π8.3 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_7

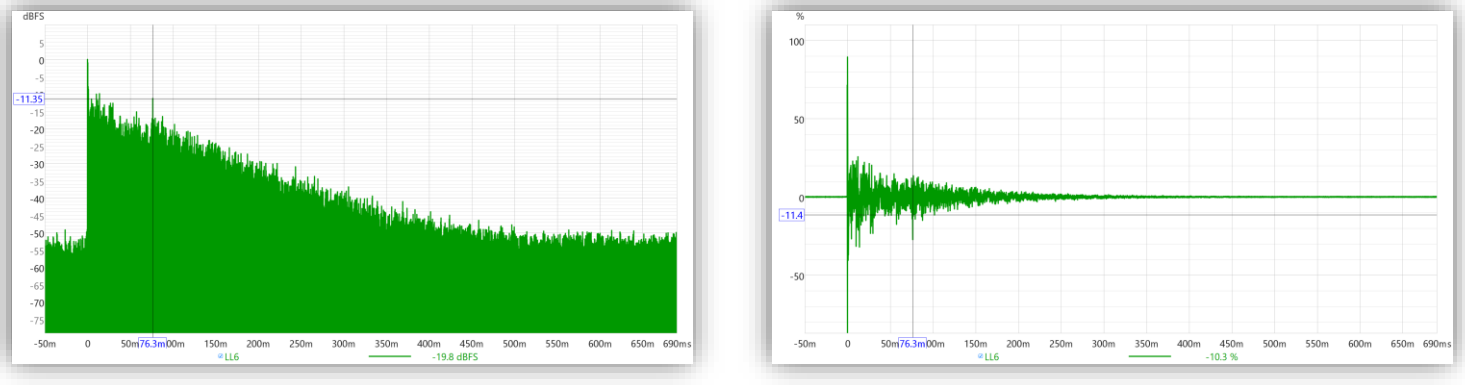


Διάγραμμα Π8.4 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_8

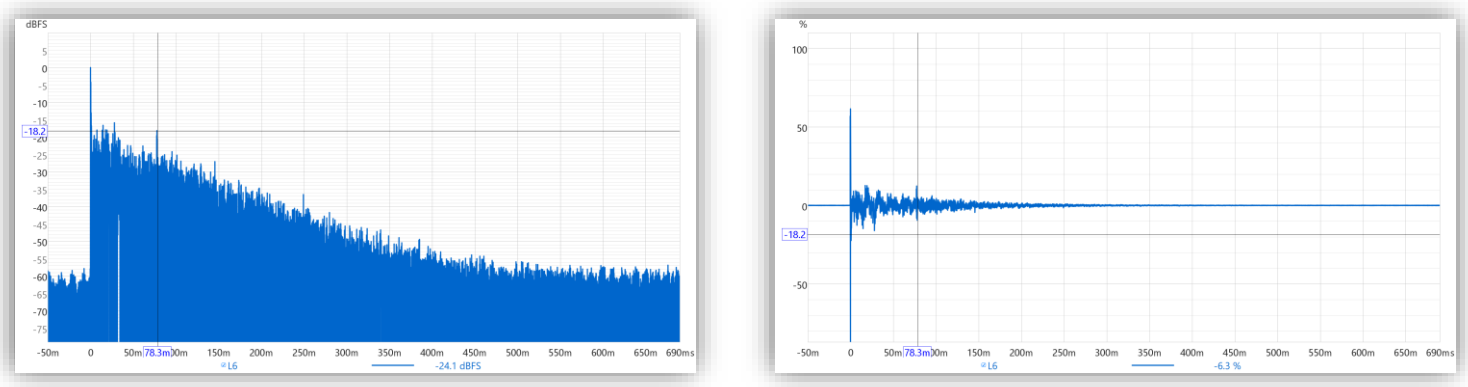


Διάγραμμα Π8.5 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_8

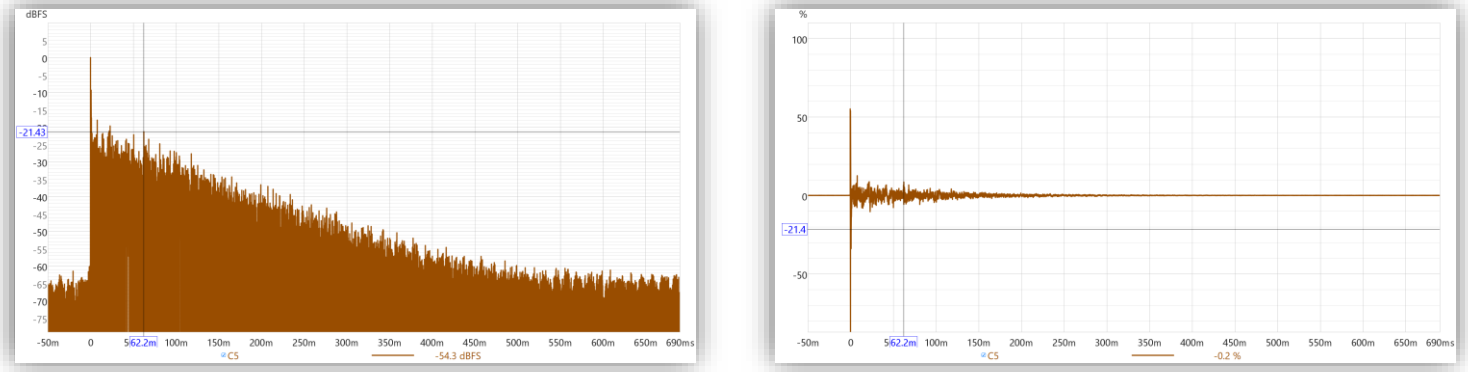
Ζώνη 6 (LL6, L6, C5, R6, RR6)



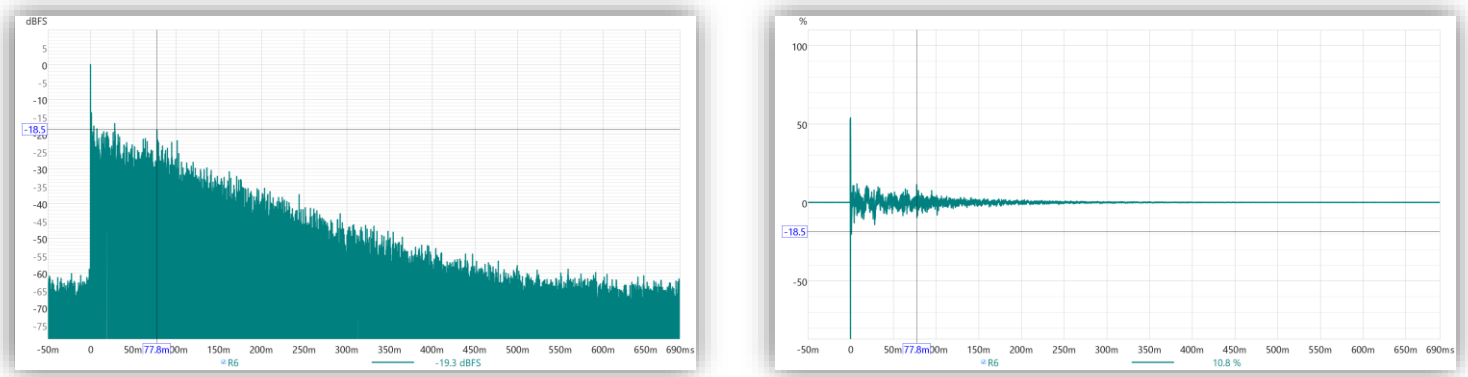
Διάγραμμα Π8.6 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_6



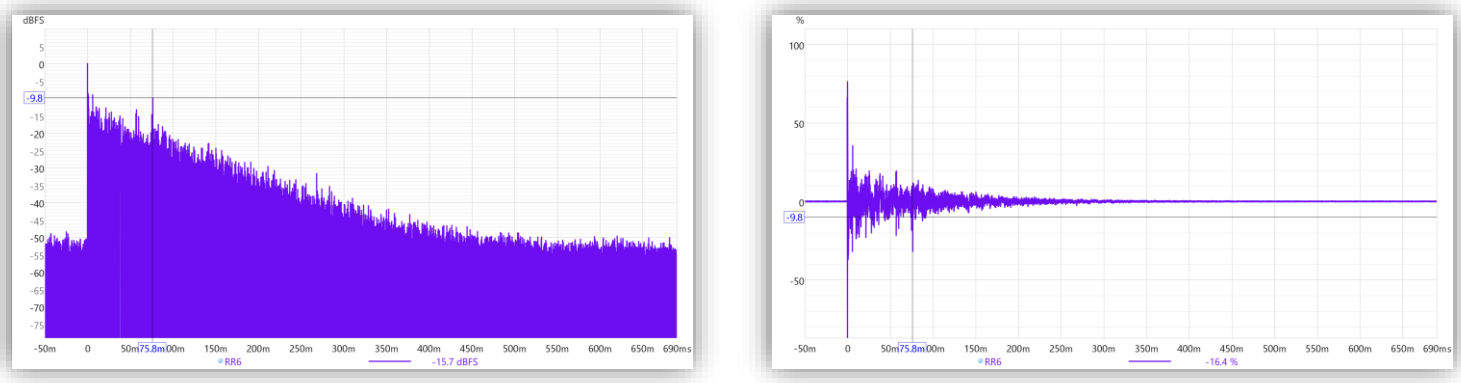
Διάγραμμα Π8.7 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_6



Διάγραμμα Π8.8 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_5

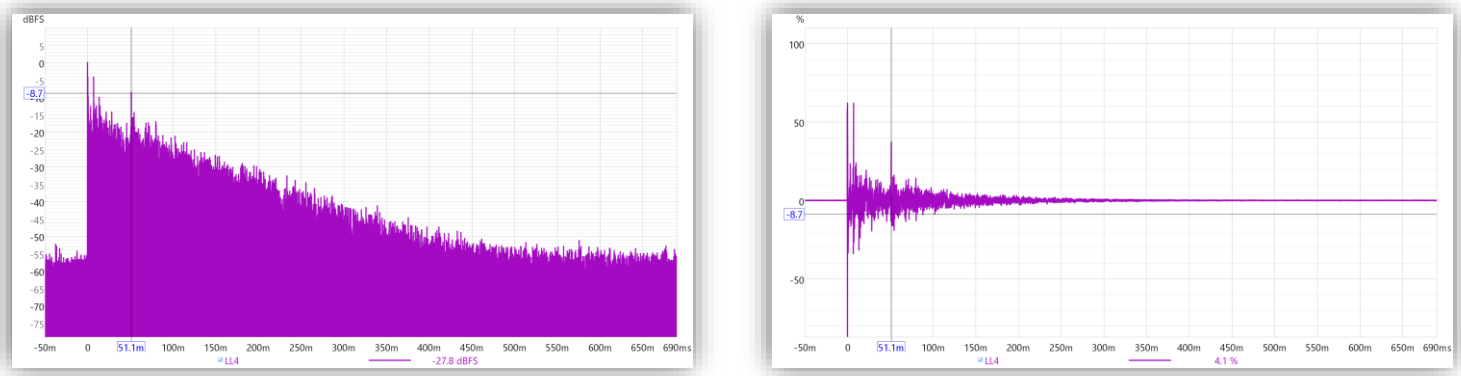


Διάγραμμα Π8.9 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_6

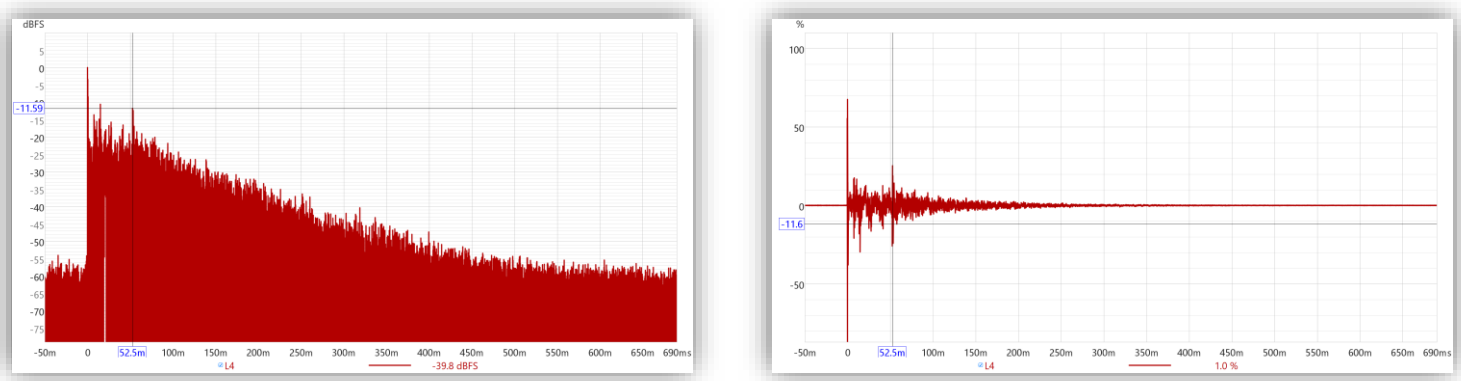


Διάγραμμα Π8.10 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_6

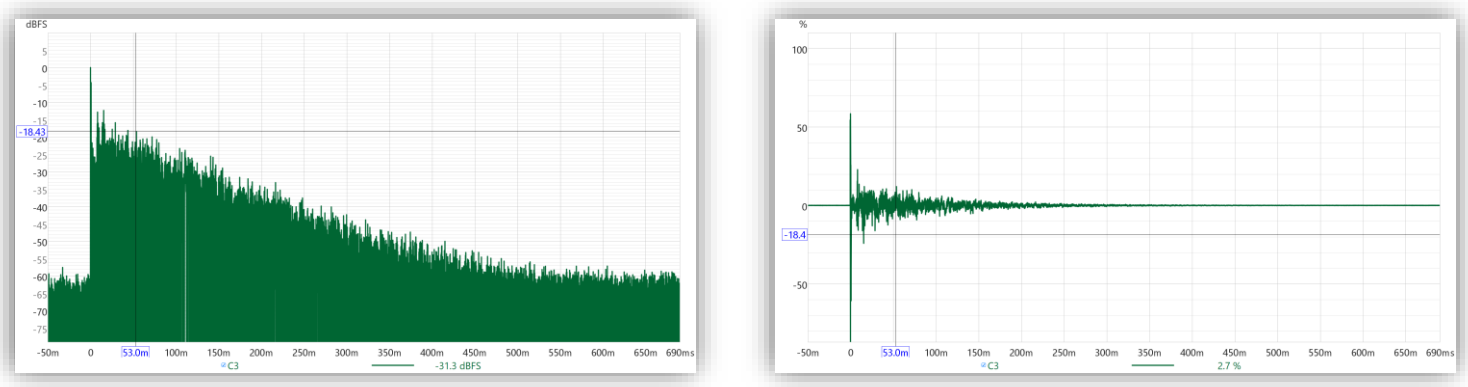
Ζώνη 4 (LL_4, L_4, C_3, R_4, RR_4)



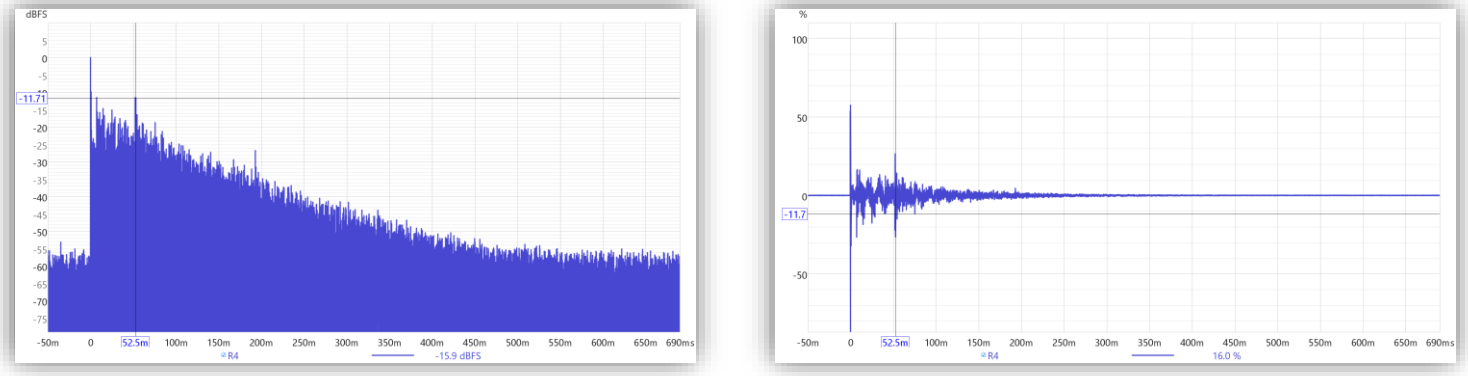
Διάγραμμα Π8.11 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_4



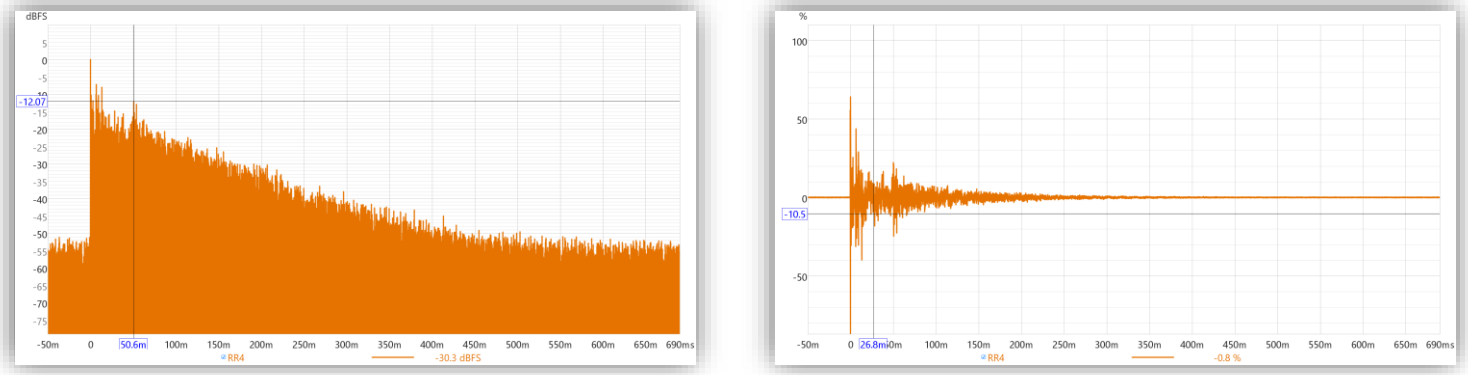
Διάγραμμα Π8.12 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_4



Διάγραμμα Π8.13 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_3

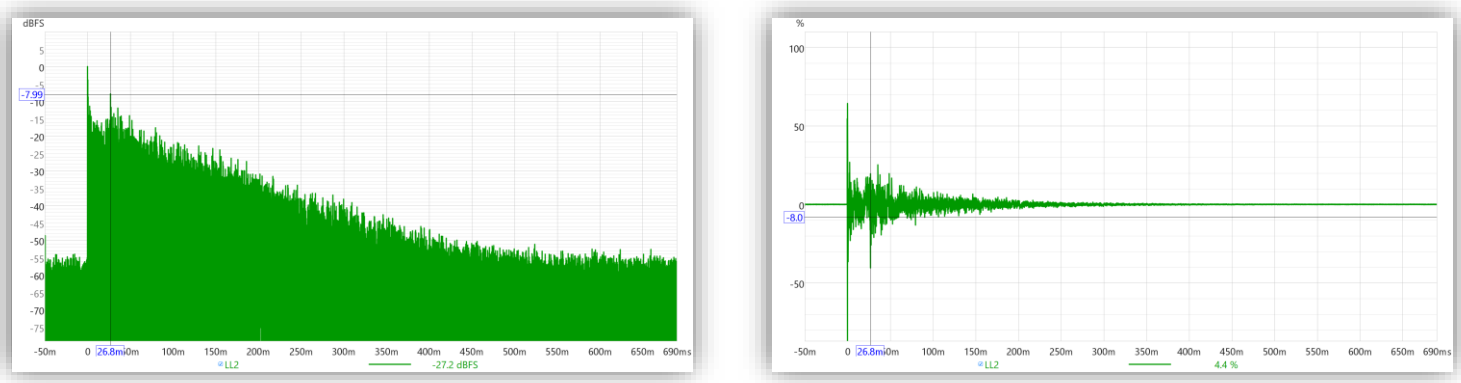


Διάγραμμα Π8.14 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_4

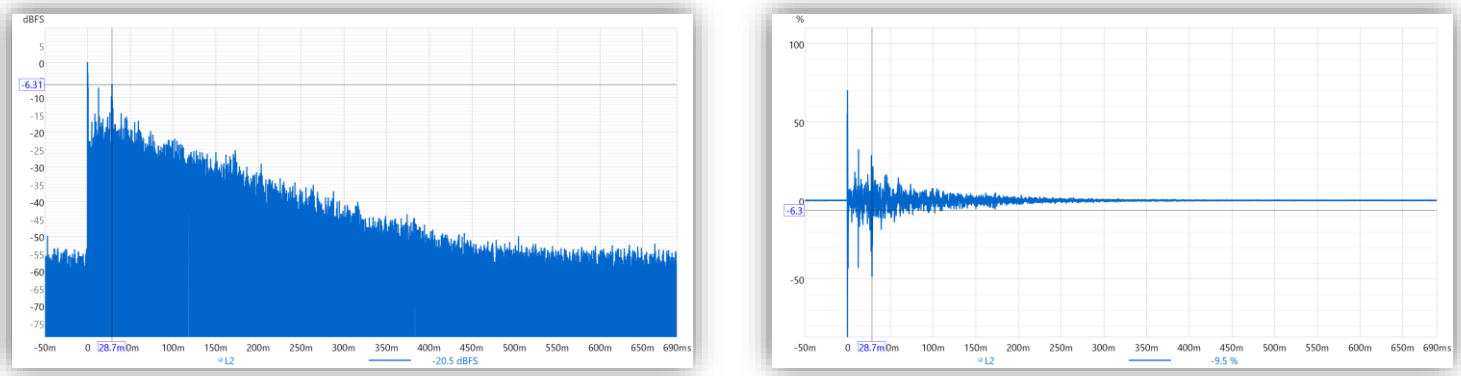


Διάγραμμα Π8.15 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_4

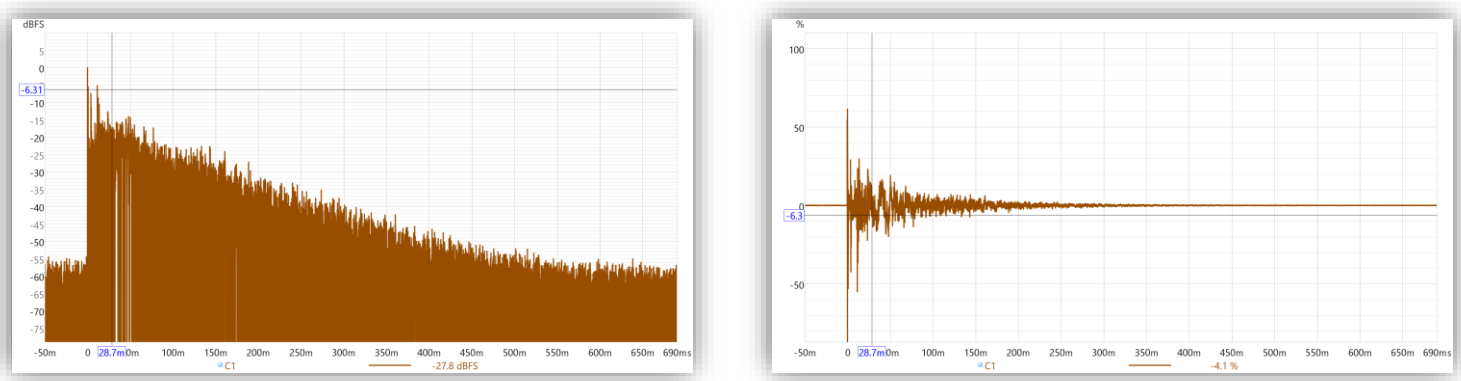
Ζώνη 2 (LL_2, L_2, C_1, R_2, RR_2)



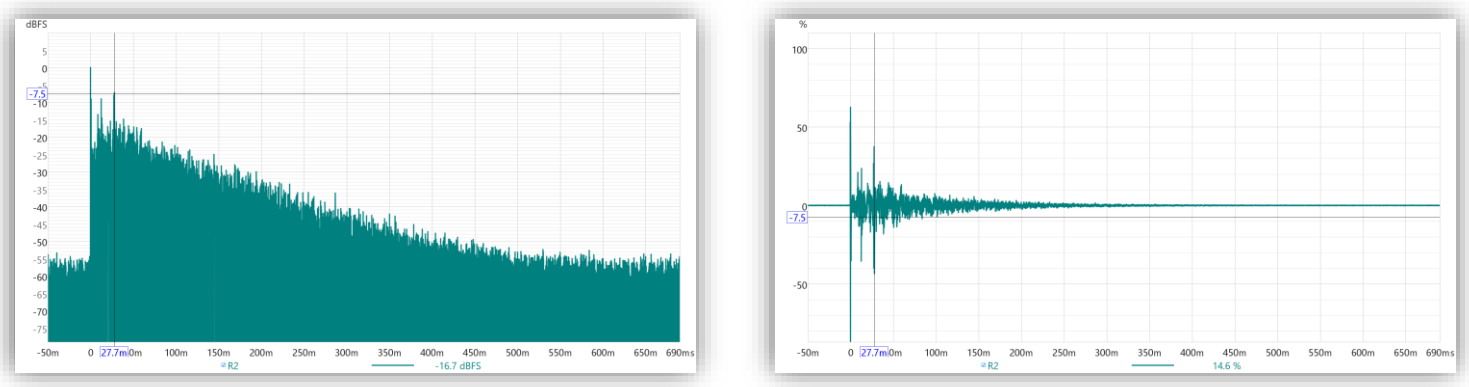
Διάγραμμα Π8.16 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_2



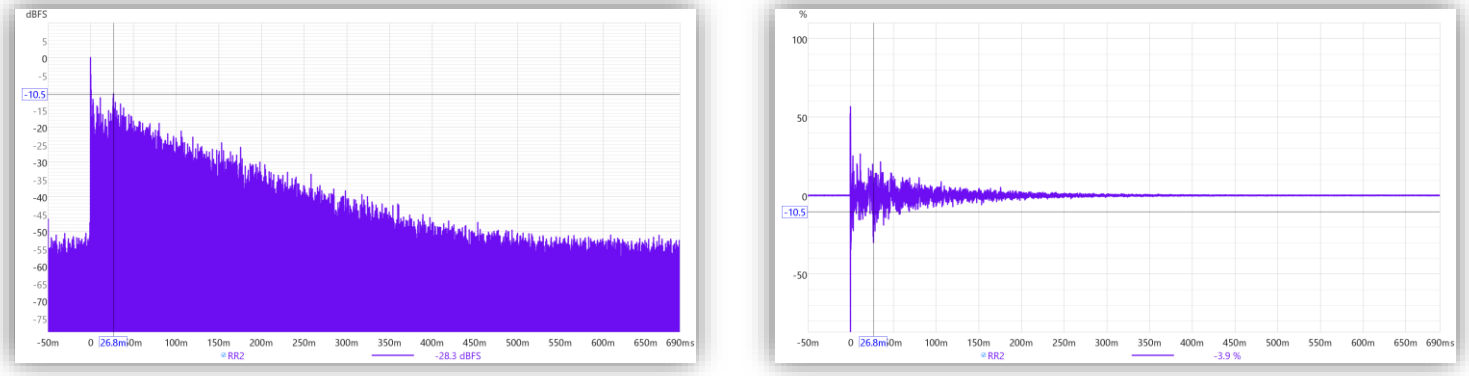
Διάγραμμα Π8.17 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_2



Διάγραμμα Π8.18 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση C_1

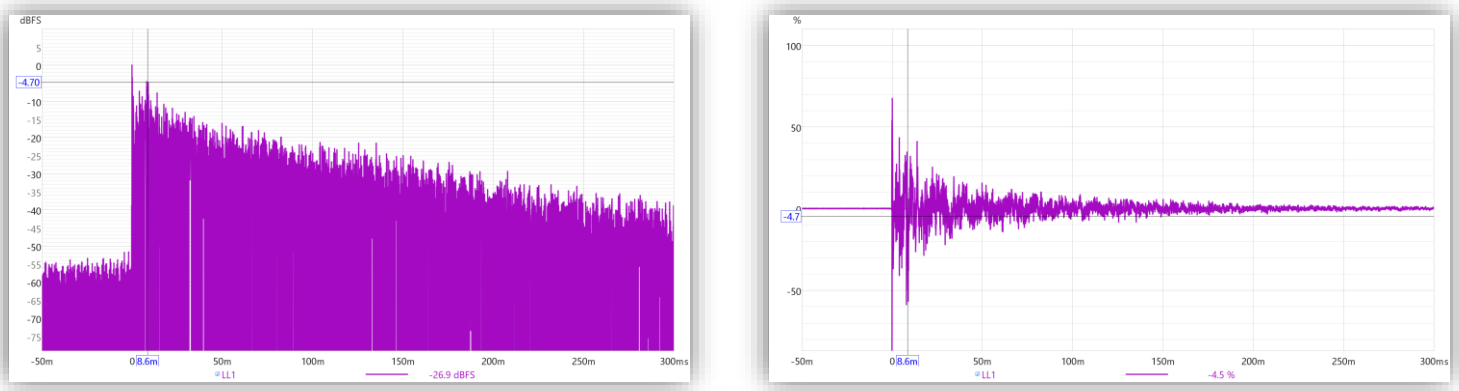


Διάγραμμα Π8.19 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_2

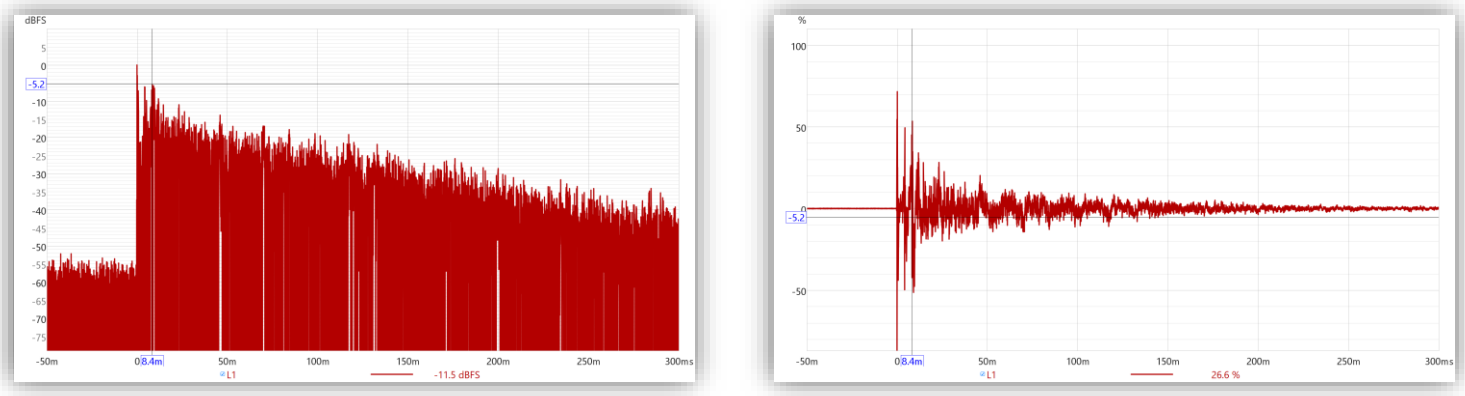


Διάγραμμα Π8.20 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_2

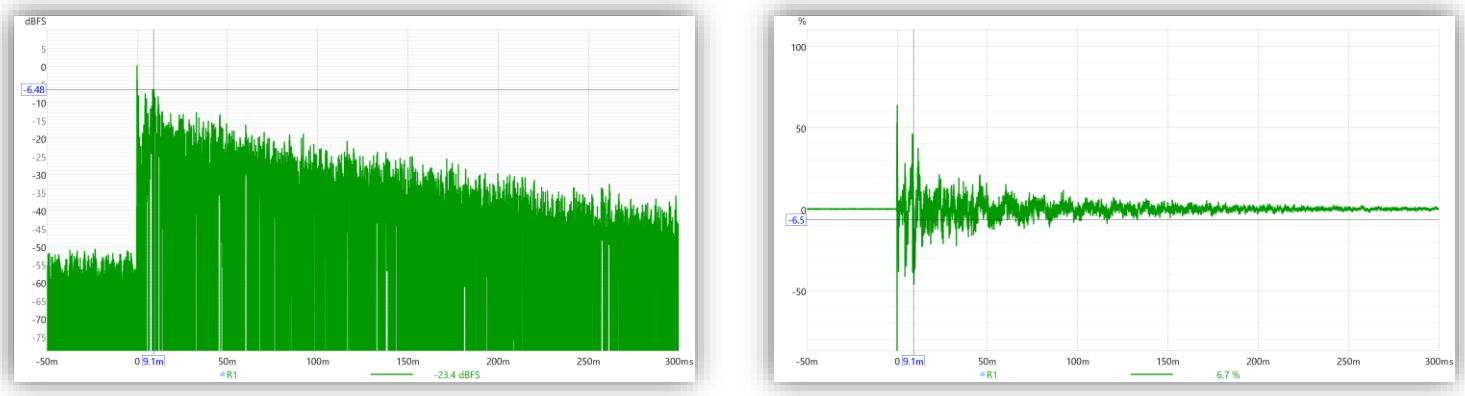
Ζώνη 1 (LL_1, L_1, R_1, RR_1)



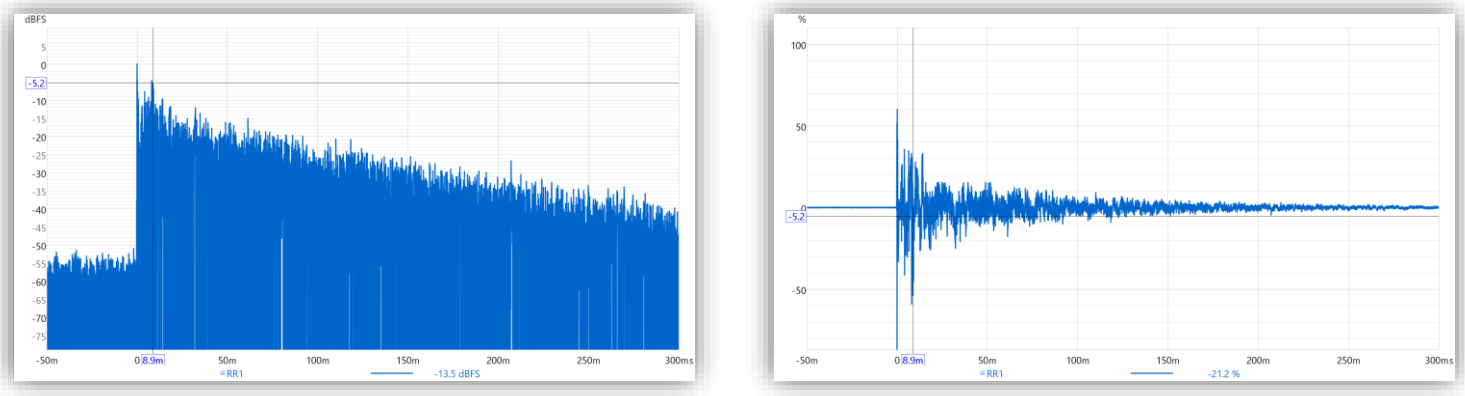
Διάγραμμα Π8.21 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση LL_1



Διάγραμμα Π8.22 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση L_1

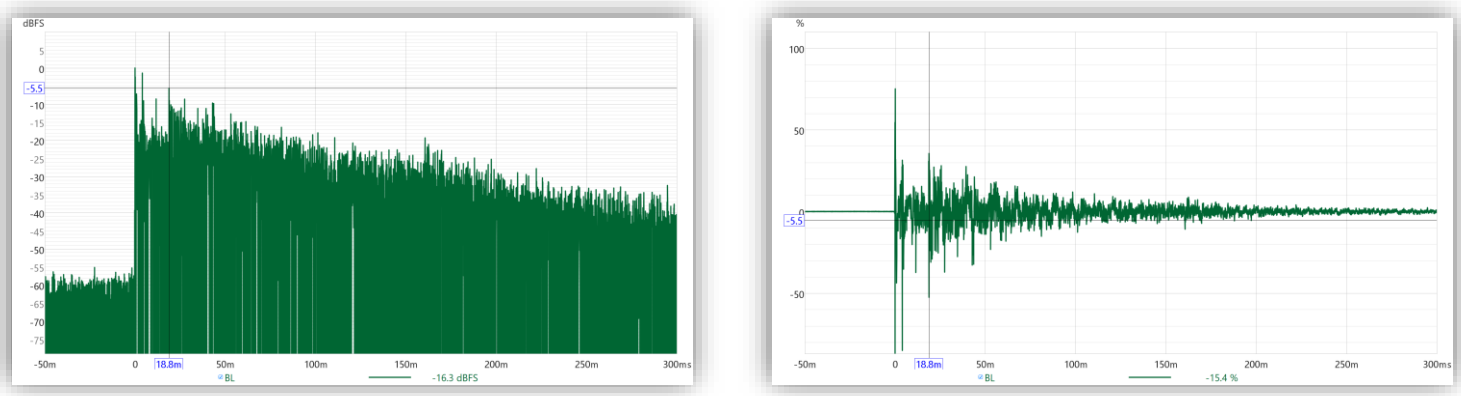


Διάγραμμα Π8.23 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση R_1

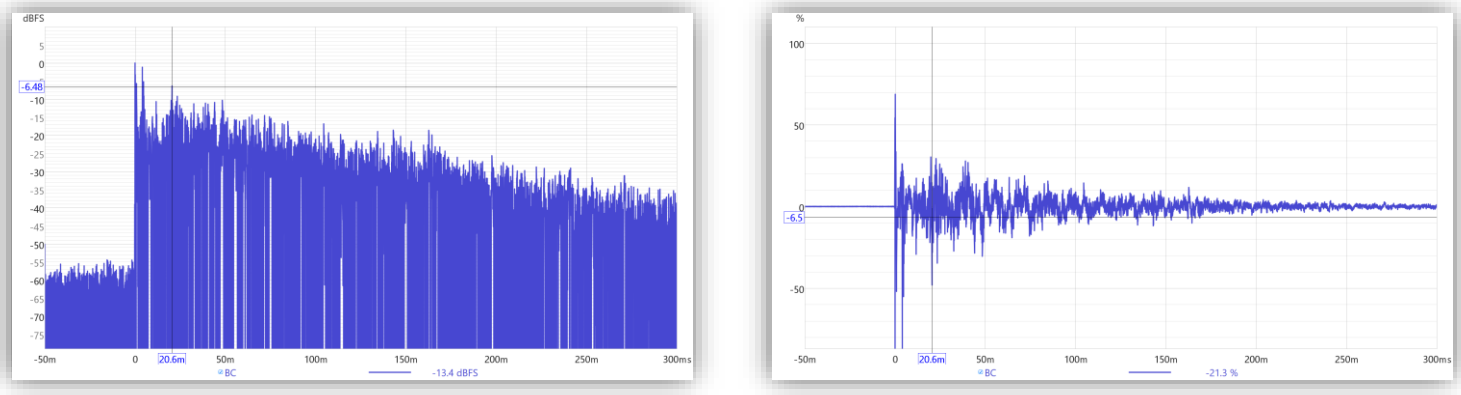


Διάγραμμα Π8.24 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση RR_1

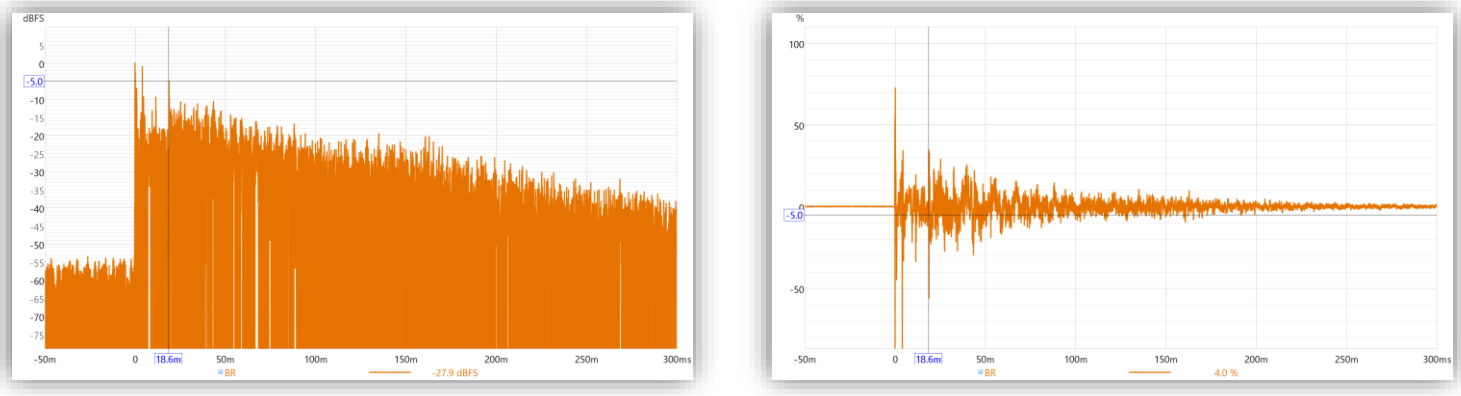
Μπαλκόνι (BL. BC, BR)



Διάγραμμα Π8.25 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BL



Διάγραμμα Π8.26 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BC



Διάγραμμα Π8.27 Χρονική απόσβεση ενέργειας & κρουστική απόκριση / θέση BR