



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος

Διπλωματική Εργασία

Ακουστική Μελέτη στην Αίθουσα Ηχογράφησης και Μουσικής Εξάσκησης του «Από Κάτω» Στούντιο Ηχογραφήσεων, Μίξης και Mastering

Σταμάτης Φουσέκης

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Κούτρας

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή (Σταμάτη Φουσέκη) 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 Μελέτη στην Αίθουσα Ηχογράφησης και Μουσικής
Εξάσκησης του «Από Κάτω» Στούντιο Ηχογραφήσεων, Μίξης
και Mastering**

Σταμάτης Φουσέκης

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αθανάσιος Κούτρας

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα ΗΜΜΥ, Παν. Πελοποννήσου

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Καλλίρης

Καθηγητής

Τμήμα Δημοσιογραφίας και ΜΜΕ, ΑΠΘ

Πάτρα, Μάιος 2026

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον φίλο και συνεργάτη Γιώργο Παυλίδη για την παραχώρηση του στούντιο, αλλά κυρίως για το πολύ χρήσιμο φωτογραφικό υλικό που μου διέθεσε από τη διαδικασία κατασκευής του χώρου.

1. Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η ακουστική συμπεριφορά του χώρου ηχογράφησης και μουσικής εξάσκησης του «Από Κάτω» στούντιο ηχογραφήσεων. Μέσω των κατάλληλων μετρήσεων θα προκύψουν τα απαραίτητα συμπεράσματα όσον αφορά τη συχνотική απόκριση του δωματίου, τον χρόνο αντήχησής του και τον εντοπισμό τυχόν συντονισμών και στάσιμων κυμάτων. Σύμφωνα με τα προσδοκώμενα αποτελέσματα θα προκύψει μια πρόταση βελτιστοποίησης της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου, προτείνοντας τις καταλληλότερες παρεμβάσεις όσον αφορά την ηχο-απορρόφηση και διάχυση σε κλειστό χώρο.

Λέξεις – Κλειδιά

Ακουστική εσωτερικών χώρων, ακουστικές μετρήσεις, ηχο-απορρόφηση, στούντιο ηχογράφησης.

“Acoustic Study of the Recording and Music Practice Room of the ‘Apo Kato’ Recording, Mixing and Mastering Studio”

Stamatis Fousekis

2. Abstract

The aim of this thesis is to investigate the acoustic behavior of the recording and music practice room of the “Apo Kato” recording, mixing and mastering studio. Through appropriate acoustic measurements, the necessary conclusions will be drawn regarding the room’s frequency response, reverberation time, and the identification of possible resonances and standing waves. Based on the expected results, a proposal for optimizing the acoustic performance of the space will be developed, recommending the most suitable interventions in terms of sound absorption and diffusion within an enclosed environment.

Keywords

Recording studio, acoustic measures, sound absorption, internal acoustics.

3. Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων	xiii
1. Η εξέλιξη της ακουστικής χώρων στα στούντιο ηχογράφησης	1
1.1 Τα πρώτα στούντιο (1890-1920).....	1
1.2 Τα στούντιο πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (1920 - 1940).....	4
1.3 Τα στούντιο μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (1940 - 1960)	7
1.4 Η χρυσή εποχή των στούντιο (1970 - 1980)	11
1.5 Ψηφιακή εποχή και μικρά στούντιο (1990 - σήμερα).....	16
2. Αντικειμενικές παράμετροι ακουστικών μετρήσεων	21
2.1 Κρουστική απόκριση σε κλειστό χώρο	21
2.2 Συχνотική απόκριση δωματίου (SPL).....	22
2.3 Χρόνος αντήχησης και χρόνος πρώιμης απόσβεσης (T30, EDT).....	24
2.4 Αρμονική παραμόρφωση στις ακουστικές μετρήσεις (THD).....	26
2.5 Ευκρίνεια (C50, C80).....	28
3. Ενδεικτική κατασκευαστική περιγραφή του προς μελέτη χώρου.....	29
3.1 Περιγραφή του χώρου	29
3.2 Οροφές	30
3.3 Τοιχία	33
3.4 Δάπεδα	35
4. Ακουστική μέτρηση του live room	38
4.1 Μεθοδολογία.....	38
4.2 Περιορισμοί της μελέτης.....	55
4.3 Μετρήσεις 1ου σεναρίου.....	56
4.4 Μετρήσεις 2ου σεναρίου.....	83
5. Συμπεράσματα	112
5.1 Συμπεράσματα 1ου σεναρίου.....	112
5.2 Συμπεράσματα 2ου σεναρίου.....	115
Βιβλιογραφία.....	117

4. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 Το στούντιο του Fred Gaisberg's Gramophone Company	2
Εικόνα 1-2 Το στούντιο ηχογράφησης του Thomas Edison που βρισκόταν στο τρίτο όροφο του εργαστηρίου.....	3
Εικόνα 1-3 Το control room του Radio City το 1943	6
Εικόνα 1-4 NBC studio 3A	9
Εικόνα 1-5 Το 30th Street studio της Columbia.....	10
Εικόνα 1-6 Ηχογράφηση με την μπάντα του Elvis Presley στο RCA's New York studio το 1956	11
Εικόνα 1-7 Το στούντιο 1 του Abbey road	12
Εικόνα 1-8 Το στούντιο 2 του Abbey road	13
Εικόνα 1-9 Το στούντιο 3 του Abbey road	14
Εικόνα 1-10 Το Angel One studio του Abbey road	15
Εικόνα 1-11 Το ιστορικό στούντιο III της Columbia.....	16
Εικόνα 1-12 Το δωμάτιο κεντρικού ελέγχου της Columbia	16
Εικόνα 1-13 Το live room από ένα project studio	17
Εικόνα 1-14 Το δωμάτιο κεντρικού ελέγχου ενός στούντιο μουσικής παραγωγής.....	18
Εικόνα 1-15 Απομονωμένο δωμάτιο τυμπάνων	19
Εικόνα 1-16 Απομονωμένο δωμάτιο φωνής	19
Εικόνα 2-1 Κρουστική απόκριση ενός χώρου με όγκο 100m ³	21
Εικόνα 2-2 Το μέτρο φάσματος ενός δωματίου	22
Εικόνα 2-3 Απόλυτα ισορροπημένη καμπύλη σε ανηχοϊκό θάλαμο	23
Εικόνα 2-4 Η Harman καμπύλη απόκρισης δωματίου.....	24
Εικόνα 2-5 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης RT60 και RT30	25
Εικόνα 2-6 Προτεινόμενος χρόνος αντήχησης σε σχέση με τον όγκο και τη χρήση του στούντιο	26
Εικόνα 2-7 Η εμφάνιση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης ενός συστήματος σε μία ημιτονοειδή κυματομορφή	27
Εικόνα 2-8 Μέτρηση ενός μικρού επιτραπέζιου ηχείου (Adam Artist 3)	28
Εικόνα 3-1 Η συνολική κάτοψη του στούντιο	30
Εικόνα 3-2 Η αντικραδασμική ανάρτηση VIBRO CHF.50/25	31
Εικόνα 3-3 Οι αντικραδασμικές αναρτήσεις οροφής τοποθετημένες σε τριγωνική μορφή ανά τετραγωνικό	32
Εικόνα 3-4 Οι μεταλλικές βάσεις στήριξης τοποθετημένες σταυρωτά	32
Εικόνα 3-5 Οι γυψοσανίδες και ο πετροβάμβακας οροφής	33
Εικόνα 3-6 Regupol sound 17.....	33
Εικόνα 3-7 Οι οδηγοί με το κόντρα πλακέ και το αντικραδασμικό υπόστρωμα όπου θα πατήσουν τα τοιχία	34
Εικόνα 3-8 Η κατασκευή των τοιχίων	35
Εικόνα 3-9 Η κατασκευή του πλωτού πατώματος.....	35
Εικόνα 3-10 Η κατασκευαστική λογική της οροφής των τοιχίων και του πλωτού πατώματος.....	36
Εικόνα 3-11 Ο χώρος του live room έτοιμος μετά την κατασκευή, όπως φαίνεται μπαίνοντας αριστερά	36
Εικόνα 3-12 Ο χώρος του live room έτοιμος μετά την κατασκευή, όπως φαίνεται μπαίνοντας δεξιά	37
Εικόνα 4-1 Η κάτοψη του στούντιο με τις τέσσερις θέσεις μέτρησης του 1ου σεναρίου και τις θέσεις των ηχείων.....	38
Εικόνα 4-2 Η μέτρηση στη θέση 1 του ντράμερ	39
Εικόνα 4-3 Η μέτρηση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου	39
Εικόνα 4-4 Η μέτρηση στη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου	40
Εικόνα 4-5 Η μέτρηση στη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου.....	41

Εικόνα 4-6 Ο ενισχυτής μπάσου που χρησιμοποιήθηκε	42
Εικόνα 4-7 Η κάτωση του στούντιο με τις πέντε θέσεις μέτρησης του 2ου σεναρίου και τη θέση του ηχείου	43
Εικόνα 4-8 Η μέτρηση στάθμης εξόδου του ηχείου στη θέση 1	44
Εικόνα 4-9 Η δεύτερη on axis θέση σε απόσταση 1 μέτρου	44
Εικόνα 4-10 Η τρίτη on axis θέση σε απόσταση 2 μέτρων	45
Εικόνα 4-11 Η τέταρτη διαγωνίως αριστερά off axis θέση στα 2 μέτρα	46
Εικόνα 4-12 Η πέμπτη διαγωνίως δεξιά off axis θέση στα 2 μέτρα	47
Εικόνα 4-13 Το λάπτοπ και η κάρτα ήχου που χρησιμοποιήθηκαν.....	48
Εικόνα 4-14 Το ηχείο Behringer F1320d που είναι τοποθετημένο στη θέση 1 για το 1ο σενάριο.....	49
Εικόνα 4-15 Τα ηχεία Electro voice zlx 12p g2 που είναι τοποθετημένα στις θέσεις 2, 3 και 4 για το 1ο σενάριο	50
Εικόνα 4-16 Ο ενισχυτής Fender bassman 800 στον οποίο οδηγήθηκαν οι χαμηλές συχνότητες κατά τη μέτρηση του 1ου σεναρίου.....	51
Εικόνα 4-17 Το μικρόφωνο Behringer ECM8000 που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις	51
Εικόνα 4-18 Η συχνотική απόκριση του μικροφώνου Behringer ECM8000 που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις	52
Εικόνα 4-19 Ο ψηφιακός μετρητής στάθμης Habotest HT622B που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ...	53
Εικόνα 4-20 Το ηχείο Focal cms65 που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του 2ου σεναρίου.....	53
Εικόνα 4-21 Η συχνотική απόκριση του ηχείου Focal cms65	54
Εικόνα 4-22 Η συχνотική απόκριση στις χαμηλές συχνότητες του Focal cms65	55
Εικόνα 4-23 Η συχνотική απόκριση από τα 20 έως τα 20.000 Hz του δωματίου για κάθε θέση	56
Εικόνα 4-24 Συχνотική απόκριση του δωματίου στο φάσμα από 20 έως 300 Hz	58
Εικόνα 4-25 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου	60
Εικόνα 4-26 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 1 εκεί που βρίσκονται τα τύμπανα	62
Εικόνα 4-27 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 4 που βρίσκεται στα αριστερά του δωματίου	63
Εικόνα 4-28 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 3 που βρίσκεται στα δεξιά του δωματίου	65
Εικόνα 4-29 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου	66
Εικόνα 4-30 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 1 στη θέση του ντράμερ.....	67
Εικόνα 4-31 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου	68
Εικόνα 4-32 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου	69
Εικόνα 4-33 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz	70
Εικόνα 4-34 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου από 20 έως 150 Hz	71
Εικόνα 4-35 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1 στη θέση του ντράμερ από 150 έως 20.000 Hz	72
Εικόνα 4-36 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1 στη θέση του ντράμερ από 20 έως 150 Hz	73
Εικόνα 4-37 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz ...	74
Εικόνα 4-38 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου από 20 έως 150 Hz	75
Εικόνα 4-39 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz	76
Εικόνα 4-40 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου από 20 έως 150 Hz	77
Εικόνα 4-41 Κρουστική απόκριση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου	78
Εικόνα 4-42 Η κρουστική απόκριση στη θέση 1 του ντράμερ	79
Εικόνα 4-43 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 2.....	80

Εικόνα 4-44 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 1	81
Εικόνα 4-45 Συνολική αρμονική παραμόρφωση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου	82
Εικόνα 4-46 Η συχνοτική απόκριση όλων των θέσεων μέτρησης	83
Εικόνα 4-47 Η συχνοτική απόκριση του δωματίου στο φάσμα από τα 20 έως τα 300 Hz	85
Εικόνα 4-48 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 1	87
Εικόνα 4-49 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 2	88
Εικόνα 4-50 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 3	90
Εικόνα 4-51 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 4	91
Εικόνα 4-52 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 5	93
Εικόνα 4-53 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 1	94
Εικόνα 4-54 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 2	95
Εικόνα 4-55 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 3	96
Εικόνα 4-56 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 4	97
Εικόνα 4-57 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 5	98
Εικόνα 4-58 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1	99
Εικόνα 4-59 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2	100
Εικόνα 4-60 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3	101
Εικόνα 4-61 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4	102
Εικόνα 4-62 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 5	103
Εικόνα 4-63 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 1	105
Εικόνα 4-64 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 2	106
Εικόνα 4-65 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 3	106
Εικόνα 4-66 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 4	107
Εικόνα 4-67 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 5	107
Εικόνα 4-68 Κρουστική απόκριση από τη θέση 1	108
Εικόνα 4-69 Κρουστική απόκριση από τη θέση 5	109
Εικόνα 4-70 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 1	110
Εικόνα 4-71 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 5	111

5. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1 Οι μετρήσεις για κάθε θέση του 1ου σεναρίου χρησιμοποιώντας τυποποιημένες ζώνες συχνοτήτων κατά το πρότυπο ISO 266	58
Πίνακας 4-2 Οι μετρήσεις για κάθε θέση από το 1ο σενάριο για το φάσμα από 40 έως 300 Hz	60
Πίνακας 4-3 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 2	61
Πίνακας 4-4 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 1	63
Πίνακας 4-5 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 4	65
Πίνακας 4-6 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 3	66
Πίνακας 4-7 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 2	72
Πίνακας 4-8 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 2	73
Πίνακας 4-9 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 1	74
Πίνακας 4-10 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 1	75
Πίνακας 4-11 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 4	76
Πίνακας 4-12 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 4	77
Πίνακας 4-13 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 3	78
Πίνακας 4-14 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 3	79
Πίνακας 4-15 Οι μετρήσεις για κάθε θέση του 2ου σεναρίου χρησιμοποιώντας τυποποιημένες ζώνες συχνοτήτων κατά το πρότυπο ISO 266	85
Πίνακας 4-16 Οι μετρήσεις για κάθε θέση από το 2ο σενάριο για το φάσμα από 40 έως 300 Hz	87
Πίνακας 4-17 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 1	88
Πίνακας 4-18 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 2	90
Πίνακας 4-19 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 3	91
Πίνακας 4-20 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 4	93
Πίνακας 4-21 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 5	94
Πίνακας 4-22 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 1	100
Πίνακας 4-23 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 2	101
Πίνακας 4-24 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 3	102
Πίνακας 4-25 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 4	104
Πίνακας 4-26 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 5	105

1. Η εξέλιξη της ακουστικής χώρων στα στούντιο ηχογράφησης

1.1 Τα πρώτα στούντιο (1890-1920)

Στις αρχές της δεκαετίας του 1890, ο φωνογράφος θεωρούνταν ακόμη μια καινοτομία που προσέφερε διασκέδαση και ψυχαγωγία, ενώ τα στούντιο όπου γίνονταν οι ηχογραφήσεις δεν ήταν τίποτε περισσότερο από απλά δωμάτια, με ένα διαχωριστικό ανάμεσα στον χειριστή της μηχανής ηχογράφησης και τον εκτελεστή (Horning, 2013).

Οι πρώτες δεκαετίες στην ανάπτυξη της ηχογράφησης χαρακτηρίστηκαν από εκτεταμένο πειραματισμό τύπου «δοκιμής και λάθους» και από συνεχή βελτίωση των επιμέρους στοιχείων της αλυσίδας ηχογράφησης. Έγινε σημαντική δουλειά για τη βελτίωση του μηχανικού εξοπλισμού, του ηχητικού θαλάμου και της μεμβράνης, του σχήματος και των υλικών του χωνιού ηχογράφησης, καθώς και της σύνθεσης του κεριού που χρησιμοποιούνταν για την εγγραφή. Ωστόσο, το στούντιο ως χώρος έλαβε ελάχιστη προσοχή.

Τα πρώτα στούντιο ήταν ουσιαστικά εργαστήρια όπου εφευρέτες και μηχανικοί πειραματίζονταν με διάφορες μεθόδους καταγραφής ήχου. Οι ηχολήπτες και οι εκτελεστές απλώς έκαναν πολλαπλά αντίγραφα, συνήθως δέκα ή και περισσότερα ταυτόχρονα, το ένα μετά το άλλο, για να καλύψουν τη ζήτηση (Horning, 2013).

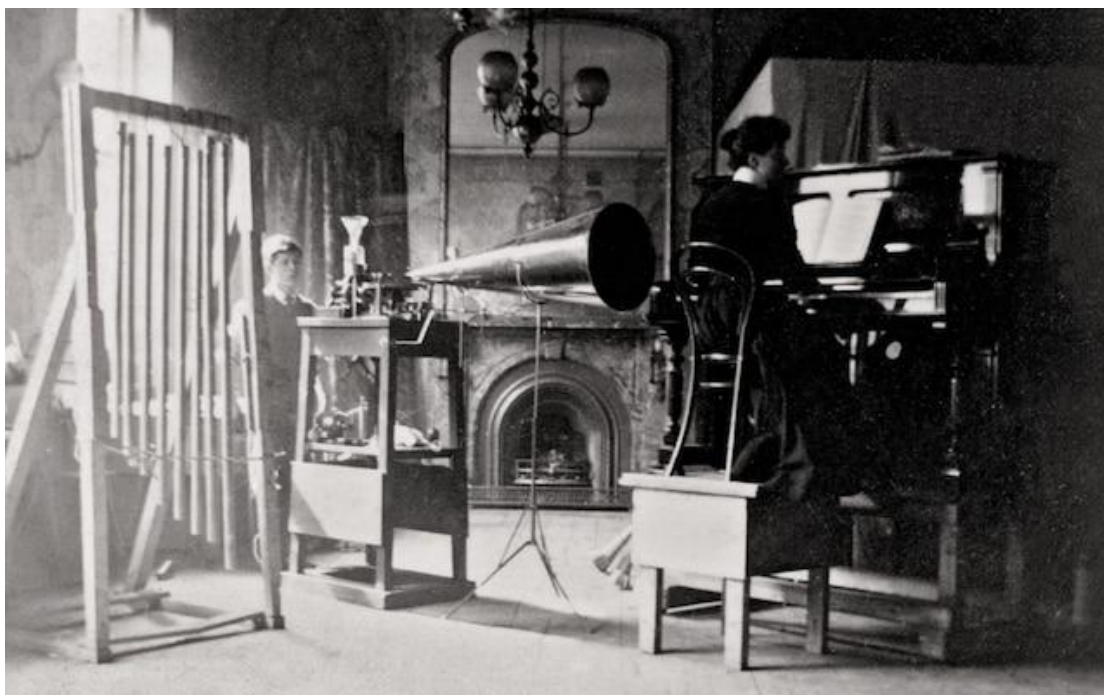
Η επιστήμη της σύγχρονης ακουστικής βρισκόταν ακόμη στα πρώτα της βήματα, και παρόλο που ορισμένες εταιρείες ηχογράφησης προσλάμβαναν επιστημονικούς συμβούλους, η εξειδίκευσή τους επικεντρωνόταν στη βελτίωση των συσκευών ηχογράφησης και αναπαραγωγής και όχι στον σχεδιασμό και την κατασκευή των στούντιο όπου πραγματοποιούνταν οι ηχογραφήσεις. Τα στούντιο αυτά κυμαίνονταν από καλά εξοπλισμένα εργαστήρια, όπως το Edison Recording Laboratory στο West Orange του New Jersey, έως γραφειακούς χώρους στη Νέα Υόρκη και ακόμη και μια μετασκευασμένη αποθήκη στην Ιντιάνα, όπου οι ειδικοί της ηχογράφησης εργάζονταν για να βελτιώσουν την τέχνη της καταγραφής του ήχου σε μια εποχή που αυτή μόλις γεννιόταν (Horning, 2013).

Στην εποχή της ακουστικής ηχογράφησης (πριν από την εισαγωγή των μικροφώνων, της ηλεκτρικής ηχογράφησης και της ενίσχυσης), τα πρώτα στούντιο ηχογράφησης ήταν πολύ βασικές εγκαταστάσεις, ουσιαστικά ηχομονωμένα δωμάτια που απομόνωναν τους εκτελεστές από τον εξωτερικό θόρυβο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δεν ήταν

ασυνήθιστο οι ηχογραφήσεις να γίνονται σε οποιονδήποτε διαθέσιμο χώρο, όπως σε μια τοπική αίθουσα χορού, χρησιμοποιώντας φορητό ακουστικό εξοπλισμό ηχογράφησης.

Σε αυτή την περίοδο, οι master ηχογραφήσεις δημιουργούνταν με άμεση εγγραφή σε δίσκο, οι εκτελεστές τοποθετούνταν συνήθως γύρω από ένα μεγάλο ακουστικό κέρας (μια μεγαλύτερη εκδοχή του γνωστού κέρατος του φωνογράφου) και η ακουστική ενέργεια από τις φωνές και/ή τα όργανα διοχετευόταν μέσω της μεμβράνης του κέρατος σε έναν μηχανικό τόρνο χάραξης που βρισκόταν στο διπλανό δωμάτιο, ο οποίος χάραζε το σήμα ως διαμορφωμένη αυλάκωση απευθείας στην επιφάνεια του κυλίνδρου ή του δίσκου master (Glossop, 2013).

Στα πρώτα χρόνια της δισκογραφικής βιομηχανίας, λίγοι θεωρούσαν την ηχογράφιση ευχάριστη δραστηριότητα. Οι αστέρες της όπερας έβρισκαν το χωνί ηχογράφησης τρομακτικό και τη συνολική διαδικασία αγχωτική.



Εικόνα 1.1 Το στούντιο του Fred Gaisberg's Gramophone Company
(<https://www.telegraph.co.uk/music/news/fight-honour-britains-first-recording-studio/>)

Ένας διαφορετικός τύπος ηχογράφησης γινόταν στο εργαστήριο του Thomas Edison στο New Jersey. Εκεί βρισκόταν μια άκρως επαγγελματική εγκατάσταση, η οποία περιλάμβανε χώρο υποδοχής, ιδιωτικό γραφείο του διευθυντή, καθώς και αίθουσα πρόβας και ακροάσεων. Επιπλέον, υπήρχαν αίθουσες δοκιμών, αίθουσες παραλαβής και αποστολής,

καθώς και ένα πειραματικό μηχανουργείο. Στο μεγαλύτερο από τα δύο στούντιο ηχογράφησης, εξοπλισμένο με πλήθος συσκευών, κουρτίνες και άλλα όργανα, ηχογραφούσαν μεγάλα συγκροτήματα, ορχήστρες και άλλοι μουσικοί (Horning, 2013).



Εικόνα 1.2 Το στούντιο ηχογράφησης του Thomas Edison που βρισκόταν στον τρίτο όροφο του εργαστηρίου

(<https://www.facebook.com/photo/?fbid=3829785373940395&set=gm.24252100694492216&id=779220482206901>)

Μετά την εφεύρεση και την εμπορική εισαγωγή του μικροφώνου, του ηλεκτρονικού ενισχυτή, της κονσόλας μίξης και του μεγαφώνου, η βιομηχανία ηχογράφησης σταδιακά πέρασε στην ηλεκτρική ηχογράφηση. Αυτή η τεχνολογία αντικατέστησε τις μηχανικές ακουστικές μεθόδους το 1925 για μεγάλες εταιρείες όπως η RCA Victor και η Columbia, και μέχρι το 1933 η ακουστική ηχογράφηση είχε εγκαταλειφθεί πλήρως (Glossop, 2013).

1.2 Τα στούντιο πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (1920 - 1940)

Οι πωλήσεις δίσκων ανέκαμψαν τα χρόνια πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, και με τη ζήτηση των καταναλωτών, οι εταιρείες επανάφεραν την προσοχή τους στον ήχο των δίσκων και στις ακουστικές ιδιότητες των στούντιο στα οποία ηχογραφούνταν. Ενώ οι ακροατές απολάμβαναν τον φυσικό αντηχητικό χώρο σε ζωντανές συμφωνικές ή big band εμφανίσεις, οι δίσκοι δεν μπορούσαν να μεταδώσουν την ατμόσφαιρα του χώρου με τον ίδιο τρόπο, λόγω του παρασιτικού θορύβου και του περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων που οι φωνογράφοι μπορούσαν να αναπαράγουν (Horning, 2013)

Καθ' όλη τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920, οι ανεξέλεγκτες αντηχήσεις και η ηχώ δημιουργούσαν επαναλαμβανόμενα προβλήματα κατά την ηχογράφηση, τα οποία μπορούσαν να λυθούν μόνο με την απόσβεση των τοίχων και την εξάλειψη των γωνιών και κοιλοτήτων στα στούντιο. Ως αποτέλεσμα, τα περισσότερα στούντιο ηχογράφησης ακολούθησαν το μοντέλο των ραδιοφωνικών στούντιο, υιοθετώντας ένα ακουστικά «νεκρό» περιβάλλον για να ελαχιστοποιηθεί η αντήχηση. Στις αρχές της δεκαετίας του 1930, οι ραδιοφωνικοί σταθμοί άρχισαν να χρησιμοποιούν στούντιο τύπου «live end» και «dead end», καθώς και θαλάμους αντήχησης (echo chambers) για να ενισχύσουν τη μετάδοση μουσικής και ομιλίας.

Σύντομα, προϋπάρχοντες χώροι, όπως αίθουσες και εκκλησίες με πιο αντηχητική ακουστική, έγιναν ο προτιμώμενος τύπος περιβάλλοντος ηχογράφησης, και οι καλύτεροι από αυτούς απέκτησαν εξαιρετική φήμη μεταξύ όσων τους χρησιμοποιούσαν, προκαλώντας συγκρίσεις με εκλεκτά μουσικά όργανα. Η ακουστική υπογραφή ενός στούντιο, αυτό που οι ηχολήπτες και οι παραγωγοί αποκαλούσαν τον ιδιαίτερο «ήχο» του, έγινε τόσο αναγνωρίσιμη ποιότητα που οι μηχανικοί σχεδίασαν τρόπους αναπαραγωγής τέτοιας ακουστικής σε μικρότερους χώρους. Η αντήχηση, που κάποτε είχε «μηδενιστεί» τεχνητά τόσο σε δημόσιους χώρους όσο και σε στούντιο ήχου κινηματογραφικών ταινιών, έγινε απαραίτητη προϋπόθεση (Noxon, 2007).

Η αντήχηση έγινε σημαντικό πλεονέκτημα στην ηχογράφηση μουσικής, όχι μόνο για τους τραγουδιστές που δυσκολεύονταν να τραγουδήσουν σωστά τις νότες, αλλά και για την ικανότητά της να κάνει τους δίσκους να ακούγονται πιο δυνατοί.

Το κλειδί για την επιτυχή αξιοποίηση της αντήχησης ήταν η ικανότητα ελέγχου της. Αν και κάποιοι πίστευαν ότι η ηχογράφηση κατά αυτή την περίοδο πλησίαζε περισσότερο από ποτέ

στην αναπαραγωγή της ζωντανής μουσικής εμπειρίας, η επίτευξη ρεαλιστικού ήχου απαιτούσε δεξιοτεχνική χειραγώγηση από τον ηχολήπτη τόσο του εξοπλισμού ηχογράφησης όσο και των τραγουδιστών και οργάνων γύρω από τα μικρόφωνα (Noxon, 2007).

Η δημοφιλία των jukebox και των swing bands, καθώς και η συνεχής βελτίωση στην ποιότητα των δίσκων και των φωνογράφων, ενίσχυαν περαιτέρω τις πωλήσεις δίσκων, οι οποίες μέχρι το 1939 είχαν φτάσει σε ετήσιο συνολικό ποσό 36 εκατομμυρίων δολαρίων σε ολόκληρη τη βιομηχανία, έξι φορές μεγαλύτερο από το ποσό πωλήσεων του 1933, της χειρότερης χρονιάς της βιομηχανίας (Horning, 2013).

Στη Νέα Υόρκη, η NBC ολοκλήρωσε το τεράστιο συγκρότημα στούντιο Radio City το 1933. Η κατασκευή κόστισε πέντε εκατομμύρια δολάρια, περισσότερα από τα μισά εκ των οποίων δαπανήθηκαν για τον ηχητικό εξοπλισμό και την ακουστική επεξεργασία. Η κύρια ανησυχία ήταν η αποτροπή διαρροής εξωτερικών ήχων μέσα στα στούντιο. Οι σχεδιαστές ενσωμάτωσαν περίπλοκα μέσα για την επίτευξη ηχομόνωσης, όπως «πλωτή κατασκευή» των τοίχων, παρατηρητήρια με τριπλά τζάμια, και πολλούς τύπους ακουστικής επεξεργασίας πετροβάμβακα, διάτρητα πλακίδια αμιάντου και υλικά όπως Rockoustile, Acoustone και Acousti-Celotex στους τοίχους και ακόμη μέσα στους αεραγωγούς του κτιρίου.



Εικόνα 1.3 Το control room του Radio City το 1943 (<https://www.gettyimages.com/detail/photo/neon-signed-entrance-to-rainbow-room-new-york-royalty-free-image/1053363828?adppopup=true>)

Μέχρι το 1940, εμφανίστηκαν είκοσι επτά νέες μικρές δισκογραφικές εταιρείες, και οι δίσκοι έγιναν ξανά ευρέως διαθέσιμοι, εμφανιζόμενοι σε περίπτερα και καταστήματα λιανικής όπως τα Woolworth's. Τόσο η Columbia όσο και η RCA Victor δαπάνησαν περισσότερα από ένα εκατομμύριο δολάρια η κάθε μία σε διαφήμιση, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας απευθυνόταν στους καταναλωτές.

Το 1940, η CBS ανακαίνισε ένα πρώην ωδείο που βρισκόταν απέναντι από τα κεντρικά γραφεία της στην East Fifty-Second Street για τα νέα της στούντιο μετάδοσης. Οι σχεδιαστές ενσωμάτωσαν καινοτομίες στον σχεδιασμό των χώρων και στην ακουστική επεξεργασία, «με σκοπό να δημιουργηθούν στούντιο πιο 'ζωντανά' ή λαμπερά από οποιοδήποτε είχε κατασκευαστεί μέχρι τότε». Η χρήση μη παράλληλων αντίθετων επιφανειών και σφηνοειδών τοίχων και οροφών επέτρεπε στους σχεδιαστές να εξαλείψουν νεκρά σημεία, αντανάκλασεις και ανεπιθύμητες ηχώ (Horning, 2013).

Τα δύο μεγάλα στούντιο διέθεταν κινητά πάνελ, τα οποία ονομάζονταν «Acoustivanes». Τα πάνελ χειριζόταν ο ηχολήπτης από την κονσόλα ελέγχου με το πάτημα ενός κουμπιού, το οποίο του έδινε τη δυνατότητα να καθορίζει πόση αντήχηση θα προσέθετε σε συγκεκριμένες συχνότητες ή πόσο από το απορροφητικό υλικό πίσω από τα πάνελ θα αποκάλυπτε. Η Goodyear Tire and Rubber Company προμήθευσε το ελαστικό δάπεδο για τα στούντιο και τις αίθουσες ελέγχου, ενώ η Johns-Manville προμήθευσε το Transite, την ακουστική επεξεργασία των τοίχων που μείωνε τον θόρυβο και μεγιστοποιούσε την ηχομόνωση και τον έλεγχο του ήχου.

Τα στούντιο μετάδοσης διέφεραν στον σκοπό τους από τα στούντιο ηχογράφησης. Υπήρχε διαφορά μεταξύ των ακουστικών προδιαγραφών για ραδιοφωνικά προγράμματα, που περιλάμβαναν ομιλία και μουσική, και των πιο επιθυμητών ακουστικών συνθηκών για ηχογράφηση φωνογράφου, που αφορούσαν κυρίως τη μουσική. Μόνο μετά τις βελτιώσεις στην ηχογράφηση και την αναπαραγωγή, που έκαναν τον περιβάλλοντα ήχο του στούντιο πιο σημαντικό, έγινε πλήρως αντιληπτή αυτή η διαφορά στις ακουστικές προδιαγραφές. Ως εκ τούτου, τα στούντιο ηχογράφησης της δεκαετίας του 1930 ενσωμάτωναν συχνά κάποια από την ακουστική επεξεργασία των στούντιο μετάδοσης. Ωστόσο, σε σύγκριση με τις νεωτερικές εγκαταστάσεις των ραδιοφωνικών εταιρειών, τα στούντιο ηχογράφησης ήταν αρχιτεκτονικά, αν όχι τεχνολογικά, πρωτόγονα.

1.3 Τα στούντιο μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο (1940 - 1960)

Κανένα από τα in-house στούντιο των δισκογραφικών εταιρειών δεν ήταν αρκετά μεγάλο για να φιλοξενήσει ορχήστρες ή τις μεγάλες μπάντες της εποχής, οπότε κάθε εταιρεία χρησιμοποιούσε τακτικά εναλλακτικούς χώρους για τις ηχογραφήσεις μεγάλων συνόλων κατά τις δεκαετίες του 1940 και 1950. Ορισμένα από αυτά τα μεγάλα δωμάτια διέθεταν φυσική ακουστική κατάλληλη για ηχογράφηση συμφωνικής μουσικής και τζαζ μεγάλων μπαντών, αλλά επειδή δεν είχαν σχεδιαστεί για ηχομόνωση, οι μηχανικοί έπρεπε να βρουν τρόπους να ελαχιστοποιήσουν τις επιδράσεις των εξωτερικών ήχων που καταγράφονταν από τον εξοπλισμό και τους φυσικούς εξωτερικούς ήχους οι οποίοι μπορούσαν να διακόψουν την ηχογράφηση.

Μέχρι το 1947 η συσσωρευμένη εμπειρία που αποκτήθηκε σε διάφορα στούντιο ηχογράφησης, αίθουσες συναυλιών και μουσικά δωμάτια έδειξε ότι η ακουστική των στούντιο ηχογράφησης δεν ακολουθούσε πλέον το μοντέλο του ραδιοφωνικού στούντιο.

Αν και κάθε στούντιο είχε τον ιδιαίτερα ατομικό του χαρακτήρα, φαινόταν σαφές ότι ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας έπρεπε να αυξάνεται ανάλογα με την ένταση της μουσικής. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένας απλός κανόνας: όσο μεγαλύτερη η μπάντα, τόσο μεγαλύτερος ο ήχος, τόσο μεγαλύτερη η αίθουσα που χρειάζεται για να μεταδοθεί επιτυχώς σε μια ηχογράφηση (Horning, 2013).

Ωστόσο, τόσοι παράγοντες επηρέαζαν τον χαρακτήρα αντήχησης ενός στούντιο, συμπεριλαμβανομένων του σχήματος της αίθουσας και των χαρακτηριστικών των επιφανειών, που το μέγεθος από μόνο του δεν ήταν αρκετό για να καθορίσει τον χρόνο αντήχησης. Επιπλέον, επειδή τα είδη δημοφιλούς μουσικής άλλαζαν με την πάροδο του χρόνου, η ευελιξία θεωρούνταν πλέον σημαντική στον σχεδιασμό των στούντιο. Η αναγνώριση ότι το στούντιο ηχογράφησης ήταν πλέον κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία ενός δίσκου σήμαινε ότι οι ακουστικοί μηχανικοί γίνονταν όλο και πιο σημαντικοί στον σχεδιασμό τους, αλλά ακόμη και αυτοί αναγνώριζαν ως τελικό κριτήριο το κοινό που αγόραζε τους δίσκους (Crocker, 1997).

Δεκατέσσερα χρόνια αφότου τα στούντιο Radio City της NBC είχαν πρωτοστατήσει ως κορυφή του σχεδιασμού ραδιοφωνικών στούντιο, οι μηχανικοί αναδιαμόρφωσαν το Studio 3A για να φιλοξενήσει ηχογραφήσεις ραδιοφωνικών μεταγραφών και δίσκων για οικιακή χρήση. Δεδομένου ότι οι μεταγραφές προορίζονταν να αναδημιουργήσουν την αίσθηση μιας ζωντανής μετάδοσης, απαιτούσαν τις ακουστικές συνθήκες που χρησιμοποιούνταν στα ραδιοφωνικά στούντιο. Για τον προφορικό λόγο (κωμωδία, δράμα, ανακοινώσεις), ήταν καλύτερο να ελαχιστοποιείται η αντήχηση ώστε να μην υποδεικνύεται το μέγεθος της αίθουσας. Ωστόσο, για τη μουσική, η αίθουσα έπρεπε να είναι αντηχητική (Horning, 2013).



Εικόνα 1.4 NBC studio 3A (<http://www.theradiohistorian.org/nbcgallery/images3/3a.jpg>)

Κατά συνέπεια, η ακουστική επεξεργασία περιλάμβανε ανακλαστικές επιφάνειες καθώς και απορροφητικές περιοχές, κινητά πάνελ, κουρτίνες και πολυκυλινδρικές επιφάνειες, όλα ρυθμιζόμενα για την επίτευξη «βέλτιστων ακουστικών αποτελεσμάτων». Ήταν σαν το στούντιο, όπως τα όργανα των μουσικών, να μπορούσε πλέον να κουρδιστεί ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες μιας δεδομένης ηχογράφησης. Πράγματι, ένα πράγμα είχε γίνει σαφές στους ακουστικούς συμβούλους και στους επαγγελματίες ηχογράφησης: το στούντιο είχε γίνει «το τελικό όργανο που ηχογραφείται» (Crocker, 1997).

Η Columbia διέθετε τα στούντιο στη Seventh Avenue, αλλά αυτά δεν ήταν αρκετά μεγάλα για να φιλοξενήσουν μεγάλα σύνολα ηχογράφησης, οπότε οι μηχανικοί και οι διευθυντές ηχογράφησης της Columbia περιηγήθηκαν στο Μανχάταν για να βρουν κατάλληλο χώρο αντικατάστασης. Τελικά βρήκαν έναν ιδανικό χώρο σε μια εγκαταλειμμένη ελληνική ορθόδοξη εκκλησία στην East Thirtieth Street. Χτισμένη σε συμπαγή βράχο, με τρία στρώματα δαπέδων από σφένδαμο και πεύκο πάχους 2,54 εκατοστών που προσέφεραν στερεό ξύλινο ήχο σαν βάση. Το στούντιο 30th Street της Columbia απέκτησε τελικά τη

φήμη ως «το ‘Stradivarius’ των στούντιο ηχογράφησης», αποδίδοντάς του έτσι τον απόλυτο χαρακτηρισμό ως μουσικό όργανο (Horning, 2013).



Εικόνα 1.5 Το 30th street studio της Columbia (<https://xhurches.org/filter/OR/30th-Street-Studio-1949-1981>)

Αυτή η φήμη ήρθε μόνο μετά από σημαντικές ακουστικές ρυθμίσεις από τους μηχανικούς της Columbia, οι οποίοι αντιμετώπισαν την πρόκληση να μετατρέψουν έναν τεράστιο κενό χώρο με εντυπωσιακή αλλά άτακτη αντήχηση σε ένα λειτουργικό στούντιο ηχογράφησης, όπου η αντήχηση αυτή θα μπορούσε να ελεγχθεί μέσω της τεχνολογίας. Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετώπισαν οι μηχανικοί στο 30th Street, σύμφωνα με τον William Savory, ήταν ότι η ακουστική της αίθουσας, διαστάσεων 29,5 μέτρα μήκος, 16,8 μέτρα πλάτος και 15,2 μέτρα από το δάπεδο έως την οροφή, έπρεπε να «εστιαστεί».

Εκείνη την εποχή, πέρα των μεγάλων συνόλων είχε ανθίσει και η μουσική rock and roll, η οποία δεν είχε την απαίτηση τόσο έντονης αντήχησης κατά την ηχογράφηση. Έτσι, οι ηχογραφήσεις πραγματοποιούνταν σε μικρότερα δωμάτια με σχετικά μικρό χρόνο αντήχησης και γινόταν πρόσθεση τεχνητής αντήχησης στην επεξεργασία (Roy, 2004).



Εικόνα 1.6 Ηχογράφηση με την μπάντα του Elvis Prisley στο RCA's New York studio το 1956
https://www.scottymoore.net/studio_rca.html

1.4 Η χρυσή εποχή των στούντιο (1970 - 1980)

Η εποχή των '70s και '80s θα μπορούσε να θεωρηθεί η χρυσή εποχή στην ακουστική σχεδίαση των στούντιο ηχογραφήσεων. Πλέον κατασκευάζονται στούντιο αποκλειστικά για ηχογράφηση μουσικής και όχι όπως παλιότερα, που μπορεί να ήταν ταυτόχρονα στούντιο ραδιοφωνικών εκπομπών, τηλεόρασης ή ακόμα και χώροι ζωντανών εκδηλώσεων. Τα στούντιο έπρεπε πλέον να καλύψουν όλο το φάσμα της μουσικής βιομηχανίας, από μεγάλες ορχήστρες κλασσικής μουσικής έως και μια ροκ μπάντα. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για πολλούς διαφορετικούς χώρους ηχογράφησης ανάλογα με τις ανάγκες του είδους της μουσικής.

Η δυνατότητα πολυκάναλης ηχογράφησης δημιούργησε νέες τεχνικές ηχογράφησης, με πολλά μικρόφωνα κοντινής λήψης και δυνατότητα ξεχωριστής επεξεργασίας των ηχογραφημένων πηγών κατά τη διαδικασία της μίξης. Η δυνατότητα πρόσθεσης τεχνητής αντήχησης σε κάθε πηγή ξεχωριστά οδήγησε στη δημιουργία σχετικά μικρών χώρων με αρκετή απορρόφηση, ώστε να μην υπάρχει έντονη αντήχηση κατά την ηχογράφηση. Σε άλλες περιπτώσεις, ήταν απαραίτητη η καταγραφή έντονης αντήχησης σε ειδικά διαμορφωμένους θαλάμους αντήχησης (Nagler, 2007).

Κλασικό παράδειγμα ενός στούντιο που πληροί όλες τις παραπάνω προδιαγραφές και λειτουργεί αποκλειστικά για ηχογράφηση μουσικής είναι τα Abbey Road Studios στο Λονδίνο. Κατασκευασμένα το 1931, λειτουργούν μέχρι και σήμερα ως τα πιο δημοφιλή στούντιο ηχογράφησης στον κόσμο. Κατά την χρυσή εποχή των '70s και '80s, δημιουργήθηκαν και νέοι χώροι ηχογράφησης με διαφορετική προσέγγιση στην ακουστική, ώστε σήμερα τα Abbey Road Studios να διαθέτουν τέσσερις διαφορετικούς χώρους ηχογράφησης (Abbey Road, 2026).



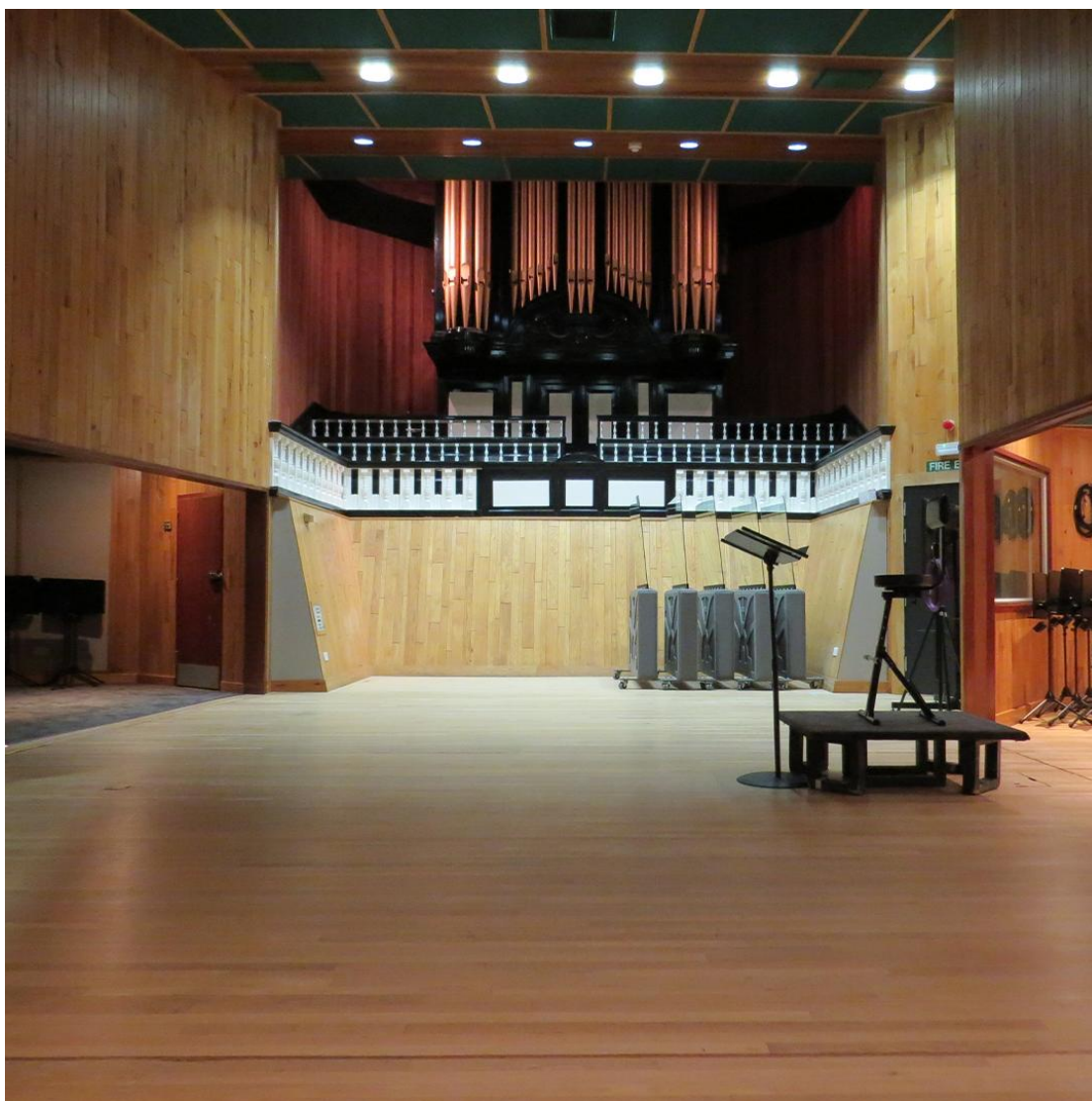
Εικόνα 1.7 Το στούντιο 1 του Abbey Road (<https://www.abbeyroad.com/the-studios>)



Εικόνα 1.8 Το στούντιο 2 του Abbey Road (<https://www.abbeyroad.com/the-studios>)



Εικόνα 1.9 Το στούντιο 3 του Abbey Road (<https://www.abbeyroad.com/the-studios>)



Εικόνα 1.10 To Angel One studio του Abbey Road (<https://www.abbeyroad.com/the-studios>)

Η άνθηση της μουσική παραγωγής εκείνη την περίοδο αποδεικνύεται και από το γεγονός πως στο ιστορικό στούντιο της Columbia στην Ελλάδα κατασκευάστηκαν άλλα δύο στούντιο, το στούντιο I και το στούντιο II. Τα δύο νέα στούντιο, που εγκαινιάστηκαν το 1964, ήταν εξοπλισμένα με υπερσύγχρονα συστήματα εγγραφής και η κατασκευή τους βασίστηκε στη σύγχρονη αντίληψη περί ακουστικής. Το στούντιο I ήταν μεγαλύτερο από το στούντιο II και με μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης. Ο αριθμός των καναλιών στις κονσόλες ανέβηκε στα 16 και αντίστοιχα ανέβηκε ο μέγιστος αριθμός μικροφώνων που χρησιμοποιούνταν στις ηχογραφήσεις. Το 1978 η Columbia απασχολούσε 350 άτομα και κατείχε την 123η θέση στις βιομηχανικές επιχειρήσεις σε ότι αφορούσε το μέγεθος των εγκαταστάσεων και τον αριθμό των υπαλλήλων (Βασιλόπουλος, 2024).



Εικόνα 1.11 Το ιστορικό στούντιο III της Columbia (<https://urbanlife.gr/urban-city/ergostasio-tis-columbia/>)



Εικόνα 1.12 Το δωμάτιο κεντρικού ελέγχου της Columbia (<https://urbanlife.gr/urban-city/ergostasio-tis-columbia/>)

1.5 Ψηφιακή εποχή και μικρά στούντιο (1990 - σήμερα)

Καθώς περνάμε στην ψηφιακή εποχή και οι περισσότερες εργασίες μπορούν πλέον να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή, άρχισαν να εμφανίζονται όλο και περισσότερα μικρά ημιεπαγγελματικά στούντιο ή αλλιώς «project / home στούντιο», όπως αποκαλούνται. Επιπλέον, καθώς η τεχνική ηχογράφησης overdubbing χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο στις νέες παραγωγές, δεν υπήρχε η ανάγκη για μεγάλους χώρους όπου πολλοί μουσικοί θα έπρεπε να παίζουν ταυτόχρονα. Ο χρόνος αντήχησης σε αυτά τα στούντιο είναι πολύ μικρός, και για να αποφευχθούν οι συντονισμοί στις χαμηλές συχνότητες περικλείονταν από κατασκευές με έντονη απορρόφηση (Leccese, 2015).



Εικόνα 1.13 Το live room από ένα project studio (<https://www.projectstudiosllc.com/blog/music-at-project-studios/>)

Η άνθηση της ηλεκτρονικής μουσικής παραγωγής στις αρχές των '90s ενίσχυσε ακόμα περισσότερο την εμφάνιση των project / home στούντιο. Πολλοί μουσικοί άρχισαν να πραγματοποιούν την παραγωγή των συνθέσεών τους αποκλειστικά στον υπολογιστή, με τις ανάγκες της ηχογράφησης να περιορίζονται σε ένα ή δύο μουσικά όργανα, όπως φωνή, κιθάρα κτλ.



Εικόνα 1.14 Το δωμάτιο κεντρικού ελέγχου ενός στούντιο μουσικής παραγωγής (<https://www.soundonsound.com/sound-advice/q-how-should-treat-my-project-studio>)

Μετά τη δεκαετία του 1990 επικρατεί όλο και περισσότερο ο «απομονωμένος» ήχος στις παραγωγές. Η αντήχηση κατά κύριο λόγο προστίθεται σε κάθε κανάλι ψηφιακά και η συμπίεση των δυναμικών του ήχου γίνεται όλο και πιο έντονη. Για να επιτευχθεί αποτελεσματικά αυτή η έντονη επεξεργασία στο κάθε κανάλι, έπρεπε τα μικρόφωνα να καταγράφουν κυρίως τον απευθείας ήχο χωρίς διαρροές από τα άλλα όργανα. Στην περίπτωση που μια μπάντα ήθελε να ηχογραφήσει ζωντανά, θα έπρεπε το κάθε όργανο ιδανικά να βρίσκεται σε διαφορετικό χώρο. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη για κατασκευή πολλών μικρών ηχητικά απομονωμένων χώρων, ώστε να μπορούν να παίζουν όλοι οι μουσικοί ταυτόχρονα και τα μικρόφωνα να μην καταλαμβάνουν ήχο από τα άλλα μουσικά όργανα. Έτσι, άρχισαν να εμφανίζονται ειδικά διαμορφωμένοι χώροι αποκλειστικά για τύμπανα με πολύ καλή ηχομόνωση και χαμηλό χρόνο αντήχησης ή αποκλειστικά για φωνή με την ίδια ακριβώς λογική (Leccese, 2015).



Εικόνα 1.15 Απομονωμένο δωμάτιο τυμπάνων (<https://www.mattsheavymetal.com/drum-isolation-booths-how-they-improve-sound-quality/>)



Εικόνα 1.16 Απομονωμένο δωμάτιο φωνής (<https://www.masteringbox.com/it/learn/vocal-booth>)

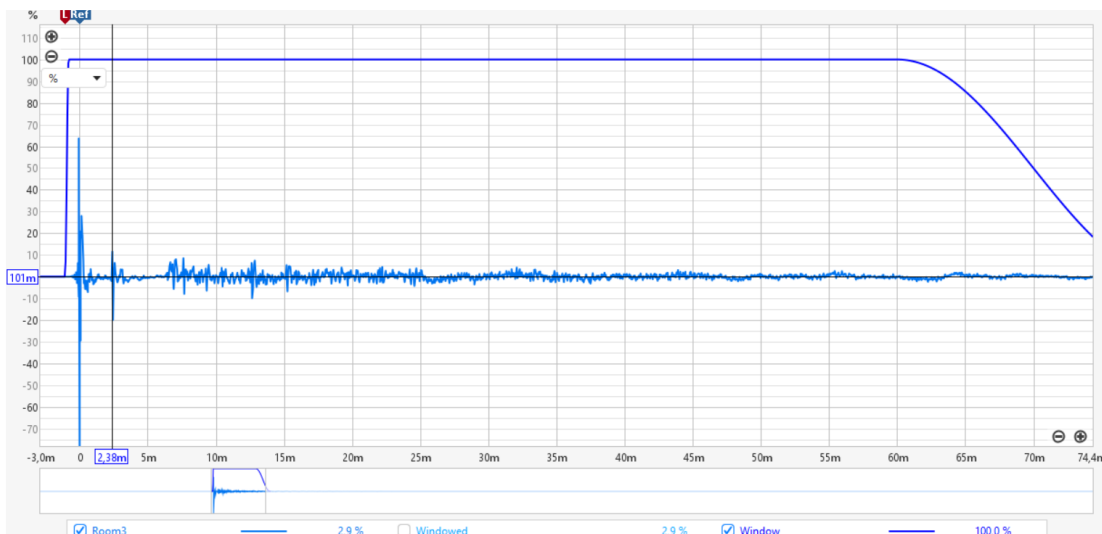
Σήμερα υπάρχουν όλες οι μορφές στούντιο, από μικρά project / home έως στούντιο με τεράστιους χώρους και υψηλή αντήχηση, που είναι ιδανική για ηχογράφηση ορχήστρας. Οι μεγάλοι ενιαίοι χώροι όλο και σπανίζουν, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου τα περισσότερα στούντιο ακολουθούν τη λογική των μικρών απομονωμένων χώρων. Όσον αφορά την ακουστική στους χώρους ηχογράφησης, δεν υπάρχει κάποιο ISO. Το κάθε στούντιο έχει τη δική του ακουστική συμπεριφορά και οι μελέτες γίνονται κατά προσέγγιση και εμπειρικά.

2. Αντικειμενικές παράμετροι ακουστικών μετρήσεων

2.1 Κρουστική απόκριση σε κλειστό χώρο.

Η κρουστική απόκριση είναι μια καταγραφή του πώς θα ακουγόταν ένας χώρος αν αναπαραγόταν ένας εξαιρετικά σύντομος και πολύ δυνατός ήχος, σαν τον κρότο ενός πυροβολισμού. Αν διασπάσουμε αυτόν τον κρότο σε ημιτονικά κύματα, περιέχει όλες τις συχνότητες με το ίδιο πλάτος.

Στην πράξη, οδηγούμε σε ένα ηχείο το επιθυμητό συχνотικό φάσμα (συνήθως από 20 έως 20.000 Hz, που είναι και το ανθρώπινο ακουστό φάσμα), το οποίο αναπαράγεται λογαριθμικά με το ίδιο πλάτος και σταδιακά ανά συχνότητα (sweep tone) από ένα ηχείο. Ταυτόχρονα, καταγράφουμε με ένα μικρόφωνο γραμμικής απόκρισης τη συμπεριφορά του χώρου στο πεδίο του χρόνου. Η κρουστική απόκριση στο πεδίο του χρόνου μας δίνει πληροφορίες για το πλήθος και τον χρόνο διάρκειας των ανακλάσεων σε σχέση με το απευθείας σήμα (Κοντομίχος, 2013).



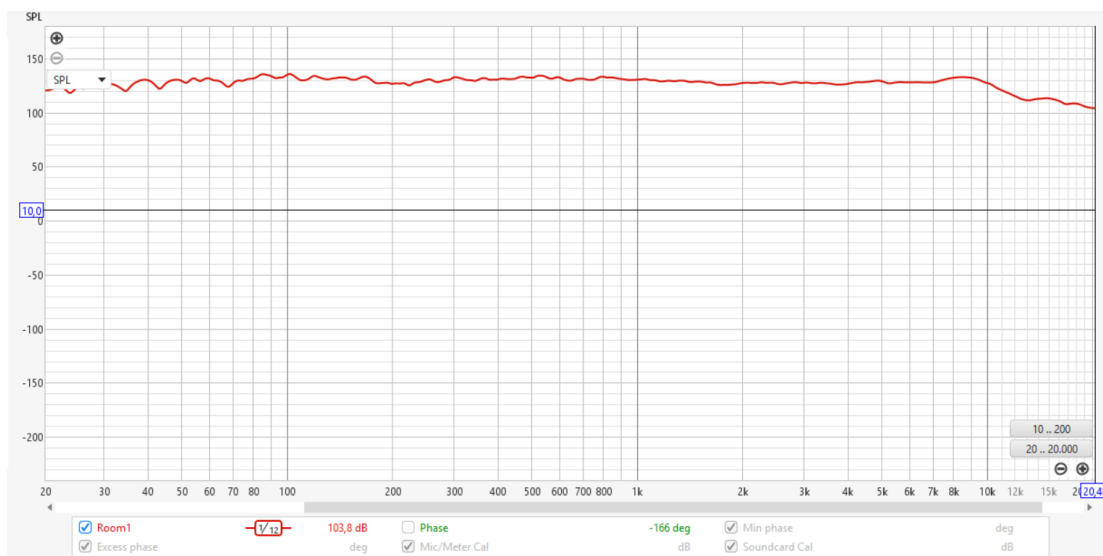
Εικόνα 2.1 Κρουστική απόκριση ενός χώρου με όγκο 100m³

Για παράδειγμα, σε έναν ανηχωϊκό θάλαμο όπου η απορρόφηση είναι απόλυτη και ο χρόνος αντήχησης ανύπαρκτος, η κρουστική απόκριση θα εμφανιζόταν με μία κορύφωση στον χρόνο μηδέν δίχως καμία άλλη πληροφορία στη συνέχεια του χρόνου. Στην εικόνα 2.1, που αντιστοιχεί σε ένα απλό δωμάτιο με όγκο 100 m³, παρατηρούμε πως η πρώτη ανάκλαση εμφανίζεται στα 2,3 ms και στη συνέχεια ακολουθεί το πλήθος των υπόλοιπων ανακλάσεων που αντιστοιχούν και στον χρόνο αντήχησης του δωματίου.

Έτσι από την καταγραφή της κρουστικής απόκρισης σε έναν κλειστό χώρο μπορούμε να συμπεράνουμε το πώς εξελίσσονται οι ανακλάσεις του χώρου στο πεδίο του χρόνου.

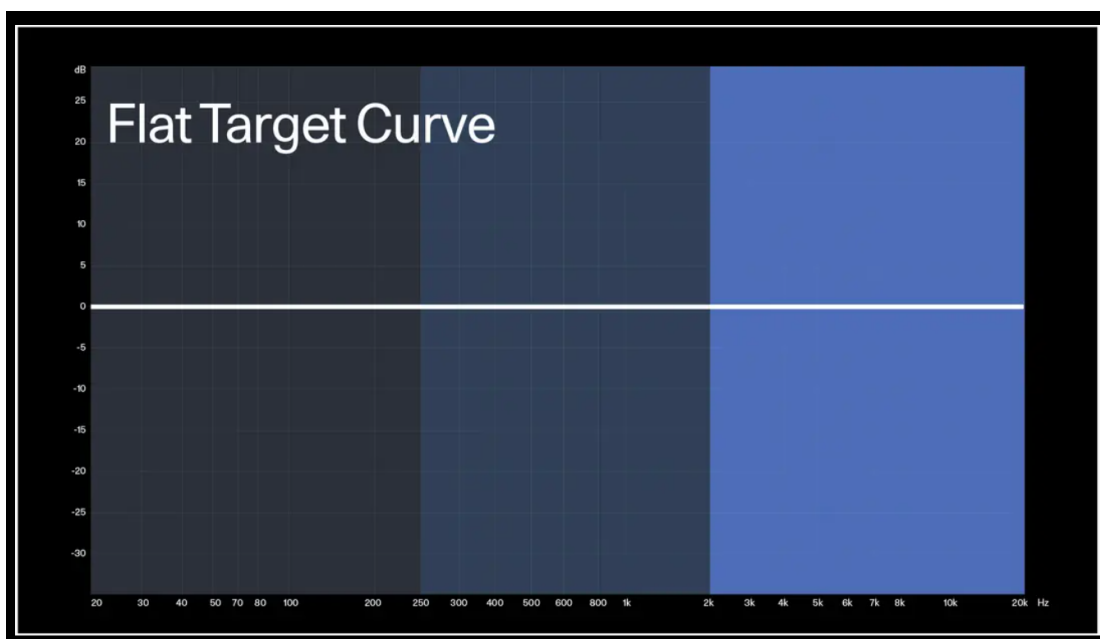
2.2 Συχνотική απόκριση δωματίου (SPL)

Όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη ενότητα, εάν η κρουστική απόκριση διασπασθεί σε ημιτονικά κύματα, περιέχει όλες τις συχνότητες με το ίδιο πλάτος. Μέσω του μετασχηματισμού Fourier, διασπάται η κρουστική διέγερση στα επιμέρους συχνотικά της συστατικά. Το γράφημα του πλάτους αυτών των συχνотήτων είναι η συχνотική απόκριση του δωματίου όπου γίνεται η μέτρηση.



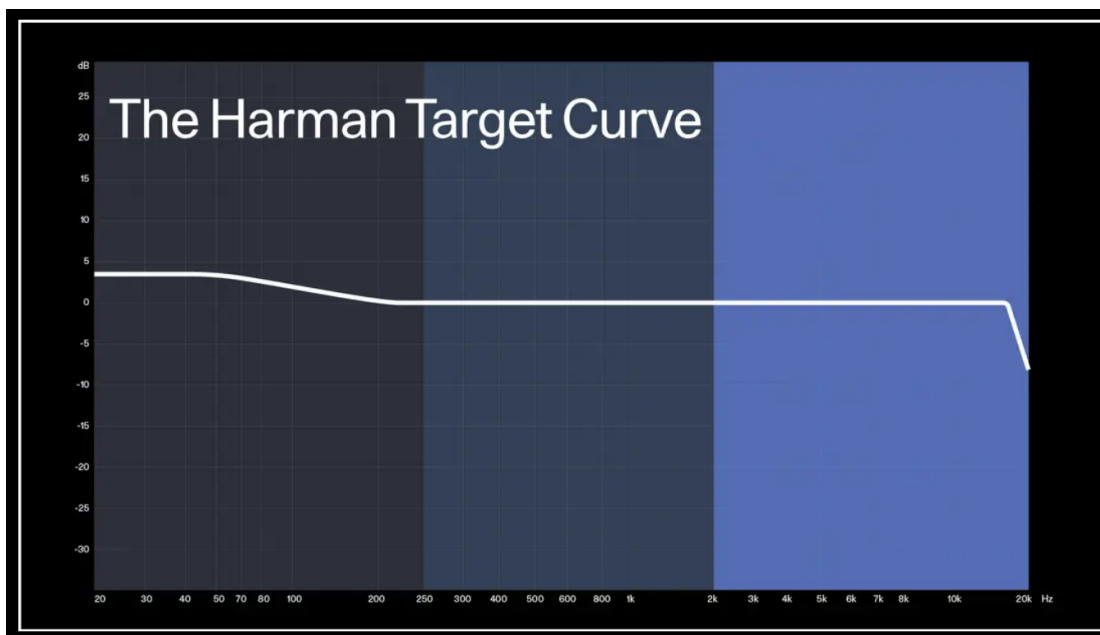
Εικόνα 2.2 Το μέτρο φάσματος ενός δωματίου

Σε ένα ιδανικό σύστημα το μέτρο φάσματος θα εμφανιζόταν με μία οριζόντια ευθεία. Αυτό θα σήμαινε πως ο χώρος είναι απόλυτα ισορροπημένος, χωρίς να τονίζει ή να εξασθενεί κάποιες συχνотητες κατά μήκος του φάσματος (Κοντομίχος, 2013). Το παραπάνω, όμως, δεν μπορεί να συμβεί στην πραγματικότητα, καθώς όλοι οι χώροι παρουσιάζουν μια απόκλιση κατά μήκος του συχνотικού φάσματος.



Εικόνα 2.3 Απόλυτα ισορροπημένη καμπύλη σε ανηχοϊκό θάλαμο (<https://www.dirac.com/resources/target-curve>)

Στην περίπτωση ενός ανηχοϊκού θαλάμου μπορεί να παρέχεται η μέγιστη διαφάνεια, αποκαλύπτοντας το αρχικό υλικό ακριβώς όπως είναι, χωρίς χρωματισμό. Στην πραγματικότητα, όμως, ένα τέτοιο δωμάτιο θα ακούγεται αρκετά αδύναμο, χωρίς «όγκο» στις χαμηλές συχνότητες. Για αυτό το λόγο, δημιουργήθηκε το 2012 η καμπύλη Harman, μέσα από μια αυστηρή επιστημονική μελέτη υπό την καθοδήγηση του ερευνητή Sean Olive. Η ομάδα του Sean Olive πραγματοποίησε διπλά τυφλές δοκιμές με πολλούς ακροατές, προκειμένου να εντοπίσει την ισορροπία συχνοτήτων που προτιμάται συχνότερα σε μικρούς χώρους ακρόασης. Έτσι προέκυψε αυτή η καμπύλη για αναπαραγωγή ήχου μέσα σε δωμάτιο, όμως, υπάρχει και ξεχωριστή εκδοχή της καμπύλης ειδικά για ακουστικά. Αυτή είναι πιθανότατα η πιο συχνά αναφερόμενη καμπύλη στόχου στον χώρο του εμπορικού ήχου.

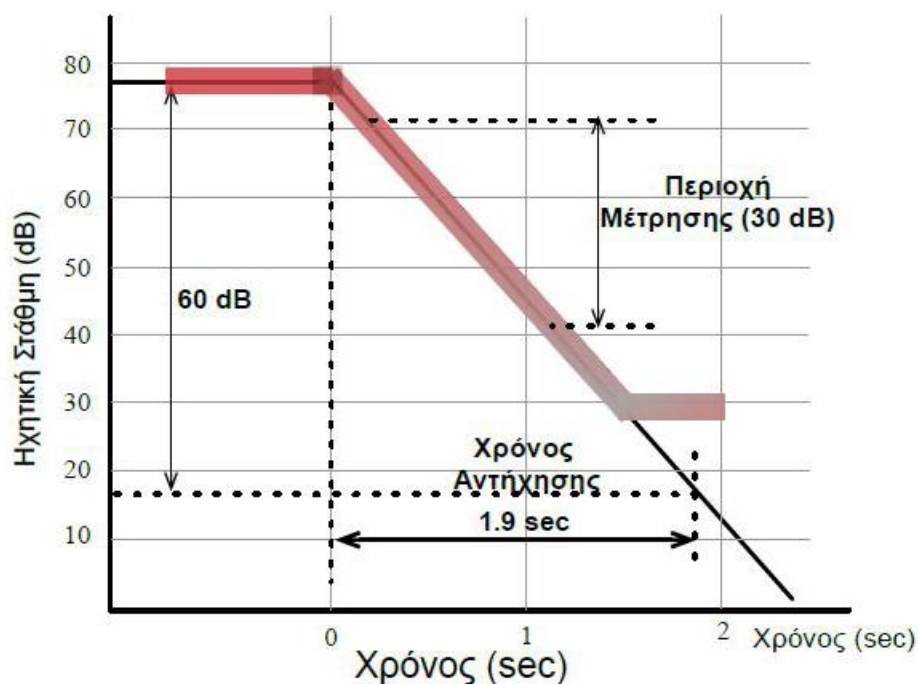


Εικόνα 2.4 Η Harman καμπύλη απόκρισης δωματίου (<https://www.dirac.com/resources/target-curve>)

Η καμπύλη Harman περιλαμβάνει σημαντική ενίσχυση των χαμηλών συχνοτήτων (από +4 dB έως +8 dB), προσφέροντας «όγκο» και δυναμική αίσθηση. Καταλήγει σε επίπεδη μεσαία περιοχή και ήπια μείωση των υψηλών συχνοτήτων, ώστε να αποφεύγεται η σκληρότητα στον ήχο. Είναι ιδανικά προσαρμοσμένη για ταινίες και σύγχρονη μουσική (Dirac, 2026).

2.3 Χρόνος αντήχησης και χρόνος πρώιμης απόσβεσης (T30, EDT)

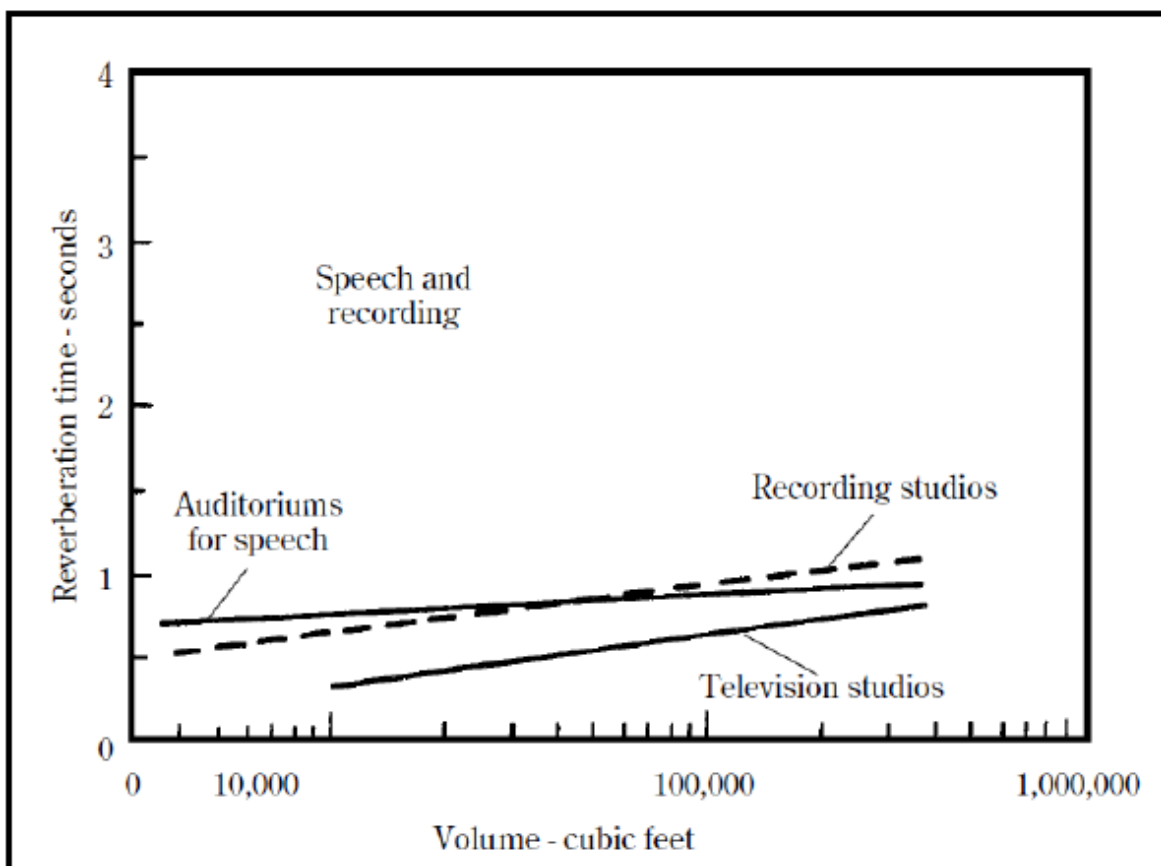
Μετά τη διακοπή της εκπομπής μιας ακουστικής πηγής υπάρχει ένας πεπερασμένος χρόνος ελάττωσης της ηχητικής ενέργειας. Αυτή η σχετική καθυστέρηση ενέργειας ονομάζεται χρόνος αντήχησης RT και μετριέται σε sec. Συνήθως, ο χρόνος αντήχησης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η στάθμη της ακουστικής πίεσης μειώνεται ιδανικά κατά 60 dB (T60). Ωστόσο, σε πρακτικές υλοποιήσεις η μέτρηση περιορίζεται σε μικρότερο διάστημα με πιο επικρατούσα την εξασθένηση κατά 30 dB (T30). Όταν η μέγιστη στάθμη ήχου είναι μεγαλύτερη ή ίση κατά 35 dB από το επίπεδο του θορύβου υποβάθρου, το T20 αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης (Κοντομίχος, 2013). Όταν η μέγιστη στάθμη ήχου είναι μεγαλύτερη ή ίση κατά 45 dB από το επίπεδο του θορύβου υποβάθρου, το T30 αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης (Davis, 2026).



Εικόνα 2.5 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης RT60 και RT30 (Κοντομίχος, 2013)

Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων μετά την παύση της ηχητικής πηγής αντιστοιχεί στον χρόνο πρώιμης απόσβεσης (EDT). Το σύστημα ακοής έχει τη δυνατότητα να συνδυάζει το απευθείας σήμα με τις πρώιμες ανακλάσεις. Επομένως, η παράμετρος EDT σχετίζεται άμεσα με την υποκειμενική αντίληψη της αντήχησης. Όσο υψηλότερη τιμή EDT, τόσο αυξημένη η αίσθηση της αντήχησης και το αντίστροφο (Κοντομίχος, 2013).

Όσον αφορά τον ιδανικό χρόνο αντήχησης, σύμφωνα με τον Everest (2001) εξαρτάται από το αν προορίζεται για μουσική, ομιλία ή τηλεοπτικές παραγωγές. Επίσης, εξαρτάται και από τον όγκο του χώρου.

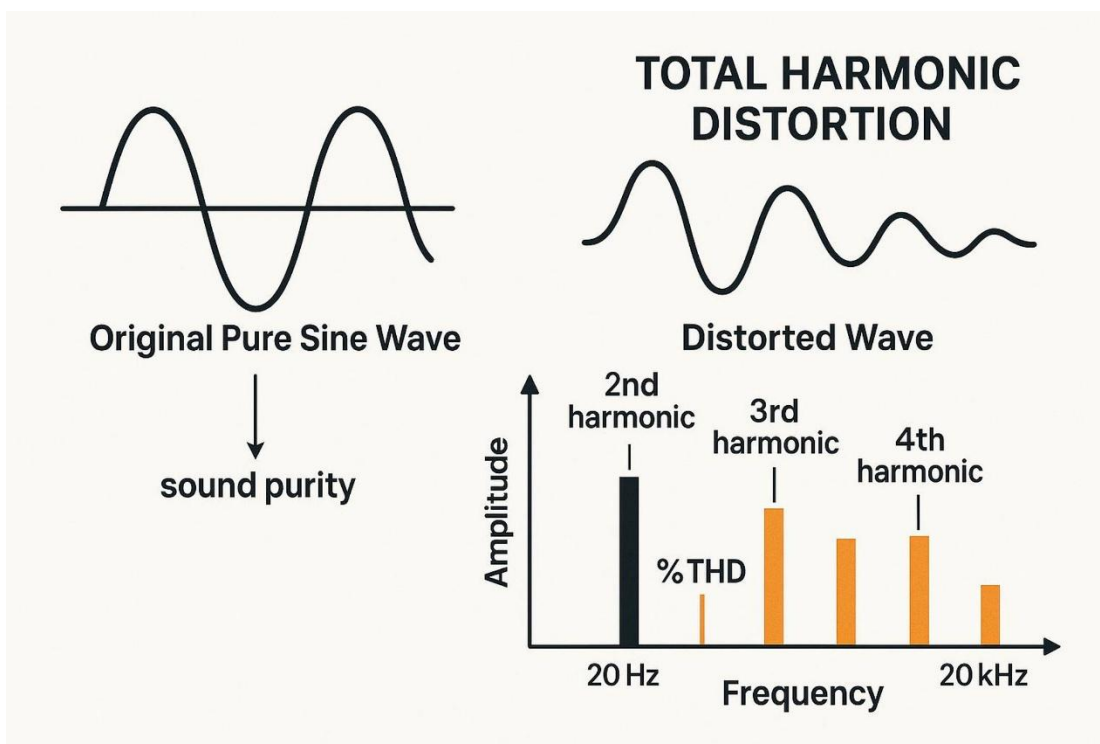


Εικόνα 2.6 Προτεινόμενος χρόνος αντήχησης σε σχέση με τον όγκο και τη χρήση του στούντιο (Everest, 2001)

Σύμφωνα με τον όγκο του προς μελέτη χώρου που είναι $90,958 \text{ m}^3$ ($3.212,2 \text{ ft}^3$), παρατηρούμε πως ο ιδανικός χρόνος αντήχησης είναι γύρω στα 500 ms.

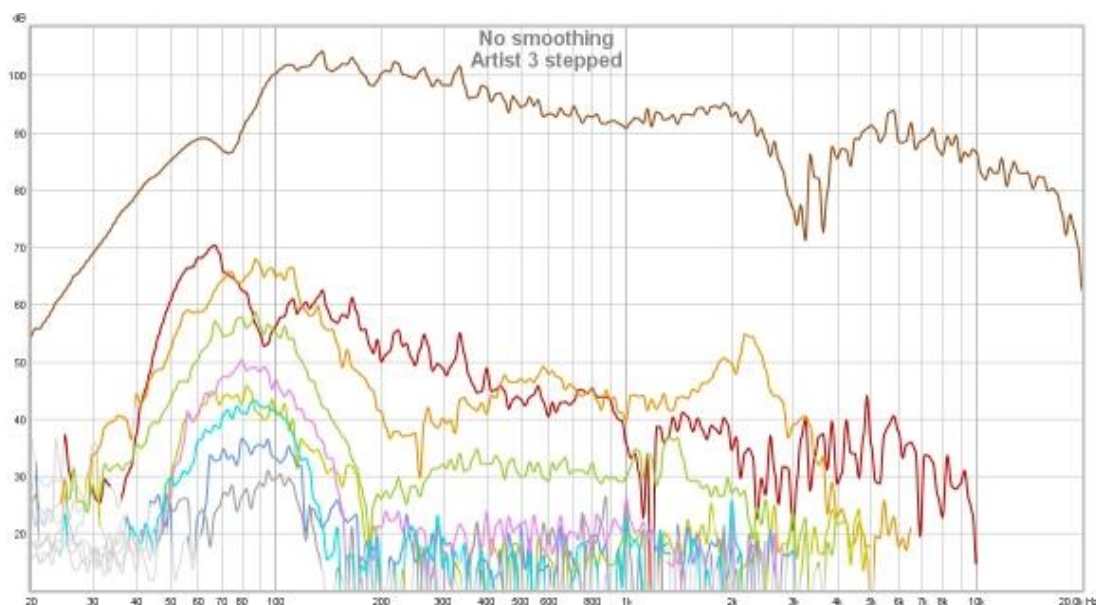
2.4 Αρμονική παραμόρφωση στις ακουστικές μετρήσεις (THD)

Η αρμονική παραμόρφωση (harmonic distortion) είναι η αλλοίωση της μορφής ενός ημιτονοειδούς σήματος (τάσης ή ρεύματος) λόγω της προσθήκης αρμονικών συνιστωσών, οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας (Everest, 2009).



Εικόνα 2.7 Η εμφάνιση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης ενός συστήματος σε μία ημιτονοειδή κυματομορφή (<https://el.homecinesolutions.fr/blog/posts/1375-evaisthhsia-empedhsh-apodotikothta-plhrhs-odhgos-gia-thn-anagnwsh-toy-technikoy-deltioy-hcheioly>)

Ένα ηχείο αδυνατεί να έχει γραμμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα να προσθέτει αρμονική παραμόρφωση στο αρχικό σήμα, η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη στάθμη αναπαραγωγής του ηχείου. Όσο πιο δυνατά παίζει ένα ηχείο, τόσο αυξάνεται και η αρμονική του παραμόρφωση. Κατά την ακουστική μέτρηση μπορεί να υπολογισθεί η συνολική αρμονική παραμόρφωση που προσθέτει το ηχείο που χρησιμοποιείται. Πέρα από τη συνολική αρμονική παραμόρφωση, γίνεται να υπολογισθούν και οι αρμονικές που προστίθενται ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να λάβουμε υπόψιν μας την αλλοίωση που υπάρχει πιθανότητα να προκαλέσει το ηχείο στο μέτρο φάσματος ενός δωματίου.



Εικόνα 2.8 Μέτρηση ενός μικρού επιτραπέζιου ηχείου (Adam Artist 3). Το μικρόφωνο (UMIK-1) τοποθετήθηκε μόλις 15 cm από το ηχείο, γεγονός που εξηγεί τη σχετικά υψηλή στάθμη SPL που μετρήθηκε. Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν περίπου σε 85 dB στη θέση ακρόασης, δηλαδή περίπου 70 cm μακριά από τα ηχεία (https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/graph_distortion.html)

2.5 Ευκρίνεια (C50, C80)

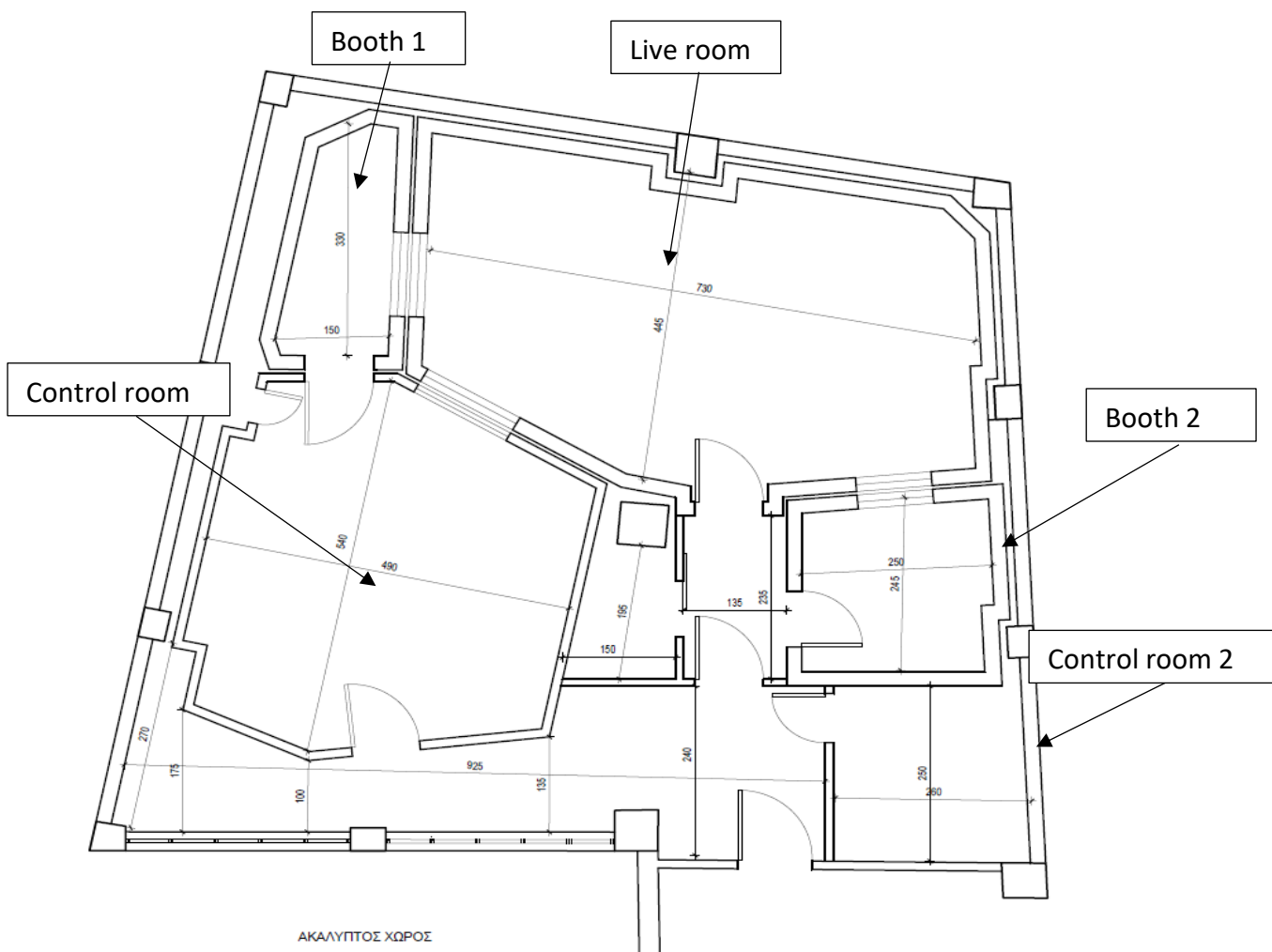
Η ευκρίνεια ενός χώρου μπορεί να υπολογισθεί με τον διαχωρισμό της κρουστικής απόκρισης σε πρώιμα τμήματα και σε τμήματα με σχετική καθυστέρηση. Το πρώιμο τμήμα περιλαμβάνει το απευθείας σήμα και τις πρώιμες ανακλάσεις, ενώ το τμήμα με τη σχετική καθυστέρηση το πεδίο αντήχησης. Όταν ο υπολογισμός για το πρώιμο τμήμα είναι στα 50ms, αντιστοιχεί στην παράμετρο C50 που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ευκρίνειας κατά την αναπαραγωγή σημάτων ομιλίας με αποδεκτές τιμές $C50 > 10$. Όταν ο υπολογισμός για το πρώιμο τμήμα είναι στα 80ms, αντιστοιχεί στην παράμετρο C80 που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ευκρίνειας κατά την αναπαραγωγή σημάτων μουσικής με αποδεκτές τιμές $C80 > -1$. Υψηλότερη τιμή του -1 υποδηλώνει αύξηση της αναλογίας του άμεσου ήχου σε σχέση με την αντήχηση (Κοντομίχος, 2013).

3. Ενδεικτική κατασκευαστική περιγραφή του προς μελέτη χώρου

3.1 Περιγραφή του χώρου

Το προς μελέτη στούντιο αποτελείται από 6 δωμάτια. Το βασικό control room 1, το βοηθητικό control room 2, δύο booth, ένα live room και το σαλόνι. Ο χώρος που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία είναι το live room, όπου πραγματοποιούνται οι πρόβες καθώς και οι περισσότερες ηχογραφήσεις ηλεκτρικών και ακουστικών οργάνων. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δωματίου, που έχει σχήμα πολυγώνου, είναι 7,30 μέτρα το μεγαλύτερο μήκος, 4,45 μέτρα το μεγαλύτερο πλάτος και 2,80 μέτρα το ύψος.

Ο χώρος έχει κατασκευαστεί με βάση τη λογική room-in-room, με πολύ μαλακές αναρτήσεις και βαριά κατασκευή για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ηχομόνωση, αλλά και η ομαλότερη συμπεριφορά του χώρου στις πολύ χαμηλές συχνότητες, ιδιαίτερα όταν αναπαράγονται σε πολύ υψηλές εντάσεις.



Εικόνα 3.1 Η συνολική κάτοψη του στούντιο

3.2 Οροφές

Η οροφή είναι κρεμασμένη σε αντικραδασμικές αναρτήσεις (VIBRO CHF.50/25) που αντέχουν βάρος 75 kg/m^2 . Αντιστοιχούν 3 σημεία ανάρτησης ανά τετραγωνικό, κρεμασμένα σε τριγωνική μορφή.



Εικόνα 3.2 Η αντικραδασμική ανάρτηση VIBRO CHF.50/25

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα, έχει τοποθετηθεί διπλή ανάρτηση για αποδοτικότερη απορρόφηση των κραδασμών.



Εικόνα 3.3 Οι αντικραδασμικές αναρτήσεις οροφής τοποθετημένες σε τριγωνική μορφή ανά τετραγωνικό

Στη συνέχεια, πάνω στις αντικραδασμικές αναρτήσεις τοποθετήθηκαν οι μεταλλικές βάσεις στήριξης.



Εικόνα 3.4 Οι μεταλλικές βάσεις στήριξης τοποθετημένες σταυρωτά

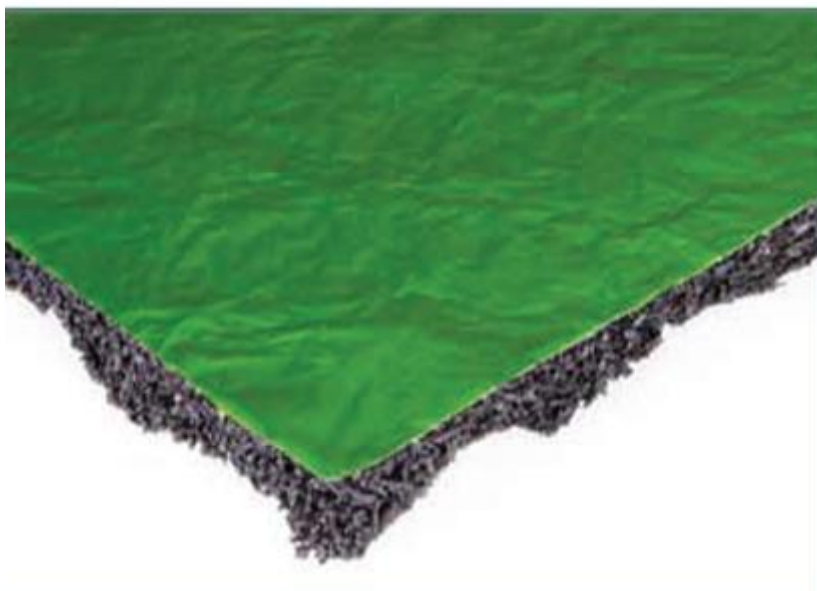
Πάνω στον οδηγό αυτό τοποθετήθηκε η διπλή γυψοσανίδα, από κάτω ο πετροβάμβακας και η κατασκευή έκλεισε με την τοποθέτηση πάλι διπλής γυψοσανίδας.



Εικόνα 3.5 Οι γυψοσανίδες και ο πετροβάμβακας οροφής

3.3 Τοιχία

Εφόσον κρεμάσθηκε η οροφή, το επόμενο στάδιο ήταν να τοποθετηθούν τα πλευρικά τοιχία. Στην αρχή σχηματίστηκε το αντικραδασμικό υπόστρωμα όπου θα πατήσουν τα τοιχία, χρησιμοποιώντας τα Regupol sound 17 σε πλάκες 120x100 cm και πάχος 17 mm.



Εικόνα 3.6 Regupol sound 17

Για την ακρίβεια, τοποθετήθηκαν 2 Regulol sound 17 το ένα πάνω στο άλλο, με τις λείες επιφάνειες να βλέπουν πάνω και κάτω αντίστοιχα. Πάνω από το Regulol τοποθετήθηκε κόντρα πλακέ.



Εικόνα 3.7 Οι οδηγοί με το κόντρα πλακέ και το αντικραδασμικό υπόστρωμα όπου θα πατήσουν τα τοιχία

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε ο μεταλλικός οδηγός γυψοσανίδας. Εκεί στηρίχθηκε στην εξωτερική πλευρά διπλή γυψοσανίδα, στη συνέχεια τοποθετήθηκε πετροβάμβακας 4 cm με πυκνότητα 100 Kg/m³, διπλή τσιμεντοσανίδα, ένα ακόμα στρώμα πετροβάμβακα 7 cm με πυκνότητα 160 Kg/m³, και στην εξωτερική πλευρά διπλή γυψοσανίδα.



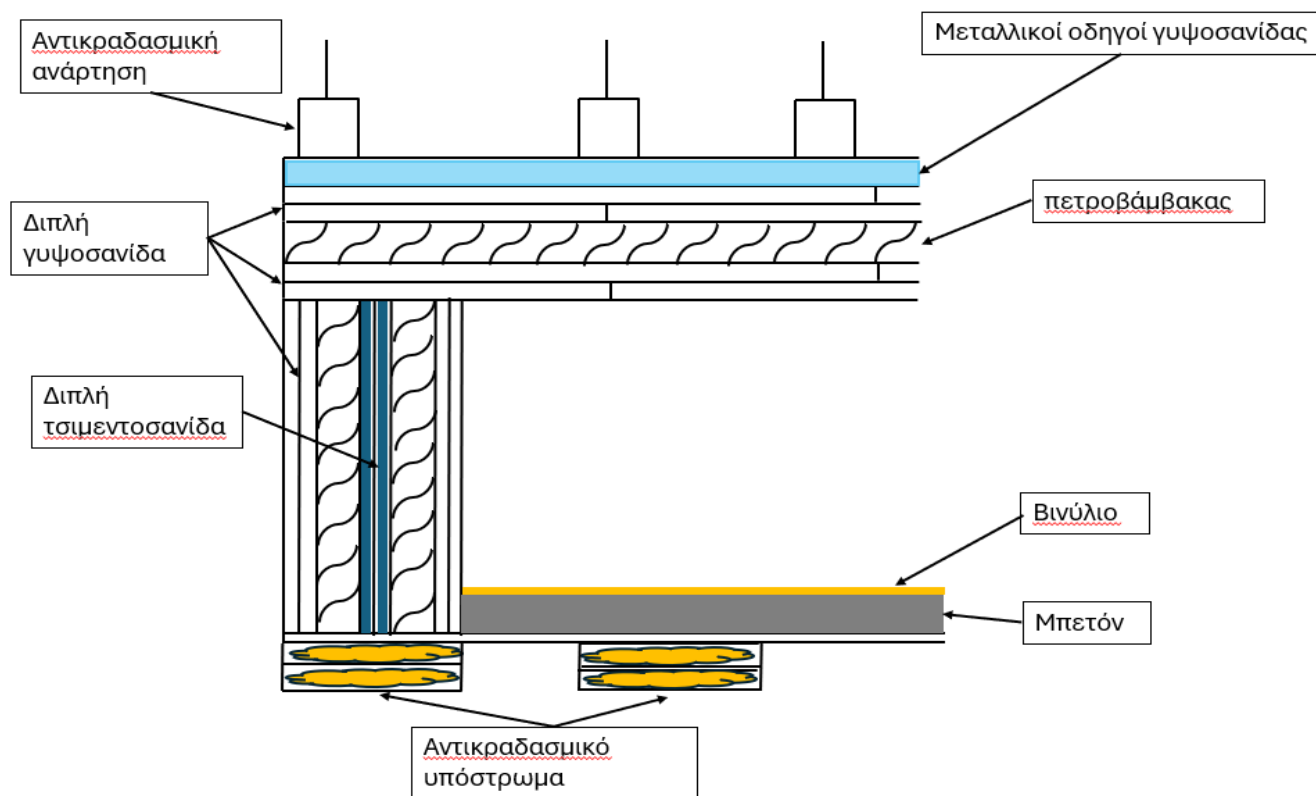
Εικόνα 3.8 Η κατασκευή των τοιχίων

3.4 Δάπεδα

Εφόσον κατασκευάστηκαν τα τοιχία, μοιράσθηκαν στο πάτωμα ανά τετραγωνικό τα αντικραδασμικά υποστρώματα Regupol sound 17. Με την ίδια λογική που ακολουθήθηκε στους οδηγούς που πάτησαν τα τοιχία, τοποθετήθηκε ένα Regupol με τη λεία επιφάνεια προς τα κάτω και ένα δεύτερο από πάνω του με τη λεία επιφάνεια προς τα πάνω. Αφού τοποθετήθηκαν τα Regupol sound 17 ομοιόμορφα στο πάτωμα, τοποθετήθηκε από πάνω κόντρα πλακέ. Πάνω στο κόντρα πλακέ προστέθηκε μπετόν και από πάνω στο τέλος βινυλικές λωρίδες πατώματος.



Εικόνα 3.9 Η κατασκευή του πλωτού πατώματος



Εικόνα 3.10 Η κατασκευαστική λογική της οροφής, των τοιχίων και του πλωτού πατώματος



Εικόνα 3.11 Ο χώρος του live room έτοιμος μετά την κατασκευή, όπως φαίνεται μπαίνοντας αριστερά

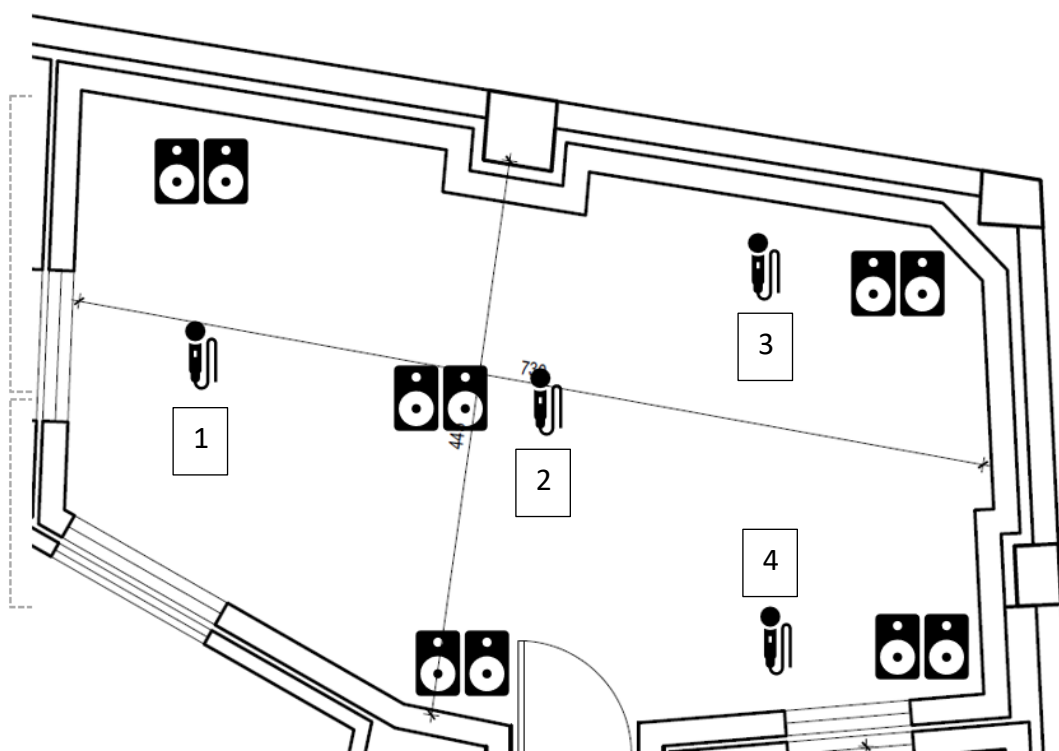


Εικόνα 3.12 Ο χώρος του live room έτοιμος μετά την κατασκευή, όπως φαίνεται μπαίνοντας δεξιά

4. Ακουστική μέτρηση του live room

4.1 Μεθοδολογία

Η μέτρηση του live room πραγματοποιήθηκε με δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά το πώς συμπεριφέρεται ο χώρος σε περίπτωση μουσικής εξάσκησης και ζωντανής ηχογράφησης, όταν μια ομάδα ανθρώπων παίζει με τα όργανα ενισχυμένα ηλεκτρικά από τα ηχεία και τους ενισχυτές. Έγιναν μετρήσεις σε τέσσερα διαφορετικά σημεία του χώρου, έτσι όπως στήνεται συνήθως μια τετραμελής μπάντα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με κλειστή την πόρτα, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα κατά την ηχογράφηση και την πρόβα. Επίσης, στον χώρο διατηρήθηκε στη θέση του ο εξοπλισμός (ηχεία, ενισχυτές μπάσου-κιθάρας, τύμπανα, κονσόλα) και τα απορροφητικά πάνελ στους τοίχους. Η μέτρηση έγινε χωρίς την παρουσία μουσικών.



Εικόνα 4.1 Η κάτοψη του στούντιο με τις τέσσερις θέσεις μέτρησης του 1ου σεναρίου και τις θέσεις των ηχείων

Στον χώρο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1, είναι τοποθετημένα 5 ηχεία. Κάθε ηχείο αντιστοιχεί σε μία θέση, συν ένα που στοχεύει σε όλο το δωμάτιο. Κατά την ακουστική μέτρηση, οδηγήθηκε ημίτονο σάρωσης σε όλα τα ηχεία ταυτόχρονα με στάθμη μέτρησης

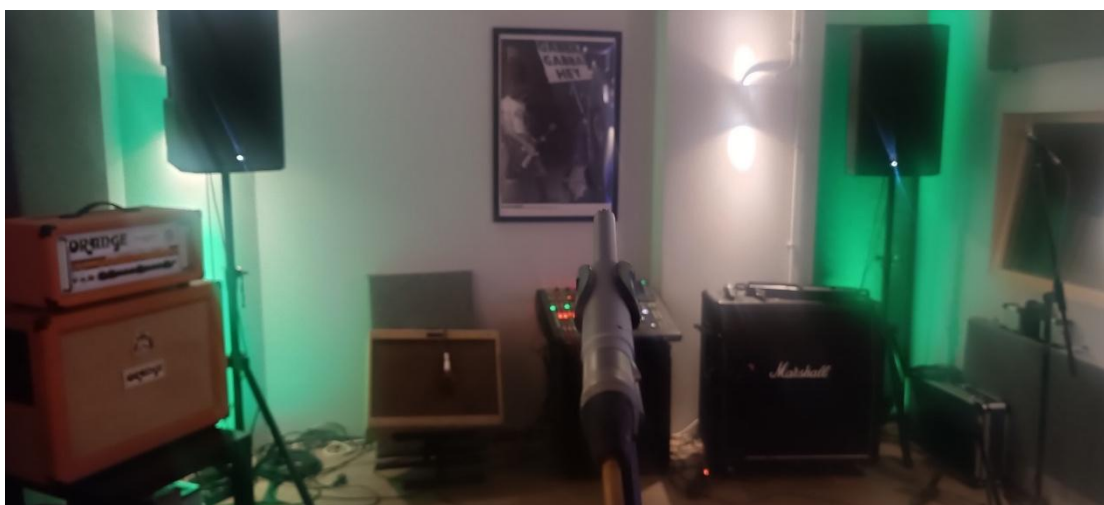
τα 100dB SPL, που είναι η μέση στάθμη στην οποία φτάνει μια ηλεκτρική μπάντα με φυσικά τύμπανα. Η μέτρηση έγινε σύμφωνα με τα επίπεδα βαθμονόμησης της καμπύλης C που είναι κατάλληλη για μετρήσεις σε υψηλές στάθμες.

Στη θέση 1 βρίσκεται ο ντράμερ, στη θέση 2 συνήθως η φωνή (ή κάποιο άλλο σολιστικό όργανο), στη θέση 3 συνήθως το μπάσο και στη θέση 4 συνήθως η κιθάρα ή οποιοδήποτε άλλο συνοδευτικό όργανο.



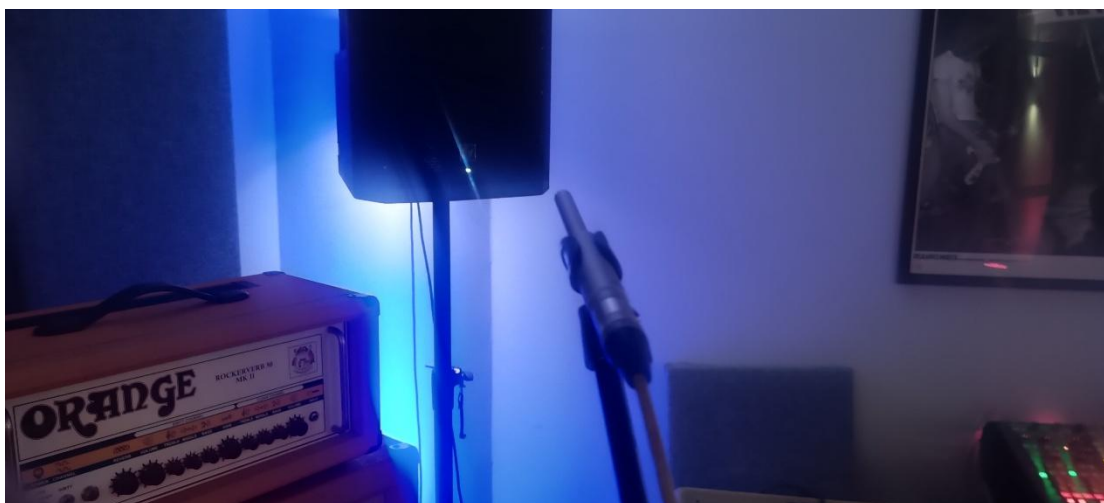
Εικόνα 4.2 Η μέτρηση στη θέση 1 του ντράμερ

Το ύψος επιλέχθηκε σύμφωνα με τον μέσο όρο του ύψους ενός καθιστού ανθρώπου σε σκαμπό, δηλαδή γύρω στα 1,20 μέτρα, και ο προσανατολισμός του μικροφώνου σε σχέση με το ηχείο σε γωνία 45 μοιρών από την on axis θέση σε απόσταση 1,5 μέτρου.



Εικόνα 4.3 Η μέτρηση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου

Στη θέση 2 το μικρόφωνο τοποθετήθηκε έτσι ώστε να σχηματίζει ένα ισοσκελές τρίγωνο μαζί με τα δύο ηχεία που ήταν τοποθετημένα μπροστά από αυτό στις δύο γωνίες του δωματίου. Η κάθε πλευρά του τριγώνου ήταν 4 μέτρα. Επίσης, ένα ακόμα ηχείο βρισκόταν ακριβώς κάτω στο πάτωμα σε γωνία 120 μοιρών σε σχέση με το μικρόφωνο, και ένα άλλο ηχείο δεξιά στις 180 μοίρες από το μικρόφωνο και σε απόσταση 2 μέτρων. Τέλος, στο πάτωμα σε απόσταση 2,5 μέτρων από το μικρόφωνο, βρισκόταν το πέμπτο ηχείο στραμμένο σε κλίση 160 μοιρών και γυρισμένο αριστερά. Το ύψος του μικροφώνου επιλέχθηκε σύμφωνα με το μέσο ύψος ενός ανθρώπου στα 1,70 μέτρα.



Εικόνα 4.4 Η μέτρηση στη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου

Στη θέση 3, το μικρόφωνο τοποθετήθηκε πάλι στο ύψος ενός μέσου ανθρώπου στα 1,70 μέτρα και σε απόσταση 60 εκατοστών από το ηχείο που βρισκόταν στη δεξιά γωνία του δωματίου. Η κλίση του μικροφώνου σε σχέση με το ηχείο ήταν στην on axis θέση των 0 μοιρών.



Εικόνα 4.5 Η μέτρηση στη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου

Στη θέση 4, το μικρόφωνο τοποθετήθηκε πάλι στο ύψος ενός μέσου ανθρώπου στα 1,70 μέτρα και σε απόσταση 60 εκατοστών από το ηχείο που βρισκόταν στην αριστερή γωνία του δωματίου. Η κλίση του μικροφώνου σε σχέση με το ηχείο ήταν στην on axis θέση των 0 μοιρών.

Για την πιο πιστή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες, ώστε να είναι και πιο ρεαλιστική η μέτρηση, όπως συμβαίνει στην πρόβα μιας ηλεκτρικής μπάντας, επιλέχθηκε ημίτονο σάρωσης αποκλειστικά στο φάσμα 20 με 150 Hz το οποίο οδηγήθηκε στον ενισχυτή του μπάσου.

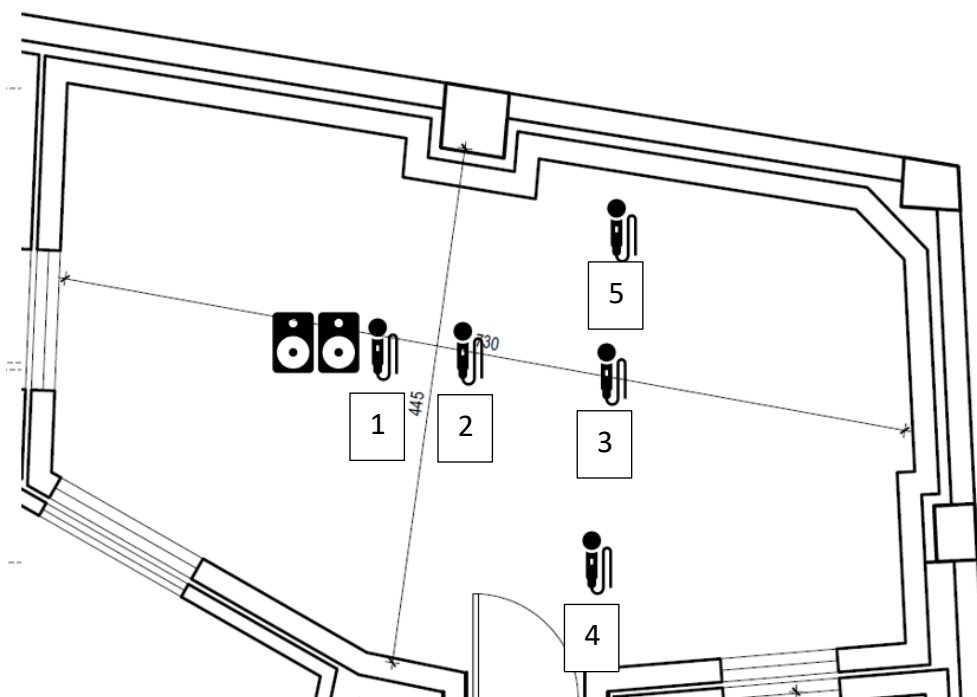


Εικόνα 4.6 Ο ενισχυτής μπάσου που χρησιμοποιήθηκε

Το υπόλοιπο φάσμα από 150 έως 20.000 Hz οδηγήθηκε σε όλα τα άλλα ηχεία. Με αυτόν το τρόπο, πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση που είναι πολύ κοντά στις συνθήκες που επικρατούν στην ακουστική του χώρου όταν μια τετραμελής μπάντα κάνει πρόβα με ηλεκτρική ενίσχυση ή επιθυμεί να ηχογραφηθεί ζωντανά.

Στο δεύτερο σενάριο η μέτρηση αφορά το πώς συμπεριφέρεται ο χώρος σε συνθήκες ακουστικής ηχογράφησης. Τοποθετήθηκε ένα ηχείο full range studio monitor στο κέντρο του δωματίου, εκεί όπου συνήθως στέκεται ο μουσικός κατά την ηχογράφηση ενός οργάνου. Η μέτρηση έγινε με ημίτονο σάρωσης από τα 20 έως τα 20.000 Hz με στάθμη τα 80 dB SPL, που είναι η μέση στάθμη που παράγει ένα ακουστικό όργανο. Η μέτρηση επίσης έγινε σύμφωνα με τα επίπεδα βαθμονόμησης της καμπύλης A που είναι κατάλληλη για μετρήσεις σε σχετικά χαμηλές στάθμες.

Επιλέχθηκαν πέντε θέσεις πιθανής λήψης στον χώρο. Η πρώτη σε on axis θέση κοντά στην πηγή σε απόσταση 50 εκατοστών, η δεύτερη σε on axis θέση σε απόσταση 1 μέτρου, η τρίτη σε on axis θέση σε απόσταση 2 μέτρων, η τέταρτη διαγωνίως αριστερά off axis στις 45 μοίρες και στα 2 μέτρα απόσταση και η πέμπτη διαγωνίως δεξιά off axis στις 45 μοίρες και στα 2 μέτρα απόσταση από την πηγή. Το ύψος υπολογίσθηκε σύμφωνα με το μέσο ύψος στο οποίο θα βρισκόταν μια πηγή ενός μουσικού οργάνου εάν ο μουσικός ήταν καθιστός, δηλαδή στα 70 εκατοστά. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την πόρτα κλειστή και χωρίς παρουσία ανθρώπων στον χώρο. Επιπλέον, στον χώρο διατηρήθηκε στη θέση του ο εξοπλισμός (ηχεία, ενισχυτές μπάσου-κιθάρας, κονσόλα) και τα απορροφητικά πάνελ στους τοίχους εκτός των τυμπάνων που αφαιρέθηκαν.



Εικόνα 4.7 Η κάτοψη του στούντιο με τις πέντε θέσεις μέτρησης του 2ου σεναρίου και τη θέση του ηχείου



Εικόνα 4.8 Η μέτρηση στάθμης εξόδου του ηχείου στη θέση 1, 50 εκατοστά μπροστά από το ηχείο



Εικόνα 4.9 Η δεύτερη on axis θέση σε απόσταση 1 μέτρου



Εικόνα 4.10 Η τρίτη on axis θέση σε απόσταση 2 μέτρων



Εικόνα 4.11 Η τέταρτη διαγωνίως αριστερά off axis θέση στα 2 μέτρα



Εικόνα 4.12 Η πέμπτη διαγωνίως δεξιά off axis θέση στα 2 μέτρα

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα λάπτοπ Lenovo ThinkPad με το λογισμικό ανοιχτού κώδικα REW, η κάρτα ήχου RME babyface pro, το παντοκατευθυντικό μετρητικό μικρόφωνο Behringer ECM8000 και το ντεσιμπελόμετρο Habotest HT622B.

Τα ηχεία στο πρώτο σενάριο ήταν τα Electro voice zlx 12p g2 και το Behringer F1320d στη θέση του ντράμερ. Για τις χαμηλές συχνότητες χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής Fender bassman 800 όπου το ημίτονο σάρωσης οδηγήθηκε μέσω του reamp box Radial για τη μετατροπή του σήματος από line σε instrument.

Για το δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκε το ηχείο Focal cms 65.



Εικόνα 4.13 Το λάπτοπ και η κάρτα ήχου που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 4.14 Το ηχείο Behringer F1320d που είναι τοποθετημένο στη θέση 1 για το 1ο σενάριο

Key technical specifications (F1320D):

- Power Output: 300 Watts Peak, Bi-amped (approx. 160W LF/40W HF continuous)
- Drivers: 12" Woofer / 1" Compression Driver
- Frequency Response: 60 Hz – 16 kHz (-10 dB)
- Max SPL: 115 dB – 118 dB
- Inputs: XLR & 1/4" TRS Mic/Line input
- Outputs: XLR Line Output
- Controls: 3-band EQ, Adjustable Feedback Filter, Level Control

Όπως παρατηρούμε, η ένταση σε αυτό το ηχείο είναι ικανοποιητική για τη μέτρηση από τη στιγμή που η μέγιστη ηχητική πίεση είναι στα 115 dBSPL, 15 dB δηλαδή περισσότερα από τη στάθμη μέτρησης. Δυστυχώς, η συχνотική του απόκριση δεν είναι πολύ ισορροπημένη,

κάτι που μπορεί να μας οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα όσον αφορά την ακουστική συμπεριφορά του χώρου.



Εικόνα 4.15 Τα ηχεία Electro voice zlx 12p g2 που είναι τοποθετημένα στις θέσεις 2, 3 και 4 για το 1ο σενάριο

Key technical specifications:

- System Type: Active 2-Way Powered Loudspeaker
- Power Rating: 1000 W Peak (Class D Amplifier)
- Woofer: 12-inch ferrite woofer
- HF Transducer: 1.4-inch titanium compression driver
- Maximum SPL: 127 dB
- Frequency Range (-10 dB): 48 Hz – 20,000 Hz
- Frequency Response (-3 dB): 54 Hz – 18,500 Hz
- Coverage (H x V): 90° x 60°

Όπως παρατηρούμε, η ένταση σε αυτό το ηχείο είναι πολύ ικανοποιητική για τη μέτρηση από τη στιγμή που η μέγιστη ηχητική πίεση που φτάνει είναι στα 127 dBSPL, 27 dB δηλαδή περισσότερα από τη στάθμη μέτρησης. Επίσης, η συχνотική του απόκριση είναι πολύ ισορροπημένη στο φάσμα που μας απασχολεί, δηλαδή μετά τα 150 Hz. Επομένως, οι

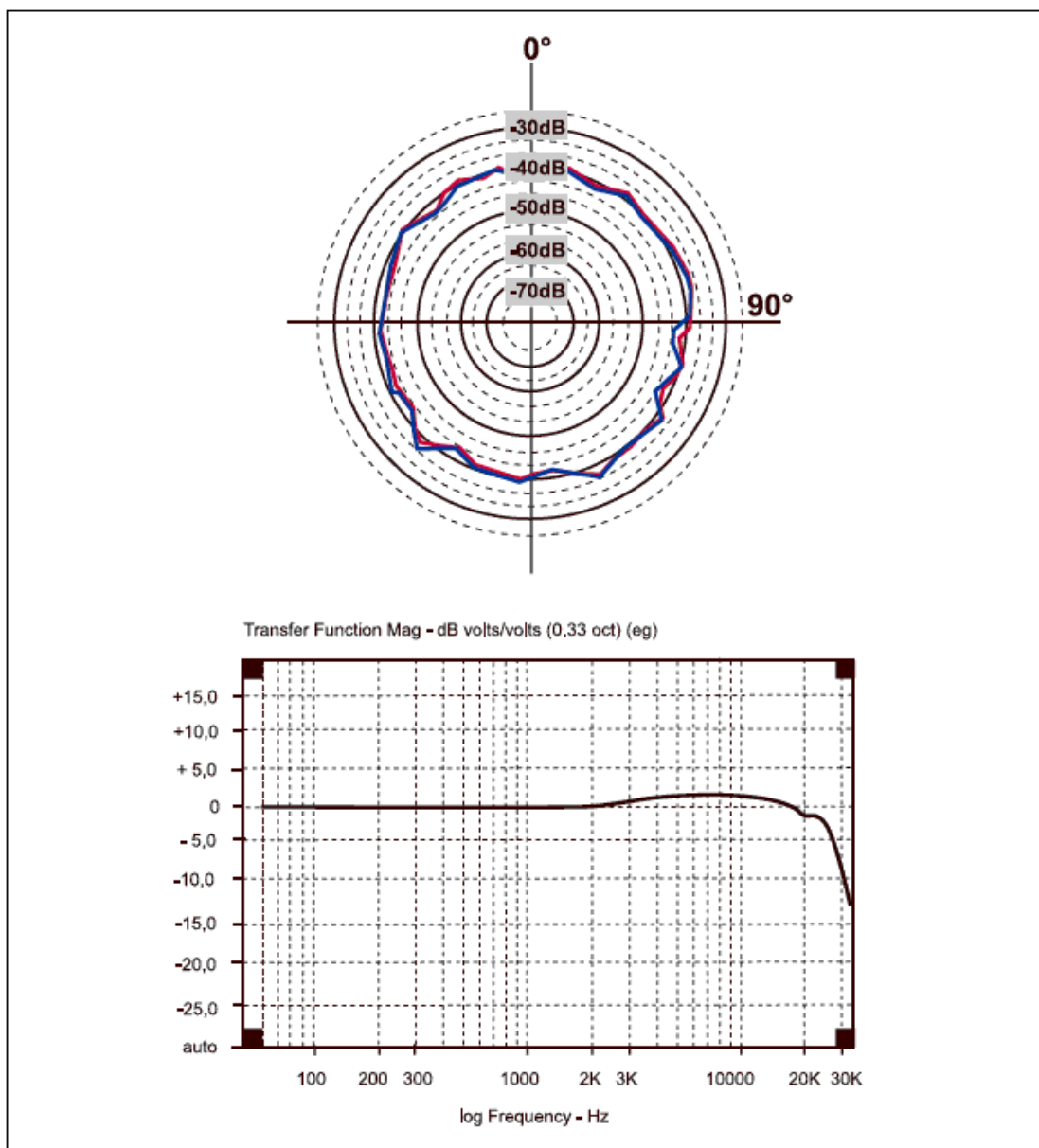
μετρήσεις που θα γίνουν στις θέσεις κοντά σε αυτά τα ηχεία θα είναι και σχετικά πιστές σε σχέση με τη συμπεριφορά του χώρου.



Εικόνα 4.16 Ο ενισχυτής Fender bassman 800 στον οποίο οδηγήθηκαν οι χαμηλές συχνότητες κατά τη μέτρηση του 1ου σεναρίου



Εικόνα 4.17 Το μικρόφωνο Behringer ECM8000 που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις



Εικόνα 4.18 Η συχνотική απόκριση του μικροφώνου Behringer ECM8000 που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις (<https://www.coutant.org/behringer/index.html>)

Όπως παρατηρούμε, το μικρόφωνο έχει παντοκατευθυντική πολική απόκριση και παρουσιάζει μια ιδιαίτερα ισορροπημένη συχνотική απόκριση σε όλο το ακουστό φάσμα, πράγμα που το κάνει ιδανικό για αξιόπιστες μετρήσεις.



Εικόνα 4.19 Ο ψηφιακός μετρητής στάθμης Habotest HT622B που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις

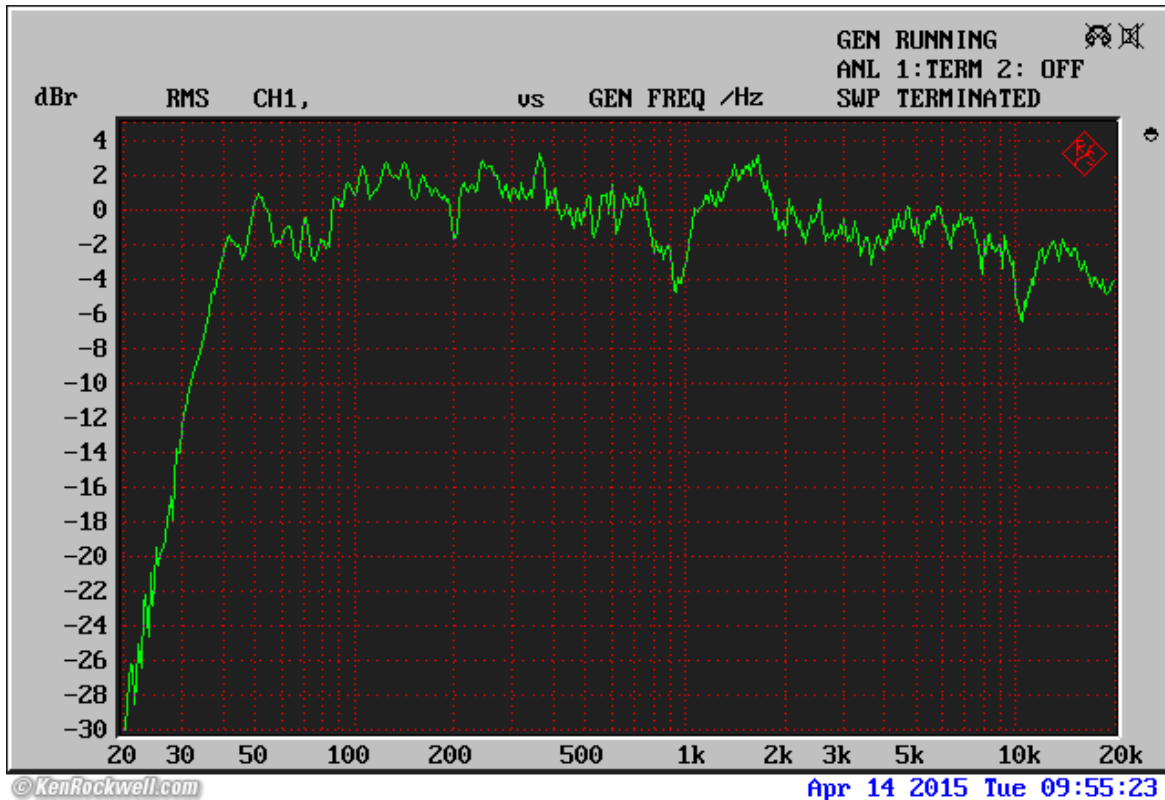


Εικόνα 4.20 Το ηχείο Focal cms65 που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του 2ου σεναρίου

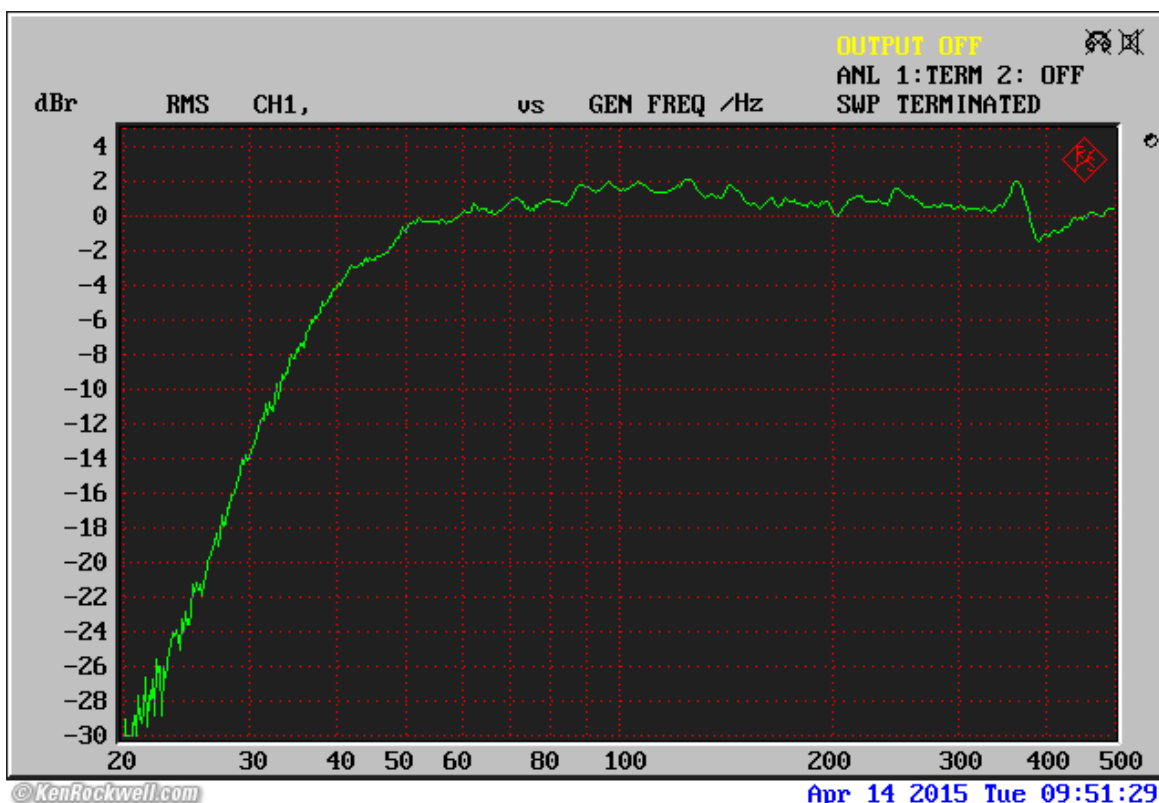
Key technical specifications του Focal cms65:

- Cabinet: solid aluminum cabinet
- Woofer: 6.5" vented woofer
- Cone covered with tiny glass beads, like a reflective street sign
- Tweeter: 1" inverted metal dome
- Audio: 45 ~ 28,000 Hz $\pm$ 3 dB
- 100W + 60W class AB amplifiers; a TDA7293 is used as the basis for the low-frequency section
- 108 dB SPL peak at 1m

- 0.4 ~ 3m suggested listening distance



Εικόνα 4.21 Η συχνοτική απόκριση του ηχείου Focal cms65
(<https://www.kenrockwell.com/audio/focal/cms-65.htm#spex>)



Εικόνα 4.22 Η συχνотική απόκριση στις χαμηλές συχνότητες του Focal cms65 (<https://www.kenrockwell.com/audio/focal/cms-65.htm#spex>)

Όπως παρατηρούμε από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχείου, η ένταση είναι αρκετά ικανοποιητική από τη στιγμή που η μέτρηση έγινε στα 80 dBSPL, ενώ το ηχείο έχει max. SPL 108 στο ένα μέτρο. Επίσης, η συχνотική απόκριση του ηχείου είναι αρκετά ισορροπημένη και καλύπτει σχεδόν όλο το ακουστό φάσμα από 45 έως 20.000 Hz με απόκλιση ± 3 dB. Τέλος, η προτεινόμενη απόσταση ακρόασης είναι από τα 0,4 έως τα 3 μέτρα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχείου δεν επηρεάζουν σημαντικά τη μέτρησή μας και σε συνδυασμό με το μετρητικό μικρόφωνο οι αποκλίσεις είναι σχεδόν αμελητέες.

4.2 Περιορισμοί της μελέτης

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το μετρητικό μικρόφωνο Behringer ECM8000 χωρίς τη χρήση του calibration αρχείου του μικροφώνου. Επομένως, είναι πιθανό να υπάρχει μια σχετική απόκλιση των μετρήσεων σε σχέση με τη συχνотική απόκριση που παρουσιάζει το μικρόφωνο. Επίσης, δεν έγινε calibration loopback στην κάρτα ήχου, με αποτέλεσμα να υπάρχει και μια σχετική απόκλιση σε σχέση με την απόκριση της κάρτας ήχου.

Όσον αφορά το πρώτο σενάριο, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την ταυτόχρονη χρήση πολλών και διαφορετικών ηχείων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μετρήσεις να αφορούν περισσότερο μια ρεαλιστική συνθήκη πρόβας και όχι την καθαρή απόκριση του χώρου. Στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ένα studio monitor, που αποτελεί ελεγχόμενη πηγή μέτρησης αλλά δεν αναπαριστά πλήρως ένα ακουστικό όργανο. Τέλος, δεν έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις ούτε και προσομοίωση χώρου για να επαληθευθούν οι μετρήσεις.

4.3 Μετρήσεις 1ου σεναρίου

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ανοιχτού κώδικα REW. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν στα 48 KHz/16 bit. Στο πρώτο σενάριο, η σάρωση του ημιτόνου έγινε σε δύο στάδια με σκοπό την επίτευξη ρεαλιστικής συνθήκης μουσικής εξάσκησης ηλεκτρικής μπάντας. Έτσι, οδηγήθηκε σάρωση ημιτόνου από τα 20 έως τα 150 Hz σε ενισχυτή μπάσου και από τα 150 έως τα 20.000 Hz στα ηχεία. Το μήκος της ανάλυσης Fourier ήταν από 12 έως 30.000 Hz με smoothing 1/3 και ο τρόπος βαθμονόμησης των SPL ήταν από -20 έως 140 dBSPL. Για τη μέτρηση στάθμης των 100 dBSPL οδηγήθηκε στα ηχεία ροζ θόρυβος και μετρήθηκε με εξωτερικό ντεσιμπελόμετρο με βαθμίδα βαθμονόμησης την καμπύλη C. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την πόρτα κλειστή χωρίς παρουσία ανθρώπων.



Εικόνα 4.23 Η συχνοτική απόκριση από τα 20 έως τα 20.000 Hz του δωματίου για κάθε θέση

Παρατηρούμε στην εικόνα 4.23 πως κάθε καμπύλη έχει το δικό της χρωματικό κώδικα. Πιο συγκεκριμένα:

- Η τρκουάζ και η πράσινη καμπύλη αντιστοιχούν στην 1η θέση μέτρησης (θέση ντράμερ).
- Η κίτρινη και η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχούν στη 2η θέση μέτρησης (στο κέντρο του δωματίου).

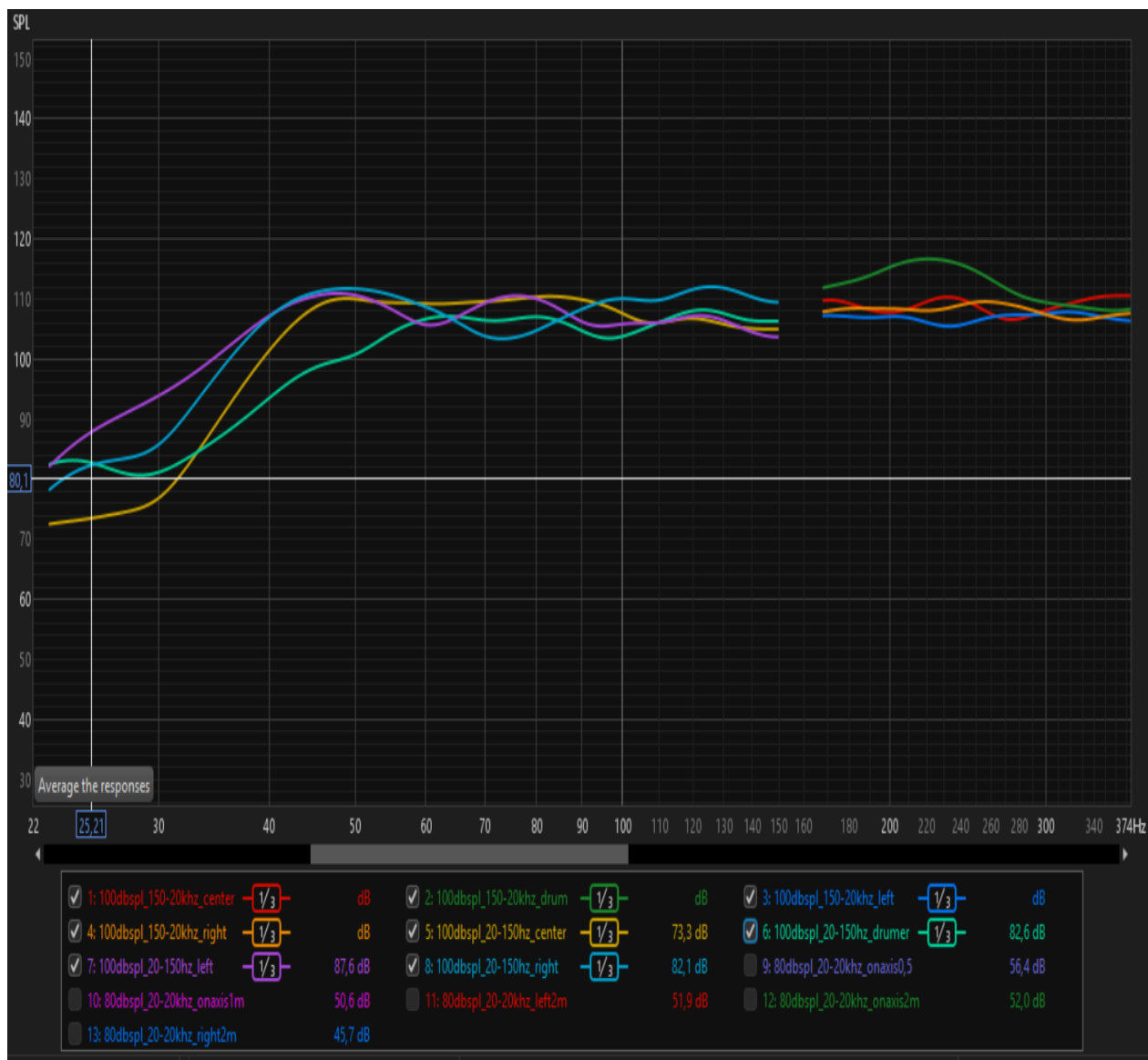
- Η γαλάζια και η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχούν στην 3η θέση μέτρησης (στα δεξιά του δωματίου).
- Η μωβ και μπλε καμπύλη αντιστοιχούν στην 4η θέση μέτρησης (στα αριστερά του δωματίου).

Σε όλες τις θέσεις το δωμάτιο παρουσιάζει την ίδια σχετική απόκριση, εκτός από τη θέση του ντράμερ όπου υπάρχει μια αύξηση στο φάσμα 200 με 300 Hz, της τάξεως των 18 dB και ένα σχετικά μικρό βύθισμα, της τάξεως των 6 dB στα 2 KHz. Σε όλες τις θέσεις από το 1 KHz και κάτω είναι σαν να έχει προστεθεί ένα low self φίλτρο που προσθέτει ομοιόμορφα περίπου 6 dB από το 1 KHz μέχρι και τα 40 Hz. Αυτό θυμίζει πολύ την καμπύλη Harman, πράγμα που αποδεικνύει πως το δωμάτιο συμπεριφέρεται αρκετά μουσικά και όχι επίπεδα. Όλες οι μετρήσεις σε όλες τις θέσεις, εκτός από τη θέση 1, είναι εντυπωσιακά ομοιόμορφες. Αυτό είναι λογικό, γιατί όλες οι θέσεις είναι on axis μπροστά από τον ίδιο τύπο ηχείου, σε αντίθεση με τη θέση 1 όπου είναι on axis μπροστά από ηχείο άλλου τύπου.

Πίνακας 4.1 Οι μετρήσεις για κάθε θέση του 1^{ου} σεναρίου χρησιμοποιώντας τυποποιημένες ζώνες συχνотήτων κατά το πρότυπο ISO 266

Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Θέση 1(SPL)	80	108	108	118	108	105	98	102	102	95
Θέση 2(SPL)	80	110	106	108	105	105	103	105	105	95
Θέση 3(SPL)	82	108	110	106	105	101	101	102	101	100
Θέση 4(SPL)	90	105	105	105	105	101	101	103	103	95

Όπως παρατηρούμε και από τον πίνακα, όλες οι θέσεις εκτός από τη θέση 1 παρουσιάζουν μια εικόνα μικρής ενίσχυσης κάτω από τα 1000 Hz και σχετικά επίπεδη απόκριση από τα 1000 Hz και πάνω. Στη θέση 1, όμως, παρατηρούμε μια μεγάλη αύξηση στα 250 Hz και ένα βύθισμα στα 2000 Hz.



Εικόνα 4.24 Συχνοτική απόκριση του δωματίου στο φάσμα από 20 έως 300 Hz

Στην εικόνα 4.24 παρατηρούμε τα εξής:

- Η τιρκουάζ και η πράσινη καμπύλη αντιστοιχούν στην 1η θέση μέτρησης (θέση ντράμερ).
- Η κίτρινη και η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχούν στη 2η θέση μέτρησης (στο κέντρο του δωματίου).
- Η γαλάζια και η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχούν στην 3η θέση μέτρησης (στα δεξιά του δωματίου).

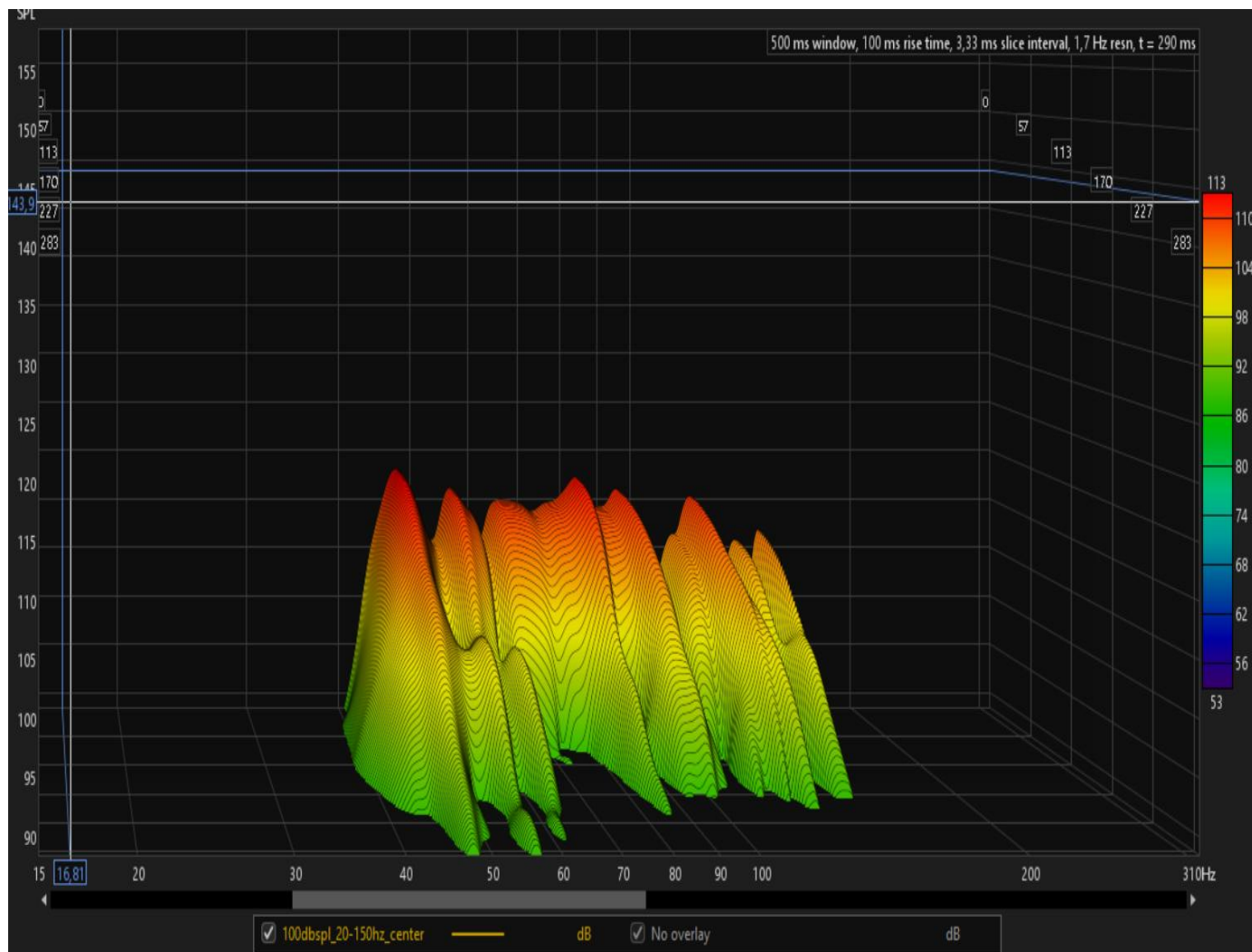
- Η μωβ και η μπλε καμπύλη αντιστοιχούν στην 4η θέση μέτρησης (στα αριστερά του δωματίου).

Βλέπουμε επίσης πως δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη αύξηση ή εξασθένηση σε καμία από τις θέσεις των μετρήσεων, εκτός από μια μικρή κορύφωση στη στενή περιοχή των 230 Hz της τάξεως των 6 dB στη θέση 1. Επίσης, στη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου εμφανίζεται μια μικρή εξασθένηση της τάξεως των 4 dB στη στενή περιοχή των 75 Hz, σε συνδυασμό με μια μικρή αύξηση της τάξεως των 4 dB στη στενή περιοχή των 50 Hz. Στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου και στη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου οι καμπύλες είναι ιδιαίτερα ισορροπημένες.

Πίνακας 4.2 Οι μετρήσεις για κάθε θέση από το 1^ο σενάριο για το φάσμα από 40 έως 300 Hz

Hz	40	60	80	100	150	200	250	300
Θέση 1(SPL)	90	105	105	104	105	112	112	110
Θέση 2(SPL)	100	108	108	105	105	105	106	106
Θέση 3(SPL)	103	107	105	108	108	105	105	105
Θέση 4(SPL)	103	105	108	105	103	105	105	105

Όπως παρατηρούμε και στον πίνακα 4.2, σε καμία θέση δεν υπάρχουν αυξομειώσεις μεγαλύτερες των 6 dB, εκτός από τη θέση 1, όπου παρατηρούμε μια αύξηση από τα 200 μέχρι και τα 300 Hz της τάξεως των 8 dB περίπου.



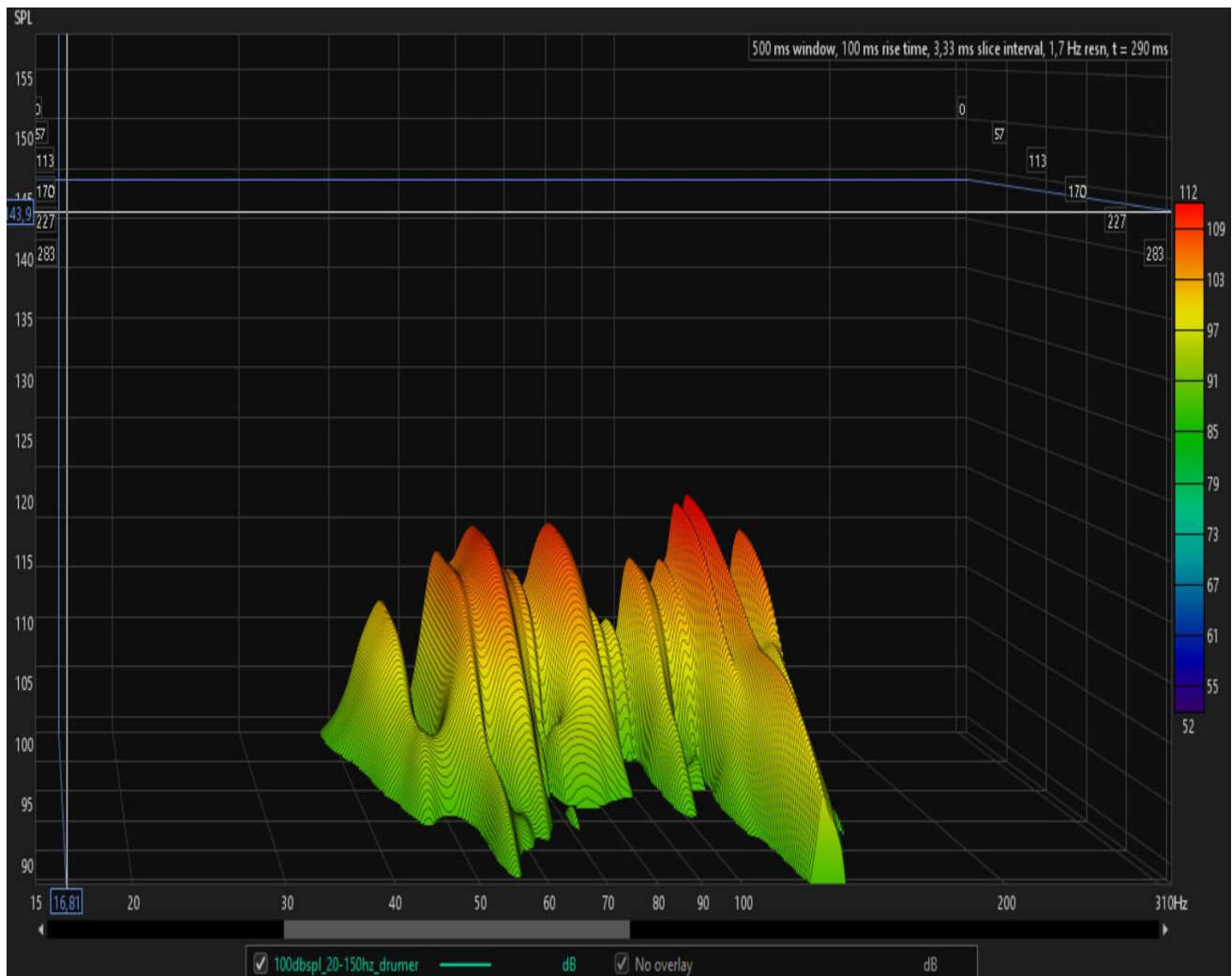
Εικόνα 4.25 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου

Στο φάσμα τύπου καταρράκτη επιλέχθηκε το επίπεδο βαθμονόμησης από 53 έως 113 dBSPL και στον άξονα του χρόνου ανάλυση μέχρι και τα 283 ms. Όπως παρατηρούμε, η πληροφορία ξεκινάει από τα 40 Hz, κάτι που οφείλεται πιθανότατα στην αδυναμία να αναπαραχθούν αυτές οι πολύ χαμηλές συχνότητες από τον ενισχυτή του μπάσου. Επίσης, η στάθμη φτάνει σε κάποια σημεία πάνω από τα 120 dBSPL, ενώ η μέτρηση έγινε στα 100 dBSPL. Πιο κοντά στα 100 dBSPL είναι τα 150 Hz, σε αντίθεση με το υπόλοιπο φάσμα που ξεπερνάει τα 110 dBSPL. Επιπλέον παρατηρούμε πως τα 50 Hz καθυστερούν να σβήσουν, σε αντίθεση με τα 70 Hz που σβήνουν πολύ πιο σύντομα σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα. Αρκετά ισορροπημένα σβήνει το φάσμα από τα 80 Hz και πάνω.

Πίνακας 4.3 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 2

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	170	86
60	170	86
80	150	86
100	170	86
120	170	86
140	170	86

Όπως παρατηρούμε, ο χρόνος απόσβεσης για όλες τις συχνότητες είναι γύρω στα 170 ms και εμφανίζονται 30 dB χαμηλότερα από τις ανώτερες κορυφές.



Εικόνα 4.26 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 1 όπου βρίσκονται τα τύμπανα

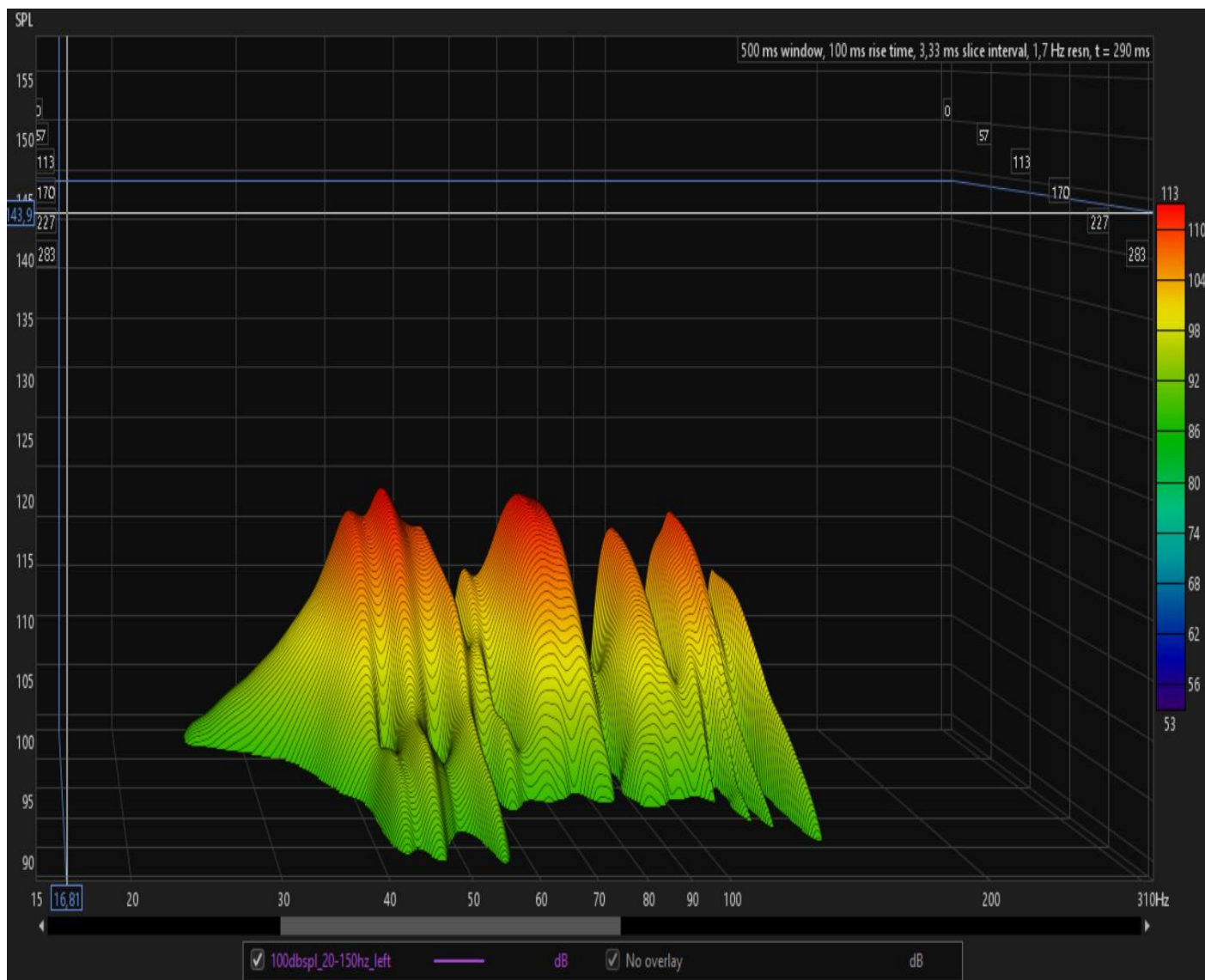
Σε αντίθεση με την προηγούμενη θέση παρατηρούμε ότι τα 40 Hz και τα 80 Hz βρίσκονται ιδιαίτερα χαμηλά σε στάθμη σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα που κυμαίνεται πάνω από τα 110 dB SPL. Επίσης, τα 120 Hz αργούν πολύ να σβήσουν, ξεπερνώντας τα 300 ms, σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα που σβήνει νωρίτερα.

Πίνακας 4.4 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 1

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dB SPL)
40	57	85
60	227	85
80	113	85

100	170	85
120	97	85
140	<283	95

Παρατηρούμε πως σε αυτήν τη θέση οι συχνότητες σβήνουν σε διαφορετικό χρόνο ιδιαίτερα ανομοιόμορφα, και πιο συγκεκριμένα στα 140 Hz όπου ο χρόνος απόσβεσης ξεπερνάει τα 283 ms και σε αρκετά υψηλή στάθμη.



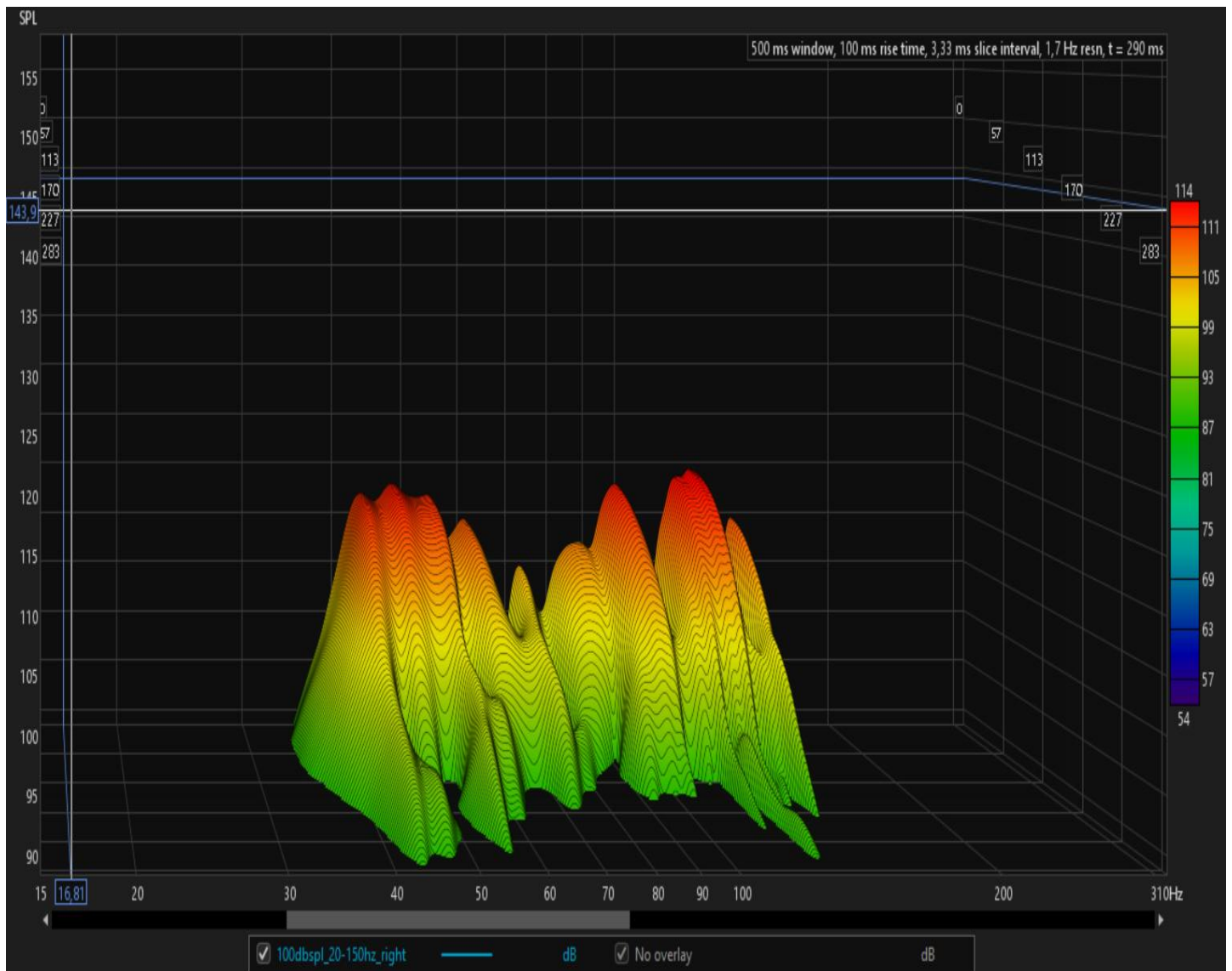
Εικόνα 4.27 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 4 που βρίσκεται αριστερά του δωματίου

Σε αντίθεση με τις άλλες θέσεις υπάρχει μια πληροφορία σε σχετικά χαμηλή στάθμη και σύντομη διάρκεια, κάτω από τα 40 Hz. Πιθανότατα δημιουργείται από τον χώρο. Επίσης, το φάσμα παρουσιάζει πιο ισορροπημένη εικόνα σε στάθμη, εκτός από τα 150 Hz που εμφανίζονται γύρω στα 5 dB χαμηλότερα. Τέλος, η διάρκεια απόσβεσης του φάσματος είναι επίσης αρκετά ισορροπημένη, εκτός από το φάσμα κάτω των 60 Hz που σβήνει λίγο πιο αργά αλλά σε αρκετά χαμηλή στάθμη.

Πίνακας 4.5 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 4

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	150	85
60	150	85
80	150	85
100	150	85
120	170	85
140	225	80

Παρατηρούμε πως μέχρι και τα 120 Hz ο χρόνος απόσβεσης είναι πανομοιότυπος, αν και στο στενό φάσμα μεταξύ 40 και 60 Hz ο χρόνος απόσβεσης είναι αυξημένος, κάτι που δεν φαίνεται από τις επιλεγμένες συχνότητες του πίνακα. Σύμφωνα με τον πίνακα, παρατηρούμε την αύξηση του χρόνου απόσβεσης στα 140 Hz, αλλά λίγο χαμηλότερα σε στάθμη σε σχέση με τις άλλες συχνότητες.



Εικόνα 4.28 Το φάσμα από 20 έως 150 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου

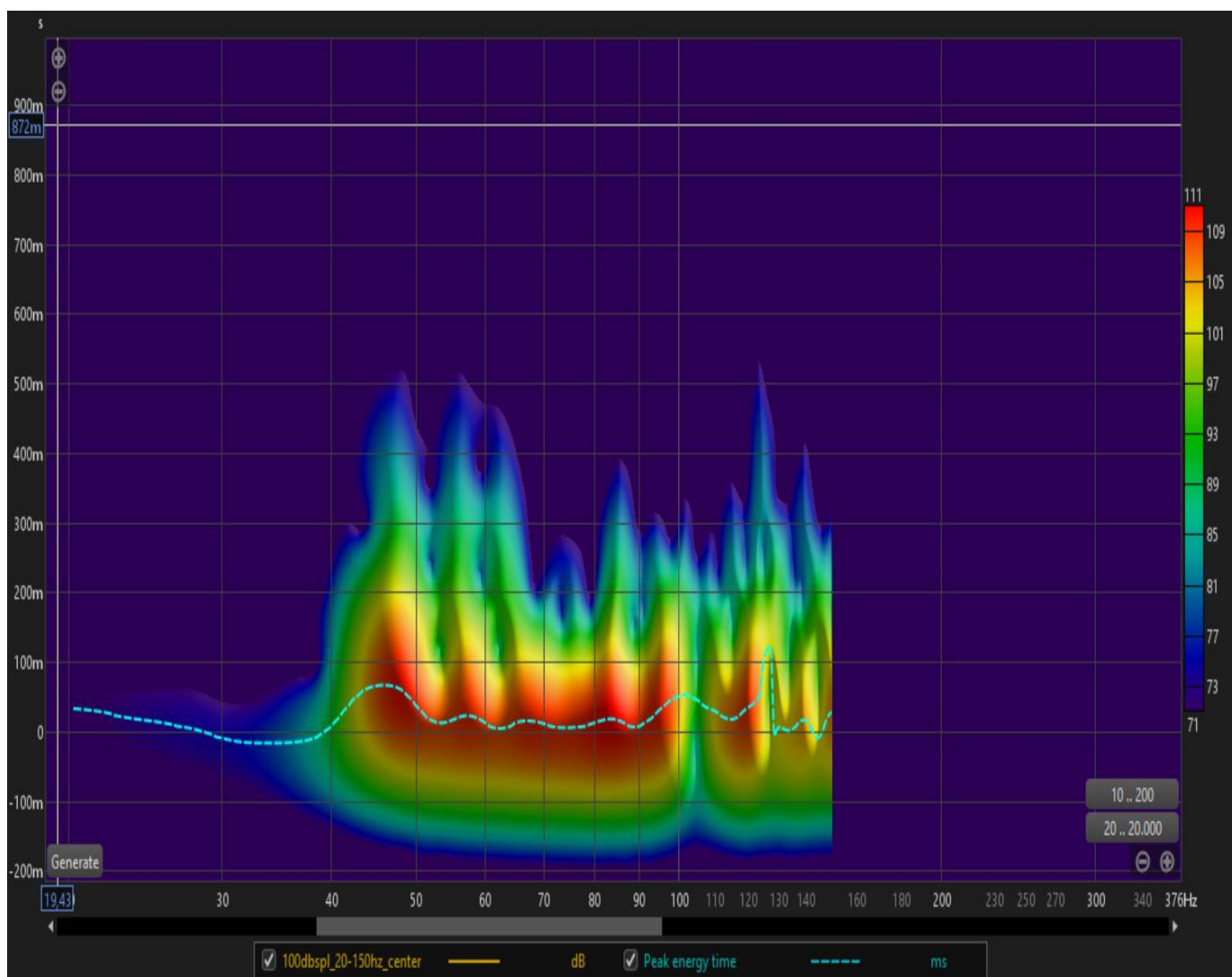
Και στη θέση 3 η πληροφορία ξεκινάει πάνω από τα 40 Hz. Η γενικότερη εικόνα όσον αφορά τις στάθμες είναι αρκετά ομοιόμορφη, εκτός από ένα σημαντικό βύθισμα της τάξεως των 6 dB στα 70 Hz σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα. Η διάρκεια σβησίματος παρόλα αυτά είναι αρκετά ομοιόμορφη.

Πίνακας 4.6 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 140 Hz για τη θέση 3

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dB SPL)
40	170	85
60	170	85

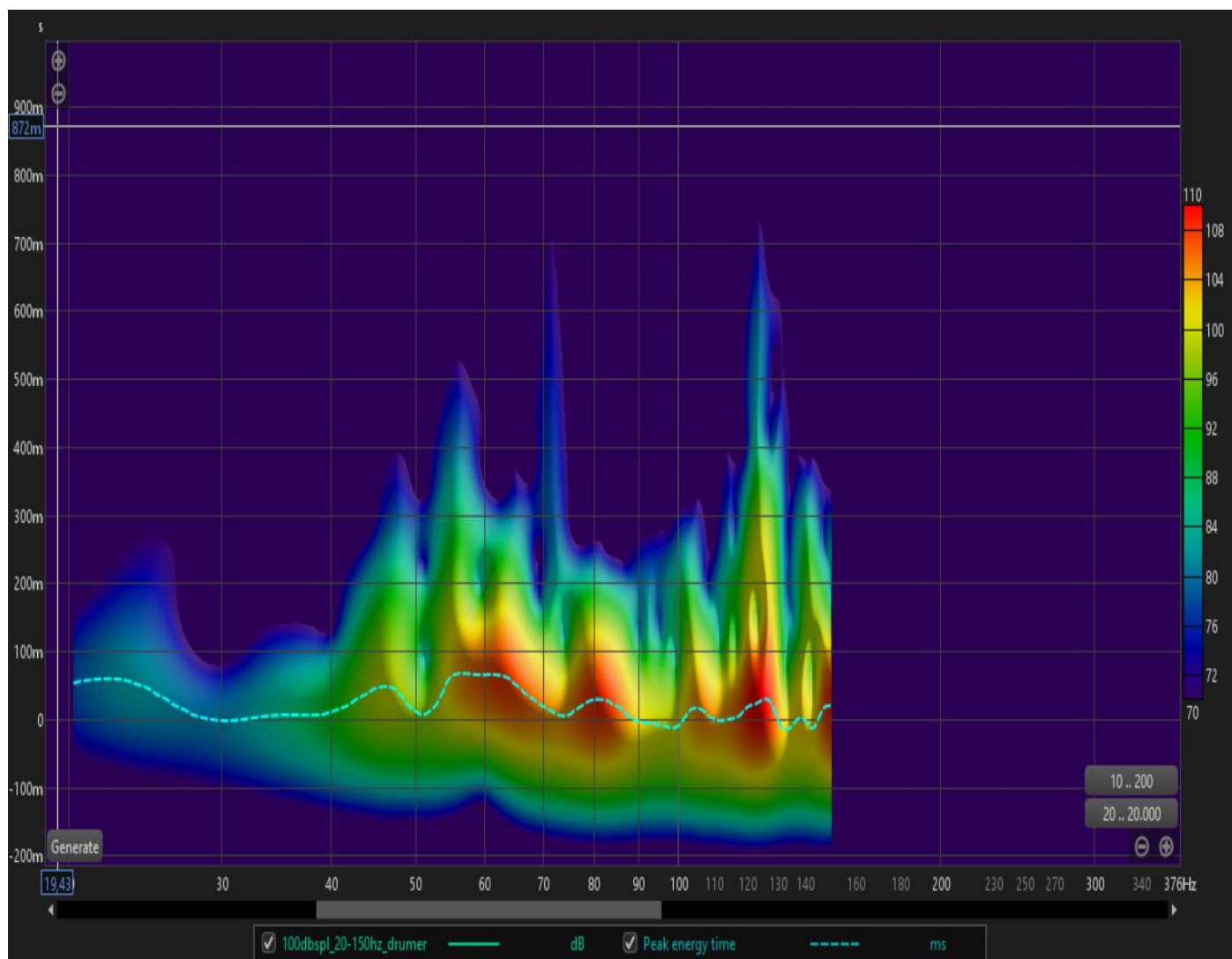
80	113	85
100	113	85
120	170	85
140	170	85

Παρατηρούμε πως ο χρόνος απόσβεσης στις περισσότερες συχνότητες είναι ιδιαίτερα ομοιόμορφος, γύρω στα 170 ms, εκτός από τα 80 και 100 Hz όπου είναι κατά 57 ms συντομότερος.



Εικόνα 4.29 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου

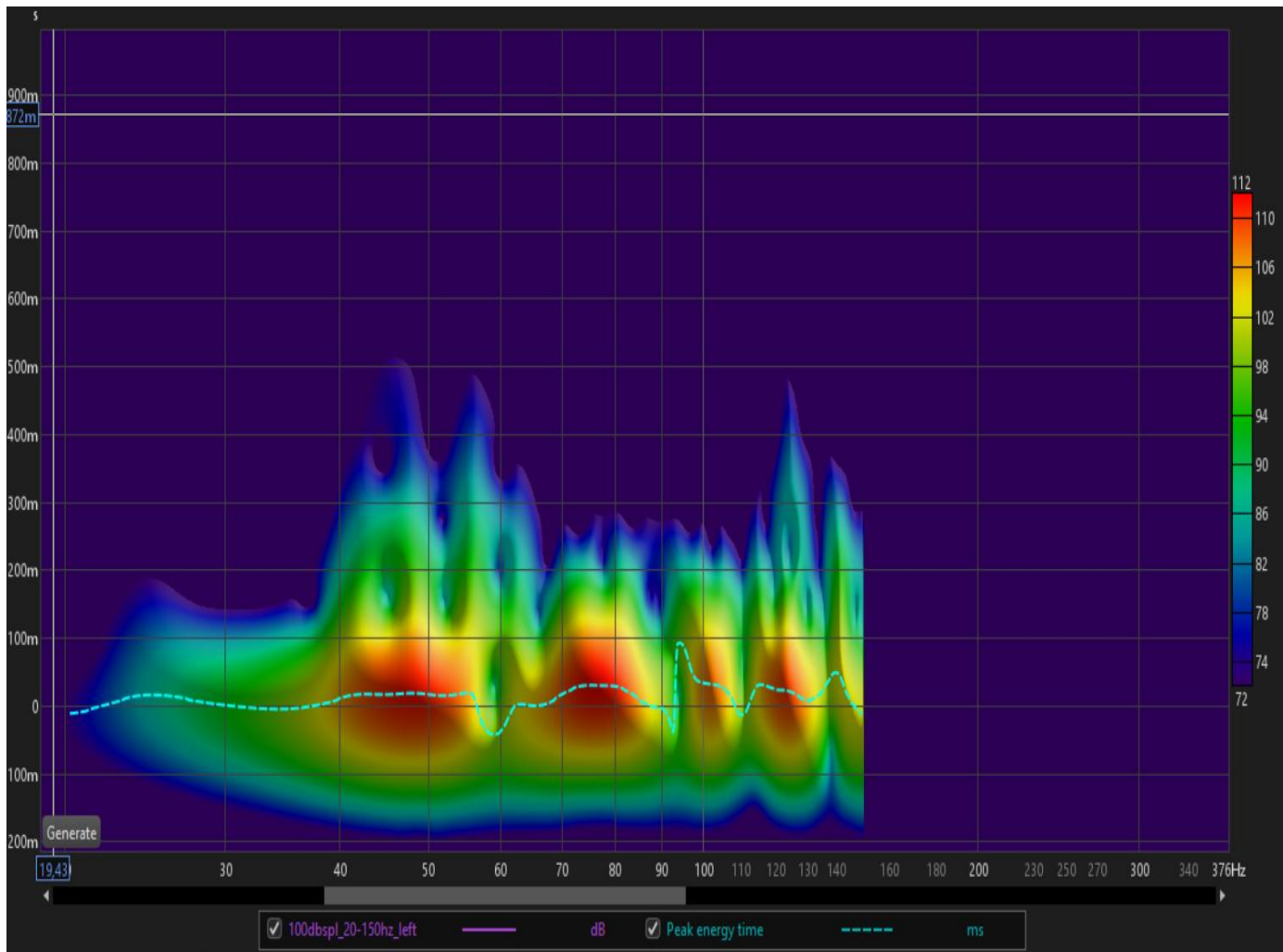
Όπως και στο γράφημα τύπου καταρράχτη, έτσι και σε αυτό το φασματογράφημα παρατηρούμε τη στάθμη του σήματος σε σχέση με τον χρόνο. Βλέπουμε πως οι στάθμες είναι ισορροπημένες σε όλο το φάσμα, με μόνη διαφορά τη διάρκεια εξασθένησης. Στο φάσμα από 40 έως 70 Hz καθώς και στα 130 Hz διαρκεί μέχρι και 500 ms, σε αντίθεση με το υπόλοιπο φάσμα όπου εξασθενεί γύρω στα 300 ms.



Εικόνα 4.30 Φασματογράφημα της συχνοτικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 1 στη θέση του ντράμερ

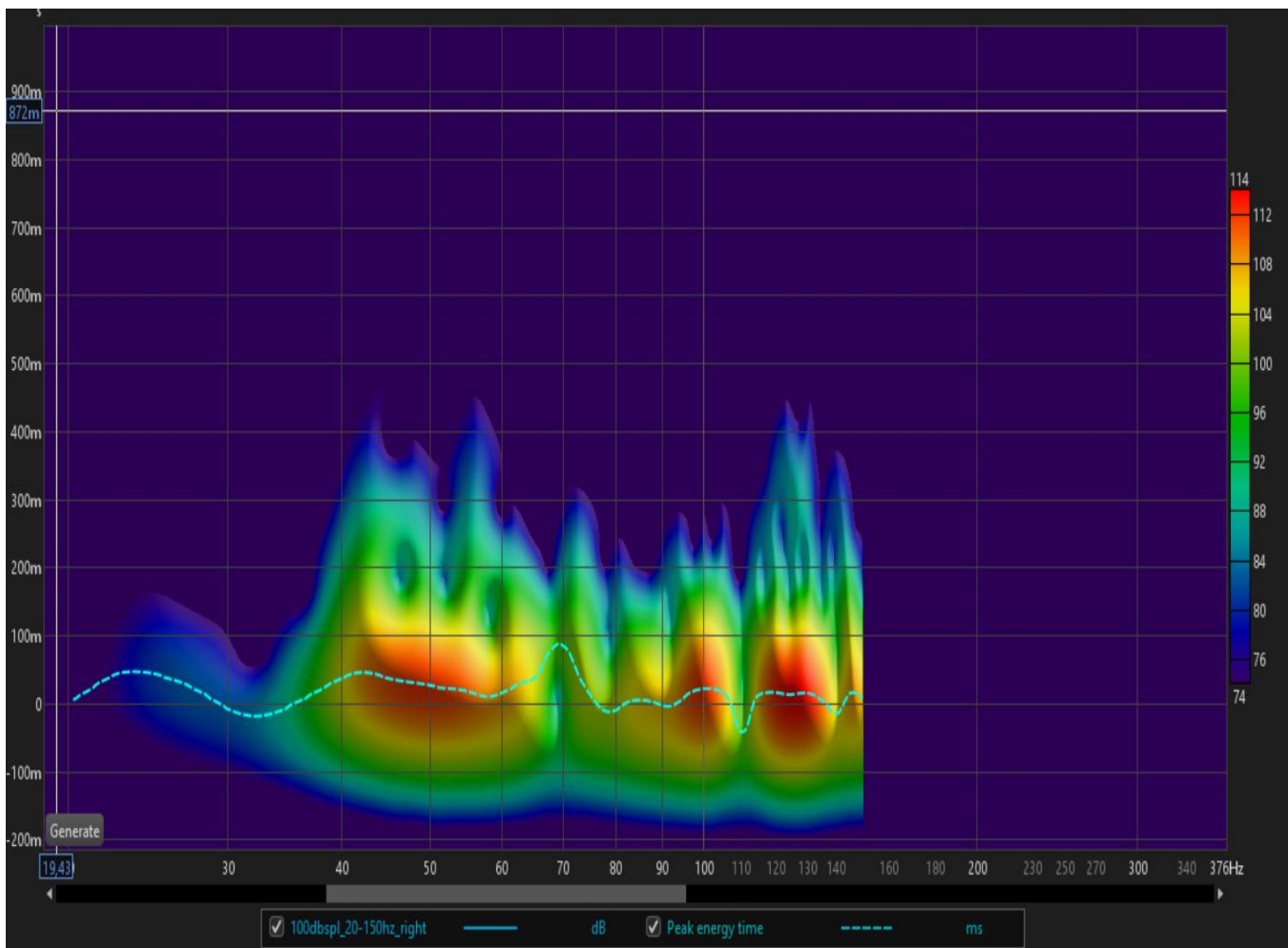
Στην εικόνα 4.30 παρατηρούμε ένα σχετικά ασθενές βύθισμα στη στάθμη της τάξεως των 10 dB κάτω από τα 50 Hz. Ταυτόχρονα υπάρχει πληροφορία και κάτω από τα 40 Hz, που εμφανίζεται 30 dB χαμηλότερα από την ανώτερη κορυφή. Όσον αφορά τη διάρκεια εξασθένησης, παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη διάρκεια εμφανίζεται στα 130 Hz και στα 75 Hz, αλλά αρκετά εξασθενημένη, γύρω στα 40 dB χαμηλότερα από την ανώτερη κορυφή.

Το υπόλοιπο φάσμα παρουσιάζει ομαλή διάρκεια εξασθένησης, ιδιαίτερα μέχρι και τα 90 dB SPL, δεδομένου ότι η ανώτερη κορυφή φτάνει στα 110 dB SPL.



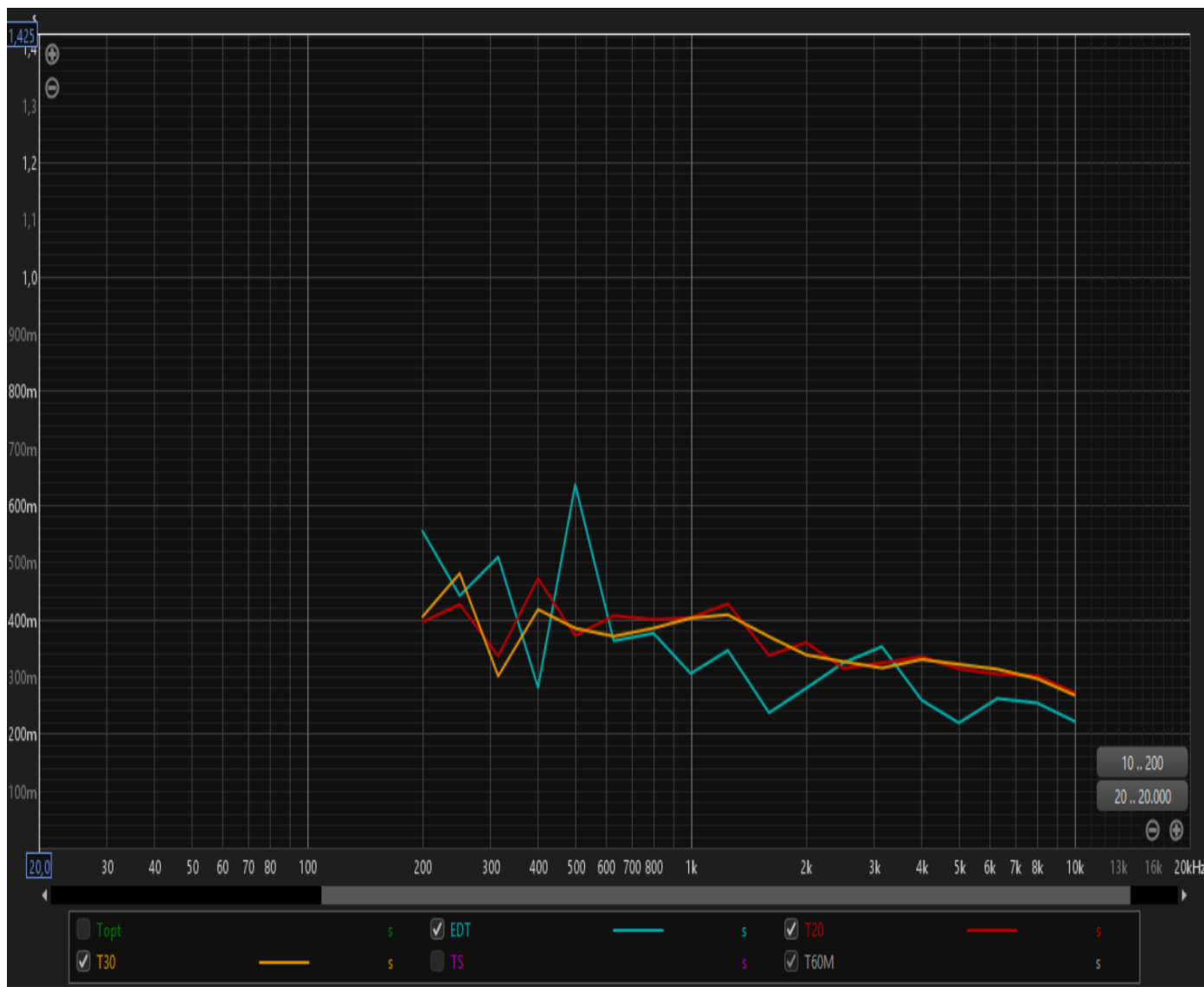
Εικόνα 4.31 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου

Και στην περίπτωση στην εικόνα 4.31 εμφανίζεται πληροφορία κάτω από τα 40 Hz και γύρω στα 90 dB SPL, αλλά με αρκετά σύντομη διάρκεια εξασθένησης. Το υπόλοιπο φάσμα είναι αρκετά ισορροπημένο τόσο σε στάθμη όσο και σε διάρκεια εξασθένησης, ιδιαίτερα μέχρι και τα 90 dB SPL.



Εικόνα 4.32 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 150 Hz για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου

Η εικόνα που παρουσιάζει η θέση 3 είναι πανομοιότυπη με τη θέση 4, με τη μόνη διαφορά ότι δεν υπάρχει πληροφορία κάτω από τα 40 Hz. Όλο το υπόλοιπο φάσμα είναι αρκετά ισορροπημένο τόσο σε στάθμες όσο και σε διάρκεια εξασθένησης.



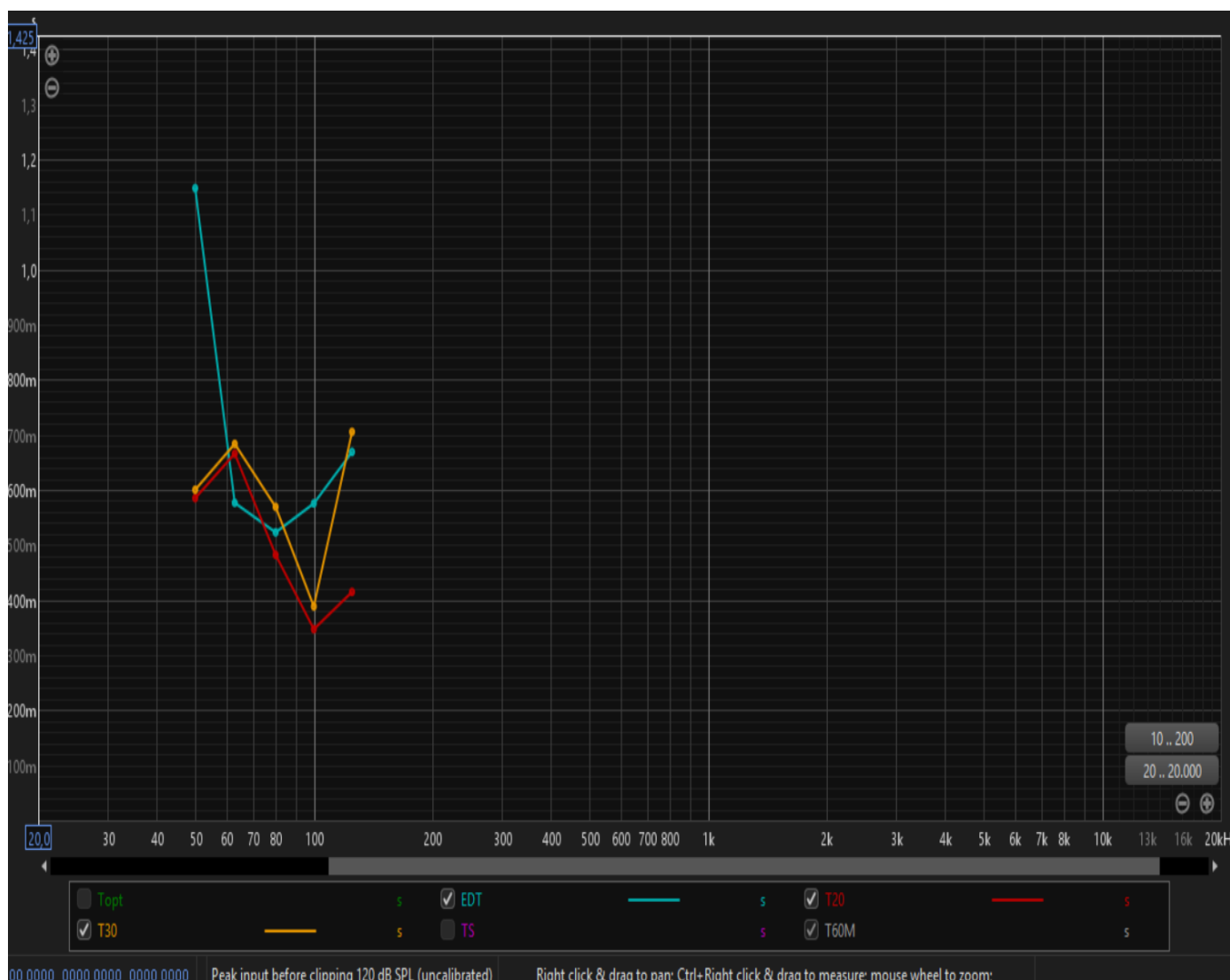
Εικόνα 4.33 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz

Στην εικόνα 4.33 παρατηρούμε πως ο μέσος χρόνος αντήχησης (RT30) είναι στα 380 ms. Μια σχετική αύξηση εμφανίζεται στα 250 Hz, όπου φτάνει στα 480 ms, και μια μείωση στα 400 Hz, όπου φτάνει στα 300 ms. Στο υπόλοιπο φάσμα είναι ισορροπημένος ο χρόνος αντήχησης με μια σταδιακή μείωση όσο αυξάνεται η συχνότητα. Παράλληλα, παρατηρούμε πως ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης (EDT) παρουσιάζει μια έντονη αύξηση στα 500 Hz, όπου ξεπερνάει τα 600 ms, και μια μικρότερη στα 300 Hz, όπου φτάνει τα 500 ms. Το υπόλοιπο φάσμα κυμαίνεται γύρω 300 ms.

Πίνακας 4.7 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 2

Hz	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	480	400	400	350	350	350

Στον πίνακα 4.7 βλέπουμε πως ο μέσος χρόνος αντήχησης (RT30) είναι στα 380 ms. Όσο αυξάνεται η συχνότητα μειώνεται και ο χρόνος αντήχησης.



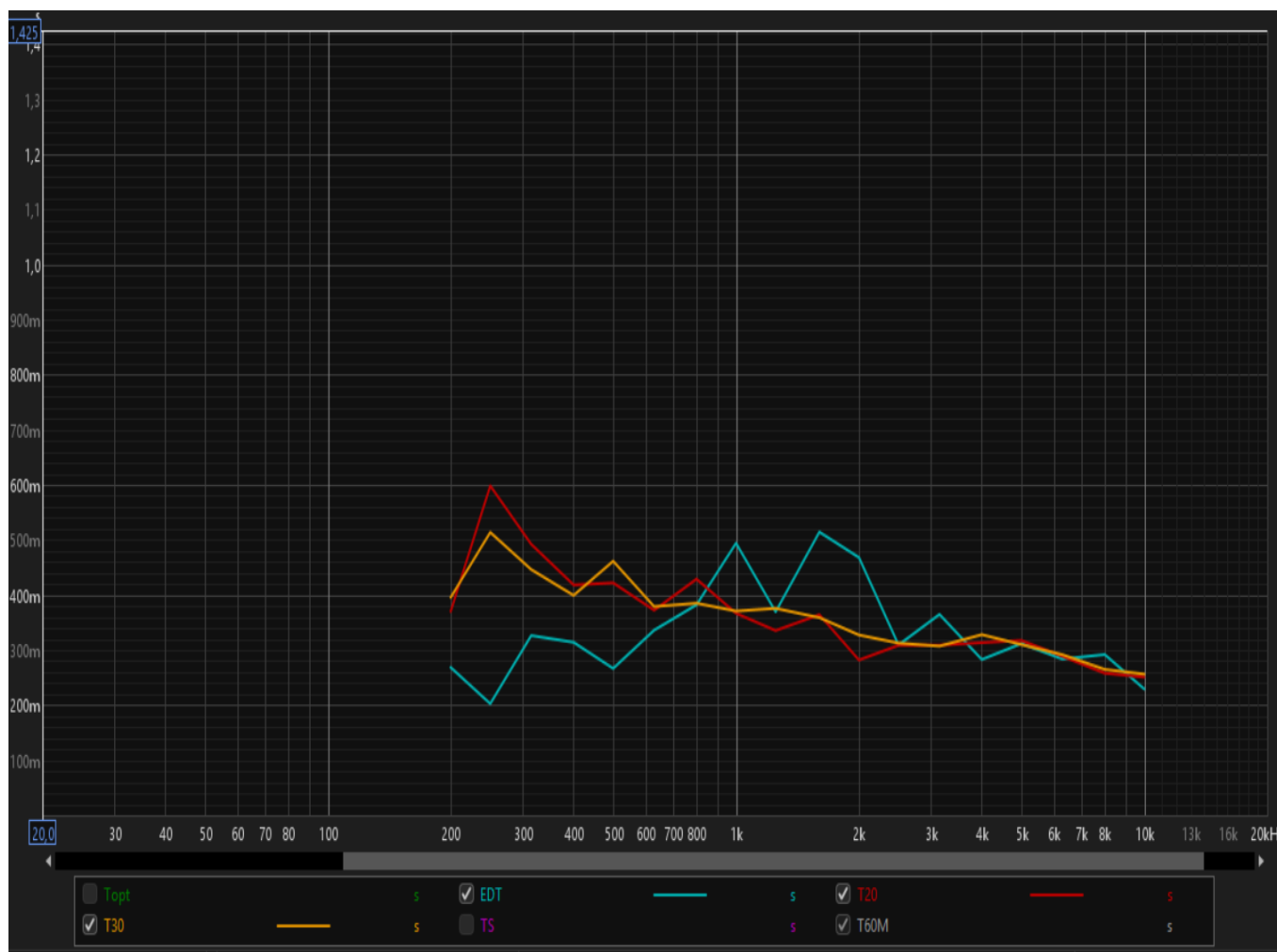
Εικόνα 4.34 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου από 20 έως 150 Hz

Στην εικόνα 4.34 παρατηρούμε πως ο χρόνος αντήχησης κάτω από τα 150 Hz είναι πιο αυξημένος σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα και ταυτόχρονα αρκετά ανομοιόμορφος. Πιο

συγκεκριμένα, ενώ τα 60 και τα 150 Hz παρουσιάζουν χρόνο αντήχησης στα 700 ms, τα 100 Hz πέφτουν στα 400 ms. Γενικότερα, τα 100 Hz είναι πιο αυξημένα από τα μέσα επίπεδα του υπόλοιπου φάσματος, που κυμαίνεται γύρω στα 380 ms. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εικόνα του χρόνου πρώιμης απόσβεσης, όπου παρότι είναι πιο ισορροπημένος σε γενικές γραμμές από τον χρόνο αντήχησης, παρουσιάζει μια πολύ απότομη αύξηση στα 50 Hz, όπου ξεπερνάει τα 1,1 sec.

Πίνακας 4.8 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 2

Hz	60	80	100	120	140
RT30(ms)	700	580	400	550	700



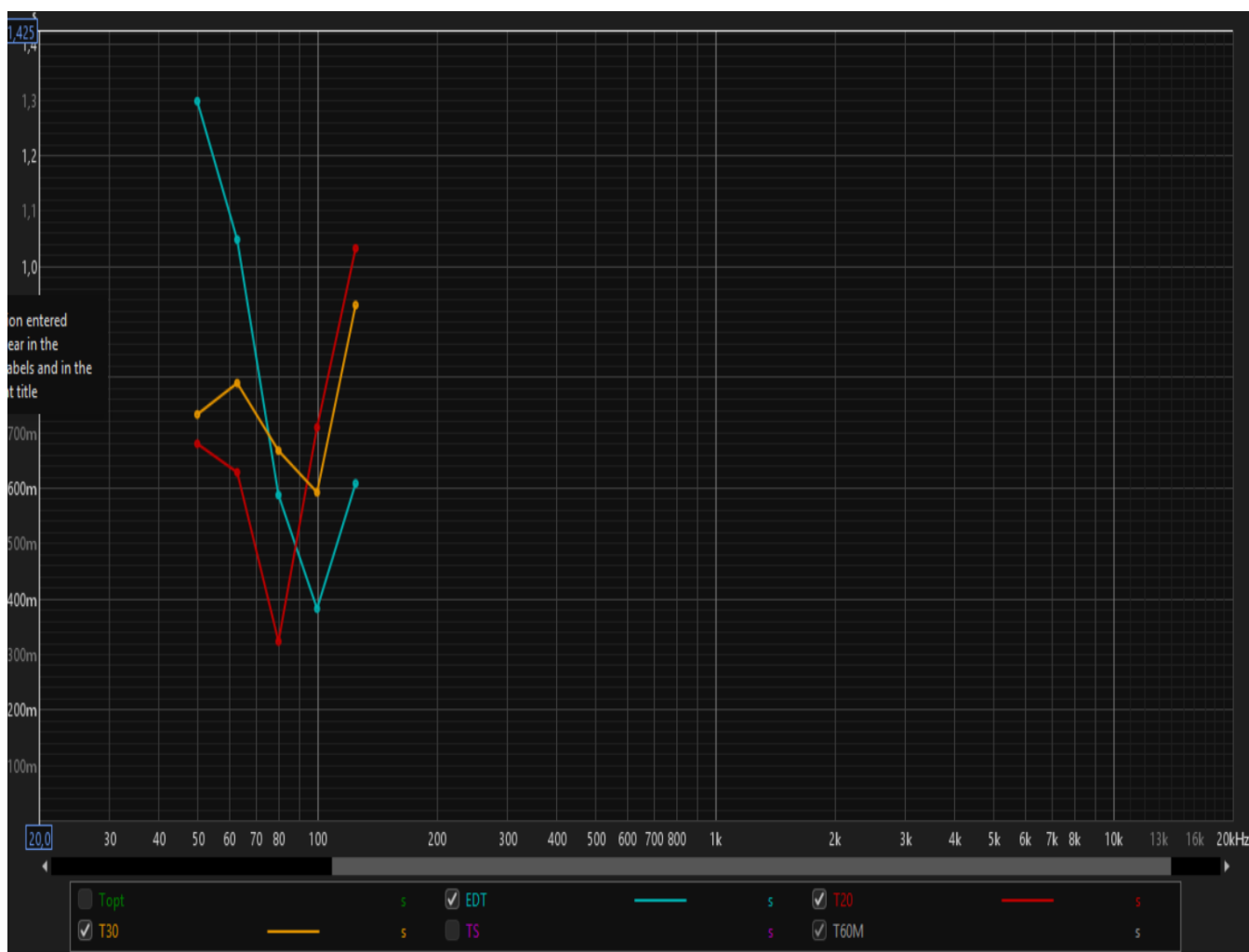
Εικόνα 4.35 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1 στη θέση του ντράμς από 150 έως 20.000 Hz

Στην εικόνα 4.35 βλέπουμε πως μόνο στη στενή περιοχή των 250 Hz παρουσιάζεται σημαντική αύξηση του χρόνου αντήχησης, ενώ στη συνέχεια είναι αρκετά ισορροπημένος,

γύρω στα 380 ms με μια μικρή και σταδιακή μείωση όσο αυξάνεται η συχνότητα. Ο χρόνος, όμως, πρώιμης απόσβεσης παρουσιάζει ανομοιομορφία, ιδιαίτερα στην περιοχή των 2 KHz, όπου αυξάνεται σημαντικά, και αντίστοιχα στην περιοχή κάτω από 600 Hz, όπου μειώνεται αισθητά. Ομοιόμορφη εικόνα σε σχέση με τον χρόνο αντήχησης παρουσιάζεται πάνω από τα 2 KHz.

Πίνακας 4.9 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 1

Hz	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	550	480	380	350	360	320



Εικόνα 4.36 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1 στη θέση του ντράμερ από 20 έως 150 Hz

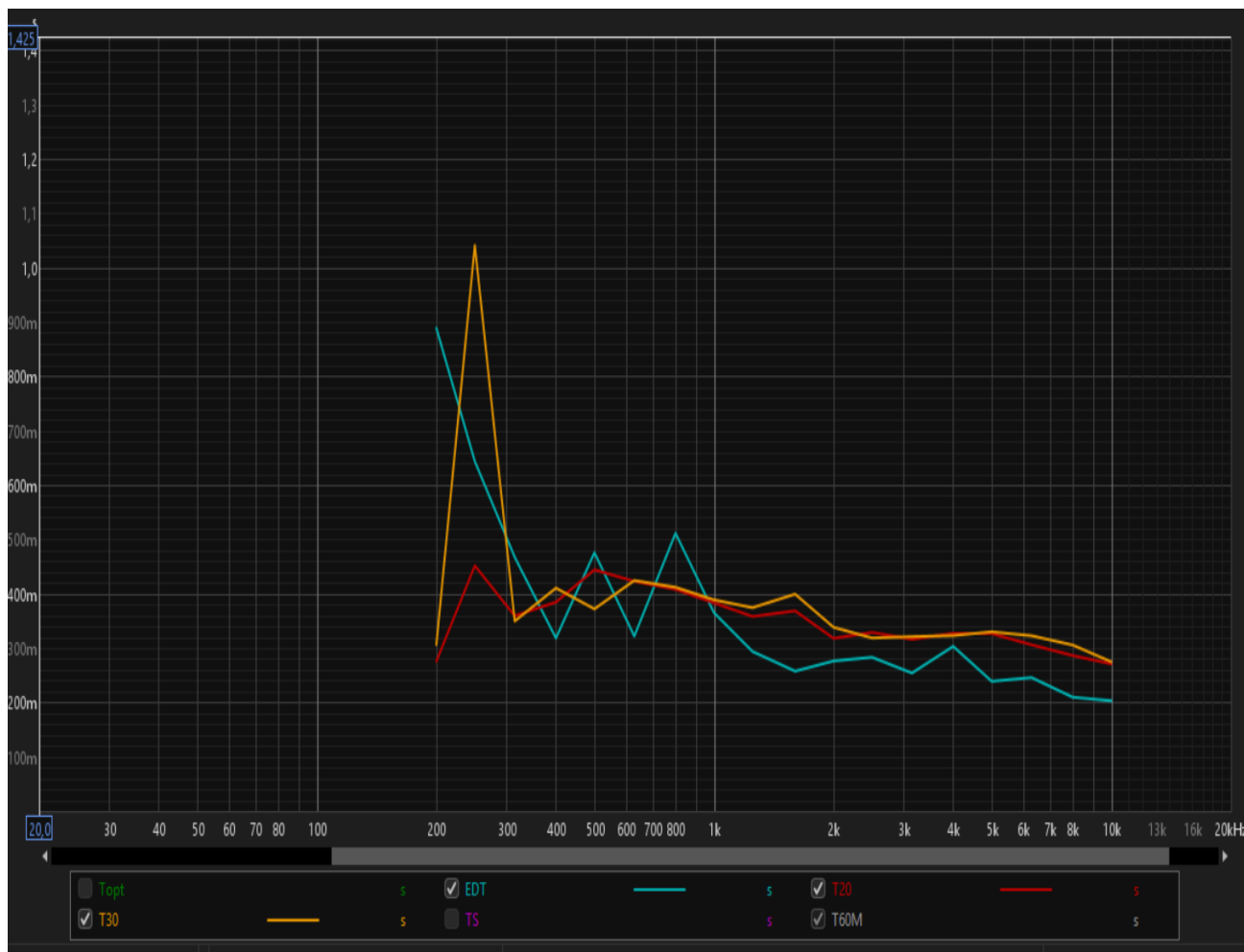
Όπως και στη θέση 2, έτσι και στη θέση 1 ο χρόνος αντήχησης είναι αρκετά υψηλότερος στις χαμηλές συχνότητες και ιδιαίτερα ανομοιόμορφος. Ενώ τα 150 Hz εμφανίζονται με

υψηλό χρόνο αντήχησης 900 ms, κατά πολύ υψηλότερο του μέσου όρου του υπόλοιπου φάσματος που είναι τα 350 ms, τα 100 Hz παρουσιάζουν ιδιαίτερη μείωση στον χρόνο αντήχησης, φτάνοντας στα 600 ms. Έπειτα ακολουθεί μια αύξηση στα 60 Hz που φτάνει στα 800 ms. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης, ο οποίος ακολουθεί σε ομοιομορφία τον χρόνο αντήχησης, με τη μόνη διαφορά πως κάτω από τα 70 Hz αυξάνεται απότομα φτάνοντας μέχρι και τα 1,3 sec.

Πίνακας 4.10 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 1

Hz	60	80	100	120	140
RT30(ms)	790	650	600	790	900

Στον πίνακα 4.10 παρατηρούμε τον υψηλό χρόνο αντήχησης που παρουσιάζει ο χώρος κάτω από τα 150 Hz. Ιδιαίτερη αύξηση εμφανίζεται στα 140 Hz, όπου φτάνει τα 900 ms, ενώ πιο χαμηλά στα 600 ms εμφανίζονται τα 100 Hz.



Εικόνα 4.37 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz

Στην εικόνα 4.37 βλέπουμε πως ενώ ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζει μια ομοιομορφία πάνω από τα 300 Hz, στα 250 Hz εμφανίζεται μια απότομη αύξηση που ξεπερνά το 1 sec. Ο υπόλοιπος χρόνος αντήχησης κυμαίνεται γύρω στα 350 ms. Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης ακολουθεί τις καμπύλες του χρόνου αντήχησης.

Πίνακας 4.11 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 4

Hz	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	1100	380	400	350	360	340

Στον πίνακα 4.11 είναι εμφανής η έντονη αντήχηση στα 250 Hz, ενώ το υπόλοιπο φάσμα είναι αρκετά ισορροπημένο.



Εικόνα 4.38 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4 στα αριστερά του δωματίου από 20 έως 150 Hz

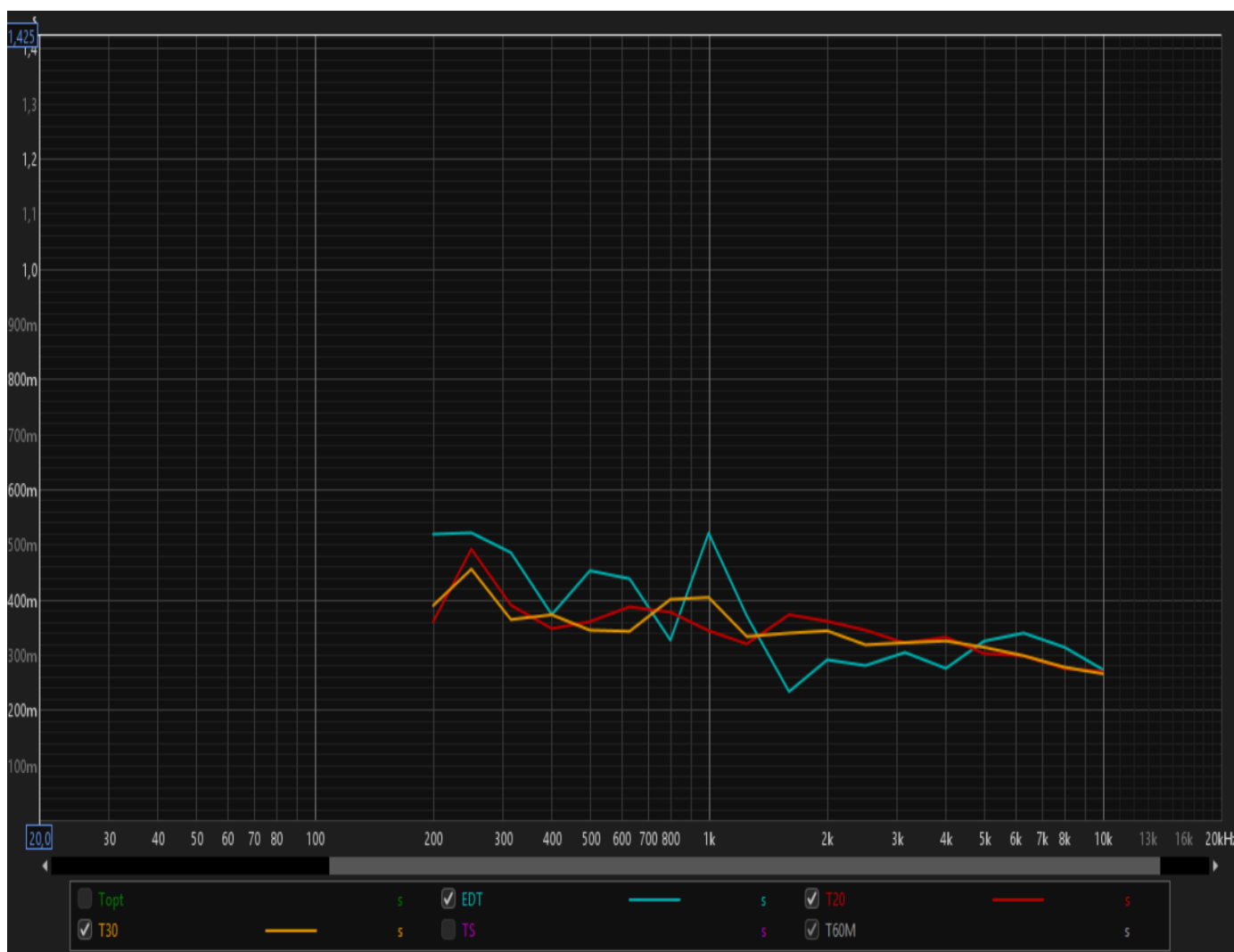
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, παρατηρούμε στην εικόνα 4.38 πως ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ υψηλότερος στις χαμηλές συχνότητες και ταυτόχρονα

ανομοιόμορφος, ιδιαίτερα στα 100 Hz όπου εμφανίζεται μια απότομη μείωση. Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης από την άλλη, παρουσιάζεται πιο ομοιόμορφος σε σχέση με τον χρόνο αντήχησης, αλλά ταυτόχρονα αρκετά υψηλότερος σε χρόνο ξεπερνώντας το 1 sec.

Πίνακας 4.12 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 4

Hz	60	80	100	120	140
RT30(ms)	700	350	320	500	760

Στον πίνακα 4.12 είναι εμφανής ο αυξημένος χρόνος αντήχησης στα 60, στα 120 και στα 140 Hz σε αντίθεση με τα 80 και 100 Hz, όπου ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται στα μέσα επίπεδα αντήχησης του υπόλοιπου φάσματος.



Εικόνα 4.39 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου από 150 έως 20.000 Hz

Στην εικόνα 4.39 τόσο ο χρόνος αντήχησης όσο και ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης παρουσιάζουν ιδιαίτερα ομοιόμορφη συχνοτική παρουσία με διάρκεια γύρω στα 380 ms.

Πίνακας 4.13 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 250 έως τα 8000 Hz για τη θέση 3

Hz	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	440	380	400	370	350	320

Στον πίνακα 4.13 είναι εμφανής η ομοιόμορφη παρουσία του χρόνου αντήχησης σε όλο το φάσμα με μια ελαφριά πτώση όσο αυξάνεται η συχνότητα.



Εικόνα 4.40 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου από 20 έως 150 Hz

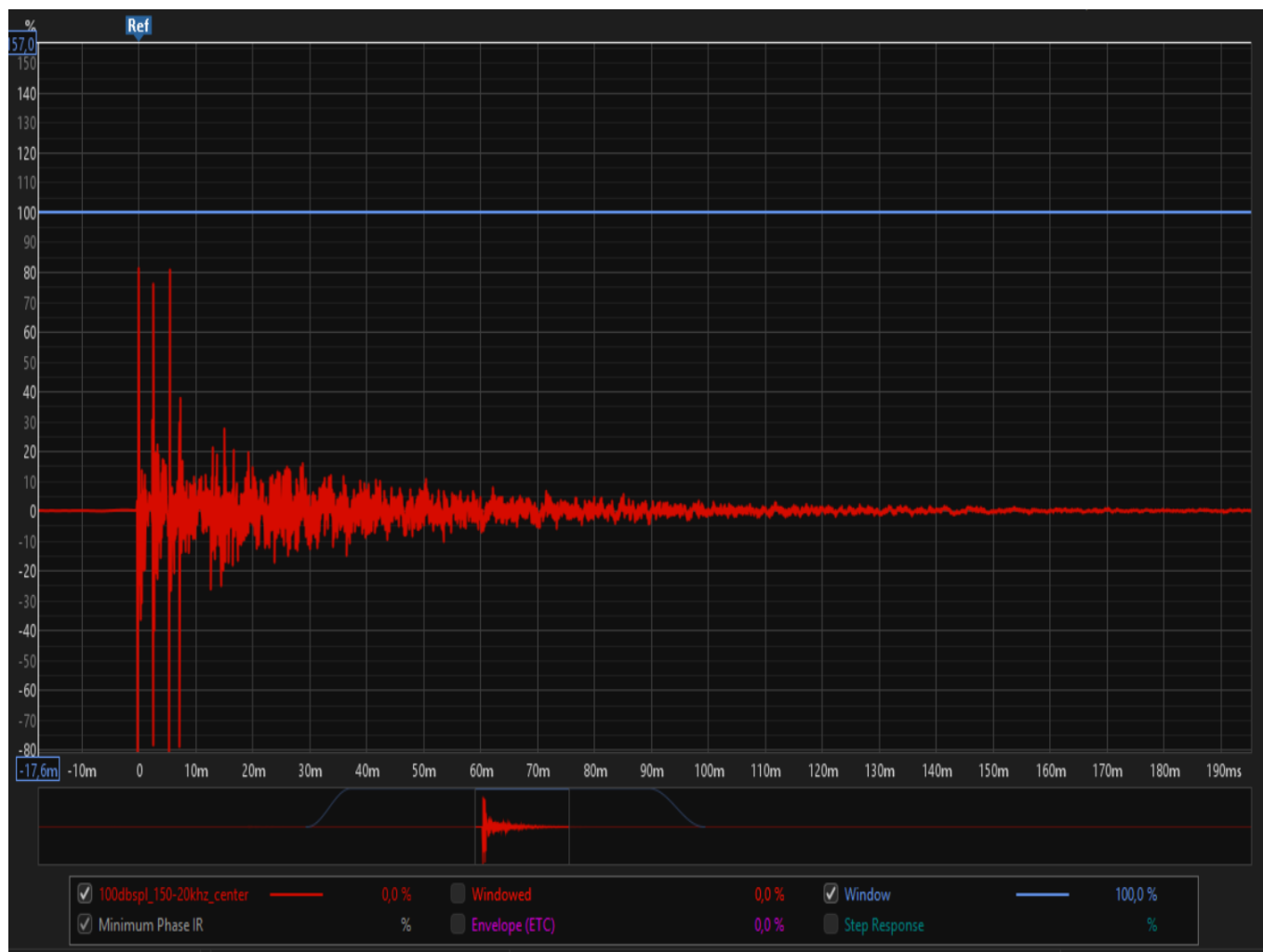
Όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, στην εικόνα 4.40 ο χρόνος αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες είναι υψηλότερος. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται υψηλότερος χρόνος αντήχησης στα 150 Hz και ακολουθεί μια απότομη μείωση στα 100 Hz. Έπειτα ακολουθεί

μια σταδιακή αύξηση μέχρι και τα 50 Hz. Αντίθετα με τον χρόνο αντήχησης, ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης αυξάνεται σταδιακά από τα 150 μέχρι και τα 50 Hz ξεπερνώντας τα 900 ms.

Πίνακας 4.14 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 20 έως τα 150 Hz για τη θέση 3

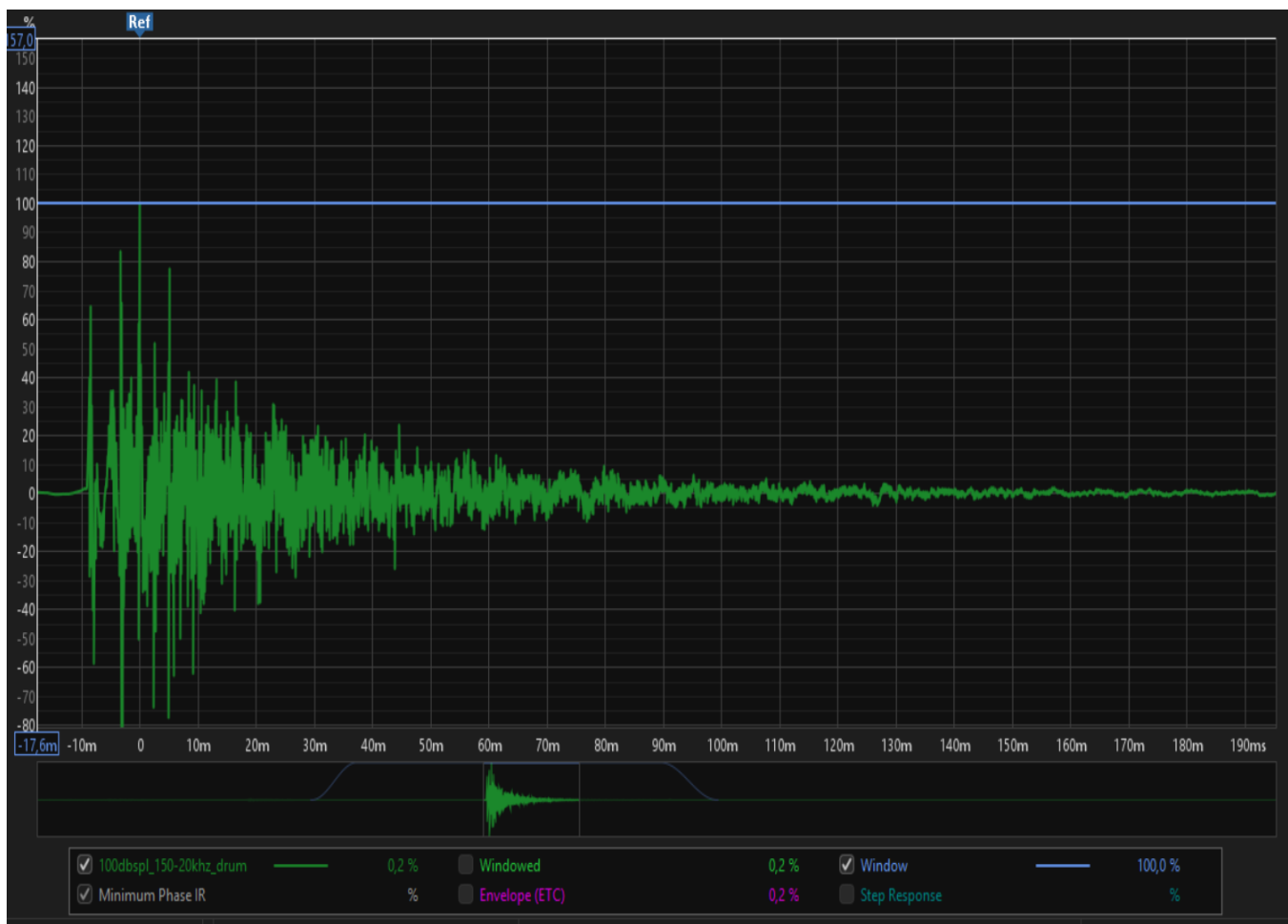
Hz	60	80	100	120	140
RT30(ms)	700	500	410	600	900

Στον πίνακα 4.14 βλέπουμε πως εκτός από τα 80 και 100 Hz το υπόλοιπο φάσμα παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό χρόνο αντήχησης που ξεπερνάει τα 600 ms και φτάνει μέχρι και τα 900 ms.



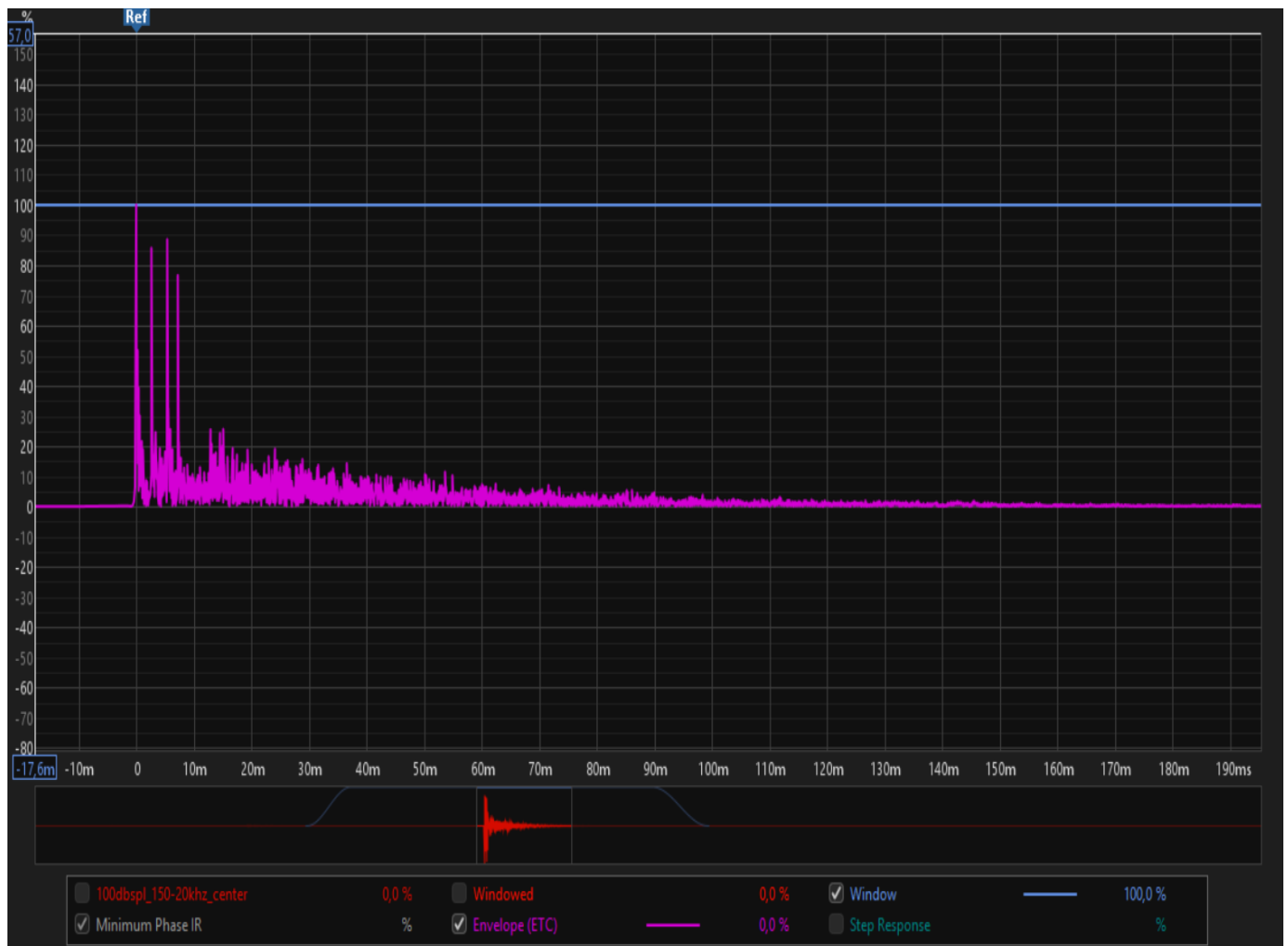
Εικόνα 4.41 Κρουστική απόκριση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 4.41, η κρουστική απόκριση έχει δύο πρωτογενείς ανακλάσεις πριν τα 10 ms, οι οποίες προέρχονται από τα επιπρόσθετα ηχεία που βρίσκονται πίσω από τη θέση 2. Στη συνέχεια ακολουθεί η σταδιακά ομοιόμορφη μείωση των υπόλοιπων ανακλάσεων μέχρι και τα 200 ms.



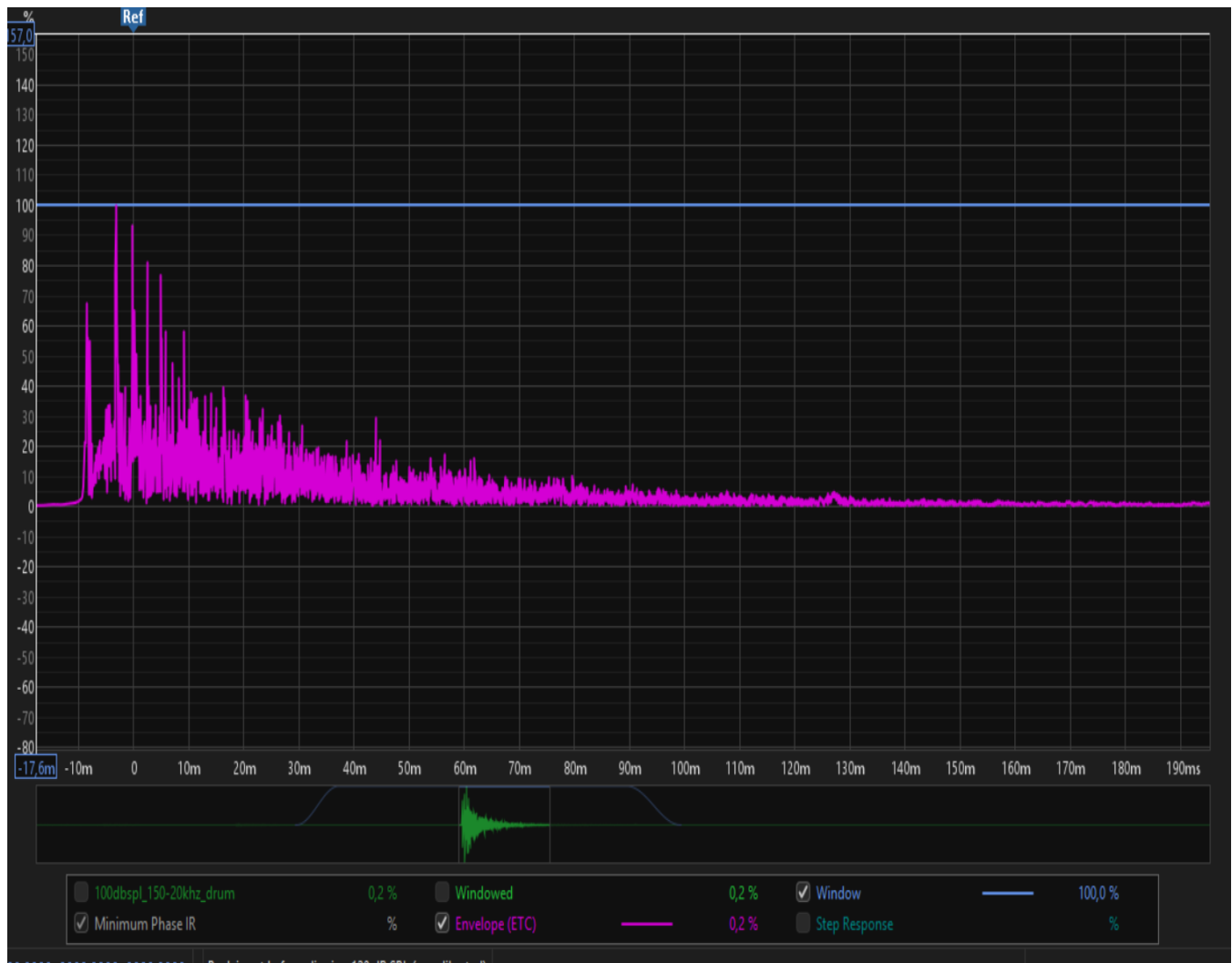
Εικόνα 4.42 Η κρουστική απόκριση στη θέση 1 του ντράμπερ

Επιλέχθηκε να γίνει μέτρηση της κρουστικής απόκρισης και της θέσης 1, καθώς φαίνεται να είναι η πιο προβληματική από όλες τις άλλες θέσεις. Στην εικόνα 4.42 παρατηρούμε τρεις πρωτογενείς ανακλάσεις πριν τα 10 ms, που προέρχονται από τα υπόλοιπα ηχεία του χώρου. Στη συνέχεια, εντοπίζεται μια έντονη παρουσία ανακλάσεων μέχρι και τα 50 ms. Μετά τα 70 ms ακολουθεί σταδιακά μια ομοιόμορφη μείωση των ανακλάσεων μέχρι και τα 200 ms.



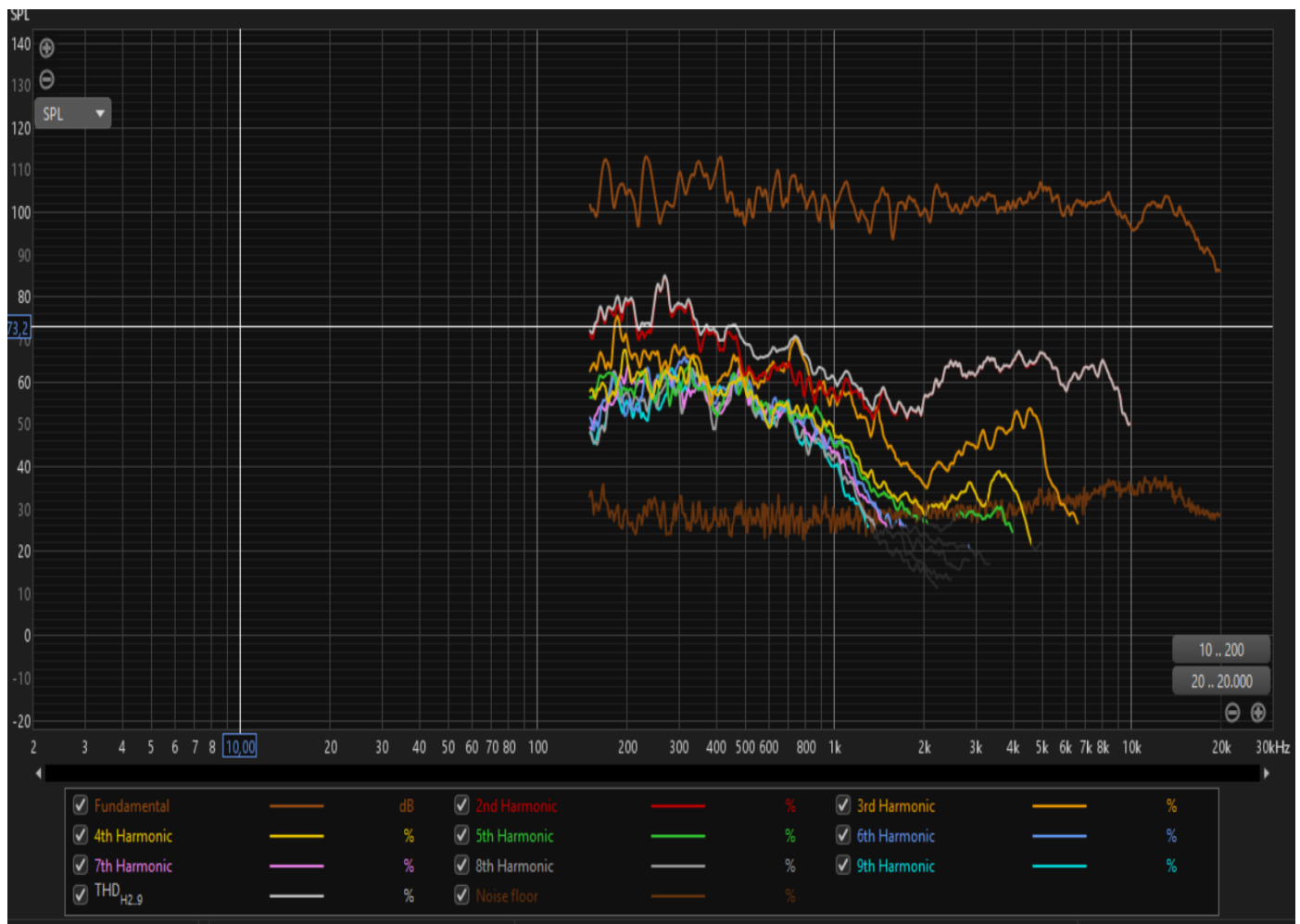
Εικόνα 4.43 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 2

Στην εικόνα 4.43 παρατηρούμε ξεκάθαρα τις τρεις πρωτογενείς ανακλάσεις που εμφανίζονται στα πρώτα 10 ms και σχεδόν στην ίδια στάθμη με το απευθείας σήμα. Στη συνέχεια, βλέπουμε την ουρά αντήχησης που εξασθενεί σταδιακά από τα 10 ms μέχρι και τα 200 ms.



Εικόνα 4.44 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 1

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα 4.44, οι πρωτογενείς ανακλάσεις εμφανίζονται τα πρώτα 10 ms, με τις αρχικές να είναι πολύ κοντά σε στάθμη με τον απευθείας ήχο. Έπειτα ακολουθεί η ουρά αντήχησης, με σταδιακή μείωση που ξεπερνάει τα 200 ms.



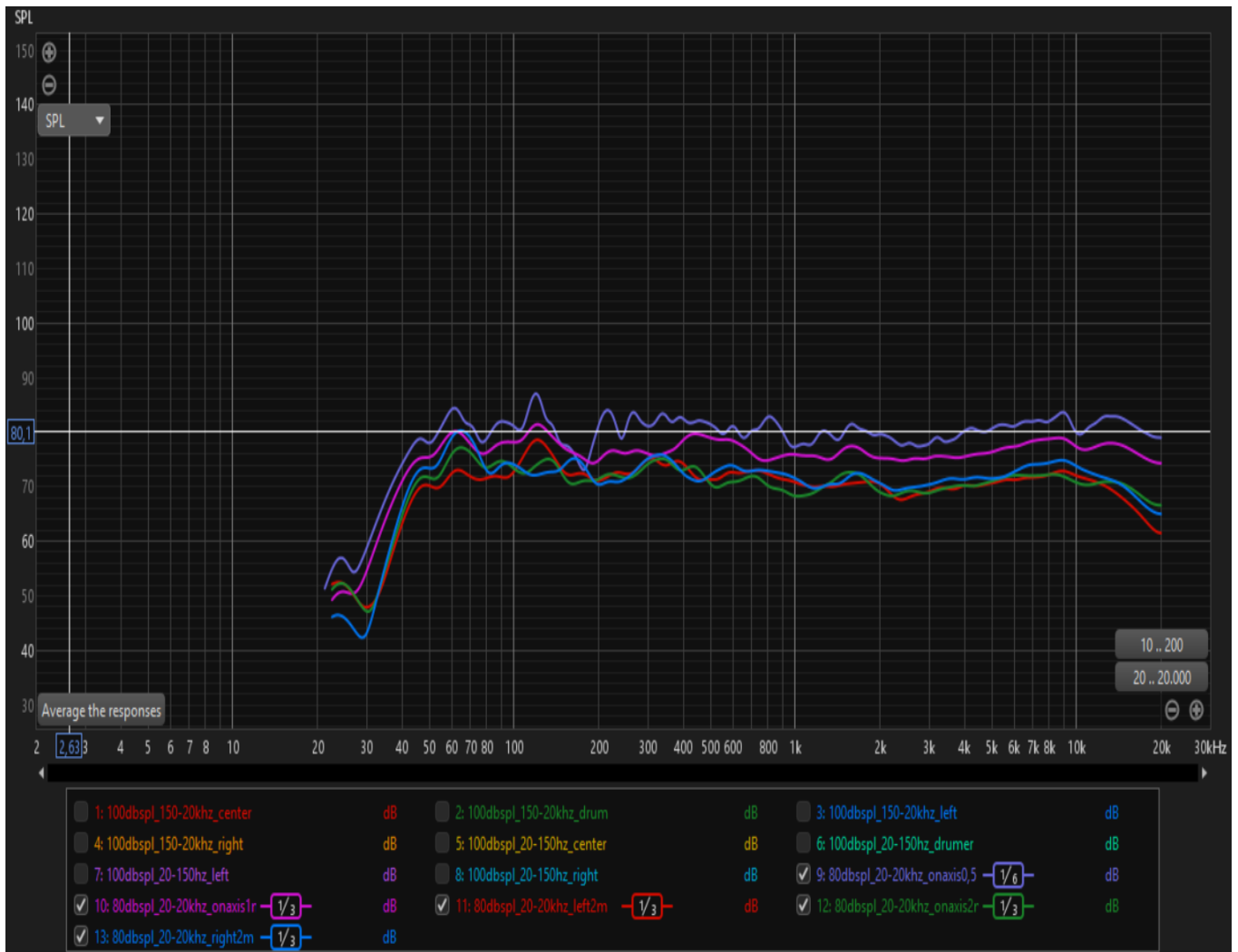
Εικόνα 4.45 Συνολική αρμονική παραμόρφωση στη θέση 2 στο κέντρο του δωματίου

Θεωρήθηκε σκόπιμο να υπολογισθεί και η συνολική αρμονική παραμόρφωση που προκαλείται από τα ηχεία λόγω της υψηλής στάθμης μέτρησης σε dBSPL. Για αυτό επιλέχθηκε ενδεικτικά η θέση στο κέντρο του δωματίου, που θεωρητικά είναι και η πιο ισορροπημένη. Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.45, η συνολική αρμονική παραμόρφωση εμφανίζεται στο μεγαλύτερο φάσμα περίπου 20 dBSPL χαμηλότερα από τη στάθμη σήματος, εκτός από το φάσμα γύρω από τα 2 KHz όπου εμφανίζεται 50 dBSPL χαμηλότερα. Επίσης, από τη μέτρηση παρατηρούμε τα επίπεδα θορύβου του δωματίου που κυμαίνονται κάτω από τα 30 dBSPL.

4.4 Μετρήσεις 2ου σεναρίου

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ανοιχτού κώδικα REW. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν στα 48 KHz/16 bit. Στο δεύτερο σενάριο το μήκος της σάρωσης του ημιτόνου ήταν από 20 έως 20.000 Hz. Το μήκος της ανάλυσης Fourier ήταν

από 12 έως 30.000 Hz με smoothing 1/3 και ο τρόπος βαθμονόμησης των SPL ήταν από 20 έως 140 dB SPL. Για τη μέτρηση στάθμης των 80 dB SPL οδηγήθηκε στα ηχεία ροζ θόρυβος και μετρήθηκε με εξωτερικό ντεσιμπελόμετρο με βαθμίδα βαθμονόμησης την καμπύλη Α. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την πόρτα κλειστή χωρίς παρουσία ανθρώπων.



Εικόνα 4.46 Η συχνοτική απόκριση όλων των θέσεων μέτρησης

Στην εικόνα 4.46 παρατηρούμε τα εξής:

- Η μωβ καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 1 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 0,5 μέτρων.
- Η ροζ καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 2 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 1 μέτρου.
- Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 3 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.

- Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 4 αριστερά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.
- Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 5 δεξιά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.46, η θέση 1 (μωβ καμπύλη) παρουσιάζει ένα βύθισμα στα 180 Hz της τάξεως των 8 dB και μια κορύφωση στα 120 Hz της τάξεως πάλι των 8 dB. Το υπόλοιπο φάσμα παρουσιάζεται ιδιαίτερα ισορροπημένο.

Στη θέση 2 (ροζ καμπύλη) όλο το φάσμα παρουσιάζεται αρκετά ισορροπημένο με μια απόκλιση ± 3 dB.

Στη θέση 3 (πράσινη καμπύλη) επίσης το φάσμα παρουσιάζεται αρκετά ισορροπημένο με μια απόκλιση ± 3 dB.

Στη θέση 4 (κόκκινη καμπύλη) παρουσιάζεται μια κορύφωση στα 120 Hz της τάξεως πάλι των 8 dB. Το υπόλοιπο φάσμα παρουσιάζεται ιδιαίτερα ισορροπημένο.

Στη θέση 5 (μπλε καμπύλη) παρουσιάζεται μια κορύφωση στα 65 Hz της τάξεως πάλι των 8 dB. Το υπόλοιπο φάσμα παρουσιάζεται ιδιαίτερα ισορροπημένο.

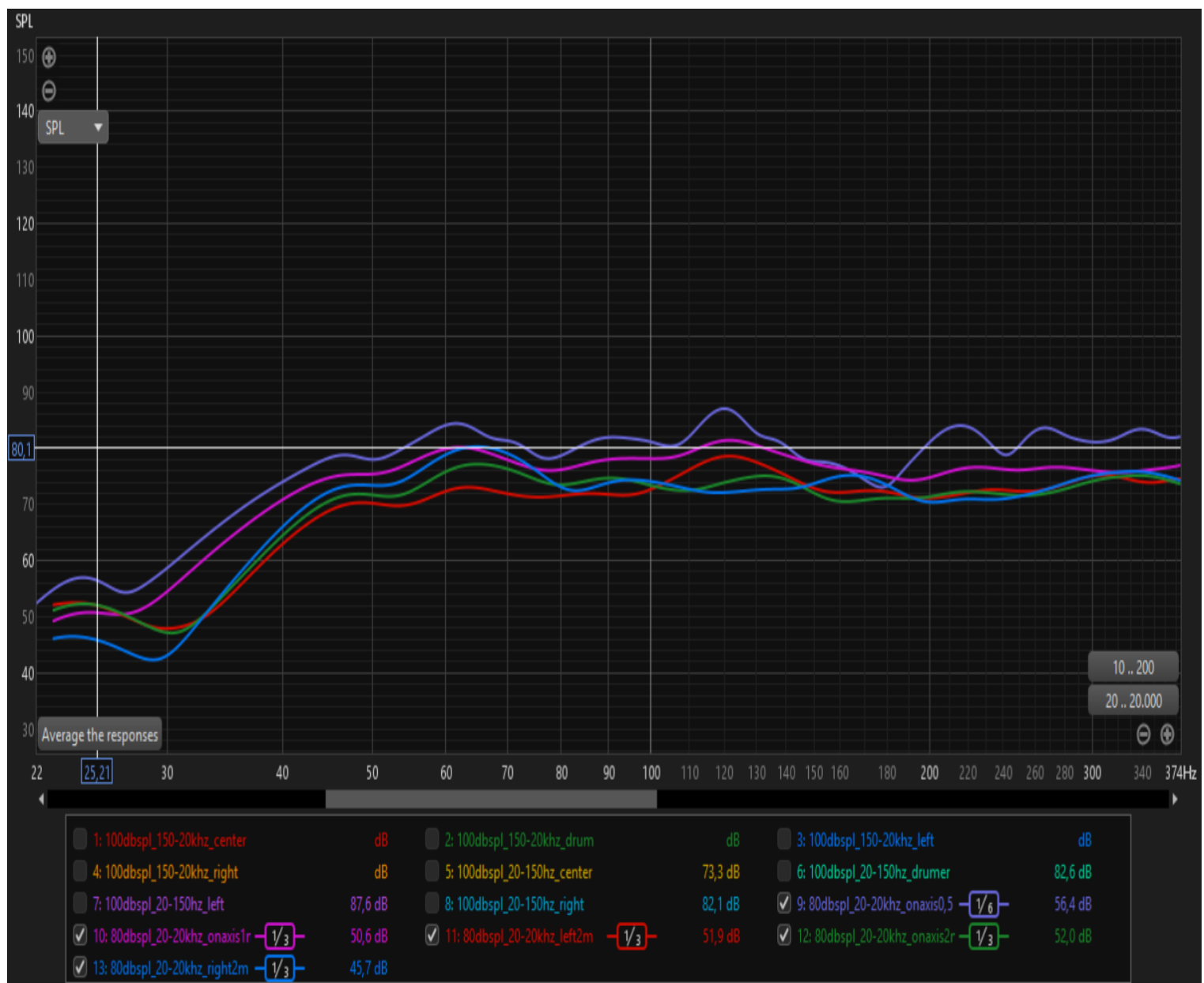
Σε όλες τις θέσεις εμφανίζεται η καμπύλη αποκοπής του ηχείου κάτω από τα 50 Hz.

Πίνακας 4.15 Οι μετρήσεις για κάθε θέση του 2^{ου} σεναρίου χρησιμοποιώντας τυποποιημένες ζώνες συχνοτήτων κατά το πρότυπο ISO 266

Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Θέση 1(SPL)	55	82	88	80	80	78	80	80	82	80
Θέση 2(SPL)	52	80	80	76	79	77	77	77	79	76
Θέση 3(SPL)	49	78	73	72	70	70	70	70	71	70
Θέση 4(SPL)	49	70	78	70	70	70	70	70	72	68
Θέση 5	42	80	70	70	70	70	70	70	72	68

5(SPL)										
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Όπως παρατηρούμε και από τον πίνακα 4.15, σε όλες τις θέσεις παρουσιάζεται ιδιαίτερα ισορροπημένη απόκριση από τα 250 Hz και πάνω. Μόνο κάτω από τα 250 Hz εμφανίζεται μια σχετική αύξηση σε όλες τις θέσεις, εκτός από τη θέση 2 που παρουσιάζει την πιο ισορροπημένη εικόνα από όλες σε όλο το φάσμα.



Εικόνα 4.47 Η συχνοτική απόκριση του δωματίου στο φάσμα από τα 20 έως τα 300 Hz

Στην εικόνα 4.47 παρατηρούμε τα εξής:

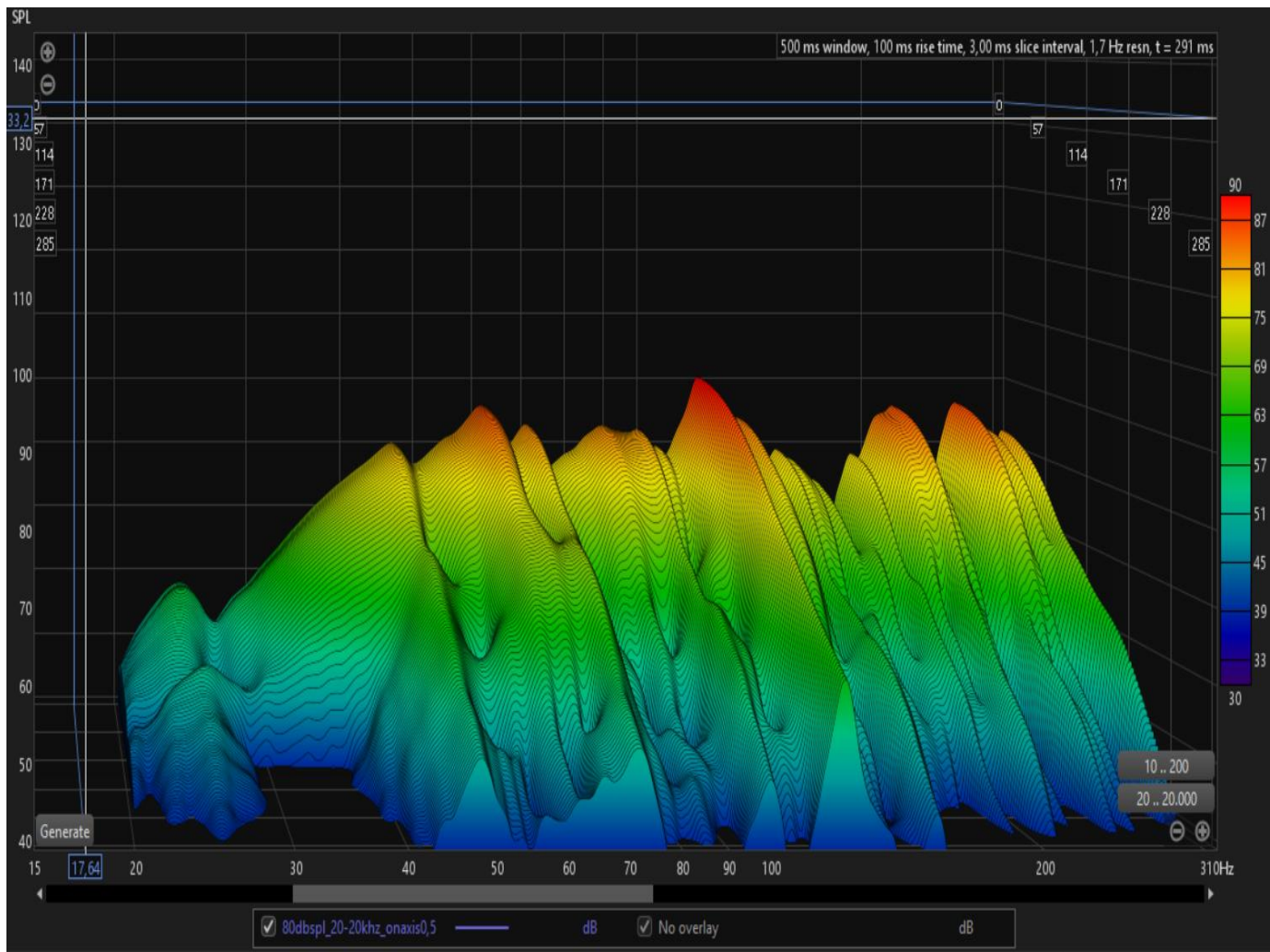
- Η μωβ καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 1 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 0,5 μέτρων.
- Η ροζ καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 2 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 1 μέτρου.
- Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 3 μπροστά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.
- Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 4 αριστερά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.
- Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στη μέτρηση 5 δεξιά από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων.

Σε όλες τις θέσεις εμφανίζεται η καμπύλη αποκοπής του ηχείου κάτω από τα 50 Hz. Επίσης, όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν πολύ ισορροπημένη εικόνα, εκτός από τη θέση 1, όπου εμφανίζεται ένα βύθισμα στα 180 Hz της τάξεως των 8 dB και μια κορύφωση στα 120 Hz της τάξεως πάλι των 8 dB. Όλες οι άλλες θέσεις παρουσιάζουν μια σχετικά ισορροπημένη απόκριση ± 5 dB σε όλο το φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων.

Πίνακας 4.16 Οι μετρήσεις για κάθε θέση από το 2^ο σενάριο για το φάσμα από 40 έως 300 Hz

Hz	40	60	80	100	150	200	250	300
Θέση 1(SPL)	72	83	79	80	80	80	80	80
Θέση 2(SPL)	70	80	77	78	77	75	76	76
Θέση 3(SPL)	65	74	72	70	70	70	70	72
Θέση 4(SPL)	63	70	70	70	72	70	70	72
Θέση 5(SPL)	65	79	70	70	70	70	70	72

Όλες οι θέσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα ισορροπημένη εικόνα σε όλο το επιλεγμένο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων, εκτός από τη θέση 5, όπου τονίζονται κατά 9 dB τα 60 Hz.



Εικόνα 4.48 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 1

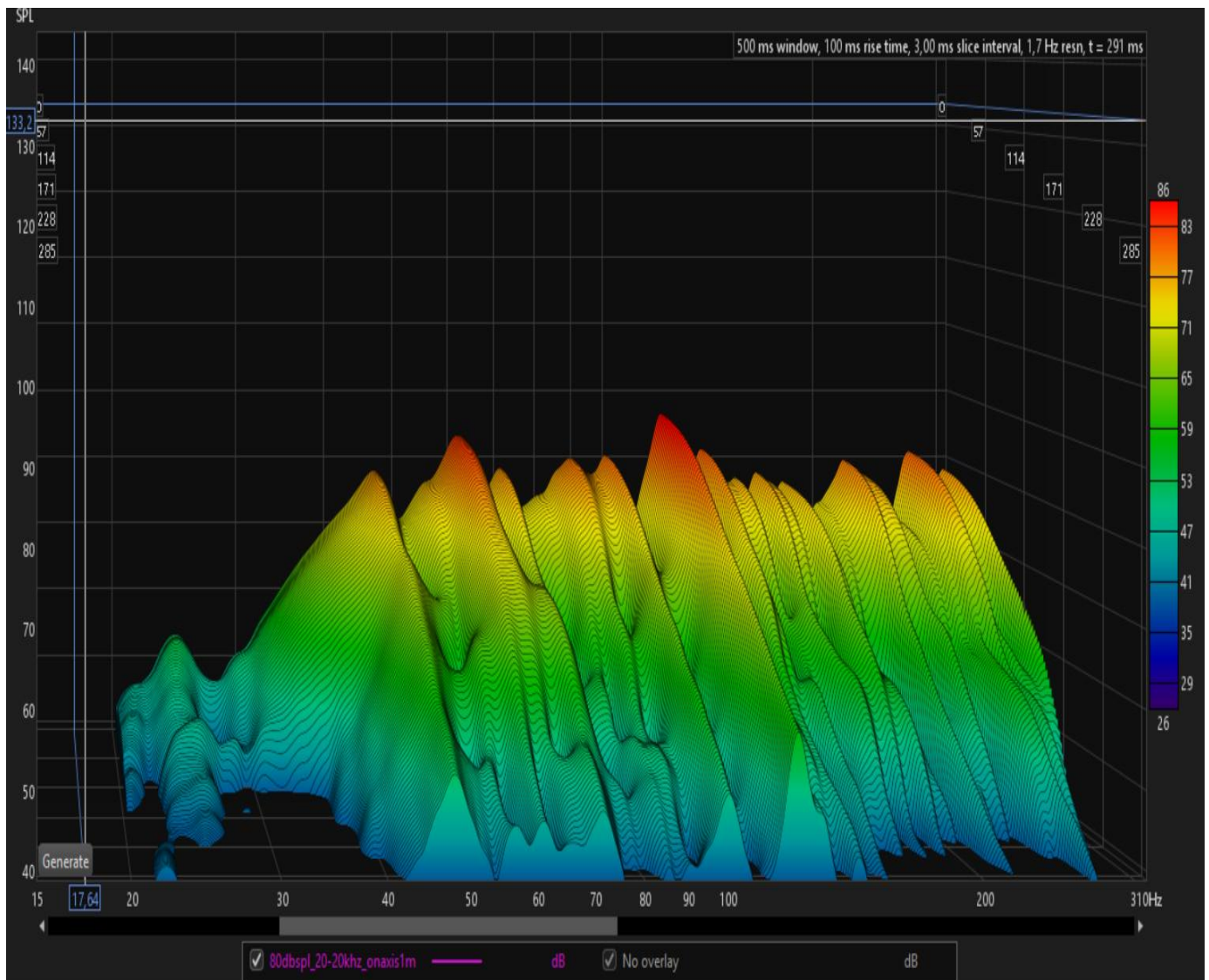
Στην εικόνα 4.48 παρατηρούμε πως ο χρόνος απόσβεσης είναι μεγαλύτερος γενικά από τα 40 έως τα 150 Hz σε σχέση με το φάσμα από τα 150 μέχρι 300 Hz. Πιο αναλυτικά, η μεγαλύτερη διάρκεια απόσβεσης εμφανίζεται στα 120 Hz και η συντομότερη στα 180 Hz. Το ίδιο εμφανίζεται αντίστοιχα και στις ανώτερες στάθμες, όπου υπάρχει μια αύξηση στα 120 Hz και ένα βύθισμα στα 180 Hz. Τέλος, η πληροφορία κάτω από τα 40 Hz θεωρείται ανύπαρκτη, γιατί παρουσιάζεται αρκετά χαμηλότερα σε στάθμη.

Πίνακας 4.17 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 1

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	114	45
60	<285	45

80	285	40
100	<285	40
150	285	40
200	285	33
250	280	33
300	280	33

Παρατηρούμε πως σε όλες τις συχνότητες ο χρόνος απόσβεσης είναι περίπου στα 280 ms, αλλά εμφανίζεται 40 dB κάτω από τη μέση στάθμη κορυφών που είναι στα 85 dB SPL.



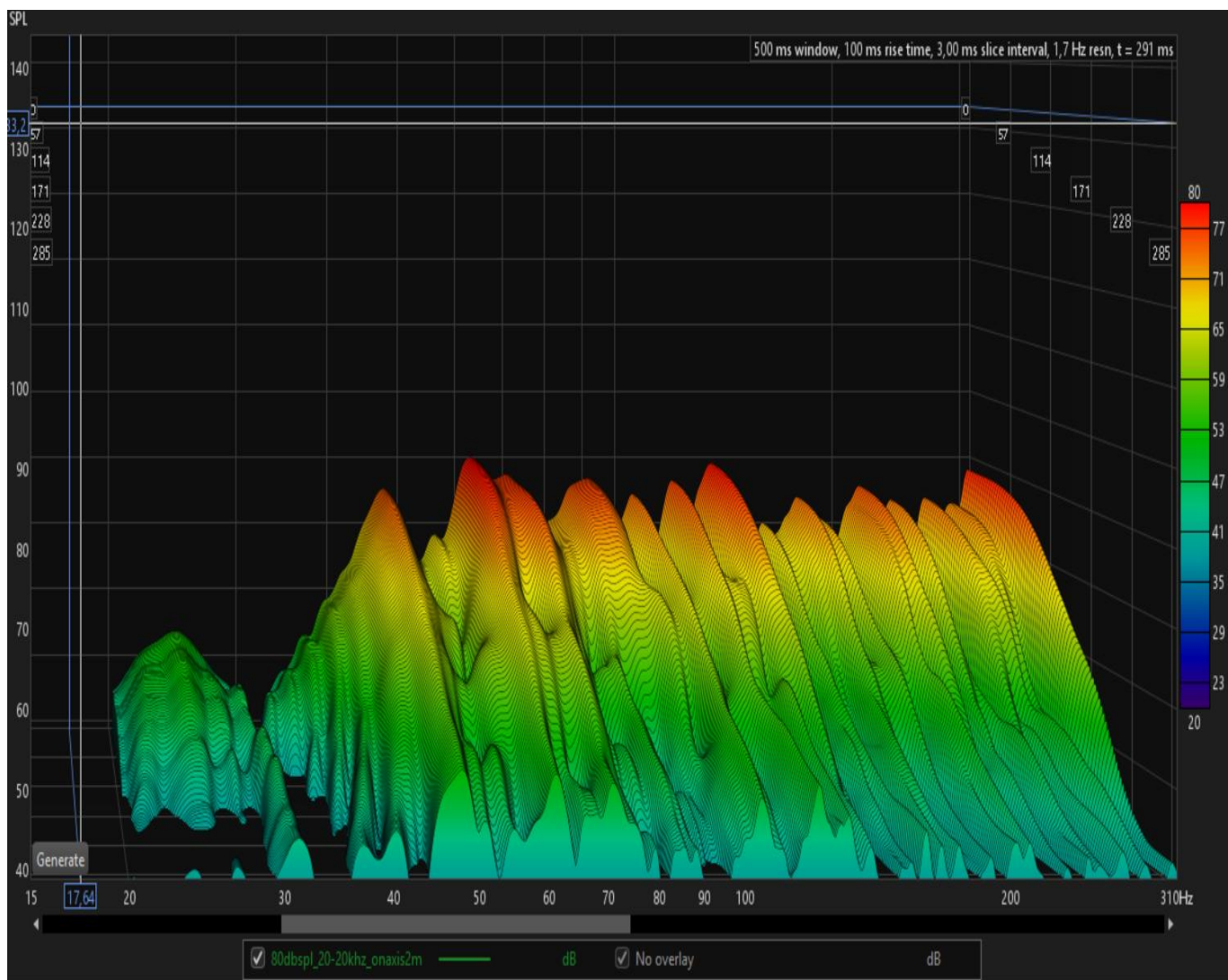
Εικόνα 4.49 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 2

Όπως και στη θέση 1, έτσι και στη θέση 2 ο χρόνος απόσβεσης είναι μεγαλύτερος γενικά από τα 40 έως τα 150 Hz σε σχέση με το φάσμα από τα 150 μέχρι 300 Hz. Και εδώ, ο μεγαλύτερος χρόνος απόσβεσης εμφανίζεται στα 120 Hz και ο συντομότερος στο στενό φάσμα από 160 έως 200 Hz. Οι συνολικές στάθμες είναι ισορροπημένες, εκτός από δύο σχετικά μικρές κορυφώσεις στα 60 και τα 120 Hz.

Πίνακας 4.18 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 2

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	228	40
60	<285	40
80	285	40
100	<285	40
150	285	40
200	228	40
250	228	40
300	285	40

Στον πίνακα 4.18 παρατηρούμε πως σε όλες τις συχνότητες ο χρόνος απόσβεσης είναι περίπου στα 280 ms, αλλά εμφανίζεται 40 dB κάτω από τη μέση στάθμη κορυφών που είναι στα 80 dBSPL.



Εικόνα 4.50 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 3

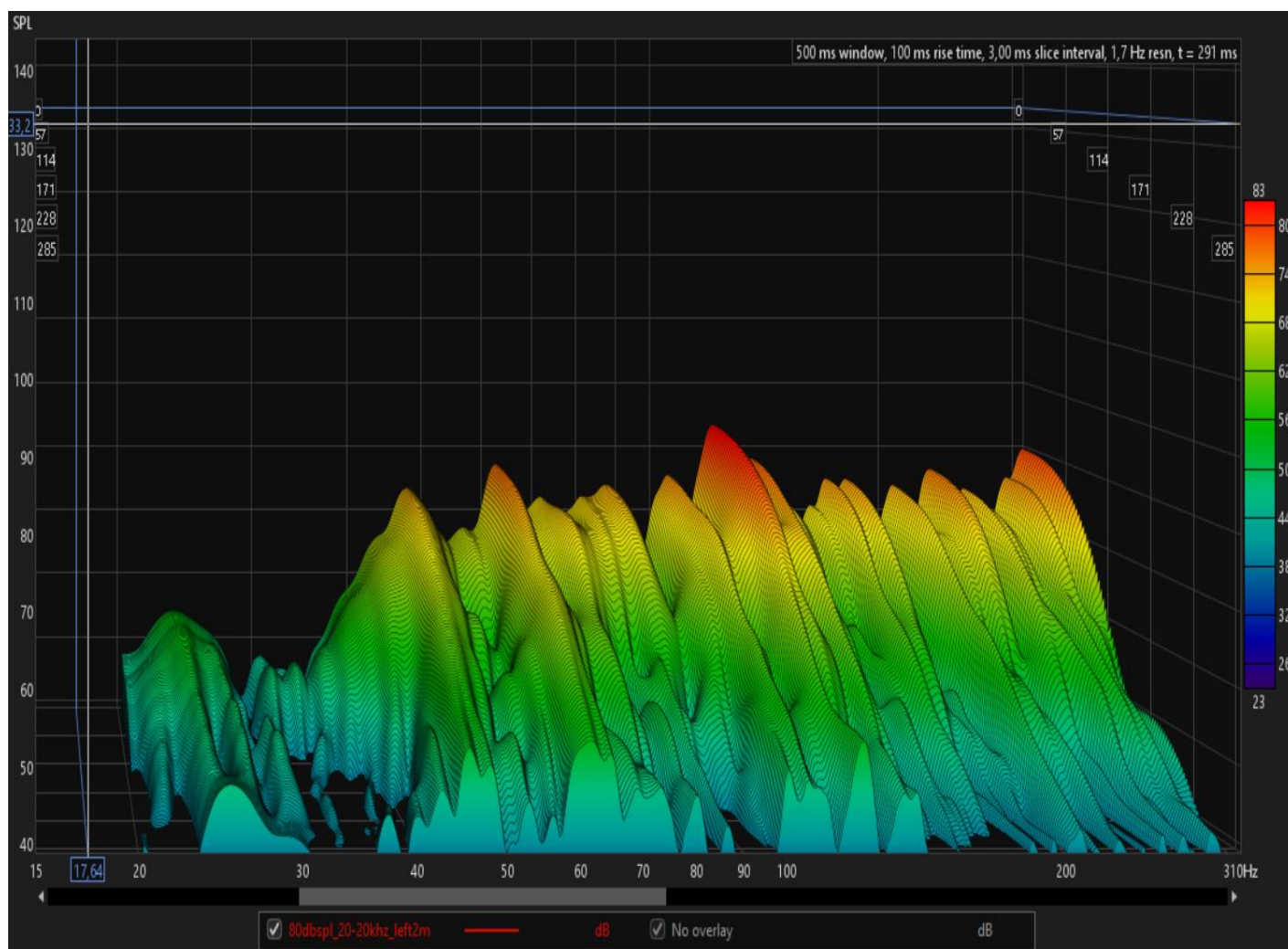
Στη θέση 3 που είναι σε απόσταση 2 μέτρων από το ηχείο παρατηρούμε μια ισορροπημένη εικόνα όσον αφορά τις στάθμες των αρμονικών, με τον χρόνο απόσβεσης να μειώνεται ομαλά όσο αυξάνεται η συχνότητα. Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος απόσβεσης είναι αρκετά πιο σύντομος σε σχέση με τις άλλες δύο θέσεις.

Πίνακας 4.19 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 3

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dB SPL)
40	<285	45
60	<285	47
80	285	47

100	<285	47
150	<285	47
200	285	47
250	285	47
300	285	47

Στον πίνακα 4.19 βλέπουμε πως ο χρόνος απόσβεσης είναι ομοιόμορφος για όλες τις συχνότητες και εμφανίζεται γύρω στα 33 dB χαμηλότερα από τη μέση στάθμη των κορυφών, που είναι στα 80 dB SPL.



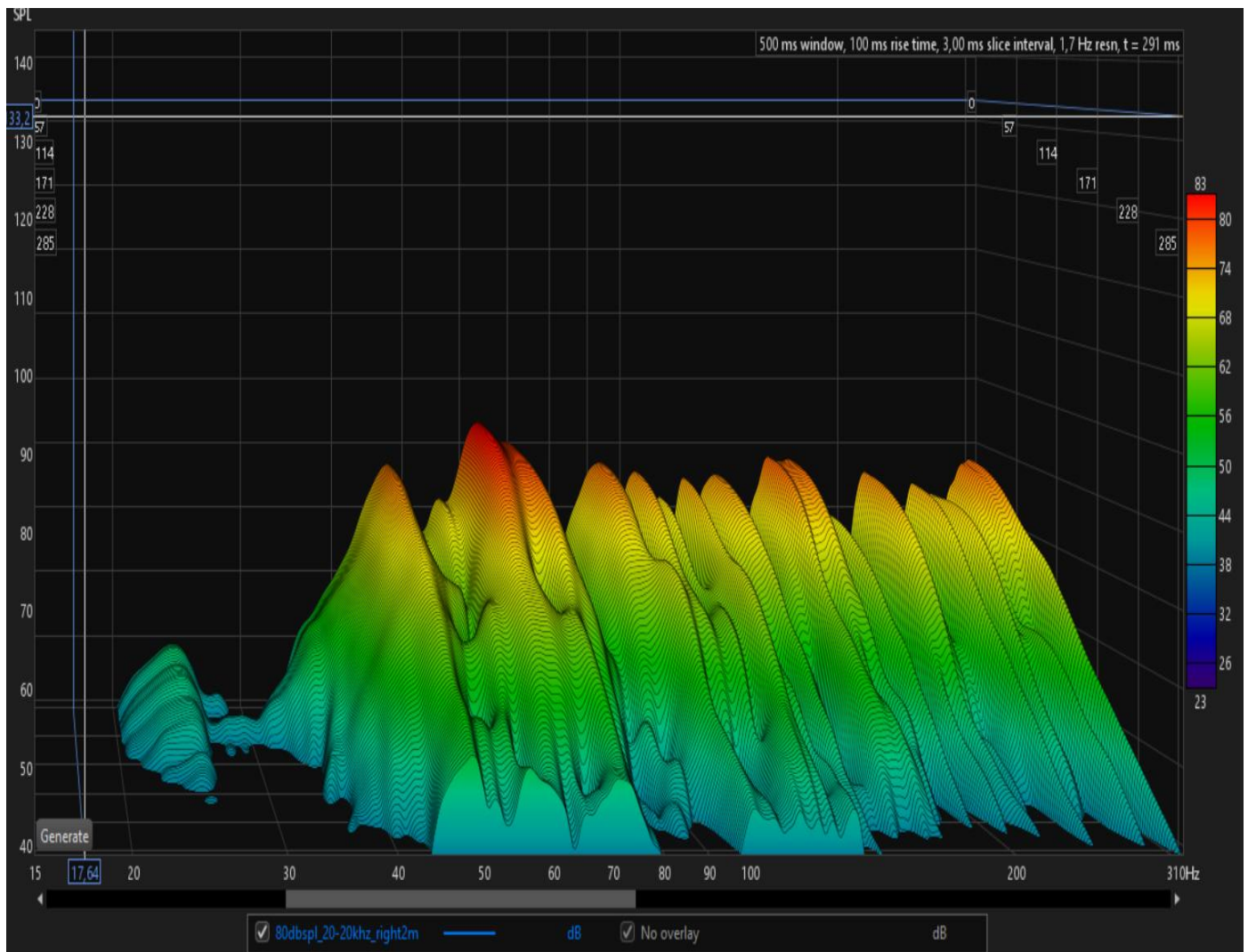
Εικόνα 4.51 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 4

Στην εικόνα 4.51 παρατηρούμε ότι όσον αφορά τις στάθμες εμφανίζεται μια κορύφωση στα 120 Hz, ενώ το άλλο φάσμα παραμένει σχετικά ισορροπημένο. Ο χρόνος απόσβεσης είναι αρκετά ανομοιόμορφος, παρουσιάζοντας μεγάλη διάρκεια από τα 40 έως 80 Hz, συντομότερη διάρκεια στα 90 με 100 Hz, αύξηση από τα 100 μέχρι και τα 150 Hz, μείωση από τα 150 έως τα 200 Hz, και τέλος μια ομοιόμορφη αύξηση από τα 200 έως και τα 300 Hz.

Πίνακας 4.20 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 4

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	<285	40
60	<285	50
80	<285	45
100	<285	47
150	285	40
200	285	40
250	285	40
300	285	40

Στον πίνακα 4.20 παρατηρούμε μια σχετική μείωση στον χρόνο απόσβεσης μετά τα 150 Hz έως και τα 300 Hz. Στο φάσμα κάτω από τα 150 Hz ο χρόνος απόσβεσης είναι σχετικά ισορροπημένος.



Εικόνα 4.52 Το φάσμα από 20 έως 300 Hz τύπου καταρράκτη για τη θέση 5

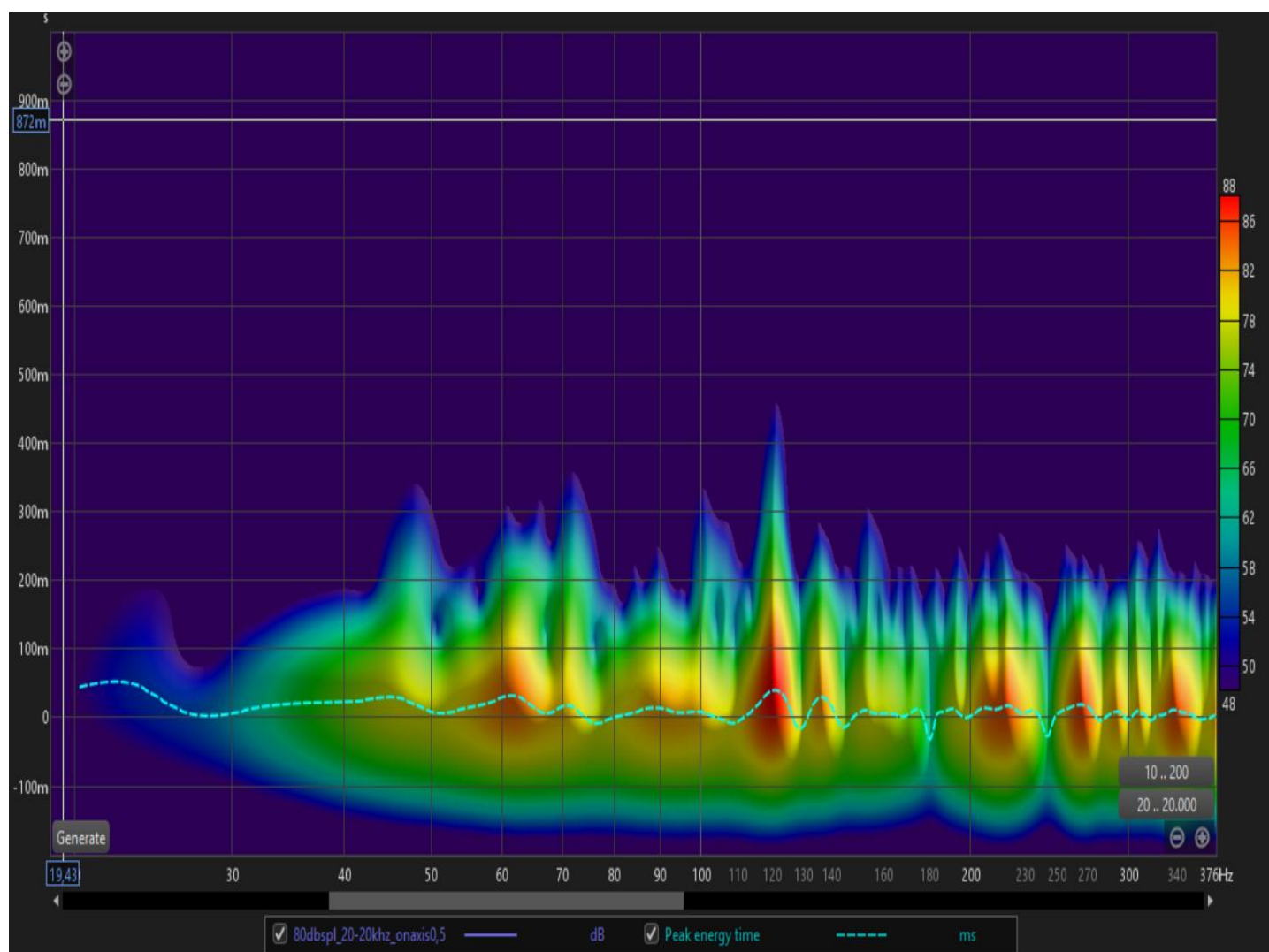
Στην εικόνα 4.52 βλέπουμε πως όσον αφορά τις στάθμες το φάσμα εμφανίζεται αρκετά ισορροπημένο. Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος απόσβεσης μειώνεται ομαλά όσο αυξάνεται η συχνότητα, με εξαίρεση το στενό φάσμα των 90 Hz, όπου παρουσιάζεται μια σημαντική μείωση στον χρόνο απόσβεσης.

Πίνακας 4.21 Ο χρόνος απόσβεσης σε ms από τα 40 έως τα 300 Hz για τη θέση 5

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος (ms)	Στάθμη (dBSPL)
40	228	40
60	<285	50
80	<285	50
100	<285	50

150	285	50
200	228	40
250	285	40
300	285	40

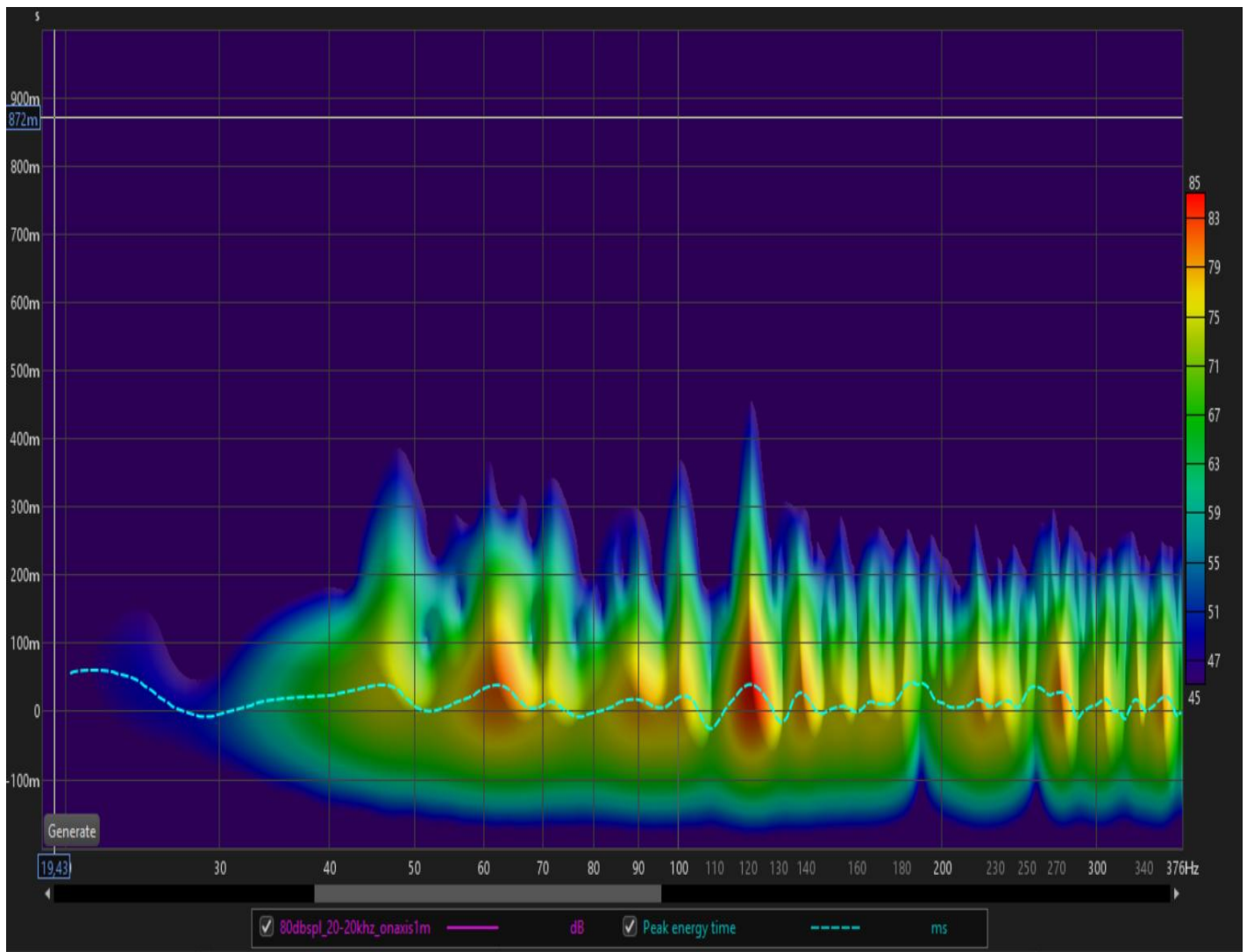
Στον πίνακα 4.21 παρατηρούμε πως σε αυτήν τη θέση ο χρόνος απόσβεσης είναι λίγο πιο σύντομος σε σχέση με τις άλλες θέσεις, αλλά ταυτόχρονα ομαλός με μέση τιμή τα 250 ms.



Εικόνα 4.53 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 1

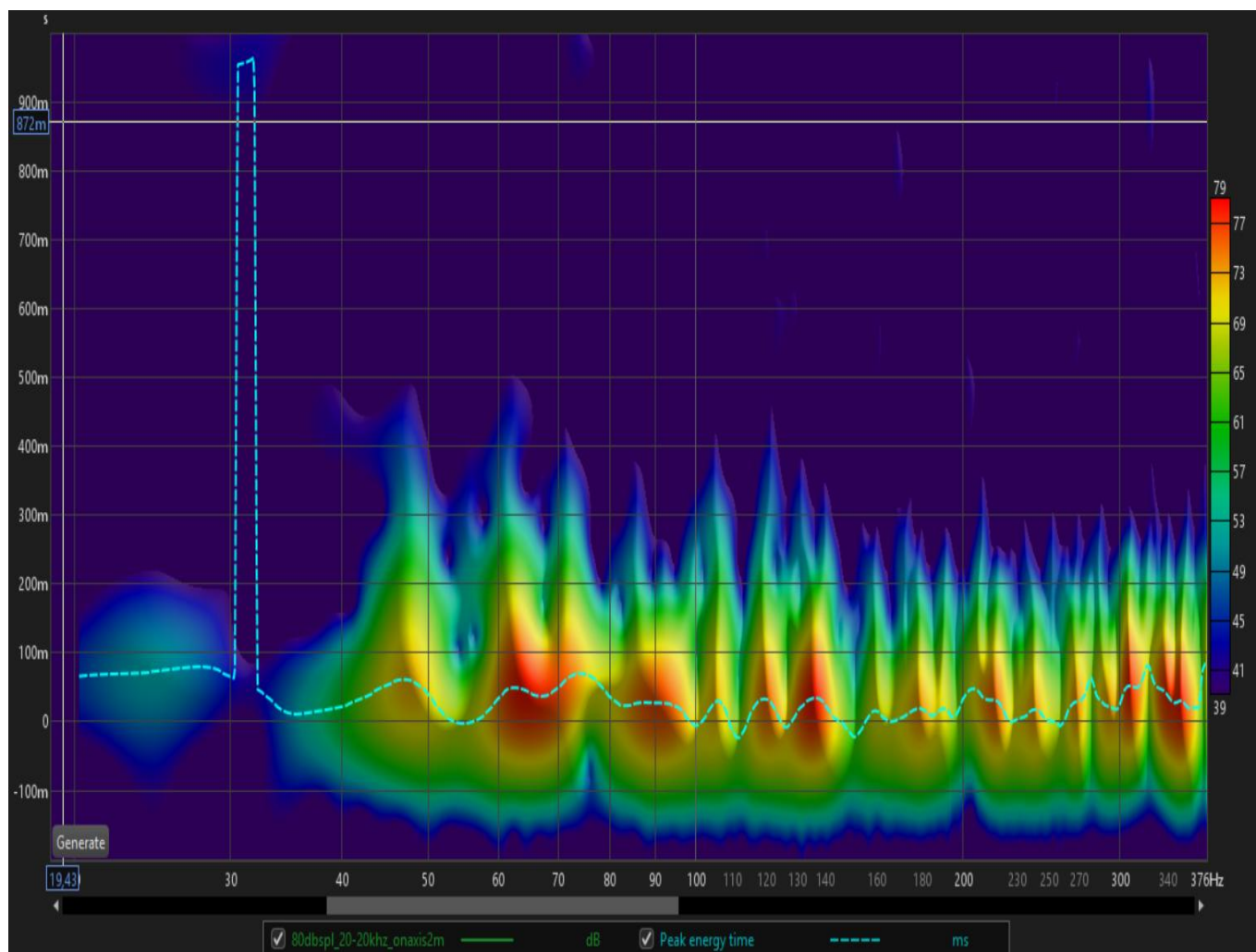
Στην εικόνα 4.53 παρατηρούμε ένα σημαντικό βύθισμα στα 180 Hz και στα 250 Hz και ταυτόχρονα μια κορύφωση στα 120 Hz. Η διάρκεια απόσβεσης είναι πολύ ισορροπημένη από τα 80 έως τα 300 Hz, με εξαίρεση τα 120 Hz όπου αυξάνεται σημαντικά. Όσον αφορά

το φάσμα από τα 80 Hz και κάτω, ο χρόνος απόσβεσης είναι μεν ισορροπημένος αλλά πιο υψηλός από το υπόλοιπο φάσμα.



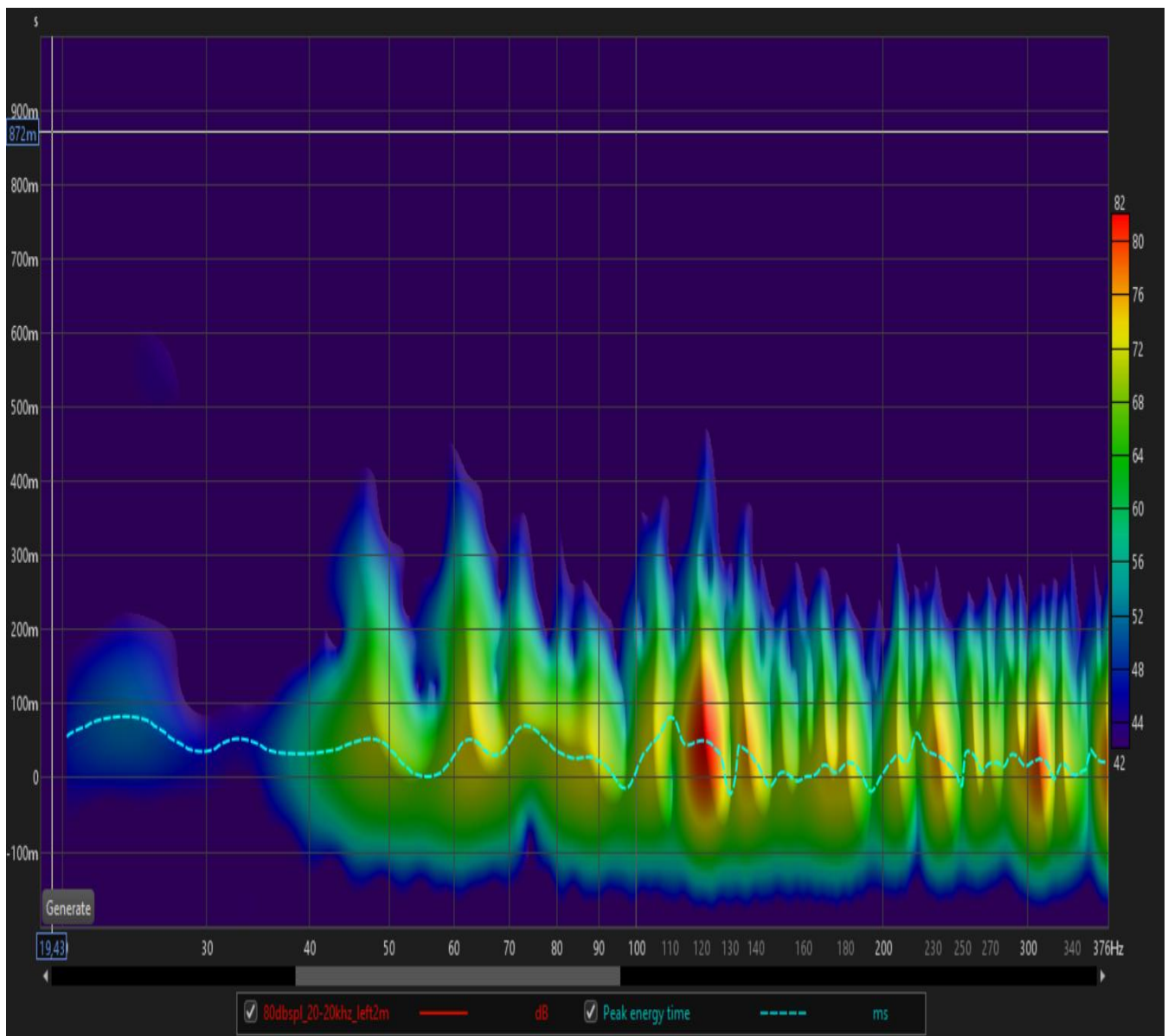
Εικόνα 4.54 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 2

Στη θέση 2 παρατηρείται αρκετά ισορροπημένη απόκριση τόσο στις στάθμες όσο και στον χρόνο απόσβεσης. Η μόνη εξαίρεση είναι η αύξηση στάθμης στα 120 Hz και το βύθισμα στη στάθμη στα 110 Hz.



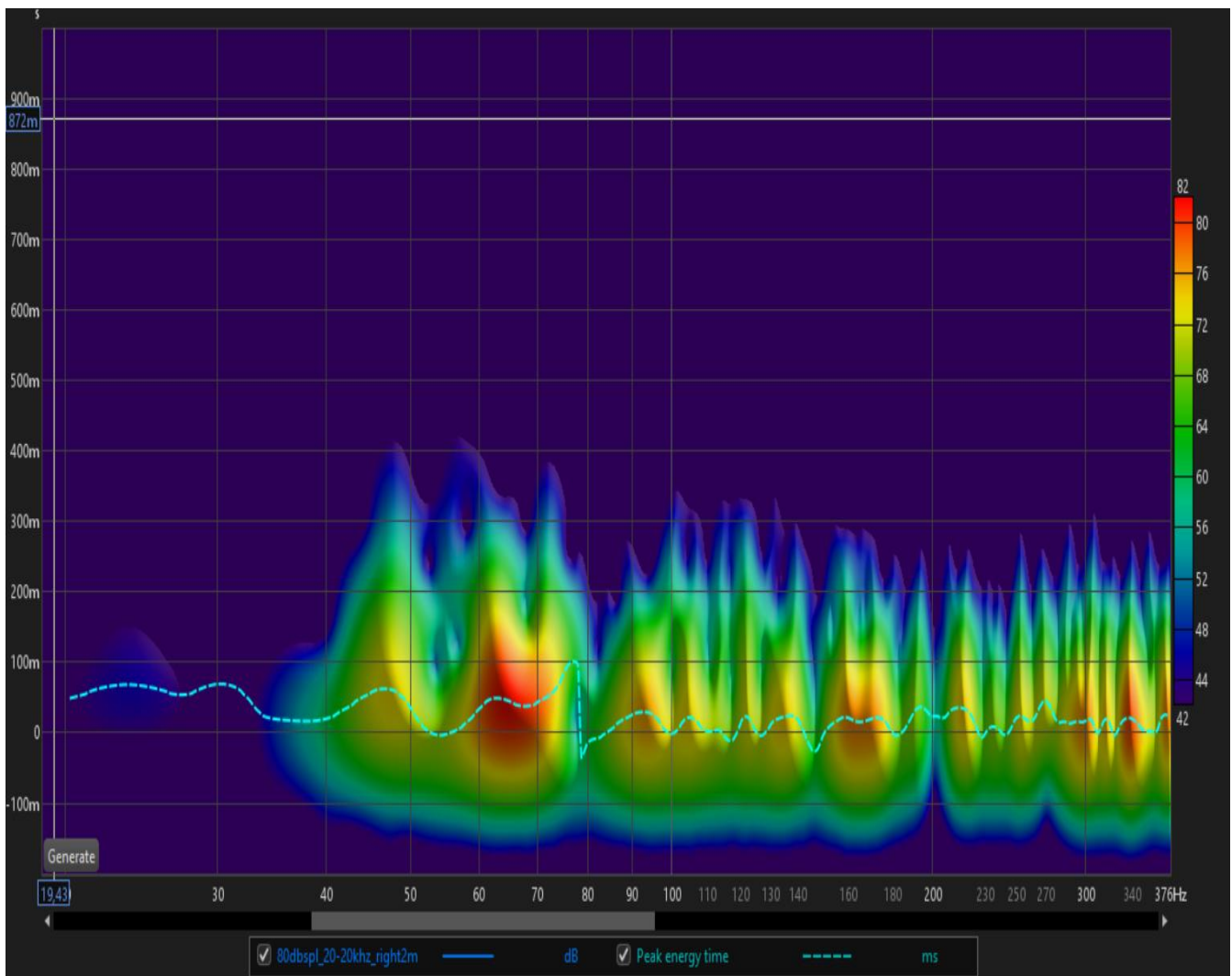
Εικόνα 4.55 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 3

Στη θέση 3 εμφανίζεται η πιο ισορροπημένη απόκριση όσον αφορά το χρόνο απόσβεσης, παρουσιάζοντας μια σχετικά ομαλή μείωση όσο αυξάνεται η συχνότητα. Όσον αφορά τις στάθμες, παρουσιάζεται ένα σχετικό βύθισμα στο φάσμα από τα 150 έως τα 280 Hz, μια αύξηση από τα 60 έως τα 150 Hz και ένα βύθισμα στα 50 Hz.



Εικόνα 4.56 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 4

Στην εικόνα 4.56 βλέπουμε πως όσον αφορά το φάσμα από 80 έως 300 Hz ο χρόνος απόσβεσης είναι πολύ ισορροπημένος, με μόνη εξαίρεση τα 120 Hz όπου αυξάνεται σημαντικά. Αντίστοιχα εμφανίζεται μια μικρή αύξηση στον χρόνο απόσβεσης στα 60 και 50 Hz. Τέλος, όσον αφορά τις στάθμες είναι ισορροπημένες στο μεγαλύτερο φάσμα, με εμφάνιση, όμως, δύο κορυφώσεων στα 120 και στα 300 Hz αντίστοιχα.



Εικόνα 4.57 Φασματογράφημα της συχνотικής περιοχής από 20 έως 300 Hz για τη θέση 5

Στη θέση 5 παρατηρείται ένα σημαντικό βύθισμα στα 80 Hz και μια σημαντική αύξηση στα 65 Hz. Στο υπόλοιπο φάσμα οι στάθμες είναι αρκετά ισορροπημένες. Όσον αφορά τον χρόνο απόσβεσης, είναι πάρα πολύ ομαλός σε όλο το φάσμα, εκτός από τη στενή περιοχή των 80 Hz που παρουσιάζει μια μικρή αύξηση από τα 80 Hz και κάτω.



Εικόνα 4.58 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 1

Στην εικόνα 4.58 παρατηρούμε πως ο χρόνος αντήχησης είναι πάρα πολύ ομαλός από τα 200 Hz και πάνω, με διάρκεια γύρω στα 380 ms. Από τα 200 Hz και κάτω, όμως, υπάρχει μια σημαντική αύξηση που φτάνει μέχρι και τα 550 ms, με μια απότομη μείωση στη στενή περιοχή των 62 Hz. Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης είναι πολύ ισορροπημένος, αλλά αρκετά σύντομος από τα 800 Hz και πάνω, με διάρκεια σχεδόν 20 ms. Από τα 800 Hz και κάτω αυξάνεται σημαντικά, με μια απότομη αύξηση στα 120 Hz και 60 Hz, όπου ξεπερνάει τα 600 ms.

Πίνακας 4.22 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8.000 Hz για τη θέση 1

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	350	500	310	380	380	360	360	310



Εικόνα 4.59 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2

Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 2 κυμαίνεται γύρω στα 400 ms, με μια σταδιακή αύξηση όσο χαμηλώνει η συχνότητα. Εκεί που παρουσιάζεται μια ανομοιομορφία είναι στα 80 Hz, όπου φτάνει τα 550 ms, ενώ στα 60 Hz πέφτει στα 380 ms και έπειτα στα 50 Hz αυξάνεται και πάλι στα 550 ms. Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης για το φάσμα από τα 2 KHz και πάνω είναι πολύ ισορροπημένος, αλλά ταυτόχρονα και πολύ μικρός σε διάρκεια (γύρω στα 20 ms). Έπειτα ακολουθεί μια απότομη κορύφωση στα 800 Hz όπου φτάνει τα 500 ms, μια μεγαλύτερη στα 120 Hz όπου ξεπερνάει τα 600 ms και τέλος, μια ακόμα μεγαλύτερη στα 50 Hz όπου ξεπερνάει τα 900 ms.

Πίνακας 4.23 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8.000 Hz για τη θέση 2

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	300	490	390	410	400	380	350	310

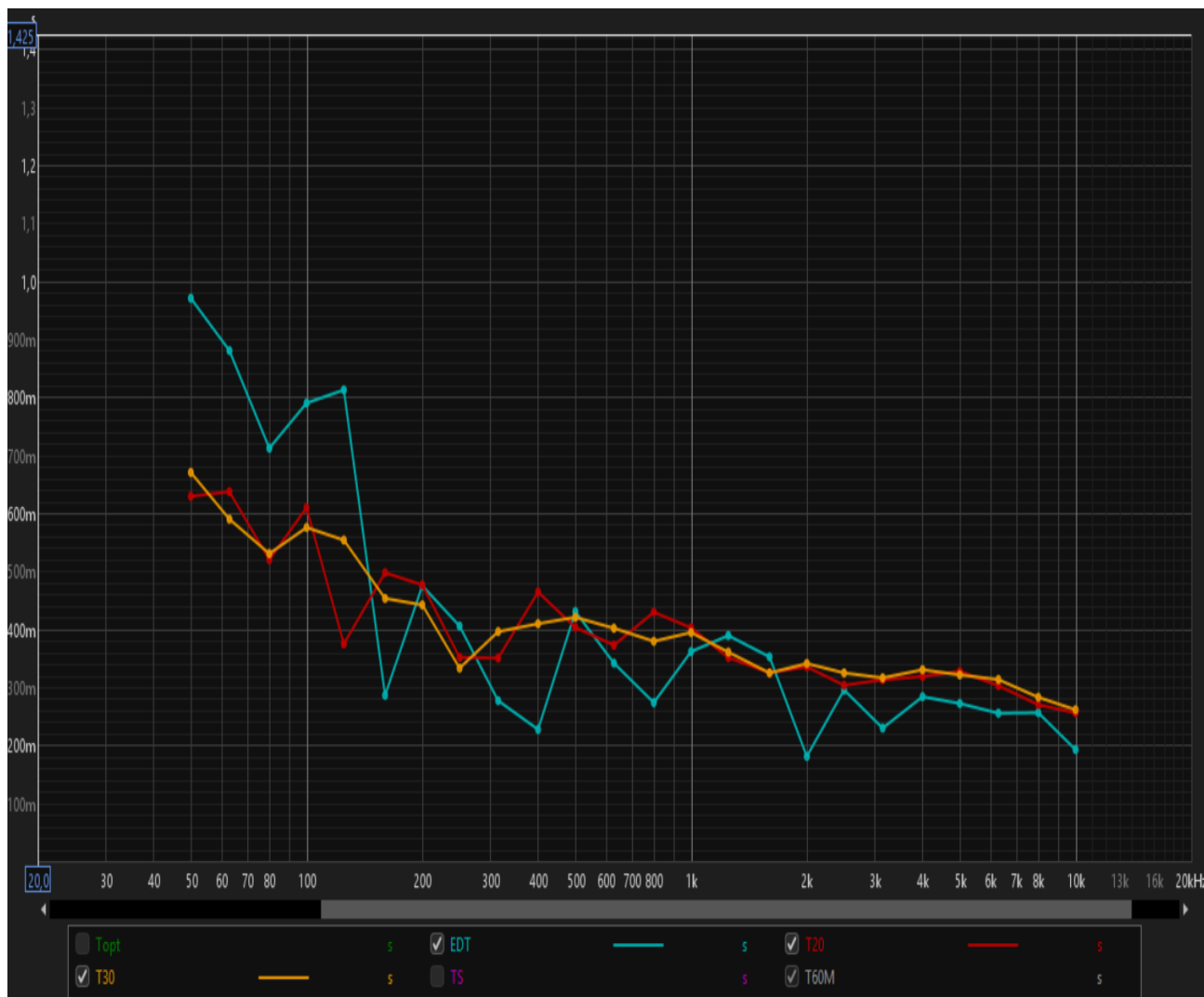


Εικόνα 4.60 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3

Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 3 είναι περίπου 400 ms, παρουσιάζοντας μια εξασθένηση από τα 150 Hz μέχρι και τα 300 Hz. Στη συνέχεια ισορροπεί σχετικά, με τον μέσο χρόνο αντήχησης να είναι περίπου στα 350 ms. Από τα 200 Hz και κάτω αυξάνεται σταδιακά, με ένα μικρό βύθισμα στα 60 Hz και μια αύξηση στα 50 Hz που ξεπερνάει τα 600 ms. Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης ακολουθεί σχετικά ομοιόμορφα τον χρόνο αντήχησης, με κάποια βυθίσματα στα 1500 Hz και 2500 Hz, όπως επίσης και μια σημαντική αύξηση στα 50 Hz όπου ξεπερνάει το 1,1 sec.

Πίνακας 4.24 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 3

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	450	500	390	420	400	380	350	310



Εικόνα 4.61 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4

Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 4 είναι περίπου 400 ms, παρουσιάζοντας, όμως, αρκετές αυξομειώσεις ανά συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τα 50 Hz ο χρόνος αντήχησης φτάνει τα 650 ms, ενώ στα 80 Hz πέφτει στα 550 ms. Στη συνέχεια εξασθενεί σταδιακά μέχρι και τα 250 Hz, όπου ο χρόνος αντήχησης φτάνει στα 350 ms. Από τα 250 Hz και πάνω ισορροπεί αρκετά, με μέσο όρο χρόνου αντήχησης τα 350 ms. Όσον αφορά το χρόνο πρώιμης απόσβεσης, ξεκινώντας από τα 50 Hz έχουμε την υψηλότερη τιμή πλησιάζοντας το 1 sec. Στα 80 Hz μειώνεται αισθητά (720 ms) και από τα 150 Hz μειώνεται απότομα φτάνοντας στα 300 ms. Στη συνέχεια ισορροπεί, με μέσο χρόνο πρώιμης απόσβεσης τα 300 ms ακολουθώντας σχεδόν ομοιόμορφα την καμπύλη του χρόνου αντήχησης.

Πίνακας 4.25 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8000 Hz για τη θέση 4

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	600	580	320	410	400	360	370	300



Εικόνα 4.62 Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 5

Ο χρόνος αντήχησης για τη θέση 5 είναι κατά μέσο όρο γύρω στα 400 ms. Από τα 200 Hz και πάνω παρουσιάζει μια πολύ ισορροπημένη εικόνα, με μέσο όρο χρόνου αντήχησης τα 350 ms, εξασθενώντας σταδιακά όσο αυξάνεται η συχνότητα. Από τα 200 Hz και κάτω αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος αντήχησης, με μέσο όρο τα 450 ms. Όσον αφορά τον χρόνο πρώιμης απόσβεσης, ξεκινώντας από τα 50 Hz παρατηρούμε πως αγγίζει τα 1,2 sec, και στη συνέχεια στα 60 Hz πέφτει στα 820 ms, όπου και σταθεροποιείται μέχρι και τα 80 Hz.

Έπειτα παρουσιάζεται μια σημαντική πτώση στα 100 Hz, όπου φτάνει στα 600 ms, και ακολουθεί μια ακόμη πτώση από τα 120 έως τα 180 Hz, όπου ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης πέφτει πλέον στα 300 ms. Από τα 180 μέχρι και 1.8 KHz σταθεροποιείται στα 350 ms και από τα 1.8 KHz και πάνω σταθεροποιείται στα 200 ms.

Πίνακας 4.26 Ο χρόνος αντήχησης σε ms από τα 63 έως τα 8.000 Hz για τη θέση 5

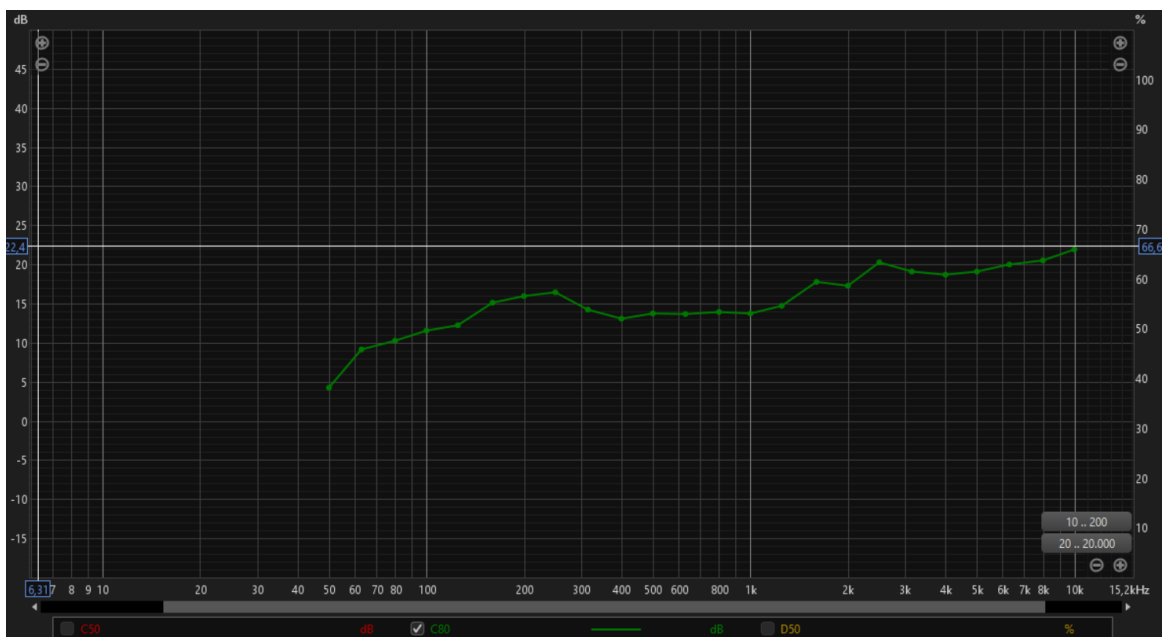
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT30(ms)	400	500	380	400	400	360	360	300



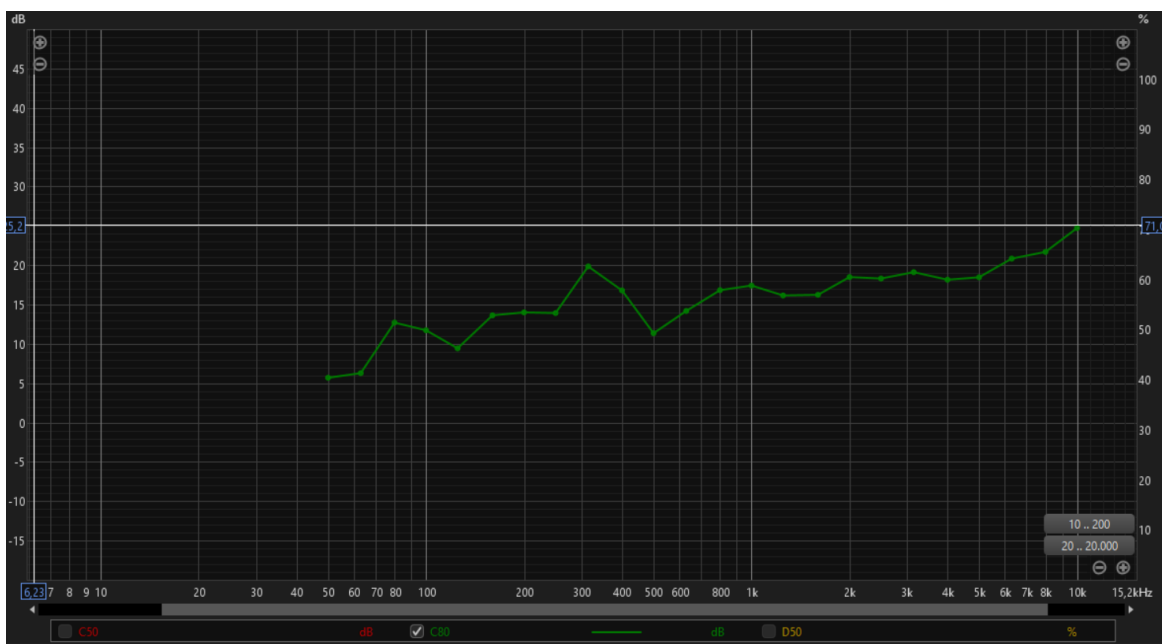
Εικόνα 4.63 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 1



Εικόνα 4.64 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 2



Εικόνα 4.65 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 3



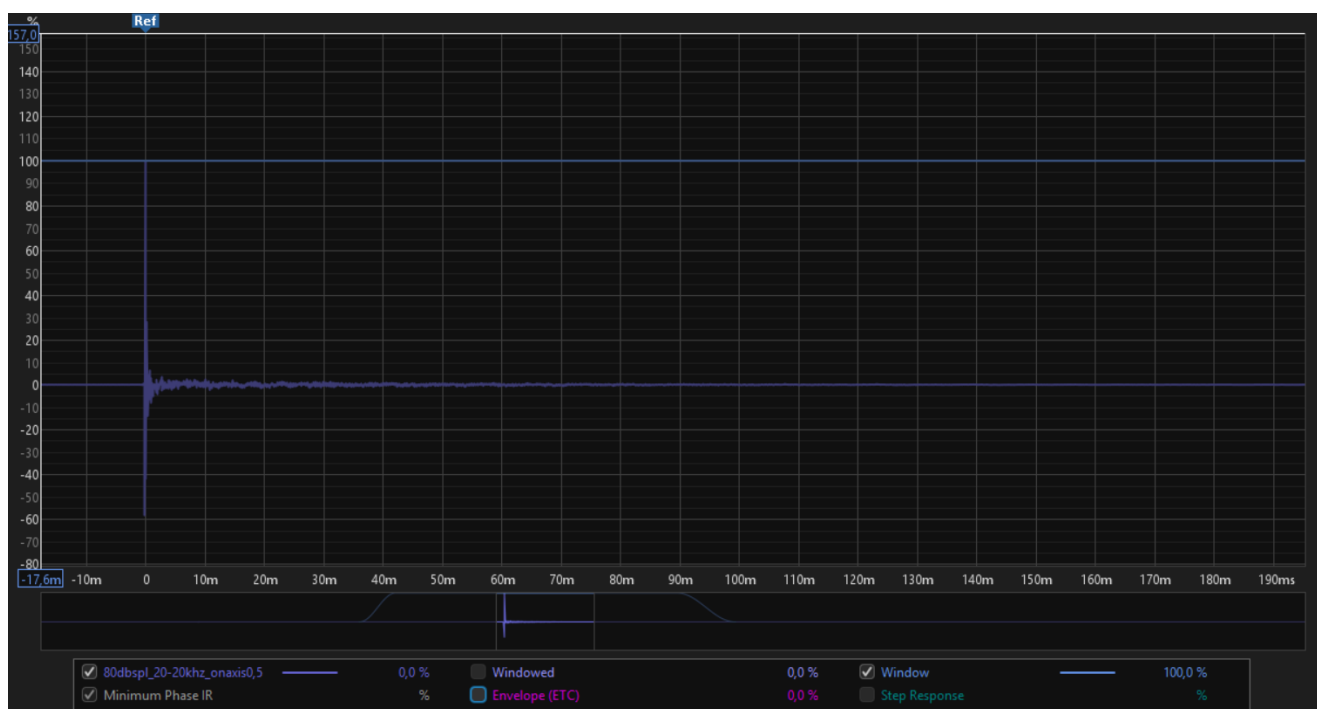
Εικόνα 4.66 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 4



Εικόνα 4.67 Ευκρίνεια C80 για τη θέση 5

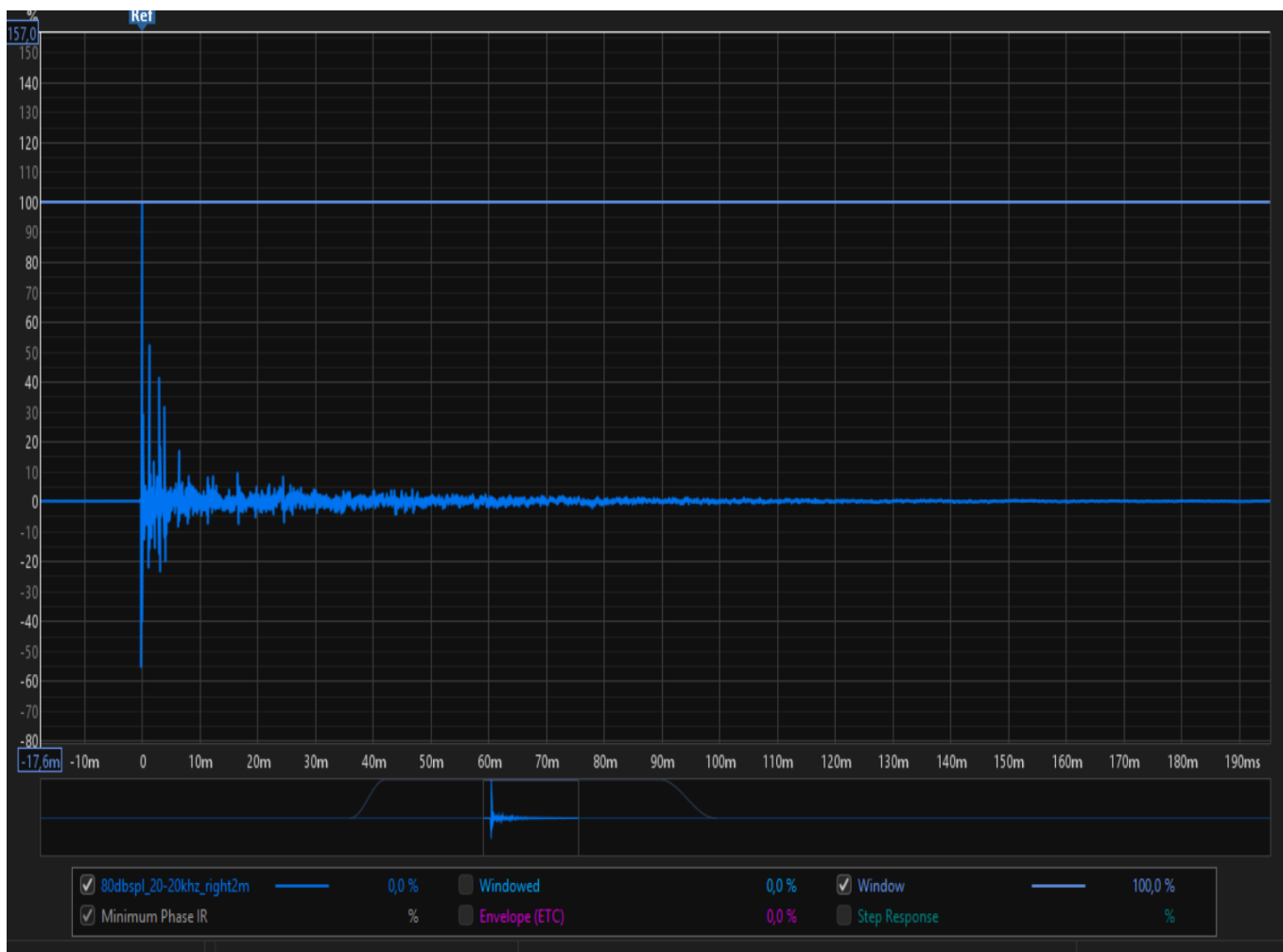
Στις εικόνες 4.63, 4.64, 4.65, 4.66 και 4.67 παρατηρούμε πως σε όλες τις θέσεις το C80 βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα από τη στιγμή που ο χώρος προορίζεται αποκλειστικά για μουσική χρήση. Επίσης, βλέπουμε πως όσο αυξάνεται η συχνότητα αυξάνεται και το C80, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ευκρίνεια είναι υψηλότερη στις μεσαio-υψηλές συχνότητες. Υψηλότερη ευκρίνεια παρουσιάζεται στη θέση 1, που είναι και η

μέτρηση με την κοντινότερη λήψη από την πηγή. Αντίστοιχα, η χαμηλότερη ευκρίνεια παρουσιάζεται στη θέση 3 που βρίσκεται σε απόσταση 2 μέτρων από την πηγή. Αξιοσημείωτο είναι πως παρότι και οι θέσεις 4 και 5 βρίσκονται σε απόσταση δύο μέτρων από την πηγή, παρουσιάζουν υψηλότερη ευκρίνεια σε σχέση με τη θέση 3.



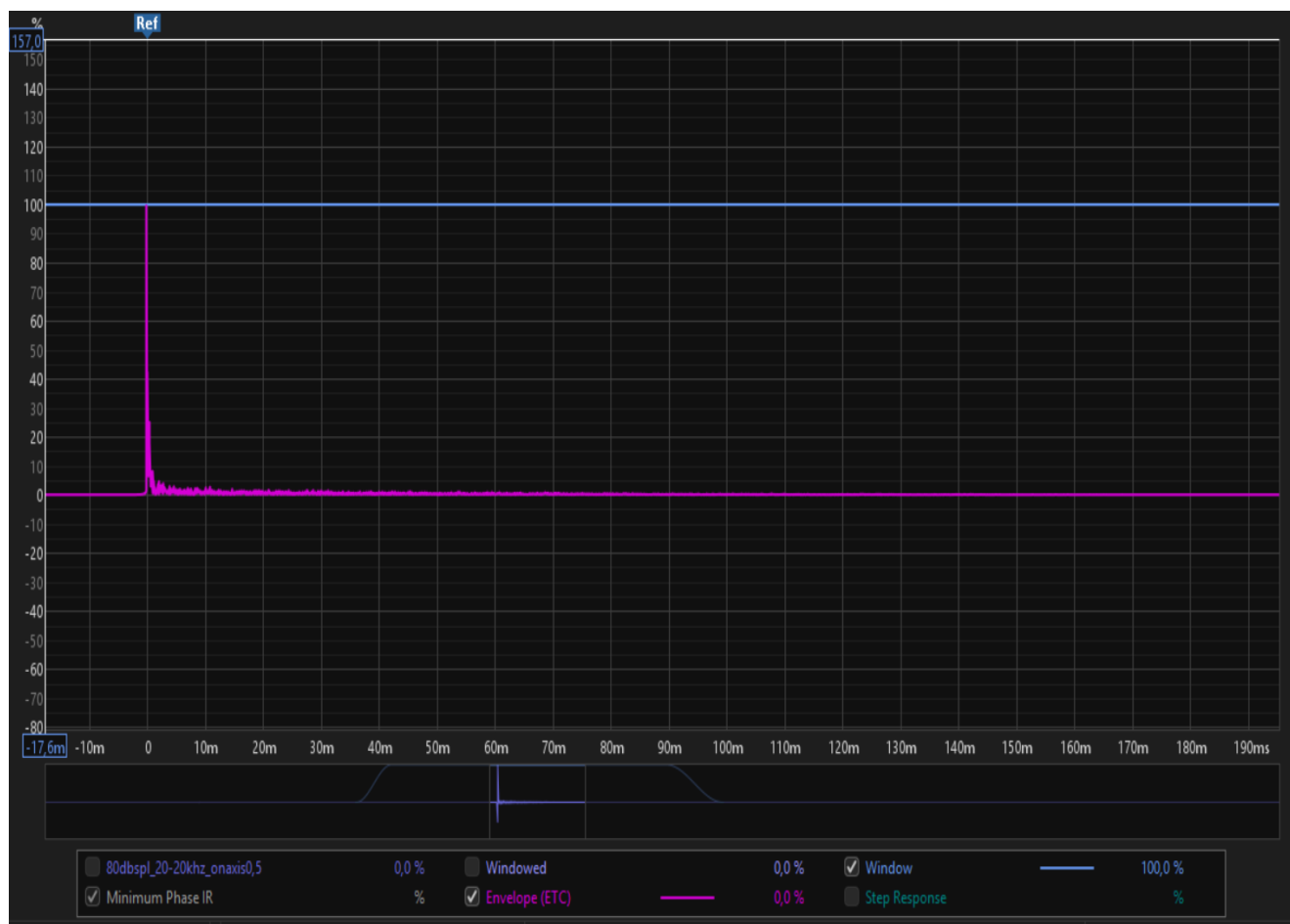
Εικόνα 4.68 Κρουστική απόκριση από τη θέση 1

Στην εικόνα 4.63 παρατηρούμε τα πρώτα 200 ms της κρουστικής απόκρισης από τη θέση 1 σε απόσταση 0,5 μέτρων από το ηχείο. Φαίνεται ξεκάθαρα πόσο καθαρή είναι μέτρηση, καθώς υπερισχύει κατά πολύ ο απευθείας ήχος σε σχέση με τις ανακλάσεις που εμφανίζονται αρκετά χαμηλότερα σε στάθμη.



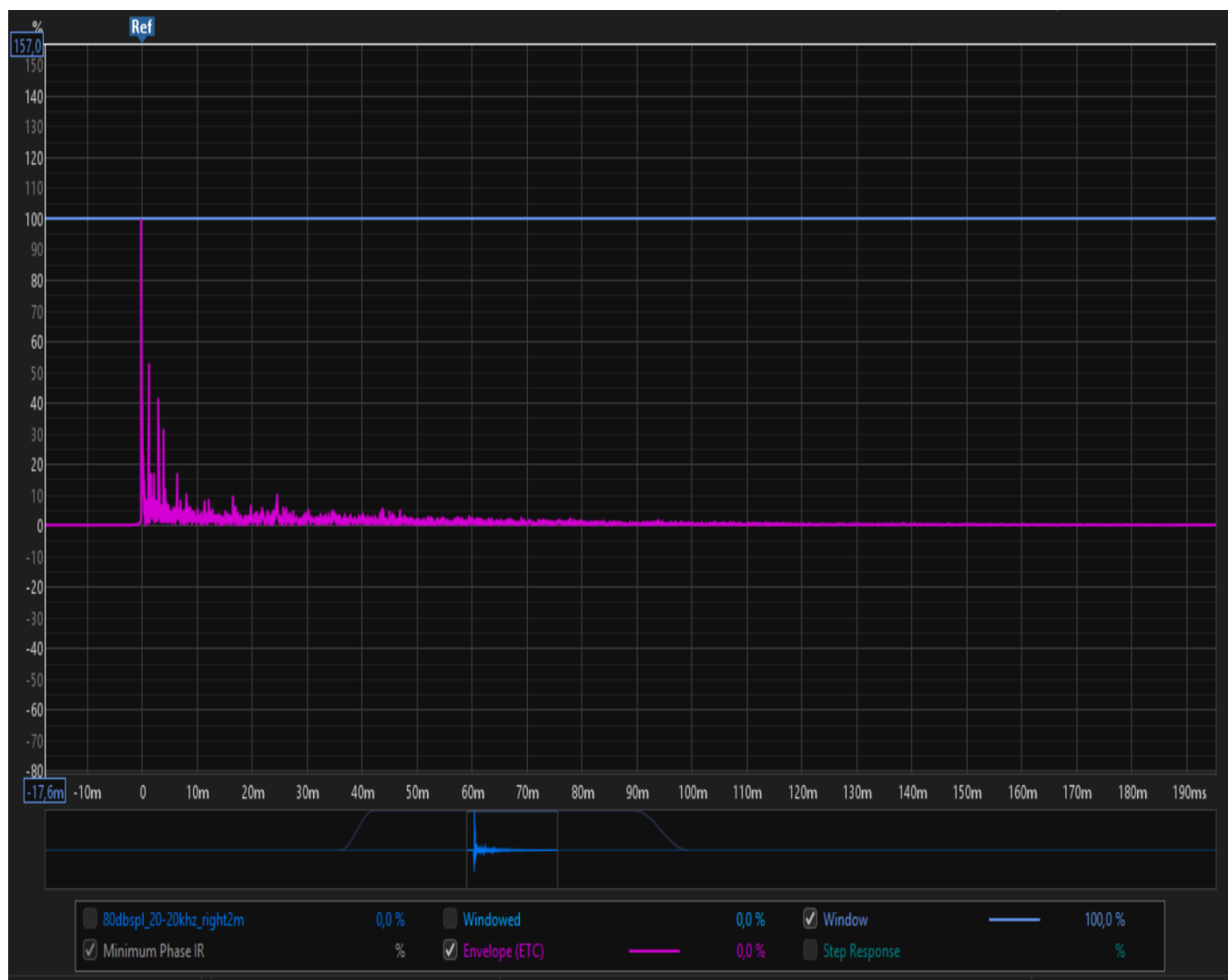
Εικόνα 4.69 Κρουστική απόκριση από τη θέση 5

Επιλέχθηκε να γίνει μέτρηση και της κρουστικής απόκρισης από τη θέση 5, που βρίσκεται δεξιά διαγωνίως από το ηχείο σε απόσταση 2 μέτρων, ώστε να φανεί η διαφορά με την κοντινή μέτρηση. Είναι ξεκάθαρο πόσο πιο έντονα εμφανίζονται οι πρωτογενείς ανακλάσεις που προέρχονται από τους τοίχους, καθώς ξεχωρίζουν τουλάχιστον τρεις στα πρώτα 5 ms. Στη συνέχεια, το υπόλοιπο σύνολο των ανακλάσεων εξασθενεί σταδιακά μέχρι και τα 200 ms.



Εικόνα 4.70 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 1

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.65, οι πρωτογενείς ανακλάσεις εμφανίζονται πάρα πολύ σύντομα, περίπου στα 2 ms, και 80 dB SPL χαμηλότερα από το απευθείας σήμα. Η ουρά αντήχησης ακολουθεί ακόμα πιο χαμηλά σε στάθμη με σταδιακή μείωση μέχρι περίπου και τα 90 ms.



Εικόνα 4.71 Χρονικός προσδιορισμός απευθείας σήματος (ETC) για τη θέση 5

Στην εικόνα 4.66 βλέπουμε πως σε αυτήν τη θέση οι πρωτογενείς ανακλάσεις εμφανίζονται πολύ πιο δυνατά σε στάθμη σε σχέση με τη θέση 1. Επίσης, η ουρά αντήχησης ξεκινάει αρκετά πιο μετά σε σύγκριση με τη θέση 1, περίπου μετά τα 10 ms, και σβήνει περίπου στα 140 ms.

5. Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα 1ου σεναρίου

Οι μετρήσεις του πρώτου σεναρίου πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να διερευνηθεί το πώς συμπεριφέρεται ο χώρος σε συνθήκες μουσικής εξάσκησης με ηλεκτρικά όργανα και τύμπανα, ώστε να προκύψουν κυρίως συμπεράσματα για το πώς ακούνε οι μουσικοί στον χώρο. Ταυτόχρονα, όμως, σύμφωνα με τις μετρήσεις προκύπτει και μια εικόνα σχετικά με την απόκριση που μπορούν να καταγράψουν τα μικρόφωνα σε περίπτωση ζωντανής ηχογράφησης με ηλεκτρικά όργανα και τύμπανα. Ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις δεν μας επιτρέπει να βγάλουμε συμπεράσματα για την καθαρή ακουστική απόκριση του δωματίου. Η μέτρηση αφορά ένα συνολικό σύστημα ηχείων, ενισχυτών, χώρου μικροφώνου και θέσεις μετρήσεων. Άρα, τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν κυρίως τη λειτουργική συνθήκη πρόβας και όχι τόσο την απόκριση του χώρου.

Από τη μέτρηση της συχνοτικής απόκρισης του δωματίου παρατηρούμε ότι σε όλες τις θέσεις εκτός του ντράμερ, όλοι οι μουσικοί ακούνε αρκετά ισορροπημένα και με την ίδια συχνοτική απόκριση. Σε όλες τις θέσεις παρατηρείται, επίσης, μια ομοιόμορφη ενίσχυση των χαμηλών συχνοτήτων κάτω από το 1 KHz, σαν να έχει προστεθεί ένα low self φίλτρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ακούγεται ο χώρος λίγο πιο «ζεστός» σε σχέση με την επίπεδη απόκριση, ακολουθώντας τη λογική της καμπύλης Harman. Αν επιθυμούμε πιο επίπεδη απόκριση, προτείνεται μια σχετική αφαίρεση κάποιων απορροφητικών πάνελ περιμετρικά του χώρου, με σκοπό να ισορροπήσουν οι υψηλές συχνότητες πάνω από το 1 KHz σε σχέση με τις χαμηλές κάτω από το 1 KHz. Αυτό, όμως, θα κάνει τον ήχο πιο «λεπτό», με πιο έντονη την παρουσία των υψηλών συχνοτήτων.

Στη θέση του ντράμερ συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένα σημαντικό βύθισμα στα 2 KHz και μια αύξηση στα 200 Hz. Το πιο πιθανό είναι αυτές οι αυξομειώσεις να προέρχονται από το ηχείο που είναι κοντά στον ντράμερ. Όπως είδαμε, το συγκεκριμένο ηχείο δεν παρουσιάζει καθόλου ισορροπημένη απόκριση σε όλο το φάσμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ενισχύει ή να δημιουργεί βυθίσματα σε συγκεκριμένα φάσματα στον χώρο.

Για τη λύση του προβλήματος, προτείνεται να τοποθετηθεί ένα ηχείο της ίδιας εταιρείας με τα ηχεία που βρίσκονται στις άλλες θέσεις, τα οποία παρουσιάζουν πιο ισορροπημένη απόκριση τουλάχιστον από τα 150 Hz και πάνω. Σε περίπτωση που δεν διορθωθεί το πρόβλημα και μετά την τοποθέτηση άλλου ηχείου, θα πρέπει να γίνει παρέμβαση στον

χώρο. Για να μειωθούν οι απώλειες γύρω από τα 2 KHz προτείνεται να αφαιρεθούν κάποια πάνελ απορρόφησης σε εκείνο το σημείο του χώρου και να τοποθετηθεί διάχυση, ώστε να κατανεμηθεί ομοιόμορφα η ενέργεια των μεσαίο-υψηλών συχνοτήτων, που πλέον θα έχουν πιο έντονη παρουσία. Όσον αφορά την κορύφωση των 200 Hz, ιδανικότερη λύση είναι η τοποθέτηση ενός συνηχητή Helmholtz, με την κατασκευή του να είναι υπολογισμένη στα 200 Hz δεδομένου ότι οι υπόλοιπες χαμηλές συχνότητες είναι αρκετά ισορροπημένες.

Σύμφωνα με τη σχέση 6.1 (Berg, 2026):

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V L_{eff}}}$$

Όπου:

f = συχνότητα συντονισμού (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 200 Hz)

c = η ταχύτητα του ήχου (την υπολογίζουμε ως 343 m/s)

A = εμβαδόν λαιμού (m^2)

V = όγκος κοιλότητας (m^3)

L_{eff} = ενεργό μήκος λαιμού ($L_{eff} = L + 1.7 r$), όπου L είναι το πραγματικό μήκος λαιμού και r η ακτίνα λαιμού

Εάν επιλέξουμε κυκλική οπή διαμέτρου 5 cm, το $r = 0,025$ m. Επίσης, αν επιλέξουμε μήκος λαιμού 3 cm, προκύπτει $A = \pi r^2 = 0,00196$ m^2 και $L_{eff} = 0,03$ m + $1,7 \times 0,025$ m = 0,0725 m.

Λύνοντας ως προς V (σχέση 6.2)

$$V = \frac{A}{L_{eff} \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2}$$

προκύπτει ο όγκος του συνηχητή να είναι 2 λίτρα. Επομένως, ένα κουτί 20x20x5 cm που αντιστοιχεί σε όγκο 2 λίτρων, με κυκλική οπή διαμέτρου 5 cm και μήκος λαιμού 3 cm, θα συντονίζεται στα 200 Hz. Φυσικά, για αποτελεσματικότερη απόδοση προτείνεται να τοποθετηθούν 8 ίδιοι τέτοιοι συνηχητές.

Από το φασματογράφημα τύπου καταρράκτη εντοπίζονται τυχόν συντονισμοί στον χώρο, από τη στιγμή που εμφανίζεται και ο χρόνος απόσβεσης ανά συχνότητα. Γενικότερα, σε

όλες τις θέσεις υπάρχει μια σχετικά ομοιόμορφη σχέση των χαμηλών συχνοτήτων, με την απόσβεση να μην ξεπερνάει τα 300 ms, πράγμα λογικό σύμφωνα και με τις διαστάσεις του χώρου. Στη θέση του ντράμερ, όμως, τα 120 Hz ξεπερνούν κατά πολύ τα 300 ms, κάτι που δηλώνει πως υπάρχει κάποιος συντονισμός σε αυτήν τη θέση. Επομένως, η μόνη λύση είναι η τοποθέτηση συνηχητή Helmholtz υπολογισμένο στα 120 Hz.

Αρα σύμφωνα με τη σχέση 6.2, αν υποθέσουμε κυκλική οπή τα 6 cm και μήκος λαιμού τα 5 cm, θα προκύψει όγκος 5,7 λίτρα για τον θάλαμο Helmholtz. Οπότε, ένας θάλαμος με διαστάσεις 30x30x6,5 cm, με κυκλική οπή διαμέτρου 6 cm και μήκος λαιμού 5 cm θα συντονίζεται στα 120 Hz.

Από τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης παρατηρείται πως σε όλες τις θέσεις κυμαίνεται περίπου στα 400 ms, που είναι ιδανικός σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου για χρήση μουσικής. Αυτό που φαίνεται σχετικά ανησυχητικό είναι ότι στη θέση 4, αποκλειστικά στα 250 Hz, εμφανίζεται ο χρόνος αντήχησης στο 1 sec σε αντίθεση με το υπόλοιπο φάσμα που κυμαίνεται στα 350 ms. Επειδή αυτή η θέση βρίσκεται κοντά στην πόρτα, πολύ πιθανό αυτό να προκύπτει από την ανάκλαση που δημιουργείται πάνω στο τζάμι της πόρτας. Επομένως, μια λύση θα ήταν να τοποθετηθούν απορροφητικά πάνελ πάνω στο τζάμι της πόρτας. Μια σωστή τακτική θα ήταν να πραγματοποιηθεί η ίδια μέτρηση με ανοιχτή την πόρτα και να εντοπισθεί εάν ακόμα ο χρόνος αντήχησης παραμένει σε αυτά τα επίπεδα στο συγκεκριμένο φάσμα.

Όσον αφορά το χρόνο πρώιμης απόσβεσης, παρατηρούμε πως ακολουθεί σε γενικές γραμμές τον χρόνο αντήχησης. Επομένως η αίσθηση της αντήχησης εξελίσσεται ομαλά κατά μήκος του φάσματος. Η μόνη εξαίρεση είναι ότι στα 60 Hz εμφανίζεται πολύ έντονα, σε όλες τις θέσεις, ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης να ξεπερνάει το 1 sec. Λαμβάνοντας υπόψιν, όμως, πως κάτω από τα 150 Hz το EDT είναι ενδεικτικό και από τη στιγμή που αυτή η ουρά αντήχησης δεν εμφανίζεται στο φασματογράφημα τύπου καταρράκτη, θεωρούμε πως δεν είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί κάποια ακουστική βελτίωση για τη συγκεκριμένη περιοχή.

Όλες οι παραπάνω προτεινόμενες λύσεις αποτελούν αρχική εκτίμηση σχεδιασμού και όχι βέβαιη λύση, καθώς η πραγματική απόδοση εξαρτάται από τη θέση τοποθέτησης, τις απώλειες, το εύρος ζώνης, την κατασκευή και την αλληλεπίδραση με τον χώρο. Για τον λόγο αυτό προτείνεται επαναληπτική μέτρηση μετά την εγκατάσταση.

Σαν γενικό συμπέρασμα προκύπτει πως σε μεγάλο βαθμό ο χώρος συμπεριφέρεται ομαλά, με μια σχετικά ομοιόμορφη απορρόφηση των υψηλών συχνοτήτων πάνω από το 1 KHz. Η πιο προβληματική θέση είναι αυτή του ντράμερ, όπου χρειάζεται σίγουρα αντικατάσταση ηχείου μόνιτορ με κάποιο άλλο με πιο ισορροπημένη απόκριση. Ο χρόνος αντήχησης είναι σε λογικά επίπεδα, τόσο για μουσική εξάσκηση όσο και για ζωντανή ηχογράφηση. Οι πιο ισορροπημένες θέσεις όσον αφορά τον χρόνο αντήχησης είναι η θέση 2 στο κέντρο του δωματίου και η θέση 3 στα δεξιά του δωματίου, σε αντίθεση με τη θέση 4 που είναι στα αριστερά του δωματίου και πιο κοντά στο τζάμι της πόρτας. Επομένως, σε μια πιθανή ηχογράφηση με μικρόφωνα ίσως η καλύτερη επιλογή θα ήταν να τοποθετηθεί μια στερεοφωνική τεχνική στο κέντρο του δωματίου ή στη θέση 3 στα δεξιά του δωματίου.

5.2 Συμπεράσματα 2ου σεναρίου

Οι μετρήσεις του 2ου σεναρίου πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να διερευνηθεί το πώς συμπεριφέρεται ο χώρος σε πιθανή ηχογράφηση ακουστικών οργάνων. Όπως παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις, η πιο ισορροπημένη συχνотική απόκριση παρουσιάζεται στη θέση 2, που βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου σε απόσταση 1 μέτρου από την πηγή, και στη θέση 3, που βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου σε απόσταση 2 μέτρων από την πηγή.

Η θέση 1 που βρίσκεται πάλι στο κέντρο του δωματίου αλλά 50 εκατοστά από την πηγή παρουσιάζει μια ανομοιομορφία στις χαμηλο-μεσαίες συχνότητες. Όσον αφορά τις απομακρυσμένες διαγώνιες θέσεις από την πηγή, δηλαδή τις θέσεις 4 και 5, η θέση 4 που βρίσκεται στα αριστερά του δωματίου σε απόσταση δύο μέτρων από την πηγή παρουσιάζει μια αύξηση στα 120 Hz, ενώ η θέση 5 που βρίσκεται στα δεξιά του δωματίου σε απόσταση δύο μέτρων από την πηγή παρουσιάζει πιο ισορροπημένη απόκριση, με έναν συντονισμό στα 65 Hz. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο ότι η θέση 4 βρίσκεται δίπλα στο τζάμι της πόρτας, ενώ η θέση 5 βρίσκεται κοντά στη γωνία, με γυψοσανίδα και απορροφητικά πάνελ περιμετρικά.

Επομένως, θα λέγαμε πως οι ιδανικές θέσεις ηχογράφησης είναι η θέση 2 και 3. Επειδή όμως και οι δύο θέσεις είναι σχετικά μακριά από την πηγή, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο χρόνος αντήχησης που εμφανίζεται σε αυτές.

Όπως παρατηρήθηκε στη θέση 2, ο χρόνος αντήχησης υπολογίσθηκε γύρω στα 400 ms, με τον χρόνο πρώιμης απόσβεσης να είναι αρκετά πιο χαμηλά από τα 2 KHz και πάνω. Σαν

χρόνος αντήχησης είναι επιθυμητός για μουσική καταγραφή ενός ακουστικού οργάνου, αν και θα έχει μια αίσθηση ελαφρώς παραπάνω αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες λόγω της συχνοτικής παρουσίας του χρόνου πρώιμης απόσβεσης σε αυτήν την περιοχή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός πως και στη θέση 3, παρότι βρίσκεται 2 μέτρα μακριά από την πηγή, ο χρόνος αντήχησης δεν αυξάνεται. Αντίστοιχα, όμως, αυξάνεται ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης, επομένως η αίσθηση της αντήχησης θα είναι πιο έντονη στη θέση 3 σε σχέση με τη θέση 2. Εάν επιθυμούμε πιο σύντομο χρόνο αντήχησης, ιδανικότερη είναι η θέση 1 που βρίσκεται 50 εκατοστά από την πηγή.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι ακόμα και στις θέσεις 4 και 5, παρότι βρίσκονται διαγωνίως στα 2 μέτρα από την πηγή, ο χρόνος αντήχησης παραμένει στα 400 ms. Επομένως, ο χώρος παρουσιάζει πολύ ισορροπημένο χρόνο αντήχησης σε όλα περίπου τα σημεία του, είτε βρίσκονται κοντά σε πλευρικούς τοίχους και γωνίες, είτε στο κέντρο του δωματίου.

Συμπεραίνουμε από αυτά ότι και οι πέντε θέσεις είναι ικανοποιητικές για ηχογράφηση. Η θέση 1 (στο κέντρο με 50 εκατοστά απόσταση από την πηγή) παρουσιάζει μια μικρή ανομοιομορφία στις χαμηλο-μεσαίες συχνότητες, αλλά σχετικά σύντομο χρόνο αντήχησης. Η θέση 2 (στο κέντρο με 1 μέτρο απόσταση από την πηγή) παρουσιάζει ομοιόμορφη συχνοτική απόκριση, με λίγο υψηλότερο χρόνο αντήχησης σε σχέση με τη θέση 1. Η θέση 3 (στο κέντρο με 2 μέτρα απόσταση από την πηγή) παρουσιάζει εξίσου ισορροπημένη συχνοτική απόκριση με τον ίδιο χρόνο αντήχησης, αλλά η αίσθηση της πρώιμης απόσβεσης είναι πιο έντονη. Η θέση 4 (διαγωνίως αριστερά σε 2 μέτρα απόσταση και κοντά στο τζάμι της πόρτας) παρουσιάζει ένα συντονισμό στα 120 Hz, επομένως ιδανικά θα έπρεπε να τοποθετηθεί συνηχητής Helmholtz σε αυτή τη συχνότητα. Σύμφωνα με τη σχέση 6.1, ένας θάλαμος με διαστάσεις 30x30x6,5 cm, με κυκλική οπή διαμέτρου 6 cm και μήκος λαιμού 5 cm θα συντονίζεται στα 120 Hz. Τέλος, η θέση 5 (διαγωνίως δεξιά σε 2 μέτρα απόσταση από την πηγή) παρουσιάζει μόνο έναν συντονισμό στα 65 Hz. Το πιο πιθανό είναι να ενισχύεται λόγω της γωνίας που βρίσκεται κοντά στη θέση αυτή. Επομένως, προτείνεται να τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη γωνία ένα συνηχητής Helmholtz με συχνότητα συντονισμού τα 65 Hz. Σύμφωνα με τη σχέση 6.1, ένας θάλαμος με διαστάσεις 50x50x12 cm, με κυκλική οπή διαμέτρου 10 cm και μήκος λαιμού 10 cm θα συντονίζεται στα 65 Hz.

6. Βιβλιογραφία

Abbey Road. (n. d.). *Our Story*. <https://www.abbeyroad.com/our-story>

Berg, R. E. (2026, June 8). The Helmholtz resonator. In *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/sound-physics/The-Helmholtz-resonator>

Crocker, M. (1997). *Encyclopedia of acoustics, Volume three*. John Wiley & Sons, Inc.

Everest, F., & Pohlmann, K. (2009). *Master handbook of acoustics* (5th ed.). Mc Graw Hill.

Greenwood, S. (2007). *How should I treat my project studio?* Sound on Sound.
<https://www.soundonsound.com/sound-advice/q-how-should-treat-my-project-studio>

Hall, J. (2019, December 6). My fight to honour Britain's first recording studio. *The Telegraph*. <https://www.telegraph.co.uk/music/news/fight-honour-britains-first-recording-studio/>

Jim Hawkins. (2025, September 30). *Radio City Music Hall control room 1943* [Image attached] [Status update]. Facebook.
<https://www.facebook.com/photo/?fbid=3829785373940395&set=gm.24252100694492216&id&orvanity=779220482206901>

Keeley, E. (2018, February 22). *Recording isolation: Do you need a vocal booth?* Mastering Box. <https://www.masteringbox.com/it/learn/vocal-booth>

Leccese, F., & Rocca, M. (2015, July). *Evaluation methods of the acoustic quality of a small recording studio* [Conference presentation]. 22nd International Congress on Sound and Vibration, Firenze, Italy.

Nagler, J. (2007). *Introduction to the recording studio and the music industry*. Elementary Media, Inc.

Noxon, A. (2007). *History of sound fusion recording*. Acoustic Sciences Corporation.
<https://www.acousticssciences.com/asc-articles/history-of-sound-fusion-recording/>

Roy, J. (2004, February). *RCA Victor Studio A NY*. Scotty Moore.

https://www.scottymoore.net/studio_rca.html

Schmidt Horning, S. (2013). *Chasing sound: Technology, culture, and the art of studio recording from Edison to the LP*. Johns Hopkins University Press.

Βασιλόπουλος, Λ. (2024, 17 Μαρτίου). *Το εργοστάσιο της Columbia*. Urban Life.

<https://urbanlife.gr/urban-city/ergostasio-tis-columbia/>

Κοντομίχος, Φ., Ζαρούχας, Θ., & Χατζηαντωνίου, Π. (2013). *Ακουστική χώρου. Βασικές αρχές και σύγχρονες εξελίξεις στην κτιριακή ακουστική*. ΕΑΠ.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.