

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπουδάστρια: Καπλάνη Κωνσταντίνα

Επιβλέπων καθηγητής: Σηφάκης Μηνάς

Θέμα: «Ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων (θεάτρων, αιθουσών συναυλιών, συνεδριακών χώρων). Εφαρμογή στη μελέτη αίθουσας του θεάτρου Ριάλτο στη Λεμεσό, Κύπρου.»



ΡΕΘΥΜΝΟ 2008

*Αφιερώνεται στη φίλη Κωνσταντίνα και
στον καθηγητή μου Μηνά Σηφάκη που
πίστεψαν σε μένα και με βοήθησαν
να φτάσω μέχρι εδώ...*

Ευχαριστίες

Η υλοποίηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε με την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή Μηνά Σηφάκη, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες. Ευχαριστώ επίσης και τον διευθυντή του θεάτρου Ριάλτο, Ανδρέα Τριανταφύλλου, για την ευγενή παραχώρηση της αίθουσας του θεάτρου και την υποστήριξη κατά τη διάρκεια της υλοποίησης των μετρήσεων, καθώς και τον ηγολήπτη Ανδρέα Παύλο, τον τεχνικό σκηνής Λευτέρη Τσικκούρα και το φίλο Μάρκο Φουτά για την αξιόλογη βοήθειά τους.

Κωνσταντίνα Καπλάνη

Σύνοψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε όλους τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν προκειμένου να γίνει μια σωστή και ολοκληρωμένη μελέτη του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού ενός μεγάλου κλειστού χώρου, ώστε η μετάδοση του ήχου να γίνεται χωρίς την ενίσχυσή του με τη χρήση ηχητικών συστημάτων.

Ξεκινώντας με μια ανασκόπηση των βασικών εννοιών της ακουστικής των μεγάλων κλειστών χώρων διερευνήσαμε τη βιβλιογραφία προκειμένου να εντοπισθούν οι βασικές αντικειμενικές και υποκειμενικές παράμετροι που συνδέονται με αυτήν. Προσδιορίστηκε το βέλτιστο εύρος τιμών για κάθε μια από τις ποσότητες αυτές και διερευνήθηκε η επίδραση των διαφόρων χαρακτηριστικών της αίθουσας (γεωμετρία, όγκος, υφή των οριακών επιφανειών) σε κάθε μια εξ' αυτών.

Στη συνέχεια και ως εφαρμογή των ανωτέρω πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αξιολόγησης της ακουστικής ποιότητας της αίθουσας του θεάτρου Ριάλτο στη Λεμεσό, Κύπρου. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (θόρυβος βάθους, στάθμη ηχητικής πίεσης, χρόνος αντήχησης, κρουστική απόκριση) συγκρίθηκαν με τις προτινόμενες στη βιβλιογραφία βέλτιστες τιμές και με τα αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών βασισμένων στα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της αίθουσας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	xv
Κεφάλαιο 1 – Ακουστική και χώροι	
1.1 Βασικές Έννοιες	1
1.2 Είδη Ηχητικών Πεδίων	5
1.3 Διάκριση Χώρων	9
1.4 Κλειστοί Χώροι	11
1.4.1 Μεγάλοι Κλειστοί Χώροι	12
1.4.2 Μικροί Κλειστοί Χώροι	16
Κεφάλαιο 2 – Υποκειμενικές ποσότητες	20
2.1 Κατανόηση Λόγου	24
2.2 Δείκτες μέτρησης υποκειμενικών ποσοτήτων	53
Κεφάλαιο 3 – Ακουστικές απαιτήσεις μεγάλων κλειστών χώρων	
3.1 Βασικοί παράγοντες	
3.1.1 Γραμμές ορατότητας	56
3.1.2 Σχήμα	60
3.1.3 Οροφή	69
3.1.4 Τοίχοι	72
3.1.5 Απορρόφηση	77
3.1.6 Κέλυφος σκηνής	83
3.1.7 Πιτ ορχήστρας	86
3.1.8 Μπαλκόνι	87
3.2 Ακουστικές απαιτήσεις αιθουσών – συνοπτικά	90
3.2.1 Αίθουσες διαλέξεων	92
3.2.2 Αίθουσες πολλαπλής χρήσης	95
3.2.3 Αίθουσες συναυλιών	
Κεφάλαιο 4 - Πειραματικό Μέρος	
Μέτρηση ακουστικών ποσοτήτων	
4.1 Περιγραφή χώρου	102

4.2 Μέτρηση θορύβου βάθους	103
4.3 Μέτρηση χρόνου αντήχησης	105
4.4 Μέτρηση στάθμης ηχητικής πίεσης	109
4.5 Μέτρηση κρουστικής απόκρισης	111
Κεφάλαιο 5 – Επεξεργασία μετρήσεων – Σχολιασμός – Αξιολόγηση αίθουσας	
5.1 Θεωρητικός υπολογισμός χρόνου αντήχησης	125
5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	129
Κεφάλαιο 6 – Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα – Προτάσεις για Μελλοντική Συνέχιση της Εργασίας	
6.1 Γενικά	135
Θέατρα και αίθουσες συναυλιών	
6.2 Εφαρμογή στο Θέατρο Ριάλτο	137
6.3 Προτάσεις μελλοντικής συνέχισης της εργασίας	138
Παράρτημα Α – Αντικειμενικές μετρήσεις για αίθουσες ακρόασης & Υπολογιστικά μοντέλα	139
Παράρτημα Β – Πίνακες αποτελεσμάτων και σχεδιαγράμματα	152
Παράρτημα Γ – Υπολογιστικό πρόγραμμα (MATLAB)	172
Παράρτημα Δ – Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις	176
Βιβλιογραφικές Αναφορές	180

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1-1. Γραφική παράσταση ημιτονικού ηχητικού κύματος	1
Σχήμα 1-2. Είδη πεδίων, [1]	7
Σχήμα 1-3. Σχηματική απεικόνιση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε κλειστούς χώρους, [19]	7
Σχήμα 1-4. Διάγραμμα Bolt, Beranek και Neumann, ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου, [19]	10
Σχήμα 1-5 (α). Φαινόμενο αντήχησης, [19]	12
Σχήμα 1-5 (β). Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του ήχου κατά την πρόσπτωση σε επιφάνεια	13
Σχήμα 1-6. Σταθερά δωματίου σε σχέση με την επιφάνεια του δωματίου και το συντελεστή μέσης ηχητικής απορρόφησης, [19]	14
Σχήμα 1-7. Ελεύθερο, αντηχητικό πεδίο και κρίσιμη απόσταση, [19]	15
Σχήμα 1-8. Ακουστική απόκριση χώρου, στάθμη ηχητικής πίεσης σε συνάρτηση με το χρόνο, [19]	16
Σχήμα 1-9. Συχνοτική απόκριση δωματίου, στις συχνότητες που παρουσιάζονται κορυφές δημιουργούνται στάσιμα κύματα, [19]	17
Σχήμα 1-10. Αξονικό, εφαπτομενικό και πλάγιο στάσιμο κύμα αντίστοιχα, [18]	18

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2-1. Συχνοτική περιοχή και κατώφλι ακουστότητας για τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου, [19]	21
Σχήμα 2-2. Η επίδραση της στάθμης ηχητικής πίεσης στην κατανόηση του λόγου, [19]	21
	22

Σχήμα 2-3. Καμπύλη που περιγράφει το φαινόμενο Haas, [19]	23
Σχήμα 2-4. Καμπύλη κατευθυντικότητας ομιλίας, [9]	25
Σχήμα 2-5. Πραγματική μέτρηση χρόνου αντήχησης δωματίου σε δυο διαφορετικές συχνότητες, [19]	27
Σχήμα 2-6. Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για διάφορους χώρους κατά τον Beranek, [6]	27
Σχήμα 2-7. Σχετικοί χρόνοι αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με τον RT60 στα 500 Hz, κατά τον Beranek [1]	32
Σχήμα 2-8. Σχέση καταληπτότητας και διακριτότητας, [1]	37
Σχήμα 2-9. Σχέση ποσοστού κατανόησης λέξεων ή προτάσεων και δείκτη άρθρωσης, [9]	38
Σχήμα 2-10. Δείκτης άρθρωσης σε αίθουσα ακρόασης, [9]	39
Σχήμα 2-11. Η επίδραση της ηχούς στην απώλεια άρθρωσης συμφώνων, [19]	39
Σχήμα 2-12. Πιθανή απώλεια άρθρωσης συμφώνων σε σχέση με το χρόνο αντήχησης και το λόγο ελεύθερου προς αντηχητικό πεδίο, [19]	40
Σχήμα 2-13 Καταληπτότητα ομιλίας και Rasti, [1]	43
Σχήμα 2-14. Καμπύλες NR (α) και Καμπύλες PNC (β)	
α) 2005, <i>An introduction to Noise Rating - NR - curves, developed by the International Organization for Standardization (ISO) - NR diagram</i> [online], Available from: http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html [Accessed: 15.11.2008].	
β) Καμπύλες Preferred Noise Criterion. From: Beranek, Blazier and Figwer, "Preferred Noise Criterion (PNC) curves and their application to rooms", <i>Journal of the Acoustical Society of America</i> , vol. 50, p.1226, 1971	44
, [5]	32
Πίνακας 2-1. Αντιστοιχία δεικτών D50 και C50	41
Πίνακας 2-2. Συσχέτιση μεταξύ RASTI και AI_{cons} , [19]	43
Πίνακας 2-3. Σταθερές για καμπύλες NR, [5]	

Πίνακας 2-4. Τιμές στάθμης ηχητικής πίεσης (ανά οκτάβα) κατ' αντιστοιχία με τις προτεινόμενες καμπύλες PNC, 1971[from Beranek, Blazier and Figwer, <i>J.A.S.A.</i> , 1971, p. 1226], [5]	45 46
Πίνακας 2-5.Αντιστοιχία κριτηρίων NR, NC,NCB, RNC, RC, [5]	46
Πίνακας 2-6. Τιμές κριτηρίων, [12]	
Πίνακας 2-7. Υποκειμενικές ποσότητες σε αίθουσες συναυλιών και οι αντίστοιχοι αντικειμενικοί δείκτες, [24]	48
Σχήμα 2-15. Έντυπο αξιολόγησης υποκειμενικών ποσοτήτων σε αίθουσα ακρόασης, [9]	51
Σχήμα 2-16. Παράδειγμα - έντυπο αξιολόγησης υποκειμενικών ποσοτήτων σε αίθουσα ακρόασης [9]	52

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3-1. Ανάκλαση, [9]	54
Σχήμα 3-2. Διάχυση, [9]	54
Σχήμα 3-3. Περίθλαση, [9]	55
Σχήμα 3-4. Γραμμές ορατότητας και διάταξη θέσεων, [9]	57
Σχήμα 3-5. Πλευρικές γραμμές ορατότητας σε αίθουσα με προσκήνιο, [9]	58
Σχήμα 3-6. Arrival point of Sight (APS) και ύψος σκηνής [9]	59
Πίνακας 3-1. Προτινόμενη τιμή όγκου ανά θεατή για διάφορες αίθουσες, [1]	60
Σχήμα 3-7. Κανονικοποιημένη μέση απόσταση, [1]	61
Σχήμα 3-8. Θέατρο με προσκήνιο, αρρένα, ανοικτό θέατρο, [9]	62
Σχήμα 3-9. Κατόψεις (στην ίδια κλίμακα) των σημαντικότερων θεάτρων του 18 ^ο αιώνα μ.Χ., [3]	63
Σχήμα 3-10 . Κοίλος ανακλαστήρας, [9]	64
Σχήμα 3-11 . Επίπεδος ανακλαστήρας, [9]	65
Σχήμα 3-12. Κυρτός ανακλαστήρας, [9]	65
Πίνακας 3-2. Sound path difference, TDG και συνθήκες ακρόασης, [9]	66
Σχήμα 3-13 (α). Sound path difference, [9]	67
Σχήμα 3-13 (β). Ανακλάσεις σε αίθουσα με προσκήνιο, [9]	68
Σχήμα 3-13 (γ). Ηχητική στάθμη ως προς το χρόνο, [9]	68

Σχήμα 3-14. Επίπεδη οροφή και οροφή με κλίση, [9]	69
Σχήμα 3-15. Οροφή και ανακλάσεις, [1]	70
Σχήμα 3-16. Βελτίωση συνθηκών ακρόασης με αλλαγή του σχήματος της οροφής, [9]	71
Σχήμα 3-17. Ανακλαστικές και απορροφητικές επιφάνειες σε ορθογώνια αίθουσα ακρόασης, [1]	72
Σχήμα 3-18. Αντιμετώπιση φαινομένων ηχούς, [9]	72
Σχήμα 3-19. Φαινόμενο πολλαπλής ηχούς, [9]	73
Σχήμα 3-20. Φαινόμενο «υφέρπουσας ηχούς»- creep echo, [9]	74
Σχήμα 3-21. Φαινόμενο εστίασης ήχου εξαιτίας του κοίλου σχήματος της οροφής, [9]	75
Σχήμα 3-22. Φαινόμενο εστίασης ήχου σε αίθουσα με σχήμα βεντάλιας, [9]	75
Σχήμα 3-23. Βελτιώσεις στο σχήμα, ορθογώνιας αίθουσας, για καλύτερες συνθήκες ακρόασης, [9]	76
Σχήμα 3-24. Κλίση δαπέδου (seating area), [1]	78
Σχήμα 3-25. Μεταβλητές συνθήκες ηχοαπορρόφησης, ηχοανάκλασης, [9]	79
Σχήμα 3-26. Πάνελς μεταβλητής απορρόφησης, ανάκλασης ήχου, [9]	80
Σχήμα 3-27. Περιστρεφόμενα στοιχεία, [9]	80
Σχήμα 3-28. Jesse Jones Hall, Houston, Texas (CRS Surrine, αρχιτέκτονες και BBN, ακουστικοί σύμβουλοι), [9]	81
Σχήμα 3-29. Edwin Thomas Hall, University of Arkon, Ohio (CRS Surrine, αρχιτέκτονες και V.O. Knudsen, ακουστικοί σύμβουλοι), [9]	82
Σχήμα 3-30. Κέλυφος σκηνής, [9]	84
Σχήμα 3-31. Τομή σκηνής, [9]	84
Σχήμα 3-32. (α,β) Forestage canopy, [9]	85
Σχήμα 3-33. Πιτ ορχήστρας σε τομή, [9]	87
Σχήμα 3-34. Πιτ ορχήστρας σε κάτοψη, [9]	87
Σχήμα 3-35. Μπαλκόνι σε τομή, [9]	88
Σχήμα 3-36. Σχέση ανοίγματος προβόλου (H) και μήκους προβόλου (D), [9]	88

Σχήμα 3-37. Flying Balcony, [9]	89
Πίνακας 3-3. Προτινόμενα χαρακτηριστικά γνωρίσματα για τον ακουστικό σχεδιασμό αιθουσών συναυλιών, όπερας και θεάτρου κατά τον Barton, [3]	89
Σχήμα 3-38. Προτινόμενη περιοχή για τοποθέτηση θέσεων ακρόασης, [9]	91
Σχήμα 3-39. Κάτοψη αίθουσας πολλαπλής χρήσης και δευτερευόντων χώρων, [9]	92
Σχήμα 3-40. Δάπεδο σκηνής σε τομή, [9]	97
Σχήμα 3-41. Αίθουσες συναυλιών σε ορθογώνιο σχήμα (αριστερά) και τύπου αρένας (δεξιά), [9]	98
Σχήμα 3-42. Βέλτιστες τιμές χρόνου αντήχησης για διάφορες αίθουσες, [6]	100
Πίνακας 3-4. Συγκεντρωτικός πίνακας προτεινόμενων τιμών	100

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4-1. Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις	103
Πίνακας 4-2 . Τιμές θορύβου βάθους για τις αντίστοιχες θέσεις μέτρησης	104
Πίνακας 4-3. Μέσος χρόνος αντήχησης όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο, δεξιά και αριστερά στη σκηνή	107
Πίνακας 4-4 . Μέσος χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης	107
Πίνακας 4-5 . Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης	109
Πίνακας 4-6 . Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης	111
Πίνακας 4-7. Τιμές χρόνου αντήχησης για τις θέσεις μέτρησης, όπως προκύπτουν από την κρουστική απόκριση	113
Πίνακας 4-8. Δείκτες EDT, D50, STI, RASTI	116
Πίνακας 4-9. ISO 3382 – αντίστοιχοι δείκτες	117
Σχήμα 4-1 . Θόρυβος βάθους. Με μπλε χρώμα σημειώνεται το κριτήριο NR-32 ενώ με γαλάζιο το κριτήριο NR-30	105
Σχήμα 4-2 . Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής, Center, Left, Right	108

Σχήμα 4-3 . Μέσος χρόνος αντήχησης για την κάθε θέση μέτρησης	108
Σχήμα 4-4 . Ηχητική στάθμη ανά συχνότητα (σε σχέση με την απόσταση από την πηγή)	110
Σχήμα 4-5 . Ηχητική στάθμη ανά συχνότητα (σε σχέση το πλάτος της αίθουσας)	110
Σχήμα 4-6. Κρουστική απόκριση αίθουσας (θέση μέτρησης , θέση πηγής – Center)	112
Σχήμα 4-7 . Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής, Center, Left, Right	114
Σχήμα 4-8 . (α, β, γ) Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης	114
Σχήμα 4-9 . Διάταξη θέσεων ακρόασης	118
Σχήμα 4-10. Κάτοψη αίθουσας (Ριάλτο)	120
Σχήμα 4-11. Κάτοψη εξώστη	121
Σχήμα 4-12 . Κάτοψη σκηνής	122
Σχήμα 4-13 (α,β,γ). Εσωτερικό αίθουσας θεάτρου Ριάλτο	124
	125

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5-1. Θεωρητικός υπολογισμός συνολικής απορρόφησης (α) συμπεριλαμβανομένου του όγκου της σκηνής, (β) χωρίς να συμπεριλάβουμε τον όγκο της σκηνής στον υπολογισμό.	126
Πίνακας 5-2. Θεωρητικός υπολογισμός χρόνου αντήχησης (α) συμπεριλαμβανομένου του όγκου της σκηνής, (β) χωρίς να συμπεριλάβουμε τον όγκο της σκηνής στον υπολογισμό.	128
Σχήμα 5-1. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών του χρόνου αντήχησης α) στο θεωρητικό υπολογισμό περιλαμβάνεται ο όγκος τη σκηνής	128
β) στο θεωρητικό υπολογισμό δεν περιλαμβάνεται ο όγκος της σκηνής.	129
Πίνακας 5-3 . Bass ratio	134

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχήμα Α-1. Θεωρία των ειδώλων, [1]	145
Σχήμα Α-2. Στη μέθοδο image-source οι ηχητικές ανακλάσεις από τις οριακές επιφάνειες του χώρου παράγονται δημιουργώντας εικονικές πηγές (image sources), μία για κάθε επιφάνεια, [21]	146
Σχήμα Α-3. Οι υπολογιζόμενες εικονικές πηγές σε μια αίθουσα συναυλιών. Όλες οι ορατές πρώτες και δεύτερες «εικονικές πηγές» παρουσιάζονται στο σχήμα σαν σφαίρες, [21]	147
Σχήμα Α-4 Ο απευθείας ήχος και οι πρώτες και οι δεύτερες ανακλάσεις που φθάνουν σε ένα συγκεκριμένο ακροατή στην αίθουσα συναυλιών Sigyn στην Φινλανδία υπολογιζόμενες με τη μέθοδο ray-tracing, [21]	148
Πίνακας Α-1. Τιμές για τις σταθερές Α και Β, [1]	144

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Β- 1. Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης, όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής	150
Πίνακας Β-2. Στάθμη θορύβου βάθους σε κάθε θέση μέτρησης	151
Σχήμα Β-1 . Θόρυβος βάθους ανά θέση μέτρησης. Με μπλε χρώμα σημειώνεται το κριτήριο NR32 ενώ με γαλάζιο χρώμα το κριτήριο NR30	152
Σχήμα Β-2 . Στάθμη ηχητικής πίεσης σε σχέση με την απόσταση από την πηγή	153
Σχήμα Β-3. Στάθμη ηχητικής πίεσης σε σχέση με το πλάτος του θεάτρου	154
Σχήμα Β-4. Χρόνος αντήχησης όταν η πηγή βρίσκεται στο α) κέντρο της σκηνής β) δεξιά, γ) αριστερά, (μέτρηση με τη μέθοδο MLS)	154
Σχήμα Β-5. Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής	155
Σχήμα Β-6 . Μέσος χρόνος αντήχησης ανά θέση μέτρησης	155
Πίνακας Β-3. Αποτελέσματα μετρήσεων του χρόνου αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης για τρεις θέσεις της πηγής, με τη μέθοδο MLS	156
Σχήμα Β-7. Χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής	156

Σχήμα B-8. Χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται αριστερά	157
Σχήμα B-9 .Χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται δεξιά	157
Σχήμα B-10. Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής	158
Σχήμα B-11 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής.	158
Σχήμα B-12 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται αριστερά.	159
Σχήμα B-13 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται δεξιά	159
Πίνακας B-4 . Τιμές δεικτών για ομιλία όταν η πηγή βρίσκεται α) στο κέντρο της σκηνής β) αριστερά και γ) δεξιά	160 161 163
Πίνακας B-5 . Τιμές δεικτών σύμφωνα με το ISO 3382 όταν η πηγή βρίσκεται α) στο κέντρο της σκηνής β) αριστερά και γ) δεξιά	165 167 169

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Σχήμα Δ-1. Ηχείο MP415	176
Πίνακας Δ-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου MP415	176
Σχήμα Δ-2. Ηχείο MP415 : Απόκριση συχνότητας, συχνοτικό εύρος, δείκτης κατευθυντικότητας	177
Σχήμα Δ-3. Μικρόφωνο AKG CK92	178
Πίνακας Δ-2. Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροφώνου AKG CK92	178
Σχήμα Δ-4. Συχνοτική απόκριση μικροφώνου AKG CK92	179

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

f	Συχνότητα
T	Περίοδος
A	Απορρόφηση
α	Συνελεστής απορρόφησης
\bar{a}	Μέσος συντελεστής απορρόφησης
RT60	Χρόνος αντήχησης
EDT	Αρχικός χρόνος μείωσης ηχητικού πεδίου
G	Ηχηρότητα
C80, C50	Διαύγεια
D80, D50	Διακριτότητα
LEF	Πλευρικά κλάσματα- Λόγος πρώιμης προς συνολική ηχητική ενέργεια
IACC	Interaural cross-correlation coefficient
ITDG	Initial time delay gap
TS	Κριτήριο ηχούς
STI	Υποστήριξη σκηής
AI	Δείκτης άρθρωσης
AL _{cons}	Απώλεια άρθρωσης συμφώνων
STI	Δείκτης μετάδοσης λόγου
RASTI	Ταχύς δείκτης μετάδοσης λόγου
SII	Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας
NR	Καμπύλες στάθμησης θορύβου Noise Rating
PNC	Καμπύλες στάθμησης θορύβου Preferred Noise Criterion

Εισαγωγή

Η ακουστική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη του ήχου, δηλαδή με τον τρόπο παραγωγής και διάδοσής του μέσα σε κάποιο μέσο, την αλληλεπίδρασή του με την ύλη (στερεά, υγρή, αέρια), τους τρόπους με τους οποίους γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο, και γενικότερα με τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με αυτόν. Η συγκεκριμένη εργασία σχετίζεται με τον κλάδο της αρχιτεκτονικής ακουστικής, δηλαδή με την επιστήμη που μελετά τον έλεγχο του ήχου στο εσωτερικό των κτιρίων, και αφορά την διερεύνηση των μεθόδων – τεχνικών του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού μεγάλων κλειστών χώρων.

Η ακουστική των μεγάλων χώρων είτε πρόκειται για θέατρα είτε για αίθουσες συναυλιών ή ακρόασης αποτελούσε ανέκαθεν μια μεγάλη πρόκληση για ακουστικούς και αρχιτέκτονες. Για πολλές δεκαετίες, μάλιστα, επικρατούσε ασάφεια σχετικά με τον ορισμό της «καλής ακουστικής» ενός μεγάλου κλειστού χώρου ενώ η εκτίμηση της επίδρασης διαφόρων αρχιτεκτονικών παρεμβάσεων στην ακουστική της αίθουσας βασιζόνταν σε εικασίες ή εμπειρικούς κανόνες. Σήμερα, έπειτα από αρκετά χρόνια έρευνας στον τομέα αυτό, μπορούμε έστω και μερικώς να προσδιορίσουμε με αντικειμενικά μέτρα την έννοια της καλής ακουστικής ενός χώρου αλλά και να ακολουθήσουμε μια βασική μεθοδολογία για την κατάρτησή της.

Για τον ορισμό του προβλήματος εξετάζουμε την απλή περίπτωση όπου δύο άνθρωποι που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, σε περιβάλλον χαμηλού θορύβου και συζητούν. Υπό αυτές τις συνθήκες η συνομιλία μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς κάποιο πρόβλημα. Όσο όμως, ο χώρος μεγαλώνει, αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων είτε αυξάνεται η στάθμη του θορύβου βάθους, τόσο δυσχεραίνεται η επικοινωνία. Από ένα σημείο κι έπειτα δε, η επικοινωνία γίνεται αδύνατη χωρίς την περαιτέρω ενίσχυση της φωνής του ομιλητή.

Σε μια σωστά σχεδιασμένη θεατρική αίθουσα, η ενίσχυση της φωνής του ομιλητή δεν είναι απαραίτητη ακόμα κι όταν αυτός βρίσκεται στη σκηνή και ο ακροατής στο πιο απομακρισμένο σημείο της αίθουσας του θεάτρου. Η εργασία, λοιπόν, αναφέρεται σε όλους τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε μια τέτοια περίπτωση, προκειμένου να γίνει μια σωστή και ολοκληρωμένη μελέτη του αρχιτεκτονικού

σχεδιασμού του θεάτρου, ώστε η μετάδοση του ήχου να γίνεται χωρίς την ενίσχυσή του με τη χρήση ηχητικών συστημάτων.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται βασικές έννοιες και παράμετροι της ακουστικής μεγάλων κλειστών χώρων, καθώς και τα φαινόμενα που συναντάμε και οι μαθηματικοί τύποι που τα περιγράφουν. Γίνεται αναφορά στα είδη των ηχητικών πεδίων καθώς και στη διάκριση των κλειστών χώρων σε μεγάλους και μικρούς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι υποκειμενικές ποσότητες που αφορούν την ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων, που προορίζονται για παραστάσεις λόγου είτε μουσικής, καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες μέτρησης των ποσοτήτων αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά τις ακουστικές απαιτήσεις των μεγάλων κλειστών χώρων. Περιγράφονται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική κάθε αίθουσας και λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό αυτής. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται σε λίστες οι ακουστικές απαιτήσεις που αφορούν αίθουσες διαλέξεων, αίθουσες πολλαπλής χρήσης καθώς και αίθουσες συναυλιών. Επιπλέον, δίδονται πίνακες με τις βέλτιστες τιμές στις ακουστικές ποσότητες και μεγέθη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέτρηση των ακουστικών ποσοτήτων. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται το πειραματικό μέρος που αφορά τη μέτρηση του θορύβου βάθους, του χρόνου αντήχησης και της στάθμης ηχητικής πίεσης (με ηχόμετρο) καθώς και τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης της αίθουσας του θεάτρου (χρησιμοποιώντας το λογισμικό WinMLS).

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την επεξεργασία των μετρήσεων και το σχολιασμό αυτών, καθώς και την αξιολόγηση της αίθουσας του θεάτρου Ριάλτο. Ειδικότερα αφορά τον θεωρητικό υπολογισμό του χρόνου αντήχησης για την αίθουσα του συγκεκριμένου θεάτρου και έπειτα, τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις μετρήσεις με τις θεωρητικές τιμές όπως αυτές προκύπτουν από τη σχετική βιβλιογραφική έρευνα.

Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή ανακεφαλαίωση όσον αφορά γενικά την ακουστική θεάτρων και αιθουσών συναυλιών, καταγράφονται τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τη σύγκριση θεωρίας και πράξης σχετικά με την εφαρμογή στο θέατρο Ριάλτο, καθώς και προτάσεις για συνέχιση της εργασίας.

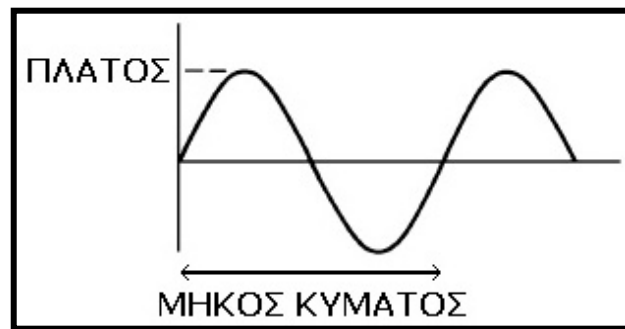
Ελπίζουμε ότι η εργασία αυτή θα αποτελέσει χρήσιμο βοήθημα για οποιονδήποτε ενδιαφέρεται να αποκτήσει τις βασικές θεωρητικές γνώσεις και να μελετήσει σε βάθος

την ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων και γενικότερα την όλη διαδικασία που ακολουθείται κατά εκπόνηση μιας σωστής ακουστικής μελέτης σε μια θεατρική αίθουσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΧΩΡΟΙ

Βασικές έννοιες

Ήχος είναι μια μηχανική διαταραχή που διαδίδεται μέσα σε ένα ελαστικό μέσο με ορισμένη ταχύτητα. Πρόκειται για διαμήκη κύματα όπου γίνεται μεταβίβαση ενέργειας χωρίς καθαρή μεταφορά ύλης. Τα μόρια του αέρα κινούνται περιοδικά γύρω από μια θέση ισορροπίας, μεταδίδοντας την κίνησή τους στα διπλανά μόρια. Η μέγιστη απόκλιση από τη θέση ισορροπίας ονομάζεται **πλάτος της ταλάντωσης**, (amplitude). Άλλα χαρακτηριστικά του ήχου είναι η **συχνότητα** (frequency), f σε Hertz (Hz), δηλαδή ο αριθμός των περιοδικών μεταβολών ανά μονάδα χρόνου, η **περίοδος** (period), T σε δευτερόλεπτα (sec), ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει ένας ολόκληρος κύκλος του ακουστικού κύματος, και το **μήκος κύματος** (wavelength), λ σε μέτρα (m), η φυσική απόσταση που καλύπτεται από έναν πλήρη κύκλο.



Σχήμα 1-1. Γραφική παράσταση ημιτονικού ηχητικού κύματος

Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη, δηλαδή από την ταλάντωση των μορίων κατά τη μετάδοση ενός ηχητικού κύματος δημιουργούνται στο μέσο μετάδοσης πυκνώματα και αραιώματα ύλης τουτέστιν μεταβολή της πυκνότητας και της πίεσης σε σχέση με το χώρο και το χρόνο. Η μεταβολή της πίεσης του μέσου μετάδοσης γύρω από την θέση ισορροπίας ονομάζεται **ηχητική πίεση** (sound pressure), p , και μετριέται σε Pascal (Pa). Η μαθηματική έκφραση της διάδοσης του ηχητικού κύματος περιγράφεται από την κυματική εξίσωση :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1)$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα¹ και t ο χρόνος (sec).

Μια λύση της εξίσωσης είναι :

$$p = p_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1-2)$$

Πρόκειται για τα επίπεδα κύματα τα οποία εξαπλώνονται με τη μορφή μιας επίπεδης επιφάνειας.

Μια άλλη λύση της εξίσωσης είναι τα σφαιρικά κύματα που παράγονται από σημειακή ομοιοκατευθυντική πηγή και έχει τη μορφή:

$$p = \frac{P_0}{r} \sin(\omega t - k|r|) \quad (1-3)$$

[1]

όπου p η ακουστική πίεση (Pa), p_0 η μέγιστη τιμή ακουστικής πίεσης (Pa), r και x η απόσταση από την πηγή (m) και t ο χρόνος (sec). Και, όπου ω είναι η **κυκλική συχνότητα** δηλαδή η γωνία που διαγράφει το κάθε σωματίο στην μονάδα του χρόνου, για την οποία ισχύει : $\omega = 2\pi f$ (rad/sec), και k είναι ο **κυματάριθμος** που με απλά λόγια δηλώνει το πόσο γρήγορα διαδίδεται η διαταραχή στο μέσο, όπου : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (1/sec).

Στην περίπτωση που η απόσταση των μετώπων του κύματος από την πηγή είναι μεγάλη, τα κύματα δύναται να θεωρηθούν επίπεδα. Η **σωματιδιακή ταχύτητα**, δηλαδή η μεταβολή της μέσης ταχύτητας με την οποία κινούνται τα σωματίδια του μέσου διάδοσης γύρω από τη θέση ισορροπίας, των επίπεδων κυμάτων είναι :

$$u = \frac{p}{\rho_0 c} \quad (1-4)$$

όπου p η ηχητική πίεση, ρ_0 η πυκνότητα του μέσου και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο. Το γινόμενο $\rho_0 c$ ονομάζεται **ειδική ακουστική εμπέδηση** (characteristic impedance) του μέσου μετάδοσης και προκύπτει από το λόγο της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα

¹ Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και υπολογίζεται από τη σχέση :
 $c = 331.4 + 0.607\theta^0 C$ στους $20^0 C$ είναι $c=343.54m/s$ [1]

των σωματιδίων και είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα. Για τον αέρα είναι $\rho_0 c = 417 Pa \frac{s}{m}$.

Η γενική σχέση που συνδέει τη σωματιδιακή ταχύτητα με την πίεση είναι :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1-5)$$

[15]

Κατά τη διάδοση ενός ηχητικού κύματος μεταδίδεται **ηχητική ενέργεια** η οποία είναι άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας, και η οποία κινητική ενέργεια υπάρχει λόγω της σωματιδιακής ταχύτητας.

Ο ρυθμός μετάδοσης ηχητικής ενέργειας στη μονάδα του χρόνου δίνει την **ηχητική ισχύ** (sound power), W (watt), πρόκειται δηλαδή για ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου :

$$W = \frac{E}{T} \quad (1-6)$$

Ηχητική ένταση (sound intensity), $I (W/m^2)$, ορίζεται ως η μέση ηχητική ισχύς που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας :

$$I = \frac{W}{S} \quad (1-7)$$

Για επίπεδα κύματα, και χρησιμοποιώντας τη σχέση (1-4, $u = \frac{p}{\rho_0 c}$), αποδεικνύεται ότι :

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (1-8)$$

όπου p η ηχητική πίεση, $\rho_0 c$ η ειδική ακουστική εμπίδηση, όπου για τον αέρα είναι $\rho_0 c = 417 Pa \cdot \frac{s}{m}$. Μετρώντας την ηχητική ένταση σε διάφορες κατευθύνσεις γύρω από την πηγή υπολογίζουμε την **κατευθυντικότητα** (directivity), Q, της πηγής. Οι περισσότερες φυσικές ηχητικές πηγές εκπέμπουν ομοιοκατευθυντικά (τουλάχιστον σε μεγάλη απόσταση), εκπέμπουν δηλαδή ηχητικά κύματα που μεταδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Και τέλος, **πυκνότητα ηχητικής ενέργειας** (energy density), w ($Pa \cdot \frac{m}{s}$), είναι η συνολική ηχητική ενέργεια σε ένα σημείο ανεξάρτητα από τη διεύθυνση διάδοσης. Για επίπεδα κύματα αποδεικνύεται :

$$w = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad (1-9)$$

όπου p η ηχητική πίεση και $\rho_0 c$ η ειδική ακουστική εμπέδηση (για τον αέρα είναι $\rho_0 c = 417 Pa \cdot \frac{s}{m}$)

Για την περιγραφή των μεγεθών της πίεσης της ισχύος καθώς και την έντασης του ήχου χρησιμοποιείται μια λογαριθμική μονάδα μέτρησης, εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων στις τιμές. Πρόκειται για το **decibel**, που είναι το δεκαπλάσιο της μονάδας Bel², η οποία περιγράφει το λόγο μεταξύ δύο μεγεθών ($Bel = \log \frac{A_2}{A_1}$). Έτσι

προκύπτουν τα εξής μεγέθη :

Στάθμη Ηχητικής Πίεσης (Sound Pressure Level ή SPL), L_p (dB_{SPL}) :

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (1-10)$$

όπου p η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης (Pa) και p_0 η τιμή αναφοράς (για τον αέρα $p_0 = 20 \mu Pa$).

Στάθμη Ηχητικής Ισχύος (Sound Power Level), L_w (dB) :

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (1-11)$$

όπου W η μέση ηχητική ισχύς (W) και W_0 η τιμή αναφοράς (10^{-12} W)

² Ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του μεγάλου εφευρέτη και πρωτοπόρου ερευνητή της ηλεκτροακουστικής και μετάδοσης σημάτων Graham Bell

Στάθμη Ηχητικής Έντασης (Sound Intensity Level), L_I (dB) :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1-12)$$

όπου I η ηχητική ένταση (W/m^2) και I_0 η τιμή αναφοράς (10^{-12}W/m^2).

Είδη ηχητικών πεδίων

Ο χώρος γύρω από την πηγή μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

1. Κοντινό πεδίο (Near Field)

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του ΕΛΟΤ 556.1 (2.14) κοντινό πεδίο μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου είναι η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου της πηγής στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση.

Για τον καθορισμό της ηχητικής πίεσης λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες όπως οι διαστάσεις, το είδος του υλικού, η γεωμετρία της πηγής κ.ά.

Αν η πρόκειται για σφαιρική πηγή και ισότροπη , η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι δύο μήκη κύματος³ του εκπεμπόμενου ήχου.

2. Μακρινό πεδίο (Far Field)

Ως μακρινό ηχητικό πεδίο μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου ορίζεται η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι ουσιαστικά σε φάση και στην οποία η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι αντίστροφα ανάλογη με την απόσταση από την πηγή. (ΕΛΟΤ 556.1)

³ Σε περίπτωση που το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό η ηχητική πίεση και η σωματιδιακή ταχύτητα μπορεί να είναι σε φάση. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος πλησιέστατο ηχητικό πεδίο (ΕΛΟΤ 556.1)

Το μακρινό ηχητικό πεδίο αρχίζει μετά το κοντινό πεδίο. Στην περιοχή αυτή η στάθμη ηχητικής πίεσης ελαττώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης και η ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακουστικής πίεσης.

Ένα σημείο βρίσκεται στο χώρο του μακρινού πεδίου αν η απόσταση του από την πηγή ικανοποιεί τις σχέσεις:

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg l, \quad r \gg \frac{\pi l^2}{2\lambda}$$

όπου λ το μήκος κύματος του ήχου

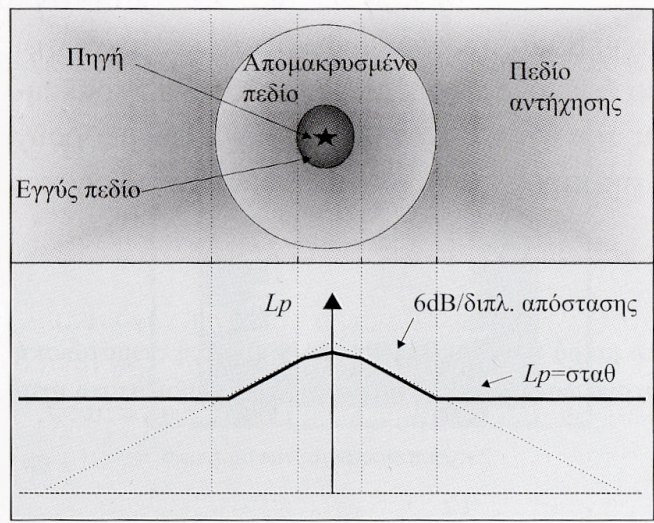
l η μεγαλύτερη διάσταση της πηγής⁴

3. Αντηχητικό πεδίο

Αντηχητικό πεδίο σε ένα ολικά ή μερικά κλειστό χώρο όπου λειτουργεί ηχητική πηγή είναι η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου που προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στις περατωτικές επιφάνειες του χώρου και στην οποία η επίδραση του ήχου που φτάνει κατευθείαν από την πηγή είναι αμελητέα. (ΕΛΟΤ 556.1)

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται τα τρία είδη των πεδίων και η μεταβολή της ηχητικής στάθμης L_p συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

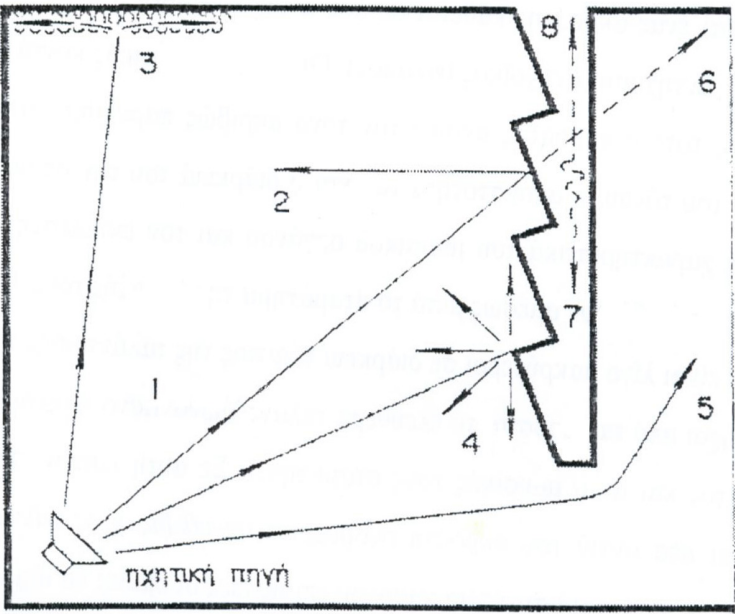
⁴ Σε περίπτωση που το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο, σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με $2a$ (a τυπική διάσταση της πηγής), η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα μπορεί να είναι σε φάση. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται ο όρος από μακρο ηχητικό πεδίο (ΕΛΟΤ 556.1)



Σχήμα 1-2. Είδη πεδίων

Στην περίπτωση του μακρινού πεδίου η στάθμη μειώνεται λόγω της απόστασης αλλά και εξαιτίας της απορρόφησης του χώρου. [1]

Όταν ο ήχος διαδίδεται σε κλειστό χώρο λαμβάνουν χώρα διάφορα φαινόμενα, όπως η απορρόφηση, η ανάκλαση, η διάχυση, η περίθλαση, η διάδοση μέσω του εμποδίου και η διασπορά μέσα στην κατασκευή :



Σχήμα 1-3. Σχηματική απεικόνιση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε κλειστούς χώρους

είας ήχος,

- (2) ανάκλαση,
- (3) απορρόφηση,
- (4) διάχυση,
- (5) περίθλαση,
- (6) διάδοση,
- (7) διασπορά μέσα
στην κατασκευή,
- (8) διάδοση μέσα στην
κατασκευή

Τα φαινόμενα που αναφέρονται πιο πάνω δημιουργούν το ηχητικό πεδίο (sound field) του χώρου. Το είδος του δημιουργούμενου πεδίου από μια πηγή εξαρτάται από την απόσταση από αυτήν καθώς κι από τον χώρο στον οποίο γίνεται η διάδοση. Τα ηχητικά πεδία διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Ελεύθερο Πεδίο (free field) :

Αφορά διάδοση σε χώρο ομοιόμορφο, χωρίς οριακές επιφάνειες που δε διαταράσσεται από άλλες ηχητικές πηγές, στον οποίο η ροή της ενέργειας γίνεται προς μια κατεύθυνση. Ελεύθερο πεδίο μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ένας ανοιχτός εξωτερικός χώρος χωρίς τοίχους και έδαφος ή άλλα ανάλογα εμπόδια.

2. Αντηχητικό Πεδίο (reverberant field) :

Δημιουργείται από τη συμβολή των απευθείας και των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. Σε ένα διάχυτο αντηχητικό πεδίο η πυκνότητα της ηχητικής ενέργειας παραμένει ίδια σε όλα τα σημεία του, και η πιθανότητα ροής της ηχητικής ενέργειας είναι ίση προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντηχητικό πεδίο δημιουργείται σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους, με επιφάνειες μικρής ηχοαπορρόφησης, όπου ο ήχος ανακλάται στους τοίχους.

3. Ημιαντηχητικό Πεδίο (semi-reverberant field) :

Σε ένα τέτοιο πεδίο η ηχητική ενέργεια επιδέχεται τόσο ανάκλαση όσο και απορρόφηση, από ημιανακλαστικά τοιχώματα. Η ροή της ενέργειας γίνεται σε περισσότερες κατευθύνσεις, αλλά σε ορισμένα σημεία του χώρου – κυρίως κοντά στην πηγή - παρουσιάζεται έντονη κατευθυντικότητα. Ημιαντηχητικό πεδίο θεωρούμε ότι έχουμε σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με επιφάνειες με μέτρια ηχοανακλαστικότητα.

Διάκριση χώρων

Ο ήχος όταν διαδίδεται σε κλειστούς χώρους παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά από ότι όταν διαδίδεται σε ανοικτούς χώρους. Η «ακουστική ταυτότητα» που χαρακτηρίζει κάθε χώρο διαμορφώνεται από τις διαστάσεις του, τη γεωμετρία του, τα δομικά υλικά του και από τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται μέσα σε αυτόν κατά την μετάδοση ηχητικού σήματος. Οι χώροι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: οι ανοιχτοί, οι μεγάλοι κλειστοί και οι μικροί κλειστοί χώροι. Στην περίπτωση της ακουστικής μελέτης ενός χώρου λαμβάνονται υπόψιν τα γενικά χαρακτηριστικά του χώρου, αλλά και τυχόν ιδιαιτερότητες του, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η «ακουστική του ταυτότητα».

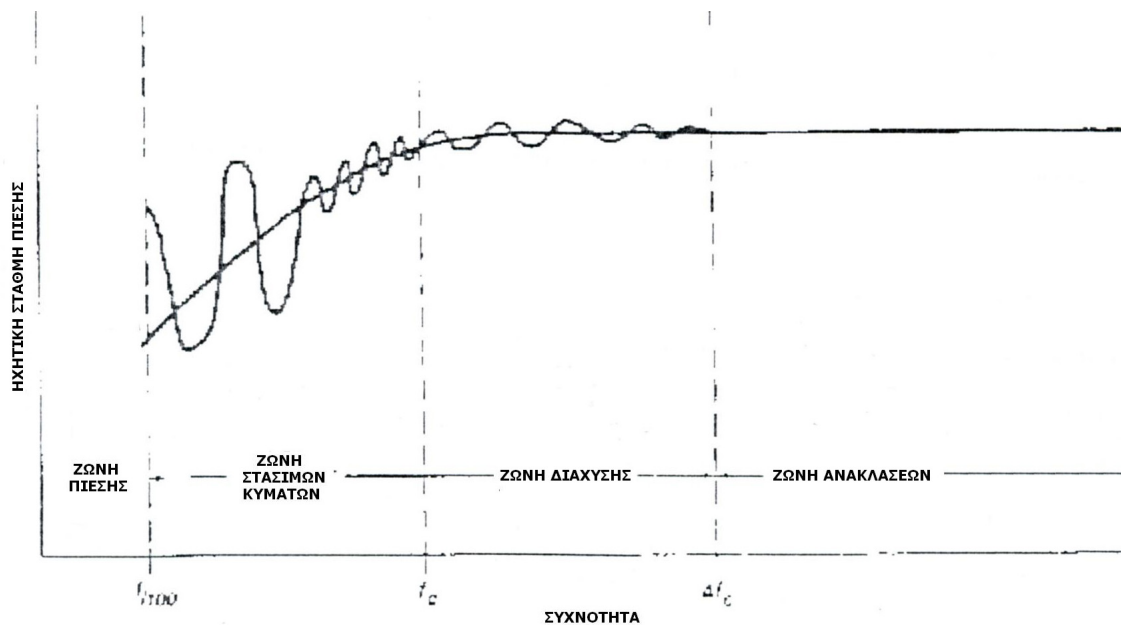
Στη μελέτη ανοικτών χώρων, όπου δεν υπάρχουν εμπόδια- ανακλαστικές επιφάνειες θεωρούμε προσεγγιστικά ότι το πεδίο είναι ελεύθερο. Θεωρώντας ότι η πηγή είναι σημειακή, η πίεση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από την πηγή ισχύει δηλαδή ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου (inverse square law), όπου έχουμε μείωση της στάθμης κατά 6 dB σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης.

Στην περίπτωση που μελετούμε τη διάδοση του ήχου σε κλειστό χώρο, θα πρέπει να λαβουμε υπόψη μας την αλληλεπίδρασή του με αυτόν. Οι κλειστοί χώροι διακρίνονται σε μεγάλους και μικρούς. Η μελέτη των μεγάλων κλειστών χώρων γίνεται με βάση τις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής και της στατιστικής επιστήμης, όπου ο ήχος θεωρείται σαν μια ακτίνα που διαδίδεται και όταν προσπίπτει σε μια επιφάνεια ανακλάται ή απορροφάται. Στους μικρούς κλειστούς χώρους όπου τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα, προσεγγίζουμε τη συμπεριφορά του ήχου με τις αρχές της κυματικής ακουστικής, όπου ο ήχος μελετάται σαν κύμα.

Η διάκριση των κλειστών χώρων σε μεγάλους και μικρούς γίνεται με κριτήριο τη *συχνότητα αποκοπής* (cut-off frequency), η οποία ορίστηκε από τον Schroeder. Πρόκειται για τη συχνότητα πάνω από την οποία δημιουργείται τόσο μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων ώστε το δωμάτιο συμπεριφέρεται πρακτικά ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες. Υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (1-13)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης (sec) και V ο όγκος του δωματίου (m^3).



Σχήμα 1-4. Διάγραμμα Bolt, Beranek και Neumann, ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου

Οι Bolt, Beranek , Newman δημιούργησαν ένα διάγραμμα το οποίο φέρει την ονομασία «ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», και το οποίο παρουσιάζει το διαχωρισμό της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή διαφορετικά το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου.

Σύμφωνα με το πιο πάνω διάγραμμα έχουμε διαχωρισμό του ακουστικού φάσματος σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές :

1. Ζώνη πίεσης (pressure zone/ cut off region): για $f \leq f_{\min}$, όπου $f_{\min} = \frac{c}{2 \cdot L_{\max}}$

Αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού, δηλαδή στην περιοχή όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου.

2. Ζώνη των στάσιμων (modal zone): για $f_{\min} \leq f \leq f_c$, όπου f_c η συχνότητα αποκοπής

Αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου, και συγκεκριμένα στην περιοχή ανάμεσα στην κατώτατη συχνότητα συντονισμού, f_{\min} , και συχνότητα αποκοπής f_c . Στην περιοχή αυτή εφαρμόζουμε τις αρχές της Κυματικής Ακουστικής.

3. Ζώνη διάχυσης (diffusion zone): $f_c \leq f \leq 4 \cdot f_c$

Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της ζώνης στασίμων και της ζώνης ανακλάσεων. Πρόκειται για μια δύσκολη συχνотική περιοχή, γιατί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της γεωμετρικής ακουστικής και της στατιστικής εφόσον εμφανίζονται ακόμη έντονοι συντονισμοί, αλλά και αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή των αρχών της κυματικής ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.

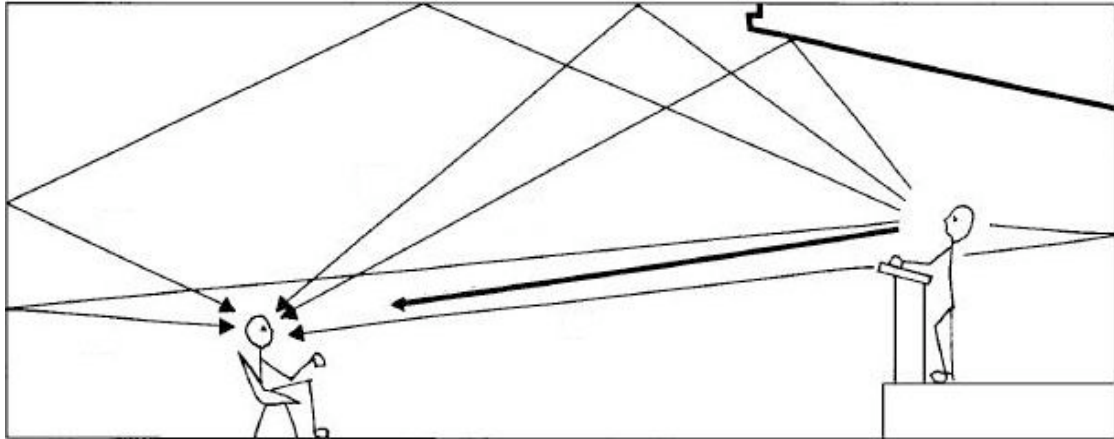
4. Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone): $f \geq 4 \cdot f_c$

Σε αυτή τη ζώνη τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν, επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις, ο ήχος διαδίδεται σε ευθείες – ακτίνες και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

[19]

Κλειστοί χώροι

Το κύριο χαρακτηριστικό των κλειστών χώρων είναι η *αντήχηση* (reverberation), δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο το ηχητικό πεδίο διατηρείται μετά από το σταμάτημα της ηχητικής πηγής που το δημιούργησε. Ακούμε τον ήχο κατευθείαν από την πηγή και έπειτα από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα ο ήχος αυτός επιστρέφει πάλι σε εμάς αφού έχει ήδη ανακλαστεί σε διάφορες επιφάνειες. Η αντήχηση του χώρου επηρεάζεται σαφώς από τις διαστάσεις του χώρου, τη γεωμετρία του και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένες όλες οι επιφάνειες του.



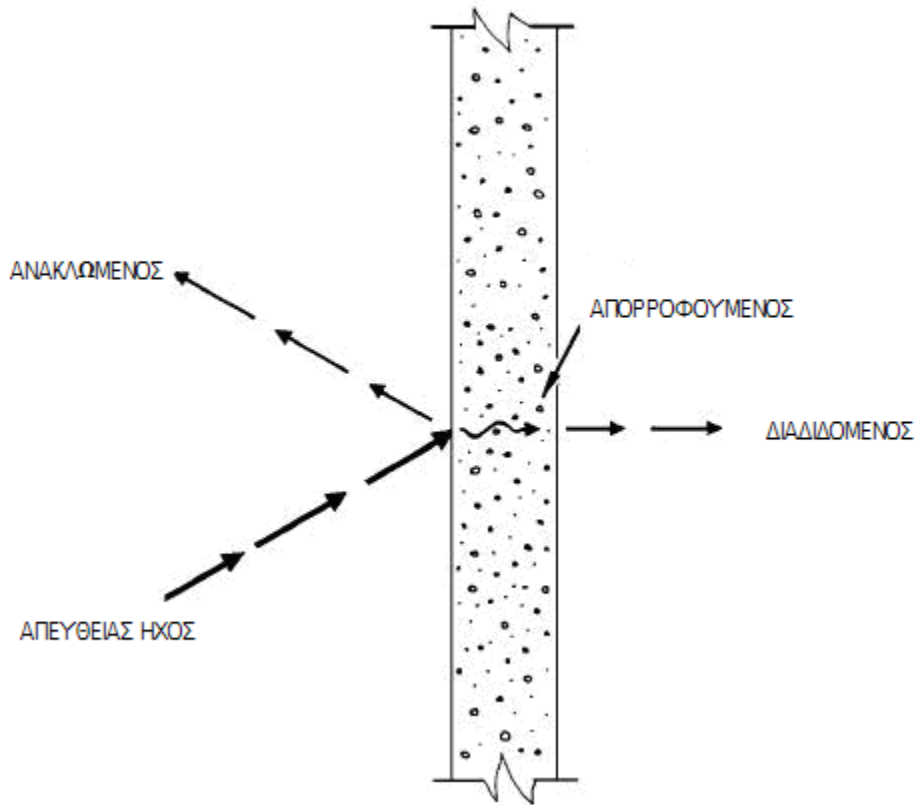
Σχήμα 1-5 (α). Φαινόμενο αντήχησης (Ο απευθείας ήχος, απεικονίζεται με έντονο βέλος, και πρώτες ανακλάσεις)

Μεγάλοι κλειστοί χώροι

Το ηχητικό πεδίο σχηματίζεται από το συνδυασμό του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν έναν μεγάλο κλειστό χώρο είναι η απορρόφηση, ο χρόνος αντήχησης και η κρίσιμη απόσταση.

Απορρόφηση (Absorption, A) : Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ένα ποσοστό της ενέργειάς του ανακλάται, ένα άλλο απορροφάται από το υλικό καθώς ένα τρίτο συνεχίζει να διαδίδεται. Για τη ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης του κάθε υλικού στην αντήχηση ενός χώρου, έχει οριστεί ο συντελεστής απορρόφησης, α , του υλικού ο οποίος ισούται με το λόγο της ηχητικής ενέργειας που απορροφάται από το υλικό (W_a) ως προς την ηχητική ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά του (W_d) :

$$\alpha = \frac{W_a}{W_d} \quad (1-14)$$



Σχήμα 1-5 (β). Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του ήχου κατά την πρόσπτωση σε επιφάνεια

Συνελεστής μέσης ηχοαπορρόφησης (\bar{a}) : Πρόκειται για το λόγο του αθροίσματος των γινομένων της κάθε επιφάνειας επί τον συνελεστή απορρόφησης αυτής, ως προς το άθροισμα των επιφανειών

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 + \dots + a_n s_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n} \quad (1-15)$$

όπου s_1, s_2, \dots, s_n το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας και a_1, a_2, \dots, a_n οι αντίστοιχοι συντελεστές ηχοαπορρόφησης κάθε υλικού.

Σταθερά δωματίου (R) : Προκύπτει από το μέσο συνελεστή ηχοαπορρόφησης και υπολογίζεται από τον τύπο⁵:

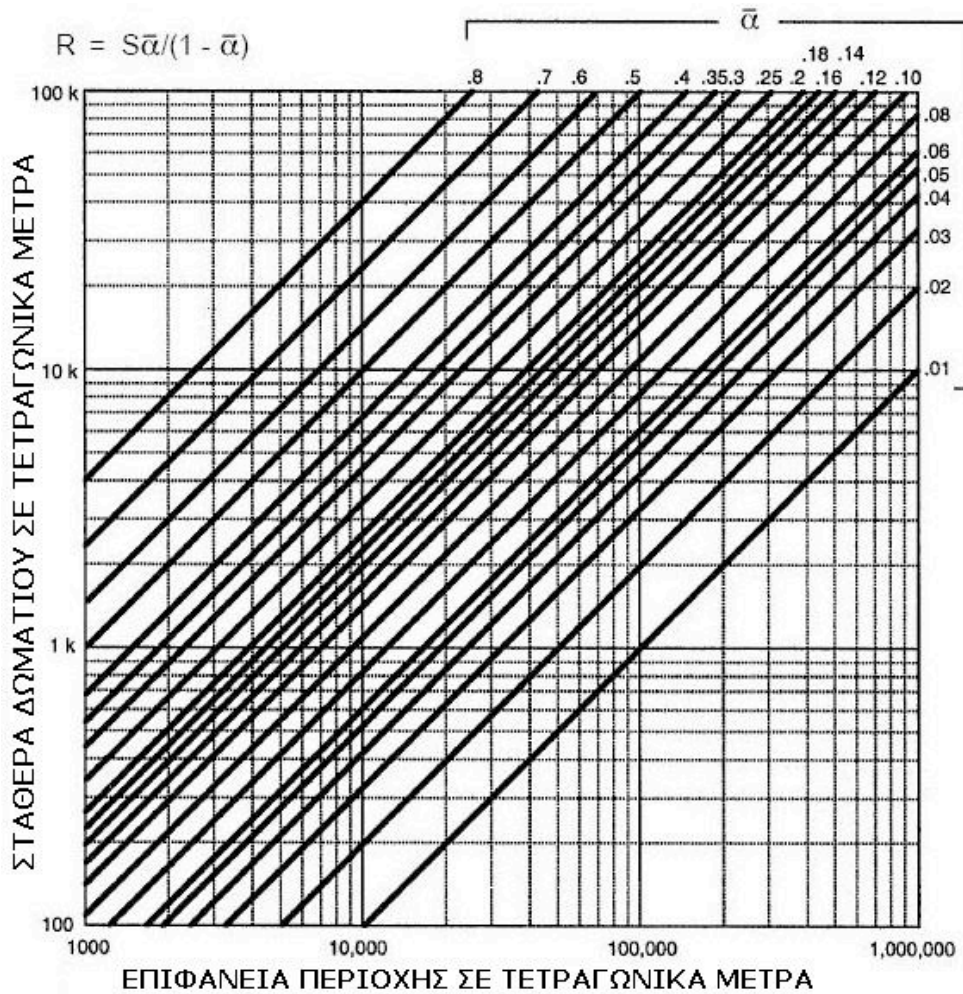
⁵ Για την απόδειξη του τύπου βλπ [1] σελ.171

$$R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}} \quad (1-16)$$

όπου S η ολική επιφάνεια του χώρου (m²).

Τέλος, το γινόμενο $S\bar{a}$ ονομάζεται **απορρόφηση** (absorption, A) του χώρου και ισχύει :

$$A = S\bar{a} = a_1S_1 + a_2S_2 + \dots + a_nS_n \quad (1-17)$$



Σχήμα 1-6. Σταθερά δωματίου σε σχέση με την επιφάνεια του δωματίου και το συντελεστή μέσης ηχητικής απορρόφησης

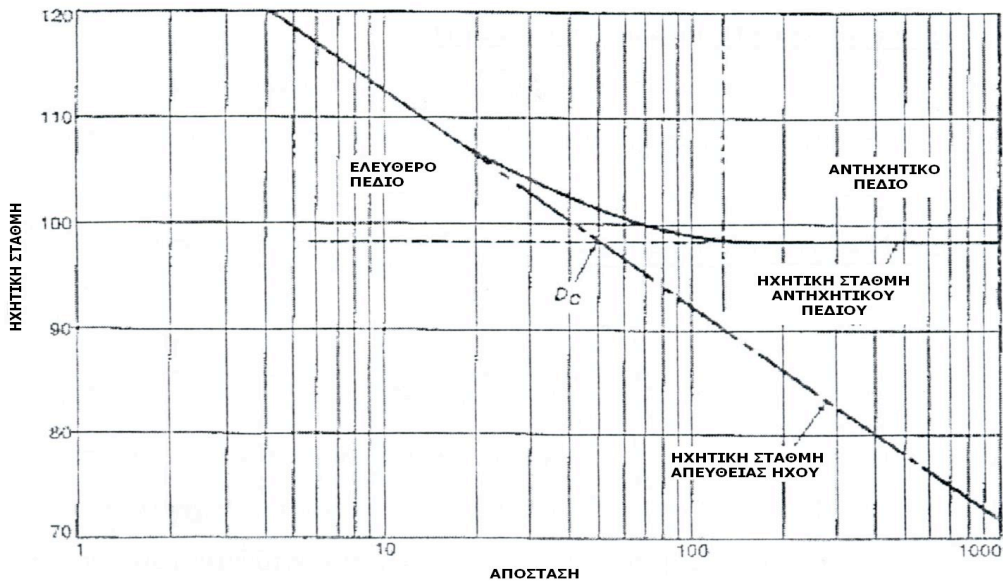
Η πιο πάνω σχέση ισχύει όταν οι διαστάσεις του χώρου είναι σχετικά μικρές και η απορρόφηση του χώρου από τον αέρα είναι αμελητέα. Στη περίπτωση μεγάλων χώρων, όπου η απορρόφηση του αέρα είναι σημαντική, η σταθερά δωματίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_c = \frac{s\bar{a}_T}{1 - \bar{a}_T} \quad (1-18)$$

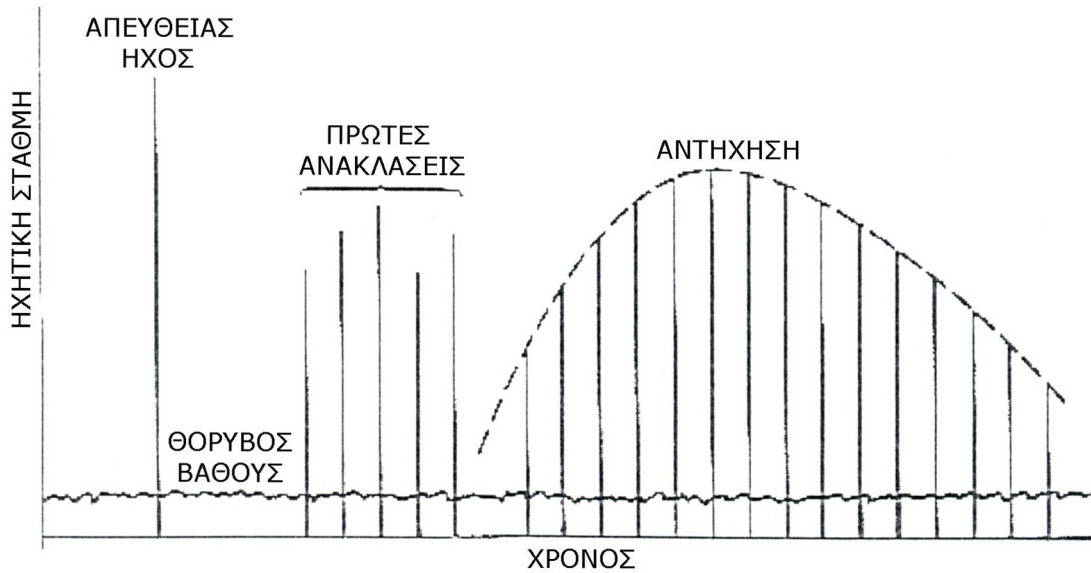
όπου $\bar{a}_T = \bar{a} + m \frac{4V}{s}$

με \bar{a} το μέσο συντελεστή απορρόφησης, s το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας και V ο όγκος της αίθουσας

Κρίσιμη Απόσταση (critical distance, d_c) : Το ηχητικό πεδίο, σχηματίζεται από το συνδυασμό του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου. Κοντά στη πηγή υπερσχύει το πρώτο, ενώ πιο μακριά το δεύτερο. Κρίσιμη απόσταση ονομάζεται το σημείο στο οποίο η πυκνότητα ενέργειας μεταξύ του απευθείας ήχου και αντηχητικού πεδίου είναι ίση.



Σχήμα 1-7. Ελεύθερο, αντηχητικό πεδίο και κρίσιμη απόσταση



Σχήμα 1-8. Ακουστική απόκριση χώρου, στάθμη ηχητικής πίεσης σε συνάρτηση με το χρόνο

Μικροί κλειστοί χώροι

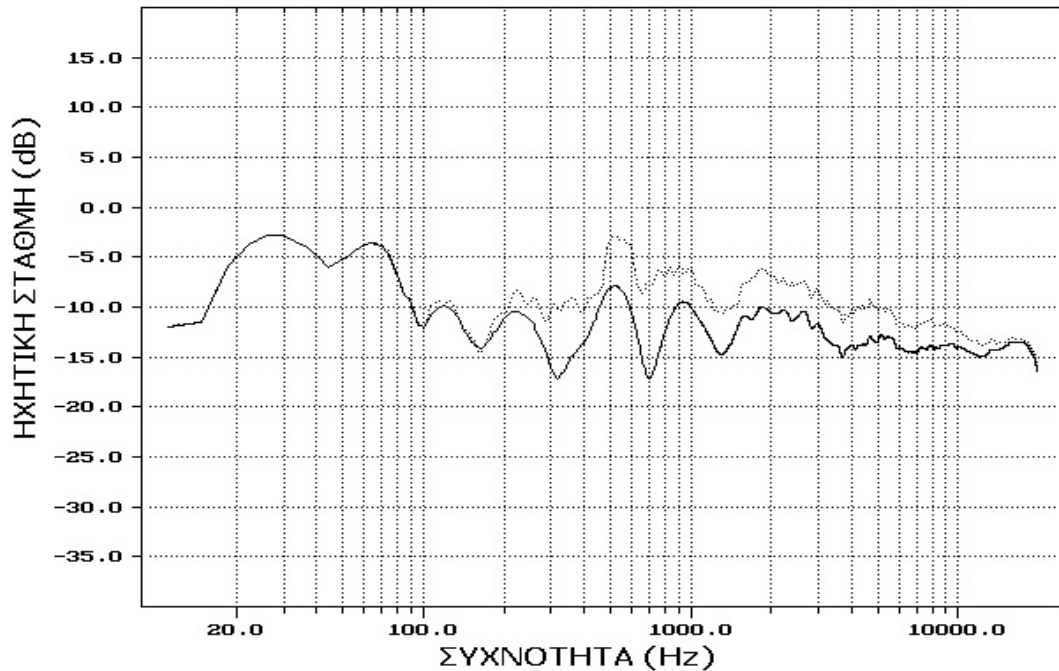
Σε χώρους με διαστάσεις συγκρίσιμες προς το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου ήχου, υπάρχει έντονο το φαινόμενο δημιουργίας στάσιμων κυμάτων έτσι η ηχητική ένταση διαφέρει κατά πολύ από σημείο σε σημείο. Σε αυτή την περίπτωση, το ηχητικό πεδίο περιγράφεται από την παρακάτω λύση της κυματικής εξίσωσης :

$$p_{\omega t} = \frac{j\omega\rho q}{4\pi|r-r_0|} e^{j\omega\left(t-\frac{r-r_0}{c}\right)} + \rho c^2 \sum_0^{\infty} \frac{q\omega}{V\Lambda_n} \frac{\Psi_n(r)\Psi_n(r_0)}{2\omega_n\xi_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)} e^{j\omega t} \quad (1-19)$$

όπου ω η συχνότητα της πηγής, ω_n η συχνότητα συντονισμού του στάσιμου κύματος, ρ η πυκνότητα του αέρα, q η ηχητική δύναμη της πηγής, r το διάνυσμα του σημείου του χώρου που μελετάται, r_0 η θέση της ηχητικής πηγής στο χώρο, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα, Ψ_n η κανονική συνάρτηση (όπου $\Psi_n(r) = A_n \cos\left(\frac{n_x\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z\pi z}{L_z}\right)$)

στο σημείο Γ και για παραλληλεπίπεδο χώρο), Λ_n παράγοντας κλίμακας που ορίζεται από κάθε στάσιμο κύμα και ζ_n η «αντίσταση» του νιοστού (n) στάσιμου κύματος.

Η λύση της εξίσωσης είναι πολύπλοκη και εφαρμόζεται με τη βοήθεια λογισμικών προγραμμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, που κάνουν χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τη σχεδίαση του ηχητικού πεδίου.



Σχήμα 1-9. Συχνотική απόκριση δωματίου, στις συχνότητες που παρουσιάζονται κορυφές δημιουργούνται στάσιμα κύματα

Τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται σε έναν κλειστό χώρο διακρίνονται σε τρία είδη :

- **Αξονικά (axial)** τα οποία δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ δύο απέναντι επιφανειών. Περιέχουν τη μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια του αντηχητικού πεδίου και είναι αυτά που συνήθως, σε μια πρώτη προσέγγιση ενδιαφέρουν τους μηχανικούς ήχου.

- **Εφαπτομενικά (tangential)** που δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ τεσσάρων επιφανειών (τοίχοι στο ίδιο επίπεδο). Ενεργειακά έχουν τη μισή ενέργεια σε σχέση με τα αξονικά επομένως είναι κατά 3 dB ασθενέστερα.
- **Πλάγια (oblique)** που δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ οκτώ επιφανειών δηλαδή από όλους τους τοίχους του δωματίου. Η ηχητική τους ενέργεια είναι το 1/4 της αντίστοιχης των αξονικών στάσιμων κυμάτων επομένως 6 dB μικρότερη.

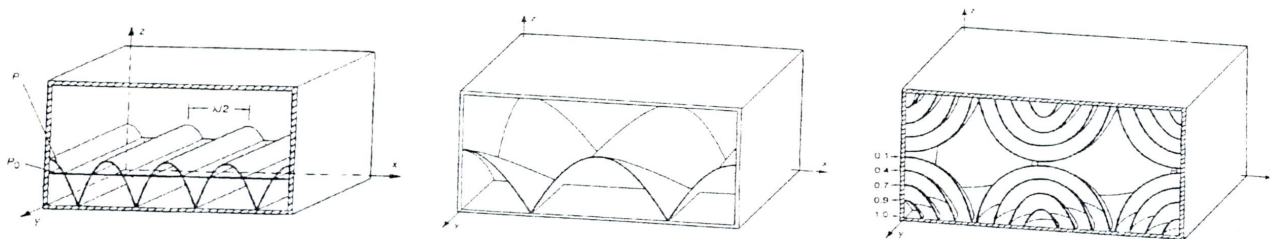
Αριθμός στάσιμων ανά συχνότητα

$$N \approx \left[\frac{4\pi Vf^3}{c^3} + \frac{\pi Sf^2}{4c^2} + \frac{Lf}{8c} \right] \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (1-20)$$

όπου V ο όγκος του δωματίου, S η συνολική επιφάνεια του δωματίου [$2(L_x L_y + L_y L_z + L_x L_z)$], f η συχνότητα, c η ταχύτητα του ήχου, N ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων

Αριθμός στάσιμων κυμάτων εύρους συχνοτήτων (Δf) κεντραρισμένο στη συχνότητα f

$$\Delta N \approx \left[\frac{4\pi Vf^3}{c^3} + \frac{\pi Sf^2}{2c^2} + \frac{Lf}{8c} \right] \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (1-21)$$



Σχήμα 1-10. Αξονικό, εφαπτομενικό και πλάγιο στάσιμο κύμα αντίστοιχα

Τέλος, στους μικρούς χώρους και στην περιοχή των στάσιμων κυμάτων (στις χαμηλές συχνότητες) συνήθως μετριέται η συχνοτική απόκριση του δωματίου και υπολογίζεται ο

ρυθμός πτώσης (mode decay rate) κάθε στάσιμου κύματος, δηλαδή ο ρυθμός μείωσης σε dB/sec. Η σχέση του με το χρόνο αντήχησης είναι :

$$d = \frac{60}{RT_{60}} \quad (1-22)$$

Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με τους μεγάλους κλειστούς χώρους η περιγραφή που έγινε για τους μικρούς κλειστούς χώρους ήταν συνοπτική. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία για περισσότερες λεπτομέρειες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ

2.1 Κατανόηση λόγου

Σε μία αίθουσα διαλέξεων είτε σε ένα θέατρο είναι πολύ σημαντική η καταληπτότητα ομιλίας (speech intelligibility), δηλαδή η ικανότητα να μεταφέρεται το σήμα ομιλίας καθαρά και κατανοητά σε όλους τους ακροατές. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανόηση του λόγου αφορούν τον «ακουστικό χαρακτήρα» του χώρου, τα ηχητικά χαρακτηριστικά του λόγου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο.

Οι παρακάτω παράγοντες επηρεάζουν την καταληπτότητα ομιλίας:

- συχνοτικό εύρος
- ένταση του ήχου και λόγος σήματος προς θόρυβο
- χρόνος αντήχησης, πρώτες ανακλάσεις και λόγος ελεύθερου προς αντηχητικό πεδίο
- ηχώ και καθυστερημένες ανακλάσεις
- ομοιομορφία κάλυψης⁶
- άρθρωση ομιλητή και ταχύτητα ομιλίας

Παράγοντες επιρροής :

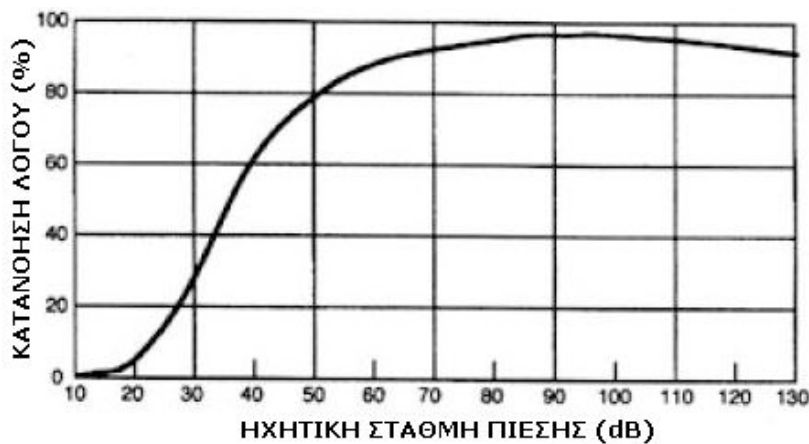
ι. Συχνοτικό Εύρος (bandwidth) : Το εύρος συχνοτήτων της ομιλίας κυμαίνεται μεταξύ 100 και 8000 Hz, παρόλο που υψηλότερες συχνότητες μέχρι και τα 12 kHz επηρεάζουν την ποιότητά του. Τα φωνήεντα αποτελούνται από χαμηλές συχνότητες, ενώ τα σύμφωνα που παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην κατανόηση της ομιλίας αποτελούνται από υψηλότερες και ασθενέστερες συχνότητες. Η οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα 2 kHz είναι σημαντική στην κατανόηση του λόγου και σε μικρότερο ποσοστό οι οκτάβες στα 4 kHz και 1 kHz .

⁶ Στην περίπτωση που έχουμε σύστημα ενίσχυσης του σήματος ομιλίας, οι παράγοντες αυτοί συμπεριλαμβάνουν την απόκριση συχνότητας του συστήματος, ομοιομορφία κάλυψης (περισσότερες λεπτομέρειες βλπ. [19])



Σχήμα 2-1. Συχνοτική περιοχή και κατώφλι ακουστότητας για τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου

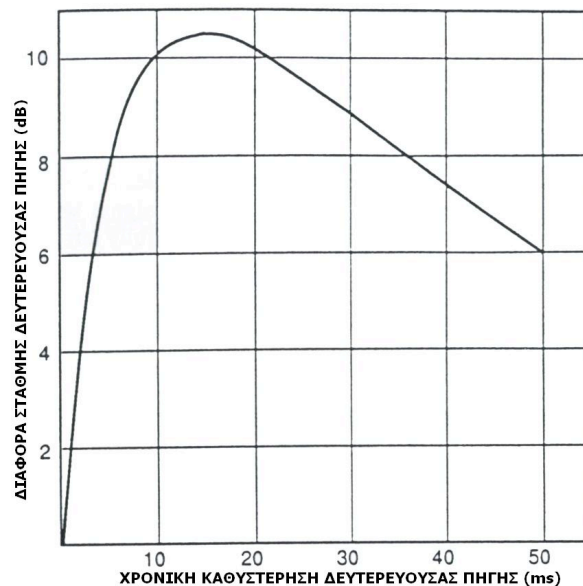
ii. Ένταση Του Ήχου και Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο (loudness and signal to noise ratio) : Στην περίπτωση που το σήμα ομιλίας δεν ενισχύεται από κάποιο αντίστοιχο σύστημα, η στάθμη έντασης του ήχου δεν υπερβαίνει τα 65 dB για κανονική ομιλία (75 dB όταν ο ομιλητής μιλάει δυνατά). Έτσι, πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανόηση του λόγου έχει η στάθμη του θορύβου βάθους εφόσον καθορίζει την τιμή του λόγου του σήματος ως προς θόρυβο.



Σχήμα 2-2. Η επίδραση της στάθμης ηχητικής πίεσης στην κατανόηση του λόγου

iii. Χρόνος Αντήχησης, Πρώτες Ανακλάσεις και Λόγος Ελεύθερου Προς Αντηχητικό Πεδίο (reverberation time, early reflections and direct to reverberant ratio) : Η αντήχηση του χώρου επηρεάζει την κατανόηση του λόγου. Αυτό εξαρτάται από το χρόνο αντήχησης και από την ένταση του αντηχητικού πεδίου. Είναι δυνατό κατά την ομιλία κάποιες συλλαβές, λόγω αντήχησης, να επιμηκύνονται σε διάρκεια έτσι που να καλύπτουν άλλες, με αποτέλεσμα να χάνονται λέξεις αλλά και να καταστρέφεται η ροή του λόγου. Το ποσοστό εξαρτάται από το λόγο του αθροίσματος του ελεύθερου πεδίου και των πρώτων ανακλάσεων προς το άθροισμα των καθυστερημένων ανακλάσεων και του αντηχητικού πεδίου, θεωρώντας ότι ο θόρυβος βάρους δεν επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό. Είναι επιθυμητό ο λόγος αυτός να έχει θετική τιμή.

iv. Ηχώ και Καθυστερημένες Ανακλάσεις (echoes and late reflections) : Σύμφωνα με το φαινόμενο Haas, υπό συγκεκριμένες συνθήκες καθυστερημένες ανακλάσεις που φτάνουν μετά από τον αρχικό απευθείας ήχο μπορεί στην πραγματικότητα να είναι μεγαλύτερης έντασης από αυτόν, χωρίς όμως να επηρεάζουν τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Επίσης, δευτερεύοντες ήχοι που φτάνουν με καθυστέρηση της τάξης των 30 – 35 ms σε σχέση με τον αρχικό ήχο, συγχωνεύονται με αυτόν δημιουργώντας έναν ήχο με μεγαλύτερη ένταση.

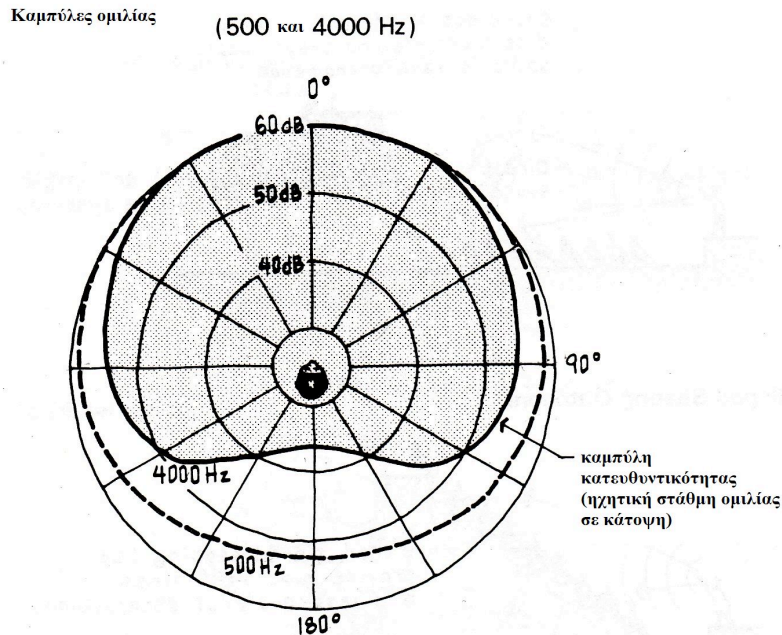


Σχήμα 2-3. Καμπύλη που περιγράφει το φαινόμενο Haas

Επίσης, από τη μελέτη του Haas προκύπτει ότι δευτερεύοντες ήχοι έντασης 10 dB χαμηλότερα από τον αρχικό απευθείας ήχο επηρεάζουν την κατανόηση λόγου σε μικρό ποσοστό, παρόλο που στους ακροατές ακούγονται καθαρά σαν ηχώ. Η μελέτη όμως, αναφέρεται σε μια επανάληψη του ήχου. Αντίθετα, σε μεγάλους και έντονα αντηχητικούς χώρους ο αριθμός των επαναλήψεων μεγαλώνει και ενώνεται με το πρωτεύον σήμα, μειώνοντας κατά πολύ την ευκρίνεια του λόγου.

v. Ομοιομορφία Κάλυψης (uniformity of coverage) : Σε ένα έντονα αντηχητικό πεδίο, διαφοροποίηση της τάξης των $\pm 3\text{dB}$ στην ένταση του ήχου μπορεί να προκαλέσει αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στην κατανόηση του λόγου σε ποσοστό 20 με 40%.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η κατευθυντικότητα της ανθρώπινης ομιλίας.



Σχήμα 2-4. Καμπύλη κατευθυντικότητας ομιλίας

vi. Άρθρωση Ομιλητή και Ταχύτητα Ομιλίας (talker articulation and rate of delivery) : Πλέον σημαντικός παράγοντας στην κατανόηση του λόγου, όπως είναι φυσικό, είναι ο ίδιος ο ομιλητής. Ένας ομιλητής με καλή άρθρωση μπορεί να μειώσει την κατανόηση λόγου κατά ποσοστό 2 με 3%, ενώ κάποιος άλλος με κακή άρθρωση έως και 12.5%. Στην περίπτωση που η ταχύτητα ομιλίας του ομιλητή μειώνεται λίγο πιο κάτω από τη φυσιολογική, παρατηρείται σημαντική βελτίωση. Επίσης, βελτίωση που αγγίζει ακόμα και το ποσοστό του 50% έχουμε όταν οι ακροατές μπορούν να δουν τα χείλη του ομιλητή, κάτι ωστόσο στο οποίο μειονεκτεί ένα σύστημα ανακοινώσεων.

2.2 Δείκτες μέτρησης υποκειμενικών ποσοτήτων

Για την εκτίμηση των υποκειμενικών ποσοτήτων που αφορούν λόγο (διαλέξεις, θεατρικές παραστάσεις) είτε μουσική (όπερα, συναυλίες μικρών συνόλων είτε

ολόκληρης συμφωνικής ορχήστρας, εκκλησιαστική μουσική) χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες μέτρησης σύμφωνα με τις διατάξεις του ISO 3382⁷

Οι δείκτες αυτοί είναι:

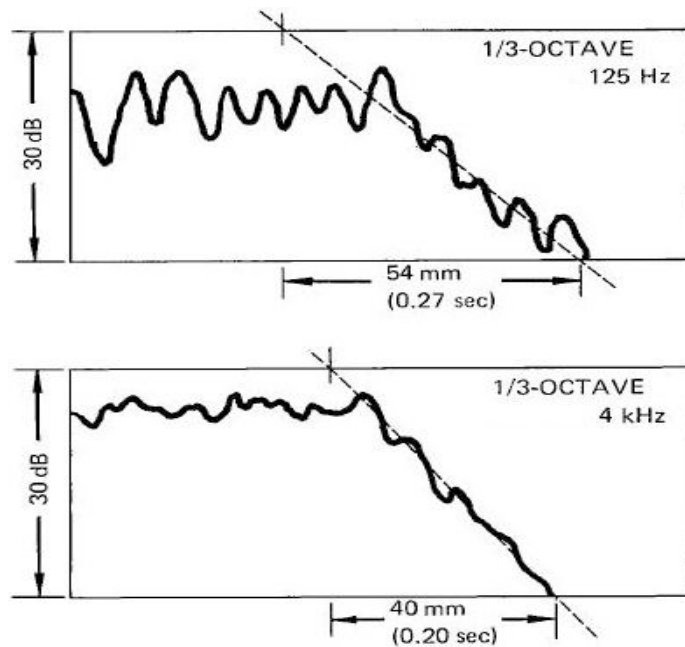
- RT reverberation time
- EDT early decay time
- G sound strength
- C₈₀, C₅₀ balance between early and late arriving energy
- LF early lateral energy measure
- IACC inter-aural cross correlation

Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time, RT₆₀):

Χρόνος αντήχησης ενός ολικά ή μερικά κλειστού χώρου, όπου λειτουργεί μια ηχητική πηγή, είναι ο χρόνος που απαιτείται, μετά από το απότομο σταμάτημα της ηχητικής πηγής, για να ελαττωθεί η στάθμη της ηχητικής πίεσης κατά 60dB. Συμβολίζεται με RT και εκφράζεται σε δευτερόλεπτα (seconds). [16]

Πρόκειται για μια μέτρηση που εκφράζει το πόσο γρήγορα φθίνει η ηχητική ενέργεια. Το ISO 3382 αφορά δωμάτια και αναφέρει τη χρήση μιας παντοκατευθυντικής (omni-directional) ηχητικής πηγής και ενός παντοκατευθυντικού (omni-directional) μικροφώνου για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης. Η πηγή τοποθετείται στη σκηνή και το μικρόφωνο τοποθετείται σε διαδοχικές θέσεις ακρόασης. [40]

⁷ “Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters”



Σχήμα 2-5. Πραγματική μέτρηση χρόνου αντήχησης δωματίου σε δυο διαφορετικές συχνότητες

Ο εμπειρικός τύπος του Sabine (1885) είναι :

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S \bar{a}} \quad \text{για } \alpha < 0.1 \quad (2-1)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα

$S\bar{a}$ η συνολική απορρόφηση σε sabins με \bar{a} το μέσο συντελεστή απορρόφησης

$$\bar{a} = \frac{a_1S_1 + a_2S_2 + \dots + a_nS_n}{S_1 + S_2 + S_3 \dots S_n} \quad (2-2)$$

όπου a οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης

S οι αντίστοιχες επιφάνειες

Ο χρόνος αντήχησης για τον ίδιο χώρο εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και για το λόγο αυτό ορίζεται για τις κεντρικές συχνότητες κάθε οκτάβας. Όταν δεν προσδιορίζεται η συχνότητα ο χρόνος αντήχησης δίνεται για την κεντρική συχνότητα των 500 Hz.

Ο τύπος των **Norris / Eyring** είναι :

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1-a)} \quad \text{για } a > 0.1 \quad (2-3)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα

$\bar{S}a$ η συνολική απορρόφηση σε sabins

με \bar{a} το μέσο συντελεστή απορρόφησης

$$\bar{a} = \frac{a_1 S_1 + a_2 S_2 + \dots + a_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 \dots S_n}$$

όπου a οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης

S οι αντίστοιχες επιφάνειες

Χρόνος αντήχησης RT_{60} - Fitzroy (1950) :

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης απορρόφησης, δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μια ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών όπως υαλοπίνακες, για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S^2} \cdot \left(2 \frac{xy}{a_{xy}} + 2 \frac{xz}{a_{xz}} + 2 \frac{yz}{a_{yz}} \right) \quad (2-4)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα

a ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

S η ολική επιφάνεια του δωματίου

Χρόνος αντήχησης για δωμάτια όπου ο αέρας είναι σημαντικός :

Στην περίπτωση που ο χώρος είναι υπερβολικά μεγάλος (π.χ. εκκλησίες, αίθουσες συναυλιών, θέατρα) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απορρόφηση του αέρα.

Ο τύπος που χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι :

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{\bar{S}a + 4mV} \quad (2-5)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα

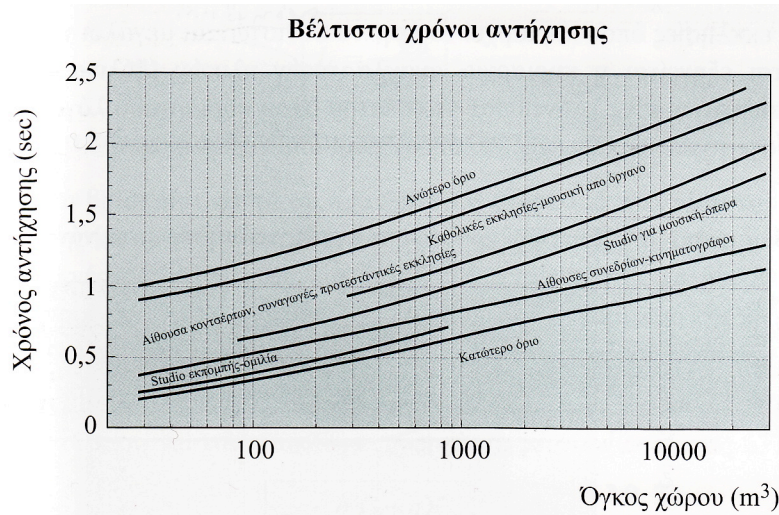
V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα

\bar{a} ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

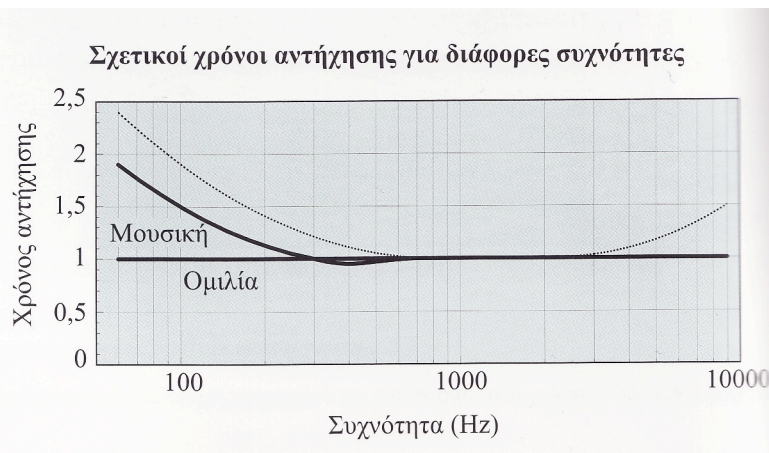
S η ολική επιφάνεια του δωματίου

m ο συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας που η τιμή του εξαρτάται από τη συχνότητα και την υγρασία

[18]



Σχήμα 2-6. Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για διάφορους χώρους κατά τον Beranek
Ο χρόνος αντήχησης είναι η πιο σπουδαία παράμετρος για το χαρακτηρισμό της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου και υπολογίζεται μετρώντας τη χρονική απόκριση του χώρου σε παλμική διέγερση. Οι μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης περιγράφονται στους κανονισμούς ISO 3382-1975 (E)



Σχήμα 2-7. Σχετικοί χρόνοι αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με τον RT_{60} στα 500 Hz, κατά τον Beranek (διακεκ. γραμμή – κατά τον MacNair)

Αρχικός Χρόνος Μείωσης του Ηχητικού Πεδίου (Early Decay Time, EDT) :

Το μέγεθος αυτό είναι συγγενές προς το χρόνο αντήχησης. Υπολογίζεται με βάση το ρυθμό μείωσης των πρώτων 10 dB. Σε ένα χώρο με διάχυτο πεδίο ταυτίζεται με το χρόνο αντήχησης. Έρευνες με ψυχομετρικά τεστ αποδεικνύουν ότι ο EDT σχετίζεται περισσότερο με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης.

Ο χρόνος αντήχησης όπως και ο αρχικός χρόνος μείωσης υπολογίζονται από την αντίστροφη ολοκλήρωση του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης του χώρου (μέθοδος Schroeder)

Ηχηρότητα (Sound Strength, G) :

Ο δείκτης αυτός σχετίζεται άμεσα με την ακουστότητα μιας ηχητικής πηγής (π.χ. οργήστρα) που τοποθετείται σε μια αίθουσα.

Ορίζεται ως ο δεκαδικός λογάριθμος του λόγου του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης ως προς το τετράγωνο της ηχητικής πίεσης μετρούμενης σε ελεύθερο πεδίο, σε απόσταση 10 m από την πηγή.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p_{10}(t)|^2 dt} \quad \text{dB} \quad (2-6)$$

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση)

$p_{10}(t)$: η ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) όταν η πηγή και ο δέκτης έχουν απόσταση 10 μέτρων μεταξύ τους. [13]

Κατά τον Barron ,

G = Total Sound Level or Loudness

Δηλαδή η συνολική ηχητική στάθμη μείον την ηχητική στάθμη του απευθείας ήχου σε απόσταση 10 m από την πηγή. [5]

$$G = 10 \log(p^2_{tot}) - 10 \log(p^2_{10}) \quad (2-7)$$

Όπου p_{10} : η ηχητική πίεση (rms) για απευθείας ήχο σε απόσταση 10 μέτρα από την πηγή, σε Pa

p_{tot} : η συνολική ηχητική πίεση (rms), σε Pa [39]

Προτεινόμενες τιμές

Για συναυλίες συμφωνικής ορχήστρας, η συνολική ηχητική στάθμη σε όλες τις θέσεις (όσον αφορά τις κεντρικές συχνότητες 125 Hz μέχρι 4000 Hz) πρέπει να ανέρχεται πέραν των 0dB ενώ εάν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι οκταβικές μπάντες με κεντρικές συχνότητες 500 Hz και 1000 Hz η τιμή του G θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5.5 dB. Για θέατρα και αίθουσες διαλέξεων η τιμή του G θα πρέπει να υπερβαίνει τα 0dB.

[5]

Διαύγεια (Clarity/ Klarheitmass, C-):

Clarity C_x , early-to-late ratio (Δείκτης πρώιμης προς όψιμη ενέργεια) για μουσική ($x=80\text{ms}$) και για ομιλία ($x=50\text{ms}$). Η διαύγεια αφορά την ισορροπία μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων προς το συνολικό ηχητικό πεδίο λόγω αντήχησης.

Χαρακτηρίζει την υποκειμενική διαφάνεια (subjective transparency) είτε την καταληπτότητα ομιλίας (speech intelligibility), αντίστοιχα.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80\text{ms}} |p(t)|^2 dt}{\int_{80\text{ms}} |p(t)|^2 dt} \text{ dB} \quad (2-8)$$

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} |p(t)|^2 dt}{\int_{50\text{ms}} |p(t)|^2 dt} \text{ dB} \quad (2-9)$$

[13]

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση)

Διαύγεια C_{80} κατά τον Barron :

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\text{ηχητική ενέργεια στα πρώτα } 80ms}{\text{ηχητική ενέργεια μετά τα } 80ms} \right) \text{ dB} \quad (2-10)$$

[5]

Η σχέση που συνδέει την Διακριτότητα (D) με την Διαύγεια (C_{50}) είναι :

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (2-11)$$

[13]

Ο δείκτης C_{50} εκφράζει τη διαύγεια ομιλίας και είναι αντίστοιχος με την διακριτότητα D_{50} . Ορίζεται ως εξής:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\text{ηχητική ενέργεια στα πρώτα } 50ms}{\text{ηχητική ενέργεια μετά τα } 50ms} \right) \quad (2-12) \quad [5]$$

Αναφορά στο δείκτη C_{80} γίνεται στο ISO3382 [40]

Προτεινόμενες τιμές

Διεθνώς αποδεκτές προδιαγραφές ακουστικής χώρου ορίζουν ως κριτήριο διαύγειας ομιλίας

C_{50} για κινηματογράφο: από 3dB ως 4dB

C_{50} για αίθουσα πολλαπλών χρήσεων: από 0dB έως 4dB

[2]

C_{80} κονσέρτα: από -1dB έως +3dB

C_{80} όπερα: από 0dB έως +2dB

C_{80} λαϊκή μουσική: από -2dB έως +6dB

[2]

C_{80} θέατρα: από -1dB έως +3dB

[4]

Προτεινόμενες τιμές κατά των Barton

Για κονσέρτα συμφωνικής ορχήστρας:

C_{80}

από -2dB έως +2dB

Για ομιλία: C_{50}

τιμές μεγαλύτερες των -3dB

[5]

Διακριτότητα (Definition ,D) :

Η πρώτη προσπάθεια για τον ορισμό ενός αντικειμενικού μετρήσιμου κριτηρίου έγινε από τον Thiele που χρησιμοποίησε τον όρο διακριτότητα (Definition, Deutlichkeit). Η διακριτότητα χαρακτηρίζει την καταληπτότητα ομιλίας (speech intelligibility) δηλαδή την κατανόηση του λόγου.

(D= early-to-late energy ratio)

$$D = \frac{\int_0^{50ms} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt} \quad (2-13)$$

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) [13]

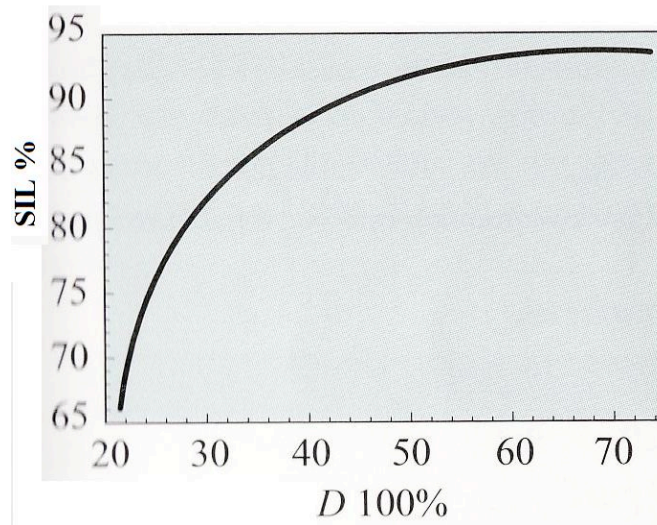
Η χρονική στιγμή $t=0$ αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που φθάνει η ηχητική ενέργεια στο δέκτη.

Η διακριτότητα είναι ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που φθάνει στον ακροατή στα πρώτα 50 ms προς τη συνολική ενέργεια, μιας παλμικής πηγής ήχου, όταν φθάνει στον ίδιο ακροατή. Εκφράζεται ως ποσοστό (%). [2]

$$D_{50} = \frac{\text{ηχητικη ενεργεια στα πρωτα } 50ms}{\text{συνολικη ηχητικη ενεργεια}} (\%) \quad (2-14)$$

Η σχέση μεταξύ διακριτότητας και καταληπτότητας ομιλίας μελετήθηκε από τον Bore. Ο Bore χρησιμοποίησε για τη μελέτη του σήματα παλμικού χαρακτήρα διάρκειας 20 ms για το εύρος των συχνοτήτων από 340 Hz μέχρι 3500 Hz.

Σύμφωνα με τα πειράματα του Bore υπάρχει άμεση σχέση ανάμεσα στην διακριτότητα και την καταληπτότητα. Η σχέση φαίνεται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8. Σχέση καταληπτότητας και διακριτότητας

Οι δείκτες D50 και C50 εκφράζουν ακριβώς το ίδιο πράγμα, όπου D₅₀ σε ποσοστό % C₅₀ σε dB.

Πίνακας 2-1. Αντιστοιχία δεικτών D50 και C50

[39]

D₅₀	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	%
C₅₀	-30	-9,5	-6,0	-3,7	-1,8	0	1,8	3,7	6,0	9,5	30	dB

Ο Beranek (1965) χρησιμοποίησε την ποσότητα D για τον καθορισμό του δείκτη αντήχησης (RD) που γίνεται διαχωρισμός της απευθείας διαδιδόμενης ηχητικής ενέργειας με τη διάχυτη.

$$R_D = 10 \log \left(\frac{1-D}{D} \right) \quad (2-15)$$

Προτεινόμενες τιμές

D50= 50% θεωρείται καλό ποσοστό για ένα θέατρο.

[2]

Πλευρικά κλάσματα – Λόγος Πρώιμης Πλευρικής προς τη Συνολική Ηχητική Ενέργεια (Early Lateral Energy Fraction, LEF) :

Σχετίζεται άμεσα με την αίσθηση της «βύθισης» (περικύκλωσης) στο ηχητικό πεδίο (envelopment)

Η ανάγκη για την εισαγωγή αυτού του δείκτη προέκυψε από ψυχοακουστικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ανηχοϊκούς θαλάμους με προσομοίωση ηχητικής πηγής και των ανακλάσεων της αίθουσας με μεγάφωνα. Διαπιστώθηκε ότι αποτυπώνει ικανοποιητικά την υποκειμενική αίσθηση του πλάτους και της βύθισης στο ηχητικό πεδίο της αίθουσας.

Υπολογίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που δέχεται ένα αμφικατευθυντικό μικρόφωνο (figure of 8) με τον άξονα στραμμένο υπό γωνία 90° από τον άξονα πηγής – θέσης μέτρησης για χρόνους από 5 ms ως 80 ms, προς τη συνολική ενέργεια που λαμβάνει ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο (omnidirectional) στην ίδια θέση και για το χρονικό διάστημα από 0 ως 80 ms.

Early lateral sound ratio (χαρακτηρίζει την υποκειμενική χωρική αντίληψη, «φαινόμενο πλάτος πηγής» - subjective spatial impression “apparent source width”)

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t)|^2 dt}{\int_0^{80ms} |p(t)|^2 dt} \quad (2-16)$$

Όπου

$p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) μετρούμενη με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο

$p_L(t)$: η ηχητική πίεση που μετρήθηκε με μικρόφωνο κατευθυντικότητας σχήματος 8 (figure-of-eight), με τον άξονα του μικροφώνου στραμμένο προς την πηγή [13]

Envelopment :

Envelopment or the early lateral energy fraction ορίζεται κατά τον Barron ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που προέρχεται από πλευρικές ανακλάσεις του ανακλώμενου ήχου στα πρώτα 80 ms ως προς τη συνολική ηχητική ενέργεια στο χρόνο αυτό.

$$\text{envelopment} = \frac{\text{η ηχητική ενέργεια που προέρχεται από πλευρικές ανακλασείς στα 80ms απευθείας ηχού}}{\text{η συνολική ηχητική ενέργεια που φθάνει σε 80ms απευθείας ηχού}}$$

(2-23)

Προτεινόμενες τιμές

Οι τιμές του envelopment για κονσέρτο συμφωνικής ορχήστρας κατά τον Barron πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 0.1 - 0.35.

Late lateral sound level :

(χαρακτηρίζει την υποκειμενική χωρική αντίληψη “listener envelopment”)

$$LG_{80}^{\infty} = \frac{\int_0^{\infty} |p_L(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p_{10}(t)|^2 dt}$$

(2-17)

Όπου

$p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) μετρούμενη με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο

$p_L(t)$: η ηχητική πίεση που μετρήθηκε με μικρόφωνο κατευθυντικότητας σχήματος 8 (figure-of-eight), με τον άξονα του μικροφώνου (0) στραμμένο προς την πηγή

$p_{10}(t)$: η ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) όταν η πηγή και ο δέκτης έχουν απόσταση 10 μέτρων μεταξύ τους.

$p_i(t)$: ηχητική πίεση (κρουστική απόκριση) μετρούμενη με dummy head

Interaural cross-correlation function, IACF :

$$IACF_{i_1, i_2}(t) = \frac{\int_{i_1}^{i_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{i_1}^{i_2} p_l^2(t) dt \int_{i_1}^{i_2} p_r^2(t) dt}}$$

(2-18)

Όπου οι ποσότητες $p_l(t)$ και $p_r(t)$ συμβολίζουν τις ηχητικές πιέσεις καθώς αυτές φτάνουν στο αριστερό και στο δεξί αυτί αντίστοιχα. [5]

Interaural cross-correlation coefficient, IACC :

(χαρακτηρίζει την υποκειμενική χωρική αντίληψη)

$$IACC = \max[IACF_{-1ms,1ms}(\tau)] \quad (2-19)$$

Δηλαδή max IACF για $-1 < \tau < +1ms$

[13]

Άλλοι δείκτες και έννοιες που αφορούν την εκτίμηση ακουστικών ποσοτήτων:

Initial Time Delay Gap, ITDG :

Initial Delay Gap είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της άφιξης του απευθείας ήχου και της πρώτης ανάκλασης. Για καλές συνθήκες ακράσης ο χρόνος αυτός πρέπει να είναι μικρότερος από 30 ms, δηλαδή διαφορά μήκους $< 10 m$, επειδή όταν το διάστημα αυτό είναι τόσο μικρό, ο ακροατής αντιλαμβάνεται τον απευθείας ήχο και την ανάκλασή του, σαν ένα ενιαίο ήχο.

Προτεινόμενες τιμές

Για αίθουσες συναυλιών το ITDG πρέπει να είναι μικρότερο των 20 ms. [9]

Κριτήριο ηχούς (Echo Criterion, TS) :

Το κριτήριο ηχούς προτάθηκε από τους Dietsch και Kraak με σκοπό τον αντικειμενικό προσδιορισμό της καταληπτότητας ομιλίας. Ορίζεται από την πιο κάτω σχέση:

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t |p(t)|^n dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^n dt} \quad (2-20)$$

Όπου $n=1$ για μουσική, $n=2/3$ για ομιλία.

Όταν $n=2$ ο χρόνος αυτός ονομάζεται «κεντρικός» χρόνος (Centre time είτε Centre of gravity time). Όσο πιο μικρή τιμή έχει ο TS τόσο καλύτερη η καταληπτότητα ομιλίας.

Κεντρικός Χρόνος (Centre time) :

Εισήχθη από τον Cremer και είναι το κέντρο βάρους κατά το μήκος του άξονα του χρόνου, του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt} \quad (2-21)$$

Υποστήριξη της σκηνής (Stage Support) :

Είναι ένα μέτρο της υποστήριξης που παρέχει η σκηνή στους ομιλητές ή μουσικούς. Μετριέται πάνω στη σκηνή με ένα μικρόφωνο σε απόσταση 1 m από την ηχητική πηγή και υπολογίζεται από το δεκαπλάσιο δεκαδικό λογάριθμο του λόγου της συνολικής ηχητικής ενέργειας των πρώτων ανακλάσεων (ενέργεια που φθάνει σε χρόνο από 0.02 μέχρι 0.1 s.) προς την ηχητική ενέργεια του απευθείας πεδίου της πηγής⁸ (ενέργεια που φθάνει σε χρόνο ως 0.01 s)

$$STI = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0.1} p^2(t) dt}{\int_0^{0.02} p^2(t) dt} \right) \quad (2-22)$$

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε τρεις θέσεις στη σκηνή από τις οποίες εξάγεται ο μέσος όρος. Λαμβάνονται τιμές στις οκτάβες των 125 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz και ο μέσος όρος αυτών είναι η τιμή του STI.

Δείκτης άρθρωσης (Articulation Index) :

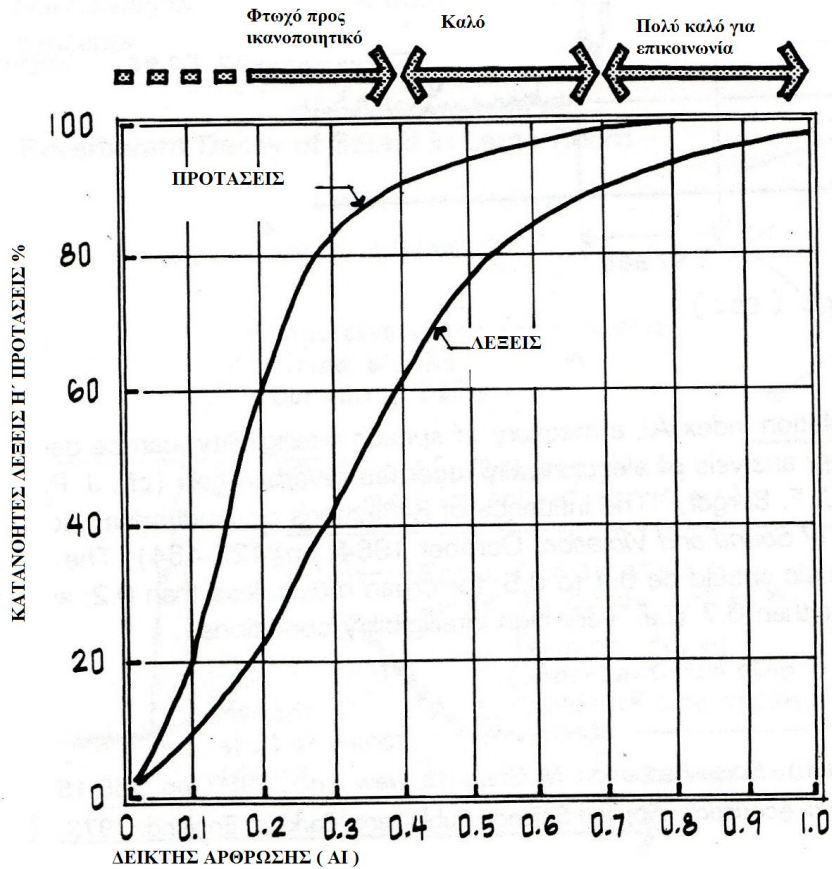
Ο δείκτης άρθρωσης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της καταληπτότητας (intelligibility). Ο δείκτης άρθρωσης είναι υποκειμενική μέτρηση της καταληπτότητας ομιλίας αφού υπολογίζεται από τις απαντήσεις μιας ομάδας εμπειρων ακροατών με κανονική ακουστική ικανότητα, οι οποίοι γράφουν προτάσεις, λέξεις ή συλλαβές οι οποίες τους διαβάζονται από συγκεκριμένες λίστες.

Προτεινόμενες τιμές

⁸ Περιλαμβάνει και την πρώτη ανάκλαση από το δάπεδο της αίθουσας. Δεδομένου όμως ότι η εν λόγω ανάκλαση είναι λίγο-πολύ ταυτόσημη σε όλες τις αίθουσες, δεν αποτελεί χαρακτηριστικό της αίθουσας και έτσι επιλέχθηκε να συμπεριληφθεί στον απευθείας ήχο της ηχητικής πηγής

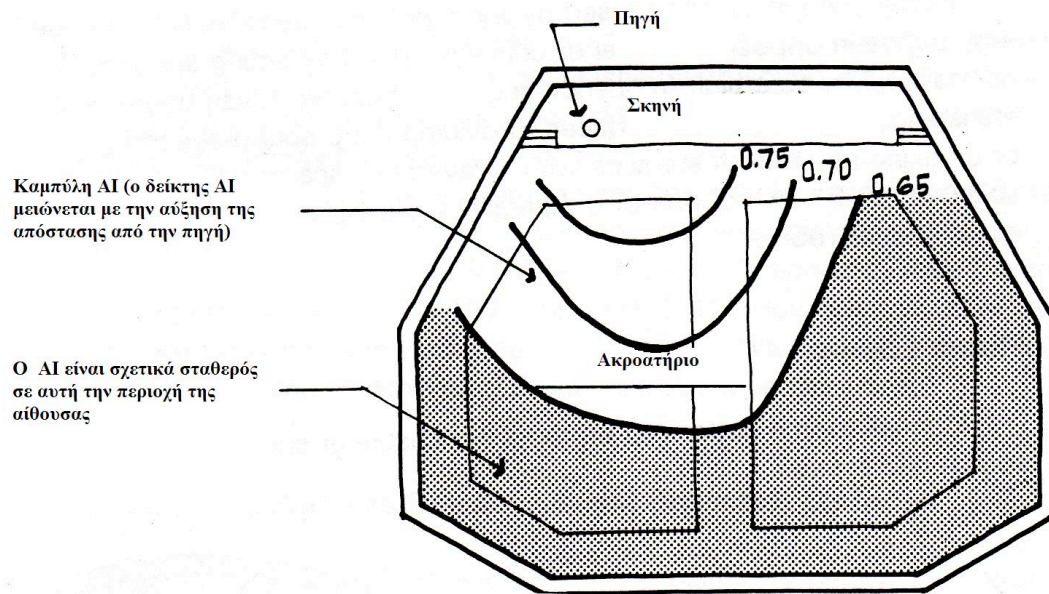
Οι τιμές του δείκτη άρθρωσης κυμαίνονται μεταξύ 0.4 - 0.5 για συμφωνική μουσική, 0.7 για οργανική μουσική, και λιγότερο από 0.2 για δράμα- θεατρικές παραστάσεις όπου απαιτούνται πολύ υψηλές συνθήκες καταληπτότητας.

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται η σχέση μεταξύ του δείκτη άρθρωσης με το ποσοστό επί τοις εκατόν της καταληπτότητας των προτάσεων ή λέξεων που οι ακροατές άκουσαν σωστά.



Σχήμα 2-9. ΣΣχήμα 2-9. Σχέση ποσοστού κατανόησης λέξεων ή προτάσεων και δείκτη άρθρωσης

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται το πλάνο μιας αίθουσας ακρόασης. Οι καμπύλες που είναι σχεδιασμένες στις θέσεις των ακροατών υποδεικνύουν τις τιμές του δείκτη άρθρωσης στις αντίστοιχες θέσεις. Παρατηρούμε ότι ο δείκτης άρθρωσης μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή, ωστόσο από ένα σημείο κι έπειτα, παραμένει σταθερός. Με την τροποποίηση του σχήματος της οροφής και τον έλεγχο των φαινομένων ηχούς από τους πλαϊνούς τοίχους, μπορεί να βελτιωθεί η τιμή του δείκτη άρθρωσης στις απομακρυσμένες θέσεις.



Σχήμα 2-10. Δείκτης άρθρωσης σε αίθουσα ακρόασης

Απώλεια Άρθρωσης Συμφώνων (Articulation Loss of Consonants, AL_{cons}): Η απώλεια άρθρωσης συμφώνων στηρίζεται σε στατιστικούς υπολογισμούς, αλλά λαμβάνει υπόψη τη στάθμη θορύβου του περιβάλλοντος και το χρόνο αντίληψης. Η εξίσωση υπολογισμού είναι :

$$\%AL_{cons} = 100 \times (10^{-2(A+BC-ABC)} + 0.015) \quad (2-26)$$

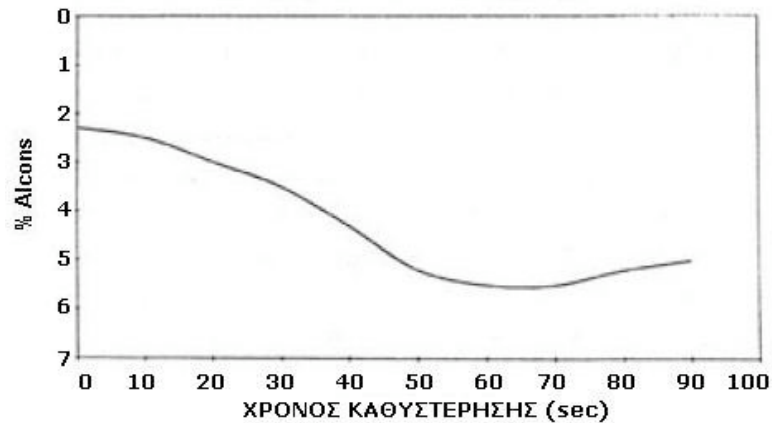
$$\text{όπου} \quad A = -0.32 \log\left(\frac{E_R + E_N}{10E_D + E_R + E_N}\right) \quad (2-27)$$

$$B = -0.32 \log\left(\frac{E_R}{10E_R + E_N}\right) \quad (2-28)$$

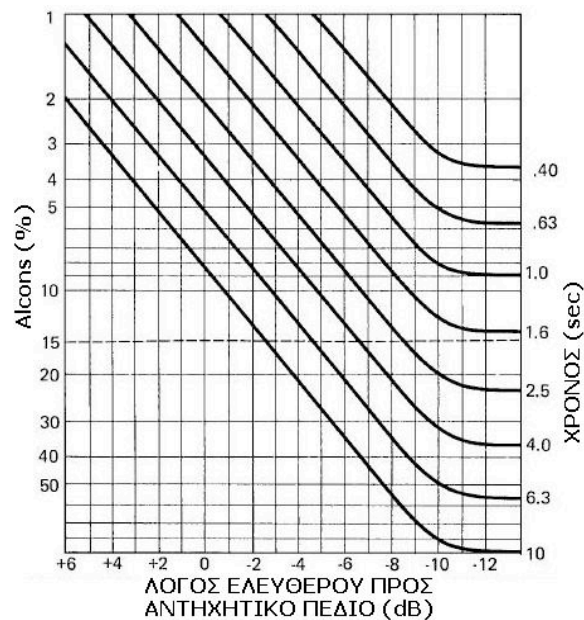
$$C = -0.5 \log\left(\frac{RT_{60}}{12}\right) \quad (2-29)$$

με $E_R = 10^{L_R/10}$ για το αντηχητικό πεδίο, $E_D = 10^{L_D/10}$ για τον απευθείας ήχο και $E_N = 10^{L_N/10}$ για το θόρυβο βάθους, L_R , L_D , L_N οι αντίστοιχες ηχητικές στάθμες (dB) και RT_{60} ο χρόνος αντήχησης (s) του χώρου.

Ο πιο πάνω τύπος έχει αντικαταστήσει παλιότερο τύπο καθώς είναι συμβατός με πολλά προγράμματα σχεδιασμού συστημάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς τη στάθμη του ελεύθερου ηχητικού πεδίου, του αντηχητικού πεδίου, του θορύβου βάθους και το χρόνο αντήχησης, μεγέθη που μπορούν εύκολα να μετρηθούν.



Σχήμα 2-11. Η επίδραση της ηχούς στην απώλεια άρθρωσης συμφώνων



Σχήμα 2-12. Πιθανή απώλεια άρθρωσης συμφώνων σε σχέση με το χρόνο αντήχησης και το λόγο ελεύθερου προς αντηχητικό πεδίο

Δείκτης Μετάδοσης Λόγου και Ταχύς Δείκτης Μετάδοσης Λόγου (Speech Transmission Index, STI, and Rapid speech Transmission Index, RASTI) :

Οι δείκτες STI και RASTI⁹ προέρχονται από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και αντιμετωπίζουν την αλυσίδα ηχητική πηγή → χώρος → ακροατής ως ένα κανάλι μετάδοσης (γραμμή μεταφοράς) και μετρούν τη μεταβολή του πλάτους διαμόρφωσης αργά μεταβαλλόμενων σημάτων κατά μήκος της γραμμής. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης τα παλαιότερα μετρητικά συστήματα χρησιμοποιούσαν ένα ειδικό σήμα που προσομοίωνε κάποια από τα βασικά φασματικά και στατιστικά χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ομιλίας αλλά τα περισσότερα σύγχρονα μετρητικά συστήματα βασίζονται στη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης και στην εξαγωγή τιμής των δεικτών καταληπτότητας από αυτήν. Αρχικά υπολογίζεται η τιμή της εξίσωσης της συνάρτησης διαμόρφωσης πλάτους (modulation transfer function) :

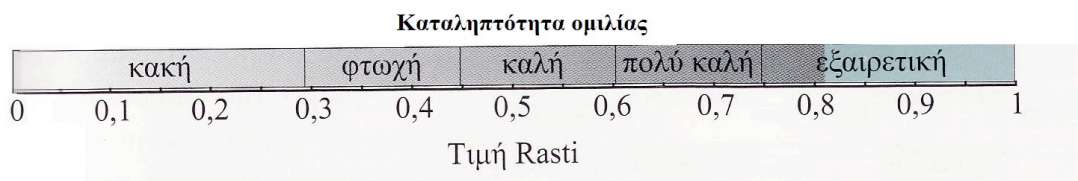
$$M(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2\pi fT}{13.8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{(-S/N)}{10}}} \quad (2-30)$$

και από αυτήν υπολογίζονται οι δείκτες καταληπτότητας.

Έχει αποδειχθεί ότι η μείωση εξαρτάται από το σύστημα (εάν χρησιμοποιείται), αλλά και από την παλμική απόκριση του δωματίου. Οι μετρήσεις για το STI γίνονται σε ζώνες εύρους οκτάβας στις συχνότητες 125 Hz έως 8 kHz και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλη μέθοδος για μετρήσεις σε συστήματα ενίσχυσης ήχου.

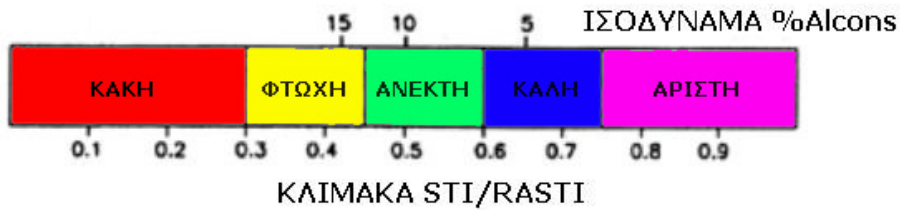
Η μέθοδος RASTI προέκυψε από την απλοποίηση της μεθόδου STI και χρησιμοποιείται για ευκολότερο και γρηγορότερο υπολογισμό της καταληπτότητας ομιλίας. Η διαφορά της από την μέθοδο STI είναι ότι χρησιμοποιεί σήμα εύρους οκτάβας, γύρω από δύο μόνο συχνότητες, τα 500 Hz και τα 2000 Hz. Η κλίμακα που χρησιμοποιείται έχει εύρος από 0 μέχρι 1.

Η σχέση της καταληπτότητας ομιλίας και του δείκτη RASTI φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 2-13 Καταληπτότητα ομιλίας και Rasti

⁹ Για περισσότερες πληροφορίες βλπ Παράρτημα Α



Πίνακας 2-2. Συσχέτιση μεταξύ RASTI και Al_{cons}

RASTI	% Al_{cons}	RASTI	% Al_{cons}	RASTI	% Al_{cons}
0.20	57.7	0.48	12.7	0.76	2.8
0.22	51.8	0.50	11.4	0.78	2.5
0.24	46.5	0.52	10.2	0.80	2.2
0.26	41.7	0.54	9.1	0.82	2.0
0.28	37.4	0.56	8.2	0.84	1.8
0.30	33.6	0.58	7.4	0.86	1.6
0.32	30.1	0.60	6.6	0.88	1.4
0.34	27.0	0.62	6.0	0.90	1.3
0.36	24.2	0.64	5.3	0.92	1.2
0.38	21.8	0.66	4.8	0.94	1.0
0.40	19.5	0.68	4.3	0.96	0.9
0.42	17.5	0.70	3.8	0.98	0.8
0.44	15.7	0.72	3.4	1.0	0.0
0.46	14.1	0.74	3.1		

Σημειώνεται ότι η μέθοδος αναφέρεται σε γραμμικό κανάλι μετάδοσης ως εκτούτου ενδέχεται μεγάλη πιθανότητα σφάλματος σε τυχόν μη γραμμικότητες ή χρονικά μεταβαλλόμενο ακουστικό περιβάλλον. [19]

Αναφορά στον δείκτη STI γίνεται στους κανονισμούς IEC 60268-16. [16]

Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας (Speech Intelligibility Index, SII) :

Υπολογίζει τον ενεργό λόγο σήματος προς θόρυβο σε έναν αριθμό περιοχών συχνοτήτων που σχετίζονται με την ομιλία. Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες περιοχών

συχνοτήτων (α) κρίσιμης ζώνης (21 ζώνες), (β) με εύρος 1/3 οκτάβας (18 ζώνες), (γ) ισομερής συμβολή κρίσιμης ζώνης (17 ζώνες) και (δ) με εύρος οκτάβας (6 ζώνες).

Προσφέρει τη μεγαλύτερη ανάλυση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους που περιγράφονται πιο πάνω και συνυπολογίζει παράγοντες όπως η αντήχηση, ο θόρυβος και η παραμόρφωση, χρειάζεται όμως προσοχή γιατί μπορεί να οδηγήσει εύκολα σε λανθασμένα αποτελέσματα, λόγω ανακλάσεων ή ηχούς.

Στάθμη θορύβου βάθους και καμπύλες στάθμισης θορύβου (Background Noise level & Noise Weighting Curves) :

Η στάθμη θορύβου που οφείλεται στο σύστημα κλιματισμού/ εξαερισμού και άλλων εξωτερικών θορύβων πρέπει να είναι χαμηλή ώστε να μην εμποδίζονται οι μουσικές παραστάσεις είτε η παραστάσεις όπερας αλλά και να αποφεύγονται προβλήματα με την καταληπτότητα ομιλίας (speech intelligibility).

Καμπύλες στάθμισης θορύβου (Noise Weighting Curves) :

Οι καμπύλες NR χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη ενώ στην Αμερική χρησιμοποιούνται οι καμπύλες PNC που αντικατέστησαν τη χρήση των καμπύλων NC.

Noise Rating Curves, NR:

Οι καμπύλες NR (Noise Ratings) προτάθηκαν από τον L. Beranek και υιοθετήθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) με σκοπό την αποτίμηση της επίδρασης του θορύβου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε κλειστούς χώρους. Χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλές περιπτώσεις και από κατασκευαστές εξοπλισμού για τον προσδιορισμό της στάθμης του εκπεμπόμενου θορύβου.

Το NR οποιουδήποτε ηχητικού γεγονότος προκύπτει από την σύγκριση του οκταβικού φάσματος του γεγονότος με τις καμπύλες NR και την εξεύρεση της καμπύλης στην οποία το εν λόγω φάσμα εφάπτεται.

Οι φασματικές τιμές των καμπύλων NR υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο:

$$NR_B = \frac{L_{p_B} - A_B}{B_B} \quad (2-31)$$

Όπου A_B και B_B είναι σταθερές και δίνονται στον πίνακα 2-2.

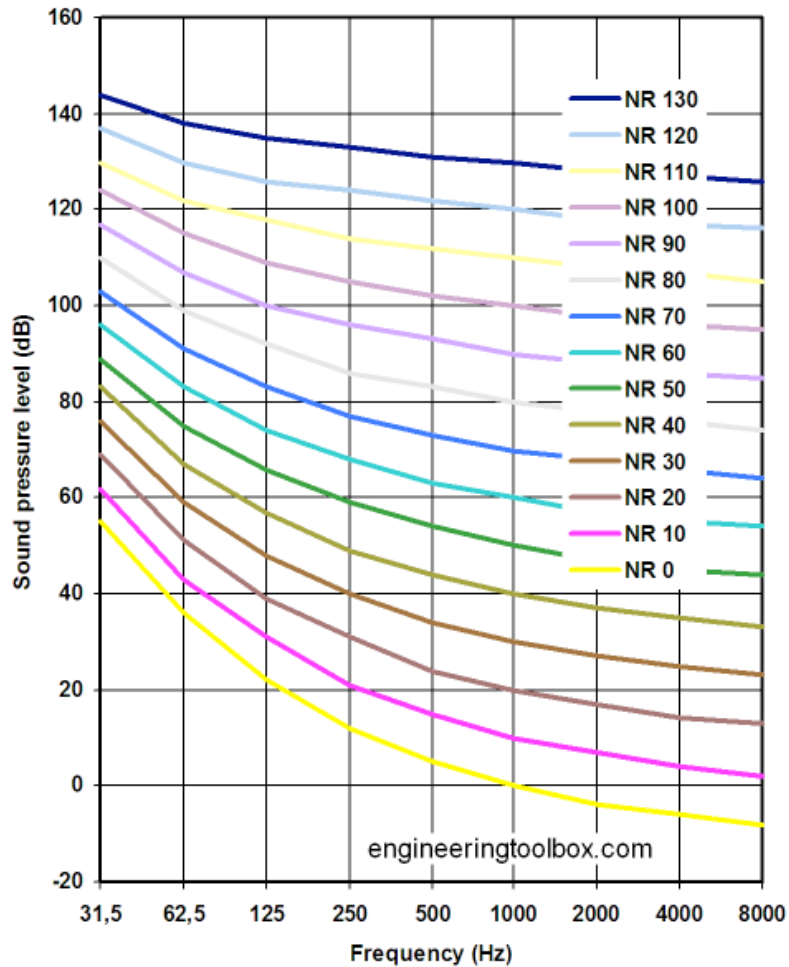
[5]

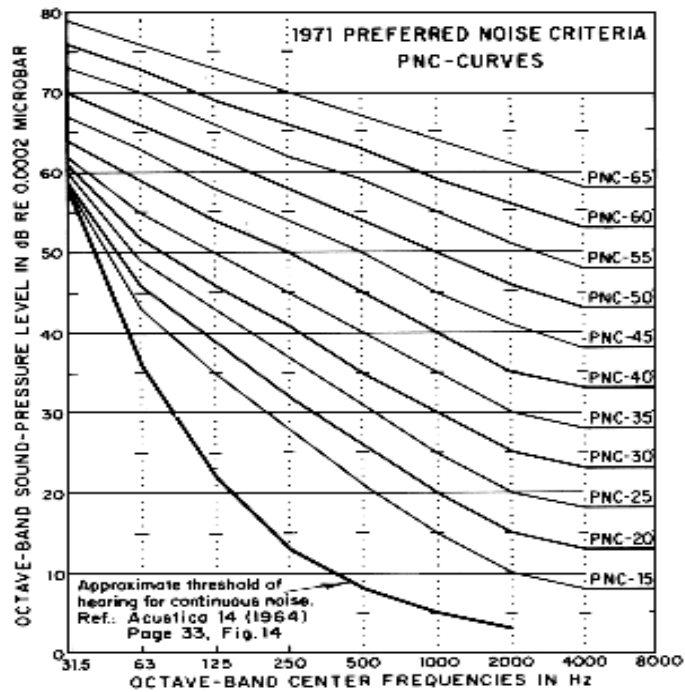
Πίνακας 2-3. Σταθερές για καμπύλες NR

Κεντρική Συχνότητα (Hz)	A_B	B_B
31.5	55.4	0.681
63	35.5	0.790
125	22.0	0.870
250	12.0	0.930
500	4.8	0.974
1000	0.0	1.000
2000	-3.5	1.015
4000	-6.1	1.025
8000	-8.0	1.030

Από την εξίσωση 2-31 προκύπτουν οι καμπύλες NR όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-14. (α)

α)





β)
Preferred Noise Criterion, PNC :Το 1971, δημοσιεύτηκαν οι καμπύλες *Preferred Noise Criterion* (PNC), στις οποίες οι επιτρεπόμενες στάθμες θορύβου στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες είναι χαμηλότερες από ότι στις καμπύλες NC.

Σχήμα 2-14. Καμπύλες NR (α) και Καμπύλες PNC (β)

Οι καμπύλες PNC χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της στάθμης του θορύβου βάθους ενός χώρου και την εκτίμηση του βαθμού ενόχλησης ή αποδοχής θορύβου ευρέους φάσματος που προκαλείται από ηλεκτρομηχανολογικό ή άλλο εξοπλισμό.

Για επαλήθευση των κριτηρίων, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι οι μετρήσεις σε αίθουσες ακρόασης και γραφεία που οι χρήστες των χώρων έκριναν ως απόλυτα αποδεκτούς, βρίσκονταν στην εντός των ορίων που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Σημειώνεται ότι όπως και τα NR, NC έτσι και τα PNC δε λαμβάνουν υπόψιν θορύβους που βρίσκονται στο κάτω άκρο του ακουστικού φάσματος (υπόηχους) ούτε την επίδραση κραδασμών φαινόμενα τα οποία, αποδεδειγμένα, δύνανται να προκαλέσουν μετρήσιμες επιδράσεις (και σε ακραίες περιπτώσεις βλάβες) στον άνθρωπο. Επίσης θεωρούν ως δεδομένη την όλο και αυξανόμενη προσαρμοστικότητα του ανθρώπου στα σύγχρονα εργασιακά περιβάλλοντα υψηλού θορύβου και στην παρατηρούμενη μείωση της οξύτητας της ακοής μεγάλων τμημάτων του πληθυσμού.

Πίνακας 2-4. Τιμές στάθμης ηχητικής πίεσης (ανά οκτάβα) κατ' αντιστοιχία με τις προτεινόμενες καμπύλες PNC, 1971

Κεντρική συχνότητα (Hz)	31.5	63.0	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PNC - 15	58	43	35	28	21	15	10	8	8
PNC - 20	59	46	39	32	26	20	15	13	13
PNC - 25	60	49	43	37	31	25	20	18	18
PNC - 30	61	52	46	41	35	30	25	23	23
PNC - 35	62	55	50	45	40	35	30	28	28
PNC - 40	64	59	54	50	45	40	35	33	33
PNC - 45	67	63	58	54	50	45	41	38	38
PNC - 50	70	66	62	58	54	50	46	43	43
PNC - 55	73	70	66	62	59	55	51	48	48
PNC - 60	76	73	69	66	63	59	56	53	53
PNC - 65	79	76	73	70	67	64	61	58	58

Εκτός από τις καμπύλες NR, NC και PNC υπάρχουν και οι καμπύλες RC (Room Criterion curves), οι καμπύλες NCB (Balanced Noise Criteria), οι καμπύλες RNC (Room Noise Criterion Curves)¹⁰

¹⁰ Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία [1], [5],[12]

Πίνακας 2-5 . Αντιστοιχία κριτηρίων NR, NC,NCB, RNC, RC

dB(A)	NR	NC, NCB and RNC	RC	Σχόλια για το χώρο
25-30	20	20	20	πολύ ήσυχος
30-35	25	25	25	
35-40	30	30	30	ήσυχος
40-45	35	35	35	
45-50	40	40	40	μέτρια θορυβώδης
50-55	45	45	45	
55-60	50	50	50	θορυβώδης
60-65	55	55	–	
65-70	60	60	–	πολύ θορυβώδης

Πίνακας 2–6. Τιμές κριτηρίων

Criterion value	Criterion	OBCF (Hz)								
		31.5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
15	NR	66	47	35	26	19	15	12	9	7
	PNC	58	43	35	28	21	15	10	8	8
20	NR	69	51	39	31	24	20	17	14	13
	PNC	59	46	39	32	26	20	15	13	13
25	NR	72	55	44	35	29	25	22	20	18
	PNC	60	49	43	37	31	25	20	18	18
30	NR	76	59	48	40	34	30	27	25	23
	PNC	61	52	46	41	35	30	25	23	23
35	NR	79	63	52	45	39	35	32	30	28
	PNC	62	55	50	45	40	35	30	28	28
40	NR	83	67	57	49	44	40	37	35	33
	PNC	64	59	54	50	45	40	36	33	33
45	NR	86	71	61	54	49	45	42	40	38
	PNC	67	63	58	54	50	45	41	38	38

Προτεινόμενες τιμές

Οι επιτρεπόμενες τιμές στάθμης θορύβου βάθους κυμαίνονται από NC15 ή NR15 με NR20 για αίθουσες συναυλιών (concert halls), μέχρι NC20 και NR25 για θέατρα (drama theatres), και NC25 για μικρές αίθουσες ακρόασης μέχρι 500 θέσεων. [5]

Προσεγγιστικός υπολογισμός /εκτίμηση των ακουστικών παραμέτρων δωματίων και υπό την προϋπόθεση ότι το ηχητικό πεδίο είναι διάχυτο, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μόνο το χρόνο αντήχησης, ήτοι σιωπηρά υποθέτοντας μια απολύτως εκθετική μείωση της ηχητικής πίεσης με το χρόνο.

(BARRON,M.,LEE,L.-J.Acoust.Soc.Am.84(1988)618 “Energy relations in concert auditoriums”)

Συνολική ενέργεια από τη στιγμή t μέχρι το άπειρο:

$$i_t = \left(\frac{31200T}{V} \right) \cdot e^{-13.82t/T} \quad (2-32)$$

Ηχητική ενέργεια (early and late, όριο 80ms) στην απόσταση r , λόγω:

$$e_d = \frac{100}{d^2}, \text{ απευθείας ήχου} \quad (2-33)$$

$$e_e = \left(\frac{31200T}{V} \right) \cdot e^{-0.04d/T} (1 - e^{-1.11/T}), \text{ πρώτων ανακλάσεων} \quad (2-34)$$

(πρώιμου ηχητικού πεδίου, 0-80ms)

$$e_l = \left(\frac{31200T}{V} \right) \cdot e^{-0.04d/T} \cdot e^{-1.11/T}, \text{ αντήχησης (80ms- } \infty) \quad (2-35)$$

$$G = 10 \log(e_d + e_e + e_l) = 10 \log \left(\frac{100}{d^2} + \frac{31200T}{V} \right) \quad (2-36)$$

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{(e_d + e_e)}{e_l} \right] \quad (2-37)$$

Όπου r η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη (m),

T ο χρόνος αντήχησης (s)

V ο όγκος του δωματίου (m^3)

Πίνακας 2-7. Υποκειμενικές ποσότητες σε αίθουσες συναυλιών και οι αντίστοιχοι αντικειμενικοί δείκτες

Διαύγεια - Clarity	Clarity Index (C80)
Αντήχηση - Reverberance	Early decay time (EDT)
Οικειότητα (εγγύτητα) - Intimacy	Total relative sound level (G)
Χωρικό εύρος πηγής - Source Broadening	Early lateral energy fraction and sound level
Αίσθηση περικύκλωσης από το ηχητικό πεδίο - Listener envelopment	Late lateral level
Ηχηρότητα - Loudness	Tonal sound level – Strength - and source –receiver distance (ηχητική στάθμη και απόσταση πηγής – ακροατή)
Ζεστασιά - Warmth	Bass level balance (Bass ratio)

Οδηγός αξιολόγησης αιθουσών για μουσικές παραστάσεις

Πώς να χρησιμοποιήσετε τον οδηγό αξιολόγησης

Οι κλίμακες στον οδηγό αξιολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους ακροατές για να διατυπώσουν τις υποκειμενικές «εντυπώσεις» όσον αφορά τους χώρους για μουσικές παραστάσεις (αίθουσες συναυλιών, εκκλησίες, αίθουσες ρεσιτάλ).

Τοποθετήστε ένα \surd στο σημείο της κλίμακας η οποία αντιπροσωπεύει τη δική σας κρίση για συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή συνθήκη. Ο κύριος σκοπός αυτού του οδηγού αξιολόγησης είναι να ενθαρρύνει τους χρήστες να εξοικειωθούν με σημαντικές ακουστικές ιδιότητες των χώρων όπου εκτελούνται μουσικές παραστάσεις. Ο οδηγός δεν προτίθεται να χρησιμοποιηθεί για να κατηγοριοποιήσει τους καλύτερους ή χειρότερους χώρους, επειδή πάντα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από ξεχωριστές κριτικές από ακροατές μεταξύ των οποίων έμπειροι ακροατές και μουσικοί- εκτελεστές. Επίσης αξίζει να επισημάνουμε τη δυσκολία στο διαχωρισμό της κριτικής για μια αίθουσα από την κριτική που αφορά την ποιότητα της συγκεκριμένης μουσικής παράστασης. Οι προσωπικές μουσικές προτιμήσεις επηρεάζουν την κρίση του ακροατή.(βλπ σχήμα 2-15)

Υποκειμενικά κριτήρια μουσικών παραστάσεων :

Διαύγεια (Clarity), Αντήχηση (Reverberance), Ζεστασιά (Warmth), Οικειότητα - Εγγύτητα (Intimacy), Ηχηρότητα (Loudness), Διάχυση (Diffusion), «Ισορροπία» (Balance)

Διαύγεια (Clarity)

Ακούστε την αρχή των μουσικών νοτών και διακρίνετε το βαθμό στον οποίο οι μεμονωμένες νότες είναι ευδιάκριτες είτε ακούγονται ξεχωριστά.

Αντήχηση (Reverberance)

Ακούστε τη διάρκεια του ήχου στις μεσαίες συχνότητες.

Ζεστασιά (Warmth)

Ακούστε τη «δύναμη» ή ζωντάνια στις μπάσες συχνότητες, συγκρίνοντας τις στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Οικειότητα – Εγγύτητα (Intimacy)

Ακούστε και προσπαθήστε να προσδιορίσετε εάν η μουσική ακούγεται σαν να παίζεται σε ένα μικρό χώρο άσχετα με το πραγματικό μέγεθος της αίθουσας.

Ηχηρότητα (Loudness)

Ακούστε τον απευθείας ήχο και την αντήχηση. Αξιολογήστε τις συνθήκες άνεσης κατά τη διάρκεια των δυνατών (forte) περασμάτων και την ακουστότητα κατά τη διάρκεια των χαμηλών περασμάτων (piano).

Διάχυση (Diffusion)

Ακούστε την «περιβάλλουσα» των ήχων και προσπαθήστε να διακρίνετε κατά πόσο νοιώθετε το αίσθημα της «βύθισης» (immersion) στον ήχο. Συγκρίνετε τις συνθήκες με τα μάτια ανοικτά και κλειστά.

«Ισορροπία» (Balance)

Προσέξτε τη σχέση της ισχύος και της ποιότητας των διαφόρων τμημάτων της ορχήστρας και μεταξύ της ορχήστρας και σολίστα είτε ορχήστρας και χορωδίας.

Οι συνηθέστεροι ήχοι που επηρεάζουν τα υποκειμενικά κριτήρια είναι:

Θόρυβος βάθους : Ήχοι που δεν προέρχονται από τους μουσικούς ή το ακροατήριο, και γίνονται αντιληπτοί κατά τη διάρκεια ενός χαμηλόφωνου σόλο, είτε όταν η αίθουσα είναι άδεια.

Ηχώ : Προσέξτε την κατεύθυνση και την ισχύ κάθε διακριτής ηχητικής ανάκλασης με μεγάλη χρονοκαθυστέρηση.

Χρησιμοποιήστε ξεχωριστό φύλο αξιολόγησης για κάθε θέση στην υπό αξιολόγηση αίθουσα. Η απουσία «νεκρών σημείων», δηλαδή σημείων όπου η μουσική είναι «αδύναμη», και οι ελάχιστες δονήσεις στις συνθήκες ακρόασης, σε όλες τις θέσεις δείχνουν ομοιομορφία του χώρου. Σημειώνουμε ότι δεν υπάρχουν σωστές και λάθος απαντήσεις. Οι υποκειμενικές κριτικές από διάφορα άτομα, είναι οι αξιολογήσεις που πραγματικά μετρούν.

Γενική εντύπωση

Το κουτί στο κάτω μέρος του οδηγού αξιολόγησης είναι για την καταγραφή της γενικής σας εντύπωσης για τη μουσική παράσταση στη συγκεκριμένη θέση της αίθουσας.

Η κλίμακα έχει καλύτερο βαθμό αξιολόγησης το A - το καλύτερο, αξέχαστη εμπειρία ακρόασης - και χειρότερο βαθμό αξιολόγησης το F – ένα από τα χειρότερα, πραγματικά κακή εμπειρία - επίσης μέτριος βαθμός αξιολόγησης είναι το C - μέτρια εμπειρία.

Αυτό που πρέπει να έχετε πάντα υπόψη είναι ότι ο οδηγός αυτός έχει σκοπό να βοηθήσει στην κατανόηση μουσικών παραστάσεων υπό συγκεκριμένες συνθήκες και με προσεκτική παρατήρηση, στο πώς επηρεάζονται οι πρώτες από την αρχιτεκτονική της αίθουσας.

EVALUATION GUIDE

(Place mark on section of scale which best represents your impression of listening condition. Use separate sheet for each seat where performance is to be evaluated.)

CLEAR SOUND (varies from clear or distinct to blurred or muddy)	_____	BLURRED SOUND
LIVE REVERBERANCE (liveness or persistence of mid-frequency sounds)	_____	DEAD REVERBERANCE
WARM BASS (relative liveness of bass or longer duration of reverberance at bass compared to mid- and treble frequencies)	_____	COLD BASS
INTIMATE SOUND (auditory impression of apparent closeness of orchestra)	_____	REMOTE SOUND
SATISFACTORY LOUDNESS (indicate early or direct sound (symbol <i>D</i>) and reverberant sound (<i>R</i>) on scale)	_____	UNSATISFACTORY LOUDNESS (too weak or too loud)
RICH DIFFUSION (expansive sound) (envelopment of sound which surrounds listener from many directions)	_____	POOR DIFFUSION (constricted sound)
GOOD BALANCE (observe between musicians and soloist or chorus, among sections of orchestra)	_____	POOR BALANCE
SATISFACTORY BACKGROUND NOISE (very quiet) (from HVAC system, or intruding noise from ancillary spaces or outdoors)	_____	UNSATISFACTORY BACKGROUND NOISE (very noisy)
ECHOES (long-delayed reflections that are clearly heard)	_____ No _____ Yes	Direction: _____

Music Performance Space: _____	Date: _____
Seating Capacity: _____	Cubic Volume: _____ ft ³
Orchestra/Conductor: _____	Composer/Work: _____
Seat Location: _____	Seat No.: _____
(Use space at right to sketch floor plan, or cut and paste seating layout from program booklet.)	

OVERALL IMPRESSION
(Refer to instructions on preceding pages.)

Σχήμα 2-15. Έντυπο αξιολόγησης υποκειμενικών ποσοτήτων σε αίθουσα ακρόασης

EVALUATION GUIDE (EXAMPLE APPLICATION)

(Place mark on section of scale which best represents your impression of listening condition. Use separate sheet for each seat where performance is to be evaluated.)

CLEAR SOUND _____ BLURRED SOUND
 (varies from clear or distinct to blurred or muddy)

LIVE REVERBERANCE _____ DEAD REVERBERANCE
 (liveness or persistence of mid-frequency sounds)

WARM BASS _____ COLD BASS
 (relative liveness of bass or longer duration of reverberance at bass compared to mid- and treble frequencies)

INTIMATE SOUND _____ REMOTE SOUND
 (auditory impression of apparent closeness of orchestra)

SATISFACTORY LOUDNESS _____ R D _____ _____
 UNSATISFACTORY LOUDNESS (too weak or too loud)
 (indicate early or direct sound (symbol D) and reverberant sound (R) on scale)

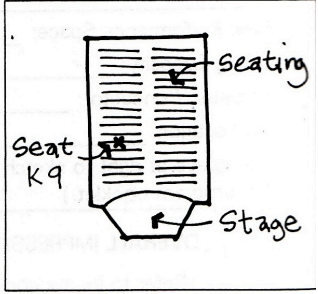
RICH DIFFUSION _____ POOR DIFFUSION
 (expansive sound) (constricted sound)
 (envelopment of sound which surrounds listener from many directions)

GOOD BALANCE _____ POOR BALANCE
 (observe between musicians and soloist or chorus, among sections of orchestra)

SATISFACTORY BACKGROUND NOISE _____ UNSATISFACTORY BACKGROUND NOISE
 (very quiet) (very noisy)
 (from HVAC system, or intruding noise from ancillary spaces or outdoors)

ECHOES No Yes Direction: _____
 (long-delayed reflections that are clearly heard)

Music Performance Space: Gallifrey Music Hall Date: 13 Feb 95
 Seating Capacity: 2,000 Cubic Volume: 625,000 ft³
 Orchestra/Conductor: Dr. Whom Composer/Work: Shostakovich Symphony No. 10
 Seat Location: Main level near side wall Seat No.: R9
 (Use space at right to sketch floor plan, or cut and paste seating layout from program booklet.)



B+ OVERALL IMPRESSION
 (Refer to instructions on preceding pages.)

Σχήμα 2-16. Παράδειγμα - έντυπο αξιολόγησης υποκειμενικών ποσοτήτων σε αίθουσα ακρόασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

Ακουστικές απαιτήσεις χώρων

Οι μεγάλοι κλειστοί χώροι μελετώνται με τη βοήθεια των νόμων της γεωμετρικής οπτικής. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η λεπτομερής μελέτη της πορείας των ηχητικών ακτινών μετά την πρώτη, δεύτερη, τρίτη...κτλ ανάκλαση είναι μια σύνθετη διαδικασία, η μελέτη με τη μέθοδο αυτή γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Υπάρχει δυνατότητα η μέθοδος να εφαρμοστεί και σχεδιαστικά. Τα βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι αγνοείται η κυματική φύση του ήχου και ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στον υπολογισμό των τιμών του χρόνου αντήχησης.

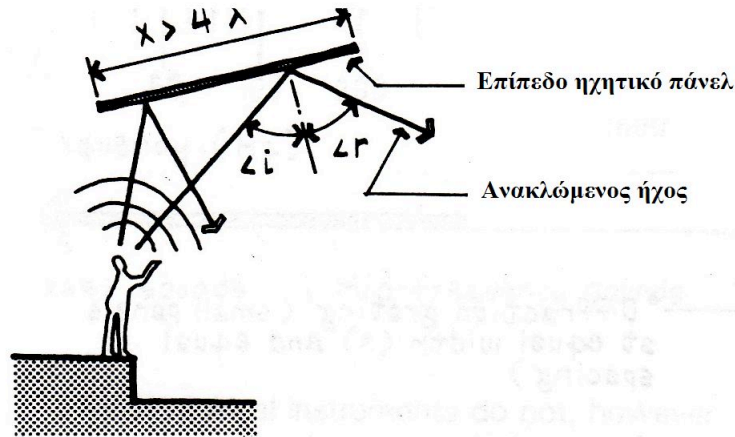
Στην περίπτωση κλειστών χώρων ο υπολογισμός της στάθμης πίεσης ή έντασης του ήχου είναι πολύπλοκος καθώς έχουμε πολλαπλά είδωλα ανώτερης τάξης από τις διαδοχικές ανακλάσεις των ηχητικών ακτίνων στα τοιχώματα του χώρου. Ο υπολογισμός για την έκφραση της στάθμης πίεσης σε ένα σημείο του κλειστού χώρου γίνεται είτε αναλυτικά με τη χρήση κυρίως κατάλληλων λογισμικών στον ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε στατιστικά με τη βοήθεια της στατιστικής ακουστικής όταν μας ενδιαφέρουν εύκολοι αλλά ακριβείς τρόποι υπολογισμού.

Ανάκλαση- Διάχυση- Περίθλαση

Ανάκλαση ($x > 4\lambda$)

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της επιστροφής μέρους της ηχητικής ενέργειας ενός ηχητικού κύματος κατά την πρόσκρουση σε μια επιφάνεια. Στην περίπτωση που μια διάσταση, x , της επιφάνειας (μήκος ή πλάτος) είναι μεγαλύτερη κατά 2 με 4 φορές, από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος, λ , τότε η γωνία πρόσπτωσης θα είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης.

Η ανάκλαση είναι σημαντικό χαρακτηριστικό στην ακουστική κλειστών χώρων. Στην περίπτωση μιας θεατρικής αίθουσας είτε μιας αίθουσας συναυλιών, όπου οι ανακλάσεις από την οροφή και τους πλαϊνούς τοίχους δεν καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις για καλή ακρόαση, χρησιμοποιούνται αναρτώμενα ανακλαστικά πάνελς σε διάφορα μεγέθη και κλίσεις.



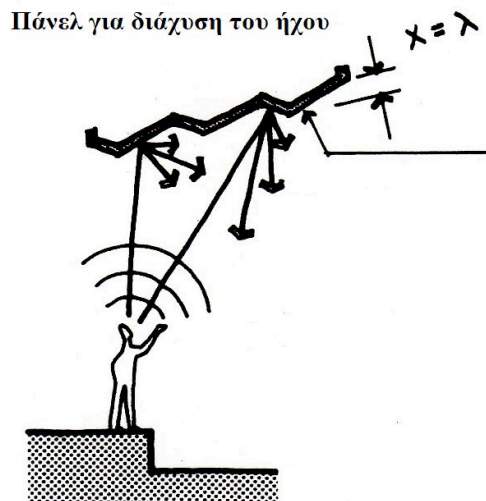
Σχήμα 3-1. Ανάκλαση

Διάχυση ($x = \lambda$)

Διάχυση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η ηχητική ενέργεια ενός ηχητικού κύματος διαχέεται – «διασκορπάται», κατά την πρόσκρουση σε μια επιφάνεια. Συμβαίνει στην περίπτωση που το βάθος των επιφανειών είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ήχου. Η διεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος αλλάζει καθώς αυτό κτυπά στην επιφάνεια ηχοδιάχυσης.

Η διάχυση είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό χαρακτηριστικό στους χώρους όπου πραγματοποιούνται μουσικές παραστάσεις.

Όταν επιτυγχάνεται ικανοποιητική διάχυση σε μια αίθουσα, οι ακροατές έχουν την αίσθηση ότι ο ήχος έρχεται από όλες τις κατευθύνσεις, με τις ίδιες στάθμες.



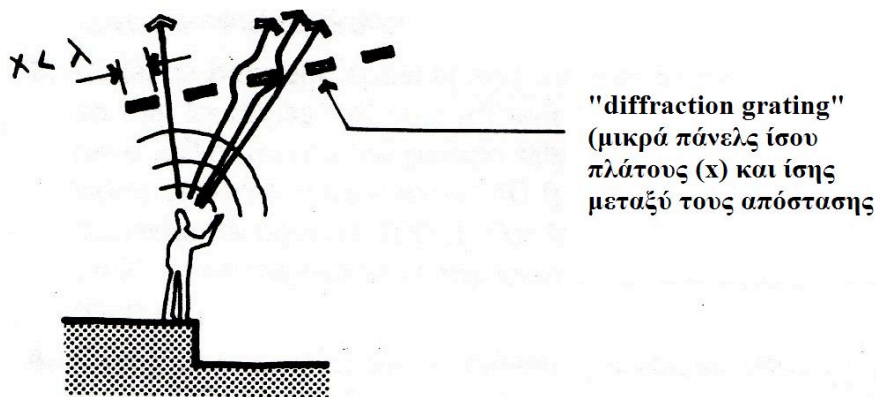
Σχήμα 3-2. Διάχυση

Περίθλαση ($x < \lambda$)

Όταν ένα ηχητικό κύμα συναντήσει στην πορεία του ένα εμπόδιο, του οποίου οι διαστάσεις είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του ήχου, τότε κάμπτεται γύρω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση.

Στις αίθουσες ακρόασης, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό των αναρτώμενων πάνελς ώστε να είναι αρκετά μεγάλα (όσον αφορά το μήκος και το πλάτος τους) και έτσι να ανακλούν επιτυχώς τα επιθυμητά μήκη κύματος του ήχου.

Όταν τα αναρτώμενα πάνελς έχουν τις ίδιες διαστάσεις και βρίσκονται σε σειρά, είναι πιθανή η δημιουργία του φαινομένου κατά το οποίο τονίζονται κάποιες συγκεκριμένες συχνότητες και κάποιες άλλες απορροφούνται· φαινόμενο που ονομάζεται «diffraction grating effect». Αυτό το φαινόμενο πρέπει να αποφεύγεται επειδή μπορεί να προκαλέσει περιέργη τονική διαστρέβλωση της μουσικής.



Σχήμα 3-3. Περίθλαση

3.1 Βασικοί παράγοντες

Για να χαρακτηρίζεται ένας χώρος ότι έχει καλή ακουστική, πρέπει να πληροί τις πιο κάτω προϋποθέσεις:

1. Ο ήχος να φτάνει ομοιόμορφα σε όλα τα σημεία του χώρου με την ίδια περίπου στάθμη.
2. Να μην παρουσιάζονται φαινόμενα επικάλυψης ή όταν αυτά παρουσιάζονται να είναι περιορισμένα.
3. Ο χρόνος αντήχησης του χώρου να είναι ο βέλτιστος, ανάλογα με τη χρήση της αίθουσας έτσι ώστε να υπάρχει καθαρότητα στο λόγο και τονική ισορροπία κατά την εκτέλεση μουσικής.
4. Να μην παρουσιάζονται φαινόμενα ηχούς, ηχητικές σκιές ηχητικές παραμορφώσεις καθώς επίσης και φαινόμενα εστίασης του ήχου σε συγκεκριμένες θέσεις.
5. Ο χώρος θα πρέπει να διαθέτει επαρκή ηχομόνωση, ώστε ο εισερχόμενος θόρυβος να είναι περιορισμένος. Κατά τον Beranek η τιμή του κριτηρίου NCB για τον εισερχόμενο θόρυβο πρέπει να είναι μικρότερη των 18 dB.

3.1.1 Γραμμές ορατότητας (Sight lines)

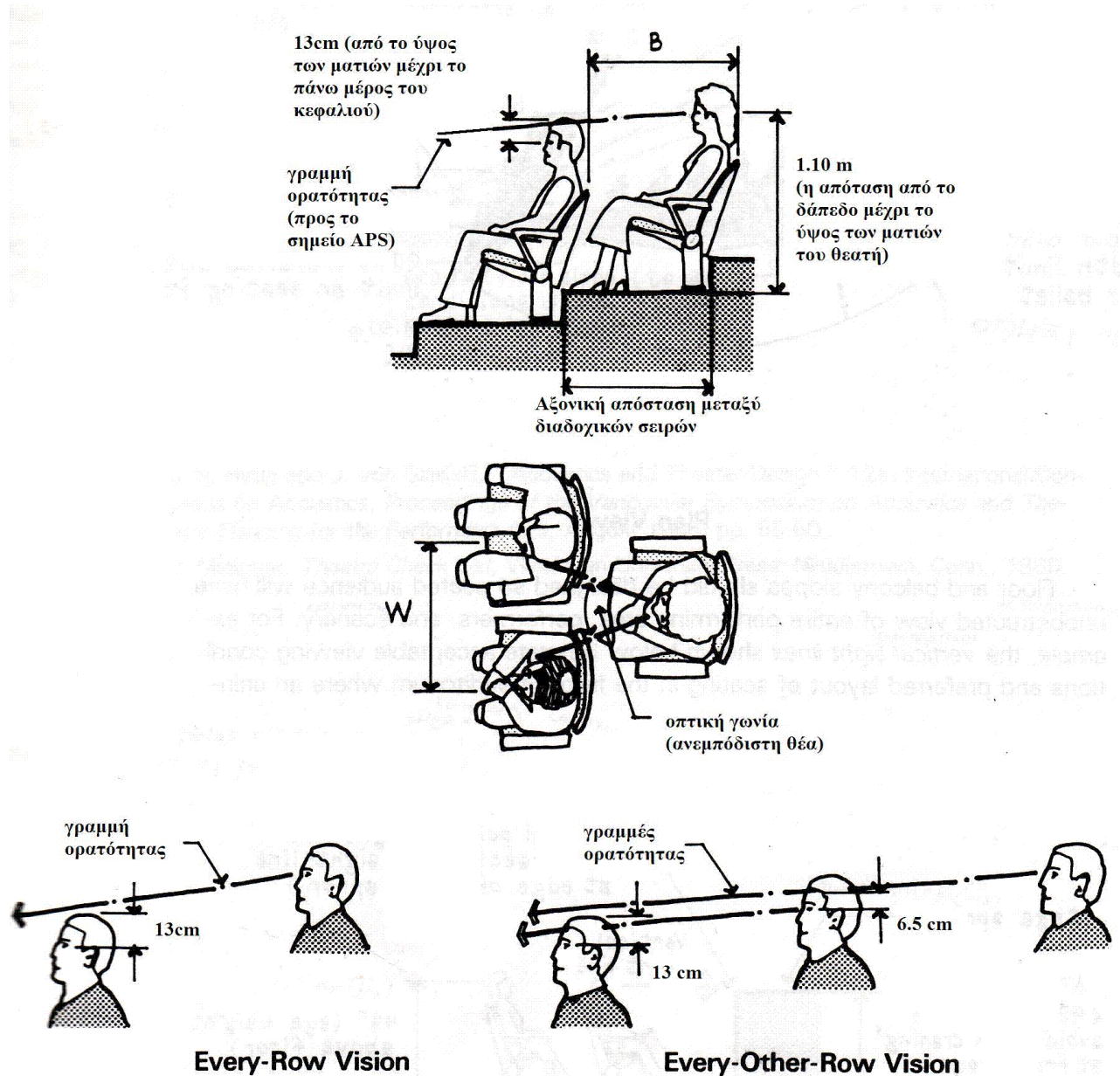
Οι γραμμές ορατότητας είναι ευθείες γραμμές που σχεδιάζονται από τα μάτια του καθισμένου ακροατή προς τη σκηνή. Το σημείο της σκηνής στο οποίο συγκλίνουν οι γραμμές ορατότητας συμβολίζεται με τα αρχικά APS (Arrival Point of Sight).

Στις αίθουσες ακρόασης και γενικότερα θεάματος είτε πρόκειται για θεατρική ή μουσική παράσταση, όπερα ή συναυλία, είναι πολύ σημαντικό ο θεατής να βλέπει τη σκηνή, χωρίς να έχει κανένα εμπόδιο στο οπτικό του πεδίο, ανεξάρτητα από τη θέση του, είτε αυτή βρίσκεται στις πρώτες σειρές ή στις τελευταίες είτε στον εξώστη.

Όταν δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο στις γραμμές ορατότητας, οι θεατές έχουν πλήρη εικόνα των ηθοποιών και η διάδοση του απευθείας ήχου γίνεται ανεμπόδιστα.

Είναι πολύ σημαντικό, οι θεατές να είναι σε θέση να ακούν και να βλέπουν καθαρά και άνετα και να διακρίνουν οτιδήποτε διαδραματίζεται στη σκηνή.

Το κατά πόσο υπάρχει κάποιο εμπόδιο στις γραμμές ορατότητας εξαρτάται από τους παράγοντες που φαίνονται στα πιο κάτω σχήματα.



Σχήμα 3-4. Γραμμές ορατότητας και διάταξη θέσεων

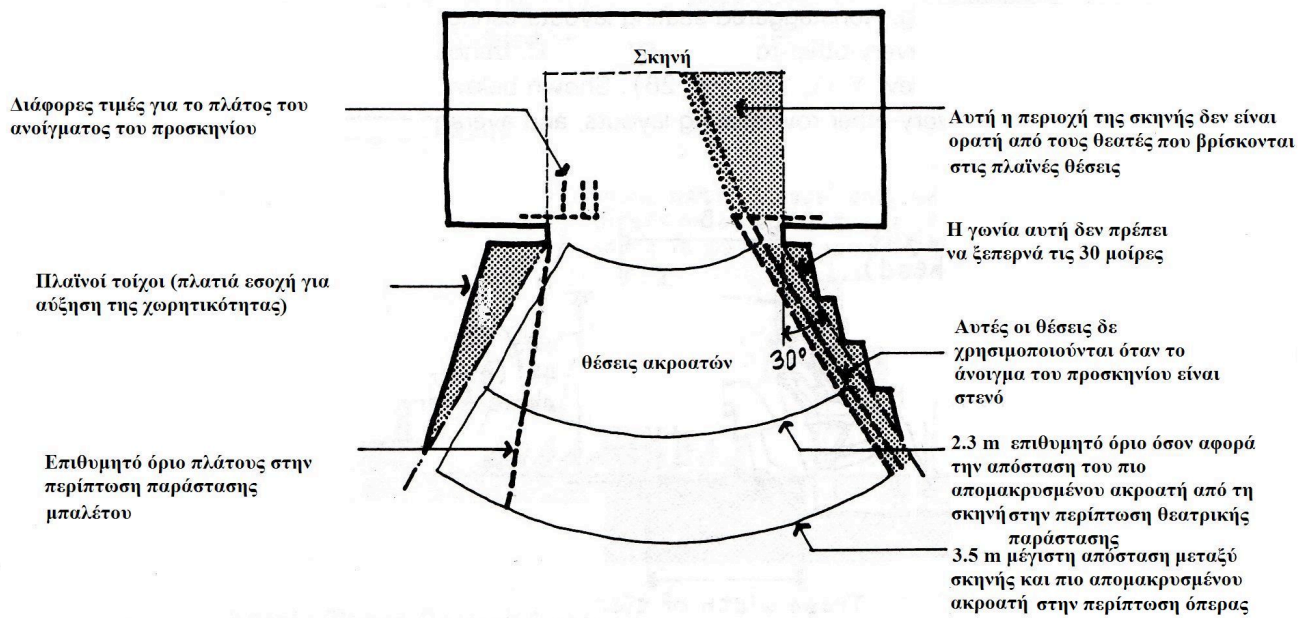
Η αξονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών, B, πρέπει να είναι 1.0 m στην περίπτωση που η διάταξη των θέσεων είναι στο ίδιο επίπεδο (ευρωπαϊκή), και περίπου 0.9 m στην περίπτωση που η διάταξη των θέσεων είναι αμφιθεατρική είτε στο ίδιο επίπεδο με παράλληλους διαδρόμους.

Στην περίπτωση που η διάταξη των θέσεων είναι στο ίδιο επίπεδο, η επιλογή διάταξης θέσεων με γραμμές ορατότητας κάθε δυο σειρές «every-other-row vision» δε δίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται.

Οι διαστάσεις B -αξονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών- και W – πλευρική απόσταση μεταξύ διαδοχικών θέσεων- πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές, αλλά και σύμφωνες με τις απαιτήσεις για άνεση και ασφαλεία.

Στα θέατρα με προσκήνιο , οι πλευρικές γραμμές ορατότητας (lateral sight lines) είναι προτιμότερο να βρίσκονται εντός της «οπτικής γωνίας» των 30°. Η οπτική γωνία μετρείται από την κατακόρυφο στο άκρο του ανοίγματος του προσκηνίου.

Σε αίθουσες πολλαπλής χρήσης το πλάτος του ανοίγματος του προσκηνίου ποικίλει ανάλογα με το είδος της παράστασης. Για παράδειγμα, εάν πρόκειται για μια παράσταση μπαλέτου, με τη συνοδεία συμφωνικής ορχήστρας, η ορχήστρα τοποθετείται συνήθως στο κάτω μέρος της σκηνης (πιτ ορχήστρας), και το άνοιγμα του προσκηνίου είναι μέγιστο. Αντίθετα, σε μικρές θεατρικές είτε μουσικές παραστάσεις με μικρά σύνολα ή σολίστες το πλάτος του ανοίγματος του προσκηνίου είναι μικρότερο.

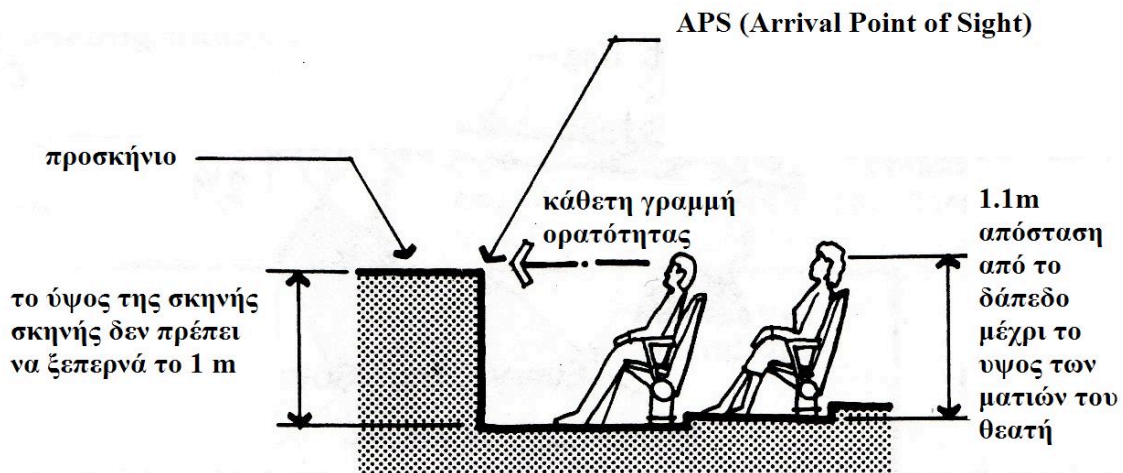


Σχήμα 3-5. Πλευρικές γραμμές ορατότητας σε αίθουσα με προσκήνιο

***23 m μέγιστη απόσταση για θεατρική παράσταση, 35 m μέγιστη απόσταση για όπερα

Οι κλίσεις στο δάπεδο όπως και στο μπαλκόνι, πρέπει να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε ο καθισμένος θεατής να μην έχει κανένα εμπόδιο στο οπτικό του πεδίο, να βλέπει δηλαδή καθαρά τη σκηνή, τους ηθοποιούς / χορευτές / μουσικούς και τα σκηνικά. Στην περίπτωση των μπαλκονιών η κλίση του δαπέδου δεν πρέπει να ξεπερνά τις 26°. Επίσης το ύψος του μπαλκονιού πρέπει να μην υπερβαίνει τα 20 m – από το ύψος της σκηνής- ώστε να αποφεύγονται συμπτώματα ιλίγγου στους θεατές.

Κάποιες φορές είναι επιθυμητό, οι θεατές που κάθονται στο μπαλκόνι, να έχουν στο



οπτικό τους πεδίο τους θεατές των πρώτων σειρών της πλατείας. Έτσι δημιουργείται η αίσθηση της συγκέντρωσης του ακροατηρίου.

Σχήμα 3-6. Arrival point of Sight (APS) και ύψος σκηνής

Σε αίθουσες ακρόασης που χρησιμοποιούνται κυρίως για ομιλία (π.χ. θέατρα, αίθουσες διαλέξεων) ο σχεδιασμός γίνεται με στόχο την υψηλή καταληπτότητα (intelligibility) ομιλίας.

Για υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (> 15 dB) το σχήμα της αίθουσας πρέπει να είναι τέτοιο ώστε όλοι οι ακροατές να λαμβάνουν απευθείας ήχο από τη θέση στην οποία βρίσκεται ο ομιλητής. Επίσης, η αίθουσα πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να μην παρουσιάζονται φαινόμενα ηχούς (echoes) και να μη δημιουργούνται σημεία εστίασης του ήχου («hot» / «bright» spots) και παράλληλα η στάθμη του θορύβου βάθους να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα.

3.1.2 Σχήμα

Το *σχήμα* της αίθουσας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακουστική της καθώς από αυτό εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό οι ανακλάσεις από την οροφή και τους τοίχους, η απόσταση του πιο απομακρισμένου ακροατή από τη σκηνή και η διάταξη των θέσεων των ακροατών. Είναι ένας παράγοντας που δεν επιδέχεται καμίας αλλαγής, εκ των υστέρων, οπότε ο σωστός σχεδιασμός είναι πολύ σημαντικός. [6]

Οπώς προαναφέρθηκε το σχήμα της αίθουσας καθορίζει την περιοχή όπου οι θεατές θα έχουν καθαρές γραμμές ορατότητας και ταυτόχρονα καθαρό απευθείας ήχο.

Επίσης, το σχήμα της αίθουσας παίζει καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία χρήσιμων ή ανεπιθύμητων ανακλάσεων, αλλά και στην παρουσία ή μη, φαινομένων ηχούς.

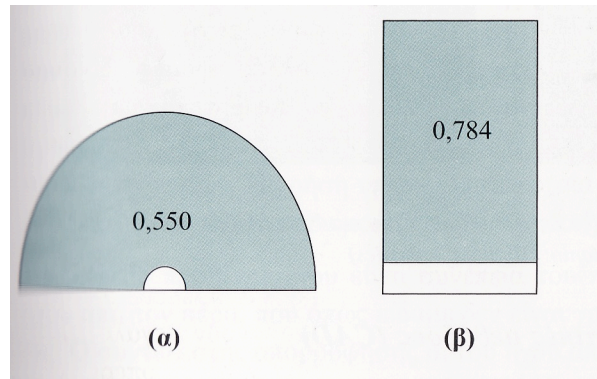
Ο όγκος της αίθουσας εξαρτάται σαφώς από τη χρήση της. Σε χώρους με όγκο μικρότερο από 4 m^3 ανά άτομο, η επίδραση των ακροατών είναι σημαντική για την ακουστική του χώρου, ενώ σε χώρους όπου ο όγκος ανά ακροατή υπερβαίνει τα 10 m^3 , η επίδραση των ακροατών είναι αμελητέα.

Πίνακας 3-1. Προτινόμενη τιμή όγκου ανά θεατή για διάφορες αίθουσες

Είδος χώρου	Όγκος ανά άτομο
Αίθουσες μουσικών εκδηλώσεων, συναυλιών, αίθουσες	6 – 9 m ³ / άτομο
Αίθουσες διαλέξεων, συνεδριάσεων	3 – 5 m ³ / άτομο
Αίθουσες πολλαπλής χρήσης	5 m ³ / άτομο
Κινηματογραφικές αίθουσες, θέατρα (με θεωρεία)	3 m ³ / άτομο
Κινηματογραφικές αίθουσες, θέατρα (χωρίς θεωρεία)	4 m ³ / άτομο

Σε μικρούς χώρους ο λόγος διαστάσεων θα πρέπει να μην έχει σχέση απλών αριθμών και οι συχνότητες να κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο. Για ορθογώνιους χώρους προτίνεται ο λόγος διαστάσεων που δίδεται από το «χρυσό κανόνα» $(\sqrt{5}-1):2: (\sqrt{5}+1)$. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι λόγοι $2^{n/3}$ ή $5^{n/3}$ όπου $n=0,1,2$. Π.χ. $1:\sqrt[3]{2}:\sqrt[3]{4}$. [6]

Για τη σύγκριση των διαφόρων χώρων μεταξύ τους όσον αφορά τη μέση απόσταση πηγής και δέκτη χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη μέση απόσταση (r_n) που ορίζεται από τη μέση απόσταση των ακροατών από την πηγή δια την τετραγωνική ρίζα του εμβαδού που καλύπτεται από ακροατές και είναι ένα αδιάστατο μέγεθος. Στο σχήμα που ακολουθεί γίνεται σύγκριση των κανονικοποιημένων μέσων αποστάσεων ενός αμφιθεατρικού χώρου (α) και ενός ορθογώνιου χώρου (β).



Σχήμα 3-7. Κανονικοποιημένη μέση απόσταση

Ο σχεδιασμός ενός χώρου μπορεί να γίνει υπολογιστικά με το σχεδιασμό της πορείας των ηχητικών ακτίνων. Δύο τρόποι ψηφιακής εξομοίωσης είναι:

Η μέθοδος του σχεδιαμού της πορείας των ακτίνων (Ray Tracing Method) και η μέθοδος των εικόνων (Image Method).

Στην πρώτη μέθοδο δημιουργούνται πολλές ηχητικές ακτίνες από την υποτιθέμενη σημειακή πηγή, οι οποίες κατευθύνονται ισότροπα στο χώρο. Η μέθοδος υπολογίζει την πορεία των ηχητικών ακτίνων μετά από τις διαδοχικές ανακλάσεις στις ανακλαστικές επιφάνειες του χώρου.

Στη δεύτερη μέθοδο υπολογίζονται οι θέσεις των εικονικών πηγών δεύτερης, τρίτης κτλ τάξης και συνδέει κάθε εικονική πηγή με το δέκτη, με μια ηχητική ακτίνα. Από το μήκος της ακτίνας υπολογίζεται η κρουστική απόκριση στο δέκτη. Η μέθοδος αυτή όταν η τάξη των ανακλάσεων είναι μεγάλη, απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς διότι ο αριθμός των πηγών είναι εξαιρετικά μεγάλος.

Ανάλογα με το σχήμα και τον όγκο της κάθε αίθουσας ισχύουν διαφορετικοί «κανόνες» για το ποιά θα είναι η διάταξη των θέσεων, αν το δάπεδο θα έχει κλίση, ποιά θα είναι η τιμή της απόστασης του πιο απομακρισμένου ακροατή από τη σκηνή, ποιά η τιμή του όγκου ανά ακροατή και ποιά η τιμή της επιφάνειας ανά ακροατή.

Πιο κάτω θα μελετήσουμε πιο συγκεκριμένα κάθε τμήμα της αίθουσας, για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς το κάθε τμήμα, είτε πρόκειται για τους πλαϊνούς τοίχους είτε για την οροφή είτε για το μπαλκόνι, επηρεάζει την ακουστική του χώρου. Οι πλευρικές ανακλάσεις λ.χ. είναι πολύ καθοριστικές για τον παράγοντα

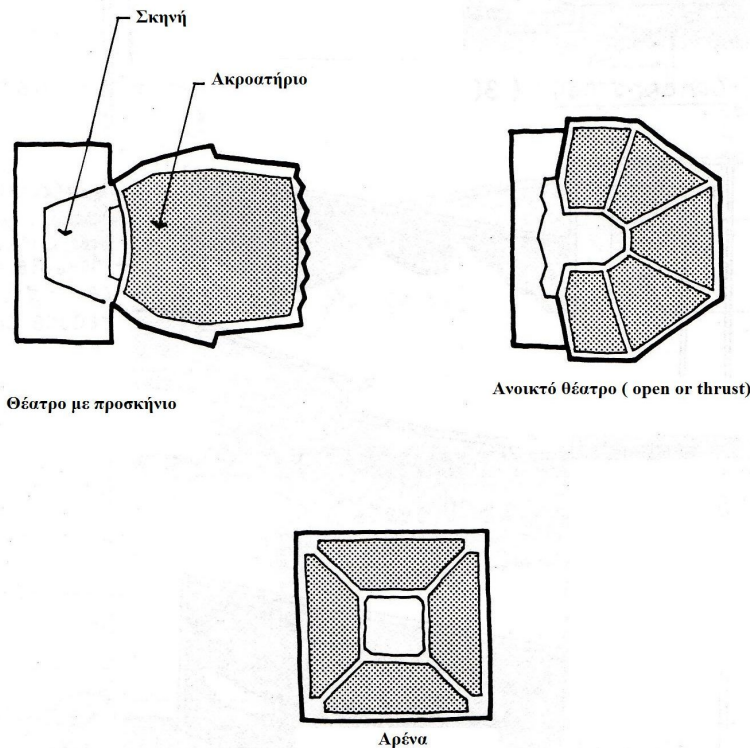
«οικειότητα» - εγγύτητα (intimacy) και συγχρόνως ενισχύουν τον απευθείας ήχο δίδοντας «όγκο».

Τα τρία βασικά ήδη σκηνης που συναντάμε σε θεατρικές αίθουσες είναι:

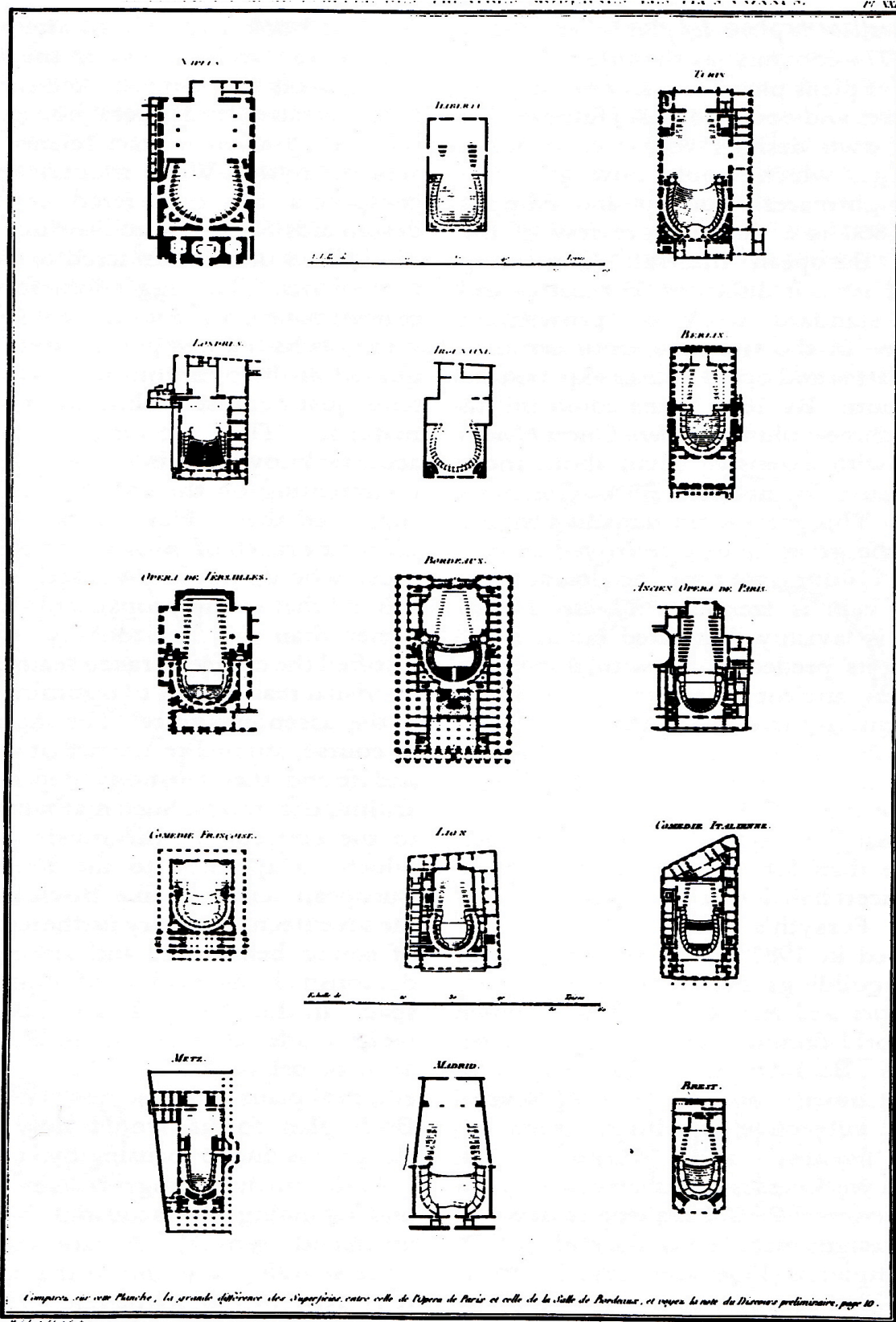
α) Προσκήνιο, β)Αρένα , γ)Ανοικτή σκηνή («thrust»)

Στα θέατρα αρένας ή στα θέατρα με ανοικτή σκηνή, οι ηχοανακλαστικοί τοίχοι καθώς και η οροφή (είτε αναρτώμενα ηχοανακλαστικά πάνελς) είναι εξαιρετικά σημαντικά στην αντιστάθμιση της κατευθυντικότητας του σήματος ομιλίας στις υψηλές συχνότητες. Η ανθρώπινη ομιλία είναι περισσότερο κατευθυντική στις υψηλές συχνότητες παρά στις χαμηλές, έτσι η ηχητική ενέργεια στις υψηλές συχνότητες που μεταδίδεται πίσω από τον ομιλητή είναι 10 μέχρι και 20 dB χαμηλότερη απ' ότι μπροστά από αυτόν. Σημειώνουμε

ότι η ενέργεια στις υψηλές συχνότητες επηρεάζει αρκετά την καταληπτότητα ομιλίας.



Σχήμα 3-8. Θέατρο με προσκήνιο, αρένα, ανοικτό θέατρο

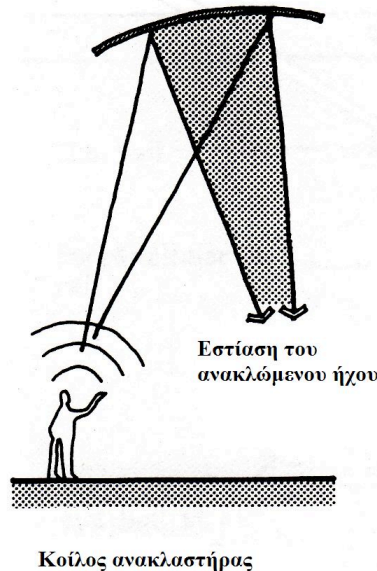


Σχήμα 3-9 Κατόψεις (στην ίδια κλίμακα) των σημαντικότερων θεάτρων του 18^ο αιώνα μ.Χ.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα είδη των ανακλαστικών επιφανειών που συναντάμε σε αίθουσες ακρόασης.

Κοίλος ανακλαστήρας

Οι κοίλες ηχοανακλαστικές επιφάνειες (π.χ. καμπυλωτοί πλαϊνοί τοίχοι σε αίθουσες ακρόασης) προκαλούν εστίαση του ήχου σε συγκεκριμένα σημεία στο ακροατήριο, δημιουργώντας τα λεγόμενα «hot» ή «bright» spots, αλλά και τη δημιουργία φαινομένων ηχούς. Στις περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η χρήση ανακλαστικών επιφανειών (π.χ. κοντά στη σκηνή), θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση κοίλων επιφανειών επειδή οι επιφάνειες αυτές προκαλούν εστίαση του ήχου, οπότε δεν έχουν τη δυνατότητα να διανέμουν τον ήχο.

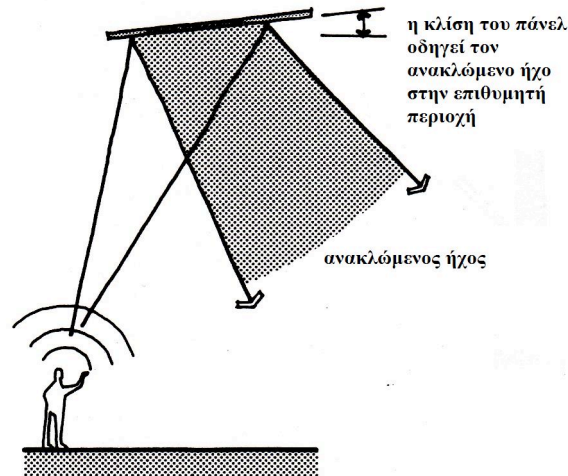


Σχήμα 3-10 . Κοίλος ανακλαστήρας

Επίπεδος ανακλαστήρας

Ο τρόπος ανάκλασης του ήχου από επίπεδες επιφάνειες εξαρτάται από το μέγεθος των τελευταίων. Εάν είναι αρκετά μεγάλες τότε μπορούν να κατευθύνουν τον ήχο επιτυχώς. Αρκετές φορές οι ανακλαστήρες τοποθετούνται με συγκεκριμένες κλίσεις ώστε να κατευθύνουν τον ήχο στα επιθυμητά σημεία. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στο σχήμα

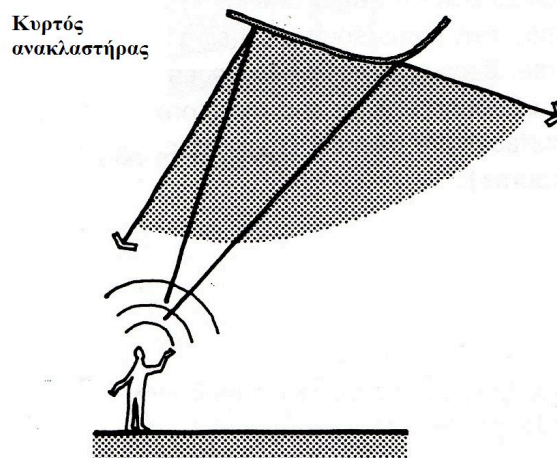
που ακολουθεί. Ο ανακλαστήρας έχει μια μικρή κλίση ώστε η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια να φτάνει στο πίσω μέρος της αίθουσας ακρόασης.



Σχήμα 3-11 . Επίπεδος ανακλαστήρας

Κυρτός ανακλαστήρας

Οι κυρτές επιφάνειες, εάν είναι αρκετά μεγάλες, μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά στη «διανομή» του ήχου. Ο ανακλώμενος ήχος αποκλίνει και η διάχυση του ήχου αυξάνεται. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που ο ανακλώμενος ήχος προκύπτει από την πρόσκρουσή του σε κυρτές επιφάνειες, η διασπορά του ήχου γίνεται σε μεγαλύτερο συχνοτικό φάσμα.



Σχήμα 3-12 . Κυρτός ανακλαστήρας

Για τη μελέτη της επίδρασης του σχήματος της αίθουσας στη διανομή του ήχου αλλά και στον προσδιορισμό των επιφανειών που προκαλούν πιθανώς φαινόμενα ηχούς, χρησιμοποιείται η ανάλυση με ακτίνες (Ray Diagram¹¹).

Η ανάλυση με τη βοήθεια ακτινών είναι κάτι ανάλογο της κατοπτρικής ανάκλασης του φωτός, αλλά αφορά ήχο. Δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος ισούται με τη γωνία ανάκλασης. Σημειώνουμε ότι οι γωνίες μετρούνται από την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης.

Οι περιορισμοί που ισχύουν στην ανάλυση με ακτίνες είναι:

1. Ο ήχος ανακλάται σύμφωνα με το τρόπο που υποδεικνύεται από την ανάλυση με ακτίνες, μόνο όταν οι διαστάσεις της επιφάνειας είναι μεγαλύτερες από το μήκος κύματος, λ , του προσπίπτοντος ήχου. ($> 4\lambda$)
2. Κανονικά, η πηγή ήχου είτε πρόκειται για ομιλία είτε για μουσική, βρίσκεται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σταθερό σημείο. Επομένως το σχήμα της αίθουσας θα πρέπει να είναι αποτέλεσμα προσεκτικής ισοστάθμισης της καλύτερης δυνατής ηχητικής διανομής από πολλά σημεία πηγής, προς το ακροατήριο.
3. Χρησιμοποιώντας την ανάλυση με ακτίνες δεν είναι δυνατό να έχουμε μια λεπτομερή εκτίμηση της διάχυσης του ήχου από τις επιφάνειες της αίθουσας. Επομένως για τη μελέτη αιθουσών υψηλών ακουστικών απαιτήσεων, χρησιμοποιούνται μοντέλα υπό κλίμακα (scale models) που επιτρέπουν την ακουστική μελέτη σε όλο το συχνοτικό εύρος.

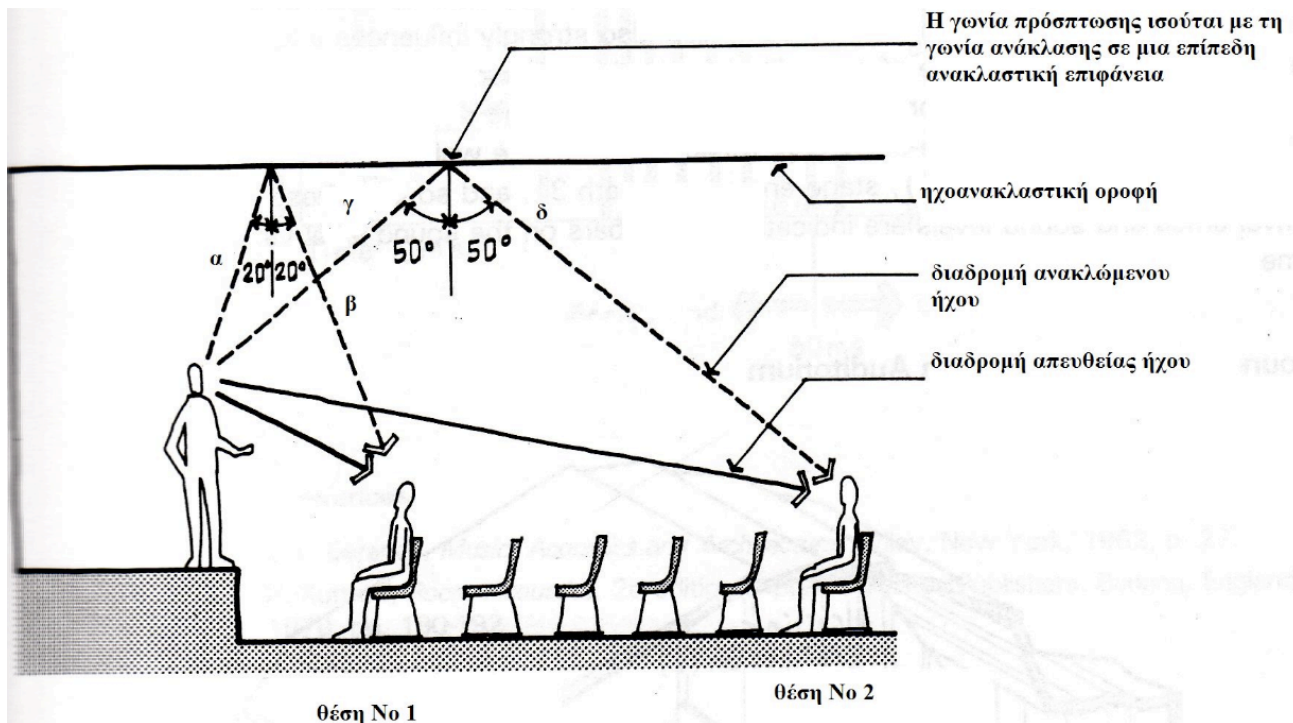
Sound path difference (m)	Time Delay Gap (ms)	Συνθήκες ακρόασης
< 7	< 20	εξαιρετικές για ομιλία και μουσική
7 - 10.4	20 - 30	καλές για ομιλία, ικανοποιητικές για

¹¹ Για περισσότερες πληροφορίες βλπ Παράρτημα Α

7 - 10.4	20 -30	καλές για ομιλία, ικανοποιητικές για μουσική
10.4 - 15.2	30 - 45	οριακές
15.2 - 20.7	45 - 60	μη ικανοποιητικές

Πίνακας 3-2. Sound path difference, TDG και συνθήκες ακρόασης

Ο πίνακας αυτός είναι οδηγός σχεδίασης και μαζί με την ανάλυση με ακτίνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γενική αξιολόγηση των συνθηκών ακρόασης.



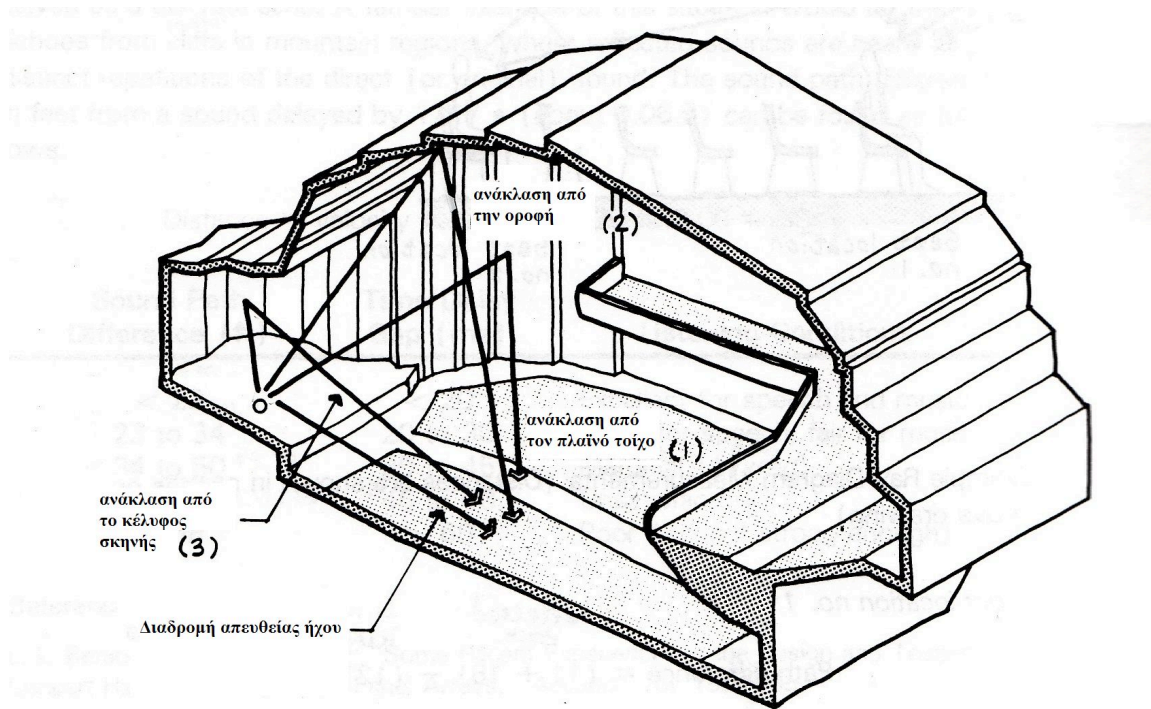
Σχήμα 3-13 (α). Sound path difference

- path difference = reflected path – direct path

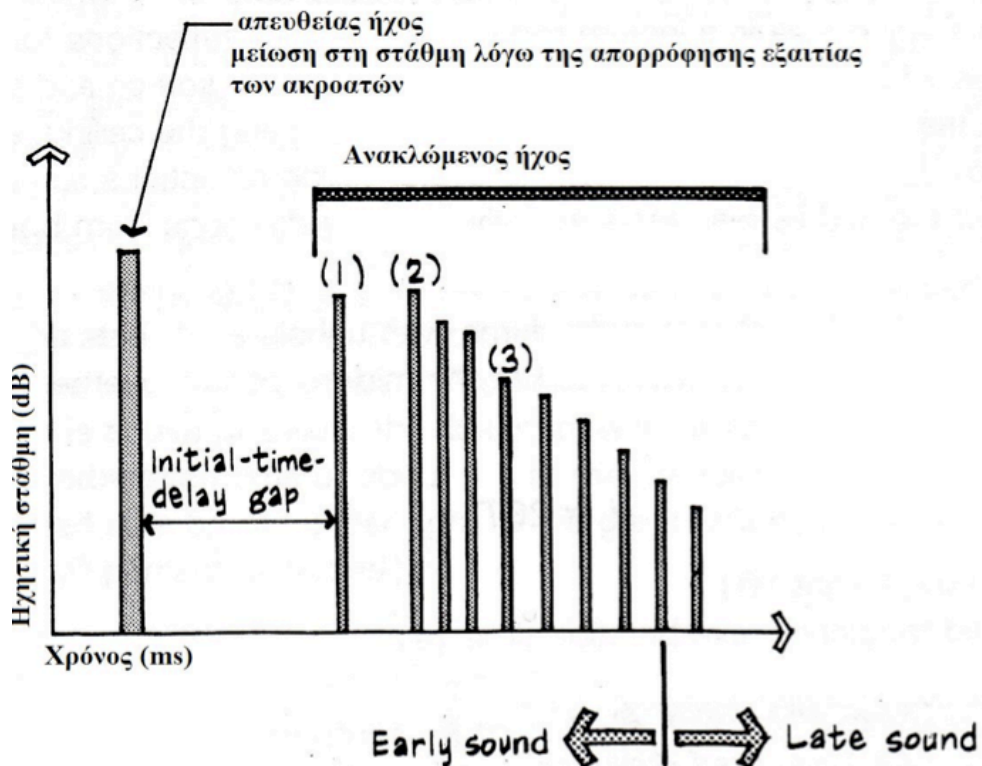
Η τιμή αυτού του χρονικού διαστήματος επηρεάζει την αντίληψη του ακροατή για το μέγεθος του χώρου.

Κατά το σχεδιασμό αιθουσών ακρόασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλυση με διάγραμμα ακτινών για τον υπολογισμό του initial delay gap.

Η ανακλώμενη ενέργεια που φτάνει στα πρώτα 80 ms είναι σημαντική για τη διακριτότητα (definition) και τη διαύγεια (clarity) της μουσικής.



Σχήμα 3-13 (β). Ανακλάσεις σε αίθουσα με προσκήνιο



Σχήμα 3-13 (γ). Ηχητική στάθμη ως προς το χρόνο

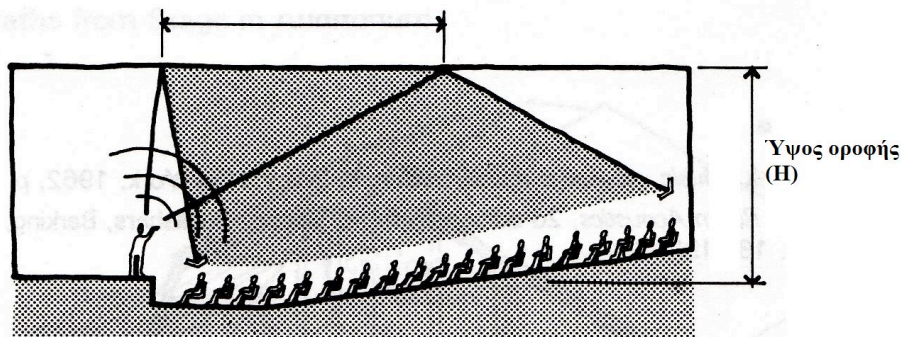
3.1.3 Οροφή

Η επιλογή του σχήματος και του ύψους της οροφής γίνεται ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιείται η αίθουσα.

Στα πιο κάτω σχήματα, με τη βοήθεια του διαγράμματος ακτινών, μπορούμε να δούμε πως μια μικρή αλλαγή στο σχήμα της οροφής μιας αίθουσας ακρόασης, μπορεί να δώσει περισσότερες χρήσιμες ανακλάσεις στην περιοχή των ακροατών.

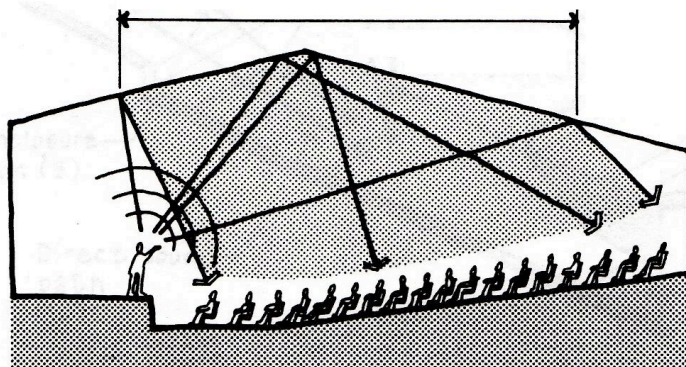
Επίπεδη οροφή

Αυτό το τμήμα της οροφής παρέχει χρήσιμες ανακλάσεις



Οροφή με κλίση

Το τμήμα της οροφής που παρέχει χρήσιμες ανακλάσεις είναι μεγαλύτερο (>150 % σε σύγκριση με την επίπεδη οροφή του πιο πάνω παραδείγματος)



Σχήμα 3-14. Επίπεδη οροφή και οροφή με κλίση

Το μέσο ύψος, H , της οροφής, σε αίθουσες ακρόασης όπου οι θέσεις έχουν υφασμάτινο κάλυμα και οι πίσω τοίχοι είναι ηχοαπορροφητικοί, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$H = 20T$$

** Η αντίστοιχη σχέση για ύψος σε μέτρα είναι $H \approx 6.1T$

όπου H = το ύψος της οροφής σε ft

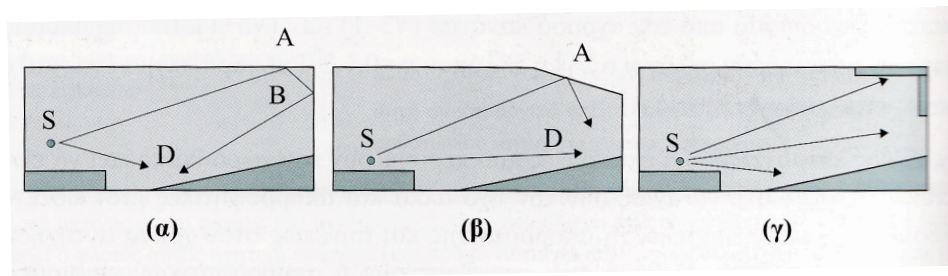
T = ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες

Σε αίθουσες συναυλιών όπου οι τιμές του χρόνου αντήχησης πρέπει να είναι μεγάλες, προτιμούνται υψηλές τιμές όσον αφορά το ύψος της οροφής. Επίσης, όλοι οι τοίχοι πρέπει να είναι ανακλαστικοί. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που η οροφή προκαλεί διάχυση του ήχου, μπορεί να βελτιώσει την ακουστότητα των πλευρικών ήχων, μειώνοντας την ισχύ των ανακλάσεων που προέρχονται από την οροφή.

Η ηχώ είναι η μεμονωμένη επανάληψη του απευθείας ήχου η οποία είναι αρκετά δυνατή ώστε να είναι ακουστή πάνω από τη γενικότερη αντήχηση και το θόρυβο βάθους ενός χώρου.

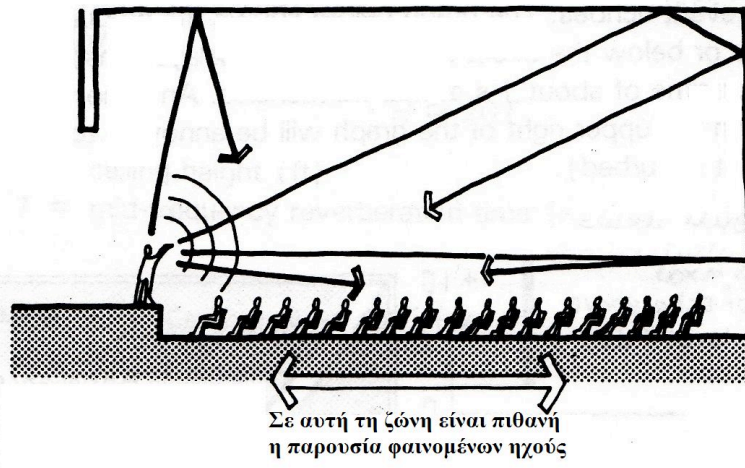
Πρόκειται για ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που οφείλεται σε ισχυρές ανακλάσεις (συνήθως τις πρώτες). Κατά την ομιλία ο μέσος ρυθμός εκφώνησης είναι 15-20 συλλαβές το λεπτό. Δηλαδή η μέση χρονική απόσταση μεταξύ συλλαβών είναι 50-70 ms. Σε αυτό το χρόνο ο ήχος διανύει απόσταση 17-24 m. Αν σε κάποιο ακροατή αντιστοιχεί διαφορά δρόμων τους απευθείας ήχου και της ανάκλασης είναι μεγαλύτερη από 17 m τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ηχούς. Για χώρους όπου πραγματοποιούνται μουσικές παραστάσεις, η διαφορά αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι τα 34 m.

Για τον περιορισμό των φαινομένων της ηχούς γίνονται τροποποιήσεις στο σχήμα της οροφής, εφαρμόζεται απορρόφηση στον πίσω τοίχο είτε ηχοδιάχυση καθώς και στην πρόσοψη του προβόλου του εξώστη, αποφεύγονται οι παράλληλοι τοίχοι και γενικότερα τα παραλληλεπίπεδα σχήματα και οι ορθές γωνίες καλύπτονται με απορροφητικό υλικό.

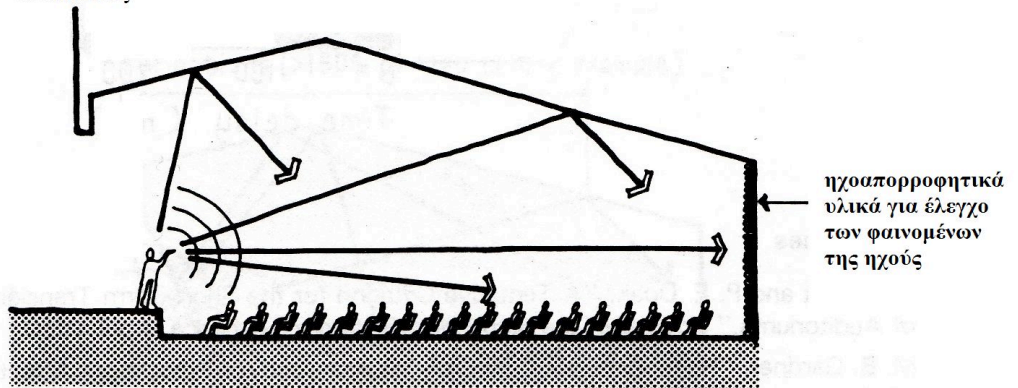


Σχήμα 3-15. Οροφή και ανακλάσεις

Για σήματα ομιλίας, η ηχώ φτάνει στον ακροατή όταν ο χρόνος μεταξύ του απευθείας ήχου και της πρώτης ανάκλασης είναι μεγαλύτερος των 60 ms. Στις αίθουσες ακρόασης, παρουσιάζονται φαινόμενα ηχούς όταν υπάρχουν ηχοανακλαστικοί επίπεδοι ή κοίλοι πίσω τοίχοι και θολωτές είτε πολύ ψηλές οροφές.



Αλλάζοντας το σχήμα της οροφής, αποφεύγονται φαινόμενα ηχούς και επιτυγχάνονται χρήσιμες ανακλάσεις

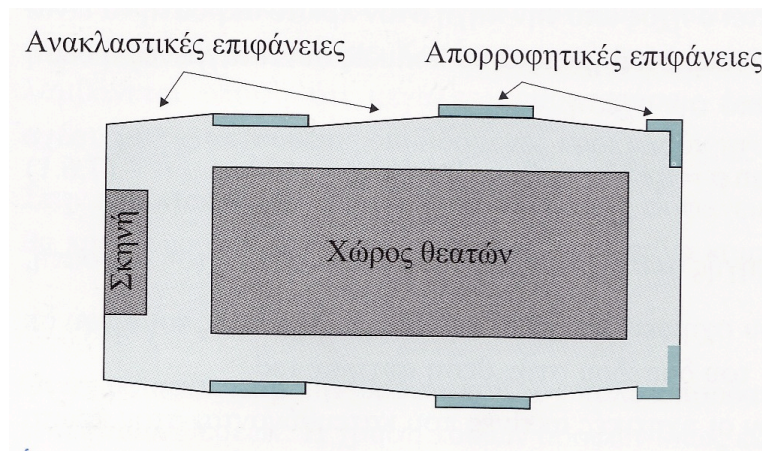


Σχήμα 3-16. Βελτίωση συνθηκών ακρόασης με αλλαγή του σχήματος της οροφής (επάνω- πριν και, κάτω μετά τις βελτιώσεις στο σχήμα της οροφής)

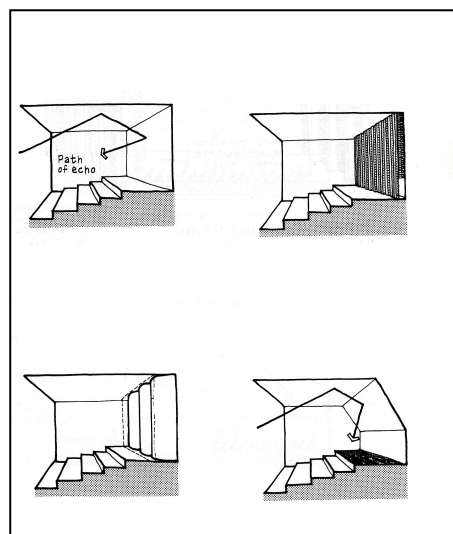
3.1.4 Τοίχοι

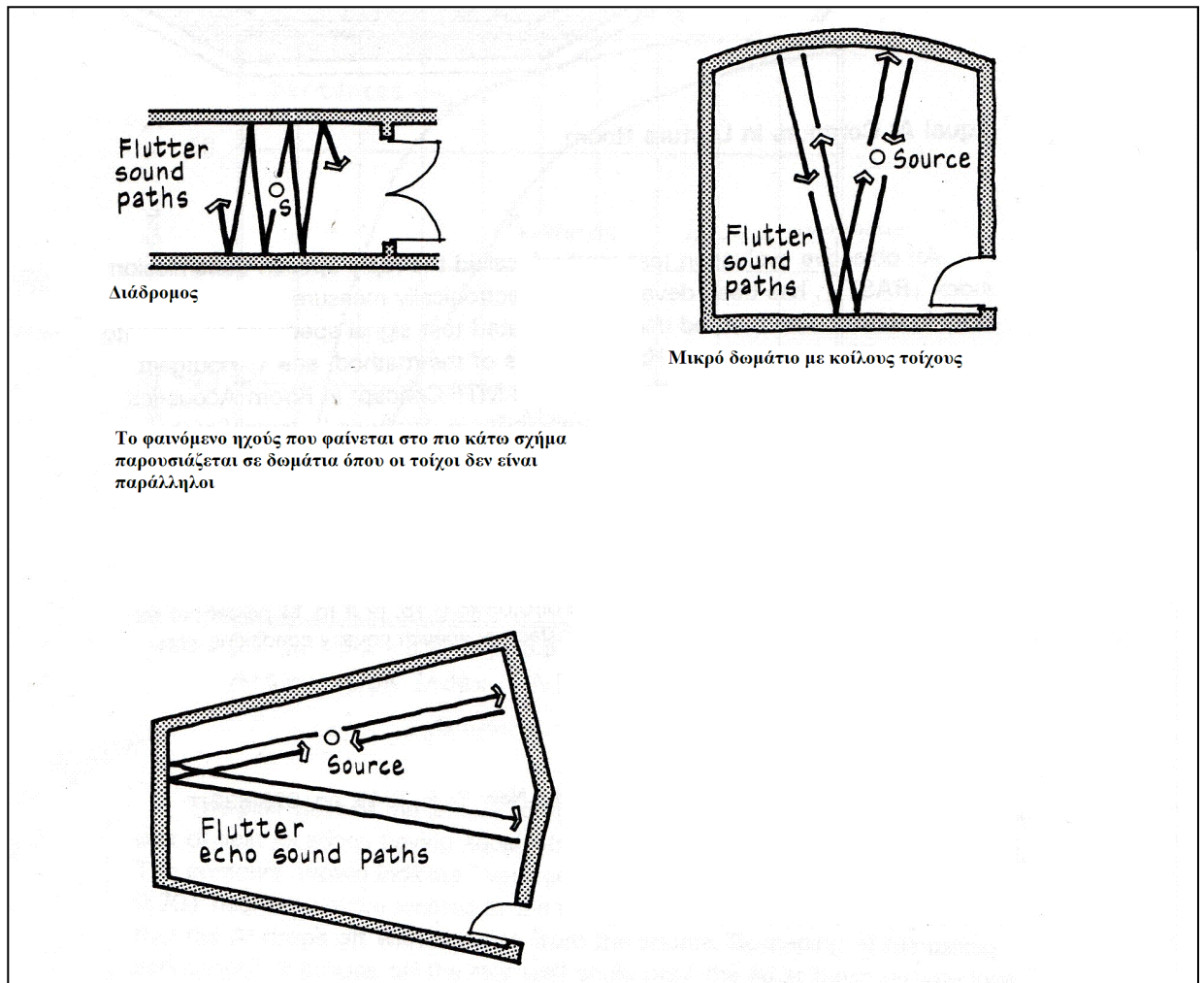
Είναι πολύ σημαντικό η οροφή και οι πλαϊνοί τοίχοι να είναι ανακλαστικοί ώστε να παρέχουν δυνατές πρώτες ανακλάσεις, και ο πίσω τοίχος καθώς και η πρόσοψη του προβόλου του εξώστη (αν υπάρχει) να είναι ηχοαπορροφητικοί, έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ηχούς.

Στην περίπτωση που παρουσιάζονται φαινόμενα ηχούς εξαιτίας του πίσω τοίχου, μπορεί να χρησιμοποιηθούν απορροφητικά υλικά ή διαχυτές είτε να γίνει τροποποίηση του σχήματος του τοίχου. Και οι τρεις περιπτώσεις φαίνονται στα πιο κάτω σχήματα.



Σχήμα 3-17. Ανακλαστικές και απορροφητικές επιφάνειες σε ορθογώνια αίθουσα ακρόασης





Σχήμα 3-18. Αντιμετώπιση φαινομένων ηχούς

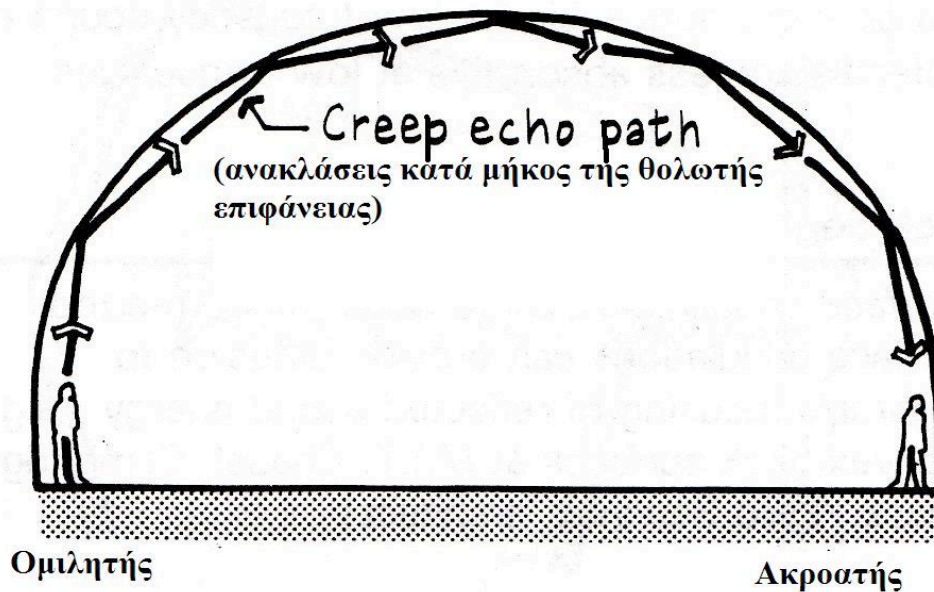
Το φαινόμενο της πολλαπλής ηχούς (flutter echo) προκαλείται συνήθως από επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις της ηχητικής ενέργειας μεταξύ απέναντι παράλληλων ή κοίλων ηχοανακλαστικών επιφανειών. Η πολλαπλή ηχώ γίνεται αντιληπτή σαν ένα υψίσυχο κουδούνισμα ή βουητό (buzzing).

Για να αποφύγουμε τη δημιουργία αυτού του φαινομένου, πρέπει κατά το σχεδιασμό να αποφεύγουμε τις παράλληλες επιφάνειες, εφαρμόζοντας ηχοαπορρόφηση είτε χωρίζοντας τις ομαλές επιφάνειες σε κλιμακωτά επίπεδα.

Σχήμα 3-19. Φαινόμενο πολλαπλής ηχούς.

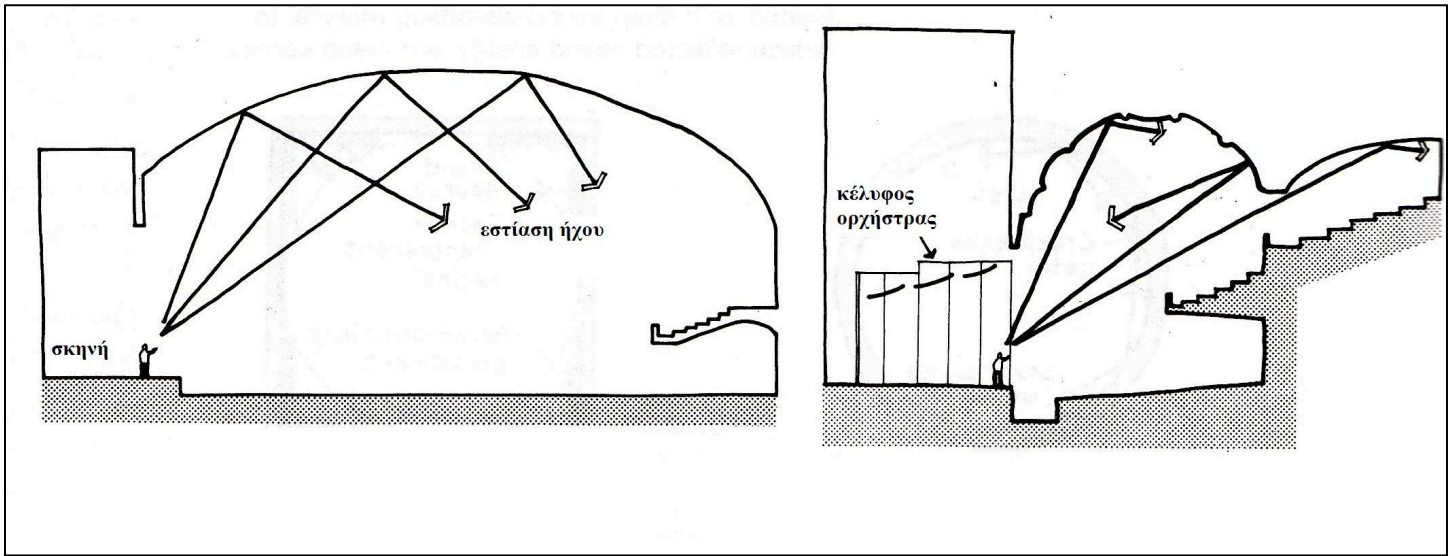
Όσον αφορά τη μελέτη της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας από τους πλαϊνούς τοίχους, και πάλι η ανάλυση με ακτίνες μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη. Οι ανακλάσεις που προέρχονται από τους πλαϊνούς τοίχους βοηθούν στη δημιουργία της «χωρικής εντύπωσης», αυτό που ονομάζουμε οικειότητα ή εγγύτητα (intimacy) και είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στους χώρους όπου πραγματοποιούνται μουσικές παραστάσεις. Επίσης, οι πρώτες ανακλάσεις από τους πλαϊνούς τοίχους προσφέρουν ενίσχυση στον απευθείας ήχο.

Για την αποφυγή ενοχλητικών ηχητικών ανακλάσεων, που μειώνουν την καταληπτότητα του απευθείας ήχου, θα πρέπει να αποφεύγονται οι κοίλες επιφάνειες στους τοίχους ή στην οροφή. Τα κοίλα σχήματα συγκεντρώνουν τον ανακλώμενο ήχο σε ένα εστιακό σημείο. Για παράδειγμα, η ηχητική ενέργεια μπορεί να συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένες περιοχές (εστίαση) ή να ανακλάται κατά μήκος ομαλών κοίλων επιφανειών διανύοντας έτσι μεγάλες αποστάσεις με μηδαμινή απόσβεση δημιουργώντας το φαινόμενο της «υφέρπουσας ηχούς» («creep echo») που είναι γνωστό και με τον όρο «whispering gallery effect» εξαιτίας του ότι χαμηλόφωνα σήματα ομιλίας μπορούν να ακουστούν σε αρκετά μακρινές αποστάσεις.

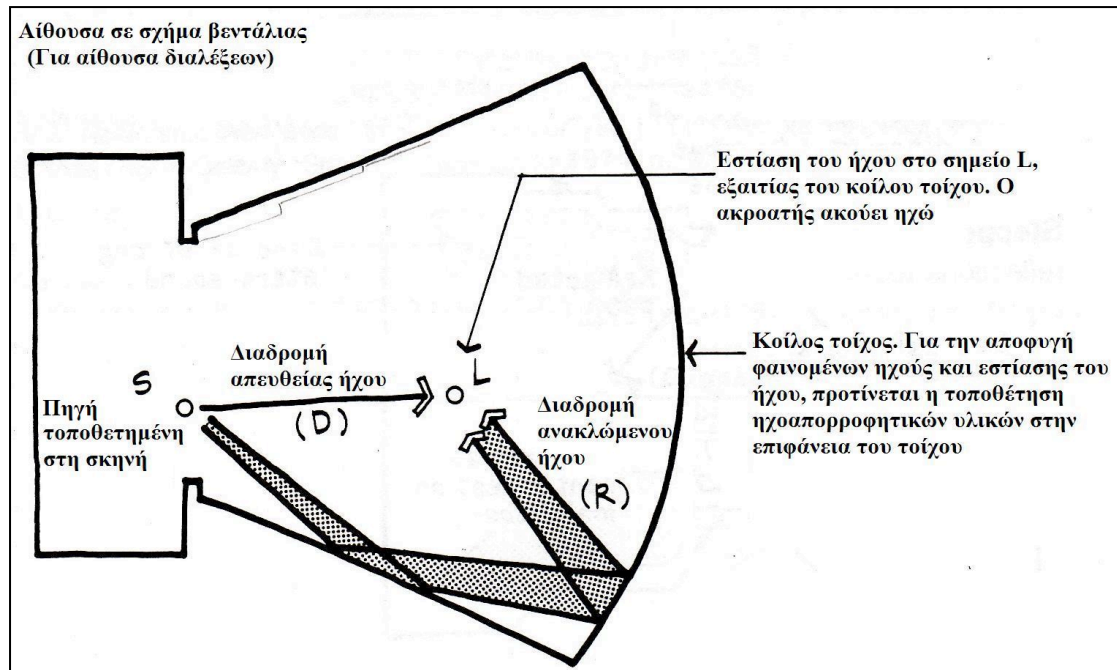


Σχήμα 3-20. Φαινόμενο «υφέρπουσας ηχούς»- creep echo

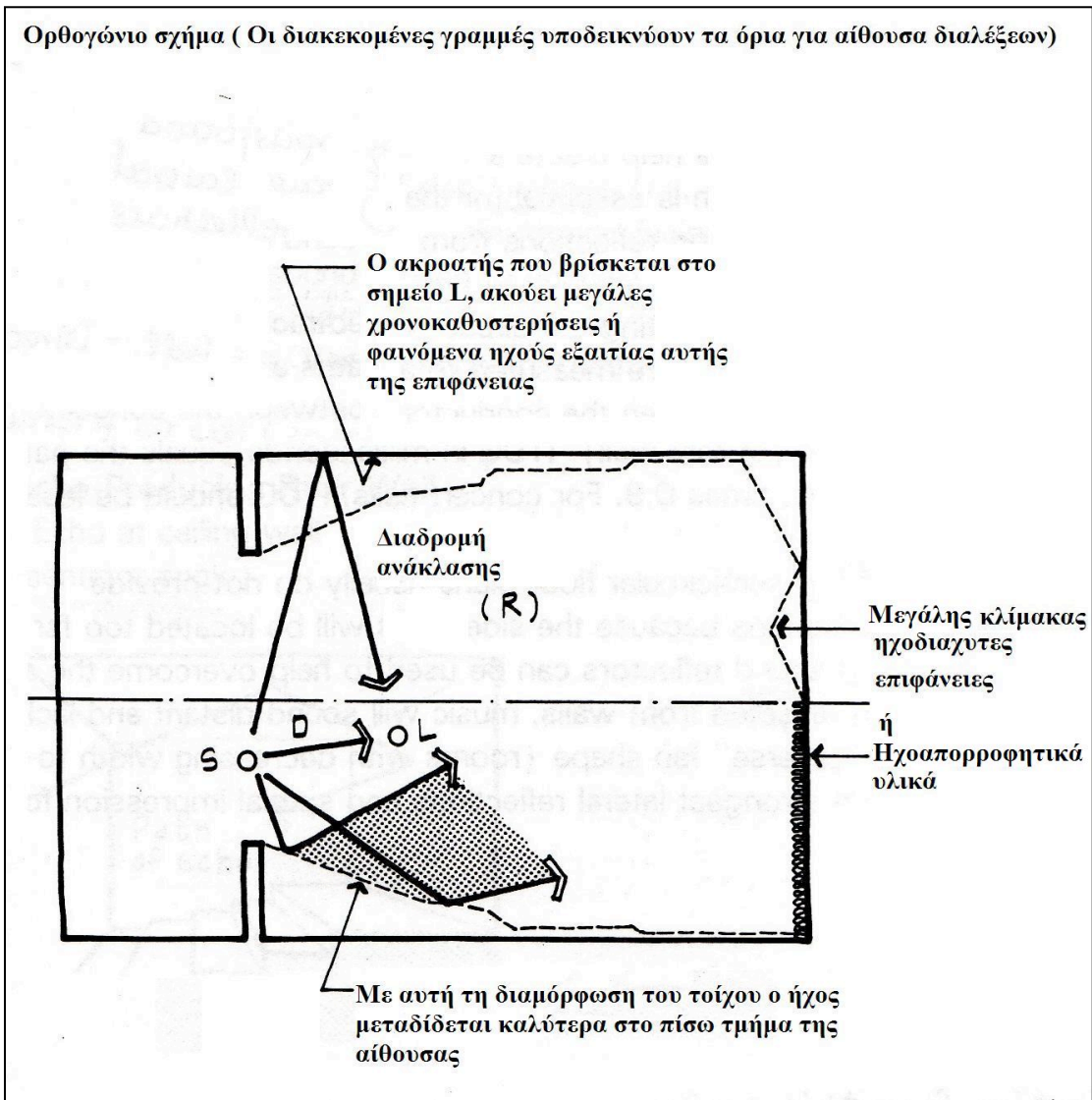
Οι αίθουσες με σχήμα βεντάλιας ή ημικυκλίου συνήθως δεν παρέχουν δυνατές πρώτες πλευρικές ανακλάσεις επειδή οι τοίχοι βρίσκονται πολύ μακριά ο ένας από τον άλλο, με αποτέλεσμα η μουσική να ακούγεται «απόμακρη» και να έχει έλλειψη τονικής πληρότητας (fullness of tone)



Σχήμα 3-21. Φαινόμενο εστίασης ήχου εξαιτίας του κοίλου σχήματος της οροφής



Σχήμα 3-22. Φαινόμενο εστίασης ήχου σε αίθουσα με σχήμα βεντάλιας



Σχήμα 3-23. Βελτιώσεις στο σχήμα, ορθογώνιας αίθουσας, για καλύτερες συνθήκες ακρόασης

3.1.5 Απορρόφηση

Η χρήση ανακλαστικών και απορροφητικών επιφανειών καθορίζει και τον χρόνο αντήχησης γεγονός που καθιστά σαφώς το ρόλο τους εξαιρετικά σημαντικό. Η θέσεις των ανακλαστικών και απορροφητικών επιφανειών προσδιορίζονται γραφικά είτε με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, έτσι ώστε ο ήχος με διαδοχικές ανακλάσεις να κατανέμεται ομοιόμορφα στο χώρο.

Απορρόφηση από δάπεδο

Το δάπεδο μαζί με τις θέσεις των ακροατών έχουν μεγάλη απορρόφηση.

Επιπρόσθετα το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών σειρών των θέσεων συντονίζεται στην περιοχή των συχνοτήτων από 100-200 Hz προσδίδοντας επιπλέον απορρόφηση. Για αποφυγή αυτού του φαινομένου κατά το σχεδιασμό δίνεται κλίση στο δάπεδο έτσι ώστε ο απευθείας ήχος να μη «διακόπτεται» από τις μπροστινές θέσεις. Κατά τον Cremer η κλίση αυτή θα πρέπει να αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή με τέτοιο τρόπο ώστε η γωνία πρόσπτωσης (φ) του ήχου προς τον ακροατή να είναι η ίδια και για τις υπόλοιπες θέσεις. Η μαθηματική προσέγγιση σε πολικές συντεταγμένες της θέσης του ακροατή δίνεται από τη σχέση:

$$r = r_0 \exp \theta \tan \varphi \approx r_0 e^{\theta / \varphi}, \quad \theta \equiv \varphi \ln(d / d_0)$$

όπου r_0 η απόσταση της πηγής από τη θέση των ματιών του πρώτου ακροατή
(γραμμή ορατότητας)

φ η γωνία πρόσπτωσης που σχηματίζεται από την ευθεία διάδοσης του ήχου σε κάποια θέση, με την κλίση του δαπέδου στη θέση αυτή σε ακτίνια (rad)

θ η γωνία που σχηματίζουν οι ηχητικές ακτίνες που κατευθύνονται στον πρώτο και τελευταίο ακροατή

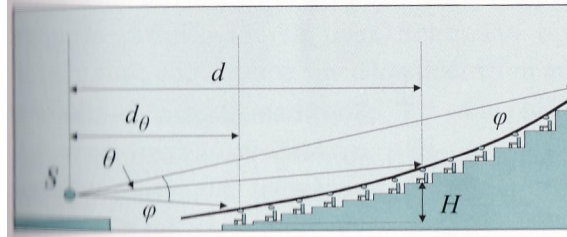
Η πιο πάνω σχέση μπορεί να προσεγγιστεί από την:

$$H = \varphi \left[d \ln \left(\frac{d}{d_0} \right) - (d - d_0) \right]$$

όπου d_0 η οριζόντια απόσταση του πρώτου ακροατή από τη σκηνή

d η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από την πηγή
Η η «ανύψωση» σε σχέση με τον πρώτο ακροατή

[6]



Σχήμα 3-24. Κλίση δαπέδου (seating area)

Απορρόφηση λόγω του αέρα

Καθώς τα ηχητικά κύματα περνούν διαμέσο του αέρα, η ενέργειά τους απορροφάται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «μοριακή ηρέμιση» («molecular relaxation») επειδή τα μόρια του αέρα απορροφούν ενέργεια καθώς κτυπούν το ένα με το άλλο. Το μέγεθος της απορρόφησης στις συχνότητες κάτω των 2000 Hz και άνω των 10000 Hz, είναι αμελητέο. Εντούτοις, το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιληφθεί στον υπολογισμό της συνολικής απορρόφησης του χώρου, όταν πρόκειται για μεγάλες αίθουσες.

Έτσι ο τύπος για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης τροποποιείται σε :

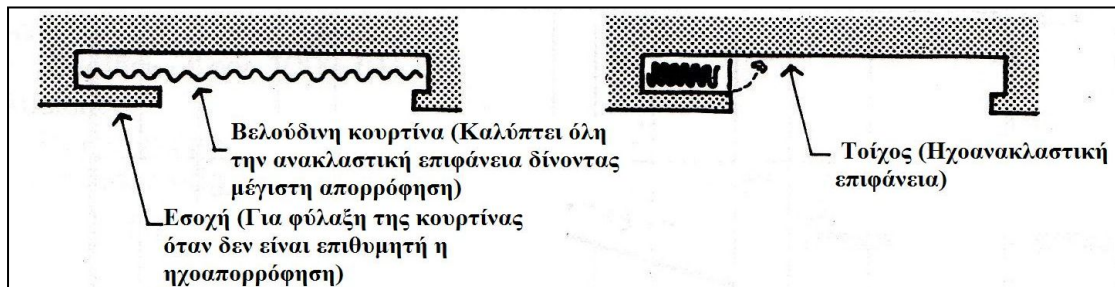
$$RT_{60} = (0.161V) / (S\bar{a} + mV)$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα, V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα, \bar{a} ο μέσος συντελεστής απορρόφησης, S η ολική επιφάνεια του δωματίου, m ο συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας που η τιμή του εξαρτάται από τη συχνότητα και την υγρασία

[3]

Στις περιπτώσεις που ο χρόνος αντήχησης πρέπει να μεταβάλλεται ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των διαφόρων δραστηριοτήτων – παραστάσεων που εκτελούνται στην αίθουσα, συνήθως χρησιμοποιούνται ηχοαπορροφητικά υλικά σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μετακινούνται ή να μεταβάλλονται δίνοντας κάθε φορά διαφορετική απορρόφηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ακροατές μπορούν να διακρίνουν τις

διαφορές στον χρόνο αντήχησης, όταν αυτός ισούται είτε υπερβαίνει τα 0.1 s. Σε αίθουσες όπου πραγματοποιούνται μουσικές παραστάσεις αποφεύγεται η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών κοντά στις ηχητικές πηγές, ώστε να μην επηρεάζεται δυσμενώς η αρχική ηχητική ενέργεια.



Σχήμα 3-25. Μεταβλητές συνθήκες ηχοαπορρόφησης, ηχοανάκλασης

- *Κουρτίνες*

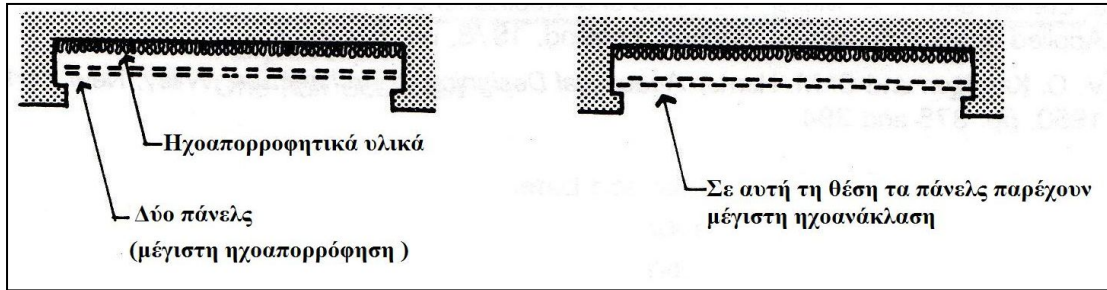
Οι κουρτίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν διαφορετική απορρόφηση, ανάλογα με τις ανάγκες της παράστασης. Δηλαδή να παρέχουν μέγιστη απορρόφηση όταν καλύπτουν πλήρως μια επιφάνεια ενώ όταν είναι μαζεμένες σε μια εσοχή να δίνουν ελάχιστη απορρόφηση, εφόσον αφήνουν εκτεθειμένη την ηχοανακλαστική επιφάνεια του τοίχου.

Μια οπτικά αδιαφανής οθόνη που ονομάζεται «transondent» τοποθετείται μπροστά από την κουρτίνα ώστε να επιτρέπει τις αλλαγές στην απορρόφηση χωρίς αυτό να επηρεάζει την εμφάνιση. Αυτή η οθόνη είναι ακουστικά διάφανη. Η χρήση αυτής της οθόνης πρέπει να γίνεται με προσοχή ιδιαίτερα σε αίθουσες όπου γίνονται μουσικές παραστάσεις, καθώς το βαθύ κενό πίσω από την ηχοδιάφανη οθόνη μπορεί να απορροφήσει μεγάλα ποσά ηχητικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες, να λειτουργήσει δηλαδή σαν συνηχητής όγκου.

- *Πανελς*

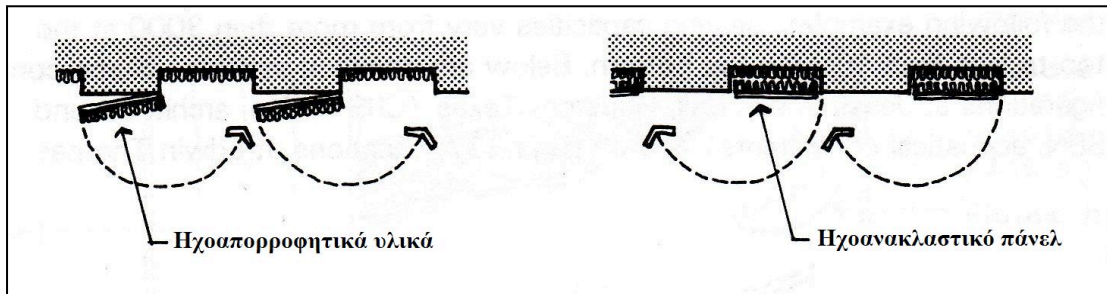
Δύο πάνελς με διάτρυτες επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικούς συνδυασμούς ώστε να δώσουν την επιθυμητή απορρόφηση. Όταν τα πάνελς βρίσκονται το ένα πίσω από το άλλο, η απορρόφηση είναι μέγιστη. Όταν το ένα από τα πάνελς μετακινηθεί έτσι ώστε να καλύψει τις τρύπες του άλλου πάνελ, η

ανάκλαση γίνεται μέγιστη. Ενδιάμεσες θέσεις των πάνελς μπορούν να δώσουν αυξομείωση στην απορρόφηση.



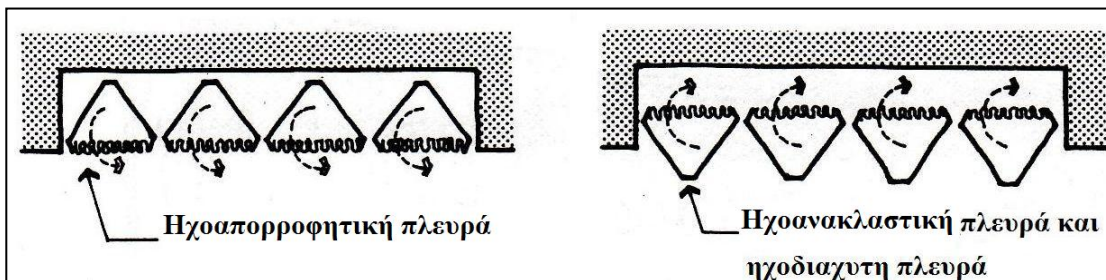
Σχήμα 3-26. Πάνελς μεταβλητής απορρόφησης, ανάκλασης ήχου

- Στο σχήμα που ακολουθεί ο σχεδιασμός των πάνελς αυτών επιτρέπει απορρόφηση είτε ανάκλαση ανάλογα με την θέση του πάνελ (ανοικτό = απορρόφηση, κλειστό= ανάκλαση)



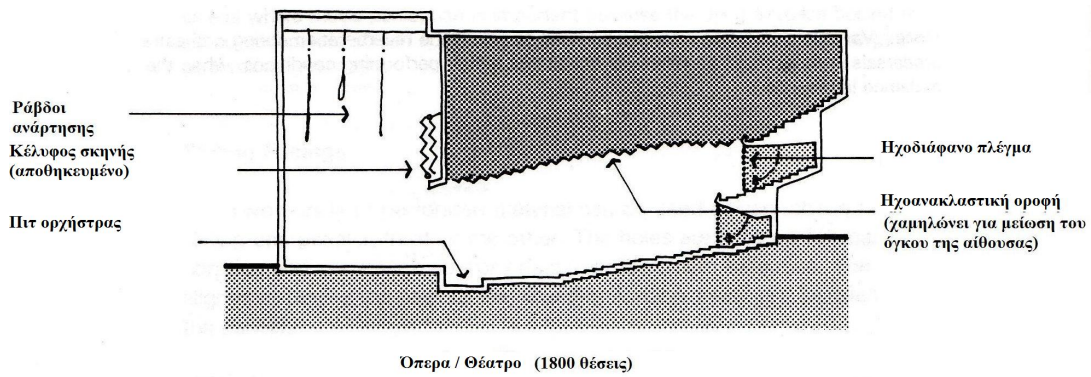
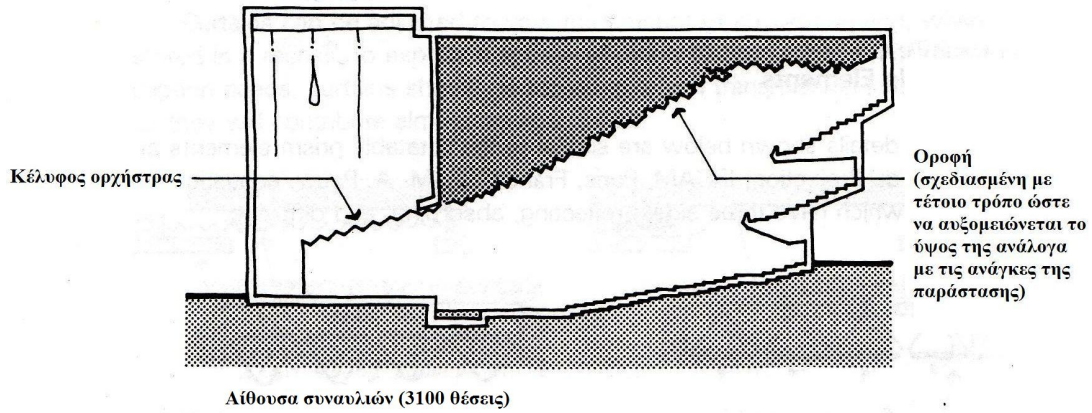
- *Περιστρεφόμενα στοιχεία*

Στα πιο κάτω σχήματα παρουσιάζονται κάποια στοιχεία που μπορούν να παρέχουν ανάκλαση είτε απορρόφηση είτε διάχυση .



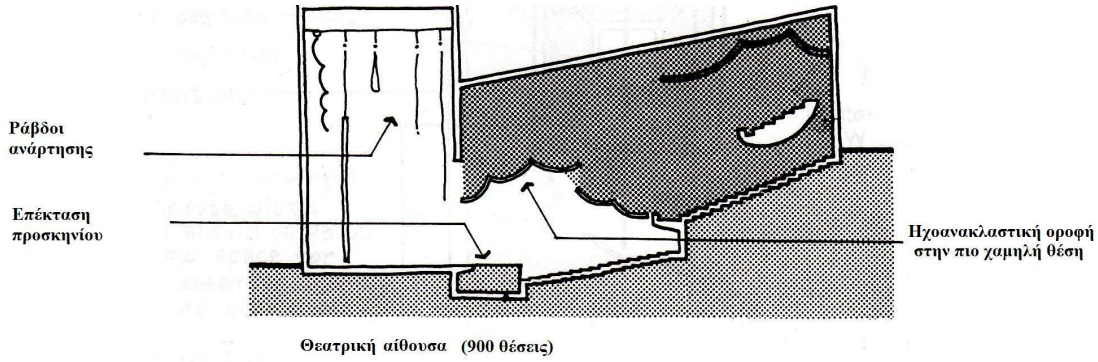
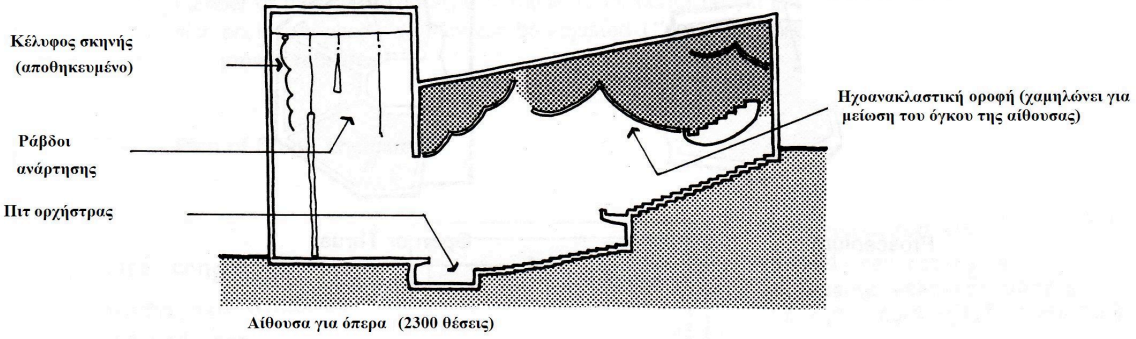
Σχήμα 3-27. Περιστρεφόμενα στοιχεία

Παραδείγματα από αίθουσες ακρόασης με μεταβλητό όγκο.

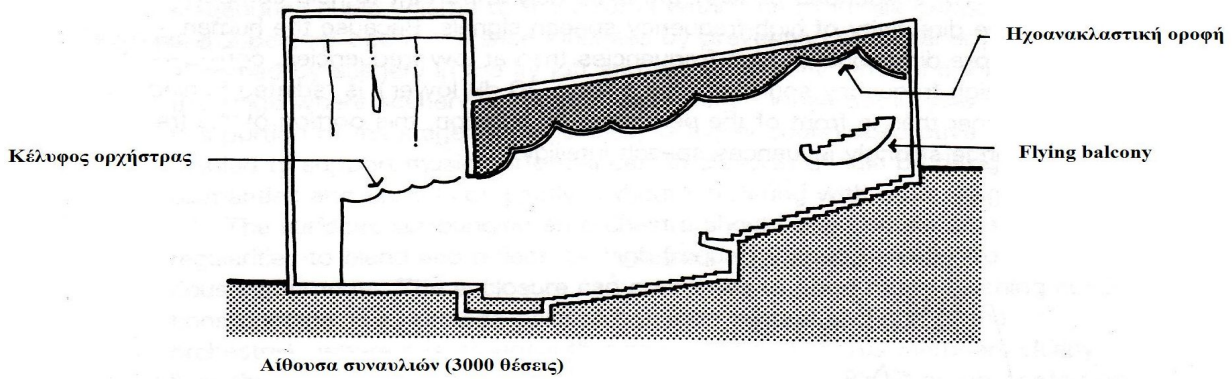


Jones Hall

Σχήμα 3-28. Jesse Jones Hall, Houston, Texas (CRS Sirrinc, αρχιτέκτονες και BBN, ακουστικοί σύμβουλοι)



Thomas Hall



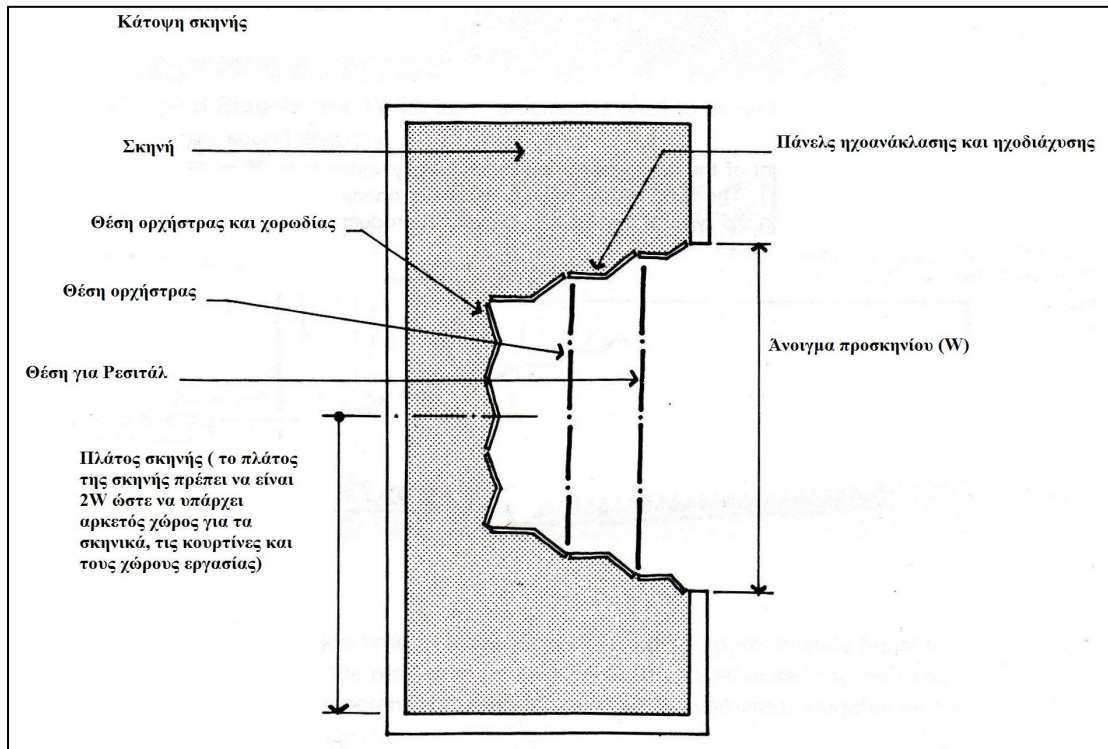
Σχήμα 3-29. Edwin Thomas Hall, University of Arkon, Ohio (CRS Sirrinc, αρχιτέκτονες και V.O. Knudsen, ακουστικοί σύμβουλοι)

3.1.6 Κέλυφος σκηνής για ορχήστρα (stage enclosures for orchestra)

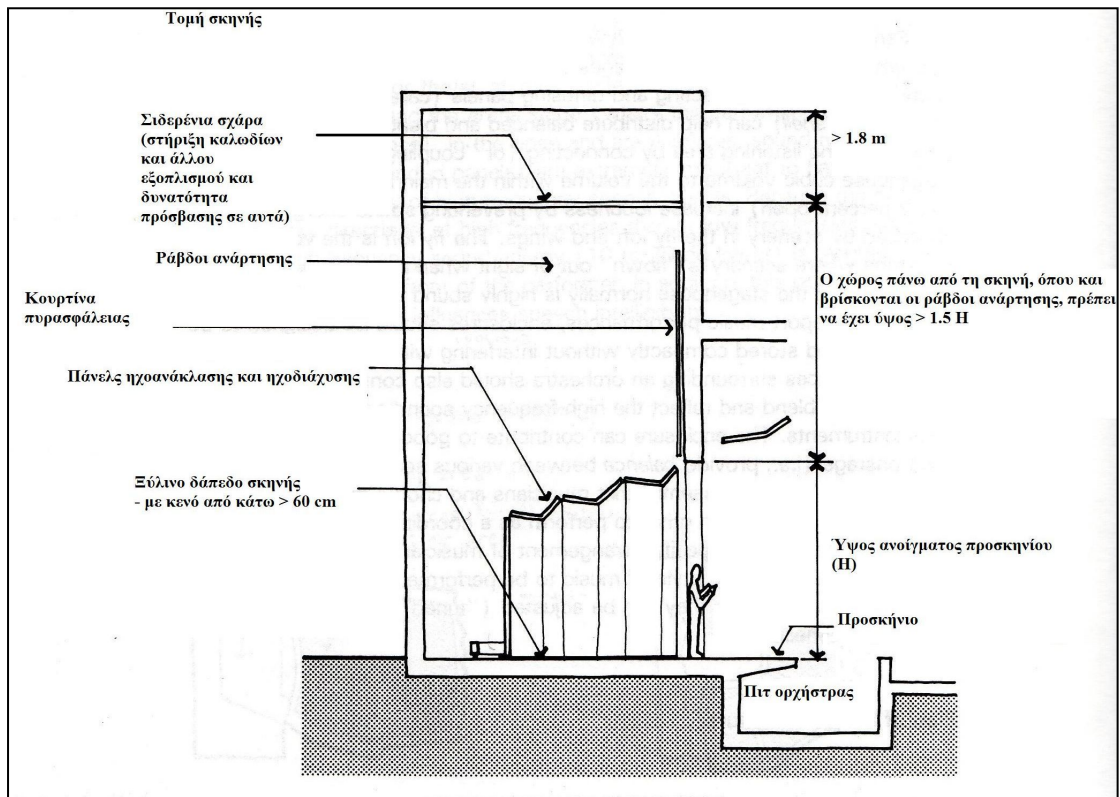
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για κέλυφος σκηνής είναι συνήθως πάνελς από χοντρό κόντρα πλακέ είτε γυψοσανίδες είτε σύνθετα μεταλλικά πάνελ με («σάντουιτς») με εσωτερική στρώση αντικραδασμικού υλικού. Τα πάνελς αυτά μπορεί να προκαλούν ανάκλαση ή διάχυση του ήχου και βοηθούν στην ομοιόμορφη διάδοση του ήχου. Το κέλυφος της σκηνής (< 2% ανοικτό) αυξάνει την ακουστότητα, εμποδίζοντας την απορρόφηση της ηχητικής ενέργειας από τα σκηνικά που βρίσκονται στις ράβδους ανάρτησης, στο υπερσκήνιο (fly loft).

Οι επιφάνειες του κελύφους της σκηνής θα πρέπει να έχουν μικρής κλίμακας εσοχές και εξοχές ώστε να προκαλούν «ανάμιξη» και ανάκλαση της υψίσυχνης ηχητικής ενέργειας που προέρχεται από τα διάφορα μουσικά όργανα. Επίσης, το κέλυφος της σκηνής μπορεί να παρέχει καλές συνθήκες ακρόασης μουσικής, στη σκηνή. Μπορεί λ.χ. να παρέχει ισορροπία ανάμεσα στα διάφορα τμήματα της ορχήστρας, εφόσον ο κάθε μουσικός θα ακούει μεν τον εαυτό του αλλά ταυτόχρονα θα ακούει και τους άλλους συναδέλφους του και όλοι μαζί να μπορούν να λειτουργούν σαν μια συντονισμένη ομάδα (ensemble).

Η διάταξη των μουσικών μέσα στο κέλυφος της σκηνής εξαρτάται από το πλήθος των μουσικών αλλά και από το είδος της παράστασης.



Σχήμα 3-30. Κέλυφος σκηνής



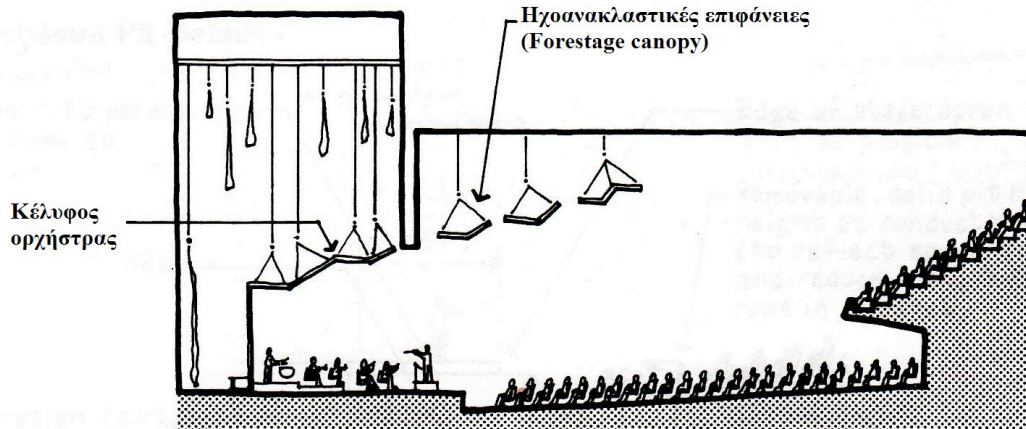
Σχήμα 3-31. Τομή σκηνής

Ηχοανακλαστικά στοιχεία κελύφους προσκηνίου (Forestage canopies)

Τα ηχοανακλαστικά πάνελς που αναρτώνται μπροστά στο προσκήνιο, ανακλούν την ηχητική ενέργεια προς το ακροατήριο και μειώνουν το ITDG. Τα πάνελς αυτά ονομάζονται «forestage canopies», και επεκτείνουν το κέλυφος σκηνής στην αίθουσα ακρόασης. Αυτή η επέκταση μπορεί να ενισχύσει τον απευθείας ήχο, που απαιτείται για την «οικειότητα» ή εγγύτητα (intimacy), αλλά και να ανακλάσει την ηχητική ενέργεια από το πιτ της ορχήστρας πίσω σε αυτό. Το κενό μεταξύ των πάνελς επιτρέπει στην ενέργεια να περνάει προς το πάνω μέρος της αίθουσας, συμβάλλοντας στην αντήχηση της αίθουσας στις χαμηλές συχνότητες - απαραίτητο για τον παράγοντα που ονομάζεται «ζεστασιά» (warmth).

α)

Forestage Canopy (Για επιμήκυνση το κελύφους)



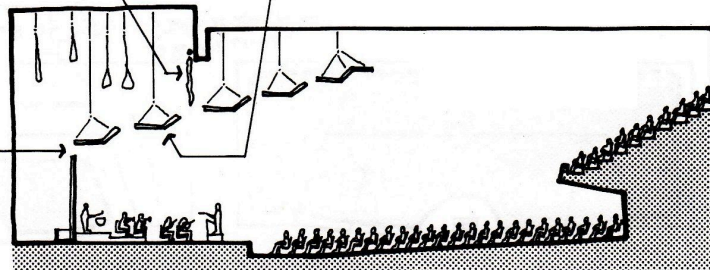
β)

Σκηνή σε σύζευξη με την αίθουσα (Με ανοικτό το κέλυφος "άρθρωσης" για να περνά η χαμηλόσυχη ηχητική ενέργεια

Υφασμάτινη κουρτίνα που επιτρέπει στη ηχητική ενέργεια να περνά στην κυρίως αίθουσα

Πάνελς κελύφους σκηνής ("άρθρωσης")

Αυτή η σχισμή στοχεύει στην απορρόφηση της ενέργειας από τα χάλκινα πνευστά και τα τύμπανα



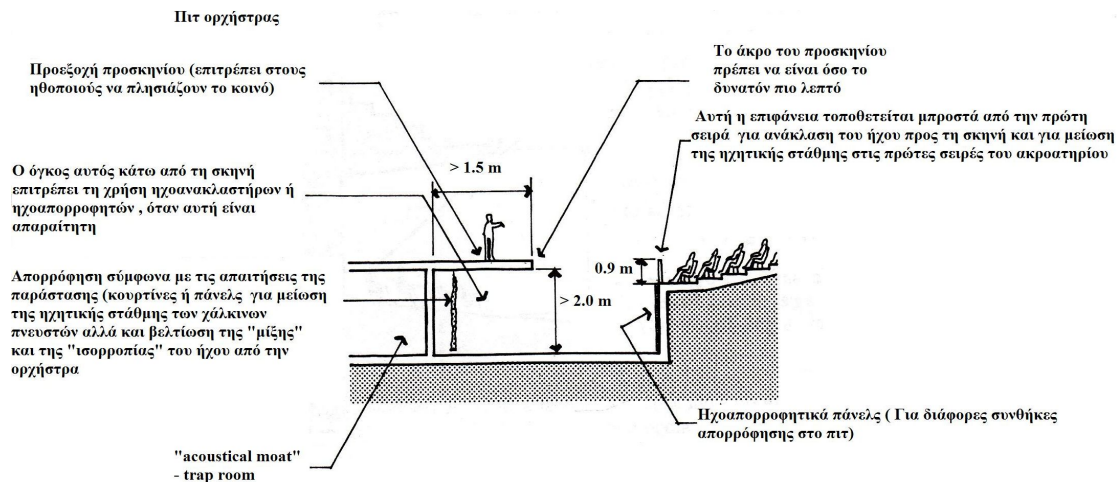
Σχήμα 3-32. (α,β) Forestage canopy

Ο χρόνος αντήχησης στη σκηνή πρέπει να είναι περίπου ίσος ή μικρότερος από αυτόν της κυρίως αίθουσας, εκτός κι αν χρησιμοποιείται σαν συζευγμένος αντηχητικός θάλαμος. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η ύπαρξη αντήχησης σε αίθουσα με σκηνή με αφαιρούμενο (αναρτώμενο) ακουστικό κέλυφος, πρέπει να αποφεύγονται τα απορροφητικά υλικά στους τοίχους της σκηνής και να απομακρύνονται απορροφητικά υλικά που πιθανώς να βρίσκονται στις ράβδους ανάρτησης. Οι πλευρικοί τοίχοι του κελύφους πρέπει να έχουν μεγάλα ανοίγματα εμβαδού τουλάχιστον της τάξης του 10 %

της επιφάνειάς τους, ενώ τα στοιχεία της οροφής θα πρέπει να έχουν ανοίγματα εμβαδού της τάξης του 15 με 50 % ανάλογα και με το ύψος των πάνελς (όσο ψηλότερα τόσο μικρότερο χρειάζεται να είναι το ποσοστό της ελεύθερης επιφάνειας).

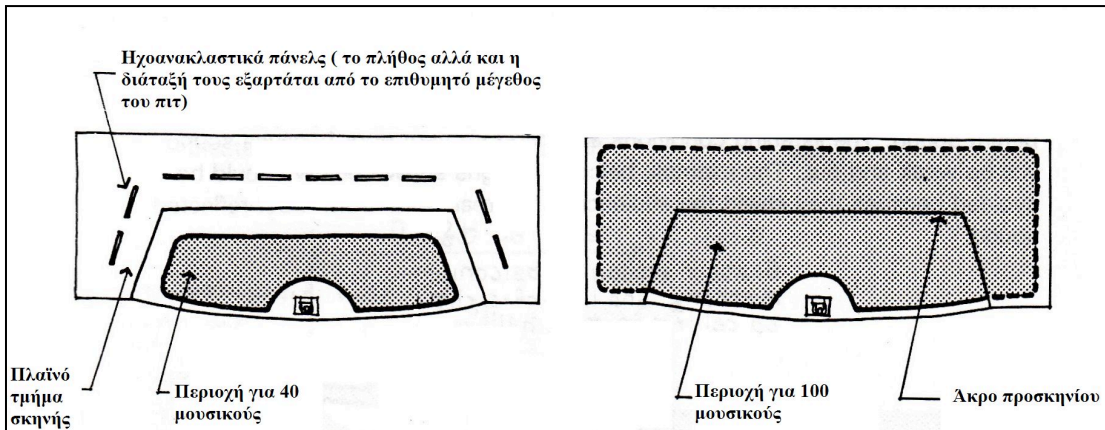
3.1.7 Πιτ ορχήστρας (orchestra pit)

Το πιτ της ορχήστρας πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ισορροπία και «ανάμιξη» της μουσικής με τον ήχο από τη σκηνή. Στα πιο κάτω σχήματα φαίνονται τα πιτς της ορχήστρας, που τοποθετούνται ανάμεσα στο προσκήνιο και το ακροατήριο. Παρόλο που προτίνονται τιμές για την επιφάνεια ανά μουσικό, αυτές οι τιμές δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του μεγέθους της επιφάνειας του πιτ, καθότι ανάλογα με την παράσταση το πλήθος των μουσικών ποικίλει. Επίσης ο χώρος που χρειάζεται κάθε μουσικός για την κίνησή του καθώς παίζει, διαφέρει από όργανο σε όργανο. Οι μουσικοί που παίζουν λ.χ. τρομπόνι ή τσέλο χρειάζονται περισσότερο χώρο από αυτούς που παίζουν κλαρινέτο. Εντούτοις, για τον αρχικό βασικό σχεδιασμό του πιτ υπολογίζουμε 1.5 m^2 ανά μουσικό.



Σχήμα 3-33. Πιτ ορχήστρας σε τομή

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται διατάξεις για 40 μουσικούς και για 100 μουσικούς. Τα ηχοανακλαστικά πάνελς μετακινούνται ανάλογα με το πλήθος των μουσικών.



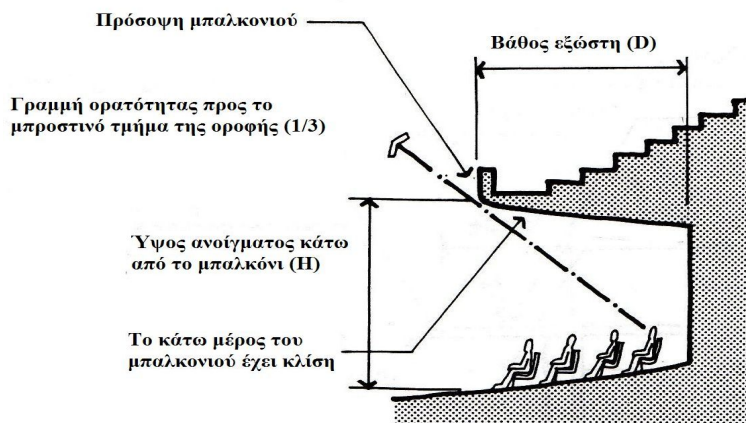
Σχήμα 3-34. Πιτ ορχήστρας σε κάτοψη

3.1.8 Μπαλκόνι

Η χρήση των μπαλκονιών μειώνει την απόσταση του πιο απομακρυσμένου θεατή από τη σκηνή ενώ παράλληλα αυξάνει τη χωρητικότητα της αίθουσας ακρόασης. Στενές αίθουσες με ρηγά μπαλκόνια μπορούν να έχουν «οικειότητα» (intimacy).

Για την αποφυγή των φαινομένων ηχούς είτε ανακλάσεων με μεγάλη χρονοκαυστέρηση, εφαρμόζεται βαθιά απορρόφηση στην πρόσοψη του μπαλκονιού. Δίνεται κλίση στην επιφάνεια που «βλέπει» προς τη σκηνή -ώστε ο ήχος να ανακλάται προς το ακροατήριο- είτε χρησιμοποιούνται ηχοδιάχυτα υλικά όπως λ.χ. κυρτά πάνελς για τη διάδοση του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις.

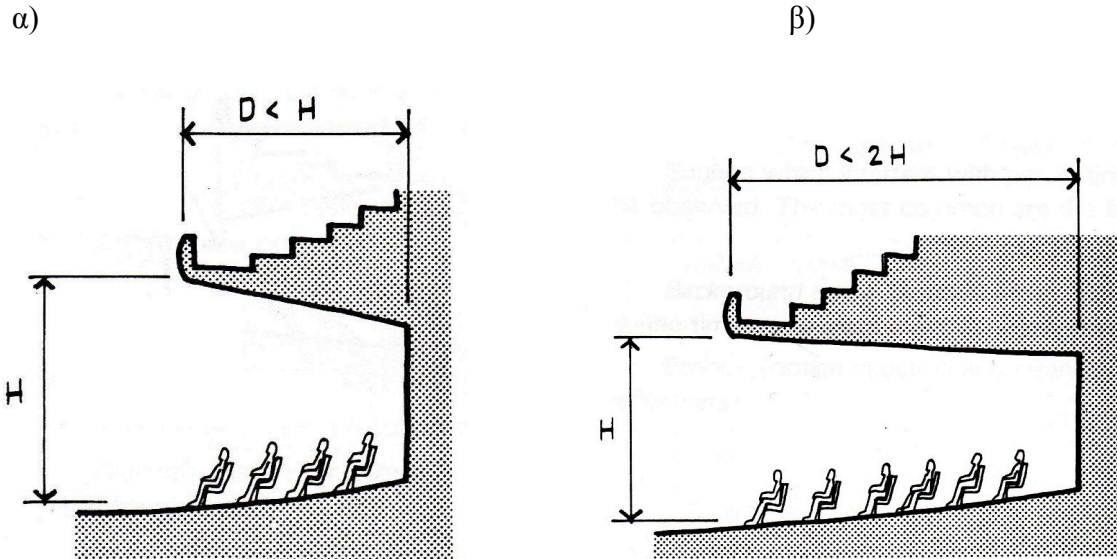
Για καθαρές γραμμές ορατότητας, η θέση που βρίσκεται στο μέγιστο ύψος στο μπαλκόνι



της σκηνής) ** όπου αναφέρεται το βάθος εξώστη εννούμε το βάθος του προβόλου

Σχήμα 3-35. Μπαλκόνι σε τομή

Σε αίθουσες που χρησιμοποιείται κεντρικό σύστημα ενίσχυσης του ήχου, πρέπει οι θεατές της τελευταίας σειράς να μπορούν να «βλέπουν» ανεμπόδιστα προς το ηχείο. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό τότε πρέπει να τοποθετηθούν ηχεία κάτω από το μπαλκόνι.

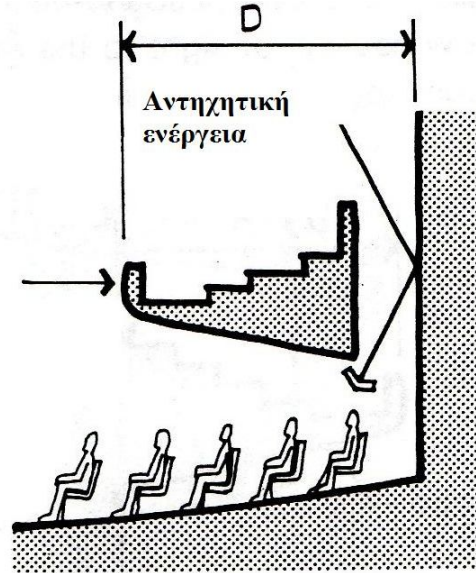


Σχήμα 3-36. Σχέση ανοίγματος προβόλου (H) και μήκους προβόλου (D)

Σε θεατρικές αίθουσες που χρησιμοποιούνται για την προβολή ταινιών, τα ηχεία τοποθετούνται πίσω από την οθόνη. Στα κινηματοθέατρα η τιμή της διάστασης D δεν πρέπει να υπερβάνει τα $3H$, αν και $2H$ είναι ήδη οριακή τιμή για θεατρικές αίθουσες που χρησιμοποιούνται και για άλλες δραστηριότητες. Κατά τον Barron για αίθουσες όπερας θα πρέπει να ισχύει η σχέση $D \leq 2H$ ενώ για θέατρα $D < 2.5H$.

Στην περίπτωση του μπαλκονιού τύπου προβόλου ή αναρτημένου από την οροφή μπαλκονιού (cantilevered balcony/ flying balcony), η ηχητική ενέργεια ανακλάται και περιβάλλει τους ακροατές που κάθονται κάτω από αυτό, εφόσον το πίσω μέρος του μπαλκονιού είναι ανοικτό. Η διάσταση D μπορεί να είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σε ένα κανονικό μπαλκόνι του ίδιου ύψους H , επειδή η αντηχητική ενέργεια θα είναι μεγαλύτερη στις πίσω σειρές.

"Flying balcony"
 (D > H επειδή η
 αντηχητική ενέργεια
 μπορεί να φτάσει
 στους ακροατές που
 κάθονται κάτω,
 ερχόμενη από το
 πίσω μέρος)



Σχήμα 3-37. Flying Balcony

Πίνακας 3-3. Προτινόμενα χαρακτηριστικά γνωρίσματα για τον ακουστικό σχεδιασμό αιθουσών συναυλιών, όπερας και θεάτρου κατά τον Barton

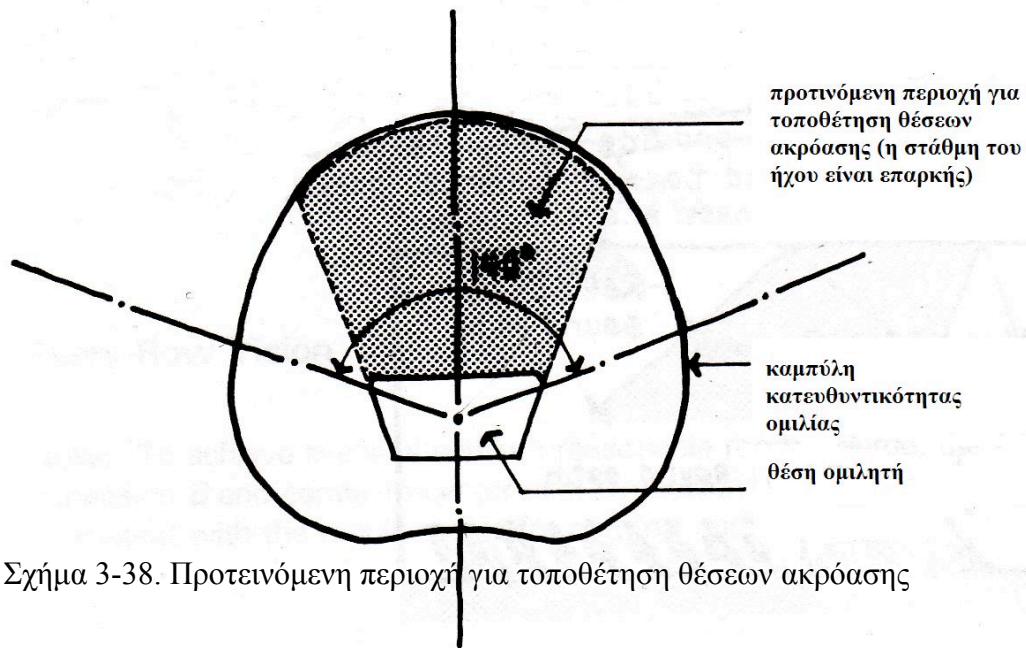
	Αίθουσα Συναυλιών	Όπερα	Θέατρο
Χρόνος Αντήχησης (s)	1.8 - 2.2	1.3 - 1.8	0.7 - 1.0
Διάχυση	Λίγη	Ναί, γύρω από τη σκηνή	Δε χρειάζεται
Επιφάνειες για να παρέχουν πρώτες ανακλάσεις	Ναί	Ναί, ειδικά για τραγουδιστές	Ναί, ειδικότερα από επάνω
Προτίμηση για πρώτες ανακλάσεις από το πλάι	Ναί	Ναί, για ορχηστρική μουσική	Καμία προτίμηση
Σχεδιασμός μπαλκονιού *	$D \leq H$	$D \leq 2H$	$D < 2.5H$
Μέγιστη απόσταση ακροατή - σκηνής (m)	40	30	20

3.2 Ακουστικές απαιτήσεις αιθουσών – συνοπτικά

3.2.1 Αίθουσες διαλέξεων

Οι σημαντικότεροι ακουστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανόηση της ομιλίας σε αίθουσες διαλέξεων συνοψίζονται πιο κάτω.

- Ακουστότητα (loudness) Για ικανοποιητική ακουστότητα το σχήμα της αίθουσας πρέπει να είναι απλό με σχετικά μικρό όγκο. Ο λόγος του όγκου ανά θεατή να κυμαίνεται μεταξύ 2.30 m^3 και 4.30 m^3 .
- Χρόνος αντήχησης (reverberation time) Ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι μικρότερος των 1.2 s - για τις συχνότητες από 250 Hz μέχρι 4000 Hz – όσον αφορά θεατρικές αίθουσες, και μικρότερος των 0.8 s για αίθουσες διδασκαλίας· επειδή μεγάλες τιμές χρόνου αντήχησης προκαλούν μείωση της καταληπτότητας ομιλίας με τον ίδιο τρόπο που ο θόρυβος καλύπτει τα σήματα ομιλίας. Επίσης, η απορρόφηση πρέπει να γίνεται σε όλο το συχνοτικό εύρος της ανθρώπινης ομιλίας.
- Απόσταση Η απόσταση μεταξύ ομιλιτή και του πιο απομακρυσμένου ακροατή πρέπει να είναι μικρή, ώστε η ακουστότητα να είναι ικανοποιητική σε όλη την αίθουσα και ταυτόχρονα οι θεατές να έχουν τη δυνατότητα να βλέπουν το πρόσωπο που μιλάει. Στην περίπτωση των θεατρικών παραστάσεων, ο θεατής είναι πολύ δύσκολο να διακρίνει τις εκφράσεις των ηθοποιών όταν η μεταξύ τους απόσταση υπερβαίνει τα 12 m . Πέραν των 20 m είναι δύσκολο να διακρίνει τις χειρονομίες τους ενώ πέραν των 30.5 m οι μεγάλες κινήσεις του σώματος είναι δυσδιάκριτες.
Για αίθουσες σε σχήμα βεντάλιας και αίθουσες με ορθογώνιο σχήμα, η περιοχή στην οποία βρίσκονται οι θέσεις πρέπει να είναι εντός των ορίων των 140° .



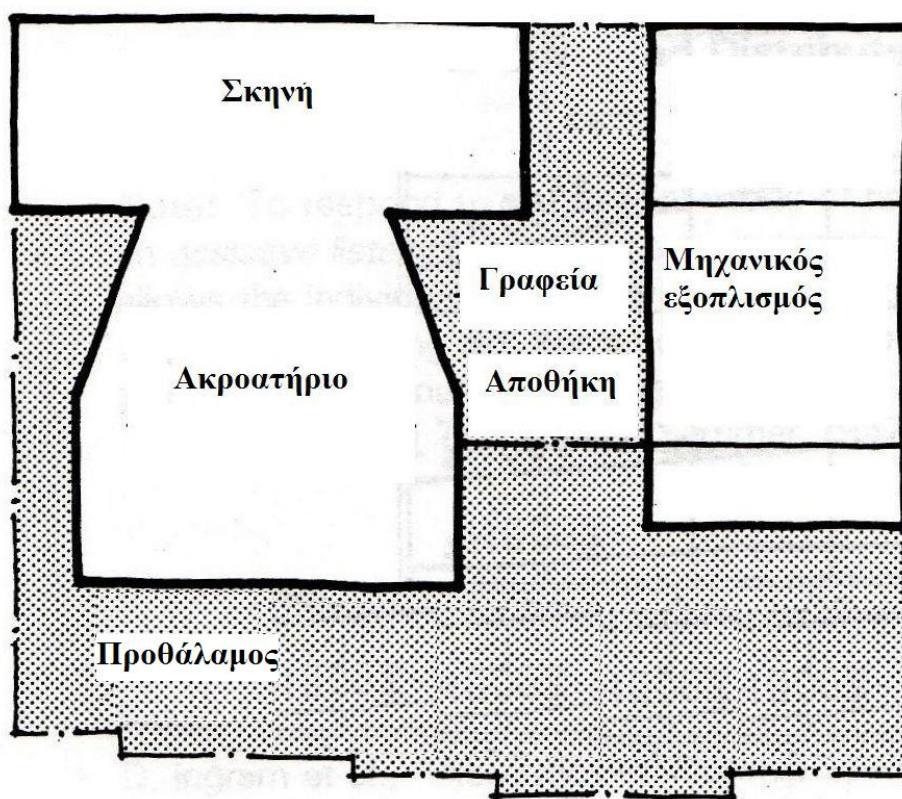
Σχήμα 3-38. Προτεινόμενη περιοχή για τοποθέτηση θέσεων ακρόασης

- Οροφή Η οροφή είτε οι αναρτώμενες ανακλαστικές επιφάνειες πρέπει να παρέχουν ηχητικές ανακλάσεις, με πολύ μικρές χρονοκαθυστερήσεις, κατευθειάν προς το κοινό. Οι διαφορές απόστασης, μεταξύ απευθείας και ανακλώμενου ήχου, πρέπει να είναι μικρότερες των 10 m.
- Δάπεδο Το δάπεδο στην περιοχή των θέσεων ακροατηρίου θα πρέπει να έχει κλίση μεγαλύτερη των 7° , έτσι ώστε να εξασφαλίζονται καλές γραμμές ορατότητας στους θεατές και ταυτόχρονα να μειώνεται το φαινόμενο της «απορρόφησης λόγω ακροατηρίου» (audience attenuation). Σε θεατρικές αίθουσες με προσκήνιο που δεν καλύπτονται από ηλεκτρονική ενίσχυση του ήχου, το ανώτατο όριο χωρητικότητας για θεατρική παράσταση ανέρχεται στις 1000 θέσεις.
- Θόρυβος βάθους Οι στάθμες θορύβου βάθους από το μηχανικό σύστημα δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 34 dBA είτε το κριτήριο NC-25. Η κατασκευή της αίθουσας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μειώνει στο ελάχιστο (κάτω από τις στάθμες που θέτουν τα κριτήρια) την παρουσία εξωτερικών θορύβων, εντός της αίθουσας. Έτσι οι εξωτερικοί θόρυβοι δε θα μπερδεύονται με τους επιθυμητούς και δε θα αποσπάται η προσοχή των ακροατών.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση που το ακροατήριο αποτελείται από παιδιά είτε άτομα με μειωμένη ακουστική ικανότητα, ο θόρυβος βάθους πρέπει να έχει ακόμα πιο χαμηλή τιμή και αντίστοιχα η τιμή του κριτηρίου πρέπει να είναι χαμηλότερη από το NC-25.

3.2.2 Αίθουσες πολλαπλής χρήσης

Πιο κάτω συνοψίζονται οι ακουστικοί παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό των σχολικών αιθουσών πολλαπλής χρήσης για χωρητικότητα 1000 μέχρι και 2000 θέσεων.



Οι δευτερεύοντες χώροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομόνωση της αίθουσας ακρόασης από το θόρυβο

Σχήμα 3-39. Κάτοψη αίθουσας πολλαπλής χρήσης και δευτερευοντων χώρων

1. Περιοχή Επιλογή μιας ήσυχης τοποθεσίας μακριά από αυτοκινητόδρομους αυξημένης κίνησης και θορυβώδεις βιομηχανίες.

2. Χρήση του χώρου Η αίθουσα θα χρησιμοποιείται για διάφορες δραστηριότητες συμπεριλαμβανομένων διαλέξεων, θεατρικών παραστάσεων, ορχηστρικών ρεσιτάλς και συναυλιών συμφωνικής μουσικής. Συνεπώς, απαιτείται σύστημα ενίσχυσης του ήχου με απόκριση σε όλο το συχνοτικό φάσμα. (περισσότερες πληροφορίες βλπ [9], [19])
3. Θέση στο εσωτερικό του κτιρίου Φροντίζουμε γύρω από την αίθουσα να υπάρχουν διαδρόμοι, αποθήκες και άλλοι δευτερεύοντες χώροι ώστε να απομονώνεται η αίθουσα από το θόρυβο. Αποφεύγουμε τοποθεσίες δίπλα από δωμάτια για μουσική μελέτη, δωμάτια με μηχανικό εξοπλισμό και άλλους θορυβώδεις χώρους.
Όλες οι πόρτες πρέπει να είναι στερεές, βαριές και να κλείνουν αεροστεγώς. Επίσης, οι διάδρομοι και οι προθάλαμοι θα πρέπει να έχουν μεγάλη απορρόφηση, για έλεγχο του συγκεντρωμένου θορύβου. Σημειώνουμε ότι οι χώροι με μεγάλη απορρόφηση («νεκροί») τείνουν να παρακινούν τους ακροατές να μιλούν σε χαμηλότερες στάθμες.
4. Όγκος Ο λόγος του όγκου ανά θέση πρέπει να είναι περίπου 6 μέχρι 7 m³ ανά άτομο, λόγος που μπορεί να επιτευχθεί σε δωμάτιο με όγκο λιγότερο από 14200 m³. Προτιμούνται οι αίθουσες με ορθογώνιο σχήμα ή ορθογώνιο σχήμα με τροποποίηση των πλαϊνών και πίσω τοίχων (τείνει προς το σχήμα βεντάλιας), ώστε να δίνεται έμφαση στις πλευρικές ανακλάσεις.
Επίσης, η διάταξη των θέσεων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχει στους θεατές καλές γραμμές ορατότητας. Για τον ίδιο λόγο το δάπεδο πρέπει να έχει κλίση μεγαλύτερη των 7°.
5. Αντήχηση Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης με τον τύπο του Sabine για 125 Hz, 500 Hz και 4000 Hz. Εφόσον όλα τα δημοσιευμένα δεδομένα από εργαστήρια ακουστικών δοκιμών, που αφορούν την απορρόφηση υλικών δίνουν στοιχεία για αυτές τις συχνότητες. Ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες (μέσος όρος χρόνου αντήχησης στα 500 Hz και 1000 Hz) πρέπει να είναι 1.4 – 1.9 s. Μεγάλη αντήχηση στις υψηλές συχνότητες έχει ως αποτέλεσμα τραχύ άκουσμα ενώ η μεγάλη αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες ακούγεται σαν βουητό.

6. Οροφή Η οροφή πρέπει να είναι ηχοανακλαστική. Εντούτοις στην περίπτωση που απαιτείται έλεγχος της αντήχησης η περίμετρος της οροφής κατά μήκος και των δύο πλαϊνών τοίχων και του πίσω τοίχου μπορούν να είναι ηχοαπορροφητικές (περίπου 1/3 με 1/2 της επιφάνειας της οροφής να είναι καλυμμένη, σε σχήμα πετάλου). Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί τέτοιο μοτίβο ώστε να υπάρχει εναλλαγή ηχοαπορροφητικών και ηχοανακλαστικών υλικών.
7. Πλαϊνοί τοίχοι Στους πλαϊνούς τοίχους συνήθως χρησιμοποιούνται ηχοανακλαστικές και ηχοδιάχυτες επιφάνειες με πολλές εσοχές και εξοχές. (κλίσεις προς τα έξω, «κυματώσεις»). Για μεταβλητή απορρόφηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφασμάτινες κουρτίνες κατά μήκος του πίσω τμήματος των πλαϊνών τοίχων είτε αναρτώμενα ηχοαπορροφητικά πάνελς.
8. Πίσω τοίχος Εάν η χρήση ηχοδιάχυτων επιφανειών με μεγάλης κλίμακας προεξοχές και εσοχές δεν είναι εφικτή, προτίνεται η χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών για έλεγχο των φαινομένων της ηχούς.
9. Δάπεδο Η χρήση χαλιού σε όλους τους διαδρόμους εκτός από την περιοχή μπροστά στη σκηνή και την περιοχή του ακροατηρίου (seating area), βοηθά στον έλεγχο του θορύβου που προέρχεται από τα βήματα των θεατών.
10. Θέσεις Με τη χρήση υφασμάτινων καθισμάτων (αποφεύγεται η χρήση δερματίνης, πλαστικού, μετάλλου) επιτυγχάνονται σταθερές συνθήκες αντήχησης, ώστε η αντήχηση να είναι παρόμοια όταν η αίθουσα είναι πλήρης από θεατές ή όχι. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ηχοαπορρόφηση εξαιτίας των καθισμάτων, ώστε αυτή να γίνεται σε όλο το συχνοτικό φάσμα, όχι σε επιλεγμένες συχνοτικές περιοχές.
11. Ανάλυση με ακτίνες Με τη βοήθεια της ανάλυσης με ακτίνες μπορεί να γίνει ο ορθός σχεδιασμός της οροφής και των πλαϊνών τοίχων. Οι επιφάνειες της οροφής και των πλαϊνών τοίχων πρέπει να είναι ανακλαστικές ώστε να παρέχουν χρήσιμες ανακλάσεις (πρώτες ανακλάσεις με μικρότερη από 8.5 m διαφορά μήκους από τον απευθείας ήχο) και διάχυση. Θόλοι και άλλες κοίλες επιφάνειες καθώς και «υπόγειοι θάλαμοι», είναι καλό να αποφεύγονται.

12. Θόρυβος βάθους Ο θόρυβος βάθους πρέπει να είναι χαμηλός ώστε να μην καλύπτει τις παραστάσεις. Το σύστημα κλιματισμού/αερισμού, HVAC, πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε ο θόρυβος που δημιουργεί να μην υπερβαίνει τα κριτήρια θορύβου της αίθουσας.
13. Κέλυφος σκηνής και πιτ ορχήστρας (stage enclosure, orchestra pit) Το κέλυφος της σκηνής πρέπει να έχει τέτοιο σχήμα ώστε να παρέχει δυνατές πρώτες ανακλάσεις σε όλη τη σκηνή. Ο χρόνος αντήχησης στη σκηνή πρέπει να είναι περίπου ίδιος με τον χρόνο αντήχησης της αίθουσας ακρόασης. Η αντήχηση θα είναι μεγαλύτερη όταν οι επιφάνειες που περιβάλλουν τη σκηνή έχουν τέτοιο σχήμα ώστε να διαχέουν τον ήχο και όχι να τον ανακλούν προς το ακροατήριο. Το πιτ της ορχήστρας με επιφάνεια $1.3 \text{ m}^2 - 1.5 \text{ m}^2$ ανά μουσικό¹² πρέπει να έχει μεταβλητή απορρόφηση είτε κουρτίνα είτε ηχοαπορροφητικά πάνελς, έτσι ώστε η απορρόφηση να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε παράστασης.
14. Μπαλκόνι Με τη χρήση μπαλκονιού επιτυγχάνεται μείωση της απόστασης του πιο απομακρυσμένου ακροατή από τη σκηνή αλλά και αύξηση της χωρητικότητας της αίθουσας. Το βάθος του προβόλου πρέπει να είναι μικρό (βάθος < 2 φορές το ύψος του ανοίγματος. Το μπαλκόνι πρέπει να έχει κλίση και στην πρόσοψή του πρέπει να υπάρχουν ηχοαπορροφητικά υλικά είτε ηχοδιάχυτα στοιχεία για την αποφυγή φαινομένων της ηχούς.
15. Σύστημα ενίσχυσης του ήχου Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται κεντρικό σύστημα για την ενίσχυση του ήχου, η τοποθέτηση των ηχείων γίνεται στο κέντρο ακριβώς πάνω και ελαφρώς εμπρός από το άνοιγμα του προσκηνίου. Οι κώνοι των ηχείων πρέπει να «κοιτάνε» προς τους ακροατές. Η κονσόλα ήχου πρέπει να τοποθετηθεί σε κεντρικό σημείο στο χώρο στο ακροατήριο.

¹² Αυτό δεν αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού του πιτ γιατί η επιφάνεια αυτή αλλάζει ανάλογα από το είδος της παράστασης και το πλήθος των μουσικών στο πιτ

3.2.3 Αίθουσες συναυλιών

Σε αίθουσες που χρησιμοποιούνται κυρίως για μουσικές παραστάσεις, ο στόχος στο σχεδιασμό είναι να επιτύχουμε σε όλη την αίθουσα ικανοποιητική στάθμη ήχου ή ακουστότητα, «δυναμική περιοχή» όπως αναφέρεται από τους μουσικούς, ευκρίνεια στη μουσική - «διαύγεια», αντήχηση, «οικειότητα» (εγγύτητα) - και κατάλληλη τονική ισορροπία.

Πιο κάτω συνοψίζονται οι σημαντικές ακουστικές απαιτήσεις για αίθουσες όπου εκτελούνται μουσικές παραστάσεις.

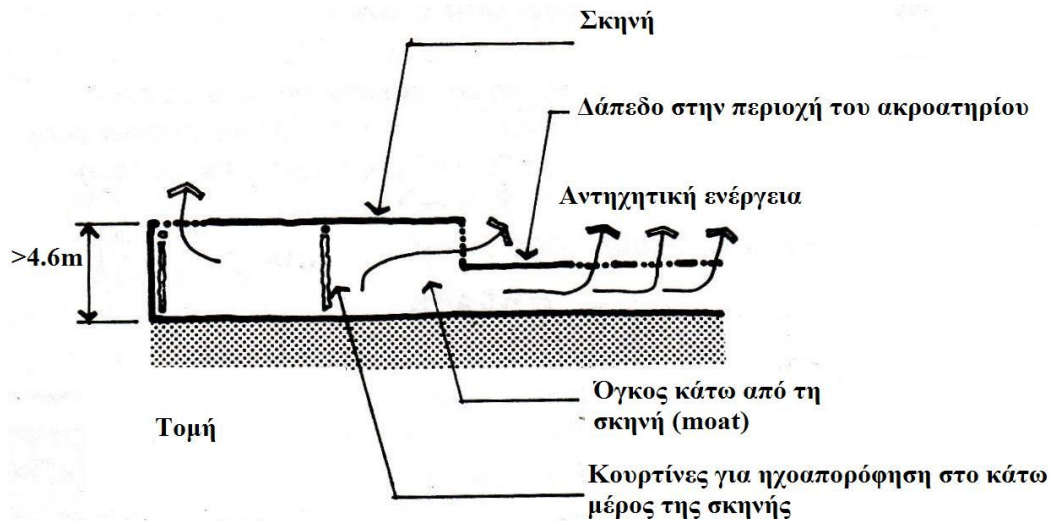
1. Χρόνος αντήχησης Ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες¹³ όταν οι θεατές είναι παρόντες, πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1.6 - 2.4 s για όπερα, συμφωνική μουσική, εκκλησιαστική μουσική και χορωδία. Στα δωμάτια με κατάλληλο χρόνο αντήχησης, η μουσική έχει ζωντάνια, τονική πληρότητα και επιτυγχάνεται ανάμιξη των οργάνων της ορχήστρας. Σε αίθουσες όπου ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ μεγάλος, η μουσική ακούγεται «θολή» και δυσδιάκριτη.
2. Bass ratio Η μέτρηση για την απόκριση της αίθουσας στις χαμηλές συχνότητες, που ονομάζεται «bass ratio¹⁴», για μουσικές παραστάσεις, πρέπει να υπερβαίνει το 1.2 . Υψηλές τιμές του λόγου αυτού υποδεικνύουν τονική πληρότητα στις μπάσες συχνότητες ή «ζεστασιά» και μπορούν να γίνουν αποδεκτές ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλες αίθουσες. Οι χρόνοι αντήχησης πρέπει να αυξάνονται περίπου 10% ανά οκτάβα κάτω από τα 500 Hz, για να επιτρέπουν στις θεμελιώδεις συχνότητες των μουσικών οργάνων να παραμένουν για αρκετό χρονικό διάστημα, και να αποφεύγεται η κάλυψή τους από το χαμηλόσυχο θόρυβο βάθους.

Όταν υπάρχει σύζευξη της αίθουσας με το κάτω μέρος της σκηνής (moat) η αντήχηση από αυτό το χώρο μπορεί να χρησιμεύσει στην ενίσχυση της

¹³ Μέση τιμή του χρόνου αντήχησης στα 500 και 1000 Hz .

¹⁴ Bass ratio είναι ο λόγος του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες (μέση αντήχηση στα 125 και 250 Hz) ως προς τον χρόνο αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες

αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, για τους θεατές που βρίσκονται μπροστά στη σκηνή.



Σχήμα 3-40. Δάπεδο σκηνής σε τομή

3. Η οικειότητα (εγγύτητα) μπορεί να επιτευχθεί όταν το ITDG είναι μικρότερο από 20 ms . Για συμφωνική μουσική, οι ορθογώνιες αίθουσες πρέπει να έχουν λόγο μήκους ως προς πλάτος, L/W , μικρότερο από 2, έτσι ώστε να παρέχουν δυνατές πλευρικές ανακλάσεις. Οι ακροατές προτιμούν συνθήκες κάτω από τις οποίες οι ήχοι διαφέρουν σε κάθε αυτί. Επομένως ένας σημαντικός στόχος είναι να επιτευχθούν δυνατές πλευρικές ανακλάσεις.

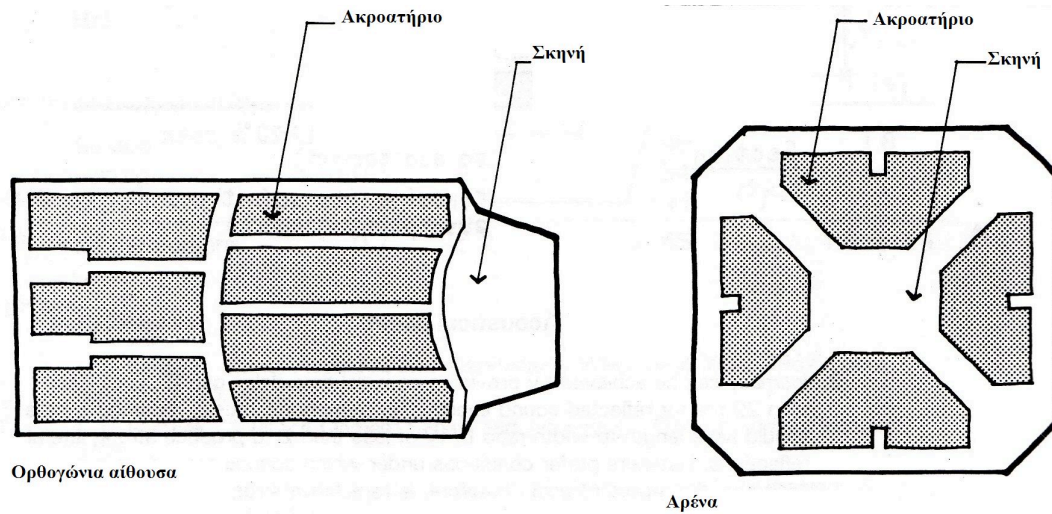
Η ανάλυση με ακτίνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιώσουμε ότι οι τιμές των ITDGs από τους πλαϊνούς τοίχους είναι μικρότερες από 7 m . Αρκετές ορθογώνιες αίθουσες στην Ευρώπη έχουν λόγο ύψους προς πλάτος, H/W , μεγαλύτερο από 0.7.

Η ανάλυση με ακτίνες μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό αναρτώμενων ηχοανακλαστήρων (κυρτά ή επίπεδα πάνελς με κλίση περίπου 45°). Η επιφάνεια των διατεταγμένων αναρτώμενων πάνελς πρέπει να είναι χονδρικά 40 με 50 % της επιφάνειας της σκηνής. Για να οδηγήσουμε τον ήχο σε

συγκεκριμένες θέσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλα πάνελς σε συγκεκριμένο ύψος και με συγκεκριμένη κλίση.

4. Η ακουστότητα καθορίζεται από τον όγκο, την ηχοαπορρόφηση και το σχήμα της αίθουσας. Η ακουστότητα συνεισφέρει στη «διακριτότητα» της μουσικής. Για ορθογώνιες αίθουσες ο λόγος του όγκου ανά θεατή πρέπει να είναι 8.5 m^3 , ενώ για αρένα περίπου 13 m^3 ανά θεατή.

Για αίθουσες συναυλιών και όπερας, οι ηχητικές στάθμες για τις μεσαίες συχνότητες (από μια σταθερή πηγή αναφοράς) πρέπει να είναι 52 με 58 dB. Κατά τη διάρκεια των μουσικών παραστάσεων οι στάθμες φτάνουν συχνά τα 90 dB ή και περισσότερο στα πολύ δυνατά μέρη (fortissimo). Αυτό εξαρτάται από το δυναμικό εύρος των μουσικών οργάνων και τα μουσικά «περάσματα» που έχει



κάθε μουσική εκτέλεση. Παρόλα αυτά, οι προτινόμενες στάθμες ακρόασης κυμαίνονται κάτω από τα 80 dB.

- Σχήμα 3-41. Αίθουσες συναυλιών σε ορθογώνιο σχήμα (αριστερά) και τύπου αρένας (δεξιά)

5. Η απορρόφηση από το ακροατήριο είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό μιας αίθουσας συναυλιών. Το όριο της πυκνότητας θέσεων κυμαίνεται μεταξύ 0.6 και 0.8 m^2 ανά άτομο, επειδή όσο πιο «σκόρπιοι» είναι οι ακροατές στην αίθουσα τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση του ήχου. Αίθουσες με χωρητικότητα μικρότερη των 2000 θέσεων μπορούν να έχουν τέτοιο

σχεδιασμό ώστε να παρέχουν «οικειότητα» και ακουστότητα σε παραστάσεις συμφωνικής μουσικής.

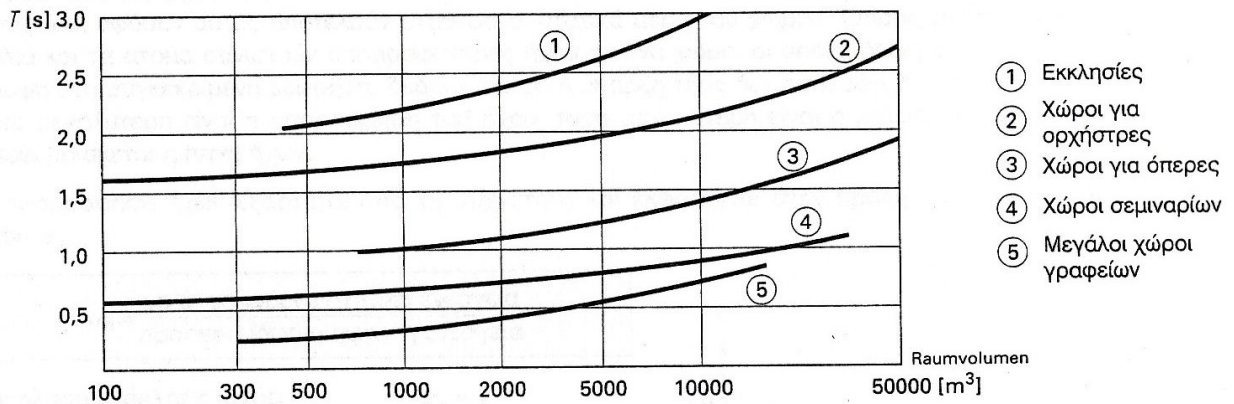
6. Στις αίθουσες ακρόασης πρέπει να υπάρχουν ηχοδιάχυτες επιφάνειες στους πλαϊνούς τοίχους, στην πρόσοψη του μπαλκονιού, στην οροφή αλλά και στους τοίχους της σκηνης, ώστε ο ακροατής να λαμβάνει ήχο από όλες τις κατευθύνσεις.

Κατά την μουσική εκτέλεση είναι πολύ σημαντικό, οι μουσικοί να ακούν ο ένας τον άλλο. Η χρήση ηχοδιάχυτων επιφανειών κοντά στους μουσικούς τους παρέχει χρήσιμη ηχητική ενέργεια.

7. Η χρήση ηχοανακλαστικών επιφανειών κοντά στην σκηνή και την ορχήστρα, συμβάλει στην επίτευξη ικανοποιητικής τονικής ισορροπίας. Η τονική ισορροπία επηρεάζεται από τις ακουστικές παραμέτρους της αίθουσας αλλά και από τη θέση των μελών της ορχήστρας, την επιλογή του προγράμματος καθώς και από το στυλ του μαέστρου!
8. Είναι πολύ σημαντικό να αποφεύγονται τα φαινόμενα ηχούς στη σκηνή αλλά και στην αίθουσα. Παρά το γεγονός αυτό, μέρος της ηχητικής ενέργειας πρέπει να επιστρέφει, από το ακροατήριο, στη σκηνή, ώστε να μπορούν να αντιληφθούν οι εκτελεστές τα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας και να τροποποιήσουν την ερμηνεία τους αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δύο αντιφατικές καταστάσεις είναι πολύ λεπτή και απαιτείται μεγάλη προσοχή στο σχεδιασμό, για την επίτευξή της.
9. Οι στάθμες του θορύβου βάθους πρέπει να είναι κοντά στο κατώφλι ακουστότητας, για να επιτυγχάνεται υψηλός λόγος σήματος ως προς θόρυβο. Αυτό επιτρέπει στους μουσικούς να παράγουν το μέγιστο δυνατό δυναμικό εύρος. Σημειώνουμε ότι οι διαδρόμοι και οι χώροι υποδοχής πρέπει να είναι χωροθετημένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να «θωρακίζουν» και να απομονώνουν την αίθουσα από γειτονικούς χώρους με υψηλότερη τιμή της στάθμης θορύβου.
10. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία στην ακουστική στις αίθουσες συναυλιών περιλαμβάνουν και ψυχολογικούς παράγοντες σχεδιασμού, όπως
 - το χρώμα Οι περισσότεροι μαέστροι προτιμούν το λευκό, το χρυσό και το μπλέ

- η χρήση του ξύλου Η πλειονότητα των μουσικών υποστηρίζει ότι το ξύλο είναι σημαντικό για τις αίθουσες συναυλιών, παρόλο που άλλα υλικά συμπεριφέρονται εξίσου καλά
- η διάταξη των θέσεων Άνετες θέσεις με καθαρές γραμμές ορατότητας
- αναφορά ακροατών σε άλλες αίθουσες Διαμόρφωση προσωπικής άποψης
- οι βοηθητικοί χώροι «νεκρά» φουαγιέ και διάδρομοι για να δημιουργούν την αίσθηση της «επισημότητας» κατά την είσοδο σε ένα πιο αντηχητικό περιβάλλον
- ανέσεις π.χ. ευρύχωρα «green rooms»

Στο πιο κάτω γράφημα δίνονται προτινόμενες τιμές για το χρόνο αντήχησης για διάφορες αίθουσες (Εκκλησίες, αίθουσες συναυλιών, αίθουσες για όπερα, αίθουσες διαλέξεων, μεγάλοι χώροι γραφείων). Αποκλίσεις μέχρι 10 % από την προτινόμενη τιμή δεν είναι σημαντικές, εφόσον άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά της ακουστικής της αίθουσας είναι ικανοποιητικά.



Σχήμα 3-42. Βέλτιστες τιμές χρόνου αντήχησης για διάφορες αίθουσες

Πίνακας 3-4. Συγκεντρωτικός πίνακας προτεινόμενων τιμών

	Αίθουσες Συναυλιών	Θέατρα & αίθουσες διαλέξεων	Αίθουσες πολλαπλής χρήσης
RT60_(mid-freq.) (seconds)	1.6 - 2.4 μουσική από εκκλησιαστικό όργανο > 2.5 ρομαντική κλασική μουσική 1.8 - 2.2 σύγχρονη κλασική μουσική 1.6 - 1.8 όπερα 1.3 - 1.8 μουσική δωματίου 1.4 - 1.7	< 0.8 (αίθουσες διδασκαλίας) 0.7 - 1.0 (θέατρα) < 1.2	1.4 - 1.9 ***
bass ratio	> 1.2	-	> 1.2

L/W	< 2.0* ¹⁵	-	-
H/W	> 0.7	-	-
ITDG	< 20 ms < 7.0 m	< 10 m	< 8.5
V/seat (m ³ /άτομο)	8.5* 12.7 **	2.30 - 4.30	5.7 - 6.8
A/seat (m ² /άτομο)	0.6 - 0.8	0.4 - 0.6	***
Ηχηρότητα	G >0 dB G _{500,1000Hz} - 4.0 - 5.5 dB	G >0 dB	***
Θόρυβος βάθους	NC < 20 (NC-15,RC-15)	NC-25	NC-25
Απόσταση σκηνής - πιο απομακρυσμένου θεατή (m)	30	10 - 20	20 - 40
AI	0.4 - 0.5 (< 0.2 organ music)	> 0.7	***
Κλίση δαπέδου	> 15 (< 35 για δάπεδο μπαλκονιού)	> 7.0	> 7.0

Οι πιο κάτω παράγοντες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά το ακουστικό σχεδιασμό μιας αίθουσας.

1. Η στάθμη θορύβου βάθους (από σύστημα αερισμού/κλιματισμού είτε άλλες εξωτερικές πηγές) πρέπει να είναι χαμηλή ώστε να μην επηρεάζει αρνητικά τις διάφορες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην αίθουσα.
2. Η ηχητική ενέργεια θα πρέπει να μεταδίδεται ομοιόμορφα σε όλο το χώρο.
3. Επίσης πρέπει να αποφεύγονται φαινόμενα ηχούς και ηχητικής εστίασης.
Σε μικρές αίθουσες διαλέξεων είτε αίθουσες μουσικής μελέτης, όπου η απορρόφηση είναι σχετικά μικρή, θα πρέπει να αποφεύγονται οι παράλληλες επιφάνειες καθώς και σχήματα που μπορεί να τονίζουν συγκεκριμένες συχνότητες. Ο λόγος δύο διαστάσεων μήκους, πλάτους και ύψους δεν πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός.
4. Οι διάφορες επιφάνειες της αίθουσας πρέπει να έχουν τέτοιο σχήμα ώστε να παρέχουν ανακλάσεις σε όλο το ακροατήριο. Εάν το μέγεθος της αίθουσας απαιτεί τη χρήση συστήματος ενίσχυσης του ήχου, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη ρύθμιση του συστήματος αυτού, σύμφωνα με τον ακουστικό σχεδιασμό της αίθουσας.

¹⁵ *για ορθογώνιες αίθουσες

**για αίθουσες τύπου αρένας

*** ανάλογα με τις απαιτήσεις της παράστασης

5. Η τιμή του χρόνου αντήχησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχει «ανάμιξη» στον ήχο αλλά και αρκετά μικρή ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της διάκρισης των ήχων, για βέλτιστη καταληπτότητα.

Σε αίθουσες για ομιλία αλλά και μουσικές δραστηριότητες πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, καθότι για τη μουσική απαιτείται μεγάλος χρόνος αντήχησης ώστε να υπάρχει «ανάμιξη» στις νότες, και πλούτος στις χαμηλές συχνότητες ενώ για την ομιλία απαιτείται μικρός χρόνος αντήχησης έτσι ώστε κάθε συλλαβή να ακούγεται καθαρά και να μην καλύπτεται ή να επηρεάζεται από άλλες προηγούμενες ή επόμενες συλλαβές.

6. Τα ITDGs πρέπει να είναι μικρότερα από 30 ms για να μπορούν να ενισχύουν τον απευθείας ήχο.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία μέτρησης των ακουστικών ποσοτήτων που πραγματοποιήθηκε στην αίθουσα του Θεάτρου «Ριάλτο», στις 20 και 21 Σεπτεμβρίου 2007.

Ιστορικά στοιχεία θεάτρου

Η ανέγερση του κινηματοθέατρου Ριάλτο άρχισε το 1930 σε σχέδια του Αυστριακού αρχιτέκτονα Gunsberg, αποτελώντας ένα σημαντικό δείγμα σύγχρονης αρχιτεκτονικής για την εποχή του. Υπήρξε το δεύτερο κινηματοθέατρο της Λεμεσού με χωρητικότητα πέραν των 800 θέσεων στην πλατεία και τον αμφιθεατρικό του εξώστη. Από το 1933 λειτουργεί φιλοξενώντας κυρίως κινηματογραφικές ταινίες αλλά και θεατρικές παραστάσεις μουσικές εκδηλώσεις, χοροσπερίδες και καρναβαλίστικους χορούς.

Το 1991 άρχισε η ανακαίνιση του κινηματοθέατρου με ακουστικό σύμβουλο τον Π. Οικονόμου. Το Μάιο του 1999 το Ριάλτο πήρε ξανά τη θέση του στην πόλη, ως ένα από τα μεγαλύτερα έργα πολιτιστικής υποδομής που έγιναν ποτέ στη Λεμεσό.

Σήμερα το θέατρο, διαθέτει 560 θέσεις, μια άρτια σκηνή, η οποία κυριαρχεί δικαιωματικά στο συνολικό χώρο του θεάτρου, ενώ το εσωτερικό αναπαριστά μια εξωτερική υπαίθρια αστική πλατεία με πιστή απεικόνιση των αστρικών σχηματισμών.

4.1 Περιγραφή χώρου

Ο χώρος στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις είναι αμφιθεατρικός (κλίση δαπέδου 7°). Η κάτοψη της αίθουσας φαίνεται στα σχήματα (4-9) και (4-10). Η κάτοψη του θεάτρου έχει κατά βάση ορθογωνικό σχήμα - με διαστάσεις¹⁶ : 19.5 m μήκος, 16.5 m πλάτος- με τροποποίηση των πλαϊνών τοίχων (μικρή κλίση) και του πίσω τοίχου (κοίλο σχήμα), με αποτέλεσμα το σχήμα του θεάτρου να τείνει ελαφρώς προς τον τύπο αιθουσών σε

¹⁶ Οι διαστάσεις που αναφέρονται εδώ αφορούν τις μέγιστες τιμές του μήκους, πλάτους και ύψους της αίθουσας

«σχήμα βεντάλιας». Οι διαστάσεις της σκηνής είναι 18 m πλάτος, 13.3 m βάθος, 13 m ύψος (4-12).

Η συνολική χωρητικότητα του θεάτρου ανέρχεται στις 560 θέσεις εκ των οποίων οι 427 θέσεις βρίσκονται στην πλατεία (διατεταγμένες σε 18 σειρές) και οι υπόλοιπες 133 βρίσκονται στον εξώστη.

Πειραματικό μέρος

Στις 20 Σεπτεμβρίου 2007 πραγματοποιήθηκε η πρώτη φάση μετρήσεων κατά την οποία μετρήθηκαν : α) ο θόρυβος βάθους , β) ο Χρόνος Αντήχησης της αίθουσας, με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής, και γ) η Στάθμη Ηχητικής Πίεσης.

Πίνακας 4-1. Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις

Ηχόμετρο	SIP95 01 dB-Stell C55 Type 1
Γεννήτρια ροζ Θορύβου	GB98
Κονσόλα ήχου	Soundcraft K3
Ενισχυτής	Carver pm700
Ηχείο	JBL Mpro M415 (stage monitor)

4.2 Μέτρηση του θορύβου βάθους

Θόρυβος βάθους (background noise), ορίζεται ως ο συνολικός θόρυβος που υπάρχει στο χώρο όταν η ηχητική πηγή που μας ενδιαφέρει βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Όταν η στάθμη του θορύβου βάθους είναι συγκρίσιμη με τη στάθμη της πηγής που επιθυμούμε να μετρήσουμε (πιο συγκεκριμένα όταν διαφέρουν λιγότερο από 10 dB σε οποιαδήποτε συχνοτική περιοχή), πρέπει να γίνουν διορθώσεις.

[18]

Η μέτρηση του Θορύβου βάθους έγινε σε επτά σημεία στην αίθουσα του θεάτρου. Σε πέντε θέσεις στην πλατεία (C13, H15, H23, N16, Q240) και σε δύο θέσεις στον εξώστη (CCC18, CCC25), όπως φαίνεται στα σχήματα (4-9) , (4-10) και (4-11).

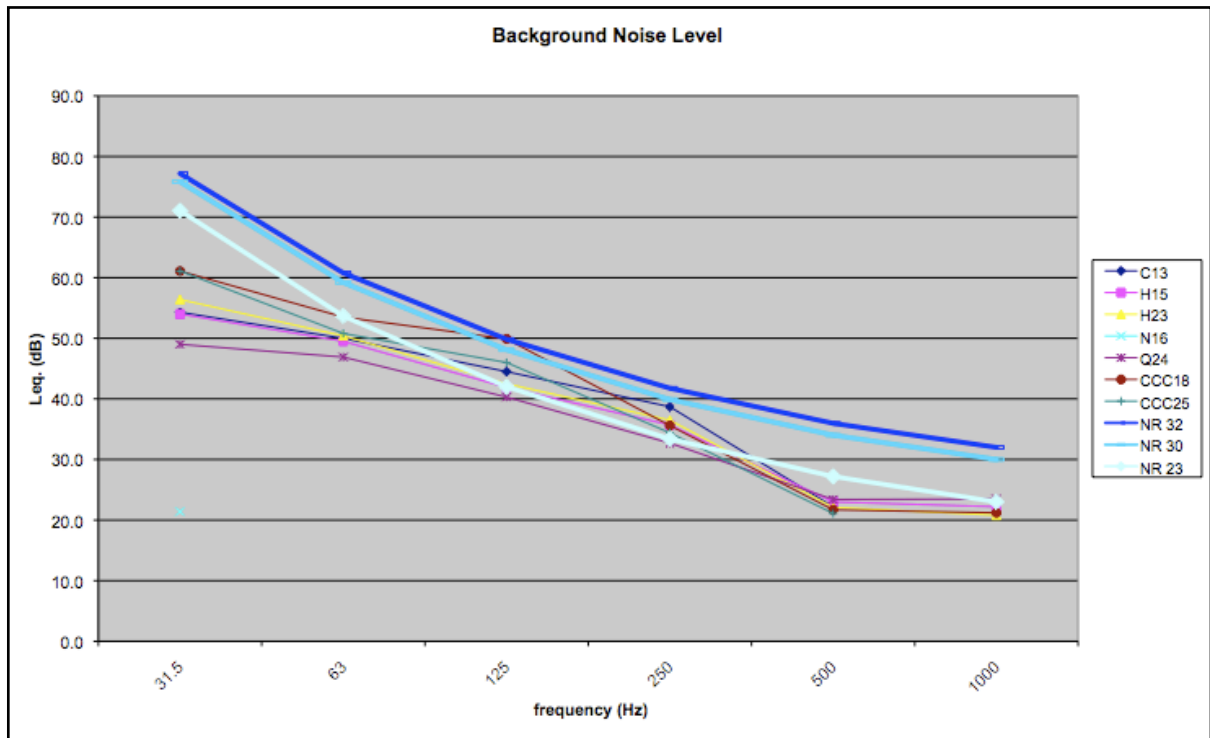
Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ηχόμετρο, SIP95 01 dB-Stell C55 Type 1, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε τρίποδο, σε ύψος 1.10 m που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος του καθισμένου ακροατή.

Ο Θόρυβος βάθους μετρήθηκε ανά τριτοκτάβα και με διάρκεια μέτρησης 20 δευτερόλεπτα ανά θέση.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του Θορύβου βάθους το σύστημα εξαερισμού βρισκόταν σε λειτουργία.

Πίνακας 4-2 . Τιμές θορύβου βάθους για τις αντίστοιχες θέσεις μέτρησης

HV on / AC Off	mic. position	Background Noise Level (Leq, dB)						
		31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	A
seating area	1 C13	54.3	50.0	44.5	38.7	22.2	-	32.7
	2 H15	54.0	49.5	41.9	35.7	23.0	22.2	31.4
	3 H23	56.4	50.4	42.5	36.5	22.1	20.8	31.9
	4 N16	56.0	48.9	42.7	34.8	21.9	21.4	31.4
	5 Q24	49.0	46.9	40.3	32.7	23.4	23.5	30.2
balcony	6 CCC18	61.1	53.5	49.9	35.6	21.7	21.2	34.4
	7 CCC25	61.1	50.8	46.0	34.4	21.1	-	32.7



Σχήμα 4-1 . Θόρυβος βάθους. Με μπλε χρώμα σημειώνεται το κριτήριο NR-32 ενώ με γαλάζιο το κριτήριο NR-30

4.3 Μέτρηση του χρόνου αντήχησης

Χρόνος αντήχησης ενός ολικά ή μερικά κλειστού χώρου, όπου λειτουργεί μια ηχητική πηγή, είναι ο χρόνος που απαιτείται, μετά από το απότομο σταμάτημα της ηχητικής πηγής, για να ελαττωθεί η στάθμη της ηχητικής πίεσης κατά 60 dB. Συμβολίζεται με RT και εκφράζεται σε δευτερόλεπτα (sec).

[16]

Για την μέτρηση του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο του μηδενισμού της πηγής.

Ένας χώρος διεγείρεται με ροζ θόρυβο¹⁷ που μηδενίζεται ακαριαία. Ένας αναλυτής κι ένα ηχόμετρο καταγράφουν τη μείωση της ηχοστάθμης του ηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης, RT60. Εφόσον ο χρόνος αντήχησης είναι συνάρτηση της απορρόφησης του χώρου εκφράζεται σε όλες τις συχνότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι συχνότητες 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz. [3]

Ο Χρόνος Αντήχησης μετρήθηκε, όπως και ο θόρυβος βάθους, σε επτά θέσεις. Σε πέντε θέσεις στην πλατεία (C13, H15, H23, N16, Q24) και σε δύο θέσεις στον εξώστη (CCC18, CCC25) και για τρεις θέσεις της πηγής στη σκηνή (βλπ σχήματα 4-9, 4-10, 4-11)

Center → τοποθέτηση του ηχείου στον κεντρικό άξονα της σκηνής σε απόσταση 1,50 m από το άκρο της σκηνής

Left → τοποθέτηση του ηχείου αριστερά από τον κεντρικό άξονα, σε απόσταση 5,00 m από τη θέση Center, και 1,50 m από το άκρο της σκηνής

Right → τοποθέτηση του ηχείου στην αντίστοιχη συμμετρική θέση της θέσης Left, δηλαδή σε απόσταση 5,00 m από τη θέση Center, και 1,50 m από το άκρο της σκηνής.

Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης, όπως προαναφέραμε, έγινε με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής.

Συνδέσαμε την έξοδο της γεννήτριας ροζ θορύβου με την είσοδο ενός καναλιού της κονσόλας ήχου, το σήμα οδηγούνταν μέσω των πάγιων διασυνδέσεων στον ενισχυτή carver pm700 και από εκεί στο ηχείο-μόνιτορ, JBL 415, το οποίο τοποθετήσαμε στη σκηνή στις τρεις θέσεις που αναφέρονται πιο πάνω, Center, Left και Right.

¹⁷ Ροζ θόρυβος είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη σταθερού σχετικού ζωνικού εύρους (ίση ενέργεια ανά οκτάβα)

Για τις μετρήσεις του χρόνου αντήχησης ηχώμετρο, χρησιμοποιήθηκε ηχώμετρο, SIP95 01 dB-StellC55 Type 1, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε τρίποδο, σε ύψος 1.10 m που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος του καθισμένου ακροατή.

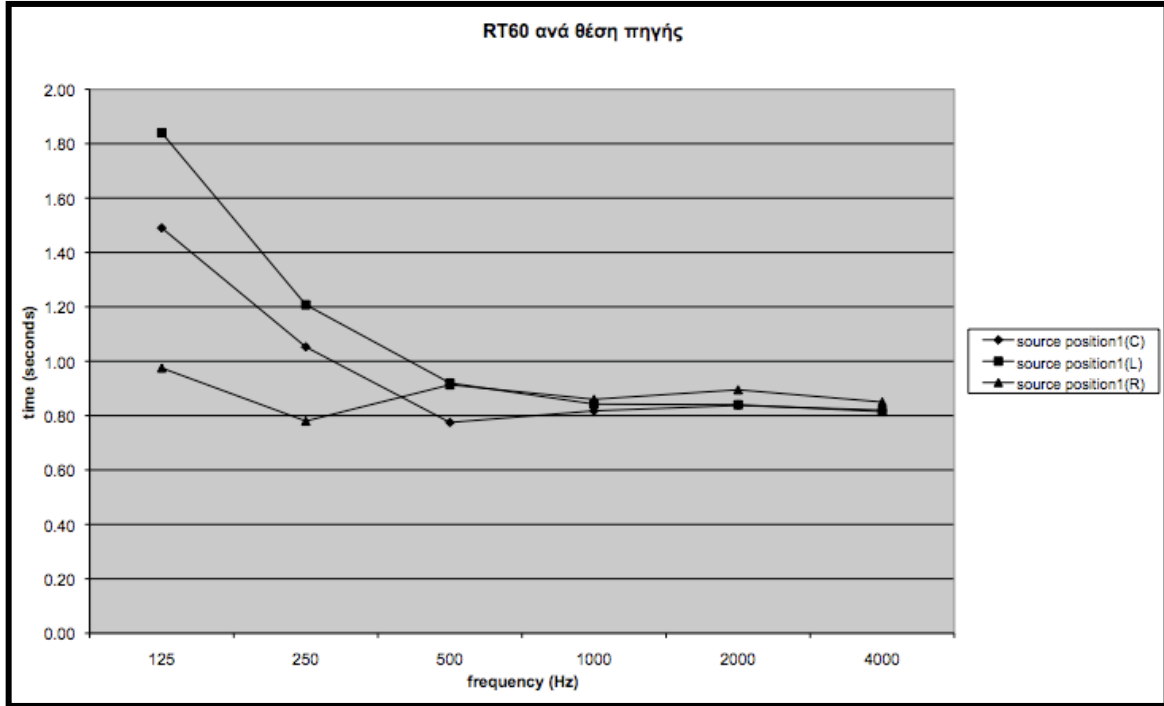
Ο Χρόνος Αντήχησης μετρήθηκε ανά οκτάβα και με διάρκεια μέτρησης 30 δευτερόλεπτα ανά θέση.

Πίνακας 4-3. Μέσος χρόνος αντήχησης όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο, δεξιά και αριστερά στη σκηνή

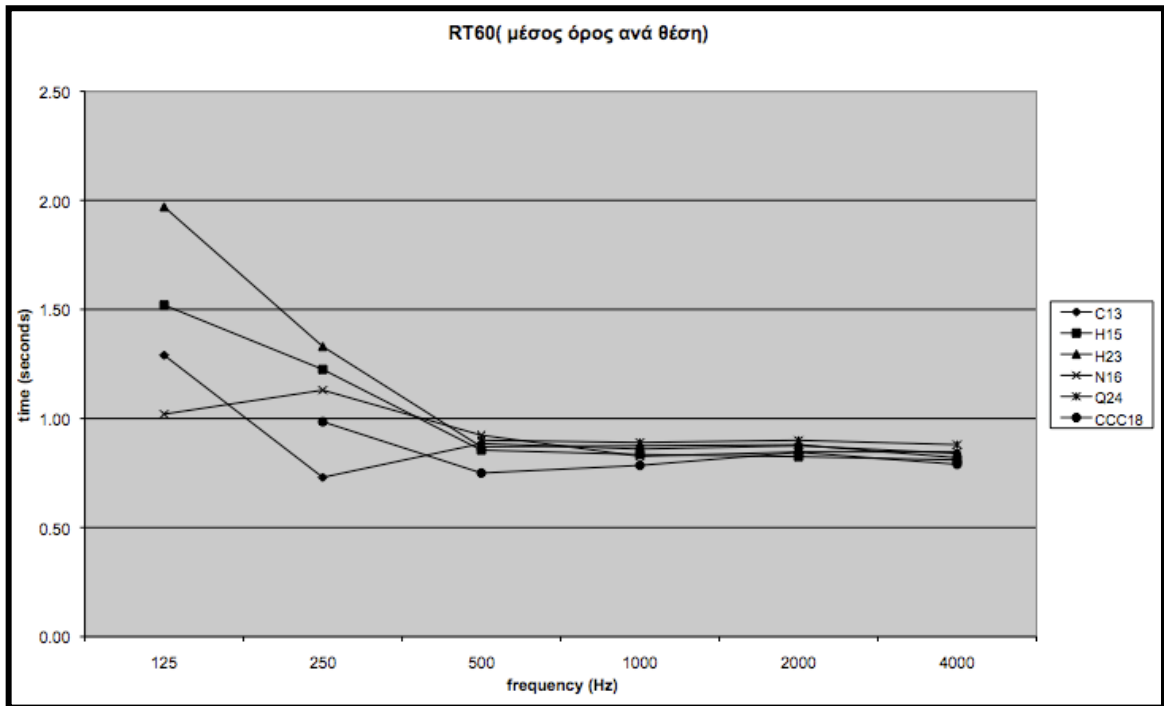
Συχνότητα	RT60 (s)						φίλτρο A
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2kHz	4 kHz	
Θέση πηγής - Centre	1.49	1.05	0.78	0.82	0.84	0.82	0.88
Θέση πηγής - Left	1.84	1.21	0.92	0.84	0.84	0.82	0.91
Θέση πηγής - Right	0.98	0.78	0.91	0.86	0.90	0.85	0.88

Πίνακας 4-4 . Μέσος χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης

μέσος όρος τιμών ανά θέση			RT60 (s)						φίλτρο A
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
seating area	1	C13	1.29	0.73	0.89	0.86	0.88	0.84	0.88
	2	H15	1.52	1.23	0.86	0.84	0.83	0.81	0.94
	3	H23	1.97	1.33	0.87	0.88	0.88	0.82	0.90
	4	N16	1.02	1.13	0.92	0.83	0.85	0.85	0.88
	5	Q24			0.90	0.89	0.90	0.88	0.94
balcony	6	CCC18		0.99	0.75	0.79	0.85	0.79	0.84



Σχήμα 4-2 . Μέσος χρόνος αντίληψης για τις τρεις θέσεις της πηγής, Center, Left, Right



Σχήμα 4-3 . Μέσος χρόνος αντίληψης για την κάθε θέση μέτρησης

4.4 Μέτρηση της Στάθμης Ηχητικής Πίεσης

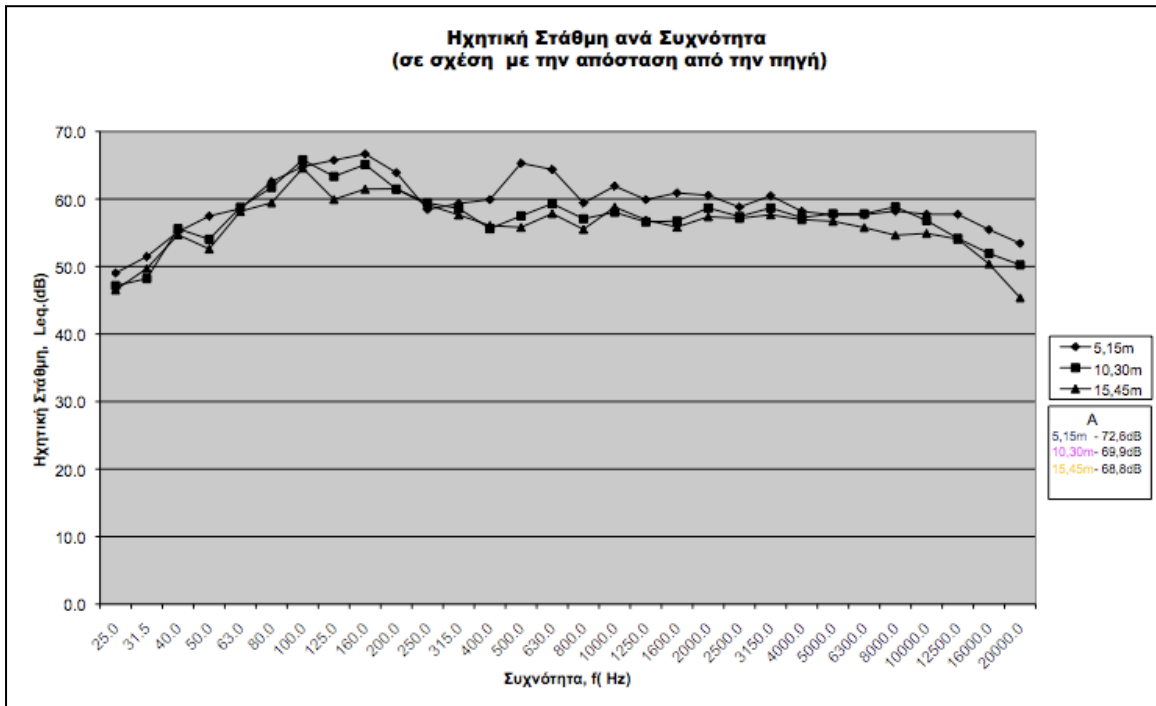
Η Στάθμη Ηχητικής Πίεσης μετρήθηκε σε συνολικά έντεκα θέσεις ακρόασης, σε εννέα θέσεις στην πλατεία (B11, B16, B21, H13, H19, H25, N14, N20, N27) και σε δύο θέσεις στον εξώστη (CCC18, CCC25).

Για την μέτρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ηχόμετρο SIP95 01 dB-Stell C55 Type 1, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε τρίποδο, σε ύψος 1.10 m που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος του καθισμένου ακροατή.

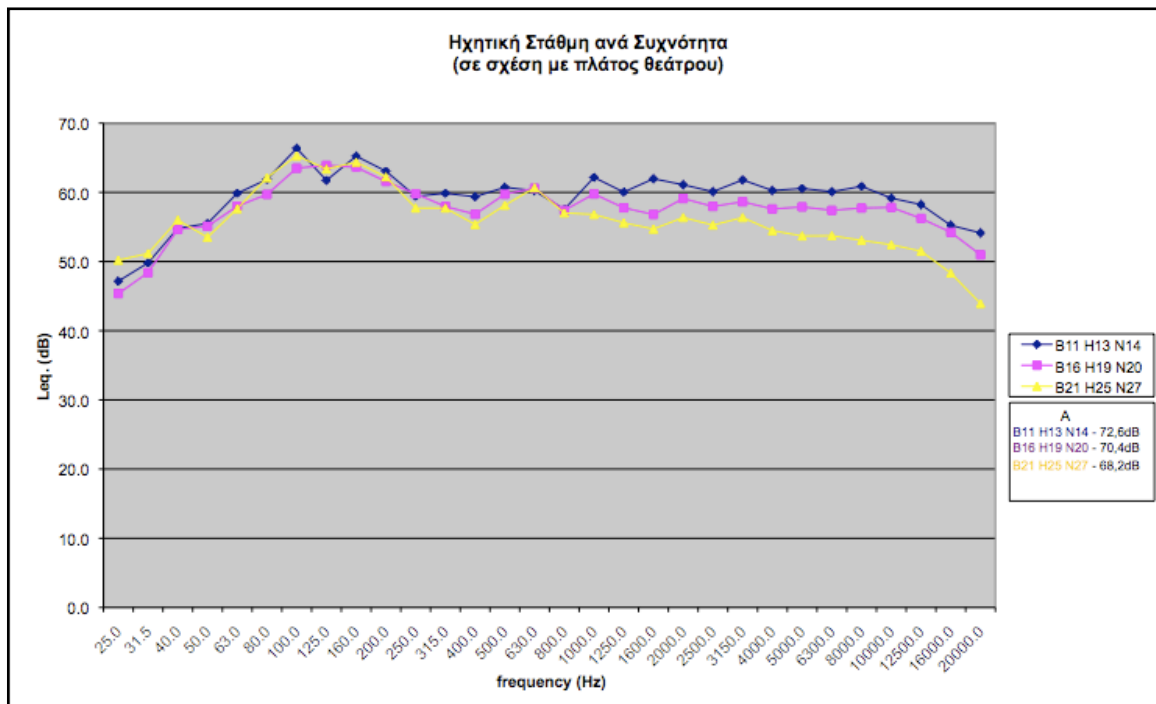
Συνδέσαμε την έξοδο της γεννήτριας ροζ θορύβου με την είσοδο ενός καναλιού της κονσόλας ήχου, το σήμα οδηγούνταν μέσω των πάγιων διασυνδέσεων στον ενισχυτή carver pm700 και από εκεί στο ηχείο-μόνιτορ, JBL 415, το οποίο τοποθετήσαμε στη σκηνή στις τρεις θέσεις, Center, Left και Right.

Πίνακας 4-5 . Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης

source position (C.)	mic. position		Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq						
			125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	A
seating area	1	B11	71.6	67.3	69.1	68.9	70.2	69.2	76.4
	2	B16	71.0	66.2	69.4	65.9	65.4	63.6	72.8
	3	B21	69.5	64.6	67.1	61.6	59.3	58.4	68.6
	4	H13	68.4	65.0	62.4	62.4	64.1	64.6	71.0
	5	H19	70.1	64.6	62.0	62.4	62.1	62.6	69.8
	6	H25	70.5	65.2	63.4	61.8	61.3	60.9	68.8
	7	N14	69.9	65.7	63.6	64.0	63.4	63.3	70.4
	8	N20	64.2	63.7	61.2	61.5	61.5	62.2	68.6
	9	N27	68.7	64.0	59.6	60.7	60.2	60.1	67.3
balcony	10	CCC18	63.5	70.0	62.2	62.4	59.8	61.5	68.8
	11	CCC25	64.3	65.6	60.4	60.1	58.4	59.2	66.8
πηγή	μέτρηση στο 1 m	* 30 cm ύψος	84.4	80.8	77.8	77.9	72.7	76.1	89.0



Σχήμα 4-4 . Ηχητική στάθμη ανά συχνότητα (σε σχέση με την απόσταση από την πηγή)



Σχήμα 4-5 . Ηχητική στάθμη ανά συχνότητα (σε σχέση το πλάτος της αίθουσας)

4.5 Μέτρηση της κρουστικής απόκρισης

Στις 21 Σεπτεμβρίου 2007 πραγματοποιήθηκε η δεύτερη φάση των μετρήσεων κατά την οποία μετρήθηκε η κρουστική απόκριση της αίθουσας του θεάτρου με τη μέθοδο ακολουθίας μέγιστου μήκους.

Πίνακας 4-6 . Όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης

Κονσόλα ήχου	Soundcraft K3
Ενισχυτής	Carver pm700
Ηχείο	JBL Mpro M415 (stage monitor)
Μικρόφωνο	AKG CK92 (omnidirectional, condenser)
Κάρτα ήχου	Alesis MultiMix FireWire
Λογισμικό	WinMLS2004 (Level 7)

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της ακολουθίας μέγιστου μήκους (*MLS-Maximum Length Sequence*¹⁸)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους Shroeder και Alrutz και βασίζεται στην εκπομπή μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται ακολουθία μέγιστου μήκους (*Maximum Length Sequence*). Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο *MLS* έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ελάχιστα ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος σήματος ως προς θόρυβο (*S/N*). Η ακολουθία είναι στάσιμη και έχει περίοδο $L = 2^n - 1$ (όπου n , θετικός ακέραιος αριθμός). Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή $+1$ ή -1 ,

¹⁸ Για περισσότερες πληροφορίες βλπ Παράρτημα Α

αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου :

- Μεγάλος λόγος σήματος ως προς θόρυβο S/N

Ο λόγος S/N θα αυξάνει κατά 3dB για κάθε διπλασιασμό του αριθμού των αθροίσεων (δλ χρόνος) της κρουστικής απόκρισης

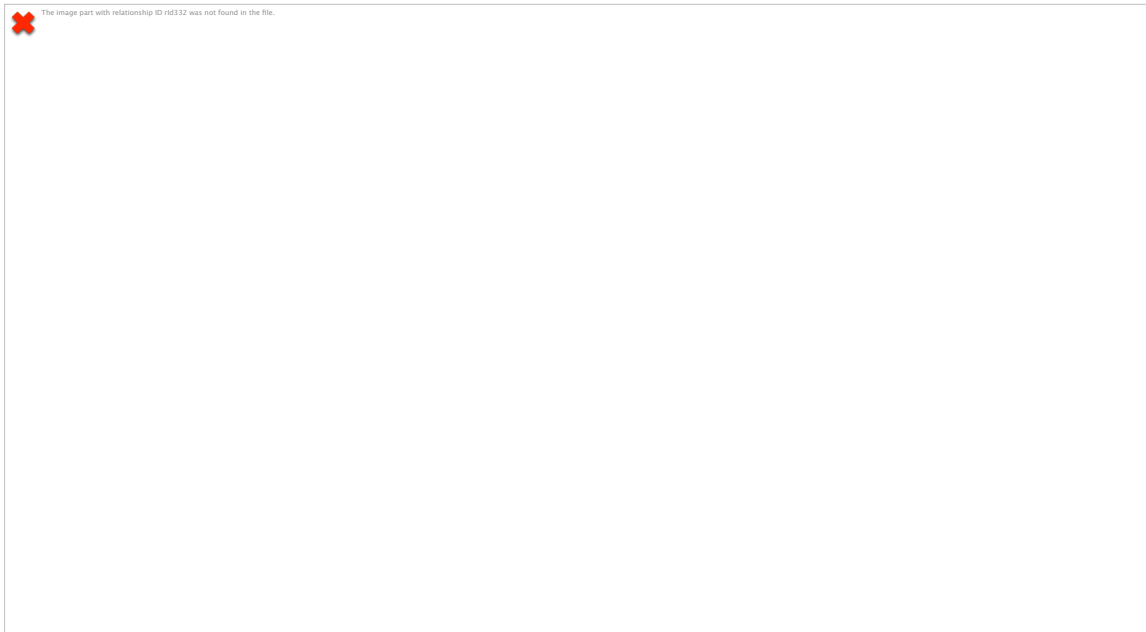
- Λιγότερα ηχεία
- Μικρότερος ενισχυτής
- Λιγότερη ενόχληση

[18]

Συνδέσαμε το μικρόφωνο AKG CK92 στην είσοδο της κάρτας ήχου και την έξοδο της τελευταίας με το πρώτο κανάλι της κονσόλας ήχου Soundcraft K3. Η έξοδος της κονσόλας ήχου οδηγούνταν στον ενισχυτή Carver pm700 και από τον ενισχυτή στο ηχείο-μόνιτορ.

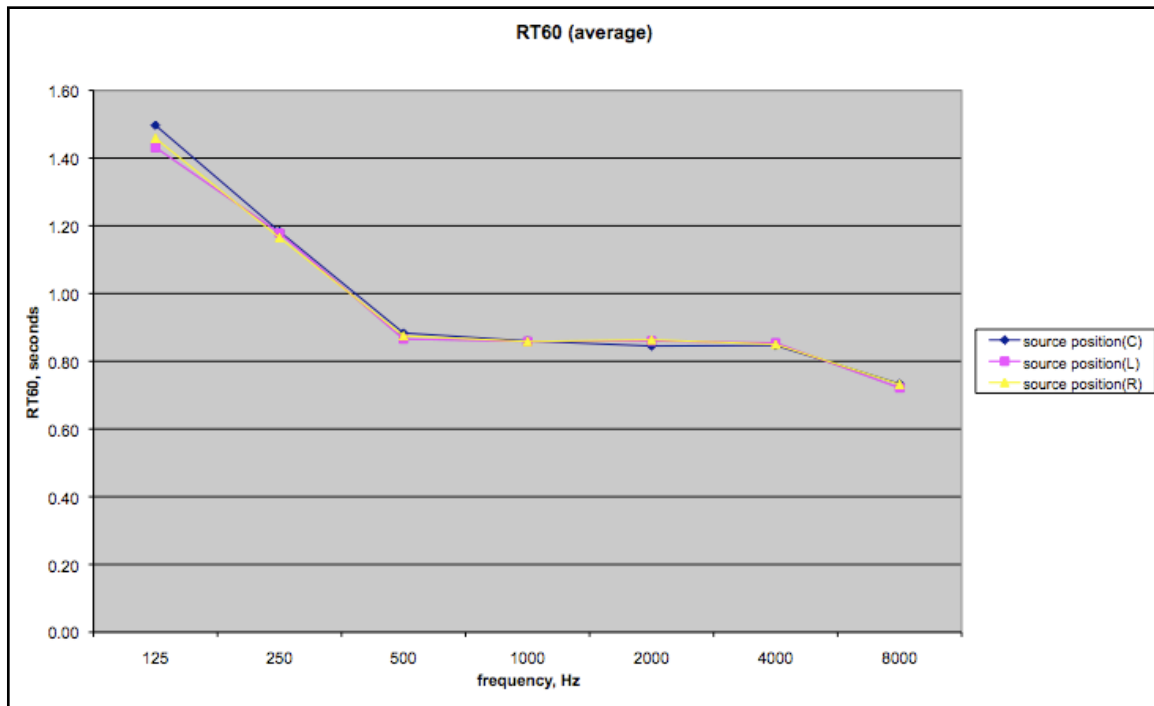
Σημειώνουμε ότι το μήκος του MLS σήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τον προβλεπόμενο χρόνο αντήχησης και ο συνολικός χρόνος μέτρησης να είναι δεκαπλάσιος του προβλεπόμενου χρόνου αντήχησης. (17 averages ,total 10,92 δευτερόλεπτα)

Σχήμα 4-6. Κρουστική απόκριση αίθουσας (θέση μέτρησης , θέση πηγής – Center)

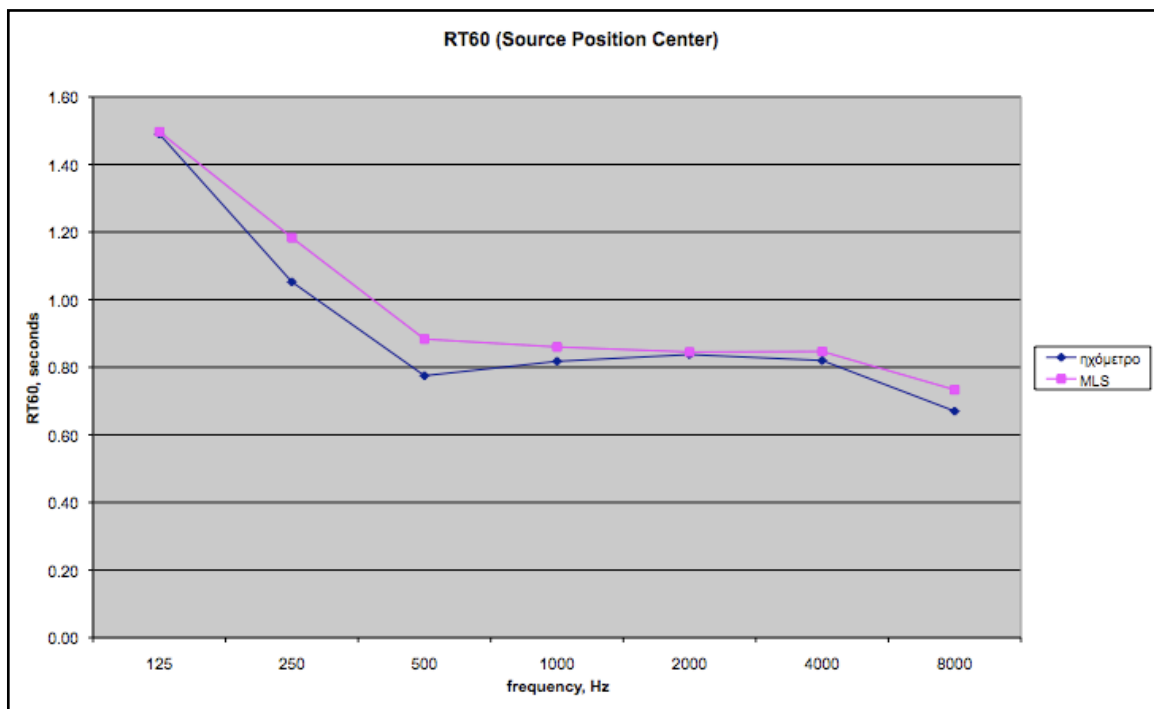


Πίνακας 4-7. Τιμές χρόνου αντήχησης για τις θέσεις μέτρησης, όπως προκύπτουν από την κρουστική απόκριση

source position(C)	mic. position		RT60 (s)					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
seating area	1	C13	1.53	1.23	0.87	0.86	0.88	0.88
	2	H15	1.63	1.21	0.86	0.85	0.83	0.85
	3	H23	1.53	1.22	0.88	0.86	0.82	0.84
	4	N16	1.26	1.18	0.89	0.86	0.85	0.82
	5	Q24	1.49	1.14	0.93	0.89	0.86	0.88
balcony	6	CCC18	1.54	1.12	0.87	0.84	0.83	0.81
	μέσος όρος		1.50	1.18	0.88	0.86	0.85	0.85
source position(L)								
seating area	1	C13	1.41	1.16	0.88	0.88	0.88	0.89
	2	H15	1.45	1.20	0.86	0.87	0.84	0.84
	3	H23	1.49	1.26	0.85	0.85	0.84	0.83
	4	N16	1.53	1.20	0.89	0.86	0.84	0.86
	5	Q24	1.64	1.19	0.85	0.84	0.86	0.88
balcony	6	CCC18	1.07	1.06	0.85	0.88	0.88	0.85
balcony	7	CCC25	1.43	1.18	0.88	0.83	0.88	0.83
	μέσος όρος		1.43	1.18	0.87	0.86	0.86	0.85
source position(R)								
seating area	1	C13	1.54	1.16	0.87	0.88	0.87	0.86
	2	H15	1.16	1.22	0.87	0.87	0.87	0.84
	3	H23	1.45	1.18	0.91	0.84	0.85	0.83
	4	N16	1.59	1.12	0.87	0.85	0.87	0.87
	5	Q24	1.69	1.19	0.90	0.85	0.88	0.89
balcony	6	CCC18	1.32	1.12	0.83	0.86	0.84	0.81
	μέσος όρος		1.46	1.17	0.88	0.86	0.86	0.85

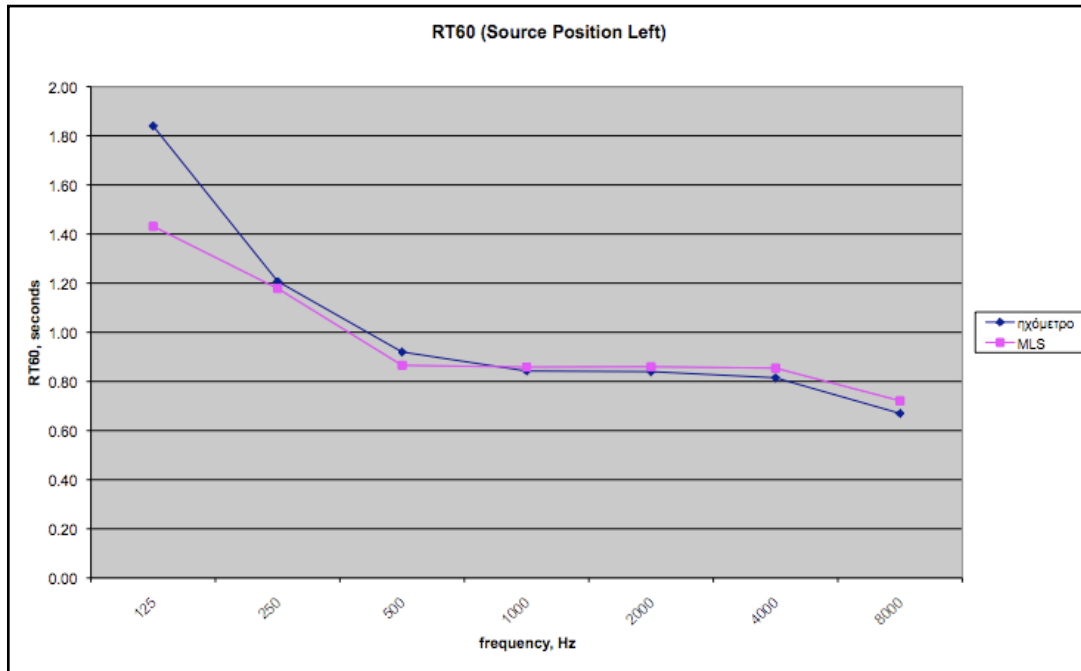


Σχήμα 4-7 . Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής, Center, Left, Right
 α) πηγή στο κέντρο

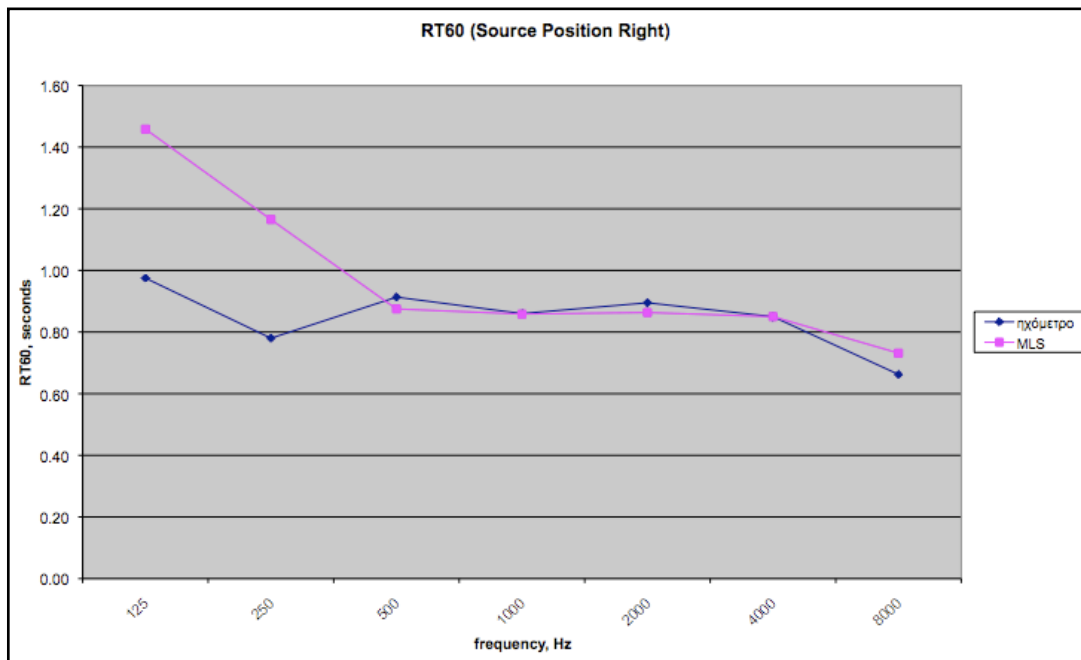


Σχήμα 4-8 . (α, β, γ) Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης (με ροζ χρώμα οι τιμές του RT60 που προκύπτουν από την κρουστική απόκριση, με μπλε χρώμα οι τιμές του RT60 που μετρήθηκαν με το ηχώμετρο – μέθοδος μηδενισμού πηγής)

β) πηγή αριστερά



γ) πηγή δεξιά



Πιο κάτω δίνονται τα αποτελέσματα για τους δείκτες για τρεις από τις έξι θέσεις μέτρησης, στην περίπτωση που η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής.

Πίνακας 4-8. Δείκτες EDT, D50, STI, RASTI

balcony_CCC18C							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]	0.94	1.55	0.23	0.52	0.33	0.46	0.25
D50(%)	5	59	91	83	89	85	92
STI	0.78	Rating:	Good				
STIrMal	0.79	Rating:	Good				
STIrFem	0.81	Rating:	Excellent				
RASTI	0.77	Rating:	Good				
WinMLS Evaluation							
seat C13							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]	1.22	1.19	1.34	1.48	0.85	0.40	0.01
D50(%)	72	74	63	81	90	92	97
STI	0.81	Rating:	Excellent				
STIrMal	0.85	Rating:	Excellent				
STIrFem	0.86	Rating:	Excellent				
RASTI	0.81	Rating:	Excellent				
WinMLS Evaluation							
seat H15							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]		1.58	1.30	0.87	0.79	0.91	0.58
D50(%)		63	36	48	75	76	91
STI	0.71	Rating:	Good				
STIrMal	0.73	Rating:	Good				
STIrFem	0.75	Rating:	Good				
RASTI	0.65	Rating:	Good				

Πίνακας 4-9. ISO 3382 – Αντίστοιχοι δείκτες

ISO 3382							
WinMLS Evaluation							
balcony_CCC18C							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]	0.94	1.55	0.23	0.52	0.33	0.46	0.25
T30[s]	0.97	1.54	1.12	0.87	0.84	0.83	0.81
corr	-0.936	-0.980	-0.997	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999
T20(s)	0.97	1.54	1.11	0.89	0.85	0.84	0.81
corr	-0.936	-0.980	-0.993	-0.999	-0.997	-0.998	-0.997
Tc[ms]	114	86	36	33	24	32	18
C80(dB)	-1.0	3.5	11.5	9.3	11.0	9.5	11.6
D50(%)	5	59	91	83	89	85	92
G[dB]	10.8	8.9	7.4	-0.2	-3.4	0.7	-5.2
seat_C13							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]	1.22	1.19	1.34	1.48	0.85	0.40	0.01
T30[s]	1.16	1.53	1.23	0.87	0.86	0.88	0.88
corr	-0.998	-0.997	-0.996	-0.996	-0.998	-0.998	-0.993
T20(s)	1.18	1.68	1.11	0.88	0.89	0.94	1.08
corr	-0.998	-0.995	-0.996	-0.988	-0.996	-0.993	-0.988
Tc[ms]	68	62	71	29	15	13	6
C80(dB)	5.0	6.2	3.7	7.4	10.2	11.1	15.2
D50(%)	72	74	63	81	90	92	97
G[dB]	12.0	10.4	4.4	1.2	0.3	0.4	-0.2
WinMLS Evaluation							
seat_H15							
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
EDT[s]		1.58	1.30	0.87	0.79	0.91	0.58
T30[s]		1.63	1.21	0.86	0.85	0.83	0.85
corr		-0.997	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999
T20(s)		1.56	1.16	0.93	0.81	0.82	0.92
corr		-0.997	-0.996	-0.997	-0.999	-0.998	-0.998
Tc[ms]		90	103	67	35	32	13
C80(dB)		3.1	0.7	3.6	7.3	7.0	11.9
D50(%)		63	36	48	75	76	91
G[dB]		15.7	7.8	2.7	0.3	-0.4	-2.5

seating area : 427 seats

(18 σειρές)

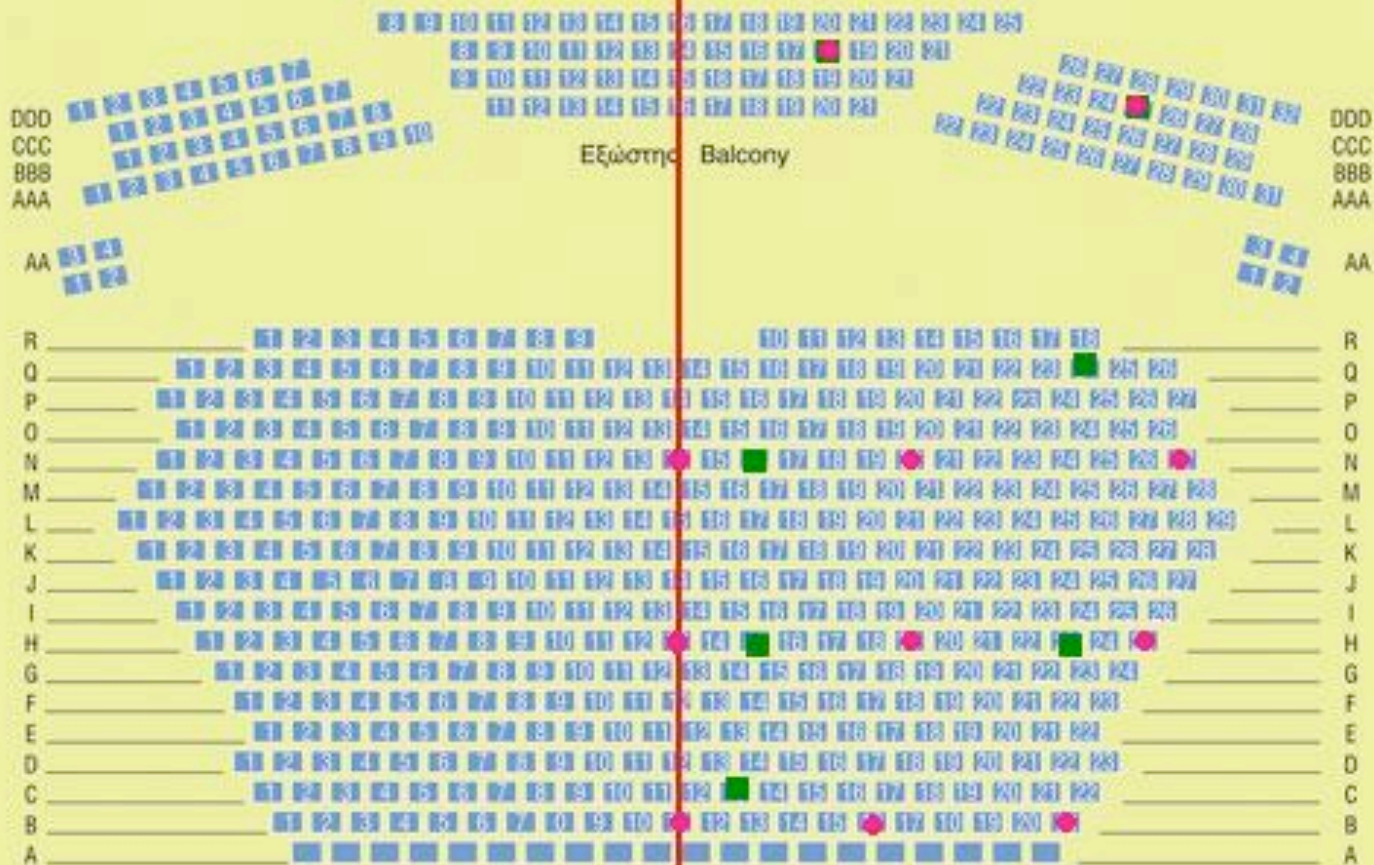
balcony: 133 seats

(4 σειρές)

ριόλιτο
θέατρο theater

SPC

RZGO



Ανδρέα Δρουσιώτη 19
Πλατεία Ηρώων
Τ.Θ. 50332, CY 3603 Λεμεσός
Τηλ 25 343900, Φαξ 25 749663

19 Andrea Droussioti str.
P.O. Box 50332, Cy 3603 Limassol
Tel 25 343900, Fax 25 749663

E-mail: rialto@cytanet.com.cy

CCC18 CCC25

● B11 B16 B21
 H13 H19 H25
 N14 N20 N27
 ■ C13
 H15 H23
 N16 Q24

Σχήμα 4-9 . Διάταξη θέσεων ακρόασης

Ακολουθούν τα σχετικά σχεδιαγράμματα, (κάτοψη αίθουσας και εξώστη). Με **κόκκινο χρώμα** σημειώνονται οι θέσεις στις οποίες έγινε η μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης, **SPL** ενώ

με **μπλε χρώμα** σημειώνονται οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε μέτρηση του **θορύβου βάθους**, του **Χρόνου Αντήχησης** αλλά και της **Κρουστικής Απόκρισης**.

** απόσταση ηχείου από άκρο σκηνής → 1.5 m

Απόσταση ανάμεσα στις θέσεις του ηχείου:

a) Center- Left → 5 m

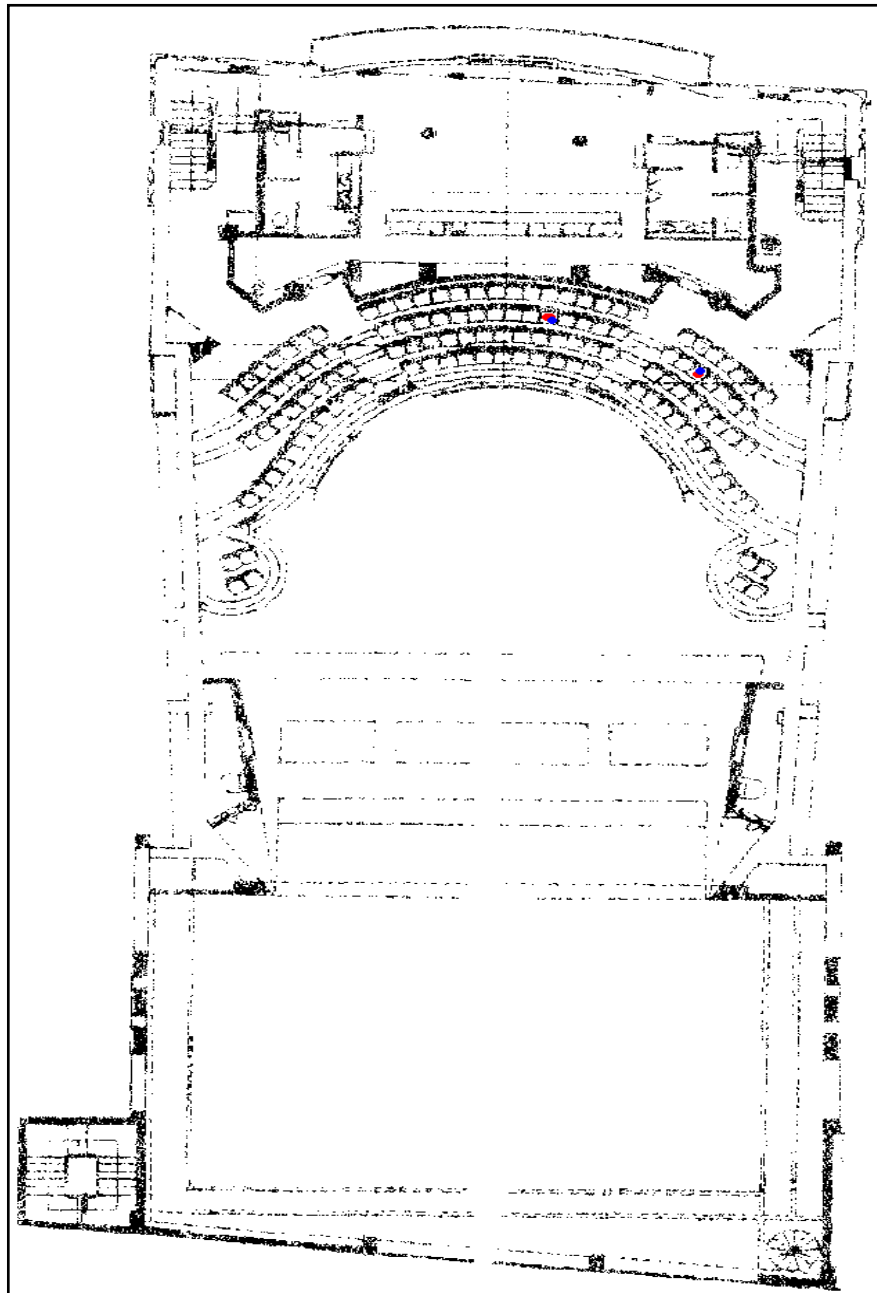
b) Center- Right → 5 m

Απόσταση ηχείου από πρώτη σειρά (στην περίπτωση που μετράμε SPL) → 5.15 m

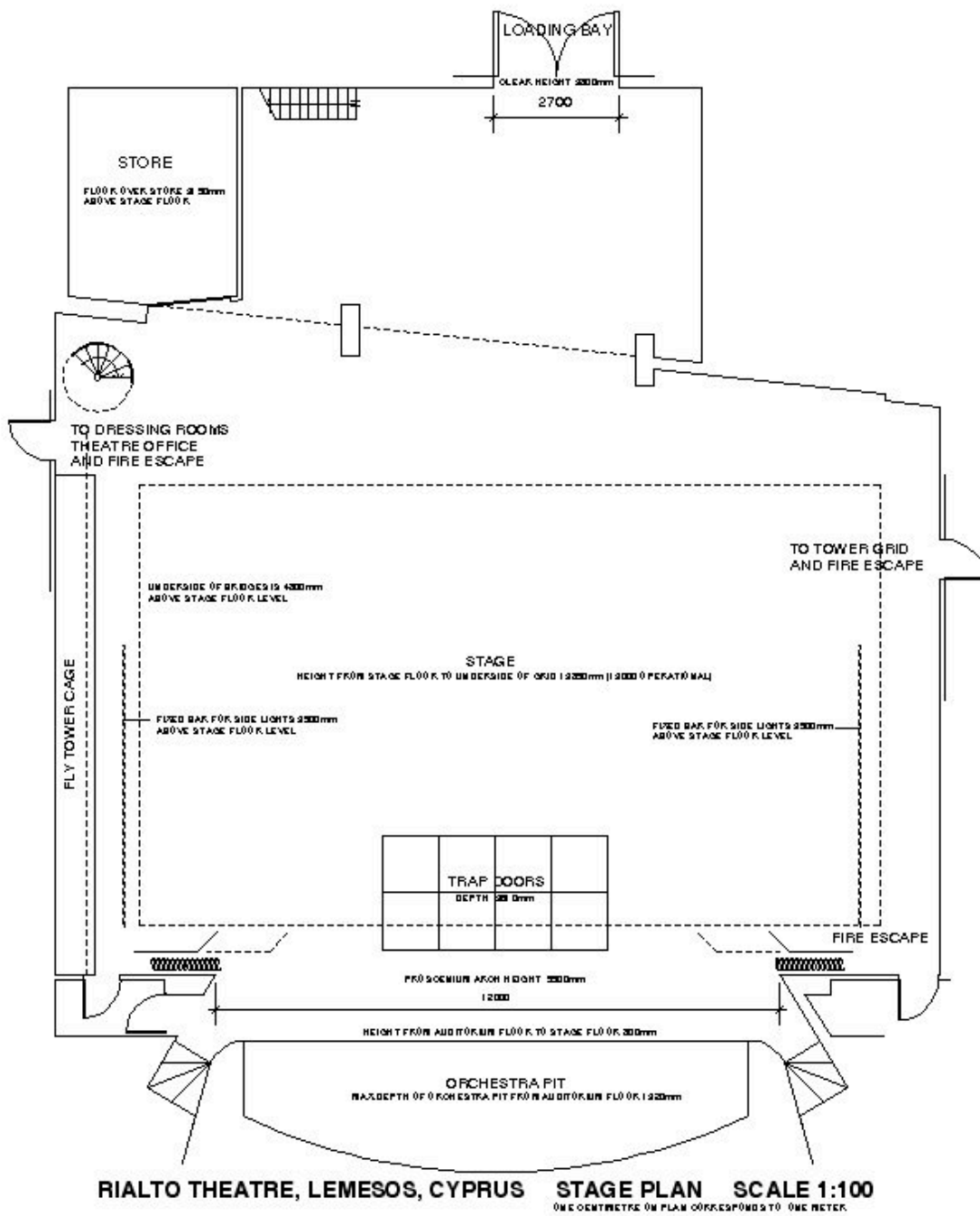


The image part with relationship ID r6338 was not found in the file.

Σχήμα 4-10. Κάτοψη αίθουσας (Ριάλτο)

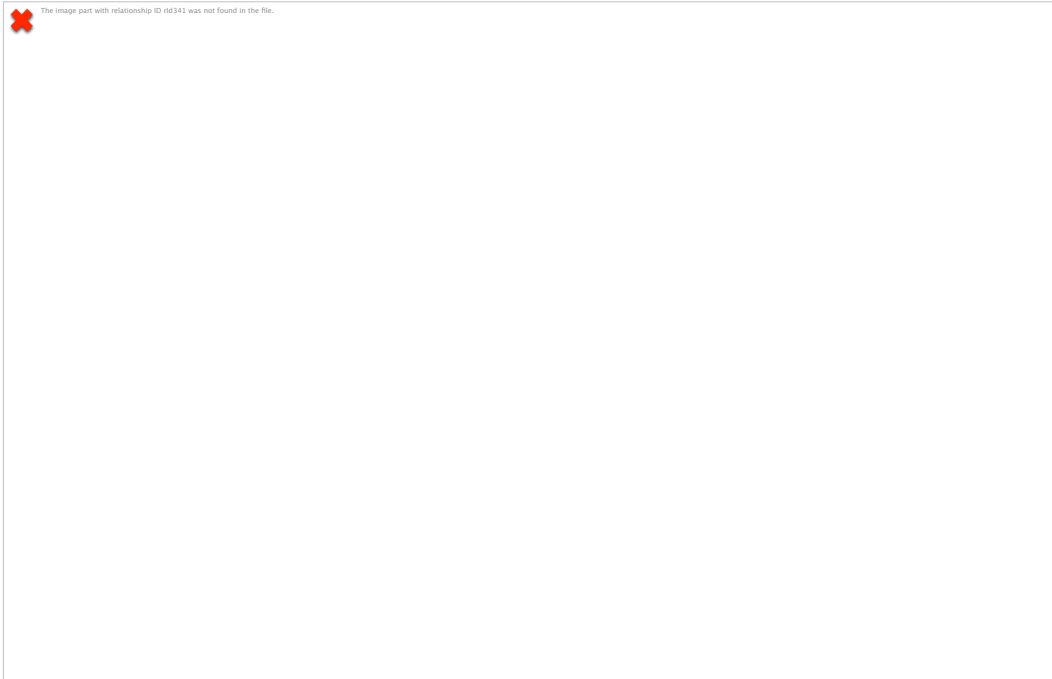


Σχήμα 4-11. Κάτοψη εξώστη



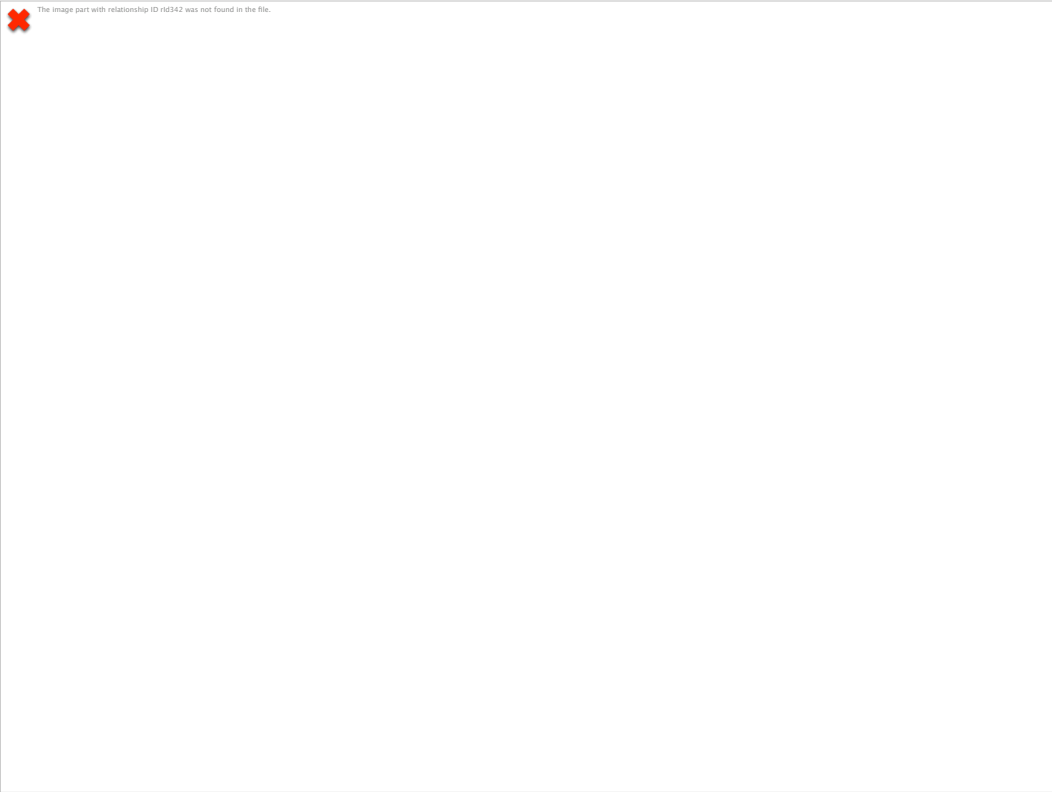
Σχήμα 4-12 . Κάτοψη σκηνής

α)



Σχήμα 4-13 (α,β,γ). Εσωτερικό αίθουσας θεάτρου Ριάλτο

β)



γ)



Οι πίνακες αποτελεσμάτων δίνονται αναλυτικά για όλες τις θέσεις μέτρησης και για κάθε θέση της πηγής στο Παράρτημα Β (μέτρηση με μέθοδο μηδενισμού της πηγής), ενώ στο CD δίνονται και όλα τα σχεδιαγράμματα και οι πίνακες που αφορούν τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης της αίθουσας (με τη μέθοδο MLS).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΙΘΟΥΣΑΣ

5.1 Θεωρητικός υπολογισμός χρόνου αντήχησης

Για τον θεωρητικό υπολογισμό του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος για μεγάλους χώρους όπου η απορρόφηση του αέρα είναι σημαντική:

$$RT60 = \frac{0.161V}{A + 4m}$$

όπου A η συνολική απορρόφηση

V ο όγκος της αίθουσας

m (sound attenuation coefficient) συντελεστής που εξαρτάται από τη συχνότητα και τη σχετική υγρασία

Αρχικά υπολογίστηκε το εμβαδόν κάθε επιφάνειας της αίθουσας και έπειτα ο όγκος της τελευταίας, σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια του θεάτρου (κάτοψη και τομή).

Για τον υπολογισμό του εμβαδού, κάθε επιφάνεια χωρίστηκε σε επιμέρους επιφάνειες. Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του όγκου ο συνολικός όγκος του θεάτρου χωρίστηκε σε επιμέρους όγκους.

Στη συνέχεια έγινε η επιλογή των συντελεστών απορρόφησης των διαφόρων υλικών από πίνακες (βλπ. βιβλιογραφικές αναφορές [3], [6],[9])

Οργανώνοντας τα δεδομένα σε ένα φύλο εργασίας στο Excel και κατόπιν της απαιτούμενης επεξεργασίας, υπολογίστηκε αρχικά η συνολική απορρόφηση A της αίθουσας και έπειτα ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας για τις κεντρικές συχνότητες 125, 250, 500, 1000, 2000 και 4000 Hz.

Πίνακας 5-1. Θεωρητικός υπολογισμός συνολικής απορρόφησης

(α) συμπεριλαμβανομένου του όγκου της σκηνης, (β) χωρίς να συμπεριλάβουμε τον όγκο της σκηνης στον υπολογισμό.

α)

Είδος επιφάνειας	Πλήθος	Εμβαδόν επιφάνειας	Εμβαδόν επιφάνειας Sn συνολικό	Απορρόφηση A						
				125 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
δάπεδο σκηνης	1	239.40	239.40	0.20	47.88	35.91	23.94	23.94	11.97	23.94
πρόσοψη σκηνης	1	10.80	10.80	0.20	2.16	1.62	1.08	1.08	0.54	1.08
παράθυρα με εσωτερική απορρόφηση	20	0.68	13.64	0.30	4.09	10.91	13.64	13.64	13.64	13.64
παράθυρα ανοικτά (ξύλινη γρίλια)	20	0.17	3.41	0.15	0.51	0.38	0.34	0.24	0.20	0.24
παραθυρόπορτες με εσωτερική απορρόφηση	2	2.67	5.34	0.30	1.60	4.27	5.34	5.34	5.34	5.34
παραθυρόπορτες (ξύλινη γρίλια)	2	0.67	1.33	0.15	0.20	0.15	0.13	0.09	0.08	0.09
στρογγυλά παράθυρα	12	0.31	3.69	0.30	1.11	2.96	3.69	3.69	3.69	3.69
στρογγυλά παράθυρα (ξύλινη γρίλια)	12	0.08	0.92	0.15	0.14	0.10	0.09	0.06	0.06	0.06
πόρτες εισόδου	4	2.88	11.50	0.14	1.61	1.15	0.69	0.92	1.15	1.15
πόρτες εξόδου	2	3.57	7.13	0.14	1.00	0.71	0.43	0.57	0.71	0.71
τζάμα	2	2.20	4.40	0.15	0.66	0.22	0.13	0.13	0.09	0.09
τζάμα	2	1.54	3.08	0.15	0.46	0.15	0.09	0.09	0.06	0.06
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα1	2	48.10	87.71	0.08	7.02	7.89	10.52	14.03	19.30	21.05
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα2	2	27.84	54.76	0.08	4.38	4.93	6.57	8.76	12.05	13.14
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα3	2	49.60	93.77	0.08	7.50	8.44	11.25	15.00	20.63	22.51
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα4	2	27.39	51.37	0.08	4.11	4.62	6.16	8.22	11.30	12.33
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα5	2	16.65	31.94	0.08	2.55	2.87	3.83	5.11	7.03	7.66
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα6	2	27.55	52.10	0.08	4.17	4.69	6.25	8.34	11.46	12.50
ισόγειο πίσω τοίχος (απορ.)	1	44.20	38.45	0.25	9.61	23.07	42.30	25.38	10.38	11.54
πίσω τοίχος (εξώστης)	1	42.50	36.75	0.28	10.29	4.41	3.68	2.57	4.78	3.31
πίσω τοίχος (πάνω από εξώστη)	1	38.25	30.77	0.42	12.92	6.46	3.08	2.46	1.85	2.15
δάπεδο	1	296.40	122.03	0.20	24.41	18.30	12.20	73.22	91.52	97.62
seating area	1	194.36	194.36	0.44	85.52	116.62	149.66	172.98	159.38	136.05
μπαλκόνι (χαλί)	1	95.15	37.46	0.20	7.49	5.62	3.75	22.47	28.09	29.96
μπαλκόνι (θέσεις θεατών)	1	57.70	57.70	0.44	25.39	34.62	44.43	51.35	47.31	40.39
πρόσοψη μπαλκονιού	1	34.69	34.69	0.28	9.71	4.16	3.47	2.43	4.51	3.12
ventilation grille	4	0.38	1.54	0.60	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
κουρτίνες	2	66.00	132.00	0.16	21.12	39.60	84.48	77.88	81.84	89.76
οροφή	1	296.40	294.86	0.29	85.51	29.49	14.74	11.79	20.64	26.54
Αέρας				0.06	1.76	4.10	7.33	16.71	52.19	182.08

Συνολική απορρόφηση		385.80	379.35	464.22	569.43	622.7 0	762.7 4
------------------------	--	--------	--------	--------	--------	------------	------------

β)

Είδος επιφάνειας	Πλήθος	Εμβαδόν επιφάνειας	Εμβαδόν επιφάνειας Sn συνολικό	Απορρόφηση A					
				125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000Hz
πρόσοψη σκηνής	1	10.80	10.80	2.16	1.62	1.08	1.08	0.54	1.08
παράθυρα με εσωτερική απορρόφηση	20	0.68	13.64	4.09	10.91	13.64	13.64	13.64	13.64
παράθυρα ανοικτά (ξύλινη γρίλια)	20	0.17	3.41	0.51	0.38	0.34	0.24	0.20	0.24
παραθυρόπορτες με εσωτερική απορρόφηση	2	2.67	5.34	1.60	4.27	5.34	5.34	5.34	5.34
παραθυρόπορτες (ξύλινη γρίλια)	2	0.67	1.33	0.20	0.15	0.13	0.09	0.08	0.09
στρογγυλά παράθυρα	12	0.31	3.69	1.11	2.96	3.69	3.69	3.69	3.69
στρογγυλά παράθυρα (ξύλινη γρίλια)	12	0.08	0.92	0.14	0.10	0.09	0.06	0.06	0.06
πόρτες εισόδου	4	2.88	11.50	1.61	1.15	0.69	0.92	1.15	1.15
πόρτες εξόδου	2	3.57	7.13	1.00	0.71	0.43	0.57	0.71	0.71
τζάμια	2	2.20	4.40	0.66	0.22	0.13	0.13	0.09	0.09
τζάμια	2	1.54	3.08	0.46	0.15	0.09	0.09	0.06	0.06
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα1	2	48.10	87.71	7.02	7.89	10.52	14.03	19.30	21.05
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα2	2	27.84	54.76	4.38	4.93	6.57	8.76	12.05	13.14
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα3	2	49.60	93.77	7.50	8.44	11.25	15.00	20.63	22.51
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα4	2	27.39	51.37	4.11	4.62	6.16	8.22	11.30	12.33
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα5	2	16.65	31.94	2.55	2.87	3.83	5.11	7.03	7.66
πλαϊνοί τοίχοι τμήμα6	2	27.55	52.10	4.17	4.69	6.25	8.34	11.46	12.50
ισόγειο πίσω τοίχος (απορ.)	1	44.20	38.45	9.61	23.07	42.30	25.38	10.38	11.54
πίσω τοίχος (εξώστης)	1	42.50	36.75	10.29	4.41	3.68	2.57	4.78	3.31
πίσω τοίχος (πάνω από εξώστη)	1	38.25	30.77	12.92	6.46	3.08	2.46	1.85	2.15
δάπεδο	1	296.40	122.03	24.41	18.30	12.20	73.22	91.52	97.62
seating area	1	194.36	194.36	85.52	116.62	149.66	172.98	159.38	136.05
seating area	1	174.37		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
μπαλκόνι (χαλί)	1	95.15	37.46	7.49	5.62	3.75	22.47	28.09	29.96
μπαλκόνι (θέσεις θεατών)	1	57.70	57.70	25.39	34.62	44.43	51.35	47.31	40.39
πρόσοψη μπαλκονιού	1	34.69	34.69	9.71	4.16	3.47	2.43	4.51	3.12
ventilation grille	4	0.38	1.54	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
σκηνή (άνοιγμα)	1	66.00	66.00	29.70	29.70	29.70	29.70	29.70	29.70
οροφή	1	296.40	294.86	85.51	29.49	14.74	11.79	20.64	26.54
Αέρας	*Rh 20%			1.76	4.10	7.33	16.71	52.19	182.08
Συνολική απορρόφηση				346.50	333.54	385.50	497.31	558.59	678.74

Πίνακας 5-2 Θεωρητικός υπολογισμός χρόνου αντήχησης

(α) συμπεριλαμβανομένου του όγκου της σκηνης, (β) χωρίς να συμπεριλάβουμε τον όγκο της σκηνης στον υπολογισμό.

α)

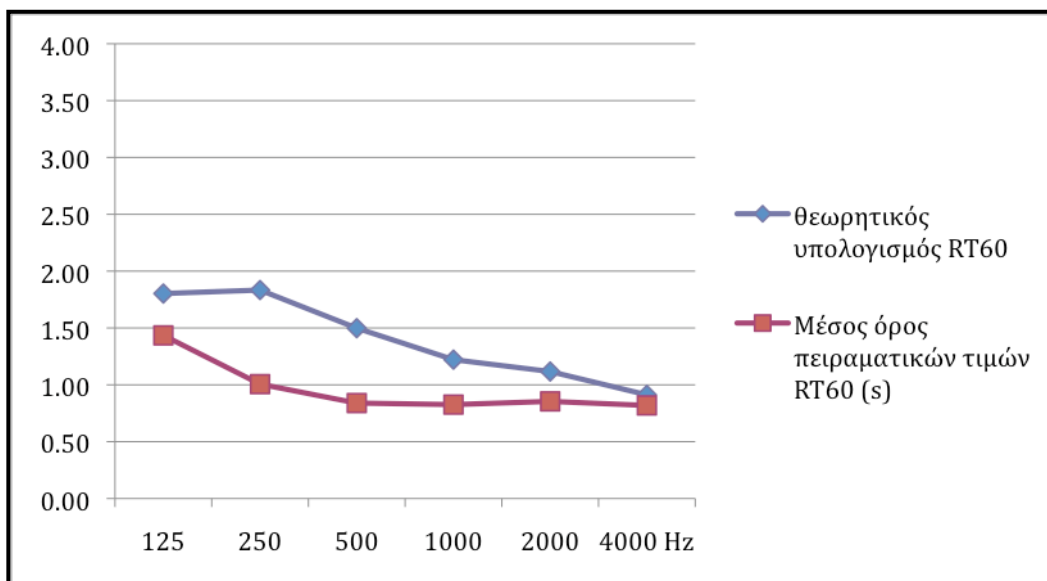
Χρόνος Αντήχησης, RT60 (s)					
125	250	500	1000	2000	4000 Hz
1.80	1.83	1.50	1.22	1.12	0.91
Μέσος όρος πειραματικών τιμών RT60 (s)					
1.44	1.01	0.84	0.83	0.85	0.82

β)

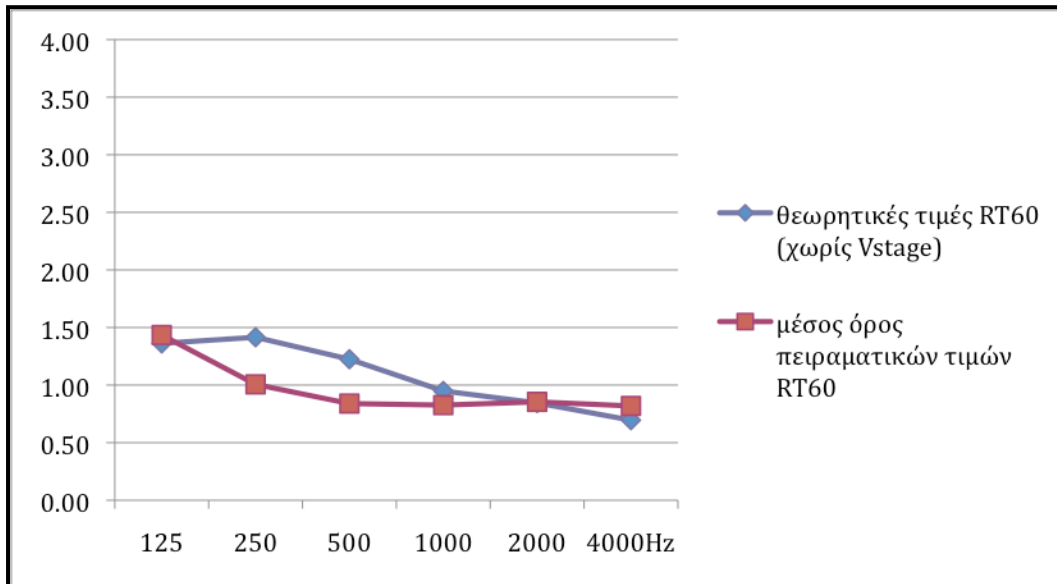
Χρόνος Αντήχησης RT60					
125	250	500	1000	2000	4000Hz
1.36	1.42	1.22	0.95	0.85	0.70
Μέσος όρος πειραματικών τιμών RT60 (s)					
1.44	1.01	0.84	0.83	0.85	0.82

Σχήμα 5-1. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών του χρόνου αντήχησης α) στο θεωρητικό υπολογισμό περιλαμβάνεται ο όγκος τη σκηνης β) στο θεωρητικό υπολογισμό δεν περιλαμβάνεται ο όγκος της σκηνης.

α)



β)



5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια έγιναν υπολογισμοί για τις πιο κάτω ποσότητες και μεγέθη:

- L/W
- H/W
- V/seat
- Area/seat
- Μέγιστη απόσταση σκηνης - ακροατή
- Κλίση δαπέδου (seating area)

Λόγος μήκους ως προς πλάτος

$$L/W = 1.18$$

Η τιμή του λόγου του πλάτους ως προς το μήκος - για ορθογώνιες αίθουσες - θα πρέπει να είναι μικρότερη από 2, (βλπ πίνακα 3-4) οπότε η τιμή 1.18 είναι αρκετά καλή.

Λόγος ύψους ως προς πλάτος

$$H/W = 0.59$$

Η τιμή του λόγου του ύψους ως προς το πλάτος στην περίπτωση του θεάτρου Ριάλτο είναι 0.59, ικανοποιητική τιμή για θεατρική αίθουσα λιγότερο ικανοποιητική ωστόσο, σε περίπτωση που η συγκεκριμένη αίθουσα χρησιμοποιείται σαν αίθουσα συναυλιών.

Λόγος όγκου ανά ακροατή (θέση)

$$V/\text{seat} = 7.71$$

Η βέλτιστη τιμή του όγκου ανά ακροατή για αίθουσες συναυλιών είναι 8.5 m^3 ανά ακροατή. Στην περίπτωση της θεατρικής αίθουσας που μελετούμε ο όγκος είναι 7.71 m^3 ανά ακροατή. Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική αν και μικρότερη από τη βέλτιστη.

Προκειμένου για αίθουσες πολλαπλών χρήσεων η τιμή αυτή είναι κατά 0.91 m^3 μεγαλύτερη από την τιμή που θεωρείται βέλτιστη.

Τέλος η τιμή αυτή είναι, διπλάσια από τη βέλτιστη τιμή για αίθουσες διαλέξεων.

Λόγος επιφάνειας ανά ακροατή (θέση)

$$\text{Area}/\text{seat} = 0.41$$

Η βέλτιστη τιμή του λόγου της επιφάνειας ανά ακροατή στην περίπτωση των αιθουσών συναυλιών κυμαίνεται μεταξύ $0.6 - 0.8 \text{ m}^2$ ανά ακροατή. Στην περίπτωση της αίθουσας που μελετάμε η τιμή του λόγου επιφάνειας ανά ακροατή, δεν είναι ικανοποιητική.

Μέγιστη απόσταση σκηνής – ακροατή

$$L_{\max} = 19 \text{ m}$$

Η μέγιστη απόσταση της σκηνής από τον πιο απομακρισμένο ακροατή πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 με 30 m, οπότε τα 19 m που αντιστοιχούν στη μέγιστη απόσταση σκηνής και πιο απομακρισμένου ακροατή στην αίθουσα που μελετούμε είναι μια αρκετά ικανοποιητική τιμή.

Κλίση δαπέδου (seating area)

Η κλίση του δαπέδου στην περίπτωση αιθουσών που χρησιμοποιούνται για παραστάσεις που αφορούν το λόγο (αίθουσες διαλέξεων, θέατρα) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 7° . Στο θέατρο που μελετούμε η κλίση του δαπέδου είναι 7° δηλαδή ικανοποιητική.

Άλλες παρατηρήσεις:

Η διάταξη των θέσεων των ακροατών βρίσκεται μέσα στη γωνία των 140° (από το κέντρο της σκηνής) όπου σύμφωνα με τις καμπύλες κατευθυντικότητας ομιλίας, η ομιλία έχει μέγιστη στάθμη. (βλπ Σχήμα 2-4)

Το ύψος του δαπέδου της σκηνής/ προσκηνίου ανέρχεται μόλις στα 0.90 m. Η τιμή αυτή είναι πολύ καλή, εφόσον το ύψος του προσκηνίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 m.

Το βάθος προβόλου είναι 2.25 m στο κεντρικό άξονα , 5.5 m στις θέσεις που βρίσκονται στα άκρα των σειρών δεξιά και αριστερά της αίθουσας, ικανοποιώντας τη σχέση που πρέπει να ισχύει στις αίθουσες όπου υπάρχει εξώστης:

βάθος προβόλου $< 2 H$, όπου H το ύψος του ανοίγματος προβόλου-δαπέδου που στην περίπτωση που μελετάμε είναι ίσο με 3.5 m.

Στην περίπτωση των αιθουσών συναυλιών το βάθος προβόλου θα πρέπει να είναι μικρότερο από το ύψος του μπαλκονιού. Στην περίπτωση που η αίθουσα χρησιμοποιείται για κινηματογραφικές προβολές ή όπερα, το βάθος προβόλου θα πρέπει να είναι μικρότερο από το διπλάσιο του ύψους του μπαλκονιού ενώ στην περίπτωση των θεάτρων το μήκος του προβόλου πρέπει να είναι μικρότερο από 2.5 φορές το ύψος του ανοίγματος. Στην περίπτωση του θεάτρου που μελετούμε το ύψος του μπαλκονιού είναι 3.5 m και το βάθος του προβόλου στον κεντρικό άξονα της αίθουσας 2.25 ενώ πιο αριστερά ή δεξιά από τον κεντρικό άξονα η τιμή είναι 5.50 m, έτσι ικανοποιούνται και οι σχέσεις σε όλες τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν.

Το πλάτος της σκηνής είναι 18 m ενώ το άνοιγμα του προσκηνίου είναι 12 m, δίνοντας λόγο πλάτους της σκηνής ως προς το άνοιγμα του προσκηνίου ίσο με 1.5. Η τιμή αυτή

είναι ικανοποιητική εφόσον το πλάτος της σκηνής πρέπει να είναι διπλάσιο από το άνοιγμα του προσκηνίου.

Το υπερσκήνιο πρέπει να έχει ύψος μεγαλύτερο από 1.5 φορές το ύψος του ανοίγματος του προσκηνίου. Στην περίπτωση του θεάτρου που μελετάμε η τιμή του ύψους του υπερσκηνίου είναι 7.5 m, ικανοποιητική τιμή εφόσον η βέλτιστη είναι 8.25 m (1.5 x 5.5). Οι τιμές του ύψους, τόσο του ανοίγματος του προσκηνίου όσο και του υπερσκηνίου είναι ικανοποιητικές. Άλλωστε το ύψος του ανοίγματος του προσκηνίου μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση πάνελς αλλά και με τη χρήση του κελύφους σκηνής, ανάλογα με τις ανάγκες της παράστασης.

Το ύψος του πιτ της ορχήστρας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2 m. Στην περίπτωση του θεάτρου Ριάλτο, το πιτ της ορχήστρας είναι μόλις 1.32 m κάτω από το επίπεδο των θέσεων των ακροατών.

Αξιολόγηση μετρήσεων που έγιναν στις 21 και 22 Σεπτεμβρίου 2007 στο θέατρο Ριάλτο.

Θόρυβος βάθους:

Η μέτρηση του θορύβου βάθους έγινε στις θέσεις των μετρήσεων με τη χρήση του ηχομέτρου. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (βλπ Παράρτημα Β) προκύπτει ότι οι τιμές του θορύβου βάθους είναι αρκετά ικανοποιητικές εφόσον ικανοποιούν τις απαιτήσεις για θεατρική αίθουσα (κριτήριο NC-25). Παρατηρούμε, ότι οι υψηλότερες τιμές του θορύβου βάθους αντιστοιχούν στις θέσεις που βρίσκονται στον εξώστη. Στη θέση C13 η στάθμη του θορύβου βάθους είναι η μεγαλύτερη από τις στάθμες στις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης (seating area).

Στάθμη ηχητικής πίεσης σε σχέση με την απόσταση από την πηγή:

Η πηγή που χρησιμοποιήσαμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων δεν ήταν σφαιρική (δωδεκαεδρική πηγή) αλλά ένα συνηθισμένο μόνιτορ που τοποθετήσαμε στο δάπεδο της σκηνής. Αφού με τη χρήση του μόνιτορ υπάρχει κατευθυντικότητα στις υψηλές συχνότητες, ανά διπλασιασμό της απόστασης δεν περιμένουμε μείωση κατά 6 dB αλλά

αρκετά μικρότερη μείωση. Παρατηρούμε ότι η ηχητική στάθμη ανά διπλασιασμό της απόστασης μειώνεται λιγότερο από 6 dB σε κάθε συχνότητα, με εμφανή μείωση της διαφοράς ($SPL@ r_2 - SPL@ r_1$) στις υψηλές συχνότητες.

Στο πίνακα (B-1) παρατηρούμε ότι η ηχητική στάθμη στη θέση N14 για τις περισσότερες συχνότητες είναι ίση ή και μεγαλύτερη από τη στάθμη στη θέση H13 που είναι πιο μπροστά. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι στη συγκεκριμένη θέση (N14) ο ήχος φαινόταν να έρχεται από τον εξώστη, κι όχι από την πηγή που βρισκόταν στο κέντρο της σκηνής. Όλα αυτά οφείλονται στο φαινόμενο της εστίασης του ήχου στη συγκεκριμένη θέση. Οι ανακλάσεις από την πρόσοψη του μπαλκονιού συγκεντρώνονται στη θέση αυτή προκαλώντας στον ακροατή το φαινόμενο της «λανθάνουσας θέσης της πηγής». Παρατηρώντας τα σχέδια του θεάτρου – σχήματα (4-11) και (4-12) βλέπουμε ότι η θέση N14 βρίσκεται στον κεντρικό άξονα της αίθουσας. Θεωρώντας ότι το ημικυκλικό σχήμα του προβόλου (πρόσοψη) έχει ακτίνα r , παρατηρούμε ότι η θέση N14 βρίσκεται σε απόσταση r από τον εξώστη. Οι ανακλάσεις από την πρόσοψη του προβόλου, εξαιτίας του κοίλου σχήματος, συγκεντρώνονται στη θέση N14.

Στο σχήμα (B-3) φαίνεται η στάθμη ηχητικής πίεσης ως προς το πλάτος της αίθουσας. Παρατηρούμε, όπως είναι και αναμενόμενο βέβαια ότι οι τιμές της ηχητικής στάθμης είναι μέγιστες στις θέσεις που βρίσκονται στον κεντρικό άξονα της αίθουσας ενώ μειώνεται όσο προχωρούμε προς τα δεξιά (είτε αριστερά¹⁹)

Χρόνος αντήχησης (RT60):

Οι βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες για θέατρα σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα -πίνακας (3-4) -κυμαίνονται μεταξύ 0.7 s και 1.0 s. Στον πίνακα (B-4α) παρατηρούμε ότι η τιμή του χρόνου αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής, κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 0.9 δευτερόλεπτα. Αυτές οι τιμές είναι πολύ καλές όσον αφορά τις θεατρικές παραστάσεις όμως είναι αρκετά χαμηλές για την περίπτωση μουσικών παραστάσεων.

¹⁹ Λόγω συμμετρίας της αίθουσας οι μετρήσεις έγιναν μόνο στη δεξιά πλευρά της αίθουσας η ίδια συμπεριφορά της αίθουσας ισχύει και για την αριστερή πλευρά. [23],[3]

Bass ratio:

Σε αίθουσες που προορίζονται για μουσικές παραστάσεις η τιμή του λόγου των χαμηλών συχνοτήτων ως προς της μεσαίες δηλαδή το «Bass Ratio» πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.2. Όπως βλέπουμε στον πιο κάτω πίνακα η τιμή που αντιστοιχεί στο bass ratio κατά μέσο όρο είναι 1.6 όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής. Αυτή είναι πολύ καλή και δηλώνει τονική πληρότητα στις μπάσες συχνότητες ή αλλιώς «ζεστασιά» στην αίθουσα του θεάτρου.

Πίνακας 5-3 . Bass ratio

θέση πηγής	bass ratio
C	1.60
L	1.73
R	0.99

Αρχικός Χρόνος Μείωσης του Ηχητικού Πεδίου, (EDT):

Οι τιμές του EDT είναι σε γενικές γραμμές καλές καθώς δεν παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τις τιμές του χρόνου αντήχησης . Οι χαμηλότερες τιμές του EDT παρουσιάζονται στις θέσεις μέτρησης που βρίσκονταν στο μπαλκόνι.

Δείκτης μετάδοσης λόγου (STI), και ταχύς δείκτης μετάδοσης λόγου (RASTI):

Οι τιμές των δεικτών STI και RASTI, είναι πολύ ικανοποιητικές και σε κάποιες περιπτώσεις εξαιρετικά καλές (βλπ. πίνακες (B-4) και (B-5)).

Διακριτότητα (D50) :

Οι τιμές της διακριτότητας D είναι πολύ ικανοποιητικές και αντιστοιχούν στις βέλτιστες τιμές τόσο για θεατρικές αίθουσες όσο και για αίθουσες κινηματογραφικών προβολών αλλά και αίθουσες πολλαπλών χρήσεων.

Διαύγεια (C80):

Οι τιμές του C80 είναι ικανοποιητικές. Είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις βέλτιστες τιμές για θεατρική αίθουσα και παράλληλα αρκετά καλές στην περίπτωση παραστάσεων λαϊκής μουσικής. (βλπ Κεφάλαιο 2)

Σε γενικές γραμμές η ακουστική της αίθουσας κρίνεται αρκετά καλή. Πληροί τις προδιαγραφές για καλές ακουστικές συνθήκες στην περίπτωση παραστάσεων λόγου-θέατρο, διαλέξεις- αλλά και στην περίπτωση κινηματογραφικών προβολών. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν αίθουσα πολλαπλών χρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

6.1. Γενικά

Θέατρα και αίθουσες συναυλιών

Η ανάγκη για καλή ορατότητα σε όλες τις θέσεις μιας αίθουσας εισάγει αυστηρούς περιορισμούς στο σχήμα, το ύψος και τη μορφή της οροφής καθώς και στη διάταξη των θέσεων.

Στην περίπτωση των θεάτρων η μέγιστη απόσταση σκηνής και πιο απομακρυσμένου ακροατή περιορίζεται μόλις στα 20 m εφόσον είναι απαραίτητο ο θεατής να κατανοεί τις χειρονομίες αλλά και τις εκφράσεις του προσώπου του κάθε ηθοποιού.

Η βιβλιογραφία για την ακουστική των θεάτρων είναι σχετικά περιορισμένη συγκρινόμενη με αυτή που αφορά σε συγγενείς κλάδους της ακουστικής όπως λ.χ. την ακουστική των αιθουσών συναυλιών. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι στην ακουστική ενός χώρου που αφορά ομιλία τα πράγματα είναι σαφώς πιο απλά από ότι στην περίπτωση που ο χώρος αφορά μουσική.

Το βασικό ακουστικό κριτήριο που μας απασχολεί στην περίπτωση του λόγου είναι η καταληπτότητα ομιλίας. Σε πρώτη προσέγγιση η παράμετρος αυτή δίδεται να συσχετισθεί με την τιμή δύο βασικών αντικειμενικών ακουστικών ποσοτήτων : α) λόγος της πρώιμης ηχητικής ενέργειας ως προς τη συνολική ηχητική ενέργεια, β) λόγος σήματος ως προς θόρυβο. Από τις δύο αυτές ποσότητες η πρώιμη ηχητική ενέργεια αξίζει μεγαλύτερης προσοχής. Η επαρκής πρώιμη ενέργεια επιτυγχάνεται με την παροχή ισχυρών ανακλάσεων κατά το 1/20 ενός δευτερολέπτου μετά τον απευθείας ήχο. Όσον αφορά το λόγο σήματος προς θόρυβο, αυτός εξαρτάται από το θόρυβο βάθους και από την ισχύ των ανακλάσεων της ηχητικής ενέργειας της πηγής που φθάνουν από τις οριακές επιφάνειες του χώρου σε κάθε θέση του θεάτρου. Οι προτεινόμενες τιμές αντιστοιχούν σε κριτήριο NC20 είτε NC25 (μέγιστη τιμή).

Οι τιμές του χρόνου αντήχησης της τάξεως του 1.0 s είναι πολύ ικανοποιητικές στην περίπτωση που η αίθουσα αφορά ομιλία. Παρόλα αυτά σε μεγαλύτερες αίθουσες η τιμή του χρόνου αντήχησης μπορεί να περιοριστεί μόλις στα 0.8 s.

Στην περίπτωση των θεάτρων με προσκήνιο, όταν η αίθουσα είναι σχετικά μικρή, η ακουστική συμπεριφορά είναι, συνήθως, πολύ ικανοποιητική. Η καταληπτότητα ομιλίας

είναι ικανοποιητική ακόμα και σε αίθουσες με εξώστες μεγάλου βάθους. Σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ σημαντικό να αποφεύγονται οι καθυστερημένες ανακλάσεις προς τη σκηνή (από τον απέναντι τοίχο της αίθουσας) καθώς επίσης και οι κοίλες επιφάνειες, που προκαλούν προβλήματα εστίασης του ήχου και δημιουργούν το φαινόμενο της λανθάνουσας θέσης της πηγής.

Προκειμένου για αίθουσες που προορίζονται για την ακρόαση μουσικής είναι πλέον παγκοσμίως αποδεκτό το γεγονός ότι οι απαιτήσεις είναι πολύ πιο σύνθετες. Οι κυριότερες υποκειμενικές παράμετροι είναι: η διαύγεια (clarity), η αντήχηση (reverberance), η αίσθηση περικύκλωσης από το ηχητικό πεδίο (envelopment), η οικειότητα ή εγγύτητα (intimacy) και η ηχηρότητα (loudness).

Για επιτευχθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων αυτών, θα πρέπει ο σχεδιασμός της αίθουσας να είναι τέτοιος ώστε να παρέχονται επαρκείς πρώιμες ανακλάσεις από τους πλαϊνούς τοίχους και την οροφή. Επίσης, η τιμή του EDT θα πρέπει να υπερβαίνει τα 1.8 s ώστε η αντήχηση να είναι ικανοποιητική. Για την παράμετρο της οικειότητας – εγγύτητας θα πρέπει η στάθμη ηχητικής πίεσης να ξεπερνά τα 0 dB.

Σημειώνουμε επίσης, ότι κατά το σχεδιασμό μιας αίθουσας συναυλιών είναι εξίσου σημαντικές οι καλές ακουστικές συνθήκες στην περιοχή της σκηνής. Οι μουσικοί θα πρέπει να λαμβάνουν ανακλάσεις από επιφάνειες γύρω από τη σκηνή ώστε να μπορούν να ακούν μεν οι ίδιοι τον εαυτό τους αλλά και ο ένας τον άλλον. Ωστόσο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις ανακλάσεις που προέρχονται από τον πίσω τοίχο της σκηνής, καθώς αυτές μειώνουν τη διαύγεια του ήχου στους ακροατές που βρίσκονται στις πρώτες σειρές.

Στις σχετικά μικρές αίθουσες συναυλιών ο χρόνος αντήχησης είναι ο πιο σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό της αίθουσας. Οι προτεινόμενες τιμές για το χρόνο αντήχησης κυμαίνονται μεταξύ 1.8 s και 2.2 s όσον αφορά συμφωνική μουσική, ενώ ακόμα μικρότερες τιμές του χρόνου αντήχησης είναι αποδεκτές για αίθουσες με όγκο μικρότερο από 10000 m³.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης μπορεί να επιτευχθεί απλά με την επιλογή του κατάλληλου όγκου της αίθουσας, ωστόσο στην περίπτωση των βέλτιστων τιμών που

αφορούν τις πρώιμες ανακλάσεις καθώς και τη συνολική ηχητική στάθμη τα πράγματα δεν είναι τόσο απλα.

Οι δύο παράγοντες που αφορούν την συνολική ηχητική στάθμη είναι οι πρώτες ανακλάσεις και η όψιμη ηχητική ενέργεια. Η όψιμη ηχητική ενέργεια συνήθως δε δημιουργεί προβλήματα με εξαίρεση την περίπτωση κατά την οποία οι ανακλαστικές επιφάνειες (από τις οποίες προέρχεται) είναι περιορισμένες. (λ.χ. στην περίπτωση μιας αίθουσας με σχήμα βεντάλιας, η όψιμη ηχητική ενέργεια προέρχεται κυρίως από ανακλάσεις στην οροφή). Συνήθως η όψιμη ηχητική ενέργεια απουσιάζει στις θέσεις κάτω από τον εξώστη όπου ελάχιστη ηχητική ενέργεια μπορεί να φτάσει από την οροφή ή τους πλαϊνούς τοίχους. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου συνιστάται το άνοιγμα προβόλου να είναι μεγαλύτερο από το βάθος του.

Στις μεγάλες αίθουσες συναυλιών οι πρώτες ανακλάσεις συνήθως δεν είναι επαρκείς. Παλαιότερα υπήρχε μια τάση για ενίσχυση αυτών από την οροφή ενώ στις μέρες μας συνηθίζεται οι πρώτες ανακλάσεις να προέρχονται κυρίως από τους πλαϊνούς τοίχους.

Ο καλός ακουστικός σχεδιασμός των αιθουσών συναυλιών γίνεται όλο και δυσκολότερος όσο η επιθυμητή χωρητικότητα μιας αίθουσας αυξάνεται καθότι θα πρέπει το πλάτος της αίθουσας να παραμείνει σε λογικό μέγεθος ώστε να υπάρχουν επαρκείς πρώτες ανακλάσεις, το μήκος της αίθουσας να μην υπερβεί τα 35 m, ο όγκος της αίθουσας να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να δίνει ικανοποιητικό χρόνο αντήχησης και το βάθος του προβόλου (εξώστη) να μην είναι πολύ μεγάλο.

6.2. Εφαρμογή στο Θέατρο Ριάλτο

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων , η ακουστική της αίθουσας του θεάτρου Ριάλτο κρίνεται σε γενικές γραμμές αρκετά καλή. Η αίθουσα πληροί τις προδιαγραφές - όσον αφορά τον χρόνο αντήχησης και την καταληπτότητα ομιλίας – για παραστάσεις που αφορούν ομιλία.

Το μόνο πρόβλημα που εντοπίστηκε είναι το φαινόμενο «της λανθάνουσας θέσης της πηγής» στη θέση N14. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή απορροφητικού υλικού στην πρόσοψη του εξώστη ώστε να περιοριστεί η εστίαση των ανακλάσεων στη συγκεκριμένη θέση.

Κατά συνέπεια η συγκεκριμένη αίθουσα δύναται να χρησιμοποιηθεί σαν αίθουσα πολλαπλών χρήσεων καθώς με τη χρήση ηχητικού συστήματος ενίσχυσης του ήχου οι συνθήκες ακρόασης μπορούν να βελτιωθούν. (λ.χ. θεατρικές παραστάσεις, διαλέξεις, κινηματογραφικές προβολές).

Ο όγκος της αίθουσας και κατεπέκτασιν ο χρόνος αντήχησης είναι μικρός σε σύγκριση με τις επιθυμητές τιμές για αίθουσες συναυλιών. Συνεπώς η συγκεκριμένη αίθουσα δεν είναι κατάλληλη για παραστάσεις συμφωνικής μουσικής

6.3. Προτάσεις Μελλοντικής Συνέχισης της Εργασίας

Για την περαιτέρω μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακουστικά μοντέλα υπό κλίμακα. Επίσης, και ειδικότερα για τη μελέτη των ανακλάσεων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και υπολογιστικά μοντέλα - λογισμικά ώστε να ελεγχθούν οι προτεινόμενες λύσεις στα ακουστικά προβλήματα που εντοπίστηκαν.

Κάποιες από τις μεθόδους μέτρησης του χρόνου αντήχησης είναι:

- Μέθοδος μηδενισμού της πηγής

Ένας χώρος διεγείρεται με έναν θόρυβο (ροζ ή λευκό) που μηδενίζεται ακαριαία. Ένας αναλυτής κι ένα ηχόμετρο καταγράφουν τη μείωση της ηχοστάθμης του ηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης RT. Εφόσον ο χρόνος αντήχησης είναι συνάρτηση της απορρόφησης του χώρου εκφράζεται σε όλες τις συχνότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι κεντρικές συχνότητες 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz.

- Παλμός (Impulse)

Ένας χώρος διεγείρεται με έναν παλμό (πιστόλι). Ένας αναλυτής κι ένα ηχόμετρο καταγράφουν τη μείωση της ηχοστάθμης του ηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης RT. Εφόσον ο χρόνος αντήχησης είναι συνάρτηση της απορρόφησης του χώρου εκφράζεται σε όλες τις συχνότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι κεντρικές συχνότητες 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz.

- Μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS)

Maximum Length Sequence

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε από τους Schroeder και Alrutz η μέθοδος εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται ακολουθία μέγιστου μήκους (Maximum Length Sequence). Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ελάχιστα ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος σήματος ως προς θόρυβο (S/N). Η

ακολουθία είναι στάσιμη και έχει περίοδο $L = 2n - 1$ (όπου n , θετικός ακέραιος αριθμός). Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή $+1$ ή -1 , αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac.

[18]

Μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS - Maximum Length Sequence) :

Η μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους Schroeder και Alrutz, για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους. Πρόκειται για μια μέθοδο εκπομπής ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ελάχιστα ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνεται υψηλός λόγος σήματος ως προς θόρυβο (S/N). Η ακολουθία αυτή είναι στάσιμη και έχει περίοδο:

$$l = 2^n - 1$$

όπου n θετικός ακέραιος

Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή $+1$ ή -1 , αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac.

Έστω s_k η ακολουθία με $n=3$

$$-1, +1, +1, -1, +1, -1, -1$$

Εξαιτίας της περιοδικότητας προφανώς ισχύει $s_{k+1} = s_k$. Η ακολουθία έχει τη γενική ιδιότητα:

$$\sum_{k=0}^{l-1} s_k = -1$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας s_k , δίδεται από τη σχέση:

$$R_{ss}(m) = \sum_{k=0}^{l-1} s_k s_{k+m}$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης έχει μέγιστα (1) στα σημεία $m=0, 1, 2, 3, \dots$ και

(-1) στα υπόλοιπα

Σε κάθε σύστημα είναι γνωστό ότι η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ εισόδου και εξόδου θα δίδεται από τη συνέλιξη (convolution) της κρουστικής απόκρισης του χώρου $[h(t)]$ με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της εισόδου.

$$R_{xy}(t) = h(t) * R_{xx}(t)$$

Εξαιτίας του ότι η ακολουθία αποτελείται από συναρτήσεις δέλτα (Dirac), η κρουστική απόκριση του δωματίου θα ισούται απλά με τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Ο υπολογισμός της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης γίνεται με ένα ταχύ μετασχηματισμό (Hadamart Transform), που απαιτεί $l \cdot \log_2(l)$ υπολογισμούς. Εφόσον ο θόρυβος του περιβάλλοντος είναι ασυσχέτιστος από τη μια μέτρηση στην άλλη, ο λόγος σήματος ως προς θόρυβο θα αυξάνει κατά 3 dB για κάθε διπλασιασμό του αριθμού των μετρήσεων της κρουστικής απόκρισης. Το κέρδος σε σχέση με ένα παλμό θα δίνεται από τη σχέση:

$$G = 3 \log_2(l) = 10 \log(l) \text{ dB} \quad [1]$$

Μέθοδος υπολογισμού STI και RASTI

Υπολογισμός STI :

Η μόνη μέτρηση καταληπτότητας ομιλίας που είναι αποδεκτή από την IEC standard (IEC 60268 Part 16, 1998) είναι ο δείκτης RASTI (Rapid Speech Transmission Index). Πρόκειται για μια απλούστευση του δείκτη STI, που υπολογίζει την επίδραση τόσο του θορύβου περιβάλλοντος όσο και του χρόνου αντήχησης στην καταληπτότητα ομιλίας. Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η μέτρηση είναι ότι για καλή καταληπτότητα ομιλίας, η «περιβάλλουσα» (envelope) του σήματος δεν πρέπει να το παραμορφώνει πολύ ανάμεσα στην πηγή και τον δέκτη. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιείται ένα σήμα (test signal) που διαμορφώνεται ημιτονικά ανάμεσα στις συχνότητες 0.4 - 20Hz (αντίστοιχα με την διαμόρφωση στην οποία βασίζεται η κανονική ομιλία). Ο θόρυβος στην πηγή είναι 100% διαμορφωμένος έτσι που για συχνότητα διαμόρφωσης 15Hz (συνήθως), υπάρχει ένα μικρό διάστημα σιγής (silence) κάθε 0.067 δευτερόλεπτα. Το βάθος διαμόρφωσης (επηρεάζεται από τον θόρυβο βάθους και την αντήχηση) του λαμβανόμενου σήματος μετρείται με μια κλίμακα άνω των 14 συχνοτήτων διαμόρφωσης (Modulating frequencies) σε 7 συχνότητες μεταφοράς (Carrier frequencies) που αντιστοιχούν στις κεντρικές συχνότητες των οκταβικών ομάδων από 125Hz μέχρι 8000Hz, δηλαδή συνολικά 98 ξεχωριστές μετρήσεις. Οι επτά μεμονωμένες τιμές του δείκτη μεταφοράς, σύμφωνα με τη συχνότητα, συνδυάζονται για να προκύψει η τιμή STI. Εάν αυτή η τιμή είναι μικρότερη από 0.3, η καταληπτότητα ομιλίας χαρακτηρίζεται κακή (bad). Εάν είναι μεγαλύτερη από 0.75, η καταληπτότητα ομιλίας χαρακτηρίζεται τέλεια (excellent).

Ο προσδιορισμός του δείκτη STI για ένα χώρο είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, έτσι χρησιμοποιείται μια καινούργια μέτρηση βασισμένη στη μέθοδο STI, και ονομάζεται RASTI (Rapid Transmission Index).

Υπολογισμός RASTI:

Ο δείκτης RASTI αφορά τη χρήση εννέα συχνοτήτων διαμόρφωσης με μετρήσεις στις συχνότητες των 500Hz και 2000Hz. Για την επεξεργασία των δεδομένων αποτελεσμάτων ακολουθούνται οι ίδιες διαδικασίες όπως και για τον υπολογισμό του STI, μόνο που στην περίπτωση του RASTI χρησιμοποιούνται λιγότερα δεδομένα.

Είναι σημαντικό να διασφαλίσουμε ότι η ηχητική στάθμη της πηγής που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση RASTI είναι παρόμοια με την αναμενόμενη στάθμη ομιλίας και του θορύβου βάθους από τις πηγές που βρίσκονται σε λειτουργία. Σε κάποιες εφαρμογές του RASTI είναι πιθανή η αριθμητική απομάκρυνση της συμβολής της συνιστώσας του θορύβου βάθους οπότε το αποτέλεσμα προκύπτει μόνο με τη συμβολή της αντήχησης. Είναι επίσης δυνατό να υπολογιστεί αριθμητικά η επιρροή διαφορετικών θορύβων βάθους, με την εισαγωγή συγκεκριμένων ηχητικών σταθμών στο υπολογιστικό πρόγραμμα.

[1]

Η ανάπτυξη της μεθόδου RASTI οφείλεται στους Hougast και Steeneken.

Κατά τη διαμόρφωση πλάτους ενός σήματος υψηλής συχνότητας, το πλάτος του μεταβάλλεται ανάλογα με τη στιγμιαία τιμή ενός άλλου σήματος χαμηλής συχνότητας. Εάν λ.χ. έχουμε το φέρον σήμα $u(t) = u_0 \sin \omega_0 t$ και το σήμα χαμηλής συχνότητας $v(t) = v_0 \sin \omega t$ όπου $\omega_0 \gg \omega$, το διαμορφωμένο σήμα που θα προκύψει θα διατηρήσει τη συχνότητα του $u(t)$ αλλά το πλάτος του θα μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητα του $v(t)$ και θα έχει τη γενική μορφή

$$c(t) = u_0(1 + m \cos \omega t) \cos \omega_0 t \quad \text{όπου } m = \frac{v_0}{u_0}$$

Η ποσότητα m ονομάζεται δείκτης διαμόρφωσης (Modulation index).

Σε ένα κλειστό χώρο η ιδανική ακρόαση αντιστοιχεί στην περίπτωση που η περιβάλλουσα της ομιλίας ενός ομιλητή είναι ακριβώς η ίδια με την περιβάλλουσα που αντιλαμβάνεται ο ακροατής. Εξαιτίας της παρουσίας του θορύβου βάθους αλλά και της αντήχησης κατά την ομιλία, ο δείκτης διαμόρφωσης είναι μειωμένος. Η μείωση της διαμόρφωσης εκφράζεται με τον παράγοντα μείωσης της διαμόρφωσης (modulation reduction factor) και εκφράζεται ως συνάρτηση της συχνότητας διαμόρφωσης οπότε ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης MTF (Modulation Transfer Index). Η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης δίδεται από τη σχέση:

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \frac{T}{13.8})^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + 10^{\frac{1}{10} N}}}$$

Όπου T ο EDT (early decay time)

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στο πεδίο αντήχησης ενώ ο δεύτερος στο θόρυβο βάθους.

Αν L_N ο θόρυβος βάθους και L_{S+N} ο συνιστάμενος θόρυβος, ο λόγος S/N υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{S}{N} = \frac{10^{\frac{L_{S+N}}{10}} - 10^{\frac{L_S}{10}}}{10^{\frac{L_N}{10}}}$$

και από τη σχέση αυτή προκύπτει ο φαινόμενος λόγος σήματος ως προς θόρυβο για κάθε συχνότητα διαμόρφωσης με βάση τον τύπο:

$$X_i = 10 \log \left(\frac{m_i}{1 - m_i} \right) \text{ όπου η ποσότητα } X_i \text{ αποκρίνεται ως εξής:}$$

Εάν $X_i > 15$ τότε $X_i = 15$

Εάν $X_i < -15$ τότε $X_i = -15$

Η μέση τιμή των υπολογισμένων λόγων X αποτελεί την τιμή του RASTI:

$$RASTI = \frac{\bar{X} + 15}{30}$$

Οι συχνότητες διαμόρφωσης είναι 9,4 στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα 500 και 5 στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα 2000Hz.

Σε χώρους διαλέξεων είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγάλη καταληπτότητα ομιλίας. Όταν σαν κριτήριο παίρνουμε την καταληπτότητα ομιλίας, θα πρέπει στο χώρο να υπάρχει πληρότητα θέσεων κατά 2/3 και ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια να είναι ίσος με 4, στη συχνότητα των 500 Hz. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος αντήχησης δίδεται από τη σχέση:

$$T = \frac{4VQ_s}{312L^2Q_m}$$

όπου V ο όγκος του χώρου

Q_s, Q_m οι παράγοντες κατευθυντικότητας πηγής (ηχείου) και μικροφώνου

L το μήκος του χώρου

Για τους υπόλοιπους χώρους οι ιδανικοί χρόνοι αντήχησης υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_{60} = A \log V + B$$

Όπου A, B σταθερές που αντιστοιχούν στη συχνότητα των 500 Hz και

που εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου

V ο όγκος του χώρου (m^3)

Πίνακας A-1. Τιμές για τις σταθερές A και B

Είδος χώρου	A	B
Καθολικοί Ναοί, Αίθουσες συναυλιών	0.40	0.22
Ορθόδοξες εκκλησίες, Όπερες	0.35	0.16
Κινηματογραφικές αίθουσες, Αίθουσες μουσικής (Music Halls)	0.22	0.11
Αίθουσες διαλέξεων, Στούντιο	0.20	0.11

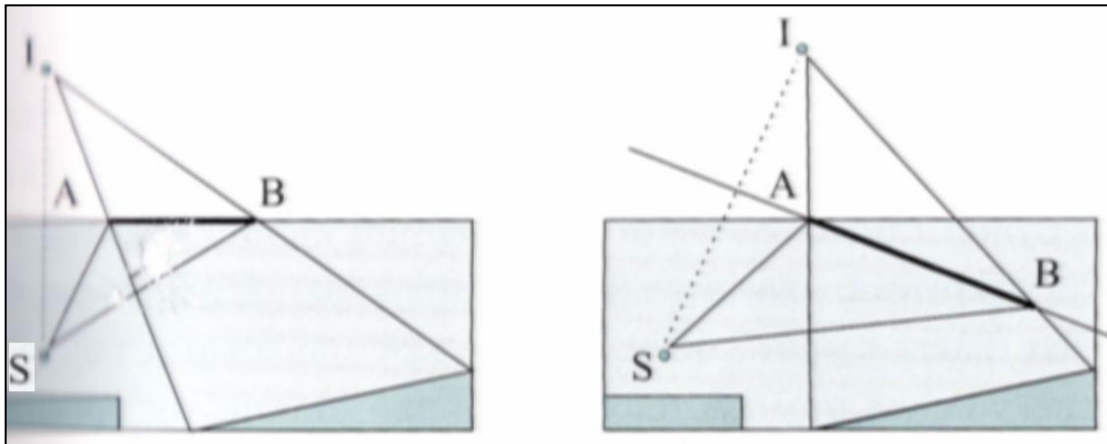
Υπολογιστικά μοντέλα

Image Source Method

Βασική θεωρία των ειδώλων

Πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την ακουστική μοντελοποίηση κλειστών είτε ανοικτών χώρων. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι απλή στη χρήση, το μεγαλύτερό της μειονέκτημα είναι η εκθετική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου σε αναλογία με την τάξη των ανακλάσεων και τον αριθμό των επιφανειών της αίθουσας. Επιπρόσθετα, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται περαιτέρω όταν η ακουστική μοντελοποίηση λαμβάνει χώρα για πολλαπλές πηγές ήχου. Στην πράξη η «μέθοδος ειδώλων πηγών» εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των πρώτων ανακλάσεων και οι υπόλοιπες ανακλάσεις υπολογίζονται με άλλες υπολογιστικά «ελαφρότερες» μεθόδους.

Για κάθε ανακλαστική επιφάνεια σχεδιάζουμε την εικόνα (I) της πηγής (S) που είναι συμμετρική με αυτήν έχοντας επίπεδο συμμετρίας την επιφάνεια. Στη συνέχεια από κάθε εικόνα φέρνουμε ευθείες προς την περιοχή που θέλουμε ενίσχυση του ήχου.

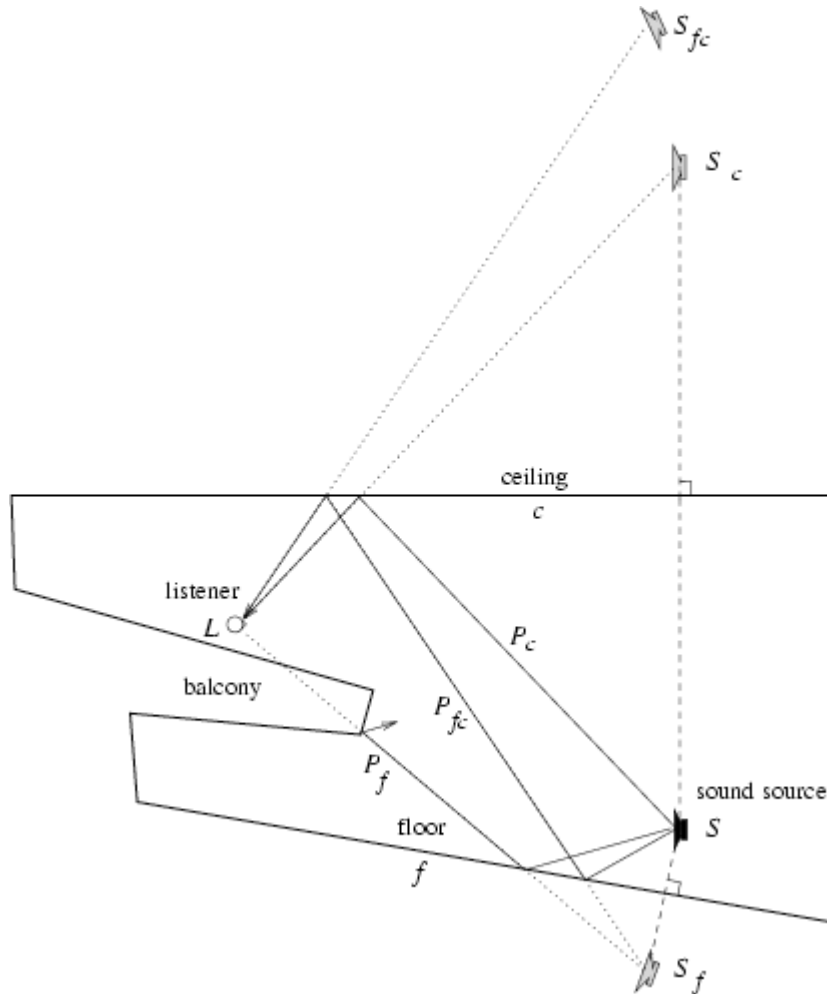


Σχήμα A-1. Θεωρία των ειδώλων

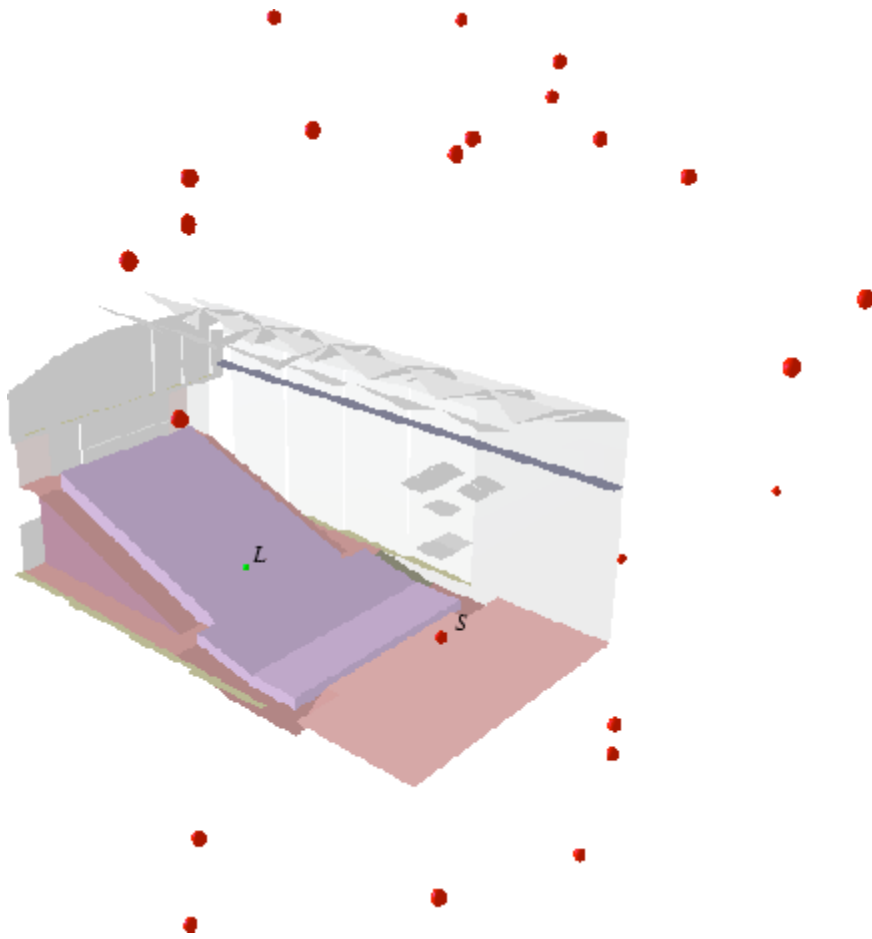
Η θεωρία των ειδώλων παράγει τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ δύο σημείων (πηγής, δέκτη) που βρίσκονται στο εσωτερικό του υπό μελέτη χώρου, θεωρώντας κάθε ανάκλαση του αρχικού ηχητικού σήματος που παράγεται από την πηγή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια εικονική πηγή- γεωμετρικό είδωλο της αρχικής. Με τον τρόπο αυτό η υπολογιζόμενη κρουστική απόκριση αποτελεί το άθροισμα κρουστικών αποκρίσεων με πλάτος και χρονική καθυστέρηση που εξαρτώνται από την απορρόφηση των τοιχωμάτων του χώρου, που εμπλέκονται σε κάθε διαδοχή ανακλάσεων, και τη

συνολική απόσταση ειδώλου-δέκτη αντίστοιχα. Βασική προϋπόθεση για τον παραπάνω υπολογισμό είναι ότι όλα τα είδωλα ενεργοποιούνται συγχρόνως με τη διέγερση της πηγής, δημιουργώντας το καθένα ένα σφαιρικό κύμα. Για λόγους απλοποίησης, φαινόμενα διάθλασης των ηχητικών ακτίνων αγνοούνται.

[22]



Σχήμα A-2. Στη μέθοδο image-source οι ηχητικές ανακλάσεις από τις οριακές επιφάνειες του χώρου παράγονται δημιουργώντας εικονικές πηγές (image sources), μία για κάθε επιφάνεια. Οι εικονικές πηγές S_c and S_{fc} αντιπροσωπεύουν την πρώτη (από το ταβάνι) και δεύτερη (δάπεδο – ταβάνι) που φθάνουν στον ακροατή. Παρατηρούμε ότι η απευθείας ανάκλαση από το δάπεδο σκιάζεται από το μπαλκόνι.



Σχήμα A-3. Οι υπολογιζόμενες εικονικές πηγές σε μια αίθουσα συναυλιών. Όλες οι ορατές πρώτες και δεύτερες «εικονικές πηγές» παρουσιάζονται στο σχήμα σαν σφαίρες. Η πηγή (source) και ο ακροατής σημειώνονται με S και L , αντίστοιχα.

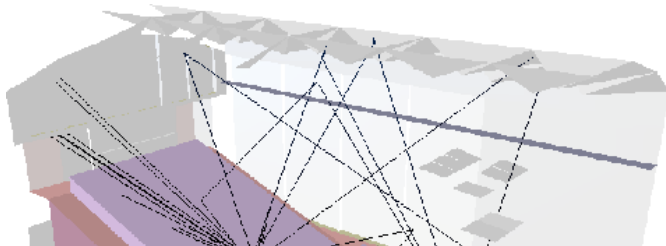
3.3 Το Ray-Tracing είναι η δεύτερη ευρέως γνωστή μέθοδος προσομοίωσης της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου. Έχουν αναπτυχθεί πολλές παραλλαγές της μεθόδου αν και η βασική ιδέα παραμένει η ίδια. Στον βασικό αλγόριθμο η ηχητική πηγή εκπέμπει ηχητικές ακτίνες, οι οποίες ανακλώνται στις επιφάνειες (κατοπτρική ανάκλαση) – σε κάθε ανάκλαση μειώνεται το πλάτος ανάλογα με τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης της επιφάνειας – έως ότου είτε απορροφηθούν είτε φθάσουν στον ακροατή.

Ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπονται οι ηχητικές ακτίνες μπορεί να είναι είτε προκαθορισμένος είτε τυχαίος. Ο τυπικός σκοπός είναι να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των ακτινών σε μια σφαιρική επιφάνεια. Με τη χρήση προκαθορισμένης κατανομής των ακτινών μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα με λιγότερες ακτίνες.

Σημειώνουμε ότι ο κανόνας που αφορά τις ανακλάσεις ως γνωστών αναφέρει ότι η γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης της ακτίνας.

Οι ακροατές συνήθως μοντελοποιούνται σαν ογκομετρικά αντικείμενα, όπως σφαίρες είτε κύβοι, είτε επίπεδα σχήματα. Θεωρητικά, ο ακροατής μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα όσο υπάρχουν αρκετές ακτίνες να διαπερνούν τον ακροατή και να επιτυγχάνουν στατιστικά έγκυρα αποτελέσματα. Πρακτικά μια σφαίρα είναι η ιδανική επιλογή για τις περισσότερες περιπτώσεις, καθότι παρέχει παντοκατευθυντικό πολικό διάγραμμα, και είναι εύκολο να εφαρμοστεί. [21]

Το πιο κάτω σχήμα απεικονίζει ένα μοντέλο μιας αίθουσας συναυλιών (Sigyn concert hall in Turku, Finland) με τον απευθείας (direct) ήχο και όλες τις πρώτες και δεύτερες ανακλάσεις που φθάνουν σε ένα συγκεκριμένο ακροατή, υπολογιζόμενες με τη μέθοδο των ηχητικών ακτινών. Το γεωμετρικό μοντέλο της αίθουσας περιέχει περίπου 300 πολύγωνα and 40,000 ακτίνες που εκπέμπονται ομοιόμορφα σφαιρικά.



Σχήμα A-4 .Ο απευθείας ήχος και οι πρώτες και οι δεύτερες ανακλάσεις που φθάνουν σε ένα συγκεκριμένο ακροατή στην αίθουσα συναυλιών Sigyn στην Φινλανδία υπολογιζόμενες με τη μέθοδο ray-tracing. Οι πηγή και ο ακροατής σημειώνονται με S και L , αντίστοιχα.

Η μελέτη της ακουστικής ενός χώρου πριν την κατασκευή του μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μοντέλων υπό κλίμακα. Πρόκειται για υπό κλίμακα μικρογραφίες του υποκατασκευή χώρου. Συνήθως οι κλίμακες αυτές είναι 1/10 έως 1/50.

Δύο σημαντικά προβλήματα που προκύπτουν από αυτή τη μέθοδο είναι:

1. Η κλιμάκωση της συχνότητας

Λόγω των φαινομένων της περίθλασης (αφού το μήκος κύματος του ήχου είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των αντικειμένων) θα πρέπει και στο μοντέλο να διατηρηθεί η ίδια αναλογία μήκους κύματος ως προς τις διαστάσεις των αντικειμένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων. Παρόλα αυτά η χρήση υπέρηχων (Ultrasonic wave method) έδωσε τη δυνατότητα μελέτης μοντέλων σε όλο το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων

2. Το δεύτερο πρόβλημα που προκύπτει από το πρώτο αφορά την απορρόφηση του ήχου από τον αέρα, που δεν είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας. Ο συντελεστής απορρόφησης του ήχου από τον αέρα (α) πρέπει να κλιμακωθεί ώστε να βρίσκεται στην κατάλληλη αναλογία. Η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα εξαρτάται από τη συχνότητα και από την παρουσία μορίων οξυγόνου καθώς και υγρασίας. Έτσι στα μοντέλα οι χώροι γεμίζονται με ξηρό αέρα ή άζωτο. Μελέτες έδειξαν ότι σε μοντέλα με κλίμακα 1/10 η χρήση ξηρού αέρα (με σχετική υγρασία 2-3%) δίνει καλά αποτελέσματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ & ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

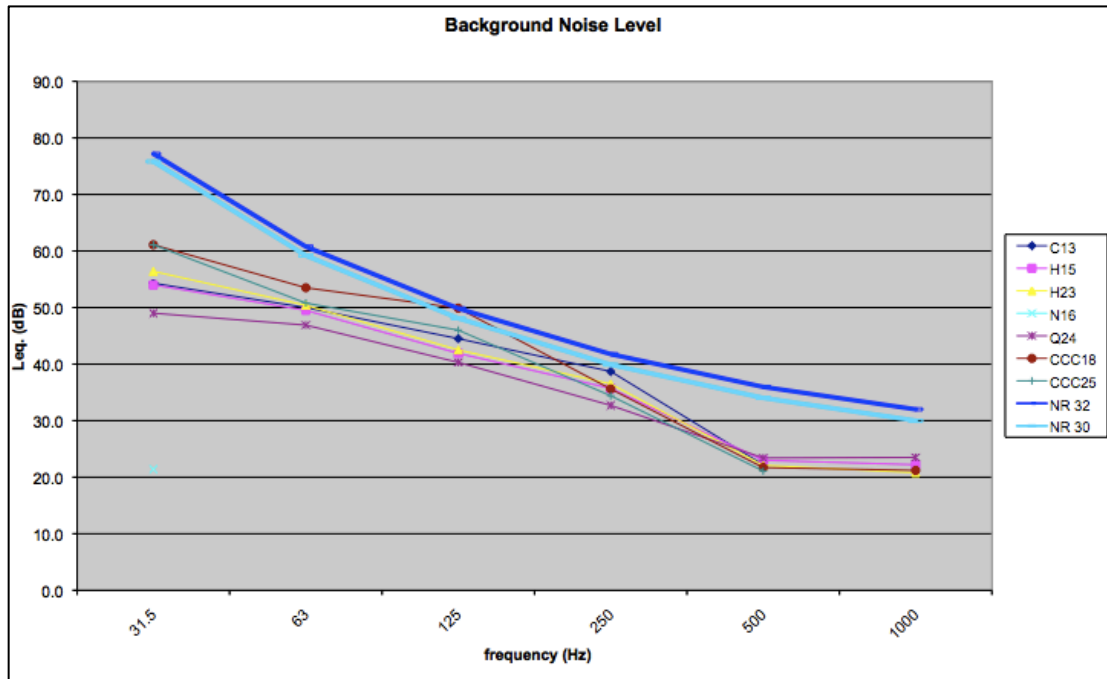
Οι πιο κάτω πίνακες και σχεδιαγράμματα αφορούν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα του θεάτρου Ριάλτο

Πίνακας Β- 1. Στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης, όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής

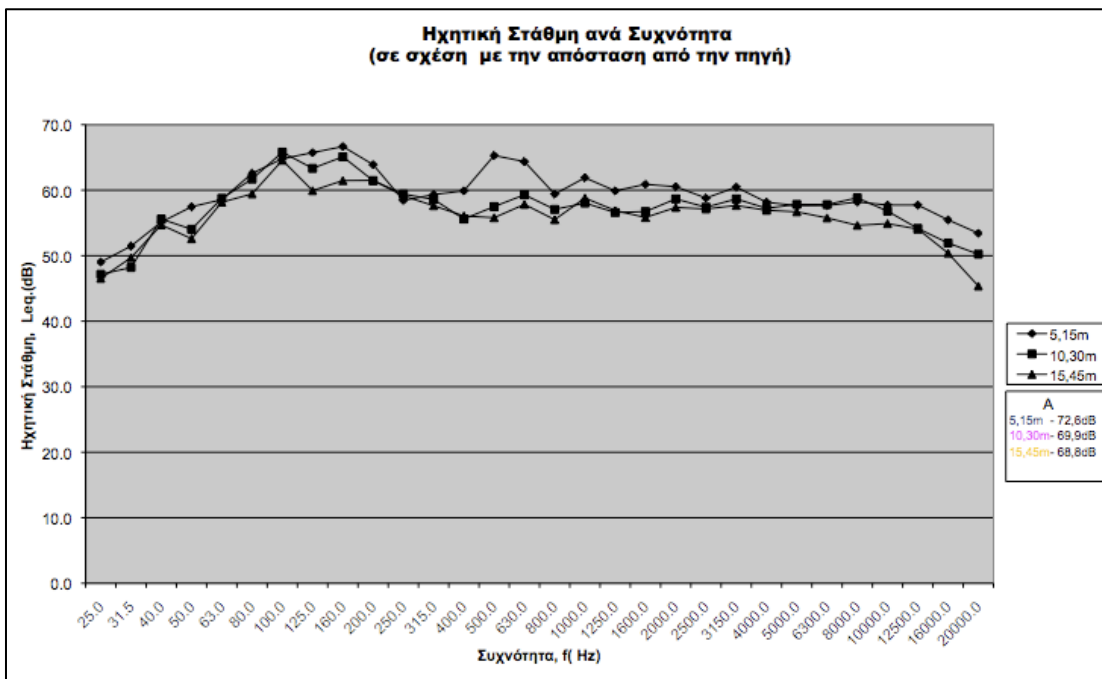
source position (C.)	mic. position		Sound Pressure Level (SPL) ----> Leq										
			31,5Hz	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KH z	2KH z	4KH z	8KH z	16KHz	A
seating area	1	B11	58.3	66.0	71.6	67.3	69.1	68.9	70.2	69.2	68.7	67.6	76.4
	2	B16	55.5	65.4	71.0	66.2	69.4	65.9	65.4	63.6	63.7	63.3	72.8
	3	B21	58.3	63.9	69.5	64.6	67.1	61.6	59.3	58.4	55.5	51.3	68.6
	4	H13	54.1	64.6	68.4	65.0	62.4	62.4	64.1	64.6	64.3	59.3	71.0
	5	H19	57.9	62.9	70.1	64.6	62.0	62.4	62.1	62.6	63.7	58.2	69.8
	6	H25	58.9	64.4	70.5	65.2	63.4	61.8	61.3	60.9	59.9	54.2	68.8
	7	N14	57.5	63.1	69.9	65.7	63.6	64.0	63.4	63.3	61.6	56.5	70.4
	8	N20	54.9	60.4	64.2	63.7	61.2	61.5	61.5	62.2	59.8	55.9	68.6
	9	N27	57.2	63.6	68.7	64.0	59.6	60.7	60.2	60.1	58.3	55.5	67.3
balcony	10	CCC 18	61.1	56.9	63.5	70.0	62.2	62.4	59.8	61.5	60.1	54.5	68.8
	11	CCC 25	61.9	59.7	64.3	65.6	60.4	60.1	58.4	59.2	59.3	55.0	66.8

Πίνακας Β-2. Στάθμη θορύβου βάθους σε κάθε θέση μέτρησης

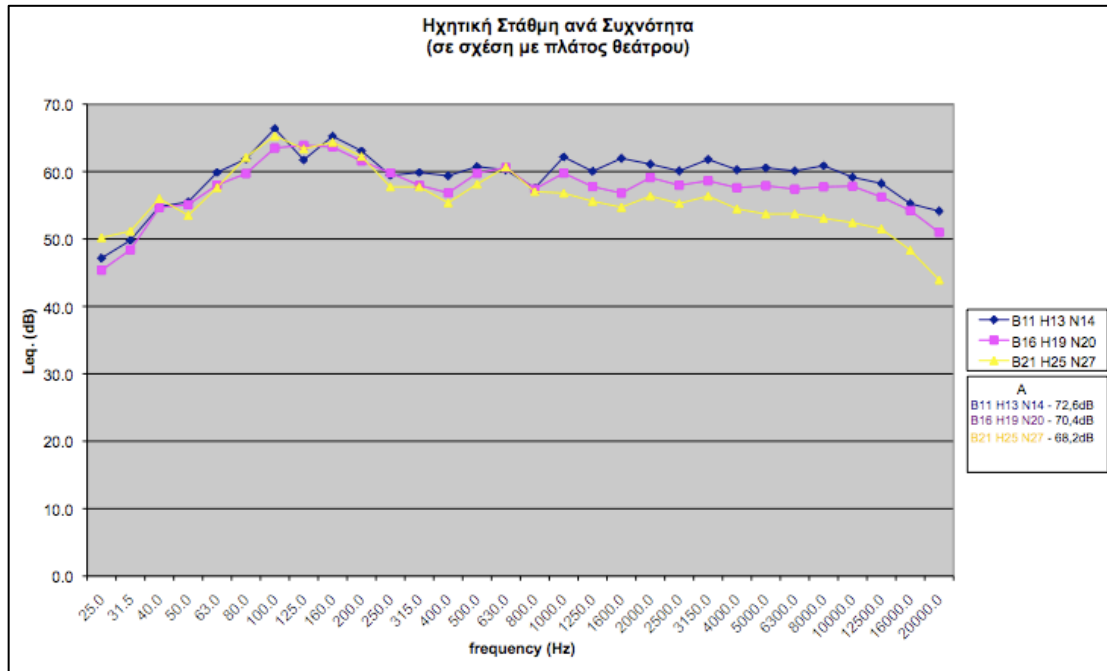
HV on / AC Off	mic. position		Background Noise Level (Leq, dB)													A	
			25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	500		1000
seating area	1	C13	47.0	47.7	52.1	46.3	45.8	43.3	43.4	32.6	36.7	36.1	34.5	27.1	-	-	32.7
				54.3			50.0			44.5			38.7		22.2	-	32.7
	2	H15	44.9	47.1	52.3	46.7	44.3	41.8	40.4	31.7	35.2	33.3	30.6	26.6	-	-	31.4
				54.0			49.5			41.9			35.7		23.0	22.2	31.4
	3	H23	49.1	48.2	54.6	48.5	44.2	41.6	40.8	33.4	35.6	34.7	30.4	27.0	-	-	31.9
				56.4			50.4			42.5			36.5		22.1	20.8	31.9
	4	N16	46.9	48.0	54.6	46.3	43.8	40.5	41.4	33.5	34.3	31.9	30.5	26.0	-	-	31.4
				56.0			48.9			42.7			34.8		21.9	21.4	31.4
	5	Q24	44.8	41.8	45.4	44.1	40.8	40.5	39.0	30.5	32.5	29.4	27.8	25.9	-	-	30.2
				49.0			46.9			40.3			32.7		23.4	23.5	30.2
balcony	6	CCC18	50.2	51.2	60.2	52.4	46.1	40.9	49.7	34.8	33.5	32.0	32.0	27.2	-	-	34.4
				61.1			53.5			49.9			35.6		21.7	21.2	34.4
	7	CCC25	48.9	49.3	60.6	47.9	44.3	45.2	45.3	35.3	34.3	32.1	28.8	26.2	-	-	32.7
			61.1			50.8			46.0			34.4		21.1	-	32.7	



Σχήμα Β-1. Θόρυβος βάθους ανά θέση μέτρησης. Με μπλε χρώμα σημειώνεται το κριτήριο NR32 ενώ με γαλάζιο χρώμα το κριτήριο NR30

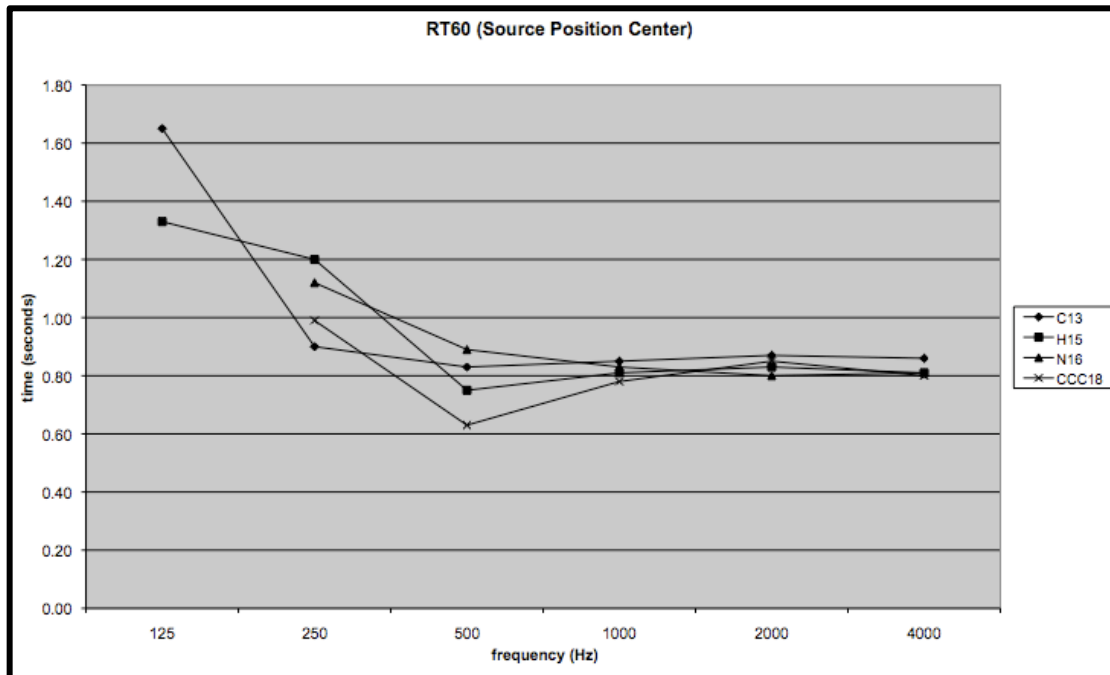


Σχήμα Β-2. Στάθμη ηχητικής πίεσης σε σχέση με την απόσταση από την πηγή



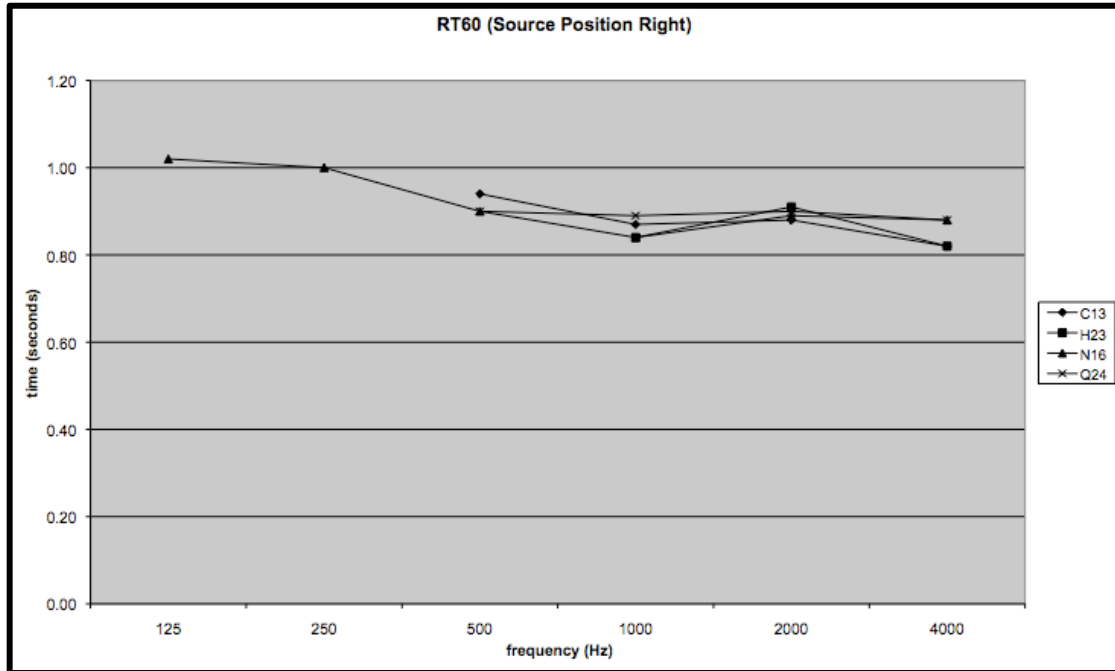
Σχήμα Β-3. Στάθμη ηχητικής πίεσης σε σχέση με το πλάτος του θεάτρου

α)

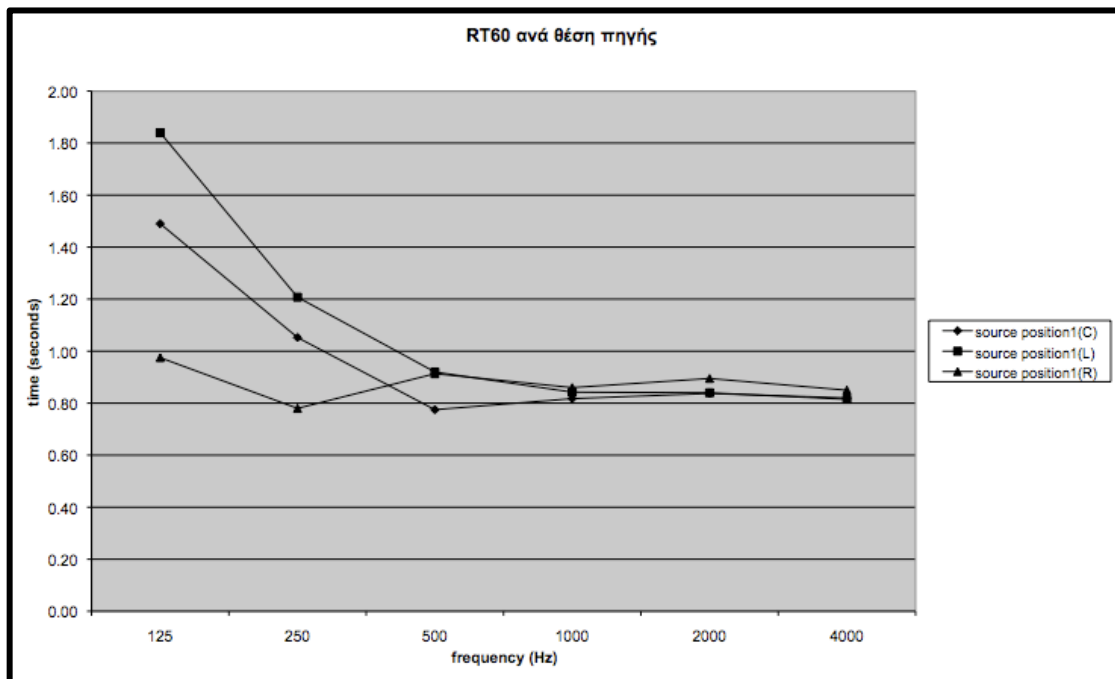
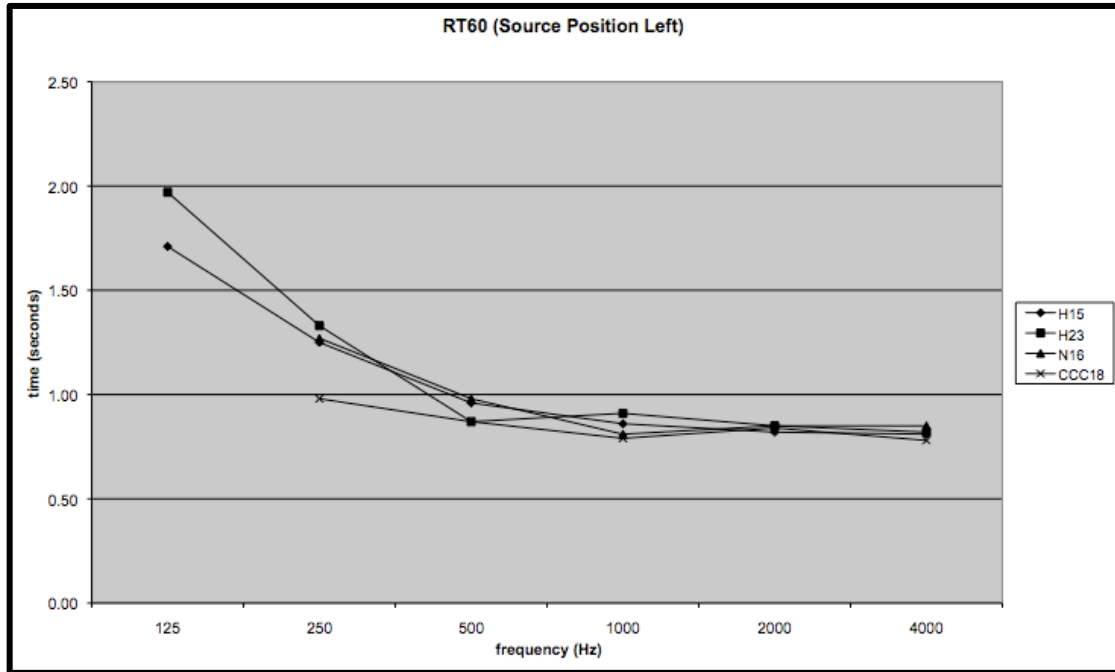


Σχήμα B-4. Χρόνος αντίληψης όταν η πηγή βρίσκεται στο α) κέντρο της σκηνής β) δεξιά, γ) αριστερά, (μέτρηση με τη μέθοδο MLS)

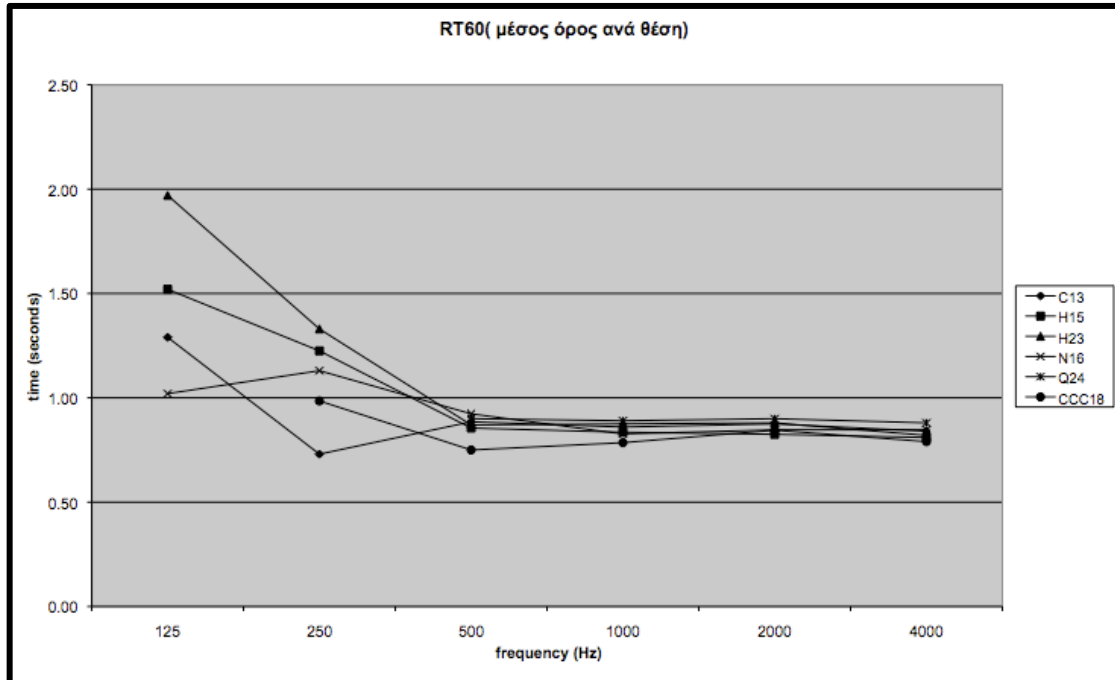
β)



γ)



Σχήμα Β-5. Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής

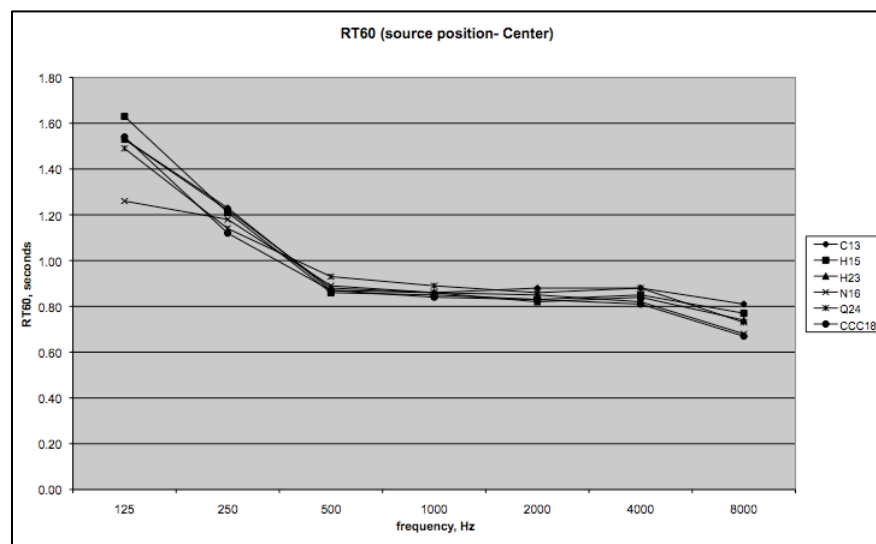


Σχήμα Β-6 . Μέσος χρόνος αντήχησης ανά θέση μέτρησης

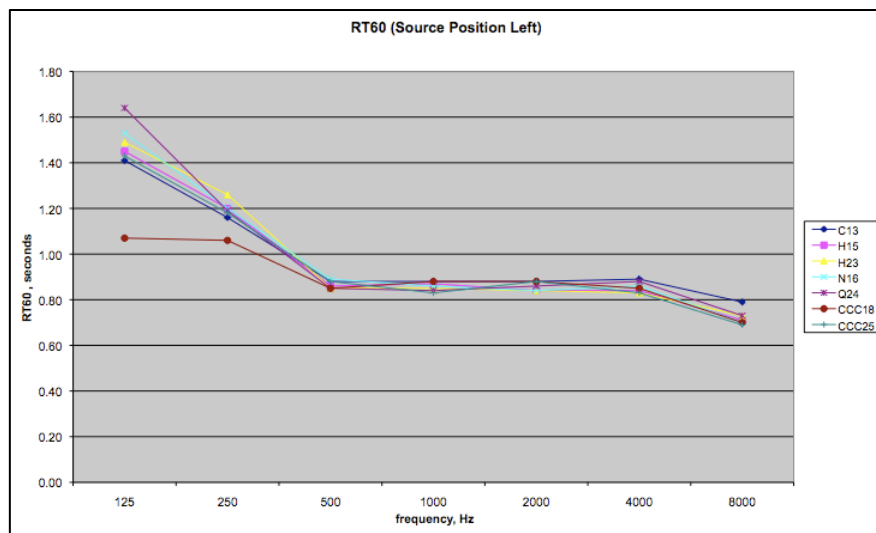
Πίνακας Β-3. Αποτελέσματα μετρήσεων του χρόνου αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης για τρεις θέσεις της πηγής, με τη μέθοδο MLS

source position(C)	mic. position		RT60 (s)					
			125	250	500	1000	2000	4000
seating area	1	C13	1.53	1.23	0.87	0.86	0.88	0.88
	2	H15	1.63	1.21	0.86	0.85	0.83	0.85
	3	H23	1.53	1.22	0.88	0.86	0.82	0.84
	4	N16	1.26	1.18	0.89	0.86	0.85	0.82
	5	Q24	1.49	1.14	0.93	0.89	0.86	0.88
balcony	6	CCC18	1.54	1.12	0.87	0.84	0.83	0.81
	μέσος όρος		1.50	1.18	0.88	0.86	0.85	0.85
source position(L)								
seating area	1	C13	1.41	1.16	0.88	0.88	0.88	0.89
	2	H15	1.45	1.20	0.86	0.87	0.84	0.84
	3	H23	1.49	1.26	0.85	0.85	0.84	0.83
	4	N16	1.53	1.20	0.89	0.86	0.84	0.86

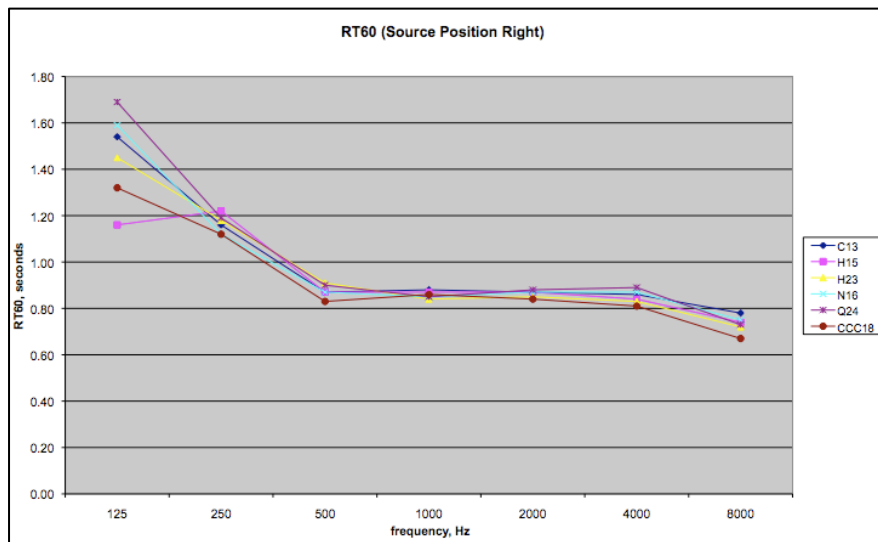
	5	Q24	1.64	1.19	0.85	0.84	0.86	0.88
balcony	6	CCC18	1.07	1.06	0.85	0.88	0.88	0.85
balcony	7	CCC25	1.43	1.18	0.88	0.83	0.88	0.83
	μέσος όρος		1.43	1.18	0.87	0.86	0.86	0.85
source position(R)								
seating area	1	C13	1.54	1.16	0.87	0.88	0.87	0.86
	2	H15	1.16	1.22	0.87	0.87	0.87	0.84
	3	H23	1.45	1.18	0.91	0.84	0.85	0.83
	4	N16	1.59	1.12	0.87	0.85	0.87	0.87
	5	Q24	1.69	1.19	0.90	0.85	0.88	0.89
balcony	6	CCC18	1.32	1.12	0.83	0.86	0.84	0.81
	μέσος όρος		1.46	1.17	0.88	0.86	0.86	0.85



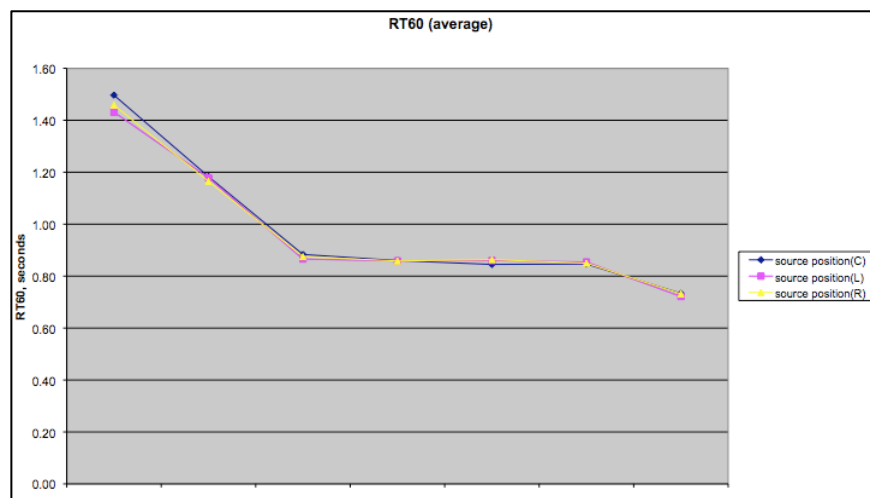
Σχήμα Β-7. Χρόνος αντήχησης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής



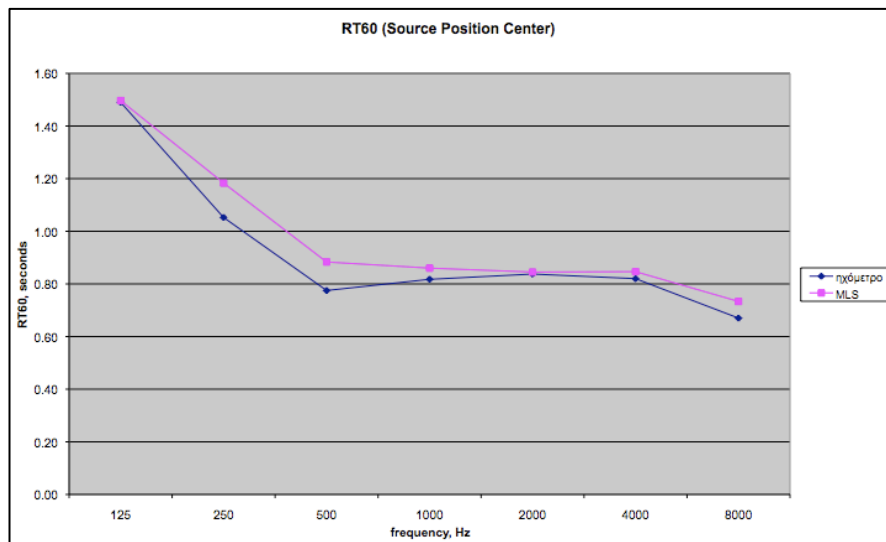
Σχήμα Β-8. Χρόνος αντίληψης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται αριστερά



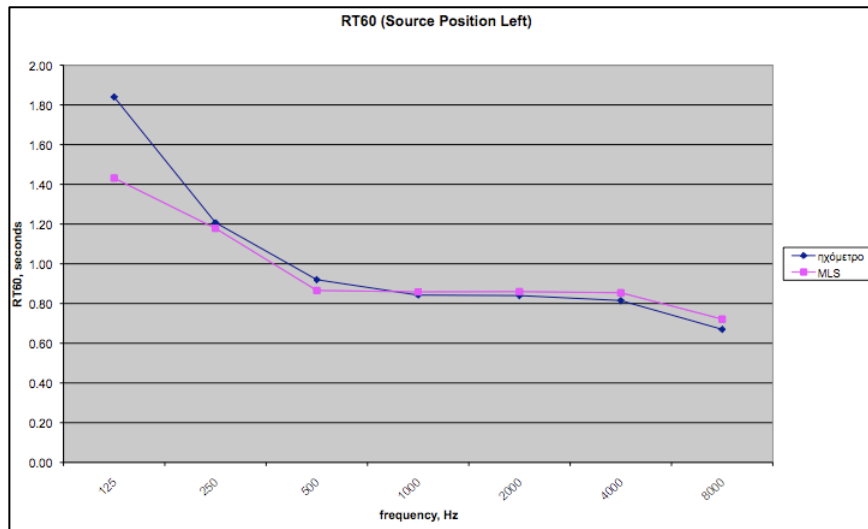
Σχήμα Β-9. Χρόνος αντίληψης σε κάθε θέση μέτρησης όταν η πηγή βρίσκεται δεξιά



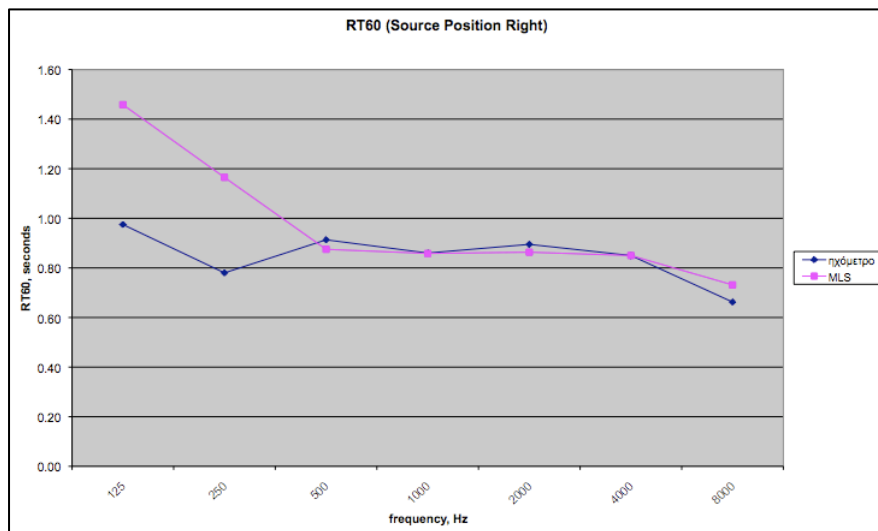
Σχήμα Β-10. Μέσος χρόνος αντήχησης για τις τρεις θέσεις της πηγής



Σχήμα Β-11 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής. Με ρόζ χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο MLS ενώ με μπλε χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής.



Σχήμα B-12 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται αριστερά. Με ρόζ χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο MLS ενώ με μπλε χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής.



Σχήμα B-13 . Σύγκριση μέσης τιμής χρόνου αντήχησης της αίθουσας (ανά συχνότητα) όταν η πηγή βρίσκεται δεξιά. Με ρόζ χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο MLS ενώ με μπλε χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής.

seat_H23									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	16.2	29.5	36.1	35.5	41.8	40.8	41.5	43.8	43.3
edr[dB]	26.5	37.1	46.1	47.5	53.2	52.3	53.5	57.0	54.4
EDT[s]	1.03	1.25	1.27	0.97	0.77	1.09	1.28	0.22	0.01
D50(%)	75	51	53	42	72	65	81	94	98
STI	0.68	Rating:	Good						
STIrMal	0.69	Rating:	Good						
STIrFem	0.70	Rating:	Good						
RASTI	0.62	Rating:	Good						
r[m]	15.4								
seat_N16									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.2	29.0	36.9	35.2	40.2	41.1	43.3	43.3	42.8
edr[dB]	26.0	39.3	47.5	46.4	51.7	52.8	55.2	57.1	92.2
EDT[s]	1.14	1.66	0.90	0.59	0.68	0.66	0.41	0.36	0.25
D50(%)	51	65	58	63	79	81	93	96	98
STI	0.74	Rating:	Good						
STIrMal	0.75	Rating:	Good						
STIrFem	0.76	Rating:	Good						
RASTI	0.72	Rating:	Good						
r[m]	20.8								
seat_Q24									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.7	34.1	36.4	32.3	37.9	36.9	38.7	40.2	41.6
edr[dB]	25.3	40.6	47.1	43.9	50.2	48.0	51.0	52.1	48.8
EDT[s]	1.35	1.24	0.86	0.83	0.65	0.85	0.31	0.20	0.07
D50(%)	67	44	54	69	80	79	92	96	99
STI	0.73	Rating:	Good						
STIrMal	0.74	Rating:	Good						
STIrFem	0.76	Rating:	Good						
RASTI	0.69	Rating:	Good						
r[m]	24.0								

β)

seat_C13Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	11.6	30.8	37.7	45.4	46.6	46.7	45.7	42.8	38.6
edr[dB]	22.7	37.7	47.0	56.2	59.3	60.2	58.0	55.8	51.8
EDT[s]	1.37	1.44	1.17	1.26	0.89	0.47	0.01	0.01	0.00
D50(%)	66	66	47	74	89	91	95	97	99

STI	0.79	Rating:	Good						
STIrMal	0.82	Rating:	Excellent						
STIrFem	0.84	Rating:	Excellent						
RASTI	0.77	Rating:	Good						
r[m]	12.4								
balcony_CCC18L									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	-2.7	8.8	29.9	37.2	32.2	31.3	30.1	29.4	27.5
edr[dB]		20.1	42.0	49.7	44.8	43.8	41.9	42.0	41.4
EDT[s]		1.48	0.74	0.56	0.69	0.77	0.76	0.45	0.31
D50(%)		28	39	32	44	41	51	75	84
STI	0.65	Rating:	Good						
STIrMal	0.67	Rating:	Good						
STIrFem	0.68	Rating:	Good						
RASTI	0.68	Rating:	Good						
r[m]	24.8								
balcony_CCC25Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	6.3	23.0	37.3	35.3	33.2	31.5	32.8	32.3	33.7
edr[dB]	18.7	33.1	48.6	47.5	45.9	43.3	44.7	44.6	47.3
EDT[s]	1.01	1.48	0.39	0.54	0.67	0.66	0.58	0.39	0.41
D50(%)	21	56	81	78	79	76	83	89	95
STI	0.71	Rating:	Good						
STIrMal	0.71	Rating:	Good						
STIrFem	0.72	Rating:	Good						
RASTI	0.71	Rating:	Good						
r[m]	26.9								

seat_H15Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.2	24.1	34.8	33.2	39.5	36.8	37.6	42.8	44.0
edr[dB]	27.7	33.4	44.7	46.3	52.5	48.0	49.3	56.5	53.3
EDT[s]	1.10	1.18	1.23	0.95	0.70	1.00	0.99	0.62	0.01
D50(%)	61	37	35	52	71	73	87	96	99
STI	0.68	Rating:	Good						
STIrMal	0.70	Rating:	Good						
STIrFem	0.72	Rating:	Good						
RASTI	0.64	Rating:	Good						

r[m]	17.1								
seat_H23Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	18.0	31.6	36.5	38.5	39.5	40.2	39.3	42.1	41.6
edr[dB]	23.6	38.7	44.6	49.8	52.1	52.5	51.6	54.4	52.9
EDT[s]	1.34	1.14	0.98	1.13	0.94	1.12	1.40	1.15	0.01
D50(%)	79	66	24	44	61	61	72	88	96
STI	0.65	Rating:	Good						
STIrMal	0.65	Rating:	Good						
STIrFem	0.66	Rating:	Good						
RASTI	0.60	Rating:	Good						
r[m]	15.3								
seat_N16Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.1	23.7	34.3	39.2	40.4	39.6	39.5	40.8	41.2
edr[dB]	23.8	32.6	42.9	50.8	53.0	51.2	51.8	53.8	48.3
EDT[s]	1.05	1.12	1.05	0.82	0.67	0.76	0.48	0.29	0.38
D50(%)	59	63	39	64	66	74	86	92	97
STI	0.69	Rating:	Good						
STIrMal	0.70	Rating:	Good						
STIrFem	0.71	Rating:	Good						
RASTI	0.68	Rating:	Good						
r[m]	21.5								
seat_Q24Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.8	21.0	32.4	29.8	34.1	32.2	33.6	35.5	36.4
edr[dB]	25.6	29.9	43.0	41.3	45.5	44.0	45.1	48.0	49.5
EDT[s]	1.01	1.16	0.95	0.94	0.67	0.72	0.65	0.49	0.77
D50(%)	75	23	16	35	53	50	76	80	93
STI	0.63	Rating:	Good						
STIrMal	0.63	Rating:	Good						
STIrFem	0.64	Rating:	Good						
RASTI	0.59	Rating:	Fair						
r[m]	25.0								

γ)

seat_C13Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.0	27.3	38.8	37.9	41.9	38.3	38.5	41.7	42.7
edr[dB]	21.3	34.9	48.4	47.0	55.0	49.7	50.3	55.2	52.3
EDT[s]	1.36	0.98	1.04	1.21	0.97	1.42	0.39	0.01	0.01
D50(%)	71	70	61	73	86	86	93	97	99
STI	0.77	Rating:	Good						
STIrMal	0.79	Rating:	Good						
STIrFem	0.81	Rating:	Excellent						
RASTI	0.74	Rating:	Good						

r[m]	13.3								
balcony_CCC18R									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	2.7	12.0	33.2	41.7	39.8	42.1	42.5	40.4	37.5
edr[dB]	13.8	22.0	44.7	52.3	51.9	54.6	54.9	53.9	50.3
EDT[s]	1.81	1.03	0.48	0.54	0.71	0.56	0.51	0.29	0.18
D50(%)	19	73	84	80	80	80	86	92	97
STI	0.76	Rating:	Good						
STIrMal	0.76	Rating:	Good						
STIrFem	0.77	Rating:	Good						
RASTI	0.74	Rating:	Good						
r[m]	27.9								
seat_H15Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.0	30.9	36.1	38.8	42.1	41.5	41.9	43.9	43.1
edr[dB]	25.4	37.2	46.9	49.6	54.2	53.2	54.0	57.0	51.9
EDT[s]	1.29	1.33	1.05	1.00	0.80	0.95	0.89	0.34	0.01
D50(%)	39	46	25	52	75	79	88	96	99
STI	0.70	Rating:	Good						
STIrMal	0.72	Rating:	Good						
STIrFem	0.74	Rating:	Good						
RASTI	0.66	Rating:	Good						
r[m]	17.6								

seat_H23Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.3	30.9	36.9	35.9	42.7	40.5	40.6	41.2	38.3
edr[dB]	21.3	38.5	46.2	46.7	54.7	52.7	53.0	53.8	51.3
EDT[s]	1.40	1.20	1.05	0.90	0.86	0.80	0.57	0.17	0.13
D50(%)	43	67	57	59	76	76	88	96	99
STI	0.73	Rating:	Good						
STIrMal	0.73	Rating:	Good						
STIrFem	0.75	Rating:	Good						
RASTI	0.68	Rating:	Good						
r[m]	19.3								
seat_N16Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.8	23.2	35.5	39.5	43.0	43.7	43.8	42.8	38.8
edr[dB]	25.9	30.4	44.7	51.5	55.3	55.5	56.4	55.7	51.5
EDT[s]	1.06	1.47	0.84	0.69	0.51	0.54	0.24	0.26	0.27
D50(%)	47	39	66	70	83	85	93	97	98
STI	0.74	Rating:	Good						
STIrMal	0.77	Rating:	Good						

STIrFem	0.78	Rating:	Good						
RASTI	0.74	Rating:	Good						
r[m]	21.7								
seat_Q24Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.5	19.1	31.2	34.2	36.5	36.3	38.9	39.3	36.1
edr[dB]	18.6	26.1	41.3	45.0	49.0	47.7	51.1	51.9	48.9
EDT[s]	2.20	1.41	1.13	0.91	0.58	0.67	0.23	0.17	0.16
D50(%)	39	29	58	62	82	84	93	96	98
STI	0.73	Rating:	Good						
STIrMal	0.75	Rating:	Good						
STIrFem	0.77	Rating:	Good						
RASTI	0.70	Rating:	Good						
r[m]	25.7								

Πίνακας Β-5 . Τιμές δεικτών σύμφωνα με το ISO 3382 όταν η πηγή βρίσκεται α) στο κέντρο της σκηνής β) αριστερά και γ) δεξιά

α)

balcony_CCC18C									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	-5.0	12.7	35.8	39.7	41.5	39.9	39.6	38.2	37.8
edr[dB]	13.4	21.9	47.9	51.1	53.5	51.7	51.2	50.8	50.7
EDT[s]	0.94	1.55	0.23	0.52	0.33	0.46	0.25	0.18	0.12
T30[s]	0.97	1.54	1.12	0.87	0.84	0.83	0.81	0.67	0.53
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.936	0.980	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.997	0.982
T20(s)	0.97	1.54	1.11	0.89	0.85	0.84	0.81	0.69	0.49
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.936	0.980	0.993	0.999	0.997	0.998	0.997	0.990	0.935
Tc[ms]	114	86	36	33	24	32	18	13	5
C80(dB)	-1.0	3.5	11.5	9.3	11.0	9.5	11.6	13.0	19.1
D50(%)	5	59	91	83	89	85	92	94	98
G[dB]	10.8	8.9	7.4	-0.2	-3.4	0.7	-5.2	-6.1	-7.2
r[m]	27.9								
seat_C13									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	16.4	31.5	34.2	40.7	44.7	45.2	46.8	47.4	45.9
edr[dB]	28.4	39.0	44.0	52.5	57.8	57.5	59.1	60.2	56.6
EDT[s]	1.22	1.19	1.34	1.48	0.85	0.40	0.01	0.01	0.01
T30[s]	1.16	1.53	1.23	0.87	0.86	0.88	0.88	0.81	0.82
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.997	0.996	0.996	0.998	0.998	0.993	0.986	0.977
T20(s)	1.18	1.68	1.11	0.88	0.89	0.94	1.08	1.05	0.51
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.995	0.996	0.988	0.996	0.993	0.988	0.980	0.815
Tc[ms]	68	62	71	29	15	13	6	3	1
C80(dB)	5.0	6.2	3.7	7.4	10.2	11.1	15.2	19.4	25.6

D50(%)	72	74	63	81	90	92	97	99	100
G[dB]	12.0	10.4	4.4	1.2	0.3	0.4	-0.2	-0.4	-0.5
r[m]	11.1								
seat_H15									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.5	25.6	35.0	34.3	43.3	43.9	44.7	44.7	42.8
edr[dB]		30.3	46.3	46.0	55.5	55.7	57.1	59.0	55.4
EDT[s]		1.58	1.30	0.87	0.79	0.91	0.58	0.01	0.01
T30[s]		1.63	1.21	0.86	0.85	0.83	0.85	0.77	0.68
corr		-	-	-	-	-	-	-	-
		0.997	0.997	0.998	0.999	0.999	0.999	0.998	0.994
T20(s)		1.56	1.16	0.93	0.81	0.82	0.92	0.81	0.59
corr		-	-	-	-	-	-	-	-
		0.997	0.996	0.997	0.999	0.998	0.998	0.996	0.964
Tc[ms]		90	103	67	35	32	13	4	2
C80(dB)		3.1	0.7	3.6	7.3	7.0	11.9	17.5	22.3
D50(%)		63	36	48	75	76	91	97	99
G[dB]		15.7	7.8	2.7	0.3	-0.4	-2.5	-3.0	-3.1
r[m]	15.1								

seat_H23									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	16.2	29.5	36.1	35.5	41.8	40.8	41.5	43.8	43.3
edr[dB]	26.5	37.1	46.1	47.5	53.2	52.3	53.5	57.0	54.4
EDT[s]	1.03	1.25	1.27	0.97	0.77	1.09	1.28	0.22	0.01
T30[s]	1.70	1.53	1.22	0.88	0.86	0.82	0.84	0.74	0.66
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.994	0.994	0.997	1000	0.999	0.998	0.995	0.994
T20(s)	1.72	1.36	1.05	0.82	0.84	0.81	0.87	0.85	0.72
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.990	0.998	0.996	1000	0.997	0.995	0.993	0.972
Tc[ms]	68	97	94	71	44	48	27	9	4
C80(dB)	6.8	1.0	1.2	1.6	6.7	4.7	7.3	13.4	19.3
D50(%)	75	51	53	42	72	65	81	94	98
G[dB]	20.2	18.3	10.3	3.2	3.2	1.1	-1.2	-2.3	-2.6
r[m]	15.4								
seat_N16									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.2	29.0	36.9	35.2	40.2	41.1	43.3	43.3	42.8
edr[dB]	26.0	39.3	47.5	46.4	51.7	52.8	55.2	57.1	92.2
EDT[s]	1.14	1.66	0.90	0.59	0.68	0.66	0.41	0.36	0.25
T30[s]	1.55	1.26	1.18	0.89	0.86	0.85	0.82	0.68	0.62
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.989	0.986	0.997	0.999	0.999	1000	0.997	0.992	0.985
T20(s)	1.58	1.48	1.25	0.89	0.87	0.86	0.80	0.66	0.48
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.990	0.992	0.995	0.995	0.999	0.999	0.991	0.971	0.959
Tc[ms]	96	94	73	54	38	33	14	11	5
C80(dB)	3.0	3.5	4.5	8.0	8.2	8.5	13.2	15.2	19.7

D50(%)	51	65	58	63	79	81	93	96	98
G[dB]	20.1	17.8	11.3	4.9	-0.7	-2.2	-4.6	-4.5	-5.3
r[m]	20.8								
seat_Q24									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.7	34.1	36.4	32.3	37.9	36.9	38.7	40.2	41.6
edr[dB]	25.3	40.6	47.1	43.9	50.2	48.0	51.0	52.1	48.8
EDT[s]	1.35	1.24	0.86	0.83	0.65	0.85	0.31	0.20	0.07
T30[s]	1.64	1.49	1.14	0.93	0.89	0.86	0.88	0.73	0.62
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.996	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.994	0.983
T20(s)	1.64	1.32	1.21	0.96	0.86	0.88	0.89	0.68	0.47
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.998	0.998	0.998	0.999	0.997	0.996	0.983	0.951
Tc[ms]	92	101	68	53	39	34	15	9	3
C80(dB)	3.6	1.6	5.5	5.8	7.8	7.7	12.4	15.7	21.9
D50(%)	67	44	54	69	80	79	92	96	99
G[dB]	24.6	23.5	10.8	2.8	-0.3	-3.7	-5.1	-5.7	-6.5
r[m]	24.0								

β)

seat_C13Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	11.6	30.8	37.7	45.4	46.6	46.7	45.7	42.8	38.6
edr[dB]	22.7	37.7	47.0	56.2	59.3	60.2	58.0	55.8	51.8
EDT[s]	1.37	1.44	1.17	1.26	0.89	0.47	0.01	0.01	0.00
T30[s]	1.28	1.41	1.16	0.88	0.88	0.88	0.89	0.79	0.75
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.995	0.997	0.998	0.997	0.995	0.992	0.986	0.985
T20(s)	1.28	1.32	1.06	0.92	0.94	0.94	1.04	1.09	0.95
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.989	0.996	0.996	0.994	0.983	0.973	0.978	0.971
Tc[ms]	75	67	84	37	18	15	8	4	2
C80(dB)	3.5	5.6	1.6	6.6	10.0	10.6	13.8	16.5	20.7
D50(%)	66	66	47	74	89	91	95	97	99
G[dB]	9.2	10.8	5.1	0.9	-0.6	-0.6	-1.2	-1.4	-1.5
r[m]	12.4								
balcony_CCC18L									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	-2.7	8.8	29.9	37.2	32.2	31.3	30.1	29.4	27.5
edr[dB]		20.1	42.0	49.7	44.8	43.8	41.9	42.0	41.4
EDT[s]		1.48	0.74	0.56	0.69	0.77	0.76	0.45	0.31
T30[s]		1.07	1.06	0.85	0.88	0.88	0.85	0.70	0.55
corr		-	-	-	-	-	-	-	-
		0.994	0.997	0.999	0.999	1000	0.999	0.999	0.998

T20(s)		1.07	1.09	0.82	0.91	0.89	0.82	0.69	0.57
corr		-	-	-	-	-	-	-	-
		0.994	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.995
Tc[ms]		128	73	62	67	72	64	48	41
C80(dB)		-1.3	4.6	7.1	5.4	4.4	5.3	8.7	11.9
D50(%)		28	39	32	44	41	51	75	84
G[dB]		18.5	11.0	8.8	10.6	8.2	5.3	5.3	7.5
r[m]	24.8								
balcony CCC25Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	6.3	23.0	37.3	35.3	33.2	31.5	32.8	32.3	33.7
edr[dB]	18.7	33.1	48.6	47.5	45.9	43.3	44.7	44.6	47.3
EDT[s]	1.01	1.48	0.39	0.54	0.67	0.66	0.58	0.39	0.41
T30[s]	0.39	1.43	1.18	0.88	0.83	0.88	0.83	0.69	0.50
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.993	0.993	0.997	0.999	0.999	1000	0.999	0.998	0.995
T20(s)	0.39	1.54	1.15	0.90	0.85	0.89	0.82	0.67	0.46
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.993	0.993	0.995	0.997	0.998	0.999	0.999	0.994	0.987
Tc[ms]	102	84	46	44	38	47	32	22	11
C80(dB)	-0.8	5.4	10.7	8.3	8.1	7.3	8.8	11.9	16.6
D50(%)	21	56	81	78	79	76	83	89	95
G[dB]	9.0	10.0	9.4	0.5	-2.1	2.5	-2.6	-4.0	-6.1
r[m]	26.9								

seat_H15Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.2	24.1	34.8	33.2	39.5	36.8	37.6	42.8	44.0
edr[dB]	27.7	33.4	44.7	46.3	52.5	48.0	49.3	56.5	53.3
EDT[s]	1.10	1.18	1.23	0.95	0.70	1.00	0.99	0.62	0.01
T30[s]	0.99	1.45	1.20	0.86	0.87	0.84	0.84	0.71	0.61
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.983	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999	0.998	0.998	0.988
T20(s)	1.06	1.41	1.15	0.91	0.85	0.84	0.90	0.71	0.51
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.989	0.998	0.995	0.999	0.998	0.998	0.996	0.991	0.963
Tc[ms]	82	105	102	65	41	39	21	8	3
C80(dB)	2.7	0.1	0.1	3.5	7.3	5.8	9.3	15.2	20.8
D50(%)	61	37	35	52	71	73	87	96	99
G[dB]	18.6	16.7	7.9	1.8	1.0	-0.9	-2.9	-3.6	-3.9
r[m]	17.1								
seat_H23Left									

F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	18.0	31.6	36.5	38.5	39.5	40.2	39.3	42.1	41.6
edr[dB]	23.6	38.7	44.6	49.8	52.1	52.5	51.6	54.4	52.9
EDT[s]	1.34	1.14	0.98	1.13	0.94	1.12	1.40	1.15	0.01
T30[s]	2.64	1.49	1.26	0.85	0.85	0.84	0.83	0.73	0.64
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.981	0.997	0.997	0.998	0.999	0.999	0.998	0.997	0.995
T20(s)	2.64	1.36	1.23	0.87	0.86	0.81	0.85	0.78	0.71
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.981	0.994	0.991	0.997	0.998	0.999	0.995	0.994	0.986
Tc[ms]	75	70	98	74	54	54	38	16	6
C80(dB)	5.5	4.6	0.3	1.6	4.7	3.2	5.3	10.6	15.4
D50(%)	79	66	24	44	61	61	72	88	96
G[dB]	14.1	14.1	10.4	2.0	2.3	2.1	-0.3	-1.7	-2.2
r[m]	15.3								
seat_N16Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.1	23.7	34.3	39.2	40.4	39.6	39.5	40.8	41.2
edr[dB]	23.8	32.6	42.9	50.8	53.0	51.2	51.8	53.8	48.3
EDT[s]	1.05	1.12	1.05	0.82	0.67	0.76	0.48	0.29	0.38
T30[s]	1.10	1.53	1.20	0.89	0.86	0.84	0.86	0.70	0.55
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.998	0.998	0.998	1000	0.999	0.999	0.999	0.987
T20(s)	1.10	1.55	1.15	0.84	0.88	0.86	0.90	0.69	0.45
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.996	0.995	0.996	0.998	0.999	0.998	0.999	0.997	0.973
Tc[ms]	79	79	93	60	49	40	24	20	8
C80(dB)	2.8	4.0	1.7	4.8	6.6	7.5	10.4	13.1	18.5
D50(%)	59	63	39	64	66	74	86	92	97
G[dB]	21.6	21.2	10.9	4.5	1.5	-1.1	-3.4	-2.9	-4.8
r[m]	21.5								

seat_Q24Left									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.8	21.0	32.4	29.8	34.1	32.2	33.6	35.5	36.4
edr[dB]	25.6	29.9	43.0	41.3	45.5	44.0	45.1	48.0	49.5
EDT[s]	1.01	1.16	0.95	0.94	0.67	0.72	0.65	0.49	0.77
T30[s]	1.58	1.64	1.19	0.85	0.84	0.86	0.88	0.73	0.56
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.997	0.998	0.998	0.999	-1000	0.999	0.999	-0.993
T20(s)	1.58	1.64	1.18	0.87	0.88	0.87	0.92	0.74	0.50
corr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.998	0.997	0.995	0.996	0.999	0.999	0.998	0.995	-0.986

Tc[ms]	67	110	99	77	58	58	37	31	13
C80(dB)	6.9	-0.2	1.8	3.1	6.3	6.1	8.3	10.9	15.5
D50(%)	75	23	16	35	53	50	76	80	93
G[dB]	19.2	17.4	11.4	2.5	2.3	0.1	-3.5	-3.1	-5.4
r[m]	25.0								

γ)

seat_C13Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.0	27.3	38.8	37.9	41.9	38.3	38.5	41.7	42.7
edr[dB]	21.3	34.9	48.4	47.0	55.0	49.7	50.3	55.2	52.3
EDT[s]	1.36	0.98	1.04	1.21	0.97	1.42	0.39	0.01	0.01
T30[s]	1.65	1.54	1.16	0.87	0.88	0.87	0.86	0.78	0.73
corr	-0.997	-0.994	-0.995	-0.998	-0.999	-0.997	-0.994	-0.988	-0.984
T20(s)	1.65	1.48	1.03	0.91	0.89	0.90	0.97	1.01	0.99
corr	-0.997	-0.994	-0.992	-0.997	-0.996	-0.992	-0.984	-0.978	-0.971
Tc[ms]	85	63	72	40	22	21	12	6	2
C80(dB)	2.7	5.0	3.2	5.3	9.3	8.6	11.6	15.3	20.0
G[dB]	9.5	9.9	6.5	0.4	-0.7	-0.7	-1.5	-1.9	-2.0
r[m]	13.3								
balcony_CCC18R									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	2.7	12.0	33.2	41.7	39.8	42.1	42.5	40.4	37.5
edr[dB]	13.8	22.0	44.7	52.3	51.9	54.6	54.9	53.9	50.3
EDT[s]	1.81	1.03	0.48	0.54	0.71	0.56	0.51	0.29	0.18
T30[s]	1.88	1.32	1.12	0.83	0.86	0.84	0.81	0.67	0.51
corr	-0.998	-0.980	-0.995	-0.998	-0.999	-0.999	-1000	-0.999	-0.995
T20(s)	1.88	1.32	1.11	0.78	0.86	0.84	0.80	0.67	0.48
corr	-0.998	-0.980	-0.989	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.996	-0.979
Tc[ms]	166	66	37	36	34	37	25	14	6
C80(dB)	-2.0	5.9	9.4	9.2	8.2	8.6	10.0	13.2	18.0
D50(%)	19	73	84	80	80	80	86	92	97
G[dB]	12.5	8.4	4.8	0.0	-3.3	0.9	-4.6	-6.6	-7.7
r[m]	27.9								
seat_H15Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	17.0	30.9	36.1	38.8	42.1	41.5	41.9	43.9	43.1
edr[dB]	25.4	37.2	46.9	49.6	54.2	53.2	54.0	57.0	51.9
EDT[s]	1.29	1.33	1.05	1.00	0.80	0.95	0.89	0.34	0.01
T30[s]	1.86	1.16	1.22	0.87	0.87	0.87	0.84	0.74	0.62
corr	-0.995	-0.996	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-0.998	-0.986
T20(s)	1.87	1.28	1.19	0.86	0.87	0.88	0.88	0.77	0.50
corr	-0.995	-0.998	-0.991	-0.997	-0.998	-0.998	-0.999	-0.995	-0.956
Tc[ms]	103	106	99	68	41	30	17	6	4
C80(dB)	3.4	0.3	-1.0	3.1	6.8	7.5	10.6	16.4	21.2
D50(%)	39	46	25	52	75	79	88	96	99

G[dB]	17.9	16.7	8.4	1.2	-0.0	-2.1	-3.5	-4.2	-4.3
r[m]	17.6								
seat_H23Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.3	30.9	36.9	35.9	42.7	40.5	40.6	41.2	38.3
edr[dB]	21.3	38.5	46.2	46.7	54.7	52.7	53.0	53.8	51.3
EDT[s]	1.40	1.20	1.05	0.90	0.86	0.80	0.57	0.17	0.13
T30[s]	1.43	1.45	1.18	0.91	0.84	0.85	0.83	0.72	0.57
corr	-								
corr	0.995	-0.997	-0.999	-0.998	-0.998	-0.999	-0.997	-0.994	-0.970
T20(s)	1.43	1.44	1.17	0.89	0.89	0.85	0.90	0.72	0.49
corr	-								
corr	0.995	-0.994	-0.997	-0.993	-0.998	-0.998	-0.994	-0.976	-0.901
Tc[ms]	112	74	73	57	39	36	24	9	5
C80(dB)	1.2	4.5	3.4	3.7	6.9	8.0	10.1	15.4	21.0
D50(%)	43	67	57	59	76	76	88	96	99
G[dB]	16.5	17.6	10.2	3.3	1.6	0.4	-1.7	-3.7	-4.1
r[m]	19.3								
seat_N16Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	14.8	23.2	35.5	39.5	43.0	43.7	43.8	42.8	38.8
edr[dB]	25.9	30.4	44.7	51.5	55.3	55.5	56.4	55.7	51.5
EDT[s]	1.06	1.47	0.84	0.69	0.51	0.54	0.24	0.26	0.27
T30[s]	1.40	1.59	1.12	0.87	0.85	0.87	0.87	0.75	0.59
corr	-								
corr	0.993	-0.998	-0.994	-0.999	-0.999	-0.999	-0.997	-0.993	-0.970
T20(s)	1.41	1.55	0.97	0.86	0.85	0.87	0.96	0.83	0.47
corr	-								
corr	0.993	-0.996	-0.993	-0.998	-0.999	-0.998	-0.992	-0.980	-0.909
Tc[ms]	88	110	67	52	37	29	19	15	10
C80(dB)	3.5	1.6	5.5	7.0	8.7	9.3	12.6	16.5	19.0
D50(%)	47	39	66	70	83	85	93	97	98
G[dB]	20.6	17.3	12.0	5.4	3.0	-1.9	-3.7	-3.3	-4.2
r[m]	21.7								

seat_Q24Right									
F[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
snr[dB]	12.5	19.1	31.2	34.2	36.5	36.3	38.9	39.3	36.1
edr[dB]	18.6	26.1	41.3	45.0	49.0	47.7	51.1	51.9	48.9
EDT[s]	2.20	1.41	1.13	0.91	0.58	0.67	0.23	0.17	0.16
T30[s]	2.14	1.69	1.19	0.90	0.85	0.88	0.89	0.73	0.56
corr	-								
corr	0.985	-0.995	-0.996	-0.998	-1000	-0.999	-0.997	-0.994	-0.988
T20(s)	2.14	1.62	1.16	0.92	0.86	0.92	0.95	0.73	0.51
corr	-								
corr	0.985	-0.996	-0.992	-0.995	-0.999	-0.999	-0.995	-0.978	-0.959
Tc[ms]	132	111	76	58	36	28	14	9	7
C80(dB)	2.9	1.7	3.5	5.0	8.4	8.9	12.7	15.2	17.6
D50(%)	39	29	58	62	82	84	93	96	98
G[dB]	21.1	18.9	9.6	2.3	-0.5	-3.9	-6.2	-6.4	-6.5

Κώδικας matlab (παλαμάκια)

```
[x,Fs,bits] = wavread('handclaps48.wav'); % Read unechoic recording (παλαμάκια σε  
ανηχοϊκό θάλαμο)
```

```
%[x, Fs, nbits] = wavread(filename) returns the sample rate (Fs) in Hertz and the  
number
```

```
%of bits per sample (nbits) used to encode the data in the file.
```

```
ir = wavread('seat_C13.wav'); % Read impulse response (κρουστική απόκριση  
στην υποφαινόμενη θέση)
```

```
% z = conv(y,ir); % θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την εντολή για συνέλιξη  
σε time domain
```

```
% αλλά απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς και η διαδικασία είναι χρονοβόρα
```

```
% έτσι χρησιμοποιούμε συνέλιξη σε frequency domain
```

```
% ο κώδικας που ακολουθεί αφορά συνέλιξη σε frequency domain
```

```
IR = fft([ir' zeros(1,length(x)-1)]); % Calculates Fourier transform of impulse response
```

```
X = fft([x' zeros(1,length(ir)-1)]); % Calculates Fourier transform of a signal x
```

```
y = real( ifft(IR.*X)); % Multiplication in frequency domain and inverse Fourier  
transform
```

```
diff = length(y) - length(x);
```

```

g = 0.15;          % gain του 'wet' σήματος

                  % Αν g = 0 ακούμε μόνο το dry σήμα x

                  % Αν g = 1 ακούμε μόνο το "convolved" - 'wet' σήμα y

out = (1-g)*[x;zeros(diff,1)] + g*y; % output signal

sound(out / max(out), Fs, bits); % plays back output signal

wavwrite(out,Fs,'test');      % αποθήκευση του παραγόμενου σήματος με το
υποφαινόμενο όνομα

% σημειώνουμε ότι τα αρχεία .wav που χρησιμοποιούνται έχουν ίδια συχνότητα
δειγματοληψίας

% Βιβλιογραφικές Αναφορές (References)
% Woldhek, A. 2005, anechoic/field-recording/hand-clap [online], Available
% from: www.freesound.org [Accessed: 30.8.2008].

%
% Zielinski, S. 2003, Audio Signal Processing - Matlab [online], Available from:
% www.surrey.ac.uk [Accessed: 21.7.2008].

```


Κώδικας matlab (τρομπέτα)

```
[x,Fs,bits] = wavread('Trumpet.wav'); % Read unechoic recording (ηχογράφηση  
τρομπέτας σε ανηχοϊκό θάλαμο)
```

```
%[x, Fs, nbits] = wavread(filename) returns the sample rate (Fs) in Hertz and the  
number
```

```
%of bits per sample (nbits) used to encode the data in the file.
```

```
ir = wavread('seat_Q24Left.wav'); % Read impulse response (κρουστική απόκριση  
στην υποφαινόμενη θέση)
```

```
% z = conv(y,ir);
```

```
% θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την εντολή για συνέλιξη σε time domain  
αλλά απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς και η διαδικασία είναι χρονοβόρα έτσι  
χρησιμοποιούμε συνέλιξη σε frequency domain
```

```
% ο κώδικας που ακολουθεί αφορά συνέλιξη σε frequency domain
```

```
IR = fft([ir' zeros(1,length(x)-1)]); % Calculates Fourier transform of impulse response
```

```

X = fft([x' zeros(1,length(ir)-1)]); % Calculates Fourier transform of a signal x

y = real( ifft(IR.*X)); % Multiplication in frequency domain and inverse Fourier
transform

diff = length(y) - length(x);

g = 0.15;          % gain του 'wet' σήματος

                    % Αν g = 0 ακούμε μόνο το dry σήμα x

                    % Αν g = 1 ακούμε μόνο το "convolved" - 'wet' σήμα y

out = (1-g)*[x;zeros(diff,1)] + g*y; % output signal

sound(out / max(out), Fs, bits); % plays back output signal

wavwrite(out,Fs,'seat_Q24Left_Tconv'); % αποθήκευση του παραγόμενου σήματος
με το υποφαινόμενο όνομα

% σημειώνουμε ότι τα αρχεία .wav που χρησιμοποιούνται έχουν ίδια συχνότητα
δειγματοληψίας

%
% Βιβλιογραφικές Αναφορές

% Acoustics Laboratory of the Technical University of Denmark,KEF %Electronics of
England, Bang and Olufsen of Denmark 1992, Music for %Archimedes, [CD], Bang &
Oluf.

```

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

Ηχείο – μόνιτορ MP415



Σχήμα Δ-1. Ηχείο MP415

Πίνακας Δ-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηχείου MP415

Specifications:

System Type:	15" 2-way bass reflex
Frequency Range (-10dB) ¹ :	44 Hz - 20 kHz
Frequency Response (+/-3 dB) ² :	57 Hz - 20 kHz
Sensitivity (1w/1m):	99 dB
Nominal Impedance:	8 Ohms
Maximum SPL ³ :	130 dB
Power Capacity ³ :	350W
Peak Power Capacity ³ :	1400W
Nominal Dispersion:	70° x 70°
Dimensions (in) ⁴ :	28.3 x 18.2 x 15.1
Dimensions (mm):	719 x 461 x 383
Net Weight (lbs):	59
Net Weight (kgs):	26.8
LF Driver:	1 x JBL 2033H
HF Driver:	1 x JBL 2406H
Input Connectors:	Neutrik® SpeakOn® NL-4 (x2), parallel
Enclosure Construction:	DuraFlex coated 18mm plywood. One piece SMC (sheet molding compound) baffle with integral horn and ports. Steel carrying handles (x2). 35 mm pole mount socket.

¹ Frequency Range and Response specifications based on half space (2 π) conditions

² Calculated based on Peak Power Capacity and Sensitivity

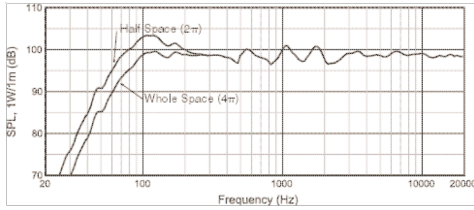
³ "Power Capacity" and "Peak Power Capacity" ratings are based on the average and peak power handling capacity of product samples subjected to a 100 hour power test of the system design using IEC filtered pink noise with a crest factor of 6 dB

⁴ Height dimension includes feet

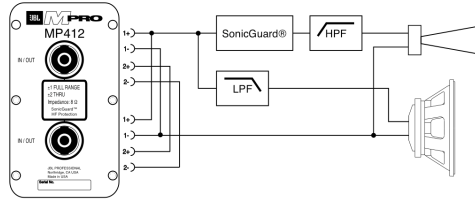
JBL continually engages in research related to product improvement. New materials, production methods and design refinements are introduced into existing products without notice as a routine expression of that philosophy. For this reason, any current JBL product may differ in some respect from its published description, but will always equal or exceed the original design specifications unless otherwise stated.

► MPro MP415 15 Inch Two-Way Speaker

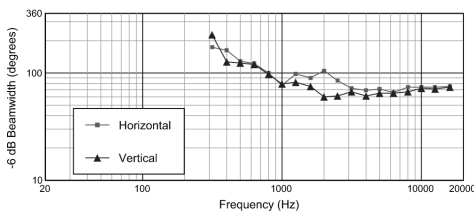
Frequency Response:



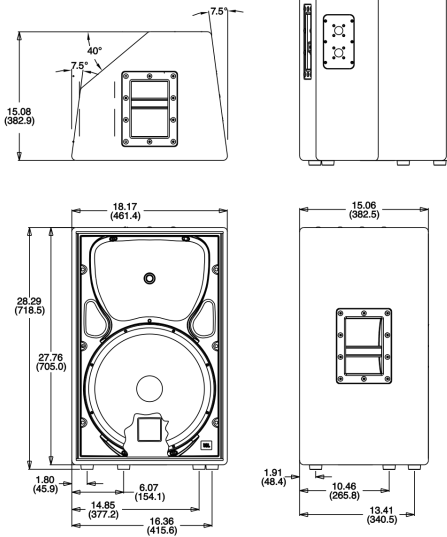
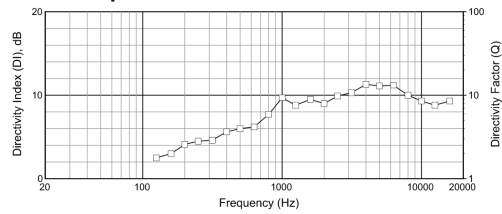
Block Diagram:



Beamwidth:



Directivity Index:



Σχήμα Δ-2. Ηχείο MP415 : Απόκριση συχνότητας, σχετικό εύρος, δείκτης κατευθυντικότητα

Μικρόφωνο AKG CK92



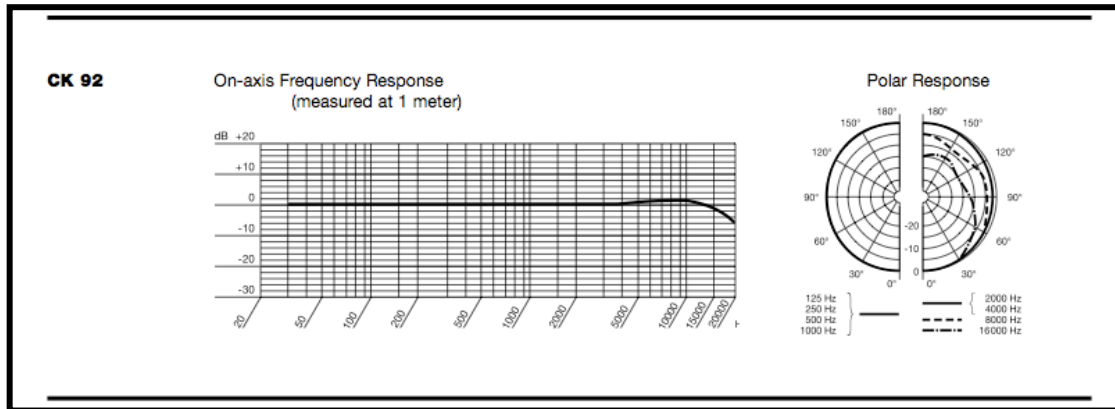
Σχήμα Δ-3. Μικρόφωνο AKG CK92

Πίνακας Δ-2. Τεχνικά χαρακτηριστικά μικρόφωνου AKG CK92

Specifications

Models:	C 391 B	CK 92	CK 93	CK 94	CK 97-0	CK 97-C	CK 97-CVR	CK 98
Transducer Principle:	All models prepolarized condenser capsules.							
Frequency Range	20-20,000 Hz	20-20,000 Hz	20-20,000 Hz	20-20,000 Hz	20-18,000 Hz	150-18,000 Hz	150-18,000 Hz	20-20,000 Hz
Polar Pattern:	Cardioid	Omnidirectional	Hypercardioid	Bidirectional	Omnidirectional	Cardioid	Cardioid	Directional
Sensitivity at 1,000 Hz:	10 mV/Pa (-40 dBV)	10 mV/Pa (-40 dBV)	10 mV/Pa (-40 dBV)	10 mV/Pa (-40 dBV)	10 mV/Pa (-40 dBV)	12 mV/Pa (-38 dBV)	12 mV/Pa (-38 dBV)	25 mV/Pa (-32 dBV)
Equivalent Noise Level:	17 dB-A	17 dB-A	17 dB-A	22 dB-A	24 dB-A	26 dB-A	26 dB-A	17 dB-A
SPL for 1% THD:	132 dB	132 dB	132 dB	132 dB	120 dB	120 dB	120 dB	124 dB
S/N Ratio (A-weighted):	77 dB	77 dB	77 dB	72 dB	70 dB	68 dB	68 dB	77 dB
Electr. Impedance:	< 200 ohms							
Load Impedance:	> 1,000 ohms							
Power Requirement:	9 to 52 Vdc phantom powering for SE300B							
Connector:	All models XLR male output when connected to SE300B							
Cable Length:	-	-	-	-	10 ft. (3 m)	10 ft. (3 m)	-	-
Finish:	All models dark gray matte finish.							
Size:	0.7 x 5.8 in. (19 x 47 mm)	0.7 x 2 in. (19 x 52 mm)	0.7 x 2 in. (19 x 52 mm)	0.7 x 2.3 in. (19 x 58 mm)	0.3 x 0.7 in. (7.5 x 17 mm)	0.4 x 1.0 in. (11 x 25 mm)	0.4 x 20 in. (11 x 500 mm)	0.4 x 10.2 in. (19 x 260 mm)
Net/Shipping Weight:	4.2 oz. (120 g) 16.6 oz. (470 g)	1.2 oz. (35 g) 6.0 oz. (170 g)	1.2 oz. (35 g) 6.0 oz. (170 g)	1.2 oz. (35 g) 6.0 oz. (170 g)	0.1 oz. (3 g) 6.7 oz. (190 g)	0.1 oz. (6 g) 6.7 oz. (190 g)	3.5 oz. (100 g) 13.1 oz. (317 g)	2.8 oz. (80 g) 13.8 oz. (390 g)

*With the 10-dB pad engaged, all SPL values for 1.0% THD can be raised 10 dB. Specifications measured with capsules attached to SE300B.



Σχήμα Δ-4. Συχνοτική απόκριση μικροφώνου AKG CK92

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΒΙΒΛΙΑ

- [1] Σκαρλάτος, Σ. 2003, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, 2η έκδοση, Φιλομάθεια, Πάτρα.
- [2] Τσινίκας, Ν. 2005, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, 2η έκδοση, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- [3] Barron, M. 1993, *Auditorium Acoustics And Architectural Design*, 1η, Taylor and Francis, Λονδίνο και Νέα Υόρκη.
- [4] Beranek, L. 1992, *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*, 2η, John Wiley & Sons, Η.Π.Α.
- [5] Bies, D. 2003, *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, 3η έκδοση, Spon Press, Αυστραλία.
- [6] Blasi, W. (μετάφραση: Κασσελούρη Βαρβάρα) 2000, *Δομική Φυσική : Θερμομόνωση- Ηχομόνωση - Πυροπροστασία*, 1η έκδοση, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Αθήνα.
- *(αρχικός τίτλος: Bauphysik
©1997: Verlag Europa Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co
5657 Haan – Gruiten –Germany)
- [7] Davis, G., Jones, R. 1990, *Sound System Engineering*, 2η έκδοση, Hal Leonard Corporation, Η.Π.Α..
- [8] Davis, D., Patronis, E. 2006, *Sound System Engineering*, 3η έκδοση, Focal Press, Η.Π.Α..

- [9] Egan, M. D. 1988, *Architectural Acoustics*, 2η έκδοση, McGraw-Hill, Νέα Υόρκη.
- [10] Fry, A. 1988, *Noise Control in Building Services*, 1η έκδοση, Pergamon Press, Οξφόρδη.
- [11] Kuttruff, H. 1999, *Room Acoustics*, 4η έκδοση, Spon Press, Λονδίνο.
- [12] Lord, P., Templeton, D. 1996, *Detailing For Acoustics*, 3η έκδοση, Spon Press, Λονδίνο.
- [13] Mechel, P. F. 2003, *Formulas of Acoustics*, 2η έκδοση, Springer, Βερολίνο.
- [14] Porges, G. 1987, *Applied Acoustics*, 1η, Los Altos, California.

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΩΝ

- [15] Ζαχαριουδάκης, Δ. 2004, *Σημειώσεις Φυσικής Ακουστικής*, 2η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- [16] Κουζούπης, Σ. 2006, *Μηχανική Ήχου II, Εργαστηριακές Ασκήσεις*, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- [17] Πασχαλίδου, Σ. 2006, *Μηχανική Ήχου I, Εργαστηριακό Φυλλάδιο*, 1η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- [18] Σηφάκης, Μ. 2004, *Μηχανική Ήχου I, Εργαστηριακές Ασκήσεις*, 2η έκδοση, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο.

ΕΡΓΑΣΙΕΣ PROJECTS

- [19] Ιωσηφίδου, Ε. 2005, *Εκπόνηση Μελέτης Ενίσχυσης Ήχου και Διερεύνηση της Μέγιστης Δυνατής Επιτεύξιμης Ενίσχυσης προ της Εμφάνισης Φαινομένων Ανάδρασης*, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης - Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής.

[20] Kaplanis, N., Woods, M. 2008, *Room Design*, presentation prj., University of Surrey - Institute of Sound Recording - Tonmeister Course.

[21] Savioja, L. 1994, *Modeling Techniques For Virtual Acoustics*, Doctorate Thesis, Helsinki University of Technology.

ΑΡΘΡΑ

[22] Φλώρος, Α., Τάτλας, Ν., Δαμαλού, Κ. 2002, *Μελέτη και Ανάπτυξη Λογισμικού για την Εξομοίωση Κλειστού Χώρου* [online], *Ακουστική 2002*, σελ. 162-169, Available from: <http://www.wcl.ee.upatras.gr/audiogroup/Publications/Full%20Papers/AcP030.pdf> [Accessed: 26.9.2008].

[23] Barron, M., Lee, L. J. 1988, *Energy relations in concert auditoriums. I* [online], *J.A.S.A.*, σελ. 618-628, Available from: <http://scitation.aip.org/JASA> [Accessed: 04.09.2007].

[24] Barron, M. 2005, *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results* [online], *Acoustical Science and Technology*, σελ. 162-169, Available from: <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ast/-char/en> [Accessed: (09.10.2007)].

[25] Chiles, S., Barron, M. 2004, *Sound level distribution and scatter in proportionate spaces* [online], *J.A.S.A.*, σελ. 1585-1595, Available from: <http://scitation.aip.org/JASA> [Accessed: (29.20.2007)].

[26] Davies, W. J., Lam, Y. W., Orłowski, R. J. 1993, *Comment on "Predicting theater chair absorption from reverberation chamber measurements"* [online], *J.A.S.A.*, σελ. 2238-2240, Available from: <http://scitation.aip.org/JASA> [Accessed: 04.09.2007].

[27] Jimenez Dianderas, C. 1992, *Acoustical Evaluation of the Municipal Theatre of Lima, Peru* [online], *Applied Acoustics*, σελ. 153-156, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0003682X> [Accessed: (20.04.2007)].

[28] Lannie, M. 1993, *Acoustics of Gonzago Theatre in the Palace and Park Museum of Archangelskoje* [online], Applied Acoustics, σελ. 347-353, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0003682X> [Accessed: (20.04.2007)].

[29] Lau Nijs, Diemer de Vries 2005, *The young architect's guide to room acoustics* [online], Acoustical Science and Technology, σελ. 229-232, Available from: <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ast/-char/en> [Accessed: 20.4.2007].

[30] Meesawat, K., Hammershoi, D. 2002, 'An investigation on the transition from early reflections to a reverberation tail in a brir', *2002 International Conference on Auditory Display*, Ιούλιος 2-5, 2002, ICAD, Ιαπωνία.

[31] Ozis, F. Ozgur, E. 2004, '3D modelling and Acoustic Simulation of Large Rooms', *1st International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering"*, Σεπτέμβριος 8-10,2004, IC-SCCE, Αθήνα.

[32] Pulkki, V., Lokki, T. 2004, 'Visualizing diffraction for educational purposes', *ICA 18th*, Απρίλιος 4-9, 2004, International Congress on Acoustic, Κιότο, σελ. 2313-2326.

[33] Schroeder, M. R. 1965, *New Method of Measuring Reverberation Time* [online], J.A.S.A., σελ. 409-412, Available from: <http://scitation.aip.org/JASA> [Accessed: 20.05.2007]

[34] Schroeder, M. R. 1979, *Integrated- impulse method measuring sound decay without using impulses* [online], J.A.S.A., σελ. 497-500, Available from: <http://scitation.aip.org/JASA> [Accessed: 20.05.2007].

[35] Wen, Y. C. J., Naylor A. P 2006, 'An Evaluation measure for Reverberant Speech Using Decay Tail Modelling', *Proc. European Signal Process. Conference*, (n.d.), E.S.P., Λονδίνο. Available from:

<http://www.eurasip.org/Proceedings/Eusipco/Eusipco2006/papers/1568981776.pdf>
[Accessed: 26.08.2007]

[36] Xiang Duanqi, Wang Zheng, Chen Jinjing , Ge Yangang 1992, *Acoustics of Gonzago Theatre in the Palace and Park Museum of Archangelskoje* [online], Applied Acoustics, σελ. 15-30, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0003682X> [Accessed: (20.04.2007)].

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ

[37] Bradley, J. S. *Acoustical Design of Rooms for speech* [online], Construction Technology Update, no 51, Available from: http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ctus/51_e.html
[Accessed: 20.08.2007].

CD

[38] Acoustics Laboratory of the Technical University of Denmark, KEF Electronics of England, Bang and Olufsen of Denmark 1992, Music for Archimedes, [CD], Bang & Oluf.

MANUALS

[39] 2002, *CATT-Acoustic V 8.0, User's Manual*.

[40] 2002, Dirac 2.6 , *User's Manual -Measuring Impulse Responses Using Dirac (Technical Note)* Available from: <http://www.acoustics-engineering.com> [Accessed: 03.08.2007].

