



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΔΔΠΜΣ Προηγμένα συστήματα υπολογιστών και επικοινωνιών
Τεχνολογίες του ήχου και της εικόνας στην παραγωγή και την
εκπαίδευση

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Ιπποκράτης Κοχλιαρίδης

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Καλλίρης

2019

Ευχαριστήρια

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καλλίρη για την αμέριστη συμπαράστασή του. Επίσης τον καθηγητή κ. Χαράλαμπο Δημούλα και τον κ. Ρήγα Κοτσάκη.

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική συνοψίζει μια έρευνα, πάνω στα ηχο-συστήματα ανακοινώσεων για σήραγγες. Συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή αφορά την επιλογή, ενός κατάλληλου ηχο-συστήματος για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί, το οποίο να εξασφαλίζει ότι όσο το δυνατόν περισσότεροι ακροατές θα λαμβάνουν βέλτιστο ήχο. Έτσι σε περίπτωση ενός ατυχήματος να αντιληφθούν την ειδοποίηση και να εγκαταλείψουν με ασφάλεια το τούνελ.

Δύο ενδεικτικές διατάξεις συστημάτων, προτείνονται για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί: Η 1^η αφορά διαδοχικές χοάνες ανά διαστήματα 50 m, ίδιας κατεύθυνσης, ενώ η 2^η αφορά: διαδοχικές χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, ανά διαστήματα 100 m. Για τη κάθε διάταξη, μελετήθηκαν παραλλαγές περιπτώσεων μέσω υπολογισμών στο χαρτί. Από τη κάθε διάταξη επιλέχθηκε η καλύτερη περίπτωση, με κριτήριο όλοι οι ακροατές να λαμβάνουν ομαλή ακουστική στάθμη. Κατόπιν έγινε εξομοίωση στο CATT Acoustic και μελέτη διάφορων ακουστικών παραμέτρων (STI, U₅₀, D₅₀ κτλ.), ώστε να εξακριβωθεί ποιες από τις δύο περιπτώσεις αποδίδει τον καλύτερο ήχο, για όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις ακρόασης. Τα αρχικά κεφάλαια αναφέρουν γενικές έννοιες πάνω στα ηχο-συστήματα σήραγγας και κάποιες μελέτες περίπτωσης για τούνελ. Επίσης αναφέρονται έννοιες πάνω στο CATT Acoustic, όπως τα είδη ακουστικών παραμέτρων, που μπορεί να εκτελέσει η εξομοίωση. Επιπλέον παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έγιναν στο χαρτί και οι εξομοιώσεις σε κάθε βήμα.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής	1
1.2 Ποιο είναι το νόημα ηχο-συστημάτων στις σήραγγες;	2
1.3 Η λειτουργία αυτών των ηχο-συστημάτων	3
1.4 Τοπογραφία ηχο-συστημάτων για σήραγγες	4
1.5 Κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού, το παράδειγμα Μαλιακός-Κλειδί	6
1.6 Χοάνες που χρησιμοποιούνται	8
1.6.1 Ασυμμετρικές	8
1.6.2 Συμβατικές	12

2. Ανάλυση συστήματος

2.1 Ακουστικές συνθήκες	15
2.1.1 Σενάριο λειτουργίας του ηχο-συστήματος	15
2.1.2 Ανακλάσεις και Αντήχηση	15
2.1.3 Θόρυβοι φόντου	16
2.2 Προσδιορισμός της αντήχησης σε σήραγγες	17
2.3 Κριτήρια αντήχησης	18
2.4 Ευθυγράμμιση χρόνων (delay)	19
2.5 Πιστότητα των ακουστικών πηγών	20
2.6 Βελτίωση του STI	23
2.7 Κατανεμημένα συστήματα	23

3. Σχεδίαση με βοήθεια προγράμματος

3.1 Εισαγωγή στο CATT Acoustic	29
3.1.1 Δημιουργώντας το μοντέλο του ηχο-συστήματος	30
3.2 Είδη ακουστικών υπολογισμών του προγράμματος CATT Acoustic	37
3.2.1 Υπολογισμός U-50	37
3.2.2 Προσδιορισμός ποιότητας μετάδοσης ομιλίας (STI)	38
3.2.2.1 Εισαγωγή	38
3.2.2.2 Προσδιορισμός του STI στο CATT Acoustic	40
3.2.3 Υπολογισμός LF	43
3.2.4 Υπολογισμός DL2 και DLf	44
3.2.4.1 Εισαγωγή	44
3.2.4.2 Χωρική απόσβεση της στάθμης ακουστικής πίεσης	45
3.2.4.3 Υπολογισμός DL2 στο CATT Acoustic	47
3.2.4.4 Υπολογισμός DLf στο CATT Acoustic	48
3.2.5 Ηχογράφημα (echograms)	49
3.2.5.1 Εισαγωγή	49

3.2.5.2 Ο χρήσιμος και επιβλαβής ρόλος των ανακλώμενων ήχων	50
3.2.5.3 Λειτουργία echograms στο CATT Acoustic	51
3.2.6 Υπολογισμοί D-50 και C-50	52
3.2.6.1 Λόγοι σήματος προς θόρυβο (Ct και Ut)	52
3.2.6.2 Υπολογισμοί G και C-80	54
3.2.7.1 Μοντελοποιώντας υποκειμενικές προτιμήσεις	54
3.2.7.2 Πρώιμες ανακλάσεις, οικειότητα και διαύγεια	56
3.2.8 Λόγος του απευθείας προς ανακλώμενο κύμα (D/R)	59
3.2.8.1 Σχεδιασμός ηχο-συστήματος	59
3.2.8.2 Κάλυψη	60
3.2.8.3 Ευκρίνεια της ομιλίας (intelligibility)	60
3.2.9 Έννοιες Ts, RT, T30 και EDT	62
3.2.10 Στάθμη ακουστικής πίεσης (SPL) και SPL(t)	64
3.2.10.1 Εισαγωγή	64
3.2.10.2 Στάθμες ακουστικής πίεσης στο CATT Acoustic	65
3.2.11 Λειτουργία Spectra	67
3.2.12 Λειτουργία DL-Lines	68

4. Ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων σε σήραγγες

4.1 Εισαγωγή	69
4.2 Μαθηματικό μοντέλο 1 ^{ης} διάταξης	70
4.3 Μαθηματικό μοντέλο 2 ^{ης} διάταξης	72
4.4 Κάλυψη στο 1 ^ο μοντέλο	75
4.4.1 1 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 44.7 m	75
4.4.2 2 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 50 m	77
4.4.3 3 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 60 m	79
4.4.4 Διερεύνηση της κάλυψης	82
4.5 Κάλυψη στο 2 ^ο μοντέλο	83
4.5.1 1 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 25 m	83
4.5.2 2 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 50 m	88
4.5.3 3 ^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 100 m	92
4.5.4 Διερεύνηση της κάλυψης	95
4.6 Ακουστικοί παράμετροι 1 ^{ου} μοντέλου	96
4.6.1 Απευθείας στάθμες στα 1 KHz	96
4.6.2 Κάλυψη σε όλες τις συχνότητες	99
4.6.3 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας	100
4.6.4 U ₅₀ για συχνότητα 1 KHz	101
4.6.5 U ₅₀ σε όλες τις συχνότητες	103
4.6.6 D ₅₀ σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων	105
4.7 Ακουστικοί παράμετροι 2 ^{ου} μοντέλου	107
4.7.1 Απευθείας στάθμες στα 1 KHz	107
4.7.2 Απευθείας στάθμες σε όλες τις συχνότητες	108
4.7.3 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας	110
4.7.4 U ₅₀ στη μπάντα συχνοτήτων του 1 KHz	112
4.7.5 U ₅₀ σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων	113
4.7.6 D ₅₀ σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων	115

5 Συμπεράσματα-επίλογος
6 Αναφορές

117
119

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής

Αρκετές σήραγγες, ειδικά όσες έχουν μεγάλο μήκος διαθέτουν ηχο-σύστημα συναγερμού, έτσι όταν προκύψει μία επείγουσα κατάσταση πχ φωτιά, τροχαίο ατύχημα και κατέβουν οι επιβάτες από τα οχήματα να ακολουθήσουν τις οδηγίες ασφαλείας.

Στην Ευρώπη, συχνά απαιτούνται ηχο-συστήματα ανακοινώσεων και συναγερμού για σήραγγες. Αυτά τα συστήματα πρέπει να ικανοποιούν αυστηρά κριτήρια σε σχέση με την ευκρίνεια της ομιλίας. Ωστόσο, οι ακουστικές συνθήκες στις οδικές σήραγγες είναι γενικώς πολύ εχθρικές στα ηχο-συστήματα, λόγω της μεγάλης αντήχησης και των υψηλών στάθμεων θορύβου [1].

Υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα μέτρα ώστε να επιτευχθούν επαρκώς υψηλά επίπεδα ευκρίνειας της ομιλίας. Πρώτον, μπορεί να αυξηθεί ο λόγος του απευθείας προς το ανακλώμενο κύμα λαμβάνοντας μέτρα ακουστικής χώρου, όπως προσθέτοντας ακουστική απορρόφηση στα τοιχώματα. Αυτό είναι συνήθως πολύ κοστοβόρο και δεν είναι πρακτικό. Δεύτερον, μειώνοντας τον θόρυβο φόντου εφαρμόζοντας πιο “ήσυχα” συστήματα εξαερισμού. Αυτό είναι τεχνικά επιτευκτό, αλλά όχι πάντα πραγματοποιήσιμο στην πράξη. Επιπλέον, ο θόρυβος που προκαλείται από την κυκλοφορία των οχημάτων δεν μπορεί να εξαλειφθεί, δίνοντας ένα συγκεκριμένο χαμηλότερο όριο για τον θόρυβο φόντου.

Μια εναλλακτική είναι να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά, υψηλής κατευθυντικότητας ηχεία. Όπως η χοάνη ασυμμετρικού ορίου (ABF-260) που έχει σχεδιαστεί από την Duran Audio [1]. Λόγω του μεγάλου μπροστά προς πίσω λόγου του μοτίβου κατευθυντικότητας και της σχετικά χαμηλής παραμόρφωσης σήματος, μια σημαντική βελτίωση της ποιότητας του ήχου και τις ευκρίνειας μπορεί να επιτευχθεί σε σήραγγες.

Μια καλά καθιερωμένη αντικειμενική μέτρηση της ποιότητας μετάδοσης ομιλίας είναι ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index-STI). Αν και η ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας δεν είναι το ίδιο με την ευκρίνεια της ομιλίας, συχνά χρησιμοποιείται ως κάτι τέτοιο.

Σε πολλές περιπτώσεις, η ευκρίνεια της ομιλίας στο θόρυβο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ανεξάρτητη από την παρούσα ακουστική στάθμη και κυρίως υπολογίζεται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Ωστόσο, σε υψηλές στάθμες ομιλίας, η υποκειμενική ευκρίνεια φαίνεται να μειώνεται. Αυτή η μείωση δεν προβλέπεται από το αρχικό STI. Για αυτό τον λόγο, στάθμες που είναι εξαρτημένες από την ακουστική απόκρυψη παρουσιάστηκαν στην τελευταία αναθεώρηση του προτύπου STI (IEC 60268-16:2003). Ως αποτέλεσμα η αντικειμενική βαθμολογία της ευκρίνειας ομιλίας μέσω του STI, άλλαξε δραματικά σε ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων για σήραγγες. Το STI ενός ηχο-συστήματος που παράγει υψηλές ακουστικές στάθμες (έως 105 dB), βαθμολογείται σημαντικά χαμηλότερα χρησιμοποιώντας το αναθεωρημένο πρότυπο, σε σχέση με το παλαιότερο πρότυπο (του 1998). Με αποτέλεσμα να έχει γίνει πολύ δύσκολο η ακόμα αδύνατο σε πολλές καταστάσεις να ικανοποιηθούν οι ελάχιστες STI απαιτήσεις σε σήραγγες. Το συμπέρασμα είναι ότι υπάρχουν πολλές προκλήσεις στη σχεδίαση ηχο-συστημάτων για σήραγγες.

1.2 Ποιο είναι το νόημα ηχο-συστημάτων στις σήραγγες;

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.1, ο σκοπός των ηχο-συστημάτων στις σήραγγες είναι να μεταδίδονται ακουστικά μηνύματα σε περιπτώσεις έκτακτων καταστάσεων όπως περιπτώσεις πυρκαγιάς, τροχαίου κτλ. Το να παραμένουν ασφαλείς οι επιβάτες ενώ κινούνται με τα οχήματα τους είναι προτεραιότητες κλειδιά για τους χειριστές των τούνελ. Ένα καλό ηχο-σύστημα ειδοποιήσεων μπορεί να βοηθήσει στο να ξεπεραστούν κάποιες από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται σε καθημερινή βάση, παρέχοντας ένα αποτελεσματικό μέσο επικοινωνίας μεταξύ των χειριστών της σήραγγας αλλά και των χρηστών της σήραγγας.

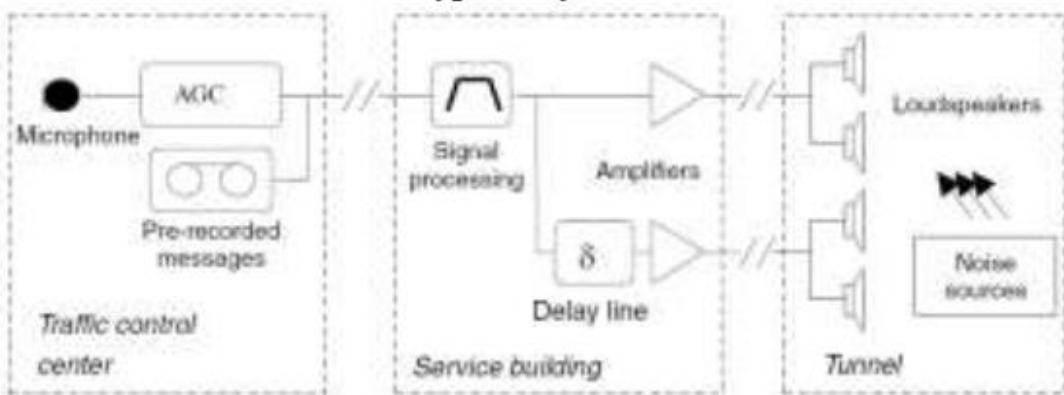
Σε μία σήραγγα το ηχο-σύστημα ειδοποιήσεων είναι ο μόνος τρόπος επικοινωνίας με τους επιβάτες μόλις αυτοί βγουν από τα οχήματά τους. Τις περισσότερες φορές αυτά τα συστήματα αποκαλούνται συστήματα δημοσίων διευθύνσεων/φωνητικού συναγερμού (Public Address/Voice Alarm Systems) [2]. Επομένως αυτά χρησιμοποιούνται ως κύρια μορφή επικοινωνίας σε περιπτώσεις έκτακτων καταστάσεων.

Το ποιο αποτελεσματικό ηχο-σύστημα ειδοποιήσεων είναι αυτό που παρουσιάζει ένα καθαρό και κατανοητό μήνυμα την πρώτη φορά. Σε μία επείγουσα κατάσταση αυτό σημαίνει ότι οι επιβάτες μπορούν να δράσουν γρήγορα και με ακρίβεια, στο μήνυμα και σε περισσότερα σενάρια από μέρα σε μέρα. Αυτό σημαίνει ότι οι χειριστές της σήραγγας μπορούν αποτελεσματικά να επικοινωνήσουν με τους χρήστες της σήραγγας, για να αποτρέψουν μικρά περιστατικά που θα κλιμακωθούν σε σενάρια μεγαλύτερων καταστάσεων.

Οι οδικές σήραγγες έχουν πολύ δύσκολο ακουστικό περιβάλλον που θέτει μια σημαντική πρόκληση στον σχεδιαστή του ηχο-συστήματος [2]. Τα συμβατικά ηχεία δεν λειτουργούν καλά σε τέτοιο περιβάλλον. Στο παρελθόν κάποιοι κατασκευαστές δεν επέλεγαν να τοποθετήσουν ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων σε σήραγγες, επειδή συνειδητοποιούσαν ότι ήταν αδύνατο να μεταδοθούν καθαρά μηνύματα με συμβατικές λύσεις ηχείων.

1.3 Η λειτουργία αυτών των ηχο-συστημάτων

Το διάγραμμα 1 είναι μια σχηματική απεικόνιση ενός συνηθισμένου ηχο-συστήματος για σήραγγες [3]. Κατά την διάρκεια έκτακτων καταστάσεων, ηχογραφημένα μηνύματα μαζί με φωνητικές οδηγίες από τον χειριστή της σήραγγας, μεταδίδονται στους επιβάτες μέσω του ηχο-συστήματος ειδοποιήσεων. Στο σήμα των φωνητικών εντολών γίνεται κάποια επεξεργασία μέσω DSP και κατόπιν το σήμα καταλήγει στους ενισχυτές που οδηγούν τα ηχεία. Επίσης, επειδή χρησιμοποιείται array ηχείων που έχουν αποστάσεις μεταξύ τους, κάθε γραμμή του ενισχυτή είναι συνδεμένη με μία ρυθμιζόμενη καθυστέρηση (Delay).



Σχήμα 1. Ηχο-σύστημα ειδοποιήσεων για οδικές σήραγγες.

Οι πηγές που χρησιμοποιούνται σε ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων είναι κατευθυντικές χοάνες (Σχήμα 2). Ιδανικά τα ηχεία αυτά πρέπει να έχουν ένα μεγάλο εύρος ζώνης 125 Hz και 8 KHz, με την ισχύ του ηχείου να επιλέγεται ώστε να παρέχεται στάθμη ακουστικής πίεσης 15 dBA παραπάνω από τον θόρυβο φόντου στον δρόμο. Αυτό το μέτρο θεωρείται ότι είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για επαρκή μετάδοση ομιλίας σύμφωνα με το NFPA 72 [4], Pincus [5].



Σχήμα 2. Χοάνες ηχο-συστημάτων ανακοινώσεων.

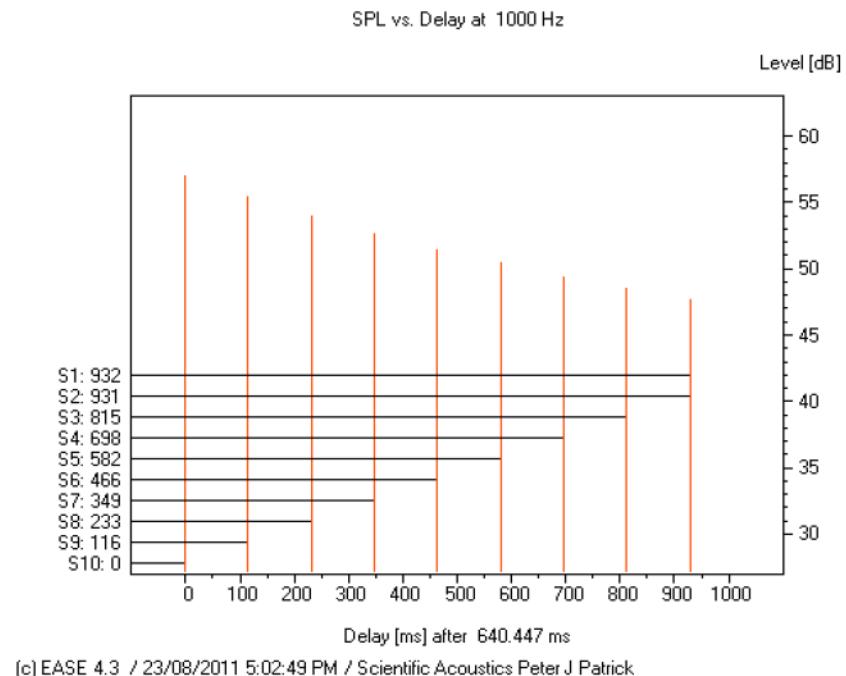
1.4 Τοπογραφία ηχο-συστημάτων για σήραγγες

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος επιλογών στη τοπογραφία συστήματος διαθέσιμο για τον σχεδιαστή ηχο-συστημάτων. Απλά κατανεμημένα συστήματα που αποτελούνται από επιμέρους ηχεία, κατανεμημένες συστοιχίες ηχείων και διαδοχικές διατάξεις καθυστέρησης, όλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι κρίσιμοι παράμετροι περιλαμβάνουν τις επιδόσεις του ηχείου, την απόσταση του ηχείου από τον ακροατή και τον αριθμό των ηχείων [6].

Τα απλά κατανεμημένα συστήματα, που αποτελούνται από επιμέρους ηχεία χωρίς επεξεργασία στην καθυστέρηση σήματος (delay), έχουν εφαρμογές σε σήραγγες εξόδου, όπου η απόσταση πηγής-ακροατή μπορεί να διαχειριστεί και να παραμείνει αρκετά μικρή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το μήκος διαδρομής του απευθείας ήχου μπορεί να διατηρηθεί αρκετά μικρό ώστε να εξασφαλιστεί, ότι η στάθμη ακουστικής πίεσης του απευθείας πεδίου, είναι αρκετά υψηλή σε σύγκριση με την στάθμη του πεδίου αντήχησης. Επιπλέον, η μικρή απόσταση της πηγής από την ακροατή σημαίνει ότι αρκετά χαμηλές ακουστικές στάθμες από το ηχείο, θα δημιουργήσουν χρήσιμες ακουστικές στάθμες για τον ακροατή. Για παράδειγμα, ένα κατανεμημένο σύστημα που μικρά ηχεία δημιουργούν στάθμη: 90 dB(A) @ 1m, με 5m απόσταση και 1.2m πάνω από την κεφαλή των ακροατών, θα παράξει περίπου 84 dB(A) κοντά στην ενδιάμεση θέση μεταξύ των ηχείων [6]. Μια παρόμοια απλή κατάσταση (παντοκατευθυντικών ηχείων) σε μία μεγάλη σήραγγα με 40m απόσταση ηχείου απαιτεί περίπου 108 dB(A) @ 1m για την ίδια στάθμη ακροατή. Επομένως, η πυκνή απόσταση ηχείων σε μία μικρή σήραγγα, απαιτεί μία χαμηλότερη συνολική ακουστική ισχύ, για να παραχθούν 85 dB(A) στον ακροατή. Ως αποτέλεσμα την δημιουργία μίας χαμηλότερης στάθμης ενέργειας αντήχησης, για την ίδια στάθμη ακουστικής πίεσης στον ακροατή. Η σχέση εξαρτάται έως ένα βαθμό από τον νόμο αντιστρόφου τετραγώνου, όπου η απευθείας στάθμη αυξάνεται κατά 6 dB όταν η απόσταση από τον ακροατή γίνει μισή, αλλά η ένταση του πεδίου αντήχησης αυξάνεται μόνο κατά 3 dB με κάθε διπλασιασμό του αριθμού των ακουστικών πηγών. Αυτό σημαίνει σε ισχύ ότι ο σχεδιαστής, μπορεί πάντα να κερδίζει στην ευκρίνεια, αυξάνοντας τον αριθμό των ηχείων, και εξασφαλίζοντας πως όταν διπλασιάζεται ο αριθμός των ηχείων, η απόσταση από το ηχείο έως τον ποιο απομακρυσμένο ακροατή του απευθείας πεδίου γίνεται μισή.

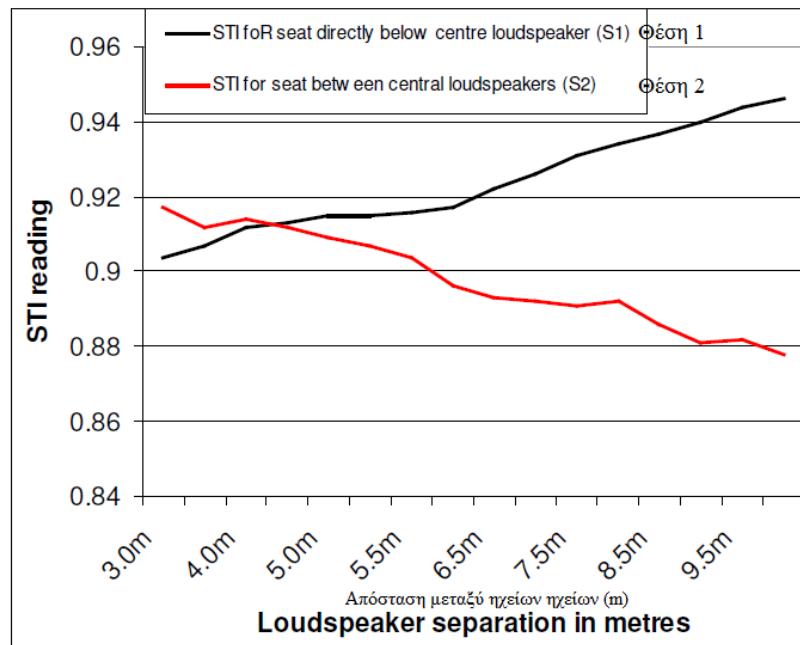
Ωστόσο μια σπάνια πτυχή που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό συστημάτων, είναι η συνολική επίδραση των πολλαπλών αφίξεων του απευθείας ήχου. Η απόσταση των πηγών έχει άμεση σχέση στο διάστημα μεταξύ των αφίξεων του ήχου της πηγής με την αύξηση της απόστασης από τον ακροατή. Η επίδραση της απόστασης του ηχείου έχει δοκιμαστεί σε ένα ανηχοικό μοντέλο που έχει διαστάσεις μίας σήραγγας εξόδου 3m (Υψος) * 2.8m (Πλάτος) * 100m (Μήκος) [6]. Παντοκατευθυντικά ηχεία τοποθετήθηκαν σε ύψος 2.95m και οι θέσεις ακρόασης σε ύψος 1.7m για έναν όρθιο άνθρωπο. Μια ακρόαση πραγματοποιήθηκε ακριβώς κάτω από ένα ηχείο η πολύ κοντά στο κέντρο της σήραγγας, ενώ μία άλλη ακρόαση έγινε στο μέσο της διαδρομής μεταξύ δύο ηχείων. Το λογισμικό Ease επιτρέπει τον χρήστη να συλλέξει δείγματα κρουστικής απόκρισης από επιμέρους θέσεις ακρόασης. Σε αυτή την περίπτωση στη θέση 1, ακριβώς κάτω από το κεντρικό ηχείο, και τη θέση 2, που βρίσκεται κεντρικά μεταξύ των δύο ηχείων στο ποιο κοντινό σημείο του κέντρου.

Το σχήμα 3 δείχνει ένα διάγραμμα από το λογισμικό που εμφανίζονται οι αφίξεις του απευθείας ήχου από μία σειρά δοκιμών.



Σχήμα 3. Απεικόνιση στο Ease των απευθείας αφίξεων στη θέση ακροατή.

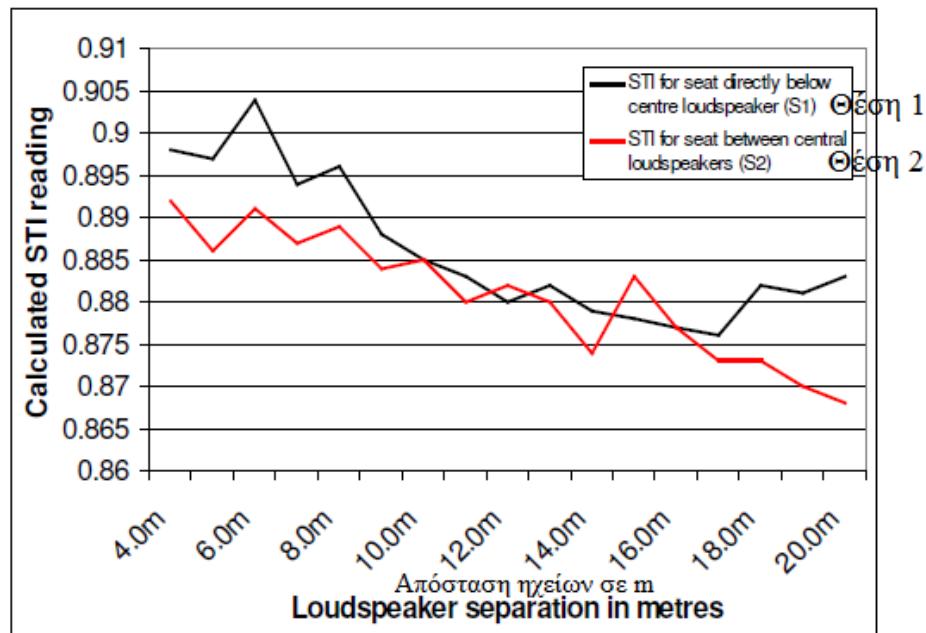
Το σχήμα 4 απεικονίζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών STI για διάφορες αποστάσεις ηχείων, για θέση ακρόασης ακριβώς κάτω από το κεντρικό ηχείο (θέση 1) και για το κεντρικό σημείο ακρόασης μεταξύ των δύο ηχείων (θέση 2) [6].



Σχήμα 4. Απόσταση μεταξύ ηχείων σε σχέση με το STI σε ανηχοικό περιβάλλον, Παντοκατευθυντικές πηγές.

Η ανατροπή του STI υπολογίζεται από το κεντρικό σημείο μεταξύ των ηχείων, όπου η αύξηση του διαστήματος σχετίζεται με το πόσο έντονες είναι οι πρώιμες αφίξεις σε σύγκριση με τις αργοπορημένες αφίξεις, από διαδοχικά ηχεία που έχουν αποστάσεις μεγαλύτερες των 10m. Η αύξηση στη τιμή του STI με την αύξηση της απόστασης, για θέση ακρόασης ακριβώς κάτω από το κεντρικό ηχείο, σχετίζεται με την αύξηση του λόγου του απευθείας ήχου από το ηχείο αυτό προς την απευθείας ακουστική πίεση από ποιο απομακρυσμένα γειτονικά ηχεία.

Ωστόσο, το σχήμα 5 απεικονίζει ότι η διάταξη ηχείων σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, δημιουργεί χειρότερα αποτελέσματα ενώ τα διαστήματα μεταξύ των ηχείων αυξάνονται. Επίσης εμφανίζεται μία τάση για απόκλιση, μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων (Θέση 1, Θέση 2) σε μεγάλες αποστάσεις.



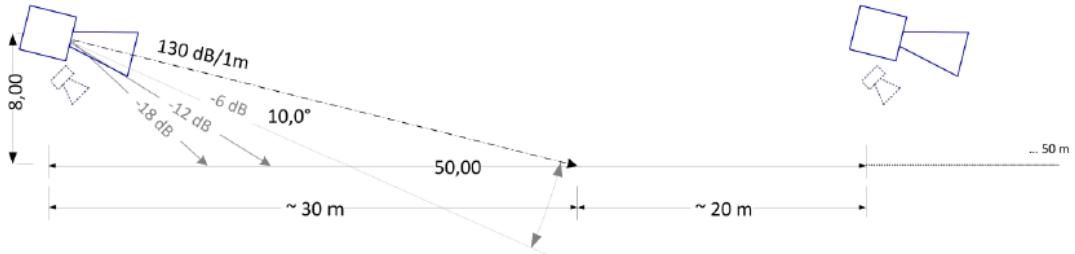
Σχήμα 5. Το STI σε σχέση με την απόσταση μεταξύ ηχείων – χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων.

1.5 Κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού, το παράδειγμα Μαλιακός-Κλειδί

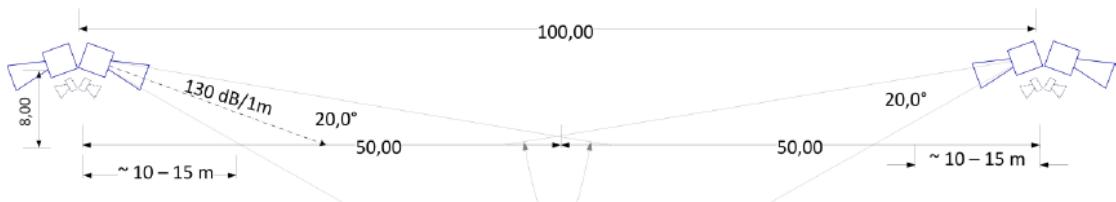
Στη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί (η οποία αφορά τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής) έχουν προταθεί δύο διατάξεις ηχο-συστημάτων:

- Όλες οι χοάνες έχουν την ίδια κατεύθυνση και έχουν απόσταση μεταξύ τους 50m, χωρίς γραμμές καθυστέρησης (Σχήμα 6).
- Οι χοάνες είναι σε ζεύγη, έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, ενώ η απόσταση από το ένα ζεύγος έως το άλλο είναι 100m, επίσης δεν υπάρχουν γραμμές καθυστέρησης (Σχήμα 7).

Οι χοάνες είναι τοποθετημένες σε ύψος 8m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου. Όλες οι χοάνες που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ίδιου τύπου. Όλες οι διατάξεις χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ σε ότι αφορά τα συστήματα που βασίζονται σε καθυστέρηση (delay-based systems) η δεύτερη λύση φαίνεται καλύτερη από την πρώτη. Πρέπει να διευκρινίσουμε ότι τα δύο συγκεκριμένα μοντέλα είναι θεωρητικά. Η ακριβής διάταξη (πχ το που θα σημαδεύουν οι κύριοι άξονες) θα προσδιοριστεί ύστερα από προσομοιώσεις, ακουστικές μελέτες και μετρήσεις πεδίου.



Σχήμα 6. Ομοιόμορφη κατανομή ηχείων ανά 50m, ίδια κατεύθυνση.



Σχήμα 7. Ηχεία σε ζεύγη, αντίθετης κατεύθυνσης ανά 100m.

Η πρώτη διάταξη είναι πιο απλή και παρέχει πιο εύκολη και απλή εγκατάσταση συστήματος. Είναι προφανές, ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ διαδοχικών χοανών είναι περιορισμένη, αν θεωρήσουμε ότι ο ήχος που εκπέμπεται από τις αδρανείς χοάνες είναι εκτός του κύριου άξονα τους (δηλαδή του άξονα που εκπέμπεται η μέγιστη ακουστική πίεση), ενώ η διαφορές απόστασης σε κάθε σημείο άφιξης είναι μεγαλύτερες των 50m (για την προηγούμενη χοάνη) και σε εύρος 25-50m για την επόμενη χοάνη. Ως ετούτου, οι θέσεις όπου έχουν σχετικά υψηλές διαφορές καθυστέρησης (πάνω από 100ms) χαρακτηρίζονται από αυξημένες διάφορές στάθμης (μεταξύ του ήχου που φτάνει από διαφορετικές πηγές), μειώνοντας την εμφάνιση μιας ενδεχόμενης φτωχής ευκρίνειας της ομιλίας για ένα σύνθετο ακουστικό πεδίο. Είναι προφανές ότι ο κύριος άξονας της πηγής σημαδεύει σε οριζόντια θέση περίπου στα 30m από την αντίστοιχη πηγή. Για ποιο επαρκή κάλυψη σε περιοχές του κοντινού πεδίου υπάρχει η επιλογή να τοποθετηθούν μικρότερες χοάνες (κοντινής εκπομπής ήχου) για να καλυφτεί οποιοδήποτε εξασθένηση υψηλής συχνότητας που προκύπτει από θέσεις εκτός κύριου άξονα των μεγάλων χοανών.

Η δεύτερη λύση, ενώ φαίνεται να είναι λίγο πιο πολύπλοκη όσο αφορά την εγκατάσταση συστήματος και τη συνδεσμολογία, χαρακτηρίζεται από κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα. Ως εκ τούτου, εκτός από αυτά που αναφέραμε παραπάνω

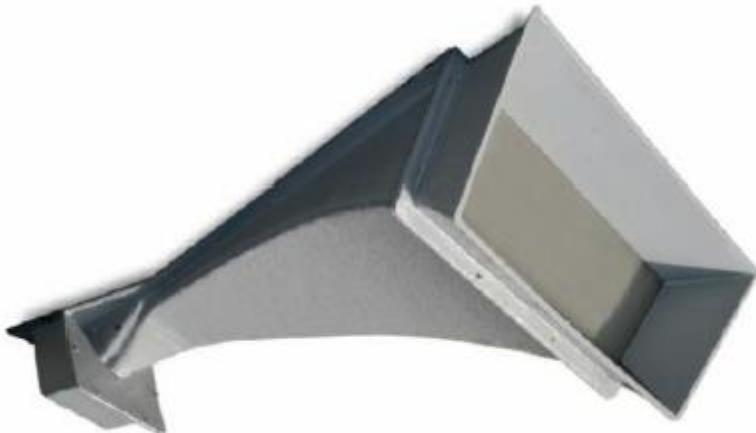
(για την επίδραση της κατευθυντικότητας στο κοντινό πεδίο), οι περιοχές εκτός του κύριου άξονα (off-axis ~ 0-15m, 85-100m) που είναι κοντά στις πηγές ευνοούνται από τον παράγοντα ότι τυχαίες επιδράσεις είναι παρών κοντά στα ζεύγη χοανών. Αυτή η επίδραση απεικονίζεται στο σχήμα 7 με τις μικρότερες χοάνες εκπομπής που βρίσκονται κάτω από τις κύριες χοάνες. Ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοια δυνατή επίδραση, το θέμα μπορεί εύκολα να διευθετηθεί τοποθετώντας υψηλής κατευθυντικότητας χοάνες με μικρότερες/χαμηλότερης κατευθυντικότητας. Επίσης οι αποστάσεις άφιξης από ανεπιθύμητους ήχους αδρανών χοανών γίνεται μεγάλη (>50m), ενώ χρήσιμη ενίσχυση του κοντινού πεδίου μπορεί να εμφανιστεί σε θέσεις 35-65m.

1.6 Χοάνες που χρησιμοποιούνται

1.6.1 Ασυμμετρικές

Οι συμβατικές χοάνες παρουσιάζουν ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων και μία σχετικά υψηλή παραμόρφωση σήματος. Επιπλέον, επειδή η ακουστική έξοδο μίας μονής χοάνης είναι συνήθως πολύ χαμηλή, συχνά χρησιμοποιούνται συστοιχίες χοανών. Αυτές οι συστοιχίες προκαλούν ανεπιθύμητες επιδράσεις στην συχνότητα και την πολική απόκριση [1].

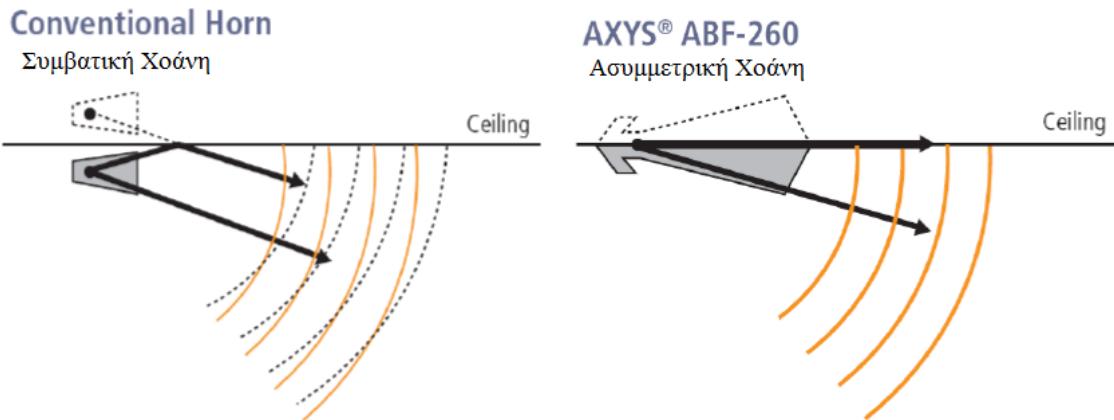
Για να βελτιωθεί η ποιότητα του ήχου και η ευκρίνεια της ομιλίας, διάφορες εταιρίες πχ Duran Audio έχουν σχεδιάσει ασυμμετρικού ορίου χοάνες (Asymmetric Boundary Flare Horns) [7], όπως φαίνεται στο σχήμα 8:



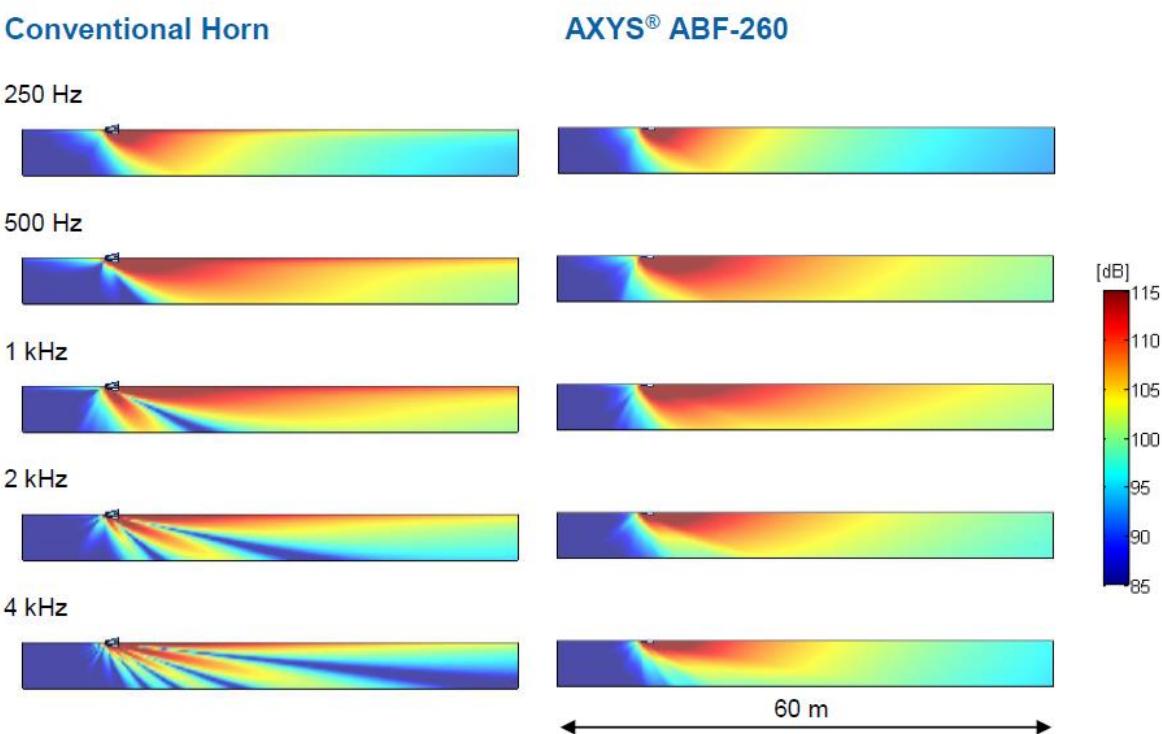
Σχήμα 8. Το μοντέλο ασυμμετρικής χοάνης ABF-260

Η γεωμετρία της ασυμμετρικής χοάνης (ABF) βασίζεται στην αρχή του ακουστικού καθρέφτη. Η χοάνη είναι σχεδιασμένη να εφαπτεται με την οροφή της σήραγγας οδικής κυκλοφορίας. Η οροφή συμπεριφέρεται σαν μία επιφάνεια μεγάλου ορίου. Καθώς το ακουστικό κέντρο της χοάνης είναι πολύ κοντά στην οροφή, η χοάνη και ο “καθρέφτης” της φαίνονται σαν μία ακουστική πηγή με διπλάσια ακουστική πίεση. Σε αντίθεση με μία συμβατική χοάνη, που πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποια απόσταση από τον τοίχο η την οροφή, καμία ακύρωση ακουστικής πίεσης δεν θα συμβεί, μεταξύ

του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτή η αρχή απεικονίζεται στο σχήμα 9 και 10.



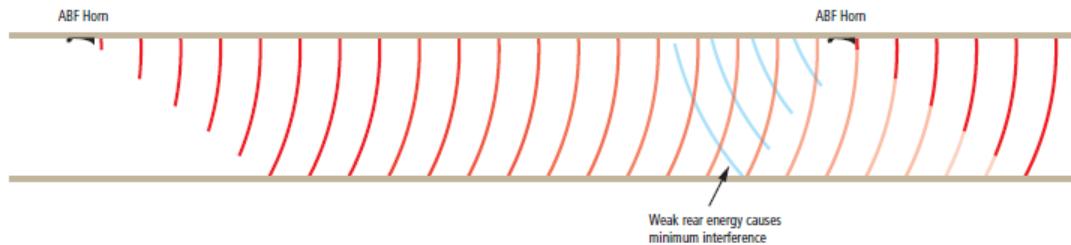
Σχήμα 9. Ο ακουστικός καθρέφτης μιας συμβατικής χοάνης σε σύγκριση με την ασυμμετρική ABF-260.



Σχήμα 10. Κατανομή στάθμης ακουστικής πίεσης (απευθείας ήχος και ανακλάσεις οροφής) σε κατακόρυφο επίπεδο σε μία σήραγγα, μιας συμβατικής χοάνης που είναι τοποθετημένη 0.2m κάτω από την οροφή σε σύγκριση μιας ασυμμετρικής χοάνης ABF-260, για μπάντες οκτάβας 250Hz έως 4KHz.

Οι γενικού τύπου χοάνες και ακόμα και οι συμμετρικές γενικώς έχουν φτωχή κατευθυντικότητα (Αυτές δεν ελέγχουν την διασπορά του ήχου καλά και ρίχνουν έξω τον ήχο σε όλες τις κατευθύνσεις) και έχουν φτωχό μπροστινό προς πίσω λόγο κατευθυντικότητας (front to back ratio). Ο συνδυασμός μεγάλου μεγέθους

ασυμμετρικών χοανών παρέχει ένα υψηλότερο μπροστινό προς πίσω λόγο και μεγαλύτερη κατευθυντικότητα από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία χοάνης. Αυτό ωφελεί την ασυμμετρική χοάνη με δύο τρόπους: 1^{ον} Η ενέργεια από επιπλέον χοάνες, συνδυάζεται με ελάχιστη αλληλεπίδραση δημιουργώντας ένα συμφασικό μέτωπο κύματος που κατευθύνεται κατά μήκος της σήραγγας, 2^{ον} η ενέργεια που εκπέμπεται από το πίσω τμήμα της χοάνης είναι αδύναμη και προκαλεί ελάχιστες παρεμβολές [2]. Αυτή η λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11. Η αλληλεπίδραση χοανών δημιουργεί ένα συμφασικό μέτωπο κύματος, η ενέργεια που εκπέμπεται πίσω από την χοάνη προκαλεί ελάχιστη αλληλεπίδραση.

Μια από τις ποιο δημοφιλές ασυμμετρικές χοάνες που έχουν εφαρμογές σε σήραγγες είναι η ABF-260 της εταιρίας Duran. Όταν οδηγείται με είσοδο 100 W, παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά: Ονομαστικό συχνοτικό εύρος 300 – 12 KHz στον άξονα αναφοράς (+3/-10 dB), η μέγιστη στάθμη ακουστικής πίεσης στα 4m (για 100W) είναι 119 dB SPL, το ονομαστικό οριζόντιο άνοιγμα της χοάνης είναι 40° στα 4m (- 6 dB, κατά μέσο όρο από 500 έως 8 KHz), ενώ το ονομαστικό κατακόρυφο άνοιγμα έχει γωνία 58° στα 4m (-6 dB, κατά μέσο όρο από 500 έως 8 KHz) [8]. Οι πίνακες 1 και 2 περιγράφουν αναλυτικά τα ακουστικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά αυτής της χοάνης.

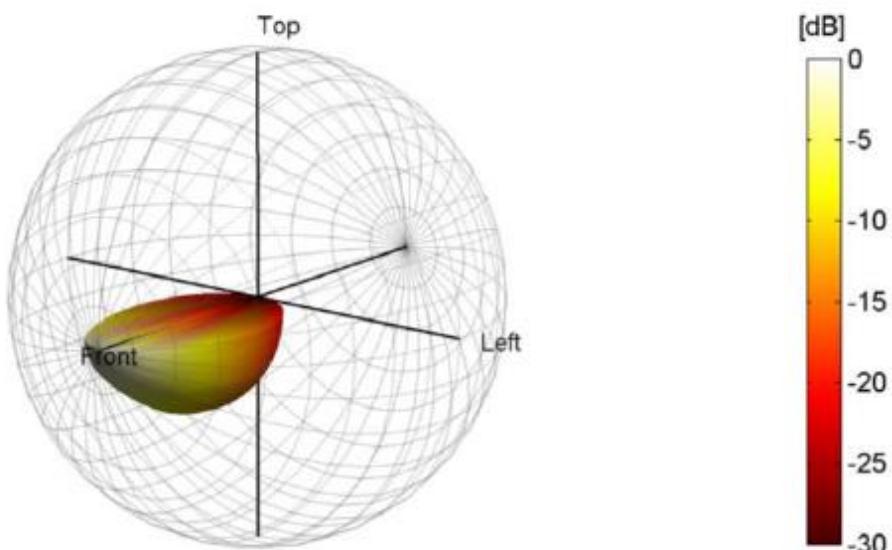
Συχνοτικό εύρος	Χωρίς ισοστάθμιση (EQ) :	300 - 12 KHz (+3/-10 dB)
	Με ενεργή ισοστάθμιση (EQ):	400 - 11 KHz (+/- 3 dB)
Ευαισθησία (1W/4m)	Χωρίς ισοστάθμιση (EQ):	99 dB _{SPL}
	Με ενεργή ισοστάθμιση (EQ):	98 dB _{SPL}
Μέγιστη Ευαισθησία (100W/4m)	Χωρίς ισοστάθμιση (EQ):	119 dB _{SPL}
	Με ενεργή ισοστάθμιση (EQ):	118 dB _{SPL}
Οριζόντια κάλυψη (-6 dB)	500 Hz	43°
	1 KHz	31°
	2 KHz	37°
	4 KHz	45°
	8 KHz	43°
Κατακόρυφη κάλυψη (-6 dB)	500 Hz	95°
	1 KHz	69°
	2 KHz	52°
	4 KHz	38°
	8 KHz	35°
Ονομαστική εκπομπή		50m

Πίνακας 1. Τα ακουστικά χαρακτηριστικά της χοάνης ABF-260

Ονομαστική αντίσταση φορτίου	Για σύνδεση 100 W:	100 Ω
	Για σύνδεση 50 W:	200 Ω
Ονομαστική ισχύς θορύβου:		100 W _{RMS}
Ονομαστική τάση θορύβου:		100 V _{RMS}
Πολικότητα:		100W tap/50W tap= +,0V= -
Φίλτρα:	Υψηπερατό φίλτρο	1 ^{ης} τάξης HPF, F-3dB στα ~ 300 Hz

Πίνακας 2. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της χοάνης ABF-260

Η χοάνη ABF-260 οδηγείται από 2'' οδηγό συμπίεσης είτε με 50W, ή με 100W και με 100V μετασχηματιστή αντίστασης. Το σχήμα 12 απεικονίζει την μετρούμενη κατευθυντικότητα μισού χώρου (balloon) για την χοάνη ABF-260 όταν είναι τοποθετημένη σε σχέση με μία επιφάνεια οριζόντιου ορίου. Εκτός από την υψηλή κατευθυντικότητα, το πολικό διάγραμμα του χώρου παρουσιάζει ένα πολύ μεγάλο (>30 dB) λόγο μπροστά προς πίσω (front-to-back ratio), ο οποίος είναι επιθυμητός όταν χρησιμοποιούνται πολλές ABF χοάνες σε μια σήραγγα. Επιπλέον, η χοάνη αυτή έχει μία εκτεταμένη απόκριση συχνότητας έως 8 KHz.



Σχήμα 12. Μπαλόνι μετρούμενης κατευθυντικότητας μισού χώρου, (500Hz – 2KHz μέσος όρος) για την ABF-260 τοποθετημένη σε σχέση με μία επιφάνεια οριζόντιου ορίου.

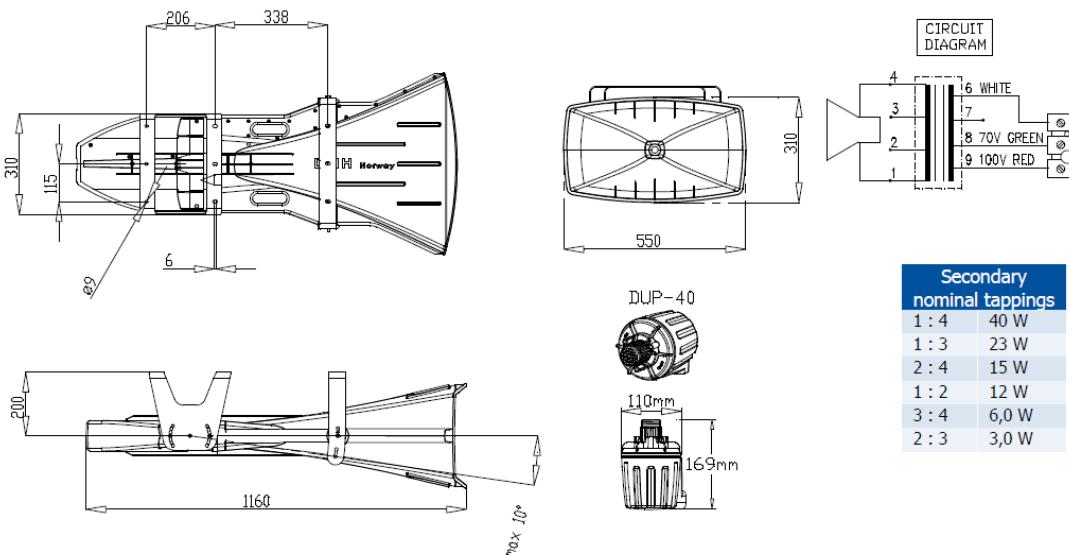
1.6.2 Συμβατικές

Μια ασυμμετρική χοάνη έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Το βασικό της όμως μειονέκτημα είναι το πολύ μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με μία συμβατική χοάνη, ειδικά στην περίπτωση της σήραγγας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλές διαδοχικές ασυμμετρικές χοάνες το κόστος του έργου θα είναι πολύ μεγάλο. Για αυτό τον λόγο στη μελέτη της παρούσας διπλωματικής επιλέχτηκαν συμβατικές χοάνες.

Στην μελέτη ακουστικής της σήραγγας επιλέχτηκε η χοάνη: Tunnel-500/DUP-40(T). Αυτή είναι μία πολύ δημοφιλής συμβατική χοάνη που έχει εφαρμογές σε σήραγγες. Το εγχειρίδιο της χοάνης αναφέρει ότι, η τιμή του δείκτη μετάδοσης ομιλίας (STI) της χοάνης Tunnel-500 με τον οδηγό DUP-40 είναι 1 σε ελεύθερο πεδίο η σε έναν ανησυχικό θάλαμο [9]. Ωστόσο η τιμή του STI επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποιότητα των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το ηχο-σύστημα, το είδος του ηχείου που επιλέχτηκε για το ακουστικό περιβάλλον, το ίδιο το περιβάλλον, δηλαδή το είδος των επιφανειών (απορροφητικές ιδιότητες), η γεωμετρία του κτιρίου και οι θόρυβοι φόντου.

Σε μία σήραγγα υπάρχουν συνήθως πολύ δύσκολες ακουστικές συνθήκες που πρέπει να ξεπεραστούν, λόγω της μεγάλης αντήχησης από σκληρές ανακλαστικές επιφάνειες και των υψηλών στάθμεων θορύβου φόντου. Με σκοπό να παραχθεί σε μια σήραγγα ένα ευκρινές σήμα φωνής, είναι επιθυμητό μια τιμή του δείκτη STI μεγαλύτερη από 0.45. Με σκοπό να επιτευχθεί αυτό, το ηχείο θα πρέπει να έχει υψηλή κατευθυντικότητα, και να είναι σε θέση να παράξει μία στάθμη ακουστικής πίεσης (SPL), τουλάχιστον 10 dB υψηλότερη από την στάθμη θορύβου φόντου [9]. Είναι προτιμότερο, ο χρόνος αντήχησης να είναι μικρότερος από 2.5 sec.

Το σχήμα 13 απεικονίζει το μηχανολογικό σχέδιο της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T) με την πρόσοψη, κάτοψη, πλάγια όψη καθώς και το διάγραμμα συνδέσεων.



Σχήμα 13. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T)

Ο πίνακας 3 αναγράφει τα τεχνικά χαρακτηριστικά της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T)

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Υλικό/Χρώμα	Πλαστικό V0 χωρίς αλογόνο/μαύρο
Τοποθέτηση	2 στηρίγματα
Υλικό στηριγμάτων	V4A/A4/316
Τερματισμός Συνδέσεων	Μέσα σε τερματικό κεραμικό
Βάρος	13 Kg
IP-Βαθμολογία με DUP-40	67
Μέγ./ελ. Θερμοκρασία περιβάλλοντος	90 °C / -40 °C
Ονομαστική/Μέγιστη ισχύ	40 W / 60 W
Στάθμη Ακουστικής Πίεσης (1W/1m)	114 dB
Στάθμη Ακουστικής Πίεσης (Ον. Ισχύ)	127 dB
Συχνοτικό Εύρος	300 – 8125 Hz
Διασκόρπιση (-6 dB) 1 KHz / 4 KHz	40° / 35°
Επιλογές	Αντιστάσεων, χρωμάτων, πινακίδων

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T).

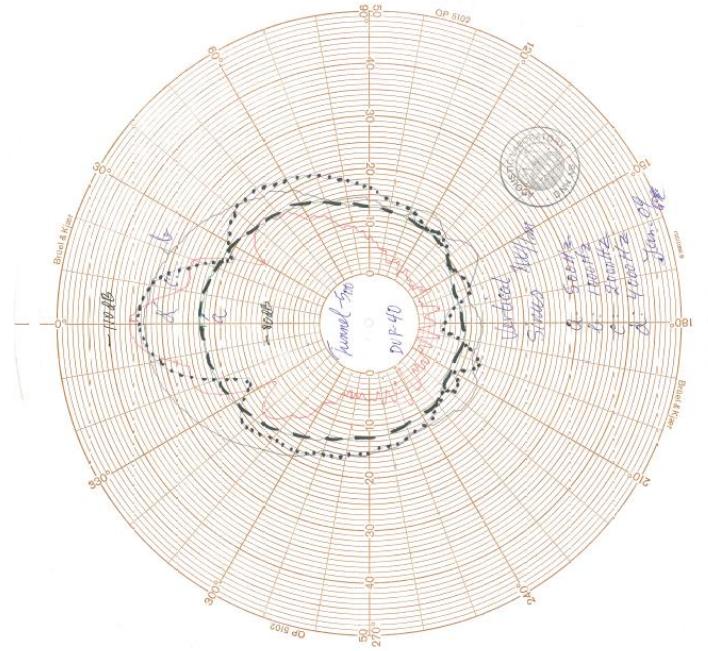
Το σχήμα 14 απεικονίζει την απόκριση συχνότητας της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T):



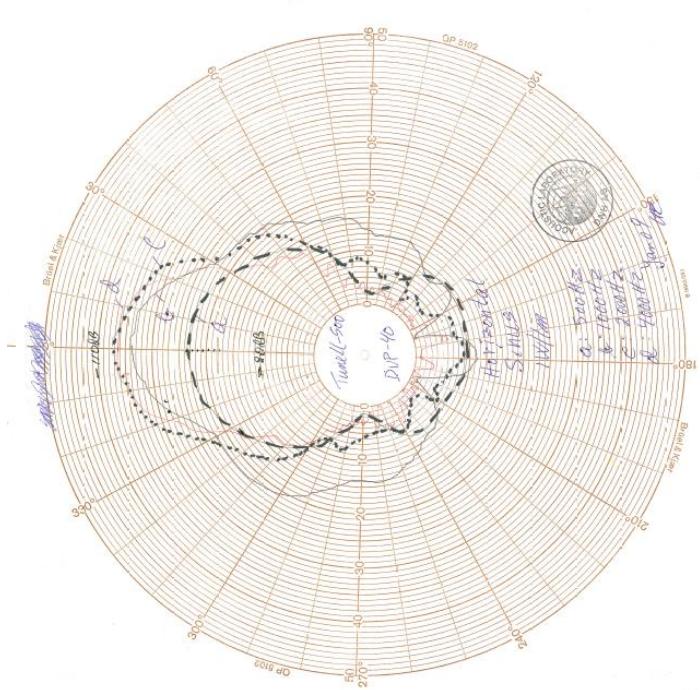
Σχήμα 14. Μεταβολή της στάθμης ακουστικής πίεσης σε σχέση με την συχνότητα της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T), για είσοδο 1W, στο 1m.

Ένα ακόμα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι η κατευθυντικότητα, δηλαδή η τιμή της ακουστικής στάθμης για οποιαδήποτε θέση του χώρου που υπάρχει μία ακουστική πηγή. Η κατευθυντικότητα απεικονίζεται με διάφορους τρόπους όμως ο πιο δημοφιλής είναι τα πολικά διαγράμματα. Για τον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας ενός ηχείου χρησιμοποιούνται οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες κάλυψης όταν το ηχείο περιστρέφεται 360° γύρο από τον άξονα αναφοράς. Οι γωνίες κάλυψης ορίζονται οι γωνίες που έχουν ως αποτέλεσμα μια μείωση 6 dB σε σύγκριση με την αρχική στάθμη ακουστικής πίεσης στον κύριο άξονα (on axis) για δεξιόστροφη και αριστερόστροφη

κίνηση. Σε γενικές γραμμές, όσο μικρότερη η γωνία κάλυψης ενός ηχείου, τόσο μεγαλύτερη η κατευθυντικότητα του ηχείου. Τα σχήματα 15 και 16 απεικονίζουν τα πολικά διαγράμματα της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T) για κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, στις μπάντες συχνοτήτων των 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz και 4 KHz.



Σχήμα 15. Κατακόρυφο πολικό διάγραμμα της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T).



Σχήμα 16. Οριζόντιο πολικό διάγραμμα της χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T).

2. Ανάλυση συστήματος

2.1 Ακουστικές συνθήκες

2.1.1 Σενάριο λειτουργείας του ηχο-συστήματος

Μια εγκατάσταση ηχο-συστήματος θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορες καταστάσεις, όπως καταστροφές, αυτοχόματα και επίσης σε λιγότερα σοβαρά προβλήματα όπως μποτιλιάρισμα ή βλάβες αυτοκινήτων. Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να διακριθούν σε λίγα, ξεκάθαρα διακριτά σενάρια. Κάθε σενάριο θα πρέπει να περιγράφεται με βάση [1]: α) Τον στόχο του ακροατηρίου πχ ένα άτομο η όλα τα άτομα στη σήραγγα, β) τη θέση των ακροατών στη σήραγγα, πχ στο αυτοκίνητο η δίπλα από το όχημα, γ) ταχύτητα κυκλοφορίας, πχ υψηλή ταχύτητα κυκλοφορίας στην περίπτωση ενός χαλασμένου αυτοκινήτου στη βοηθητική λωρίδα, η αργή κίνηση η ακίνητη κυκλοφορία όταν υπάρξει μποτιλιάρισμα, δ) αν είναι ενεργοποιημένο η απενεργοποιημένο το σύστημα εξαερισμού.

Για καθένα από αυτά τα σενάρια θα πρέπει να ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις της ποιότητας μετάδοσης ομιλίας. Οι δύο ποιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευκρίνεια της ομιλίας, είναι η ακουστική της σήραγγας και το φάσμα θορύβου περιβάλλοντος των οχημάτων και του συστήματος εξαερισμού.

2.1.2 Ανακλάσεις και Αντήχηση

Οι ακουστικές συνθήκες στις οδικές σήραγγες, είναι γενικώς πολύ εχθρικές στα ηχο-συστήματα δημοσίων διευθύνσεων και ανακοινώσεων (PA). Η ευκρίνεια της ομιλίας συνήθως θυσιάζεται σε μεγάλο βαθμό. Οι ανακλάσεις δύσκολα εξασθενούν, λόγω των χαμηλών συντελεστών απορρόφησης των ακουστικά σκληρών τοιχωμάτων, από τις εσωτερικές επιφάνειες της σήραγγας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν μεγάλο χρόνο αντήχησης και υψηλές στάθμες αντήχησης. Με αποτέλεσμα ο λόγος μεταξύ της στάθμης του απευθείας πεδίου από το ηχείο και του διεγερμένου ήχου του πεδίου αντήχησης να είναι πολύ φτωχός. Επιπλέον, ο μεγάλος χρόνος αντήχησης συμβάλει σε υψηλές στάθμες θορύβου φόντου στη σήραγγα. Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν καταστροφική επίδραση στην ευκρίνεια της ομιλίας [1].

Σε μία συνηθισμένη οδική σήραγγα με σκληρές επιφάνειες (μπετόν η αρμούς στα τοιχώματα η στην οροφή, άσφαλτος και μπετόν στην επιφάνεια του δρόμου) ο χρόνος αντήχησης είναι συνήθως πολύ μεγάλος και έχει εύρος από λίγα δευτερόλεπτα στις υψηλότερες συχνότητες έως πάνω από 10 δευτερόλεπτα στις χαμηλές με ενδιάμεσες μπάντες. Ο χρόνος αντήχησης και οι στάθμες αντήχησης μπορούν να μειωθούν λαμβάνοντας ακουστικά μέτρα, όπως προσθέτοντας απορρόφηση στις επιφάνειες. Ωστόσο, αυτά τα μέτρα συχνά κοστίζουν και δεν είναι πρακτικά. Επομένως η εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθούν υψηλής κατευθυντικότητας ηχεία.

2.1.3 Θόρυβοι φόντου

Όπως συζητήθηκε, η ευκρίνεια της ομιλίας των ηχο-συστημάτων σε σήραγγες κινδυνεύει από υψηλές στάθμες θορύβου περιβάλλοντος. Οι δύο κύριες πηγές θορύβου στις σήραγγες είναι ο θόρυβος των οχημάτων και ο θόρυβος εξαερισμού. Οι ακουστικές στάθμες που προκαλούνται από τους έλικες εξαερισμού μπορεί να είναι μεγάλες (έως 100 dBA), όπου οι στάθμες εξαρτώνται από την θέση του εξαερισμού και το είδος του ανεμιστήρα [1].

Ο θόρυβος των οχημάτων κυρίως καθορίζεται από την ταχύτητα κυκλοφορίας και προκαλείται από τους κινητήρες των οχημάτων και τον θόρυβο ελαστικών. Ο πίνακας 4 απεικονίζει κάποιες συνηθισμένες στάθμες μπαντών οκτάβας για διάφορες πηγές θορύβου, οι μετρήσεις έγιναν στη σήραγγα Schipholtunnel στην Ολλανδία [10]:

Πηγή Θορύβου	SPL [dB]							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz	Σύνολο (A-Weighted)
Γρήγορη Κυκλοφορία (100 Km/h)	90	85	88	92	88	74	62	95
Ανεμιστήρες w/o εκτροπές	89	86	86	82	81	85	83	91
Ανεμιστήρες w/ εκτροπές	94	94	94	91	84	85	82	96

Πίνακας 4. Κάποιο μετρούμενο φάσμα θορύβου στη σήραγγα Schipholtunnel στην Ολλανδία.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι με σκοπό να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικά υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο, απαιτούνται υψηλές στάθμες ομιλίας. Από την άλλη πλευρά, οι υψηλές στάθμες σήματος δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 105 dBA με σκοπό την αποφυγή ζημιάς στην ακοή των ακροατών. Αυτοί οι κανόνες θέτουν υψηλές απαιτήσεις στην ποιότητα των ηχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά της μέγιστης μακροχρόνιας ακουστικής στάθμης (RMS SPL) και η παραμόρφωση είναι πολύ σημαντικά. Συγκεκριμένα η παραμόρφωση (distortion), προκαλείται από το ηχο-σύστημα. Η παραμόρφωση μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στο πόσο εύκολο είναι να κατανοήσει κανείς ένα ακουστικό μήνυμα μέσα στη σήραγγα. Πολλοί συμβατικοί σχεδιασμοί χοανών έχουν υψηλές στάθμες παραμόρφωσης, επομένως είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν χοάνες χαμηλής παραμόρφωσης.

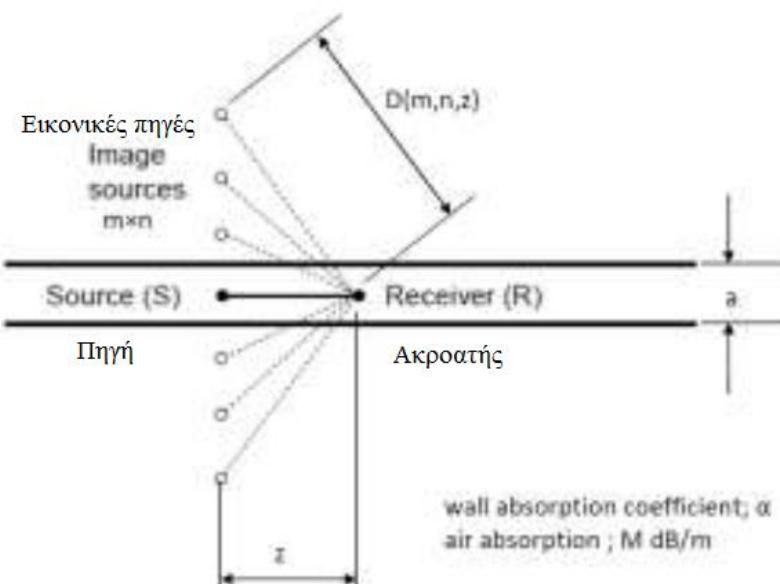
2.2 Προσδιορισμός της αντήχησης σε σήραγγες

Ο Kang [11] χρησιμοποιεί μία μέθοδο εικόνας-πηγής για να προβλέψει τον χρόνο αντήχησης ενός μεγάλου χώρου. Αυτό είναι ένα δισδιάστατο μοντέλο όπου θεωρείται, ότι οι ανακλάσεις του ήχου από τα τοιχώματα της σήραγγας είναι καθαρά κατοπτρικές και η ροή της ακουστικής ενέργειας προχωράει συνεχώς κάτω στη σήραγγα, χωρίς αντιστροφή. Η ενέργεια απορροφάτε: α) με κάθε διαδοχική ανάκλαση και β) με την απόσταση διαμέσου της απορρόφησης από τον αέρα. Η στάθμη ακουστικής πίεσης μειώνεται γραμμικά με την απόσταση από την πηγή. Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από την διατομή της γεωμετρίας και τους συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών, αλλά όχι από το μήκος της σήραγγας. Αυτό το μοντέλο είναι σαφώς διαφορετικό από ένα μοντέλο δωματίου (room model), όπου εκεί οι ανακλάσεις είναι τρισδιάστατες και ένα σταθερό διάχυτο ακουστικό πεδίο δημιουργείται κατά μήκος του χώρου.

Η ανάλυση ξεκινάει με την δημιουργία ενός συνόλου ακουστικών εικόνων που είναι οι ανακλάσεις της πηγής κατά μήκος των τοιχωμάτων της σήραγγας. Οι ακουστικές εικόνες θεωρητικά απλώνονται σε άπειρες ορθογώνιες κατευθύνσεις στον άξονα της σήραγγας. Για υπολογιστικούς σκοπούς αυτό περιορίζεται σε έναν πίνακα $[m \times n]$ εικόνων.

Το σχήμα 17 απεικονίζει μια κάθετη τομή μιας σήραγγας ύψους a με n εικόνες που επεκτείνονται κάθετα και στις δύο πλευρές μίας παντοκατευθυντικής πηγής S . Παρομοίως υπάρχει ένα ορθογώνιο m εικόνων που επεκτείνεται οριζόντια και στις δύο πλευρές της σήραγγας.

Οι ποιο απομακρυσμένες εικόνες συμβάλλουν στην ακουστική ενέργεια στον ακροατή λίγο αργότερα από τις πλησιέστερες εικόνες. Στις χαμηλές ακουστικές συχνότητες όπου ο χρόνος αντήχησης είναι μεγάλος, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί ένας μεγαλύτερος αριθμός εικόνων.



Σχήμα 17. Σύστημα εικόνων και ακτινών για μία σημειακή πηγή σε σήραγγα

Οι αποστάσεις $D(m,n,z)$ χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τον χρόνο άφιξης της ακουστικής ενέργειας $E(m,n,z)$ στον ακροατή που βρίσκεται σε μία απόσταση z από την πηγή. Αν θεωρηθεί ότι ο απευθείας ήχος φτάνει σε χρόνο $t=0$ και η άφιξη της ακουστικής ενέργειας από τις εικόνες σε χρόνο:

$$t(m,n,z) = \frac{D(m,n,z)}{c} - \frac{z}{c} \quad (1)$$

Μεταξύ του χρόνου t και $t + \delta t$ η ακουστική ενέργεια που δημιουργείται από την εικόνα πηγής (m,n) στον ακροατή είναι:

$$E(m,n,z) = \left(\frac{K_w}{D^2(m,n,z)} \right) e^{-MD(m,n,z)} (1 - \alpha)^{|m|+|n|} \quad (2)$$

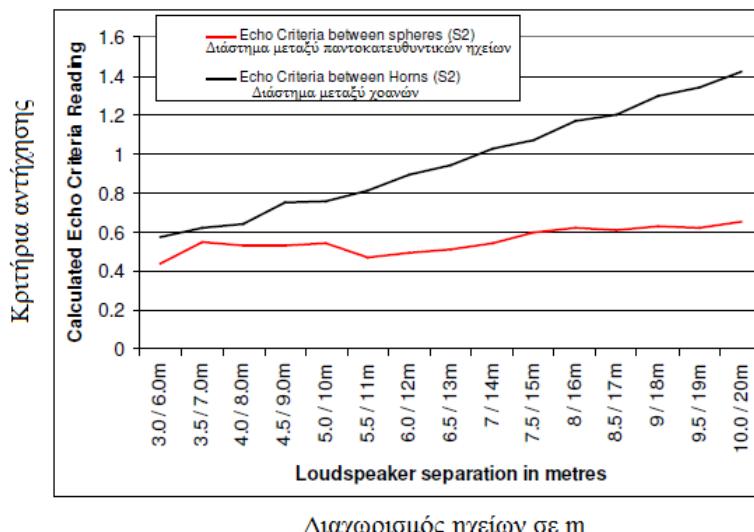
Το K_w είναι μία σταθερά που σχετίζεται με την ακουστική ισχύ της πηγής. Η εξίσωση 2 αντιπροσωπεύει: α) τις εξασθενίσεις λόγω της απορρόφησης των τοιχωμάτων όπου ο συντελεστής απορρόφησης α θεωρείται ομοιόμορφος και β) την εξασθένηση μέσω του αέρα M dB/m.

Μια σύντομου χρόνου, ισοδύναμη συνεχή ακουστική στάθμη της ενέργειας σε σχέση με τον ακροατή είναι:

$$L(t,z) = 10 \log_{10} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E(m,n,z) \quad (3)$$

2.3 Κριτήρια αντήχησης

Μια μέτρηση της ποιότητας του ήχου είναι τα κριτήρια αντήχησης που έχουν αναπτυχθεί από τους Dietsch και Kraak [12], [13], [14]. Το σχήμα 18 απεικονίζει γραφικά τα αποτελέσματα για Παντοκατευθυντικά ηχεία και για ζεύγη χοανών αντίθετων κατευθύνσεων [6]. Απεικονίζεται ότι στη διάταξη των χοανών που είναι σε ζεύγη με αντίθετες κατευθύνσεις (μαύρη καμπύλη) παράγονται αυξημένες αντηχήσεις μεταξύ των ηχείων σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 14m.

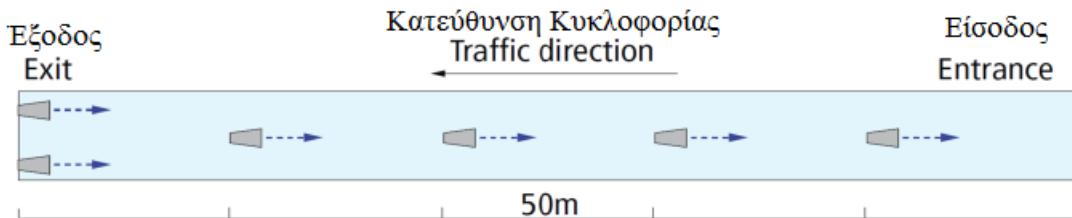


Σχήμα 18. Κριτήρια αντήχησης σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των ηχείων.

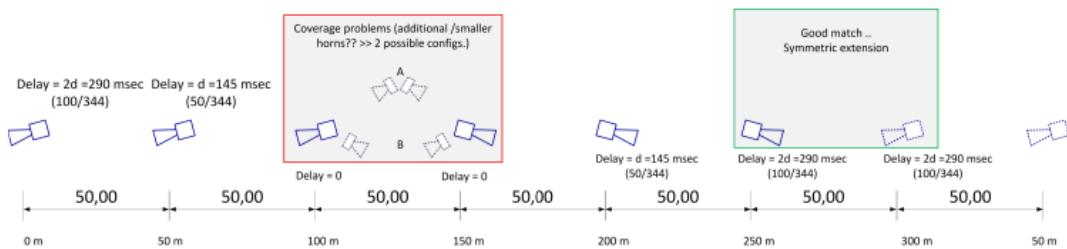
2.4 Ευθυγράμμιση χρόνων – Delay

Γενικώς, οι γραμμές καθυστέρησης χρησιμοποιούνται σε ηχο-συστήματα ανακοινώσεων με σκοπό να ευθυγραμμίσουν όλες τις ακουστικές πηγές, αποσκοπώντας στην δημιουργία μιας συμφασικής διέγερσης ήχου. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις που παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που εφαρμόζονται σε διάφορα σενάρια χρήσης, συμπεριλαμβάνοντας και τα ηχο-συστήματα για οδικές σήραγγες. Ιδανικά, οι επακόλουθες καθυστερήσεις μπορούν να ρυθμιστούν με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ομοιόμορφο (επίπεδο) μέτωπο κύματος, ώστε να παραχθεί μέγιστη ευκρίνεια της ομιλίας [15] [16].

Ωστόσο, στην περίπτωση ενός ηχο-συστήματος μεγάλης απόστασης που έχει σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιείται κυρίως ως ένα σύστημα έκτακτων ανακοινώσεων, αυτή προσέγγιση υστερεί από το γεγονός ότι οι εξαναγκασμένες καθυστερήσεις ανέρχονται γραμμικά, έτσι ώστε υψηλές τιμές καθυστέρησης να ορίζονται στις μεγάλες αποστάσεις. Επομένως, αυτή η προσέγγιση δεν είναι κατάλληλη στη περίπτωση μιας μεγάλης σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψη ότι τεράστιες καθυστερήσεις στην μετάδοση προειδοποιητικών σημάτων μπορεί να είναι κρίσιμες για την ασφάλεια των επιβατών (πχ για ένα delay 6 km το αποτέλεσμα μέγιστης καθυστέρησης 17 sec είναι πολύ προβληματικό). Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές ζώνες, όπου μπορεί να εφαρμοστεί πανομοιότυπη διάταξη καθυστέρησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα απεικονίζονται στα σχήματα 19 και 20 [16], [2].



Σχήμα 19. Διαδοχική καθυστέρηση μεταξύ των ηχείων (επαναλαμβάνεται σε κάθε ζώνη) [1], [2]



Σχήμα 20. Συμμετρική / “Κυκλική” καθυστέρηση μεταξύ των ηχείων (αναδιαμορφώνεται σε κάθε ζώνη)

Στη πρώτη περίπτωση (σχήμα 19), όλα τα ηχεία έχουν την ίδια κατεύθυνση (που είναι αντίθετη από το ρεύμα κυκλοφορίας), ενώ οι τιμές καθυστέρησης εξαναγκάζονται να επανεκκινούν στην αρχή της κάθε ζώνης. Αυτή η διάταξη είναι ιδανική στη περίπτωση

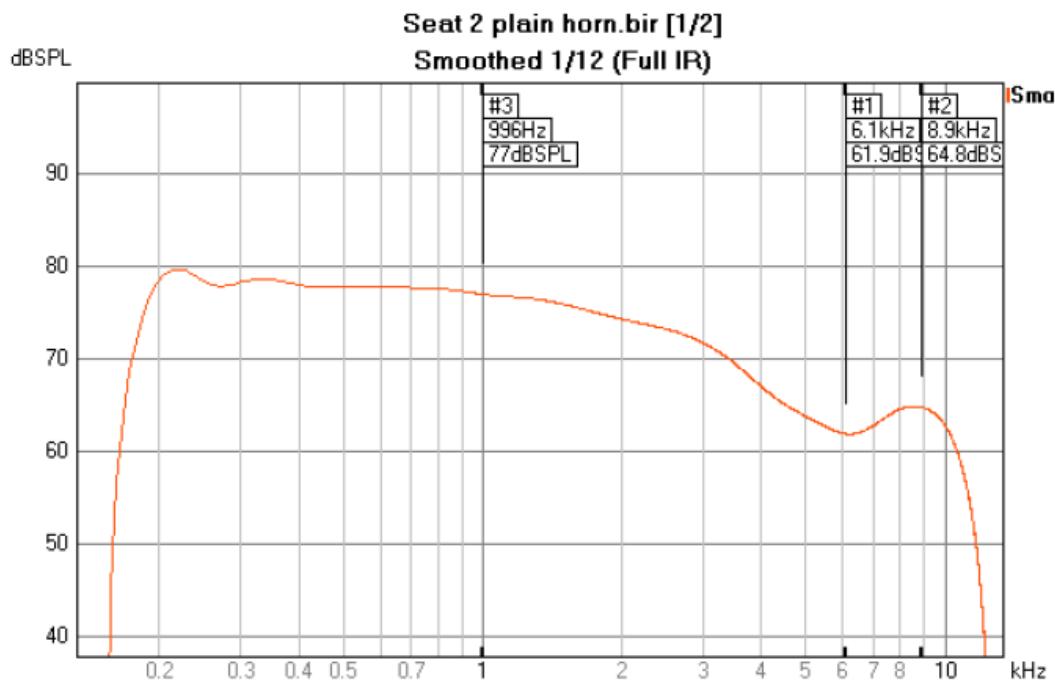
όπου το μήκος της κάθε ζώνης ταιριάζει με τα φυσικά άκρα της κάθε επιμέρους σήραγγας, το οποίο δεν είναι πολύ πιθανό. Ως αποτέλεσμα, ανεπιθύμητες (αργοπορημένες) επιδράσεις αναμένονται στο ξεκίνημα της κάθε ζώνης, όπου η διαδοχική καθυστέρηση σταματάει να επαναλαμβάνεται. Για αυτόν τον λόγο, μια επιπλέον χοάνη συνήθως τοποθετείται στην έξοδο, ώστε οι ήχοι που εκπέμπονται από την επόμενη ζώνη να μην ακουστούν, λόγο της σημαντικά μειωμένης στάθμης (εναλλακτικά, μια εκπομπή υψηλότερης ακουστικής στάθμης μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας μια μονή χοάνη). Συνολικά, αυτή η μέθοδος απαιτεί πολλές γραμμές καθυστέρησης και τα σχετικά κανάλια ενίσχυσης (6 γραμμές καθυστέρησης και 6 κανάλια ενίσχυσης), ενώ είναι ποιο πιθανό ότι απαιτούνται επιπλέον ηχεία (7 αντί για 6). Επίσης, οι μέγιστες τιμές καθυστέρησης πλησιάζουν στο 1 sec, που αυτός ο χρόνος μπορεί να είναι κρίσιμος η να μην επιτρέπεται για λόγους ασφαλείας.

Μια άλλη λύση είναι να αναπτυχθεί ένα είδος συμμετρικών/ “κυκλικών” τιμών καθυστέρησης μεταξύ των ηχείων, τα οποία είναι οργανωμένα πάλι σε συμμετρικές ζώνες, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 20. Ενώ η προτεινόμενη αυτή διάταξη παρέχει καλό ταίριασμα στο τέλος της κάθε ζώνης (θεωρώντας ότι πανομοιότυπες τιμές εμφανίζονται στην αρχή της επόμενης ζώνης), ένα πρόβλημα προκύπτει σχετικά με την επαρκή κάλυψη ακουστικής στάθμης στη μεσαία περιοχή, δηλαδή μεταξύ των δύο χοανών που έχουν μηδενική καθυστέρηση. Συγκεκριμένα, παράγονται ανεπαρκές ακουστικές στάθμες σε θέσεις 100-150m, από τη στιγμή που κανένα από τα ηχεία που έχουν αντίθετες κατευθύνσεις δεν προσανατολίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές, έτσι το ηχο-σύστημα γίνεται ευάλωτο σε ανεπιθύμητες (αργοπορημένες) επιδράσεις από τις γειτονικές χοάνες. Μια προφανή λύση αυτού του προβλήματος, θα ήταν η τοποθέτηση κάποιων επιπλέον ηχείων σε αυτήν την “ήσυχη ζώνη”, με δύο εναλλακτικές διατάξεις να απεικονίζονται στο σχήμα 20. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της προσέγγισης, συμπεριλαμβάνεται το γεγονός ότι ο αριθμός των γραμμών καθυστέρησης και αντίστοιχων καναλιών ενίσχυσης παραμένει μικρός (3), ενώ τα απαιτούμενα επιπλέον ηχεία έχουν μικρότερο κόστος, δηλαδή μικρότερη ισχύ, ευαισθησία και κατευθυντικότητα. Επίσης, η μέγιστη τιμή καθυστέρησης διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (~290 msec). Από την άλλη πλευρά, μπορεί να εμφανιστούν δυσκολίες σχετικά με την πολυπλοκότητα και την συνδεσμολογία της εγκατάστασης. Ένα άλλο αρνητικό είναι, ότι οι ζώνες σε κάθε κατεύθυνση κυκλοφορίας μπορεί να χάσουν την αυτονομία τους (πχ λόγω της ανάγκης ομαδοποίησης των ηχείων και των καναλιών ενίσχυσης που έχουν παρόμοιες τιμές καθυστέρησης).

2.5 Πιστότητα ακουστικών πηγών

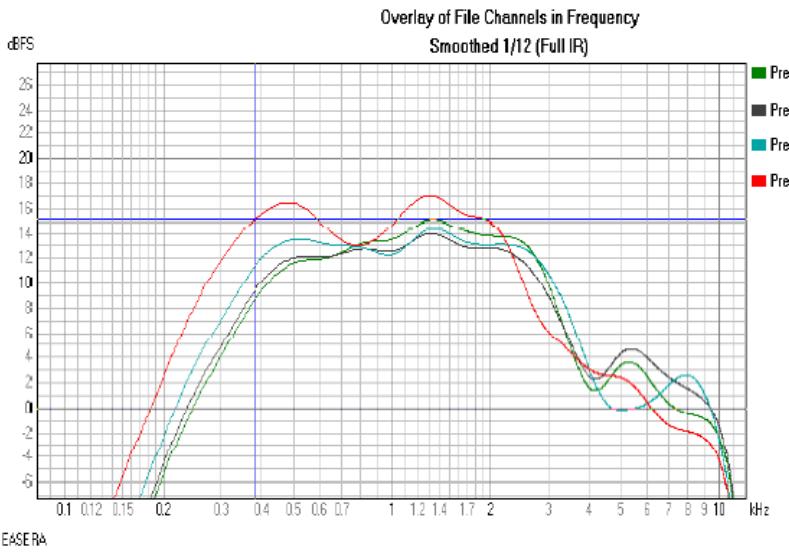
Το σχήμα 21 απεικονίζει μία καμπύλη απόκρισης συχνότητας από μια ευρέως χρησιμοποιημένη χοάνη που προέρχεται εξάγοντας μια κρουστική απόκριση από το λογισμικό Ease στο Easera [6]. Εδώ πέρα φαίνεται ότι τα δεδομένα του Ease συγκεντρώθηκαν από ομαλό ροζ θόρυβο 1/3 μπαντών οκτάβας, γιατί το σχήμα της καμπύλης απόκρισης είναι ασυνήθιστα ομαλό για απόκριση ηχείου που επιλύθηκε στο 1/12^o οκτάβας. Φαίνεται ωστόσο ότι η απόκριση του ηχείου αποσβένει περίπου στα 24 dB ανά οκτάβα κάτω από τα 200 Hz και ότι η απόκριση των υψηλών συχνοτήτων μειώνεται κατά περίπου 18 dB στα 6 KHz. Τα δεδομένα των κατασκευαστών από τα

εγχειρίδια για το συγκεκριμένο προϊόν σε υψηλότερη ανάλυση, απεικονίζουν μια αλλαγή 30 dB στην έξοδο από μια κορυφή περίπου στα 1600 Hz έως ένα χαμηλό περίπου στα 8 KHz. Η μέτρηση της αρσενικής φωνής STI, περιλαμβάνει τις μπάντες οκτάβας των 125 Hz και 8 KHz τις οποίες τα κοινά ηχεία χοάνης δεν τις αναπαράγουν καλά. Επιπλέον η διαδικασία της ισοστάθμισης ενός εύρους 30 dB σε απόκριση σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα, δημιουργεί ακραίες απαιτήσεις στο δυναμικό εύρος του συστήματος.



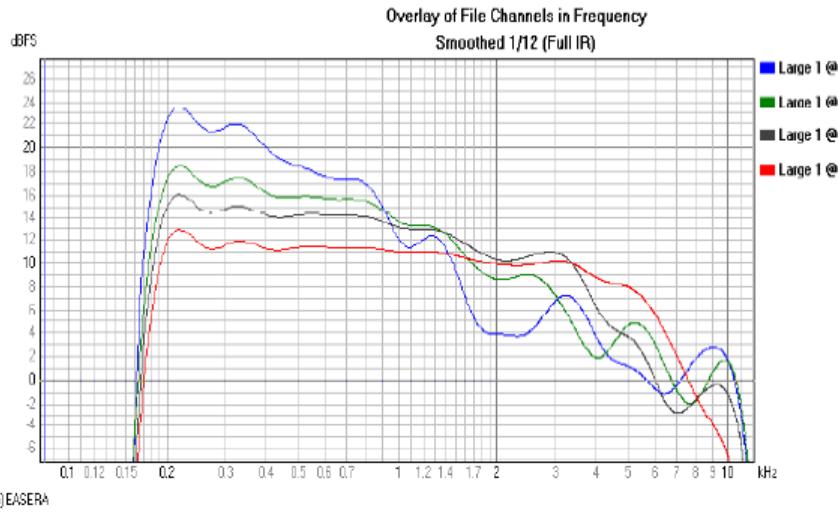
Σχήμα 21. Η απόκριση συχνότητας μιας διαδεδομένης χοάνης σε εμφάνιση στο Easera από το Ease/ Συνάρτηση μεταφοράς κρουστικής απόκρισης στο Easera.

Μια απόκριση συχνότητας που είναι επίπεδη εντός μερικών dB κατά μήκος του πεδίου ενδιαφέροντος, και κατά μήκος του εύρους των αποστάσεων ακρόασης είναι απλά ανεπιθύμητη διότι: a) αν υπάρχουν μεταβολές των 30 dB, δεν μπορούν να αντισταθμιστούν χωρίς την υπερβολική πίεση της δυναμικής του συστήματος και b) η απόκριση αλλάζει με την απόσταση. Τα σχήματα 22, 23, 24 απεικονίζουν μία σύγκριση αποκρίσεων συχνοτήτων που μετρήθηκαν σε τέσσερις ομάδες αποστάσεων από το ηχείο, για τρία ηχεία που είναι σχεδιασμένα για ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων σε σήραγγες. Ισοσταθμίζοντας την απόκλιση μιας απόκρισης συχνότητας απαιτείται ένα μέρος μέσου όρου για ένα επίπεδο συνολικό αποτέλεσμα στα κέντρα μπάντες οκτάβας του ενδιαφέροντος.



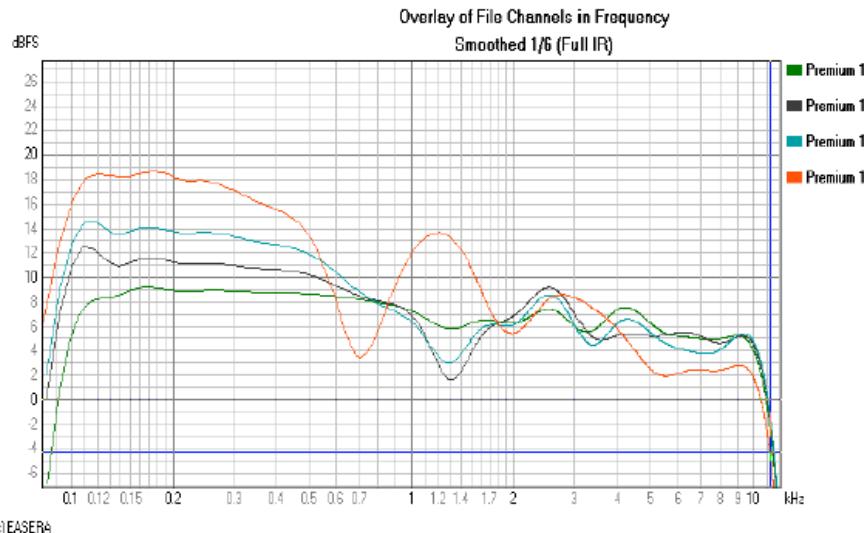
(c)EASERA

Σχήμα 22. Μεγάλο ηχείο χοάνης από fiberglass με πολύ καλό λόγο μπροστά προς πίσω (front to back ratio).



(c)EASERA

Σχήμα 23. Μεγάλη κωνική χοάνη, συνηθισμένη γενικού τύπου.



(c)EASERA

Σχήμα 24. Μεγάλο ηχείο χοάνης fiberglass, μεγάλης ισχύος.

2.6 Βελτίωση του STI

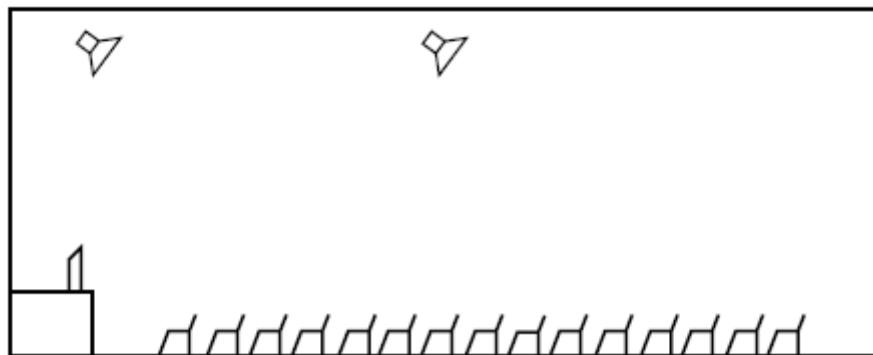
Ο Kuttruff [14] εξηγεί ότι εκπέμποντας όσο το δυνατόν περισσότερη ακουστική ενέργεια στις πρώιμες ανακλάσεις, η στις αρχικές αφίξεις στον ακροατή, αυξάνεται το STI. Ενώ οι αργοπορημένες αφίξεις του ήχου είναι “λερωμένες” με επικρατούσα αντήχηση. Αν ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI) σε μία υπάρχουσα σήραγγα θεωρείται πολύ χαμηλός, οι παράγοντες που μπορούν να βελτιωθούν είναι: Α) Η ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης στα ηχεία αποτρέποντας την υπερφόρτωση (overdriving) της πηγής ανακοινώσεων. Β) Η επιλογή ηχείων με επίπεδη πιο ομοιόμορφη απόκριση μεταξύ 125 Hz και 8 KHz. Γ) Θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλής κατευθυντικότητας ηχεία η γραμμικά array σε μικρότερο χώρο, με σκοπό την μεγιστοποίηση του απευθείας ήχου που καταλήγει στον ακροατή. Δ) Τα ηχεία θα πρέπει να είναι προσανατολισμένα κατά μήκος της σήραγγας και πάνω στον δρόμο. Ε) Η μετακίνηση των ηχείων κάτω από το ύψος του αυτιού του ακροατή, αυξάνει την πρώιμη μη ανακλώμενη ενέργεια που φτάνει στον ακροατή. Στη φάση σχεδιασμού της σήραγγας μπορεί να είναι εφικτό να γίνουν σημαντικές μειώσεις στον χρόνο αντήχησης μέσω της κατάλληλης επιλογής επιφανειών.

Η αντικατάσταση της πυκνής ασφάλτου με άσφαλτο ανοικτής κυψέλης επίσης θα βελτιώσει σημαντικά την απορρόφηση και κατά συνέπεια την μείωση της αντήχησης στην κρίσιμη περιοχή της ομιλίας στα 800-1 KHz. Ωστόσο, η άσφαλτος ανοικτής κυψέλης δεν προτιμάται διότι θα συγκρατήσει το υγρό καύσιμο στην περίπτωση διαρροής και καύσης. Επίσης υπάρχει μια τάση κατασκευής της επιφάνειας του δρόμου από αυλακωτό σκυρόδεμα. Η μείωση θορύβου από τους έλικες του εξαερισμού έχει επίσης μεγάλη σημασία. Δρομείς με πολλαπλούς έλικες με μικρή ταχύτητα (παρά ένας μονός έλικας σε πλήρη ταχύτητα) μπορούν να δώσουν την ίδια αεροδυναμική ώθηση αλλά με μειωμένες στάθμες θορύβου.

2.7 Κατανεμημένα συστήματα

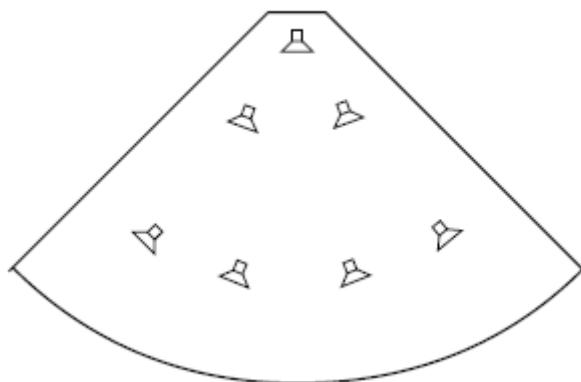
Τα κατανεμημένα συστήματα χρησιμοποιούνται σε χώρους με δύσκολη ακουστική όπου η ευκρίνεια της ομιλίας δεν μπορεί να επιτευχθεί με οποιαδήποτε άλλη τεχνική. Τα κατανεμημένα συστήματα αυξάνουν το $\%AL_{CONS}$ τοποθετώντας τις ακουστικές πηγές του απευθείας ήχου ποιο κοντά στους ακροατές [17]. Ως συνέπεια οι στάθμες λειτουργίας των πηγών μπορούν να μειωθούν μειώνοντας έτσι την συνολική ακουστική ισχύ που διαχέεται στον χώρο ακρόασης. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι μια αύξηση στον λόγο της απευθείας ακουστικής στάθμης προς την στάθμη του πεδίου αντήχησης, που με την σειρά του αυξάνει την ευκρίνεια.

Τα κατανεμημένα συστήματα μπορούν να λάβουν πολλές μορφές με βάση τις συνθήκες του συγκεκριμένου χώρου που εμπλέκεται. Σε χώρους όπου η περιοχή των καθισμάτων είναι μεγάλη σε μήκος με μικρό πλάτος, η πρώτη σκέψη είναι, ένα γραμμικό σύστημα (inline system) δύο η περισσοτέρων πανομοιότυπων ηχείων μετατοπισμένα κατά μήκος του κεντρικού άξονα και να λειτουργούν με καθυστέρηση σήματος. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στο σχήμα 25. Όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αυτή η διάταξη προσφέρει το πλεονέκτημα της διατήρησης της ταυτότητας της πηγής.



Σχήμα 25. Γραμμικό array ανύψωσης

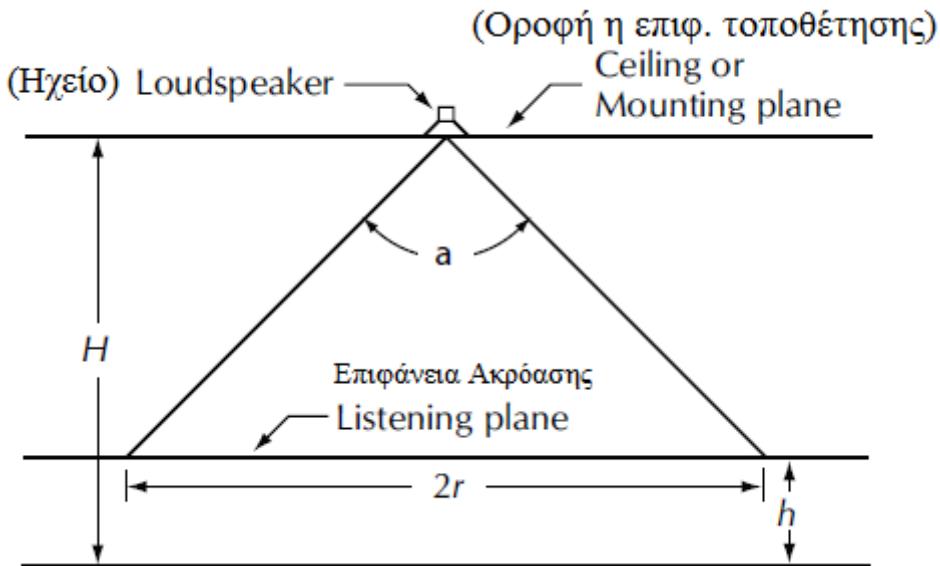
Μια σχετική αντιμετώπιση είναι αυτή που εφαρμόζεται σε περιοχές ακρόασης που έχουν σχήμα ανεμιστήρα και συχνά εμφανίζεται σε κάποιες κατασκευές εκκλησιών. Συχνά σε αυτή την περίπτωση, μια μεταβλητή λύση, αποτελείται από ένα σύστημα κεντρικής πηγής στο όποιο συμμετέχουν δορυφορικά συστήματα μετατοπισμένα κατά μήκος διαδοχικών ακτινικών τόξων. Ο προσδιορισμός της πηγής ακόμα διατηρείται όταν κατάλληλα σήματα καθυστέρησης εφαρμόζονται στα δορυφορικά ηχεία. Μια συνηθισμένη κάτοψη απεικονίζεται στο σχήμα 26. Για ισοδύναμη περιοχή κάλυψης από κάθε δορυφορικό ηχείο, ο αριθμός των μονάδων που χρησιμοποιούνται πρέπει να αυξηθεί όπως το τετράγωνο της απόστασης (ακτίνας) από την αρχή του ανεμιστήρα.



Σχήμα 26. Μια κάτοψη ενός δορυφορικά κατανεμημένου συστήματος

Τα ποιο συνηθισμένα κατανεμημένα συστήματα είναι αυτά του μοτίβου των υπερυψωμένων ηχείων. Οι σημαντικοί παράγοντες για τέτοια συστήματα είναι η γεωμετρία του μοντέλου, η γωνία κάλυψης του επιμέρους ηχείου, η κάθετη απόσταση μεταξύ της θέσης του ηχείου και της επιφάνειας ακρόασης και η επικάλυψη του μοτίβου κάλυψης του ηχείου. Το σημείο εκκίνησης στο σχεδιασμό ενός υπερυψωμένου κατανεμημένου συστήματος, είναι το "αποτύπωμα" που έχει ένα επιμέρους ηχείο στην επιφάνεια ακρόασης. Τα περισσότερα ηχεία που χρησιμοποιούνται σε υπερυψωμένα συστήματα έχουν διαγράμματα κάλυψης που παρουσιάζουν κυλινδρική

συμμετρία. Το ίχνος στην επιφάνεια ακρόασης είναι ένας κύκλος που η ακτίνα του μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια του σχήματος 27.

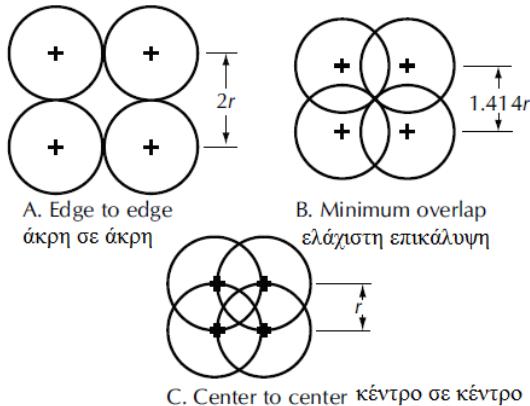


Σχήμα 27. Ένα μονό ηχείο σε ένα υπερυψωμένο κατανεμημένο σύστημα.

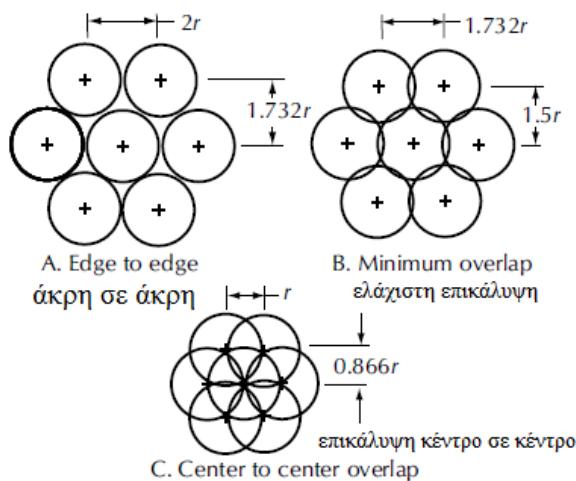
Τα μεγέθη των ηχείων που χρησιμοποιούνται σε υπερυψωμένα συστήματα είναι συνήθως 5 ιντσών, 8 ιντσών, 8 ιντσών ομοαξονικά και 12 ιντσών ομοαξονικά. Η γωνία κάλυψης α , στο εύρος κρίσιμης ομιλίας για τις 5 ίντσες καθώς και για τις δύο ομοαξονικές μονάδες συνήθως λαμβάνεται ως 90° , ενώ των 8 in που δεν είναι ομοαξονική είναι κοντά στις 60° . Η ακτίνα του κυκλικού ίχνους ενός μονού ηχείου στην επιφάνεια ακρόασης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R = (H - h)\tan(\alpha/2) \quad (4)$$

Τα μοτίβα διάταξης των ηχείων βασίζονται στις γεωμετρικές ιδιότητες δύο κανονικών πολυγώνων. Οι τοπολογικές ιδιότητες υπαγορεύουν ότι τα επιλεγμένα κανονικά πολύγωνα πρέπει να είναι είτε τετράγωνα είτε εξάγωνα. Η εφαρμογή που εμπλέκει το τετράγωνο είναι απλούστερη, ενώ αυτή που εμπλέκει το εξάγωνο απαιτεί μια μεγαλύτερη πυκνότητα ηχείων που ακολουθείται από πιο ομοιόμορφη κάλυψη. Και στις δύο περιπτώσεις μια επιλογή πρέπει να γίνει ως προς τον βαθμό του μοτίβου επικάλυψης του ηχείου. Η επιλογή συνήθως γίνεται μεταξύ των τριών διαγραμμάτων που απεικονίζονται στα σχήματα 28 και 29 που αφορούν το τετράγωνο και εξάγωνο αντίστοιχα.



Σχήμα 28. Επιλογές αλληλοεπικάλυψης για ένα μοτίβο βασισμένο σε τετράγωνο κύτταρο



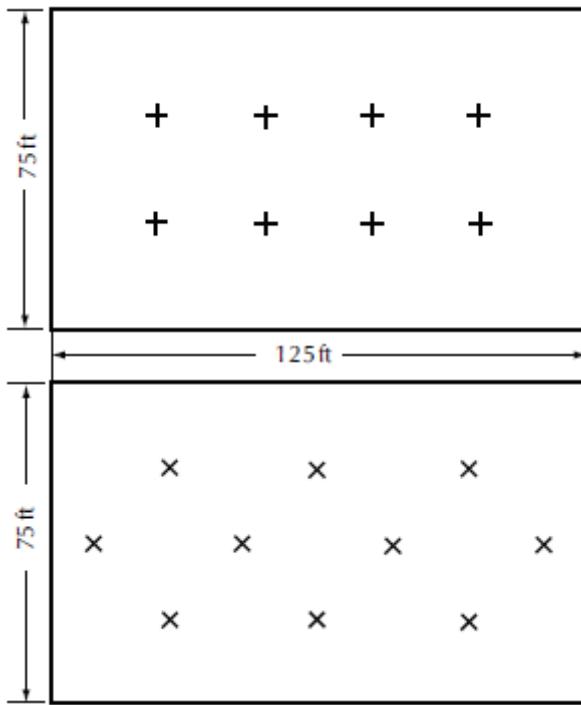
Σχήμα 29. Επιλογές αλληλοεπικάλυψης βασισμένες σε εξαγωνικό κύτταρο

Οι διαστάσεις του βασικού κυττάρου εξαρτώνται από την ακτίνα του διαγράμματος κάλυψης του επιμέρους ηχείου και την επιλογή της αλληλοεπικάλυψης. Η επιλογή από άκρη σε άκρη (Edge to edge) είναι η ποιο οικονομική σε σχέση με τον αριθμό των ηχείων που τελικά απαιτούνται ενώ αφήνουν κενά στην συνολική κάλυψη. Μια ποιοτική εγκατάσταση χρησιμοποιεί είτε ελάχιστη αλληλοεπικάλυψη, η αλληλοεπικάλυψη κέντρο σε κέντρο (center to center overlap). Από τα δύο βασικά κύτταρα, η εξαγωνική δομή παρέχει μεγαλύτερη πυκνότητα ηχείων όπως απεικονίζεται στο παρακάτω παράδειγμα [17].

Μια μεγάλη αίθουσα συνεδριάσεων έχει πλάτος 75 ft (πόδια) και μήκος 125 ft με το ηχείο να είναι τοποθετημένο σε μία επιφάνεια που βρίσκεται 25 ft πάνω από το επίπεδο του αυτιού. Τα ηχεία που θα χρησιμοποιηθούν έχουν ονομαστική γωνία κάλυψης, $\alpha = 90^\circ$. Μια εφαρμογή της εξίσωσης 4 δείχνει ότι: $r = 25$ ft. Λαμβάνοντας υπόψη την ομοιομορφία της κάλυψης ως κύριο στόχο, αποφασίζεται εξαρχής να χρησιμοποιηθεί η επιλογή αλληλοεπικάλυψης κέντρο σε κέντρο.

Σε αυτή την περίπτωση, η διάσταση ενός τετράγωνου κυττάρου είναι 25 πόδια. Οι διαστάσεις ενός εξαγωνικού κυττάρου θα είναι 25 πόδια και 21.65 πόδια.

Μοτίβα διάταξης δημιουργούνται για όλα τα βασικά κύτταρα. Μια πιθανή διάταξη στην οποία η συμμετρία είναι εξασφαλισμένη, αποτελείται από την τοποθέτηση του επιλεγμένου βασικού κυττάρου στο κέντρο του χώρου και την τοποθέτηση και/ή την επικάλυψη επιπλέον κυττάρων μέχρι το σημείο όπου το συνολικό περίγραμμα παραμένει εντός των ορίων του χώρου ακρόασης. Το σχήμα 30 απεικονίζει δύο πιθανές λύσεις που λαμβάνονται όταν χρησιμοποιούνται τετράγωνα κύτταρα.

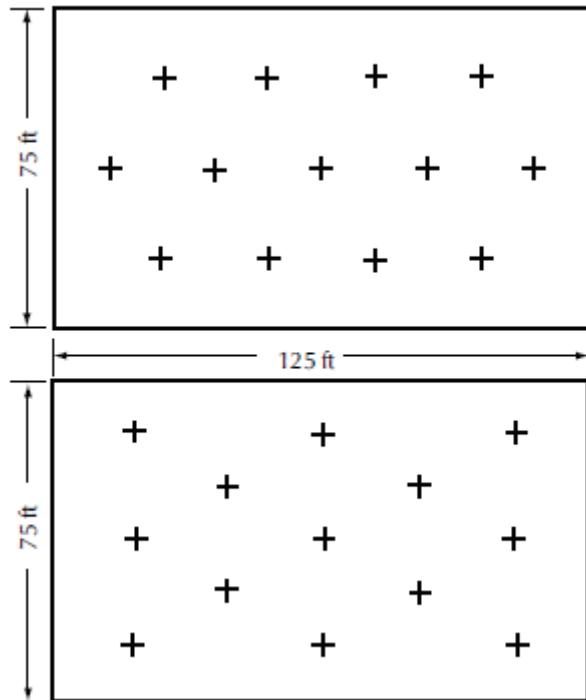


Σχήμα 30. Θέσεις ηχείων που χρησιμοποιούνται τετράγωνα κύτταρα.

Στην πρώτη περίπτωση το τετράγωνο κύτταρο, στον κανονικό του προσανατολισμό, τοποθετείται στο κέντρο του χώρου ακρόασης και αντιγράφεται δύο φορές για ένα σύνολο τριών κυττάρων. Επιπλέον επαναλήψεις θα τοποθετήσουν τα ηχεία πάνω η παραπέρα από τα όρια. Αυτή η λύση εμπλέκει ένα σύνολο οκτώ ηχείων. Η δεύτερη λύση που παρουσιάζεται στο σχήμα 30 εμπλέκει έναν απλό επανα-προσανατολισμό του βασικού τετράγωνου κυττάρου. Σε αυτή τη περίπτωση το κύτταρο περιστρέφεται σε διαγώνια θέση.

Ξεκινώντας ξανά με ένα περιστρεφόμενο κύτταρο στο κέντρο, μόνο δύο επαναλήψεις είναι εφικτές, αποδίδοντας ένα σύνολο τριών κυττάρων όπως πριν. Σε αυτή τη περίπτωση, ωστόσο, ένα σύνολο 10 ηχείων θα γεμίσει τον χώρο βελτιώνοντας έτσι την ομοιομορφία στην κάλυψη. Το σχήμα 31 απεικονίζει τις δύο λύσεις που λαμβάνονται όταν το βασικό κύτταρο είναι ένα εξάγωνο. Η πρώτη λύση που απεικονίζεται στο σχήμα 31, ξεκινάει με ένα εξάγωνο κύτταρο κανονικού προσανατολισμού τοποθετημένο στο κέντρο. Τα κύτταρα αντιγράφονται και στα δεξιά και στα αριστερά αποδίδοντας συνολικά τρία κύτταρα. Αυτή η λύση δίνει ένα σύνολο δεκατριών θέσεων ηχείων. Αυτή είναι μία σημαντική βελτίωση στη κάλυψη, σε σύγκριση με τις λύσεις που βασίζονται σε τετράγωνο κύτταρο. Στη δεύτερη λύση που απεικονίζεται στο σχήμα 31, το κεντρικό κύτταρο είναι σε περιστρεφόμενη η διαγώνια θέση. Η αντιγραφή αυτού του σχήματος ξανά αποδίδει ένα σύνολο 13 ηχείων. Η δεύτερη λύση αποδίδει ελαφρώς

βελτιωμένη ομοιομορφία της κάλυψης κοντά στα όρια. Είναι πιθανόν να υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι για τη σχεδίαση σχημάτων των βασικών θέσεων των ηχείων. Ο Enerson [17] έχει διατυπώσει αλγορίθμους που είναι χρήσιμο βοήθημα στην οργάνωση των μοτίβων.



Σχήμα 31. Θέσεις ηχείων χρησιμοποιώντας εξάγωνα κύτταρα.

3. Σχεδίαση με βοήθεια προγράμματος

3.1 Εισαγωγή στο CATT Acoustic

Το CATT Acoustic είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει την διερεύνηση ακουστικών χαρακτηριστικών, σε αίθουσες ακρόασης. Τέτοια διερεύνηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των ηχητικών επιδόσεων ενός χώρου, η για την αξιολόγηση προτεινόμενων ακουστικών αλλαγών. Οι ακουστικές προβλέψεις είναι επίσης ένα αναγκαίο μέρος της σχεδίασης των ηχητικών συστημάτων (sound reinforcement system), από τη στιγμή που η επίδοση ενός ηχο-συστήματος δεν είναι ανεξάρτητη των χαρακτηριστικών του χώρου, στον οποίο τοποθετείται. Οι ακουστικές προσομοιώσεις απαιτούνε την μελέτη του χώρου σε τρείς διαστάσεις. Για αυτόν τον λόγο, οι μηχανικοί ακουστικής, παραδοσιακά κατασκεύαζαν μοντέλα φυσικής κλίμακας που ήταν μια επίπονη και ακριβή διαδικασία. Ο σκοπός ενός προγράμματος ακουστικής πρόβλεψης είναι να μεγεθύνει την διαδικασία συμπληρώνοντας το φυσικό μοντέλο με ένα εικονικό. Η ηχητική συμπεριφορά μπορεί να εξεταστεί χρησιμοποιώντας υπολογιστικούς αλγορίθμους, που προβλέπουν πως μπορεί να ανακλαστεί ο ήχος γύρω από έναν χώρο. Χρησιμοποιώντας το φυσικό και το υπολογιστικό μοντέλο μαζί μπορούν να αντισταθμιστούν κάποιες από τις αδυναμίες του καθενός. Λόγω του κόστους θέτονται περιορισμοί σε πολλά project, για αυτό ένα εικονικό μοντέλο, συχνά χρησιμοποιείται αντί ενός φυσικού.

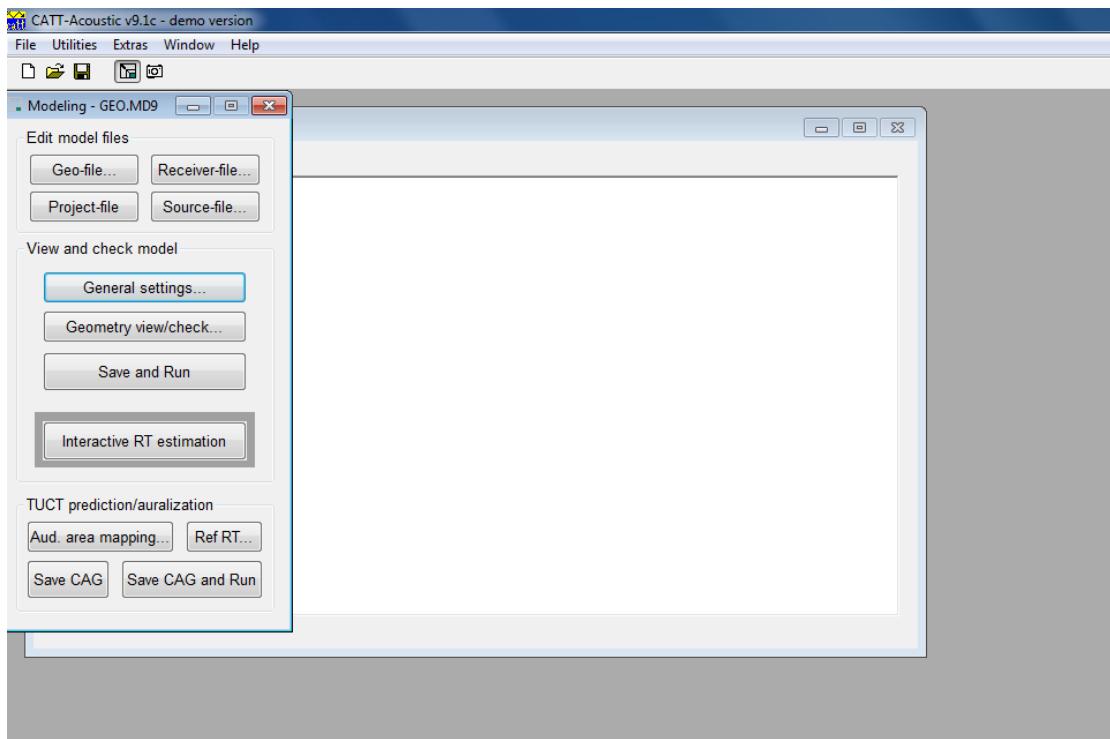
3.1.1 Λημιουργώντας το μοντέλο του ηχο-συστήματος

Το CATT Acoustic έχει την δυνατότητα να εκτελεί ακουστικούς υπολογισμούς και να δημιουργεί απεικονίσεις για το μοντέλο ενός χώρου. Για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν αυτές οι προσομοιώσεις, ο χρήστης θα πρέπει να σχεδιάσει μέσω του προγράμματος, το μοντέλο του κτιρίου, δηλαδή το σχήμα και τις διαστάσεις που θα πρέπει να έχουν οι επιφάνειες που απαρτίζουν το κτίριο αυτό, πχ τοίχοι, δάπεδο, οροφή. Με λίγα λόγια θα πρέπει να σχεδιαστεί η γεωμετρία του κτιρίου. Επίσης χρειάζεται να ορίσει ο χρήστης τις ηχο-απορροφητικές ιδιότητες (συντελεστές απορρόφησης) των επιφανειών αυτών. Επίσης θα πρέπει να οριστεί το μοντέλο του ηχο-συστήματος που θα τοποθετηθεί στο χώρο, καθώς και οι θέσεις των ακροατών στην επιφάνεια ακρόασης. Όταν ο χρήστης επιλέξει δημιουργία project το λογισμικό δημιουργεί σε φάκελο τα αρχεία δεδομένων που απεικονίζονται στο σχήμα 32.

Αγαπημένα	Όνομα	Ημερομηνία τροπο... 20/7/2018 3:07 μμ	Τύπος	Μέγεθος
Επιφάνεια εργασίας	GEO.MD9	20/7/2018 3:07 μμ	Αρχείο MD9	5 KB
Κοινόχρηστος	MASTER.GEO	20/7/2018 3:07 μμ	Αρχείο GEO	1 KB
Λήψεις	PROJECT	20/7/2018 3:07 μμ	Έγγραφο κειμένου	1 KB
Πρόσ.θέσεις	REC.LOC	20/7/2018 3:07 μμ	Αρχείο LOC	1 KB
Τροποποιήθηκαν π	REC.LOC.BKP	20/7/2018 3:07 μμ	Αρχείο BKP	1 KB
	SRC.LOC	20/7/2018 3:07 μμ	Αρχείο LOC	2 KB

Σχήμα 32. Φάκελος με αρχεία project του CATT acoustic.

Δημιουργούνται διάφορα αρχεία τα ποιο σημαντικά όμως είναι τα εξής: **GEO.MD9**: Είναι το αρχείο που ανοίγει το project, **MASTER.GEO**: Είναι το αρχείο με τον κώδικα της γεωμετρίας του μοντέλου, **SRC.LOC**: Είναι ο κώδικας που ο χρήστης ορίζει το ηχο-σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο, **REC.LOC**: Περιέχει τον κώδικα των ακροατών. Το σχήμα 33 απεικονίζει το περιβάλλον του προγράμματος CATT Acoustic. Αυτό το περιβάλλον εμφανίζεται όταν εκκινήσει η εφαρμογή. Αρχικά αποτελείται από δυο παράθυρα, το **Modeling** και το **PL9 Viewer**. Το Modeling αφορά τις ρυθμίσεις του μοντέλου του project. Οι πιο σπουδαίες ρυθμίσεις είναι ότι ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τους κώδικες γεωμετρίας, πηγών και ακροατών, καθώς και να επιλέξει πόσες πηγές και ακροατές θα συμμετέχουν στην προσομοίωση (επιλογή General Settings), επίσης μπορεί να τρέξει το πρόγραμμα (Save and Run), και τέλος οι υπολογισμοί και οι απεικονίσεις γίνονται από την επιλογή TUCT prediction/auralization. Το παράθυρο PL9 Viewer απεικονίζει το μοντέλο της γεωμετρίας του κτιρίου, καθώς και το ηχο-σύστημα που τοποθετήθηκε και τους ακροατές σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη μορφή.



Σχήμα 33. Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού CATT Acoustic.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, για να εκτελέσει το λογισμικό μια προσομοίωση, χρειάζεται να σχεδιάσει κάποιος την γεωμετρία του μοντέλου. Η σχεδίαση του μοντέλου στο CATT δεν γίνεται με κάποιο οπτικό περιβάλλον (όπως AutoCAD), όμως με κώδικα γεωμετρίας. Τα σχήματα 34 και 35 απεικονίζουν κάποια κομμάτια, του κώδικα γεωμετρίας της σήραγγας Μαλιακός-Κλειδί, η οποία σήραγγα χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη ακουστικής χώρου στην παρούσα διπλωματική. Το CATT Acoustic λειτουργεί με σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, έχοντας δηλαδή το αρχιτεκτονικό σχέδιο του κτιρίου, ο μηχανικός πρέπει να προσδιορίσει τις συντεταγμένες όλων των γωνιών που απαρτίζουν το κτίριο (Εντολή **;id x y z**). Το επόμενο βήμα είναι να δημιουργηθούν οι επιμέρους επιφάνειες. Για να γίνει αυτό, ο μηχανικός ορίζει τις γωνίες που απαρτίζουν μία επιφάνεια, καθώς και το υλικό που είναι κατασκευασμένη η επιφάνεια αυτή (Εντολές: **[id name // absname]** και **[id name // (a / a_abs) (b / b_abs)]**). Παραδείγματος χάριν, η εντολή: **[1 floor /1 2 26 25/tarmac]**, σημαίνει ότι η επιφάνεια 1 είναι δάπεδο από άσφαλτο, όπου αποτελείται από τις γωνίες: 1, 2, 26, 25.

Με την εντολή: **ABS absname** επιλέγεται ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού σε μπάντες οκτάβας, όμως ο λόγος που στον κώδικα οι συντελεστές είναι μεγαλύτεροι τις μονάδας, οφείλεται στο ότι το λογισμικό δέχεται τις τιμές σε ποσοστό. Επιλέχθηκαν συντελεστές απορρόφησης για τρία υλικά, μπετό που αποτελεί τα τοιχώματα της σήραγγας, άσφαλτος που αποτελεί τον δρόμο και αέρας για την είσοδο και έξοδο του τούνελ. Ο πίνακας 5 δίνει τους συντελεστές απορρόφησης για αυτά τα τρία υλικά σύμφωνα με το βιβλίο του Davis [17].

CATT-Edit - MASTER

File Edit Search Character Template Help

```
;MASTER.GEO
;PROJECT=project
|
;INCLUDE

;OFFSETCO
;OFFSETPL

;MIRROR co_add pl_add

;ABS absname <10 10 10 10 10 10> ;L <10 10 10 10 10 10>
ABS tarmac <2 3 3 3 3 2> {126 126 126}
ABS concrete <36 44 31 29 39 25> {192 50 70}
ABS air < 99 99 99 99 99 99> {96 208 251}

CORNERS

;id x y z
1 -5.04 -1 0
2 5.04 -1 0
3 5.04 -1 1.26
4 6.79 -1 1.29
5 6.9 -1 2.47
6 6.66 -1 3.82
7 5.99 -1 5.15
8 5.19 -1 6.08
9 4.24 -1 6.87
10 3.27 -1 7.45
11 2.22 -1 7.87
12 1.12 -1 8.12
13 0 -1 8.21
14 -1.12 -1 8.12
15 -2.22 -1 7.87
```

Σχήμα 34. Ένα ενδεικτικό κομμάτι του κώδικα γεωμετρίας της σήραγγας Μαλιακός-Κλειδί, με την εντολή: *id x y z* δηλώνονται οι συντεταγμένες των γωνιών του μοντέλου, ενώ με την εντολή: *ABS absname* οι ηχο-απορροφητικές ιδιότητες των επιφανειών.

CATT-Edit - MASTER

File Edit Search Character Template Help

```
PLANES

;[id name / / absname ]
;[id name / / (a / / a_abs) (b / / b_abs) ]

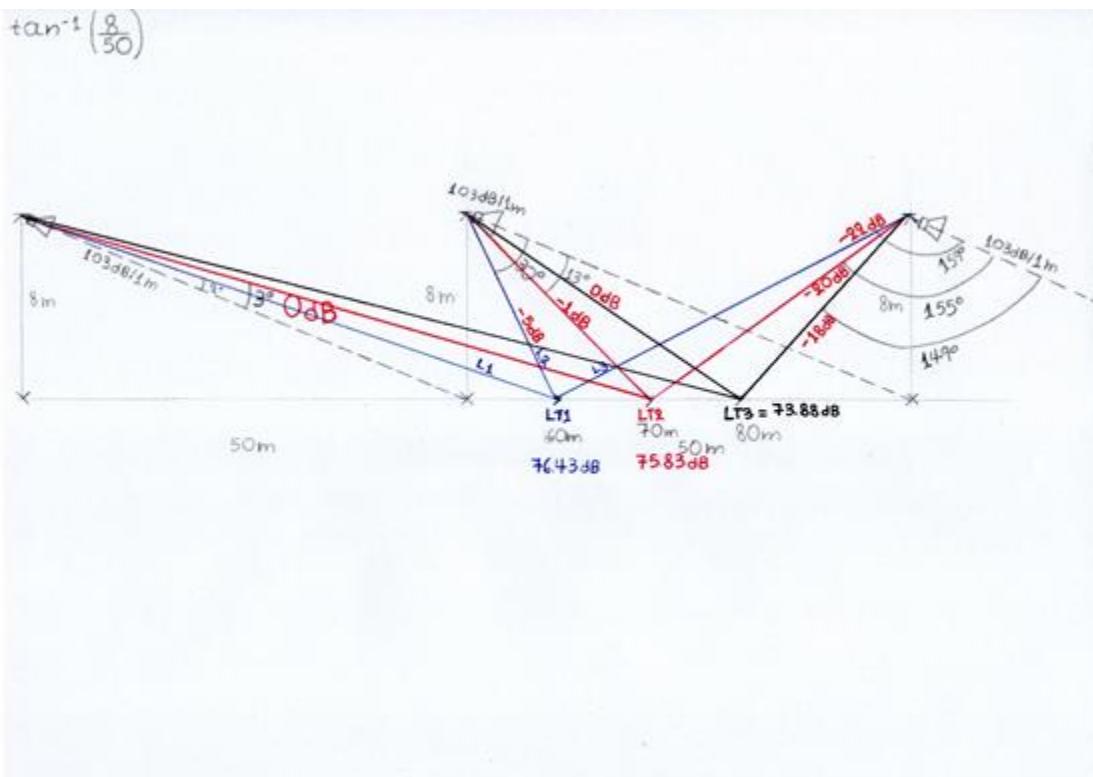
[1 floor / 1 2 26 25 / tarmac]
[2 walls / 25 48 24 1/ concrete]
[3 walls / 24 48 47 23/ concrete]
[4 walls / 23 47 46 22/ concrete]
[5 walls / 22 46 45 21/ concrete]
[6 walls / 21 45 44 20/ concrete]
[7 walls / 20 44 43 19/ concrete]
[8 walls / 19 43 42 18/ concrete]
[9 walls / 18 42 41 17/ concrete]
[10 walls / 17 41 40 16/ concrete]
[11 walls / 16 40 39 15/ concrete]
[12 walls / 15 39 38 14/ concrete]
[13 walls / 14 38 37 13/ concrete]
[14 walls / 13 37 36 12/ concrete]
[15 walls / 12 36 35 11/ concrete]
[16 walls / 11 35 34 10/ concrete]
[17 walls / 10 34 33 9/ concrete]
[18 walls / 9 33 32 8/ concrete]
[19 walls / 8 32 31 7/ concrete]
[20 walls / 7 31 30 6/ concrete]
[21 walls / 6 30 29 5/ concrete]
[22 walls / 5 29 28 4/ concrete]
[23 walls / 2 3 27 26 / concrete]
[24 walls / 3 4 28 27/ concrete]
[25 entranceA / 1 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 / air]
[26 entranceB / 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 / air]
```

Σχήμα 35. Ένα ενδεικτικό κομμάτι του κώδικα γεωμετρίας, με την εντολή *[id name//abs name]* ορίζονται οι γωνίες που απαρτίζουν την επιμέρους επιφάνεια και ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας.

Συντελεστές απορρόφησης υλικών	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Τραχύ μπετόν	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Άσφαλτος πάνω σε μπετόν	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Αέρας	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Πίνακας 5. Οι συντελεστές απορρόφησης σε μπάντες οκτάβας, για τραχύ μπετόν, άσφαλτο πάνω σε μπετόν και αέρα.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του ηχο-συστήματος που θα τοποθετηθεί στο μοντέλο του κτιρίου. Το σχήμα 36 απεικονίζει ένα τμήμα ενός ενδεικτικού ηχο-συστήματος που επιλέχτηκε για τη μελέτη στη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί. Η διάταξη αυτή αποτελείται από διαδοχικές χοάνες ίδιου τύπου (επιλέχτηκε το μοντέλο χοάνης Tunnel-500/DUP-40(T) που τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αναλύονται στο κεφάλαιο 1.7.2), οι χοάνες αυτές έχουν ίδια κατεύθυνση, έχουν απόσταση μεταξύ τους 50m, ενώ είναι τοποθετημένες σε ύψος 8m πάνω από τον δρόμο. Επίσης οι κύριοι άξονες των χοανών σημαδεύονται ανά 50m, δηλαδή εκεί που ξεκινάει η επόμενη χοάνη, επιπλέον οι χοάνες έχουν ρυθμιστεί με καθυστέρηση σήματος που αλλάζει με την απόσταση, για παράδειγμα, η 1^η χοάνη έχει καθυστέρηση 0 sec, η 2^η έχει delay = (50m)/(340m/s) = 0.147 sec, η 3^η έχει delay = 0.294 sec κτλ.



Σχήμα 36. Ένα ενδεικτικό ηχο-σύστημα που μελετήθηκε για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί. Οι διαδοχικές χοάνες έχουν ίδια κατεύθυνση ενώ οι κύριοι άξονες σημαδεύονται ανά 50m.

Το μοντέλο της σήραγγας που σχεδιάστηκε είχε μήκος 1000m, για αυτό στη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 21 χοάνες (συμπεριλαμβάνοντας την χοάνη στην έξοδο της σήραγγας). Επίσης τοποθετήθηκαν 60 ακροατές. Το σχήμα 37 απεικονίζει ένα τμήμα του κώδικα που βασίζεται στο ηχο-σύστημα του σχήματος 36.

```

*CATT-Edit - SRC
File Edit Search Character Template Help
;PROJECT=project

;for projects that need to use TUCT v1:
SOURCEDEFS

; an electro-acoustical source (syntax 1 specifying Gain_a)
A1 0.0 0.0 8.0 Tunnel1500dup40.SD0 0.0 50 0.0
Lp1m_a = Lp_voice_normal
Gain_a = <20 20 20 20 20 20> ; calculates Lp1m_ea
Delay_e = 0

; an electro-acoustical source (syntax 1 specifying Gain_a)
A2 0.0 50 8.0 Tunnel1500dup40.SD0 0.0 100 0.0
Lp1m_a = Lp_voice_normal
Gain_a = <20 20 20 20 20 20> ; calculates Lp1m_ea
Delay_e = 0.147

; an electro-acoustical source (syntax 1 specifying Gain_a)
A3 0.0 100 8.0 Tunnel1500dup40.SD0 0.0 150 0.0
Lp1m_a = Lp_voice_normal
Gain_a = <20 20 20 20 20 20> ; calculates Lp1m_ea
Delay_e = 0.294

```

Σχήμα 37. Ένα τμήμα του κώδικα του ηχο-συστήματος.

Το σχήμα 37 απεικονίζει τον editor, όπου ο χρήστης μπορεί να περιγράψει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχο-συστήματος μέσου κώδικα. Ο χρήστης χρειάζεται να ορίσει τα ονόματα των ακουστικών πηγών (A1, A2, A3 κτλ.), τις καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης των ακουστικών πηγών (0 0 8, 0 50 8, 0 100 8 κτλ.), τις συντεταγμένες για το που θα σημαδεύει ο κύριος άξονας των πηγών (0 50 0, 0 100 0 κτλ.), την καθυστέρηση σε κάθε χοάνη (Delay_e), καθώς και άλλες λεπτομέρειες όπως τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των πηγών που χρησιμοποιούνται. Το Tunnel1500dup40.SD0 είναι η βιβλιοθήκη με τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των χοανών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Το σχήμα 38 απεικονίζει ένα ενδεικτικό τμήμα του κώδικα των ακροατών, όπου οι θέσεις των ακροατών δηλώνονται με καρτεσιανές συντεταγμένες.

```

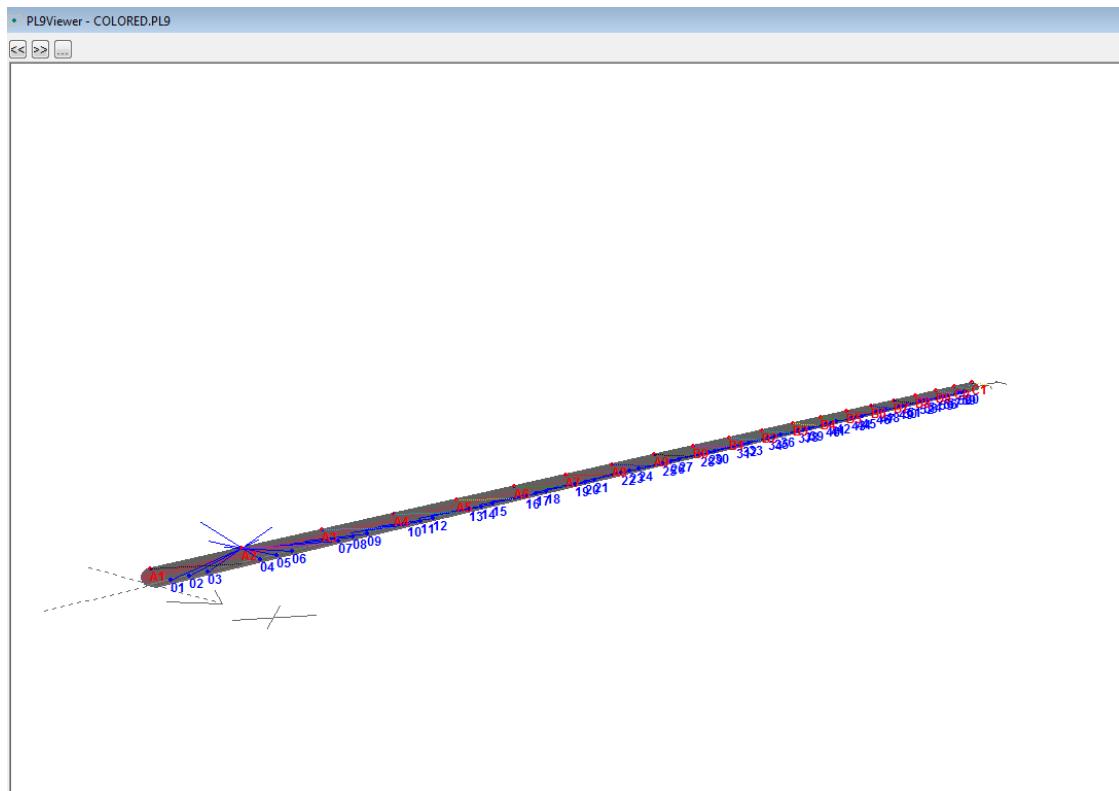
*CATT-Edit - REC
File Edit Search Character Template Help
;PROJECT=project

RECEIVERS
1 0.0 10.0 0.00
2 0.0 20.0 0.00
3 0.0 30.0 0.00
4 0.0 60.0 0.00
5 0.0 70.0 0.00
6 0.0 80.0 0.00
7 0.0 110 0.00
8 0.0 120 0.00
9 0.0 130 0.00
10 0.0 160 0.00
11 0.0 170 0.00
12 0.0 180 0.00
13 0.0 210 0.00
14 0.0 220 0.00
15 0.0 230 0.00
16 0.0 260 0.00
17 0.0 270 0.00
18 0.0 280 0.00
19 0.0 310 0.00
20 0.0 320 0.00
21 0.0 330 0.00
22 0.0 360 0.00
23 0.0 370 0.00

```

Σχήμα 38. Ένα ενδεικτικό τμήμα του κώδικα των ακροατών.

Έχοντας περάσει τον κώδικα γεωμετρίας, τον κώδικα διάταξης ηχο-συστήματος και ακροατών και τρέχοντας το CATT Acoustic, το λογισμικό εμφανίζει στο PL9Viewer την έξοδο του προγράμματος. Τα σχήματα 39 και 40 απεικονίζουν το μοντέλο της σήραγγας, τη διάταξη του ηχο-συστήματος και των ακροατών στο PL9Viewer. Το σχήμα 39 απεικονίζει ολόκληρο το μοντέλο της σήραγγας σε 3Δ μορφή, ενώ το σχήμα 40 μια πλάγια όψη που είναι ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος.

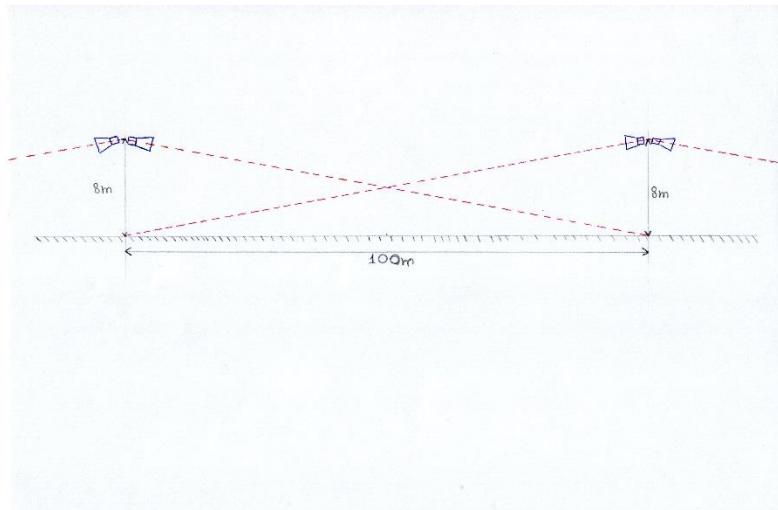


Σχήμα 39. Γενική απεικόνηση του μοντέλου της σήραγγας μήκους 1000m σε 3D μορφή.



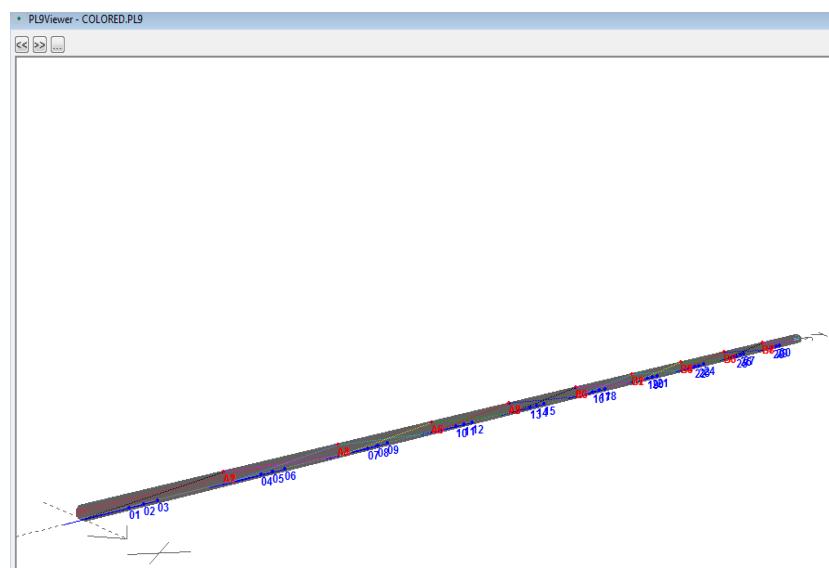
Σχήμα 40. Μια πλάγια όψη με ένα τμήμα του ηχο-συστήματος, που μελετήθηκε μέσω του CATT Acoustic για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί. Απεικονίζονται οι διαδοχικές χοάνες, ίδιας κατεύθυνσης, που έχουνε απόσταση 50m μεταξύ τους(κόκκινα νούμερα), οι κύροι άξονες σημαδεύονται ανά 50m. Τα μπλέ νούμερα είναι οι ακροατές πάνω στον δρόμο.

Μια δεύτερη διάταξη ηχο-συστήματος που μελετήθηκε μέσω του CATT Acoustic για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί απεικονίζεται στο σχήμα 41. Πρόκειται για χοάνες ίδιου τύπου (πάλι το μοντέλο Tunnel500DUP-40(T)), που είναι σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων τα οποία επαναλαμβάνονται. Το κάθε ζεύγος έχει απόσταση 100m από το άλλο, ενώ οι χοάνες είναι τοποθετημένες σε ύψος 8m πάνω από το δρόμο. Επίσης οι κύριοι άξονες των χοάνων σημαδεύονται ανα 100m.

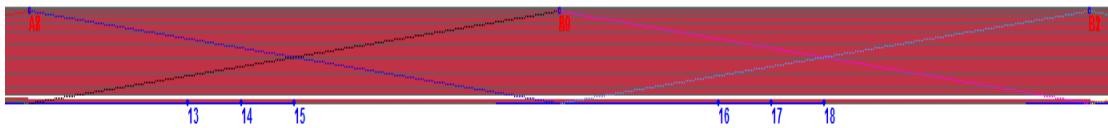


Σχήμα 41. Χοάνες σε ζεύγη, αντίθετων κατευθύνσεων.

Δημιουργώντας έναν νέο κώδικα διάταξης ηχο-συστήματος με βάση το σχήμα 41 και τρέχοντας το πρόγραμμα ξανά, το παράθυρο PL9Viewer εμφανίζει την έξοδο του προγράμματος. Τα σχήματα 42 και 43 απεικονίζουν το μοντέλο γεωμετρίας του κτιρίου, τη διάταξη του ηχο-συστήματος και των ακροατών όπως εμφανίζεται από το παράθυρο PL9Viewer. Το σχήμα 42 αναπαριστά όλο το μοντέλο της σήραγγας σε τρισδιάστατο διάγραμμα, ενώ το σχήμα 43 απεικονίζει μία πλάγια όψη από ένα ενδεικτικό τμήμα, της δεύτερης διάταξης ηχο-συστήματος.



Σχήμα 42. Απεικόνιση όλης της σήραγγας σε 3D μοντέλο στο PL9Viewer.



Σχήμα 43. Αναπαράσταση σε πλάγια όψη ενός τμήματος της δεύτερης περίπτωσης. Απεικονίζονται διαδοχικές χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, όπου οι κύριοι άξονες των χοανών σημαδεύονται ανά 100m.

3.2 Είδη ακουστικών υπολογισμών του προγράμματος CATT Acoustic

3.2.1 Υπολογισμός U-50

Ο συνδυασμός δύο μετρήσεων, ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI (IEC 60268-16, 2011) και ο λόγος του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο (useful- to – detrimental sound ratios) [18], μπορούν να θεωρηθούν ως ολοκληρωμένη πρόβλεψη της ευκρίνειας ομιλίας σε χώρους, επειδή αυτοί περιλαμβάνουν και τη μέτρηση της ποιότητας ακουστικής δωματίου και τη μέτρηση του λόγου σήματος ομιλίας προς θόρυβο (speech-to-noise ratios). Προηγούμενες μελέτες [18] [19] έχουν δείξει ότι, η ακουστική χώρων και ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), επηρεάζουν την ευκρίνεια ομιλίας και ως εκ τούτου, η συνδυαζόμενη επίδραση της ακουστικής χώρου και το SNR στην κατανόηση της ομιλίας πρέπει να μετρηθούν. Ο λόγος του κύματος της αρχικής άφιξης, προς το κύμα αργοπορημένης άφιξης (C-50) χρησιμοποιούταν ως μέτρο της επίδρασης της ακουστικής του χώρου, στην καθαρότητα των ήχων της ομιλίας σε αίθουσες [20]. Όμως αυτή η μέτρηση δεν μπορεί να προσδιορίσει τις συνδυασμένες επιδράσεις της ακουστικής χώρου και του θορύβου φόντου. Ο λόγος του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο (U-50) ορίζεται ως λογαριθμικός λόγος, του χρήσιμου ήχου προς τον επιβλαβή ήχο [18]. Ο χρήσιμος ήχος είναι η ενέργεια του ήχου της ομιλίας της πρώιμης άφιξης, ενώ ο επιβλαβής ήχος είναι το άθροισμα της αργοπορημένης ενέργειας ομιλίας και της ενέργειας του θορύβου περιβάλλοντος.

Οι τιμές του λόγου του χρήσιμου ήχου, προς τον επιβλαβή ήχο (U-50), μπορούν να υπολογιστούν και από τους λόγους σήματος προς θόρυβο και από τις τιμές C-50 (βλέπε εξίσωση 5) [18]. Η μέτρηση U-50 μπορεί να εξηγήσει τις συνδυασμένες επιδράσεις, της ακουστικής χώρου και των τιμών SNR, για το αποτέλεσμα της ευκρίνειας ομιλίας. Επιχειρεί να συμπεριληφθεί σωστά, η ισορροπία της σημαντικότητας του SNR και της ακουστικής διαυγείας του χώρου.

$$U_{50} = 10 \log \frac{E/L_{50}}{1 + (E/L_{50} + 1)N/S}, \text{ dB} \quad (5)$$

Όπου N η ενέργεια θορύβου περιβάλλοντος, S η ενέργεια του κύματος της ομιλίας, και E/L₅₀ είναι ο γραμμικός λόγος ακουστικής ενέργειας του πρώιμου κύματος προς το αργοπορημένο κύμα.

Η μέτρηση U-50 συνδυάζει τις επιβλαβείς επιδράσεις, της αργοπορημένης ομιλίας και του θορύβου περιβάλλοντος, σε σχέση με τους χρήσιμους ήχους του απευθείας κύματος και των πρώιμων ανακλάσεων. Έτσι είναι σε θέση, να πετύχει τον καλύτερο συνδυασμό μεγιστοποίησης και διαύγειας (C-50) και τιμών G για βέλτιστες συνθήκες σε αίθουσες. Παρακάτω (σχήμα 44) υπάρχει το παράθυρο επιλογών ρυθμίσεων της μέτρησης U₅₀ στο πρόγραμμα CATT Acoustic.



Σχήμα 44. Το παράθυρο ρυθμίσεων της μέτρησης U_{50} στο CATT Acoustic.

3.2.2 Προσδιορισμός ποιότητας μετάδοσης ομιλίας (STI)

3.2.2.1 Εισαγωγή

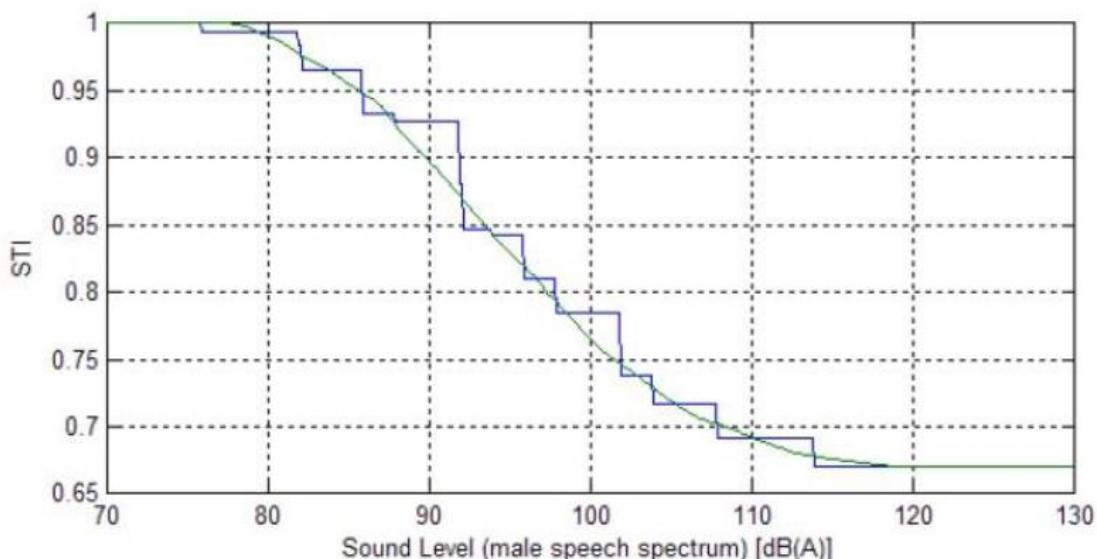
Μια καλή-εγκαθιδρυμένη αντικειμενική μέτρηση της ποιότητας μετάδοσης ομιλίας είναι, ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index – STI). Αν και η ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας δεν είναι το ίδιο με την ευκρίνεια της ομιλίας, η STI μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει η μετρήσει την ποιότητα μετάδοσης της ομιλίας σε σχέση με την ευκρίνεια. Η μέτρηση STI μπορεί να εκφραστεί ως αριθμός μεταξύ 0 και 1. Στον πίνακα 6 οι STI τιμές και οι αντίστοιχες αξιολογήσεις συνοψίζονται.

STI [-]	Εκτίμηση
0.75-1	Εξαιρετική
0.6-0.75	Αρκετά καλή
0.45-0.6	Καλή
0.3-0.45	Φτωχή
0-0.3	Κακή

Πίνακας 6. Η αξιολόγηση της ποιότητας μετάδοσης ομιλίας με τη βοήθεια του STI.

Η προτεινόμενη μέθοδος για την μέτρηση του STI σε οδικές σήραγγες, είναι η μέθοδος STIPA. Αυτή η STIPA μέθοδος απαιτεί ένα ειδικό σήμα δοκιμής που αποτελείται από αρκετές ταυτόχρονα διαμορφωμένες μπάντες συχνοτήτων, που έχουν το φάσμα συχνοτήτων της ανδρικής ομιλίας. Σε αντίθεση με τις μεθόδους κρουστικής απόκρισης, που χρησιμοποιούν MLS θόρυβο η σήματα σαρωμένου ημιτόνου, η μέθοδος STIPA έχει την δυνατότητα να μετρήσει την μείωση του STI, εξαιτίας της αρμονικής παραμόρφωσης του ηχείου. Οι μέθοδοι κρουστικής απόκρισης απαιτούν ένα γραμμικό σύστημα, καθώς η παραμόρφωση θα προκαλέσει ανεπιθύμητα αντικείμενα μετρήσεων.

Με την εισαγωγή της ακουστικής απόκρυψης (auditory masking) εξαρτημένης στάθμης, στην τελευταία έκδοση του προτύπου STI (IEC 60268-16:2003) [21], η αντικειμενική αξιολόγηση της ευκρίνειας ομιλίας με την βοήθεια του STI έχει αλλάξει δραματικά. Σαν αποτέλεσμα, το STI ενός ήχο-συστήματος που παράγει υψηλές ακουστικές στάθμες (όπως στις σήραγγες) βαθμολογείται σημαντικά χαμηλότερα χρησιμοποιώντας το αναθεωρημένο πρότυπο, σε σύγκριση με το προηγούμενο πρότυπο (χρονολογείται το 1998). Για να απεικονίσουμε αυτή την επίδραση, το (αναθεωρημένο) STI για ένα μονό, ιδανικό ηχείο (με επίπεδη απόκριση συχνότητας και χωρίς παραμόρφωση) σε ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις και χωρίς θορύβους (συνθήκες ελεύθερου πεδίου) σαν συνάρτηση της ακουστικής στάθμης της ανδρικής ομιλίας εμφανίζεται στο σχήμα 45.



Σχήμα 45. Το αναθεωρημένο πρότυπο STI ως συνάρτηση της στάθμης ακουστικής πίεσης της ανδρικής ομιλίας (χωρίς ανακλάσεις, χωρίς θορύβους).

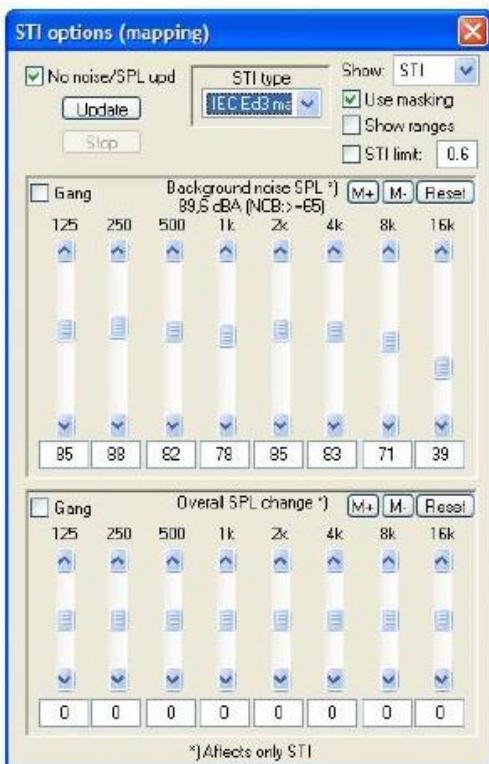
Η καμπύλη με τα “σκαλοπάτια” δημιουργείται χρησιμοποιώντας το υπάρχον STI πρότυπο. Η ομαλή καμπύλη υπολογίζεται με έναν τρόπο που η απόκρυψη εξαρτημένης στάθμης, δεν διαιρείται σε διαστήματα των 10dB, όπως το υπάρχον πρότυπο, αλλά ως παρεμβαλλόμενη συνάρτηση της στάθμης ακουστικής πίεσης.

Είναι ξεκάθαρο ότι το STI “τιμωρείται” όταν η ακουστική στάθμη ξεπεράσει τα 75dB(A). Στη πραγματικότητα αν το σύστημα λειτουργεί στα 105 dB(A), τότε το μέγιστο εφικτό STI (πχ σε συνθήκες ανιχοηκού θαλάμου) είναι γύρω στο 0.72. Σύμφωνα με το παλιότερο πρότυπο STI (1998) το STI θα είναι πολύ κοντά στο 1 για όλες τις ακουστικές στάθμες.

Κάτω από πιο ρεαλιστικές ακουστικές συνθήκες, πχ με αντήχηση και θόρυβο περιβάλλοντος, η επίδραση της απόκρυψης εξαρτημένης στάθμης στο STI είναι λιγότερο σοβαρή αλλά ακόμα σημαντική. Για ένα συνηθισμένο σύστημα σήραγγας (PA/VA) που παράγει στάθμη 105dBA στη θέση των ακροατών, η “ποινή” του αναθεωρημένου STI είναι κοντά στο 0.1. Από αυτό είναι εμφανές ότι το να πετύχει κανείς συγκεκριμένες STI τιμές κάτω από πραγματικές συνθήκες σε τούνελ, έχει γίνει μια ακόμα μεγαλύτερη πρόκληση.

3.2.2.2 Προσδιορισμός του STI στο CATT Acoustic

Στο παρακάτω παράθυρο (σχήμα 46) απεικονίζονται οι ρυθμίσεις STI του προγράμματος CATT Acoustic. Από αυτό το παράθυρο μπορεί ο χρήστης να μεταβάλλει το είδος του STI, τη στάθμη θορύβου φόντου για διάφορα φάσματα συχνοτήτων, τη συνολική αλλαγή στάθμης ακουστικής πίεσης. Επίσης μπορεί να ενεργοποιήσει η να απενεργοποιήσει την απόκρυψη. Από τη στιγμή που το STI εμπλέκει πολλούς υπολογισμούς για πολλές οκτάβες και συχνότητες διαμόρφωσης (7x14) ένας μεγάλος χάρτης θα χρειαστεί πολύ χρόνο για να αναβαθμιστεί.



Σχήμα 46. Το παράθυρο ρυθμίσεων STI στο λογισμικό CATT Acoustic.

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι λειτουργίες του σχήματος 46:

Επιλογή **Show** (Επιλέγει ο χρήστης την εμφάνιση):

- 1) Του STI από μόνο του.
- 2) Του STI που προέρχεται από το CIS: Την κοινή κλίμακα ευκρινείας όπου οι αριθμοί έχουν μετατραπεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση: $CIS = 1 + \log_{10}(STI)$.
- 3) Το STI που προέρχεται από το ISO 3382:3.

Επιλογή είδους STI (**STI Type**):

Επιλέγεται το είδος της φωνής IEC αρσενικής ομιλίας/θηλυκής σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60268-16, 3η ή 4η έκδοση. Το πρωτότυπο είναι το κλασικό STI, η τροποποίηση είναι μία παραλλαγή που μόνο χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα μέτρησης. Για την διάκριση μεταξύ 3ης και 4ης έκδοσης κάποιες συμβολοσειρές κειμένου έχουν αλλάξει.

Original (Αρχική)	"orig"	"orig"
Modified(Τροποποίηση)	"Modified"	"modified"
IEC Male Ed3 (Αρσενική φωνή IEC Ed3)	"IECEd3 male"	"ed3m"
IEC Female Ed3 (Θηλυκή φωνή Ed3)	"IECEd3 fem"	"ed3f"
IEC Male Ed4 (Αρσενική φωνή IEC Ed4)	"IECEd4 male"	"ed4m"
IEC Female Ed4 (Θηλυκή φωνή IEC Ed4)	"IECEd4 fem"	"ed4f"

Πίνακας 7. Οι διαθέσιμοι τύποι STI στο λογισμικό CATT Acoustic.

Επιλογή **No noise/SPL upd**:

Αποτρέπει STI αναβαθμίσεις ενώ αλλάζει ο θόρυβος φόντου η το συνολικό SPL.

Επιλογή **Update**:

Αναβαθμίζει τον χάρτη (Αν η επιλογή **No noise/SPL upd** είναι On).

Επιλογή **Stop**:

Ακυρώνει έναν STI υπολογισμό που είναι σε εξέλιξη (μπορεί να διαρκέσει κάποιο χρόνο για μεγάλους χάρτες και μεγάλα ηχογραφήματα).

Επιλογή **Use masking**:

Εφαρμόζει απόκρυψη που εξαρτάται από στάθμη όσο αυξάνονται οι συχνότητες. Το IEC STI πρέπει να το έχει αυτό ενεργοποιημένο, αλλά είναι χρήσιμο να δει κανείς την επίδραση πολύ υψηλής στάθμης ακουστικής πίεσης απενεργοποιώντας την απόκρυψη. Το STI που δεν είναι IEC δεν έχει απόκρυψη που εξαρτάται από τη στάθμη, αλλά

μπορεί να είναι χρήσιμο για να δει κανείς την επίδραση ούτως η άλλως. Η απόκρυψη που εφαρμόζεται στο πρότυπο IEC σύμφωνα με την 3η έκδοση είναι όπως φαίνεται στον πίνακα 8:

Στάθμη οκτάβας [dB]	46~55	56~65	66~75	76~85	86~95	>95
Κλήση απόκρυψης [dB/oct]	-40	-35	-25	-20	-15	-10

Πίνακας 8. Η απόκρυψη που εφαρμόζεται στο πρότυπο IEC 3rd ed.

Για παράδειγμα: Αν η στάθμη ακ. Πίεσης (SPL) ισούται με: 100 dB στα 1 KHz, τότε 90 dB θα προστεθούν ως όρος θορύβου στον υπολογισμό του STI στα 2 KHz, 80 dB θα προστεθούν ως θόρυβος στον υπολογισμό των 4 KHz, και 70 dB θα προστεθούν ως θόρυβος στον υπολογισμό των 8 KHz. Η 4η έκδοση παρουσιάζει ομαλές μεταβάσεις στην κλήση απόκρυψης, σε αντίθεση με τις απότομες μεταβολές στην 3η έκδοση.

Επιλογή Show ranges:

Η ρύθμιση αυτή εμφανίζει τις τιμές του STI (που αναφέρθηκαν στο σχήμα 2) σε παλέτα χρωμάτων.

Επιλογή STI Limit:

Είναι κάποιες φορές χρήσιμο να εμφανίσουμε στον χάρτη ποια σημεία έχουν περάσει ένα καθορισμένο όριο, έστω 0.65. Αυτή η επιλογή θα προκαλέσει λευκά τετράγωνα να εμφανίζονται σε σημεία του χάρτη που είναι κάτω από το επιλεγμένο όριο, με τρόπο που και το όριο και οι πραγματικές χρωματικές τιμές μπορούν να φανούν. Για να αναβαθμιστεί ο χάρτης αφού επιλέξουμε ένα όριο πατάμε το κλειδί Enter.

Σημείωση: Αυτή η συνάρτηση θα δώσει ένα αρνητικό CIS για πολύ χαμηλές τιμές STI (πχ ένα STI = 0.05 δίνει CIS = -0.3), τέτοιες αρνητικές τιμές θα εμφανίζονται σαν μηδέν.

Επιλογή Noise map:

Αν ένας χάρτης θορύβου είχε χρησιμοποιηθεί, μπορεί να επιλεχθεί ως θόρυβος φόντου.

Επιλογή Background noise SPL:

Αλλαγή των στάθμεων θορύβου φόντου.

Επιλογή Overall SPL change:

Η αλλαγή της συνολικής στάθμης ακουστικής πίεσης (SPL/eq), είναι χρήσιμη για την διερεύνηση των επιδράσεων της απόκρυψης που εξαρτάται από τη συχνότητα. Οι τιμές δίνονται κάτω από την κλίμακα του χρώματος ως Eqx. Για ακουστικές πηγές SD2 που είναι ρυθμιζόμενα array μπορεί να ξεπεράσουμε την πιθανή στάθμη που αυτά μπορούν να παραδώσουν. Παραδείγματος χάρη όταν το Gain_a ήταν όλο μηδενικά η στάθμη δεν μπορεί να ανέβει παραπάνω.

Σημείωση: Αυτό δεν αλλάζει την στάθμη ακουστικής πίεσης σε οποιαδήποτε άλλα παράθυρα η αποτελέσματα, μόνο επηρεάζει το STI όπως φαίνεται στο 3D παράθυρο (3D Window).

Επιλογή Reset:

Γυρίζει τον θόρυβο φόντου στην τιμή που ήταν αποθηκευμένος στο αρχείο CAG και την συνολική αλλαγή στάθμης ακουστικής πίεσης στο μηδέν.

Επιλογή M+ :

Αποθηκεύει την υπάρχουσα συνολική τιμή θορύβου φόντου, η τη συνολική τιμή της ακουστικής στάθμης (SPL).

Επιλογή M- :

Ανακαλεί την αποθηκευμένη συνολική τιμή θορύβου φόντου, η τη συνολική τιμή της ακουστικής στάθμης (SPL).

Επιλογή Gang:

Κάνει όλα τα ρυθμιστικά μπάντας οκτάβας να κινηθούν μαζί για ένα θόρυβο φόντου η μια συνολική αλλαγή της SPL.

3.2.3 Υπολογισμός LF

Τα αρχικά LF προέρχονται από τις λέξεις lateral fraction, δηλαδή πλευρικό κλάσμα. Οι όροι “χωρική εντύπωση” και “πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις” περιλαμβάνονται στην ορολογία και συνήθισαν να περιγράφουν την ακουστική σε αίθουσες συναυλιών. Στα τέλη του 1960, μέσω της εμπειρίας ακροάσεων και έρευνας, ο Harold Marshall, ανακάλυψε ότι οι πρώιμες ανακλάσεις που φτάνουν από πλευρικές κατευθύνσεις δημιουργούσαν μία επιθυμητή αίσθηση ευρυχωρίας [22]. Αυτό το φαινόμενο, το οποίο αυτός αρχικά αποκαλούσε “χωρική απόκριση” (αργότερα, χωρική εντύπωση), ερευνήθηκε εκτεταμένα από τον Michael Barron στην δικιά του διδακτορική διατριβή. Αργότερα, οι Barron και Marshall εξήγαγαν τον όρο του “κλάσματος πρώιμης πλευρικής ενέργειας” (early lateral energy fraction – LF) ως γραμμικό υπολογισμό της χωρικής εντύπωσης [23]. Πρόσφατη έρευνα από τον Pätynen [24], έχει επίσης καθιερώσει ότι το αντιληπτό δυναμικό εύρος ενισχύεται, όταν η γεωμετρία του χώρου παρέχει δυνατές πλευρικές ανακλάσεις. Ο υπολογισμός LF έχει γίνει μία από τις πιο σημαντικές ακουστικές περιγραφές, που συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την υποκειμενική προτίμηση του ακροατή για τον ήχο στις αίθουσες συναυλιών. Σήμερα ο όρος χωρική εντύπωση αναφέρεται σε δύο υποκειμενικές επιδράσεις: Το φαινομενικό πλάτος της πηγής, και την κάλυψη των ακροατών. Η πρώτη επίδραση αντιστοιχεί στην έρευνα των Marshall και Barron, ενώ η κάλυψη των ακροατών σχετίζεται με την στάθμη της αργοπορημένης πλευρικής ακουστικής ενέργειας [25]. Το LF ορίζεται ως γραμμικός λόγος της πρώιμης πλευρικής ενέργειας προς την συνολική πρώιμη ενέργεια. Οι Barron και Marshall διαπίστωσαν, μέσω υποκειμενικών δοκιμών ακρόασης με σύστημα προσομοίωσης, ότι οι μοίρες της χωρικής εντύπωσης μεγιστοποιούνται, όταν ο ήχος έφτανε από τα πλάγια στον ακροατή και μηδενίζονταν όταν ο ήχος έφτανε από την κατεύθυνση της ακουστικής πηγής. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν μία συσχέτιση που περιέχει $\cos(\theta)$, όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της πλευρικής ανάκλασης και του άξονα που περνάει από το κέντρο των αυτιών. Η LF γενικά προσδιορίζεται από τις κρουστικές αποκρίσεις που λαμβάνονται

χρησιμοποιώντας ένα συνημίτονο η δικαντευθυντικό μικρόφωνο – figure 8 (για να μετρήσουμε την πλευρική ενέργεια) σε συνδυασμό με ένα πάντοκατευθυντικό μικρόφωνο (για να μετρήσουμε την συνολική ενέργεια) [26]. Η LF δίνεται από την εξίσωση 6:

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0.080} p^2(t) dt} \quad (6)$$

Όπου $PL(t)$ είναι η κρουστική απόκριση του σήματος που μετριέται με δικαντευθυντικό μικρόφωνο (figure 8 microphone), $P(t)$ είναι το σήμα που μετριέται με ένα πάντοκατευθυντικό μικρόφωνο και το μηδέν του δικαντευθυντικού είναι στραμμένο προς την ακουστική πηγή.

Πρόσφατες μετρήσεις σε μία αίθουσα 2300 καθισμάτων, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά συστήματα μέτρησης, έδειξαν αρκετά διαφορετικές τιμές του LF για τις ίδιες θέσεις ακουστικών πηγών-ακροατών. Πριν μερικά χρόνια, μία εργαστηριακή επικύρωση ενός εμπορικά διαθέσιμου συστήματος μέτρησης του χρόνου αντήχησης, αποκάλυψε 10% σφάλμα λόγω αστοχίας λογισμικού. Τέτοιες εμπειρίες ωθούν τους συγγραφείς να επινοήσουν, μια εργαστηριακή επικυροποίηση των συστημάτων μέτρησης LF. Οι συγγραφείς πρότειναν μια γνωστή φυσική σχέση που θα πρέπει να δημιουργηθεί και να μετρηθεί για να επιβεβαιώσει ότι οποιοδήποτε σύστημα μετράει τις σωστές LF τιμές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το εγχειρίδιο του CATT Acoustic πάνω στον υπολογισμό της LF αναφέρει:

Η LF είναι μία πολύ εναίσθητη μέτρηση, αυτό φαίνεται επίσης σχεδόν αδύνατο να επαληθευτεί σε σχέση με τις μετρήσεις. Για παράδειγμα, στον 3ο γύρο robin (PTB Studio) η μετρούμενη τιμή για μία θέση που μεταβάλλεται μεταξύ 8-35% στα 125 Hz (standard απόκλιση 13% των μονάδων) και 19-37% στα 500Hz (standard απόκλιση 9%) με βάση την ομάδα μέτρησης.

3.2.4 Υπολογισμός DL2 και DLf

3.2.4.1 Εισαγωγή

Ο υπολογισμός DL2 αφορά το ρυθμό της χωρικής απόσβεσης στις στάθμες ακουστικής πίεσης ανά διπλασιασμό της απόστασης. Συγκεκριμένα την κλίση, σε dB ανά διπλασιασμό της απόστασης, της καμπύλης κατανομής του χωρικού ήχου για ένα δεδομένο εύρος αποστάσεων [27]. Η μείωση της ακουστικής στάθμης ανά διπλασιασμό της απόστασης, βασίζεται στο νόμο αντιστρόφου τετραγώνου και θα εξηγηθεί σε αυτή την ενότητα.

Έστω ότι μία ακουστική πηγή εκπέμπει σφαιρικά μια ισχύ P, όπου η ενέργεια είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην επιφάνεια της σφαίρας. Τότε ως ένταση I του ηχητικού κύματος ορίζεται η μέση ηχητική ισχύς που διέρχεται από μία μοναδιαία επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή (Εξίσωση 7) [28].

$$I = P / S \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (7)$$

Όπου I : η ακουστική ένταση με μονάδες μέτρησης W/m^2 , P : η ακουστική ισχύς της πηγής σε W , ενώ S : η επιφάνεια της σφαίρας, δηλαδή: $S = 4\pi r^2 (\text{m}^2)$. Σύμφωνα με την εξίσωση 7, η ηχητική ένταση μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή.

Έστω ότι ένας ακροατής έχει απόσταση r_1 από την πηγή, σύμφωνα με την εξίσωση 7 σε απόσταση r_1 από την πηγή η ακουστική ισχύς θα είναι: $P = I_1 * 4\pi r_1^2$ (8).

Αντίστοιχα, σε απόσταση r_2 η ακουστική ισχύς θα είναι: $P = I_2 * 4\pi r_2^2$ (9).

Επειδή η ίδια ισχύς περνάει από τα αντίστοιχα κομμάτια της σφαίρας, οι εξισώσεις 8 και 9 είναι ισότιμες, οπότε: $I_1 * 4\pi r_1^2 = I_2 * 4\pi r_2^2$ (10).

Παίρνοντας τη σχέση των I_1 / I_2 προκύπτει:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{4\pi r_2^2}{4\pi r_1^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (11)$$

Λογαριθμίζοντας τη σχέση 11 προκύπτει:

$$10\log \frac{I_1}{I_2} = 10\log \frac{r_2^2}{r_1^2} = 2 * 10\log \frac{r_2}{r_1} \quad (12)$$

Άρα: $\Delta_i = 20 * \log (r_2/r_1)$ (13)

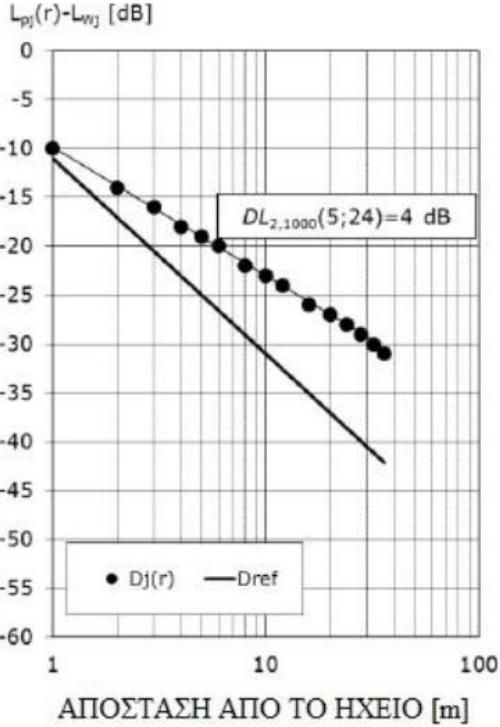
Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από τη πηγή θα υπάρχει μείωση της στάθμης κατά 6dB με την προϋπόθεση ότι η διάδοση γίνεται σε ελεύθερο ακουστικό πεδίο [28].

3.2.4.2 Χωρική απόσβεση της στάθμης ακουστικής πίεσης

Μία μέθοδος για την μέτρηση της χωρικής κατανομής ήχου, παρουσιάστηκε πολύ καιρό πριν. Ο Friberg [29], μέτρησε τους ρυθμούς χωρικής απόσβεσης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα το 1975. Οι πρώτες καμπύλες μετρήσεων χωρικής κατανομής ήχου, σε γραφεία μεγάλου ανοικτού χώρου, παρουσιάστηκαν το 1970 [30] [31] [32]. Διάφορες μελέτες πεδίου έχουν αναφέρει παραπλήσια αποτελέσματα μετρήσεων [33] [34] [35].

Η μέτρηση της χωρικής κατανομής ήχου, είναι μία μέθοδος για την εκτίμηση της ανάγκης αύξησης, της ηχοαπορρόφησης σε άδειους χώρους. Η διαδικασία για την μέτρηση της χωρικής κατανομής ήχου σε χώρους εργασίας περιγράφεται από το ISO 14257 [27]. Η προκαθορισμένη διαδρομή μέτρησης είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη με το δάπεδο σε ύψος 1.20m ή 1.55m. Η γραμμή πρέπει να είναι καθαρή από οποιαδήποτε εμπόδια και μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες. Από την άποψη του χρήστη, αυτή η απαίτηση είναι παράλογη, επειδή οι μόνες καθαρές περιοχές είναι οι διάδρομοι που οι εργαζόμενοι δεν δουλεύουν. Επιπλέον, οι μετρήσεις σε περιοχές χωρίς εμπόδια, δεν μπορούν να λάβουν υπόψη την επίδραση των οθονών και των επίπλων στη χωρική κατανομή ήχου της στάθμης ακουστικής πίεσης (SPL).

Δύο μονοί-αριθμοί παράμετροι, υπολογίζονται για την εκτίμηση της ακουστικής επίδοσης ενός χώρου [27]. Η μία παράμετρος είναι η DL2, η οποία περιγράφει τον ρυθμό της χωρικής απόσβεσης της SPL ανά διπλασιασμό της απόστασης και άλλη η DLf, η οποία περιγράφει την μέση διαφορά, μεταξύ της καμπύλης χωρικής κατανομής ήχου του χώρου και της καμπύλης αναφοράς της χωρικής κατανομής ήχου (σχήμα 47). Η πρόθεση είναι ότι οι καμπύλες χωρικής κατανομής ήχου, μετριούνται σε μπάντες οκτάβας από 125 Hz έως 4000Hz, και αυτοί οι παράμετροι υπολογίζονται για δεδομένες μπάντες οκτάβας.



Σχήμα 47. Μέτρηση της χωρικής κατανομής ήχου και υπολογισμός του DL2 σε ένα χώρο εργασίας για ένα εύρος αποστάσεων 5-24m από το ηχείο σε μία μπάντα οκτάβας των 1000 Hz. Η καμπύλη $Dref$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της DLf.

Η DL2 [dB] υπολογίζεται για ένα εύρος $r_n - r_m$ χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$DL_2 = -0.3 \frac{z \sum_{i=n}^m \left[D_i \log_{10} \left(\frac{r_i}{r_0} \right) \right] - \sum_{i=n}^m D_i \sum_{i=n}^m \left(\frac{r_i}{r_0} \right)}{z \sum_{i=n}^m \left[\log_{10} \left(\frac{r_i}{r_0} \right) \right]^2 - \left[\sum_{i=n}^m \log_{10} \left(\frac{r_i}{r_0} \right) \right]^2} \quad (14)$$

Οπου $r_o = 1 m$, $z = m - n + 1$, και $D_i = Lp,i - Lw$ στη μπάντα οκτάβας. Η στάθμη ακουστικής ισχύος, Lw , υπολογίζεται σε έναν χώρο με αντίχηση σύμφωνα με το ISO 3741 [36].

H DL_f [dB] υπολογίζεται για ένα εύρος $r_n - r_m$ χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

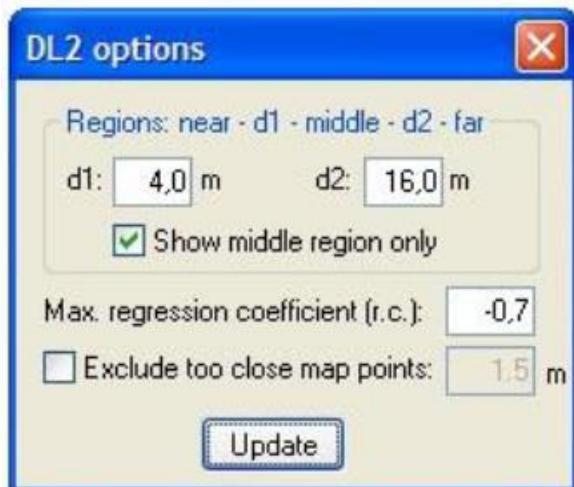
$$DL_f(r_n, r_m) = \frac{\sum_{i=n+1}^m [(DL_{fi} + DL_{fi-1}) \log_{10}(\frac{r_i}{r_{i-1}})]}{2 \log_{10}(\frac{r_m}{r_n})} \quad (15)$$

Όπου $DL_{fi} = D_i - D_{ref}$ και D_{ref} [dB] υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$D_{ref}(r) = (20 \log_{10}(r_0/r) - 11) \quad (16)$$

3.2.4.3 Υπολογισμός DL2 στο CATT Acoustic

Το σχήμα 48 απεικονίζει το παράθυρο ρυθμίσεων DL2 του λογισμικού CATT Acoustic:



Σχήμα 48. Παράθυρο setup υπολογισμού DL2.

Στο σχήμα 48 διακρίνονται οι εξής λειτουργίες:

Επιλογή **d1 και d2 (Regions: near - d1 – middle – d2 – far)**:

Ορίζουν τα όρια της περιοχής. Αυτή η ρύθμιση διαμοιράζεται με τις DL-lines και DLf οθόνες.

Επιλογή **Show middle region only**:

Εμφανίζει μόνο τα σημεία μεταξύ d1 και d2. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με την οθόνη DLf.

Επιλογή **Max. regression coefficient (r.c.)**:

Εμφανίζει μόνο τα σημεία όπου ο συντελεστής οπισθοδρόμησης έχει υψηλότερη αρνητική τιμή από αυτήν που δίνεται. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με την DLf οθόνη.

Επιλογή **Exclude too close map points**:

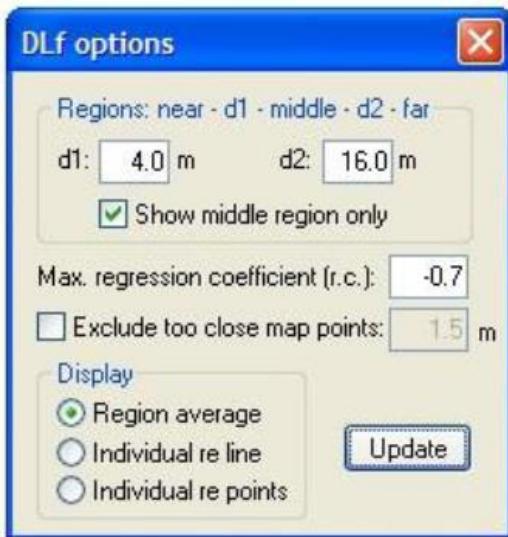
Εξαιρεί σημεία του χάρτη με κέντρα που είναι μικρότερα από την δεδομένη επιφάνεια (εκτός της επιφάνειας ακρόασης, το δάπεδο), επίσης προσθέτει μισό βήμα χάρτη για να είναι εντελώς μακριά. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με τις DL-lines και DLf οθόνες.

Επιλογή **Update**:

Αναβαθμίζει την οθόνη αφού γίνει αλλαγή σε οποιαδήποτε από τα κουτιά με τις τιμές, επίσης αυτό συμβαίνει αν το πλήκτρο Enter πατηθεί μετά την επεξεργασία.

3.2.4.4 Υπολογισμός DLf στο CATT Acoustic

Το σχήμα 49 απεικονίζει το παράθυρο ρυθμίσεων του υπολογισμού DLf:



Σχήμα 49. Παράθυρο ρυθμίσεων DLf.

Σε αυτό το παράθυρο (σχήμα 49) διακρίνονται οι εξής λειτουργίες:

Επιλογή **d1 και d2 (Regions: near – d1 – middle – d2 – far)**:

Ορίζει τα όρια περιοχών. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με τις DL-lines και DLf οθόνες.

Επιλογή **Exclude too close map points**:

Εξαιρεί σημεία του χάρτη με κέντρα που είναι μικρότερα της δεδομένης απόστασης από μία επιφάνεια (με εξαίρεση την επιφάνεια ακρόασης, το δάπεδο), και προσθέτει μισό βήμα χάρτη για να είναι εντελώς μακριά. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με τις DL-lines και DL2 οθόνες.

Επιλογή **Show middle region only**:

Εμφανίζει μόνο τα σημεία μεταξύ των αποστάσεων d1 και d2. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με την οθόνη DL2.

Επιλογή **Max. regression coefficient (r.c):**

Εμφανίζει μόνο τα σημεία όπου ο συντελεστής παλινδρόμησης έχει υψηλότερη αρνητική τιμή από τη δεδομένη. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με την οθόνη DL2.

Επιλογή **Region average (Display):**

Εμφανίζει την μέση περιοχή DLf.

Επιλογή **Individual re line (Display):**

Εμφανίζει το DLf κάθε σημείου στο χάρτη που υπολογίζεται μέσω τις διαφοράς από τη γραμμή παλινδρόμησης και το ελεύθερο πεδίο σε κάθε απόσταση σημείου του χάρτη.

Επιλογή **Individual re points (Display):**

Εμφανίζει το DLf κάθε σημείου στο χάρτη που υπολογίζεται μέσω τις διαφοράς από τη στάθμη ακουστικής πίεσης του πραγματικού σημείου και του ελεύθερου πεδίου σε κάθε απόσταση σημείου στο χάρτη, η απλά την κανονικοποιημένη SPL με την SPL του ελεύθερου πεδίου σε μία απόσταση. Αυτό δεν έχει κάποιο ισοδύναμο στο πρότυπο ISO αλλά φαίνεται ποιο χρήσιμο για ανάλυση.

Επιλογή **Update:**

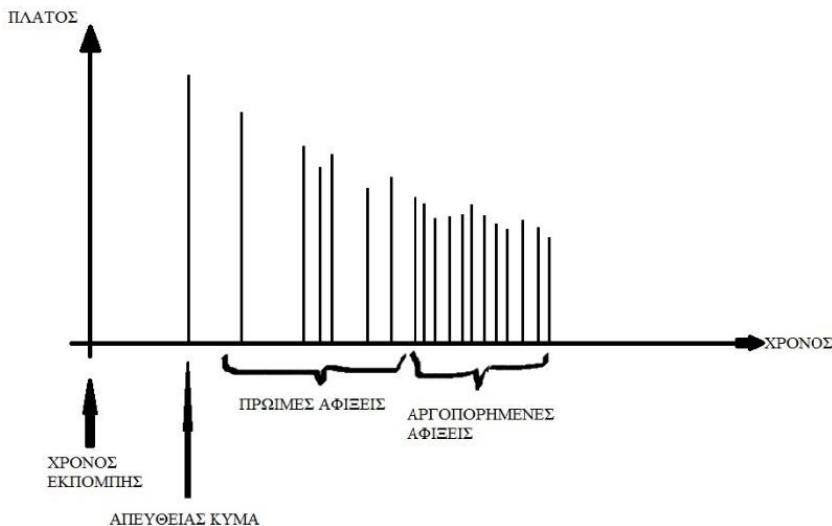
Αναβαθμίζει την οθόνη αφού γίνει αλλαγή σε οποιαδήποτε από τα κουτιά με τις τιμές, επίσης συμβαίνει αν το πλήκτρο Enter πατηθεί μετά την επεξεργασία.

3.2.5 Ηχογράφημα (echograms)

3.2.5.1 Εισαγωγή

Ένα ηχογράφημα η διάγραμμα ανακλάσεων, σχηματικά αναπαριστά τα πλάτη και τους χρόνους άφιξης του απευθείας κύματος και των ανακλώμενων-πλάγιων κυμάτων, για δεδομένες θέσεις της ακουστικής πηγής και του σημείου ακρόασης [37]. Οι χρόνοι άφιξης αντιστοιχούν στους χρόνους διάδοσης, ενώ τα πλάτη εμπλέκουν τις απώλειες εξάπλωσης και τους παράγοντες ανάκλασης (η συντελεστές απορρόφησης) των επιφανειών όπου οι ανακλάσεις λαμβάνουν χώρα. Με βάση το ηχογράφημα, μπορεί να ληφθεί μια απόφαση ως προς το ποιοι είναι οι χρήσιμοι, και ποιοι είναι οι ανακλώμενοι ήχοι.

Το σχήμα 50 απεικονίζει ένα παράδειγμα από ένα ηχογράφημα: η χρονοκαθυστέρηση (time delay) του κάθε ανακλώμενου ήχου μπορεί να διακριθεί. Οι πρώτοι ανακλώμενοι ήχοι, γνωστοί ως πρώιμες αφίξεις, παίζουν έναν αποφασιστικό και χρήσιμο ρόλο, σε σύγκριση με τους ήχους που φτάνουν αργότερα, που αναφέρονται ως αργοπορημένες αφίξεις. Παρατηρούμε ότι η όλο και περισσότερη έντονη πυκνότητα των αργοπορημένων αφίξεων στο χρόνο, τελικά σχηματίζει έναν ημισυνεχή ήχο.



Σχήμα 50. Το διάγραμμα αναπαριστά τους χρόνους άφιξης-πλάτη, του απευθείας κύματος, των πρώιμων ανακλάσεων και των αργοπορημένων αφίξεων.

3.2.5.2 Ο χρήσιμος και επιβλαβής ρόλος των ανακλώμενων ήχων

Διάφορες πειραματικές δοκιμές, έχουν επιχειρήσει να καθιερώσουν αυτούς τους ρόλους. Γενικώς, οι πρώιμες αφίξεις είναι χρήσιμες για την ομιλία (ανξάνουν τη στάθμη) όταν αυτές φτάνουν με delay από 30 έως 50 ms. Το 1953, ο Thiele [37] παρουσίασε την ιδέα της ευκρίνειας του χώρου (room definition), που αντιστοιχεί σε έναν λόγο εκφρασμένο ως ποσοστό της ενέργειας των πρώιμων αφίξεων μέχρι 50 ms σε σύγκριση με την συνολική ενέργεια για διέγερση μοναδιαίου παλμού.

Προηγούμενες μελέτες είχαν προτείνει έναν συντελεστή για τις πρώιμες αφίξεις, καθώς και έναν συντελεστή για τις καταστροφικές επιδράσεις των αργοπορημένων ανακλάσεων. Ο ορισμός είναι στενά συνδεδεμένος με την αντίληψη των συλλαβών και είναι ανεξάρτητος του χώρου. Για την μουσική, ο Alim [37] όρισε τον δείκτη διαύγειας, που αντιστοιχεί στη στάθμη της ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων έως τα 80 ms που αναφέρεται ότι οι αργοπορημένες αφίξεις από 80 ms και άνω, ακόμα χρησιμοποιούν διέγερση μοναδιαίου παλμού.

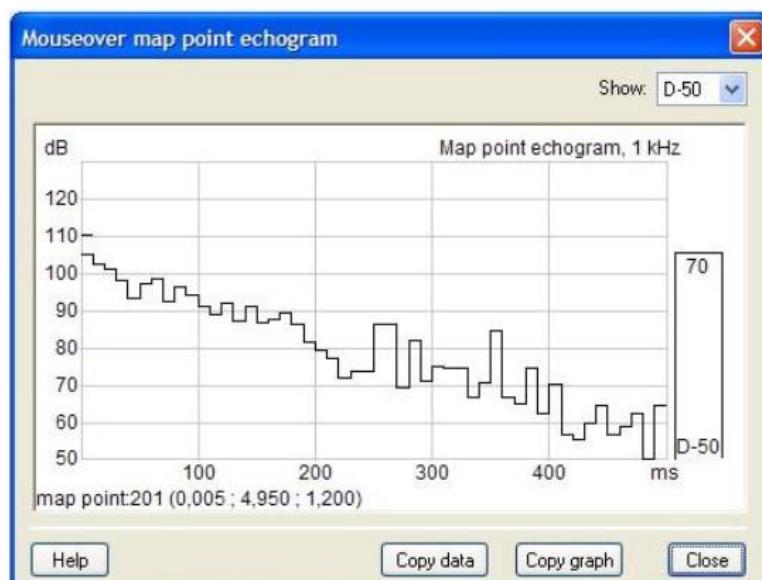
Η μελέτη προσομοίωσης μιας μονής αντήχησης χρησιμοποιώντας ηλεκτροακουστικά μέσα, επέτρεψε στο κατώφλι της ακοής και στη διαταραχή να υλοποιηθούνε σε διαφορετικές συνθήκες. Η εκπομπή του απευθείας ήχου και της αντήχησης κατά την διάρκεια αυτών των δοκιμών γινόταν από διαχωρισμένα ηχεία, όπου αυτό που χρησιμοποιούνταν για την αντήχηση περιείχε μια γραμμή ρυθμιζόμενου delay. Περιέργως, ο προσδιορισμός της ακουστικής πηγής πάντα βασιζόταν στον απευθείας ήχο ακόμα και όταν η αντήχηση ήταν ποιο έντονη. Για μπροστινή πρόσπτωση απευθείας ήχου και αντήχησης, ο Kutruff [38] δίνει για την ομιλία μέση στάθμη 70dB με κατώφλι ακοής στα 50% : $L(pi re pd) = -8 - 0.575 \tau [\text{dB}]$ (17)

Όπου pi και pd οι απευθείας και οι ανακλώμενες ακουστικές πιέσεις, ενώ το τ είναι η χρονική καθυστέρηση (time delay) σε ms. Το σύστημα της ανθρώπινης ακοής είναι λιγότερο ευαίσθητο στη μουσική, το κατώφλι είναι με τα βίας στα -15 dB για 20 ms και μετά μειώνεται κατά 0.13 dB/ms στο πιο πολύ. Αυτά τα κατώφλια ακοής είναι χαμηλότερα όταν η αντήχηση φτάνει στον ακροατή από τα πλάγια ενώ ο απευθείας ήχος φτάνει από μπροστά.

Μια αντιληπτή αντήχηση δεν είναι απαραίτητα δυσάρεστη. Όμως γίνεται πολύ ενοχλητική όταν έχει μεγάλη ένταση, η όταν ξεκάθαρα διακρίνεται από τον απευθείας ήχο. Ο Haas [37] καθιέρωσε ότι με μία σχετική στάθμη αντήχησης των -10 dB, μόνο το 5% των ακροατών αισθάνονταν ενόχληση με χρονοκαθυστέρηση έως 160 ms. Με σχετικές στάθμες των 0 και +10 dB, και καθυστέρηση 40 και 30 ms είναι αναγκαία για να πετύχουμε το 20 % των δυσαρεστημένων ακροατών.

3.2.5.3 Λειτουργία echograms στο CATT Acoustic

Το σχήμα 51 δείχνει το παράθυρο της λειτουργίας echogram του CATT Acoustic. Η ρυθμίσεις αυτές, επιτρέπουν στον χρήστη, να δει κάθε σημείο στο χάρτη και κάποιες βασικές μετρήσεις.



Σχήμα 51. Ρυθμίσεις ηχογραμμάτων του CATT Acoustic.

Επιλέγοντας Echograms στην οθόνη του χάρτη (**Main>Show 3D**) εμφανίζεται η συνολική SPL και κρατώντας πατημένο το SHIFT ενώ μετακινούμε τον κέρσορα πάνω στο αρχικό τμήμα του διαγράμματος (ηχογράφημα έως 500 ms) εμφανίζεται η επιλογή των τριών μετρήσεων: D-50, C-50 και C-80. Στην αριστερή γωνία της γραφικής παράστασης μια μικρή κάθετη γραμμή δείχνει την συνολική SPL. Επιπλέον υπάρχουν οι εξής ρυθμίσεις:

Επιλογή **Copy graph**:

Εμφανίζει το μενού διαλόγου **Graphics copy/save options**.

Επιλογή **Copy data**: Αντιγράφει το διάγραμμα σε ένα TAB.

3.2.6 Υπολογισμοί D-50 και C-50

3.2.6.1 Λόγοι σήματος προς θόρυβο (C_t και U_t)

Το 1935 δύο ερευνητές, οι F. Ainger και M. J. O. Strutt [39], αναφέρθηκαν στην ιδιότητα του αυτιού που συνδυάζει τους ήχους πρώιμων ανακλάσεων με το απευθείας κύμα, ώστε να αυξηθεί η φαινομενική δύναμη του συνόλου. Αυτοί πρότειναν μια εξίσωση ενός λόγου ενέργειας, για να ποσοτικοποιήσουν τον θορύβου φόντου και την ακουστική του χώρου στην ευκρίνεια της ομιλίας. Αυτοί ονόμασαν αυτόν τον λόγο εντύπωση, ο οποίος ορίζεται ως:

$$Q = \frac{E_d + E_e}{E_l + E_n} \quad (18)$$

Όπου E_d = Η ενέργεια του απευθείας πεδίου (N m)

E_e = Το αρχικό τμήμα της ανακλώμενης ενέργειας (N m)

E_l = Το αργοπορημένο τμήμα της ανακλώμενης ενέργειας (N m)

E_n = Η σταθερή ενέργεια του θορύβου (N m)

Αυτοί όρισαν την γραμμή διαίρεσης μεταξύ των πρώιμων και αργοπορημένων ανακλάσεων, στο 1/16 του δευτερολέπτου και όρισαν ένα χαμηλότερο όριο του 1 για την τιμή που ικανοποιεί το Q. Αν γράψουμε την εξίσωση (18) με όρους πυκνότητας ενέργειας παίρνουμε μία παρόμοια εξίσωση:

$$Q = \frac{D_d + D_e}{D_l + D_n} \quad (19)$$

Όπου D_d = Η πυκνότητα ενέργειας του απευθείας πεδίου (W s / m³)

D_e = Το αρχικό μέρος της πυκνότητας ενέργειας του ανακλώμενου κύματος (W s / m³)

D_l = Το αργοπορημένο μέρος της πυκνότητας ενέργειας του ανακλώμενου κύματος (W s / m³)

$$D_n = H \text{ σταθερή πυκνότητα ενέργειας του θορύβου} = \frac{p^2}{\rho_0 c_0^2} \text{ (W s / m}^3\text{)}$$

Θεωρώντας ένα διάχυτο πεδίο, η κρουστική απόκριση της συνιστώσας του απευθείας και ανακλώμενου πεδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$g(t) = \frac{Q}{r^2} \delta(t) + \frac{Q_k}{r_c^2} e^{-kt} \quad (20)$$

Όπου κ είναι η σταθερά της εκθετικής μείωσης της ενέργειας αντίχησης:

$$\kappa = 13.82 / T_{60}$$

Τέλος από τις εξισώσεις 18, 19, 20 προκύπτει η τιμή της εντύπωσης:

$$Q = \frac{1 + (\frac{r_l}{r})^2 - e^{-0.86/T_{60}}}{e^{-0.86/T_{60}} + 10^{0.1(L_n - L_r)}} \quad (21)$$

Όπου $L_n = H$ σταθερή στάθμη θορύβου φόντου (dB)

$L_r = H$ σταθερή στάθμη του σήματος αντήχησης (dB)

Η μετρική σπάνια συναντάται πλέον αλλά είναι ενδιαφέρουσα, όχι μόνο για την ιστορική της σημασία, αλλά επίσης σαν μια εισαγωγή των ποιο πρόσφατων εκδόσεων της ίδιας ιδέας χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποκοπής.

Το 1950, ο Thiele [40] έκδωσε μία από τις πρώτες προσπάθειες συσχετίζοντας τον λόγο της πρώιμης ενέργειας προς την συνολική ακουστική ενέργεια με την ευκρίνεια (Definition) του ήχου όπου αυτός έδωσε τον ορισμό, D. Αυτός θεώρησε για χρήσιμη ενέργεια το απευθείας κύμα και την ανακλώμενη ενέργεια που φτάνει μέσα σε 50 ms στον ακροατή. Ο ορισμός μπορεί να γραφτεί ως [41]:

$$D_{50} = \frac{1 + (\frac{r_l}{r})^2 - e^{-0.69/T_{60}}}{1 + (\frac{r_l}{r})^2} \quad (22)$$

Ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνεται υπόψη για την συμβολή του θορύβου φόντου και της επιζήμιας ενέργειας. Αναπαριστά μια άλλη πρώτη προσπάθεια για να ποσοτικοποιηθεί η ευκρίνεια της ομιλίας με όρους ακουστικής χώρου.

Ο Bradley [42] χρησιμοποίησε παραλλαγές του Q (της μετρικής) στην δικιά του μελέτη της ευκρίνειας ομιλίας σε αίθουσες διδασκαλίας. Αυτό περιείχε τον λόγο χρήσιμου σήματος προς τον επιβλαβή θόρυβο.

$$U_\tau = 10 \log \left[\frac{R_\tau}{(1-R_\tau) + 10^{-0.1L_{SN}}} \right] \quad (23)$$

Όπου R_τ είναι ο λόγος μεταξύ της πρώιμης ενέργειας και της συνολικής ενέργειας:

$$R_\tau = E_e / (E_e + E_l) \quad (24)$$

Και ο λόγος πρώιμου προς αργοπορημένο σήμα και σήματος προς θόρυβο:

$$C_\tau = 10 \log \frac{R_\tau}{1 - R_\tau} \quad (25)$$

Ο οποίος λόγος προκύπτει εξισώνοντας τον δεύτερο όρο του παρονομαστή της εξίσωσης 23 με μηδέν. Όταν αυτές οι εκφράσεις υλοποιούνται χρησιμοποιώντας κρουστική απόκριση διάχυτου πεδίου και χρόνο αποκοπής 50 ms προκύπτει:

$$U_{50} = 10 \log \left[\frac{1 + (\frac{r_l}{r})^2 - e^{-0.69/T_{60}}}{e^{-0.69/T_{60}} + 10^{0.1(L_n - L_r)}} \right] \quad (26)$$

Και

$$C_{50} = 10 \log \left[\frac{1 + (\frac{r_l}{r})^2 - e^{-0.69/T_{60}}}{e^{-0.69/T_{60}}} \right] \quad (27)$$

3.2.7 Υπολογισμοί G και C-80

3.2.7.1 Μοντελοποιώντας υποκειμενικές προτιμήσεις

Τα περισσότερα ακουστικά χαρακτηριστικά μπορούν να μοντελοποιηθούν σχετικά απλά χρησιμοποιώντας τη θεωρεία του απευθείας και του ανακλώμενου πεδίου. Σύμφωνα με την απλή παραδοχή των δύο πεδίων, η σχέση (μετρική) μεταξύ της στάθμης ακουστικής ισχύος και της στάθμης ακουστικής πίεσης είναι:

$$L_p = L_w + 10 \log (Q/4\pi^2 + 4T_{60}/0.161V) \quad (28)$$

Η στάθμη ακουστικής πίεσης σε μία δεδομένη περιοχή μπορεί να γραφτεί σε σχέση με την στάθμη του ελεύθερου πεδίου μίας παντοκατευθυντικής πηγής στα 10 m αντί της στάθμης ακουστικής ισχύος. Αυτό το κέρδος (Gain) του χώρου, κάποιες φορές αποκαλείται συνολική ακουστική στάθμη ή συντελεστής δύναμης G. Δίνεται σε μετρικές μονάδες από την εξίσωση:

$$G = L_p - L_0 = 10 \log (100/r^2 + 31200T_{60}/V) \quad (29)$$

Όπου:

$$L_0 = L_w - 10 \log (400\pi) \quad (30)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αυτές οι σχέσεις, βασίζονται στην εξίσωση του πεδίου αντήχησης του Sabine. Σε πραγματικούς χώρους, η πτώση της στάθμης με την απόσταση δεν είναι πάντα έτσι απλή. Οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε έναν μεγάλο αριθμό αιθουσών, ώθησαν τους Barron και Lee [43], να τροποποιήσουν τις παραδοσιακές εξισώσεις απευθείας πεδίου/αντήχησης, από τη στιγμή που τα δικά τους μετρούμενα δεδομένα ήταν μακριά από τις προβλεπόμενες στάθμες κατά περίπου 2 dB σε μέσο όρο. Αυτοί βρήκαν ότι οι στάθμες του πεδίου αντήχησης μειώνονται με την απόσταση από την πηγή, όμως σε ρυθμό πολύ μικρότερο από σχήμα 52. Ο μέσος ρυθμός μείωσης στη δικιά τους μελέτη ήταν περίπου 1 dB/10m πάνω από την απόσταση των 10 m.

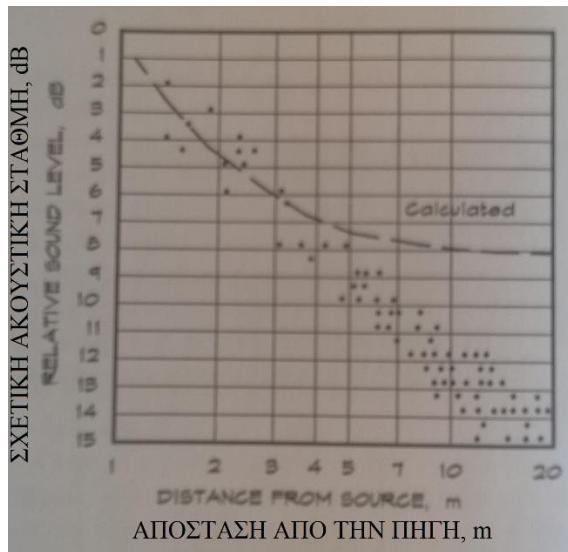
Οι Barron και Lee διαχώρισαν τα ακουστικά πεδία σε τρείς κατηγορίες: απευθείας, πρώιμων ανακλάσεων, και αργοπορημένων ανακλάσεων ενέργειας, με το σημείο καμπής να έχει ληφθεί στα 80 ms. Η ενέργεια σε κάθε τμήμα, σχετική στα 10 m είναι:

$$e_d = 100 / r^2 \quad (31)$$

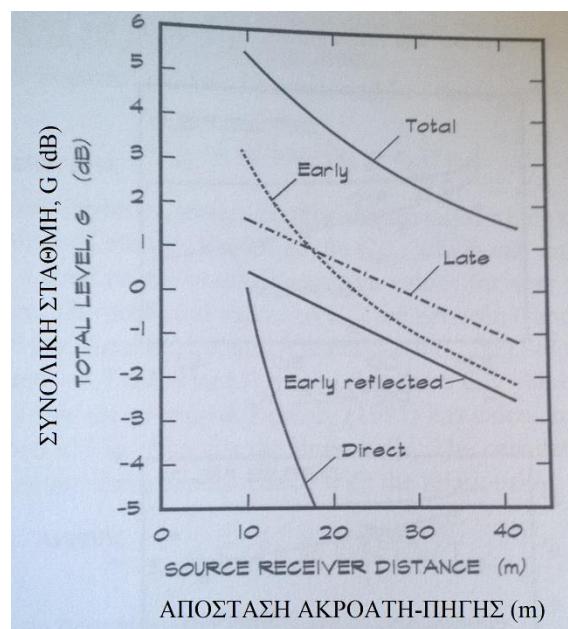
$$e_e = (31200 T_{60} / V) e^{-0.04r/T_{60}} (1 - e^{-1.11/T_{60}}) \quad (32)$$

$$e_l = (31200 T_{60} / V) e^{-0.04r/T_{60}} (e^{-1.11/T_{60}}) \quad (33)$$

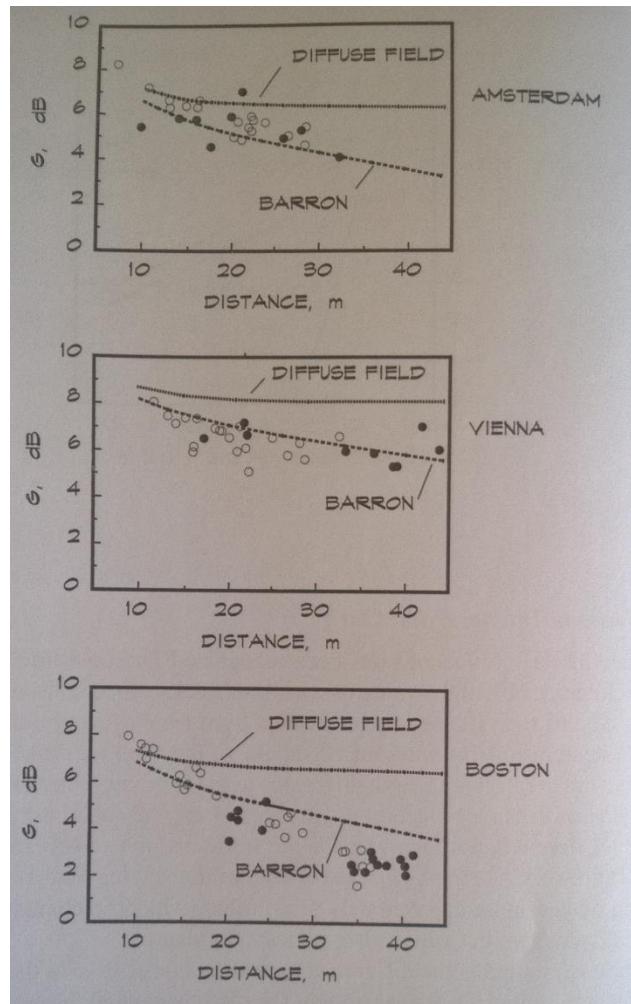
Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι αναθεωρημένες στάθμες της ενέργειας αντήχησης μειώνονται γραμμικά με την απόσταση, που έχει ως αποτέλεσμα μία μείωση των 3 dB στα 40 m από την πηγή. Η γενική συμπεριφορά δίνεται στο σχήμα 53. Το σχήμα 54 απεικονίζει μετρήσεις από τον Bradley [44], του κέρδους του χώρου σε τρείς άδειες αίθουσες συναυλιών, της Concertgebouw στο Άμστερνταμ, της Musikvereinssaal στη Βιέννη, και της συμφωνικής της Βοστόνης που θεωρούνται από τις καλύτερες στον κόσμο. Οι τρείς αυτές σχέσεις προσαρμόζουν τα μετρούμενα δεδομένα πολύ καλύτερα από την παραδοσιακή θεωρεία των δύο πεδίων αν και υπάρχουν κάποιες ενδιαφέρουσες παραλλαγές. Για την Βοστόνη η θεωρία υπο-προβλέπει το G στις κοντινές περιοχές και υπερ-εκτιμάει τη στάθμη σε ποιο απομακρυσμένες περιοχές.



Σχήμα 52. Καμπύλη μετρήσεων ενός δωματίου με συντελεστή απορρόφησης 0.25 σε σχέση με τις υπολογιζόμενες επιδώσεις (διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 53. Η θεωρητική συμπεριφορά διάφορων προσωρινών στοιχείων της ακουστικής ενέργειας. (Barron and Lee, 1988)



Σχήμα 54. Σύγκριση των μετρούμενων τιμών G στα 1 KHz σε σχέση με την απόσταση πηγής-ακροατή στις αίθουσες του Άμστερνταμ, Βιέννης, Βοστόνης.

3.2.7.2 Πρώιμες ανακλάσεις, οικειότητα και διαύγεια

Η σημαντικότητα των πρώιμων ανακλάσεων ήταν αναγνωρισμένη για κάποιο χρόνο. Ο Vitruvius, ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας, επαίνεσε την αξία που οι Έλληνες αποκαλούσαν αρμονικός ήχος, η ήχος που υποστηρίζεται και ενισχύεται από τις ανακλάσεις του σταδίου και άλλων γειτονικών επιφανειών. Ο Sabine ανέφερε τον Vitruvius και επίσης μίλησε για την ανάγκη των ανακλάσεων από επιφάνειες, που δεν έχουν πολύ μεγάλη διαφορά μήκους διαδρομής στον ακροατή. Ο Beranek [45] όρισε τον αρχικό χρόνο καθυστέρησης (time delay) της πρώτης ανάκλασης τι, ως μια ιδιότητα που αυτός αποκάλεσε οικειότητα. Ο Barron έδωσε έναν λίγο διαφορετικό ορισμό, ο οποίος είναι η αίσθηση της μουσικής που αναπαράγεται σε ένα μικρό δωμάτιο. Στην ερευνά του το 1996, ο Beranek άλλαξε τον ορισμό του, λέγοντας πως η οικειότητα είναι η αίσθηση του ήχου που αναπαράγεται σε ένα δωμάτιο κατάλληλων διαστάσεων, το οποίο αυτός χαρακτηρίζει κυρίως σε όρους αρχικού διαστήματος καθυστέρησης, αλλά επίσης το συσχετίζει με την ακουστότητα.

Ο αρχικός χρόνος καθυστέρησης είναι η διαφορά σε ms του χρόνου άφιξης της δυνατότερης ανάκλασης, μείον του χρόνου άφιξης του απευθείας ήχου, στο κέντρο της περιοχής ακρόασης. Το 1962 ο Beranek θεώρησε ότι αυτό είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της ποιότητας των αιθουσών συναυλιών, προσδιορίζοντας έναν μέγιστο αριθμό 40 σημείων σε αίθουσες που έχουν έναν αρχικό χρόνο καθυστέρησης των 20 ms η λιγότερο, μειώνοντας γραμμικά την πίστωση στο μηδέν όταν το διάστημα είναι πάνω από 70 ms. Στην δικιά του νεότερη μελέτη [46], αυτό μειώθηκε σε έναν μέγιστο αριθμό 10 σημείων. Αυτός ακόμα διατήρησε τα 20ms ως κατώφλι, αλλά έκρινε ότι πάνω από τα 35 ms η ποιότητα περιορίζεται ουσιαστικά. Οι μελέτες του Ando σε αίθουσες συναυλιών επιβεβαίωσαν την σημαντικότητα των πρώιμων ανακλάσεων, παρόλο που το δικό του πείραμα ανάκλασης ήταν από τα πλάγια, σε θέση με γωνία 36° από την κεντρική γραμμή στο οριζόντιο επίπεδο. Ο Ando επίσης κατάλαβε ότι ο προτεινόμενος αρχικός χρόνος καθυστέρησης ήταν απλά κάτω από 20 ms.

Ο Barron [47] αιτιολόγησε ότι η οικειότητα δεν είναι ακριβώς το ίδιο με τον αρχικό χρόνο καθυστέρησης. Η αίσθηση που αποκτά κανείς σε ένα μικρό δωμάτιο με μουσικούς όταν κάθεται δίπλα στους παίκτες, είναι ανεξάρτητο από το delay. Πράγματι το διάστημα είναι συχνά μεγαλύτερο σε περιοχές κοντά στην ορχήστρα.

Αν η οικειότητα ήταν εξαρτημένη μόνο από το διάστημα καθυστέρησης, αυτός υποστηρίζει ότι, ο ήχος θα έπρεπε πάντα να είναι πιο οικείος στο πίσω τμήμα της αίθουσας, όπου το χρονικό διάστημα είναι το μικρότερο. Υποκειμενικές έρευνες από τους Hawkes και Douglas και Barron [48] έχουν δείξει το αντίθετο της περίπτωσης, από τη στιγμή που η τιμή του t_i εξαρτάται από τη θέση του ακροατή. Ο Barron επίσης ρώτησε αν είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ένας μονός αριθμός που να χαρακτηρίζει ολόκληρη την αίθουσα συναυλιών. Η διαφορά εδώ πέρα είναι κατά κύριο λόγο ένας ορισμός, από τη στιγμή που ο Beranek [45] και ο Ando [49] όρισαν την οικειότητα ως αρχικό χρόνο καθυστέρησης, και ο Barron ως την αίσθηση που έχει κανείς σε έναν μικρό χώρο.

Ο λόγος SNR του πρώιμου προς το αργοπορημένο σήμα (early-to-late signal SNR) C80, ο οποίος αφορά το STI, χρησιμοποιείται και στην μουσική ακουστική. Επίσης αποκαλείται συντελεστής διαύγειας στην ανάλυση αιθουσών συναυλιών. Ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος της ακουστικής ενέργειας που φτάνει πριν, προς την ενέργεια που φτάνει ύστερα, όπου τα πρώτα 80 ms από την άφιξη του απευθείας κύματος, εκφράζονται ως στάθμη. Η στάθμη αυτή μετριέται σε μια άδεια αίθουσα συναυλίας, και περιέχει περισσότερη πληροφορία από τον αρχικό χρόνο καθυστέρησης, ο οποίος δεν λαμβάνεται υπόψη για την ένταση των πρώιμων ανακλάσεων. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο τριών τμημάτων του Barron και Lee ο C80 μπορεί να γραφτεί ως:

$$C_{80} = 10 \log [(e_d + e_e) / e_l] \quad (34)$$

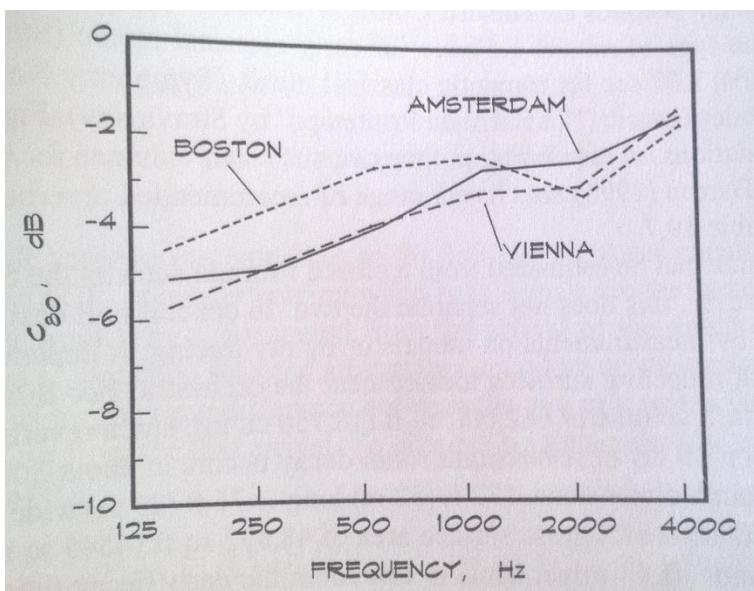
Όπως ακριβώς με την ευκρίνεια της ομιλίας, έτσι και εδώ ένας υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο, ο οποίος είναι αποτέλεσμα των δυνατών πρώιμων ανακλάσεων, παράγει καθαρή μουσική. Οι τιμές του C80, μπορεί να έχουν εύρος από μικρές θετικές τιμές, υπονοώντας ένα "νεκρό δωμάτιο" (dead room), έως μικρές αρνητικές τιμές σε χώρους με μεγάλη αντήχηση, οι τιμές κυμαίνονται σε εύρος +, - 4 dB. Οι προτεινόμενες τιμές του C80 είναι μεταξύ 0 και -4 dB. Αρκετές πολύ επιτυχημένες αίθουσες συναυλιών,

της Βοστώνης, του Άμστερνταμ και Βιέννης έχουνε C80 τιμές μεταξύ -2.7 και -3.7 dB. Τα μέσα των τριών C80 τιμών, που βρίσκονται στις μπάντες οκτάβας των 500, 1 K, 2 KHz υπολογίζονται από τον μέσο όρο. Ο Bradley [44] έχει υπολογίσει τις C80 τιμές, που αναπαράγονται στο σχήμα 55 για αυτές τις τρείς αίθουσες. Οι υπολογισμένες τιμές βασίζονται σε μετρούμενα άδεια νούμερα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$C_{80-o} = C_{80} + 13 \log [T_{60} / T_{60-o}] \quad (35)$$

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε πόσο κοντά οι τιμές είναι μεταξύ τους. Οι πρώιμες ανακλάσεις είναι σημαντικές, για την εκτίμηση γρήγορων μουσικών περασμάτων και περασμάτων που παίζονται από πιο ήσυχα όργανα όπως κιθάρα. Κυρτές επιφάνειες τοποθετούνται πάνω από την ορχήστρα, σε ύψος περίπου 20 πόδια, για να παρέχουν ανακλάσεις πίσω στους μουσικούς και στο ακροατήριο που κάθεται στο κύριο δάπεδο. Αυτές οι επιφάνειες, πρέπει να είναι τοποθετημένες στο ίδιο επίπεδο για την αποφυγή Bragg διασκόρπισης. Για ενίσχυση σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, τα επιμέρους πάνελ πρέπει να είναι σχετικά μεγάλα, τουλάχιστον 6 πόδια (1.8 m) σε μήκος, και να είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ολόκληρου πλάτους της ορχήστρας. Μια μικρή πλευρική κυρτότητα βοηθάει ώστε να καλυφθούν τα κενά που έμειναν από το διάστημα μεταξύ των πάνελ. Η διαμήκη κυρτότητα αντισταθμίζει τις αλλαγές της θέσης του μουσικού ή του οργάνου. Οι Cremer και Muller [50] πρότειναν μια ελάχιστη ανοικτή επιφάνεια περίπου 70%, με πολλά μικρά σύννεφα να προτιμάται με λίγους μεγάλους ανακλαστήρες, ώστε να εξασφαλιστεί σύζευξη μεταξύ των ανώτερων και χαμηλότερων όγκων του χώρου.

Οι πλευρικοί τοίχοι παρέχουν τις αναγκαίες πρώιμες ανακλάσεις για το ακροατήριο που κάθεται προς το πίσω τμήμα της συναυλίας. Σε ορθογώνιες αίθουσες συναυλιών αυτοί είναι παράλληλοι. Σε surround αίθουσες οι τοπικές ανακλαστικές επιφάνειες πρέπει να είναι προσεκτικά κατασκευασμένες για να γεμίσουν τις αναγκαίες ανακλάσεις. Η υψηλή οροφή είναι σχεδιασμένη για να διαχέει και επομένως δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για αυτή τη περίσταση.



Σχήμα 55. Ο μέσος όρος των μετρούμενων τιμών C80 στις τρείς αίθουσες συναυλιών.

3.2.8 Λόγος του απευθείας προς ανακλώμενο κύμα (D/R)

3.2.8.1 Σχεδιασμός ηχο-συστήματος

Η πραγματική διαδικασία του σχεδιασμού ενός ηχο-συστήματος είναι υψηλά επαναληπτική. Ξεκινάει με την ακουστική υλοποίηση του χώρου, συμπεριλαμβάνοντας, έναν υπολογισμό των χρόνων αντήχησης σε κάθε μπάντα συχνοτήτων. Η επιθυμητή μέγιστη SPL του απευθείας πεδίου πρέπει να είναι γνωστή καθώς και το εύρος συχνοτήτων, το είδος του προγράμματος, η θέση των μικροφώνων, και η προτεινόμενη εμφάνιση. Με βάση αυτούς τους παράγοντες γίνεται μια αρχική επιλογή του είδους του συστήματος.

Η επιλογή του συστήματος ηχείων βασίζεται στο στόχο της επίτευξης καλής ευκρίνειας ομιλίας (speech intelligibility) μέσο ενός υψηλού λόγου του απευθείας προς το ανακλώμενο κύμα στον ακροατή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους: 1) μετακινώντας την ακουστική πηγή κοντά στον ακροατή, 2) χρησιμοποιώντας ένα ηχείο με υψηλή κατευθυντικότητα, 3) προσθέτοντας ηχοαπορρόφηση στο χώρο, η 4) χρησιμοποιώντας συνδυασμούς αυτών των τριών.

Σε χώρους με υψηλή αντήχηση, όπου ο λόγος σήματος προς θόρυβο δεν μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας ηχοαπορρόφηση (πχ σε σήραγγες), η ευκρίνεια του ήχου μπορεί μόνο να ελεγχθεί, αυξάνοντας την κατευθυντικότητα των ηχείων, η μειώνοντας την απόσταση μεταξύ πηγής και ακροατή. Αυτό προϋποθέτει ότι οι χρονικές καθυστερήσεις και οι επιμέρους ανακλάσεις να μην επηρεάζουν. Οι επιλογές αυτές μπορούν να περιοριστούν γρήγορα σε κατευθυντικές χοάνες, ως τμήμα ενός η περισσοτέρων συστημάτων array, η κατανεμημένων συστημάτων. Σε χώρους με ηχοαπορρόφηση υπάρχει μια μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών, από τη στιγμή που τα επιμέρους ηχεία μπορεί να είναι μακριά από τον ακροατή και λιγότερο κατευθυντικά. Σε χώρους με χαμηλές επίπεδες οροφές ένα κατανεμημένο σύστημα είναι συνηθισμένη επιλογή. Σε μεγάλου μήκους, στενούς χώρους, όπως εκκλησίες με υψηλές οροφές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πλευρικό σύστημα συμπλήρωσης (side fill system). Σε θέατρα με προσκήνιο (proscenium theaters) προτιμώνται κεντρικά array. Η επιλογή του ηχο-συστήματος σε μεγάλο βαθμό οδηγείται από την αρχιτεκτονική του χώρου.

Η δεύτερη σημαντική επιλογή είναι σε ποιο χώρο θα τοποθετηθεί ο μίκτης. Σε μικρές αίθουσες συνεδριάσεων και αίθουσες meeting, ένας αφύλακτος αυτόματος μίκτης είναι επαρκής. Καθώς το εύρος του υλικού προγράμματος και ο αριθμός των εισόδων αυξάνεται πολύ, ένας χειροκίνητος μίκτης γίνεται αναγκαίος. Σε χώρους όπως σχολεία όπου η ασφάλεια πρέπει να ληφθεί υπόψη, ο μίκτης μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα τεχνικό κουβούκλιο με παράθυρο στο πίσω τμήμα της αίθουσας ακρόασης. Σε νόμιμα θέατρα και χώρους συναυλιών όπου υπάρχει έλεγχος πρόσβασης στην εγκατάσταση και όπου η εμπειρία ακρόασης είναι η μέγιστη ανησυχία, η στέγαση του μίκτη στη περιοχή ακρόασης είναι πολύ σημαντική.

3.2.8.2 Κάλυψη

Μόλις μια προσέγγιση επιλεχθεί, ένας υπολογισμός λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της στάθμης του απευθείας κύματος σε όλο το χώρο. Υπολογιστικά προγράμματα του εμπορίου (πχ CATT Acoustic) έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τέτοιους υπολογισμούς, η μπορεί κάποιος να γράψει πρόγραμμα σε κώδικα. Η διαδικασία σχεδίασης τείνει να είναι επαναληπτική, πχ μετακινώντας τα ηχεία και υπολογίζοντας την επίδραση διαφορετικών συνδυασμών. Σε έναν καλό σχεδιασμό η προβλεπόμενη στάθμη του απευθείας πεδίου, πρέπει να έχει μια στάνταρ απόκλιση λιγότερο από 2 dB στις μπάντες οκτάβας από 500 Hz έως 2 KHz σε όλη την επιφάνεια ακρόασης.

Όταν χρησιμοποιούνται array ηχεία, όσο μεγαλύτερη είναι η ανύψωση των ηχείων, τόσο ομαλότερη θα είναι η κάλυψη, αλλά θα ελαττώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Για μεγάλες χοάνες, τα array θα πρέπει να είναι υψηλότερα από 20 πόδια (6 m) αλλά χαμηλότερα από 35 πόδια (10.6 m) πάνω από την επιφάνεια του ακροατή, για βέλτιστη κάλυψη. Για κατανεμημένα συστήματα οροφής που χρησιμοποιούν ηχεία απευθείας ακτινοβολίας, το μέγιστο πρακτικό ύψος είναι περίπου 20 με 25 πόδια (6 έως 7.6 m). Πάνω από αυτό το ύψος είναι καλύτερα να χρησιμοποιηθούν array η καμπίνες. Τα συστήματα με καμπίνες μπορεί να είναι πολύ πετυχημένα αν υπάρχει επαρκής έλεγχος μοτίβου (pattern control) και ελάχιστη επικάλυψη. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι, ο ελάχιστος εφικτός αριθμός ηχείων πρέπει να καλύψει έναν ακροατή και οι χρόνοι άφιξης πρέπει να ελέγχονται ώστε να μην υπάρχει “θόλωμα” η σύγχυση της κατεύθυνσης του ήχου.

3.2.8.3 Ευκρίνεια της ομιλίας (intelligibility)

Μόλις μία ομαλή κάλυψη έχει επιτευχθεί, το επόμενο βήμα είναι η εξασφάλιση μίας επαρκής ευκρίνειας της ομιλίας. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ο υπολογισμός ενός λόγου σήματος προς θόρυβο, όπου το σήμα είναι η στάθμη του απευθείας πεδίου από όλα τα ηχεία, συνδυασμένα σε ενεργειακή βάση, ενώ ο θόρυβος είναι η στάθμη του πεδίου αντίχησης. Το αποτέλεσμα αυτού του λόγου (σήματος προς θόρυβο) συγκρίνεται με τον πίνακα 9 για τον υπολογισμό της ευκρίνειας.

Λόγος απευθείας προς ανακλώμενο κύμα (dB)	Ευκρίνεια (intelligibility)
>-3	Εξαιρετική
-3 έως -6	Πολύ καλή
-6 έως -9	Καλή
-9 έως -12	Μέτρια
-12 έως -15	Φτωχή
<-15	Πολύ φτωχή

Πίνακας 9. Στάθμες του λόγου του απευθείας προς το ανακλώμενο κύμα για ευκρίνεια ομιλίας σε χώρους.

Ο λόγος των 0 dB του απευθείας προς το ανακλώμενο κύμα σχεδόν ποτέ δεν επιτυγχάνεται μέσα σε κτίρια, και ένας λόγος μεγαλύτερος των -3 dB είναι σπάνιος. Οι τιμές μεταξύ των -3 και -6 αποδίδουν πολύ ικανοποιητική ευκρίνεια. Σε κανονικές συνθήκες αρκεί ο σχεδιασμός ενός χώρου για καλή ευκρίνεια και ένας μικρός αριθμός μέτριων θέσεων ακρόασης, (συγκεκριμένα στα πλαϊνά και στα πίσω τμήματα) είναι ανεκτός. Ένας πίνακας όπως ο πίνακας 9, μπορεί να είναι πολύ χρήσιμος παρότι είναι σχετικά απλός. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με το SNR του χρήσιμου προς το αργοπορημένο σήμα που χρησιμοποιήθηκε από τον Bradley, αλλά χρησιμοποιεί την περιορισμένη ολοκλήρωση του μηδενικού χρόνου. Μία πιο λεπτομερή ανάλυση θα λάβει υπόψη τις πρώιμες ανακλάσεις από γειτονικές επιφάνειες και πιθανόν έναν παράγοντα για τον χρόνο αντήχησης παρόμοιο με τις μεθοδολογίες που συζητήθηκαν προηγουμένως. Στις περισσότερες σχεδιάσεις ηχο-συστημάτων, υπάρχει μια συντονισμένη προσπάθεια, ώστε τα ηχεία να σημαδεύουν στην περιοχή ακρόασης και να κρατάνε τις ανακλάσεις μακριά από τους τοίχους και τις οροφές. Σαφώς δεν είναι όλο το πεδίο αντήχησης επιβλαβές για την ευκρίνεια της ομιλίας, αλλά αυτό λαμβάνεται υπόψη στον πίνακα. Καθώς ο ακροατής απομακρύνεται από την πηγή, και πιο κοντά στους πλαϊνούς τοίχους η σε άλλες ανακλαστικές επιφάνειες, είναι πιο πιθανό ότι οι στάθμες του απευθείας πεδίου θα αυξηθούν από ωφέλιμες ανακλάσεις και ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα βελτιωθεί. Επομένως οι περιοχές του ακροατηρίου σε αυτές τις θέσεις, μπορούν να σχεδιαστούν με την προσδοκία λίγης επιπλέον συνεισφοράς του απευθείας πεδίου.

Ο πίνακας 9 δεν λαμβάνει υπόψη τον θόρυβο λόγο άλλων πηγών, από τη στιγμή που ηχο-συστήματα μπορούν να εμφανιστούν αρκετά ώστε να καλύψουν τις περισσότερες στάθμες φόντου. Αξιοσημείωτες εξαιρέσεις σε αυτόν τον κανόνα περιλαμβάνουν τα αθλητικά στάδια όπου ο θόρυβος του πλήθους μπορεί να ξεπεράσει τα 100 dBA. Επομένως η συνολική στάθμη πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά.

Οι μετρήσεις ευκρίνειας του ήχου, τις οποίες δεν τις είχαν αναπτύξει αρχικά για πολλαπλές πηγές, έχουν υιοθετηθεί στους υπολογισμούς ηχο-συστημάτων. Το 2000, η JBL [51], έκδωσε ένα τεχνικό κείμενο που περιέχει εξισώσεις και ένα διάγραμμα (σχήμα 56) για την πρόβλεψη της απώλειας προφοράς των συμφώνων με όρους ενέργειας απευθείας πεδίου και πεδίου αντήχησης. Η σημείωση παραπέμπει σε έρευνα από τον Peutz [52].

$$AL_{cons} = 100(10^{-2(A + BC - ABC)} + 0.15) \quad (36)$$

$$A = -0.32 \log \left[\frac{E_R + E_N}{10E_D + E_R + E_N} \right] \quad (37)$$

$$B = -0.32 \log \left[\frac{E_N}{10E_R + E_N} \right] \quad (38)$$

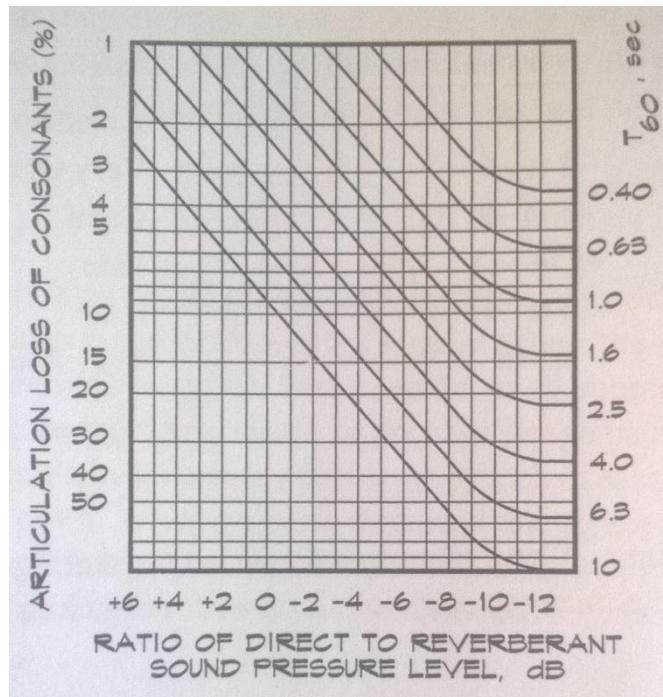
$$C = -0.5 \log \left[\frac{T_{60}}{12} \right] \quad (39)$$

Όπου $E_R = 10^{0.1} L_R$ = Συνεισφορά πεδίου αντήχησης.

$E_D = 10^{0.1} L_D$ = Συνεισφορά απευθείας πεδίου.

$E_N = 10^{0.1} L_N$ = Συνεισφορά πεδίου θορύβου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αυτοί οι όροι δεν είναι απλές ενέργειες αλλά κανονικοποιημένοι λόγοι εντάσεων, οι οποίοι είναι ανάλογοι της ενέργειας. Όταν οι υπολογισμοί δείξουν ότι ο σχεδιασμός ενός ηχείου δεν θα οδηγήσει σε επαρκή ευκρίνεια ομιλίας, ο λόγος σήματος προς θόρυβο πρέπει να βελτιωθεί. Υπάρχουν μόνο ελάχιστοι τρόποι για να γίνει κάτι τέτοιο, να μειωθεί ο πεδίο αντήχησης ή να αυξηθεί το απευθείας πεδίο. Το πεδίο αντήχησης μπορεί να μειωθεί προσθέτοντας υλικά ηχοαπορρόφησης σε έναν χώρο, η μειώνοντας τη στάθμη ακουστικής ισχύος των ηχείων. Το απευθείας πεδίο μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας πιο κατευθυντικά ηχεία, η μετακινώντας τα ηχεία πιο κοντά στον ακροατή.



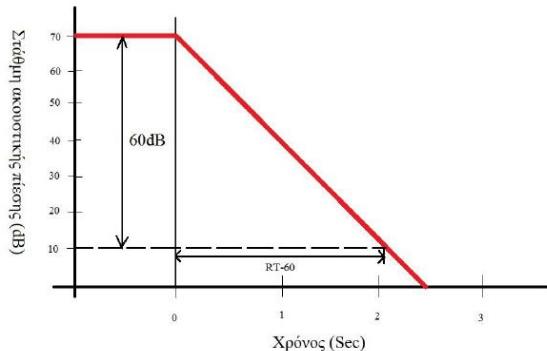
Σχήμα 56. Alcons σε σχέση με τον λόγο απευθείας προς ανακλώμενο κύμα.

3.2.9 Έννοιες T_s , RT, T30 και EDT

Μια από τις ποιο σημαντικές παραμέτρους της ακουστικής είναι ο χρόνος αντήχησης T_s . Ο χρόνος αντήχησης καθορίζει την ακουστική ποιότητα ενός χώρου. Ο υπολογισμός του και κατ' επέκτασιν η παραμετροποίησή του στα επιθυμητά επίπεδα, αποτελεί ένα από τα βασικότερα θέματα που έχει να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός.

Σε ένα κλειστό χώρο οι ηχητικές ακτίνες προτού απορροφηθούν πλήρως από τα τοιχώματα διατηρούν την ηχητική τους ενέργεια για κάποιο διάστημα. Όταν η ακουστική πηγή σταματήσει να παράγει ήχο, η ηχητική ενέργεια δεν σταματά ακαριαία αλλά διατηρείται για λίγο χρόνο έως ότου απορροφηθεί πλήρως. Παραδείγματος χάρη αν ένας ομιλητής σε μια αίθουσα σταματήσει να μιλά, θα ακούγεται φωνή του για κάποιο χρονικό διάστημα. Η μείωση της ηχητικής ενέργειας μετά τον μηδενισμό της ηχητικής πηγής εκφράζει τον χρόνο αντήχησης και μετριέται σε δευτερόλεπτα (sec).

Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντήχησης ενός χώρου είναι ο χρόνος αντήχησης RT60 (η RT) που ορίζεται ως ο χρόνος που μεσολαβεί, μετά τη διακοπή της ηχητικής διέγερσης ενός χώρου, ώστε να παρατηρηθεί μείωση της ηχητικής στάθμης κατά 60 dB (Σχήμα 57) [28].

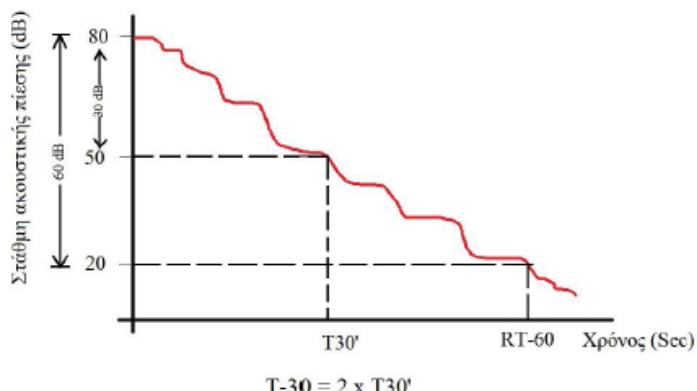


Σχήμα 57. Καμπύλη προσδιορισμού χρόνου αντήχησης.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω ορισμό, ο χρόνος αντήχησης εκφράζει πόσο ισχυρό είναι το ανακλώμενο πεδίο και πόσο γρήγορα εξασθενεί. Αντιλαμβανόμαστε ότι, μικρός χρόνος αντήχησης σημαίνει γρήγορη εξασθένηση του ανακλώμενου πεδίου και επομένως μη ισχυρό πεδίο αντήχησης, ενώ αντίθετα μεγάλος χρόνος αντήχησης συνεπάγεται παρουσία έντονου πεδίου αντήχησης. Δεδομένου ότι ο χρόνος αντήχησης εκφράζει το πεδίο ανακλασης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό πτώσης της ακουστικής ενέργειας στο χώρο και κατά συνέπεια το χρόνο αντήχησης είναι:

- Ο όγκος του χώρου
- Υπαρξη ή όχι ανακλαστικών επιφανειών
- Ηχοαπορροφητικές ιδιότητες όλων των επιφανειών και των διαφόρων αντικειμένων που βρίσκονται σε αυτόν.

Σε θορυβώδες περιβάλλον, δηλαδή σε χώρους όπου υπάρχουν υψηλές στάθμες θορύβου και κατά συνέπεια φτωχοί λόγοι σήματος προς θόρυβο, είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του χρόνου αντήχησης RT60. Για αυτό χρησιμοποιείται ο χρόνος αντήχησης T30. Όταν η πηγή απενεργοποιηθεί το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να υπάρξει μείωση της στάθμης κατά 30 dB επι δύο ορίζεται ως T30 (Σχήμα 58).



Σχήμα 58. Προσδιορισμός χρόνου αντήχησης T30.

Το εγχειρίδιο του CATT Acoustic για τον χρόνο αντίχησης T_{30} αναφέρει τα εξής:

To T_{30} υπολογίζεται από το ηχογράφημα σε κάθε σημείο του χάρτη, αν το μήκος από το ηχογράφημα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να έχει μια έγκυρη μείωση στα -35 dB χρησιμοποιώντας το εύρος -5 ... -35 dB. Αν το αναμενόμενο T_{30} δείχνει ότι το μήκος από το ηχογράφημα δεν αντιστοιχεί στα -45 dB καμία τιμή δεν είναι δεδομένη. Από τη στιγμή που η ανίχνευση των ακτίνων (Ray – tracking) μπορεί να δώσει ένα αρκετά οδοντωτό τελικό τμήμα, ειδικά με λίγες ακτίνες, εμφανίζονται μόνο οι τιμές με συντελεστή παλινδρόμησης μεγαλύτερο του 0.95. Ωστόσο, μία γενική μέση τιμή του T_{30} υπολογίζεται από ένα μέσο ηχογράφημα συνολικά από όλα τα σημεία του χάρτη. Θεωρώντας ότι ο μέσος όρος του T_{30} έχει συντελεστή παλινδρόμησης μεγαλύτερο του 0.95 αυτή η τιμή εμφανίζεται εκεί που τα επιμέρους σημεία του χάρτη με τους συντελεστές παλινδρόμησης είναι μεγαλύτερα από 0.95. Επίσης εμφανίζεται ως μαυρόασπρη διακεκομμένη γραμμή στην κλίμακα του χρώματος.

Το εγχειρίδιο του CATT Acoustic για το EDT αναφέρει ότι:

To EDT υπολογίζεται από το ηχογράφημα (Echograms) σε κάθε σημείο του χάρτη, αν το μήκος από το ηχογράφημα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να έχει μία έγκυρη μείωση στα -10 dB και εμφανίζονται μόνο οι τιμές με συντελεστή παλινδρόμησης μεγαλύτερο του 0.95. Η μείωση από 0 έως -10 dB δεν είναι σχεδόν ποτέ ευθεία γραμμή, ειδικά όχι πάνω στον άξονα (on axis) και πολύ κοντά σε μία κατευθυντική πηγή. Επομένως κάποιες από τις θέσεις μπορεί να πάρουν πολύ χαμηλό συντελεστή παλινδρόμησης (regression coefficient).

Επίσης για το RT' αναφέρει:

Υπολογίζεται από το T_s θεωρώντας εκθετική μείωση ($RT' = 13.8 T_s$), για κοντινές θέσεις είναι παρόμοιο με το EDT, ενώ για μακρινές θέσεις παρόμοιο με το T_{30} .

3.2.10 Στάθμη ακουστικής πίεσης (SPL) και SPL(t)

3.2.10.1 Εισαγωγή

Στην ακουστική, οι πιο συνηθισμένοι λόγοι είναι οι αλλαγές της στάθμης πίεσης. Αρχικά, πρέπει να υπάρχει ένα μέγεθος αναφοράς. Το παλιό μέγεθος αναφοράς ήταν 0.0002 dyn/cm², αλλά άλλαξε σε 0.00002 N/m² (20 μN/m² ή 20 μPa). Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα 0.0002 dyn/cm² είναι ακριβώς η ίδια ακουστική πίεση με τα 0.00002 N/m². Ακόμα ποιο πρόσφατα το ISO έχει δώσει για μονάδες μέτρησης τα Pascals (Pa) [17].

$$20 \text{ } \mu\text{Pa} = \frac{0.0002 \text{ dyn}}{\text{cm}^2} \quad (40)$$

Αυτό σημαίνει ότι αν η πίεση μετριέται σε Pascals:

$$L_p = 20 \log \frac{x \text{ Pa}}{20 \text{ } \mu\text{Pa}} [\text{dB}] \quad (41)$$

Αν η ακουστική πίεση μετριέται σε dynes ανά τετραγωνικό εκατοστό (dyn/cm^2), τότε:

$$L_p = 20 \log \frac{\frac{x \text{ dyn}}{\text{cm}^2}}{\frac{0.0002 \text{ dyn}}{\text{cm}^2}} [\text{dB}] \quad (42)$$

Η ενεργή τιμή της ακουστικής πίεσης (Prms) δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Prms} = 2\pi f A \rho c \quad (43)$$

Όπου:

Prms , είναι η ενεργός τιμή της πίεσης σε Pascal (Pa).

f , η συχνότητα σε Hertz (Hz).

A , η μετατόπιση των σωματιδίων του αέρα σε μέτρα (rms τιμή).

ρ , η πυκνότητα του αέρα σε κιλά ανά κυβικό μέτρο (kg / m^3).

c , η ταχύτητα του μέσου που μετριέται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα (m/s).

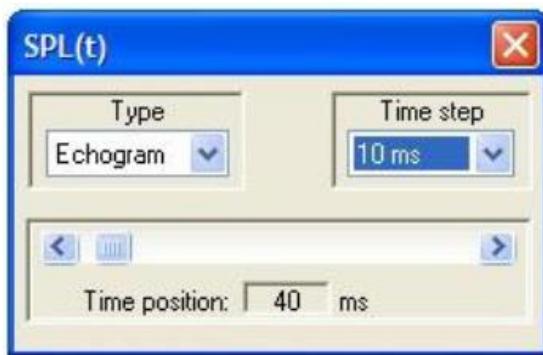
$\rho c = 406 \text{ RAYLS}$ που ονομάζεται χαρακτηριστική ακουστική αντίσταση.

Άρα:

$$L_p = 20 \log \frac{\text{Prms}}{20 \mu\text{Pa}} [\text{dB}] \quad (44)$$

3.2.10.2 Στάθμες ακουστικής πίεσης στο CATT Acoustic

Η λειτουργία SPL (t) δημιουργεί βήματα σε όλον τον χάρτη συνάρτηση του χρόνου, χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση 10 ms, 20 ms,50 ms, σε τρείς λειτουργίες (Σχήμα 59):



Σχήμα 59. Η λειτουργία SPL (t) του CATT Acoustic.

Λειτουργία Echogram:

Εμφανίζει την στάθμη ακουστικής πίεσης (SPL) σε κάθε χρονικό τμήμα. Το πρώτο πλαίσιο είναι ο απευθείας ήχος και οι πολύ πρώιμες ανακλάσεις (ψευδό-απευθείας κύμα).

Λειτουργία Buildup:

Εμφανίζει την συσσώρευση της στάθμης ακουστικής πίεσης συνάρτηση του χρόνου, το πρώτο πλαίσιο είναι το ίδιο με το Echogram και το τελευταίο πλαίσιο εμφανίζει τη συνολική στάθμη ακουστικής πίεσης (Total SPL). Με άλλα λόγια μία προς τα εμπρός ενσωμάτωση του echogram σε κάθε σημείο του χάρτη.

Λειτουργία Decay:

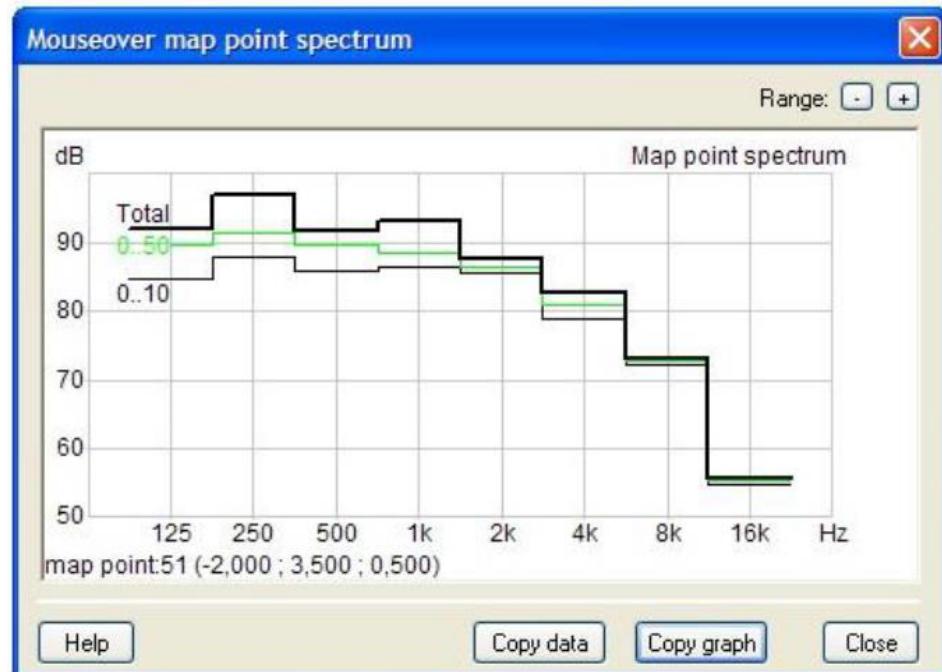
Εμφανίζει την μείωση της SPL σαν συνάρτηση του χρόνου, το πρώτο πλαίσιο είναι η συνολική στάθμη και το τελευταίο πλαίσιο είναι η στάθμη του τελευταίου πλαισίου. Με άλλα λόγια μια προς τα πίσω ενσωμάτωση του echogram σε κάθε σημείο του χάρτη.

Σημείωση:

- Ο χρόνος δεν είναι ο χρόνος άφιξης από την πηγή αλλά για κάθε σημείο του χάρτη, “χρόνος μηδέν” είναι όταν φτάσει το πρώτο απευθείας κύμα.
- Το εύρος (Range) πρέπει να είναι μεγάλο για την καλή εμφάνιση του Echogram και του Decay, η τα μεταγενέστερα χρονικά διαστήματα απλά θα εμφανίσουν τις ακουστικές στάθμες (SPLs) κάτω από την κλίμακα χρώματος.
- Μία χρήση της SPL (t), είναι να μας δείξει αν έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές ακτίνες. Αν πολύ λίγες ακτίνες έχουνε χρησιμοποιηθεί, ο χάρτης Echogram θα χειροτερεύει με την πάροδο του χρόνου πχ με σημεία να λείπουν, τουλάχιστον στα πρώτα 200 ms θα πρέπει να φαίνεται καλά. Ωστόσο και χώροι με περίεργη ακουστική μπορούν να συμπεριφέρονται έτσι.
- Με την επιλογή μόνο του απευθείας ήχου (Direct Sound Only) και παρέμβασης (interference), που επιλέγονται από τις ρυθμίσεις μετρήσεων χάρτη, μικρές τιμές στάθμης ακουστικής πίεσης, μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ των χρόνων άφιξης των απευθείας ήχων από επιμέρους ακουστικές πηγές. Αυτό οφείλεται λόγω του σχήματος της μπάντας οκτάβας των FIR φίλτρων που χρησιμοποιούνται για να υπολογίζουν το φαινόμενο της παρεμβολής (interference effect).

3.2.11 Λειτουργία Spectra

Η λειτουργία αυτή εμφανίζει την ακουστική στάθμη (SPL) κάθε σημείου του χάρτη σε οκταβικό φάσμα, καθώς και την SPL σε φάσματα 0..10 ms και 0..50 ms (σχήμα 60).



Σχήμα 60. Εμφάνιση φάσματος στο CATT Acoustic.

Αφού επιλέξουμε Spectra στην οθόνη χάρτη **Main::Show 3D**, εμφανίζεται ένα SPL φάσμα και κρατώντας πατημένο το SHIFT ενώ μετακινείται ο κέρσορας στον χάρτη, το αρχικό τμήμα του φάσματος εμφανίζεται μαζί με την επιλογή εύρους (Range) που έχει χρησιμοποιηθεί. Μια χρήση αυτής της λειτουργείας, μπορεί να είναι οι χάρτες θορύβου, όπου ο θόρυβος γύρω από την θέση ενός ακροατή μπορεί να διαβασθεί και να χρησιμοποιηθεί ως επιμέρους θόρυβος στο αρχείο των ακροατών (receiver file) που θα χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη Predict SxR STI.

Λειτουργία Copy data:

Αντιγράφει τα δεδομένα από τις γραφικές παραστάσεις μαζί με κάποιες πληροφορίες σε ένα αρχείο κειμένου για επικόλληση σε υπολογιστικό φύλλο.

Λειτουργία Copy graph:

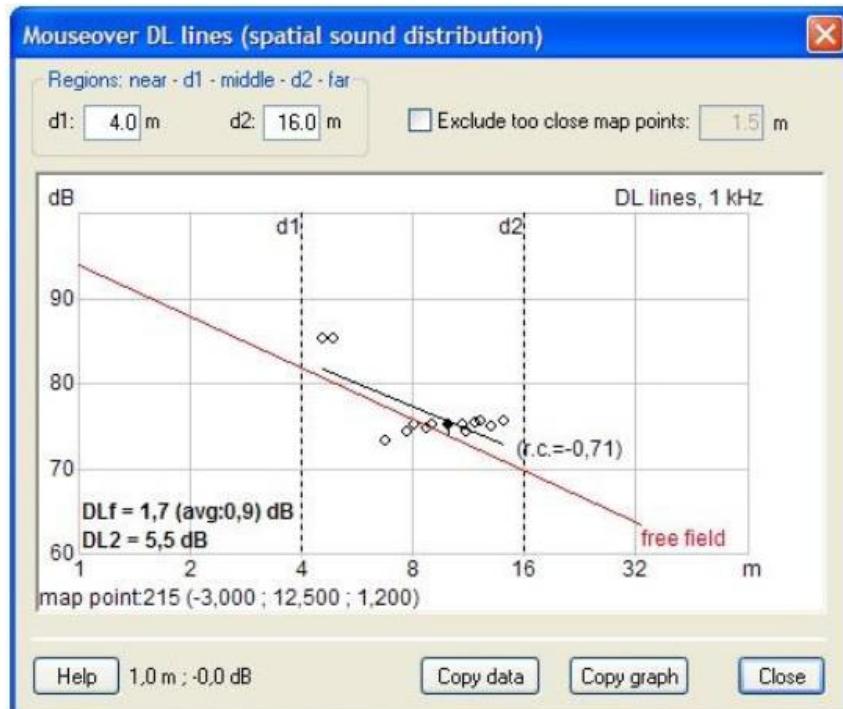
Εμφανίζει το παράθυρο επιλογών αντιγραφής/αποθήκευσης της γραφικής παράστασης (Graphics copy/save options).

Λειτουργία Range:

Επιλογή εμφάνισης του εύρους φάσμασματος της στάθμης ακουστικής πίεσης.

3.2.12 Λειτουργία DL-Lines

Οι DL-Lines βασίζονται στις μετρήσεις DLf και DL2 (ISO 14257) και επίσης τις χρησιμοποιούσαν στο ISO 3382-3 (σχήμα 61).



Σχήμα 61. Παράθυρο ρυθμίσεων DL-Lines στο CATT Acoustic.

Όταν ο κέρσορας σημαδεύει σε ένα σημείο του χάρτη, εμφανίζονται η γραμμή τα αντίστοιχα DL2, DLf και ο συντελεστής παλινδρόμησης. Η μαύρη τελεία υποδεικνύει ότι το σημείο του χάρτη στην πραγματικότητα επισημάνθηκε και η κάθετη μαύρη γραμμή δείχνει την γραμμή αναφοράς DLf για αυτό το σημείο του χάρτη.

Επιλογή d1 και d2 (Regions: near – d1 – middle – d2 – far):

Ορίζει τα όρια της περιοχής. Επιλέγουμε Enter μετά την επεξεργασία και μετά επιλέγουμε SHIFT και μετακινούμε τον κέρσορα πάνω στο χάρτη. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με τις οθόνες DL2 και DLf.

Επιλογή exclude too close map points:

Εξαιρεί σημεία του χάρτη με κέντρα που είναι μικρότερα της δεδομένης απόστασης από μία επιφάνεια (με εξαίρεση την επιφάνεια ακρόασης, το δάπεδο), προσθέτει ένα μισό βήμα χάρτη για να είναι τελείως μακριά. Μετά από την αλλαγή ξανά επιλέγουμε SHIFT και μετακινούμε τον κέρσορα πάνω στο χάρτη. Αυτή η ρύθμιση είναι διαμοιρασμένη με τις DL2 και DLf οθόνες.

Επιλογή Copy data:

Αντιγράφει τα δεδομένα των γραμμών σε ένα TAB αρχείο κειμένου στο σημειωματάριο.

4. Ηχο-συστήματα ειδοποιήσεων σε σήραγγες

4.1 Εισαγωγή

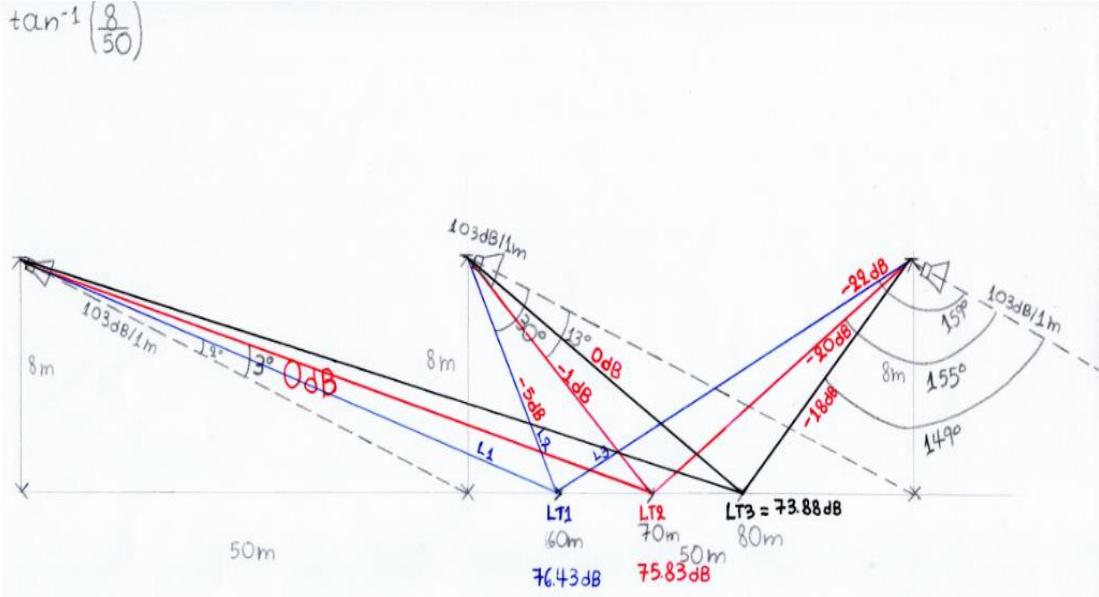
Το παρόν κεφάλαιο, αφορά τη σύγκριση δύο ενδεικτικών ηχο-συστημάτων που έχουν εφαρμογή στη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί. Τα δύο αυτά ηχο-συστήματα περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.6. Η σύγκριση αυτών των δύο διατάξεων έγινε με σκοπό να διερευνηθεί ποιο από τα δύο ηχο-συστήματα αποδίδει την καλύτερη ποιότητα του ήχου. Για αυτό τον λόγο, έγιναν διάφοροι υπολογισμοί ακουστικών παραμέτρων τόσο στο χαρτί, όσο και σε προσομοίωση μέσο του λογισμικού CATT Acoustic.

Οι υπολογισμοί που έγιναν στο χαρτί, αφορούν την συνολική στάθμη ακουστικής πίεσης του απευθείας πεδίου (L_T – Direct) για διάφορες θέσεις ακρόασης, δηλαδή το απευθείας κύμα που λαμβάνει ο ακροατής από όλες τις χοάνες. Συνολικά έγιναν έξι υπολογισμοί στο χαρτί. Οι τρείς αφορούσαν πιθανές περιπτώσεις της μιας διάταξης ηχο-συστήματος, ενώ οι άλλοι τρείς της άλλης. Από τη πρώτη διάταξη ηχο-συστήματος επιλέχτηκε η περίπτωση με την καλύτερη κάλυψη, αντίστοιχα το ίδιο έγινε και στη δεύτερη διάταξη, όπου στο τέλος έγινε σύγκριση των ακουστικών παραμέτρων των δύο καλύτερων περιπτώσεων με το CATT Acoustic. Επίσης, τα ηχο-συστήματα σε σήραγγες, είναι σχεδιασμένα ώστε να μεταδίδουν ανακοινώσεις (ομιλίες) σε περιπτώσεις εκτάκτων καταστάσεων, για αυτό οι υπολογισμοί μέσω της προσομοίωσης αφορούσαν ακουστικά μεγέθη που σχετίζονται με την ποιότητα της ομιλίας. Συγκεκριμένα, οι ακουστικοί παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν: Ο λόγος SNR του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο U-50, το STI, που σχετίζεται με την ποιότητα μετάδοσης ομιλίας, η ευκρίνεια της ομιλίας D-50, καθώς και αν υπάρχει καλή κάλυψη.

4.2 Μαθηματικό μοντέλο 1^{ης} διάταξης

Το σχήμα 62 απεικονίζει μια ενδεικτική διάταξη ηχο-συστήματος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί, όπου για αυτό το διάγραμμα έχουν γίνει υπολογισμοί στο χαρτί.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{50}\right)$$



Σχήμα 62. Χοάνες ίδιας κατεύθυνσης με διαστήματα ανά 50m.

Το διάγραμμα, απεικονίζει χοάνες που έχουν ίδια κατεύθυνση. Οι χοάνες αυτές έχουν απόσταση 50m μεταξύ τους και είναι τοποθετημένες σε ύψος 8m πάνω από τον δρόμο, ενώ οι κύριοι άξονες των χοανών σημαδεύουν ανά 50m (δηλαδή στην αρχή της επόμενης χοάνης). Επίσης στους υπολογισμούς επιλέχτηκε η χοάνη TUNNEL500-DUP40(T), που τα χαρακτηριστικά της περιγράφονται στο κεφάλαιο 1.7.2. Σύμφωνα με το πολικό διάγραμμα η χοάνη αυτή παράγει μέγιστη ευαισθησία 103 dB/1m στον κύριο άξονα, στα 1 KHz. Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις θέσεις ακροατών, στα 60, 70 και 80m. Επίσης διακρίνεται, ότι ο κάθε ακροατής λαμβάνει στάθμες απευθείας πεδίου από όλες τις ακουστικές πηγές, παραδείγματος χάρη ο ακροατής στη θέση των 60m λαμβάνει τη στάθμη L1 από την αριστερή χοάνη, την L2 από την κεντρική χοάνη, και την L3 από την δεξιά (μπλε γραμμές), όπου η υπέρθεση των τριών δίνει ως αποτέλεσμα μια συνολική στάθμη L_{T1}. Οι στάθμες του απευθείας πεδίου βασίζονται στο νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου. Έτσι η απευθείας στάθμη L1 υπολογίζεται από την εξίσωση: $L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53m) = 67.36 \text{ dB}$, δηλαδή η L1 προκύπτει από τη διαφορά της μέγιστης ευαισθησίας στον κύριο άξονα (103 dB), μείον την ευαισθησία του άξονα που είναι υπό κάποια γωνία (0 dB στις 2°), μείον του λογαρίθμου της απόστασης πηγής-ακροατή, όπου απόσταση των 60.53m υπολογίζεται από το πυθαγόρειο θεώρημα: $d_1 = \sqrt{8^2 + 60^2} = 60.53m$. Η στάθμη του απευθείας πεδίου L2 υπολογίζεται από την εξίσωση: $L_2 = 103 \text{ dB} - 5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(12.80m) = 75.85 \text{ dB}$, όπως με πριν έτσι και εδώ, η L2 θα είναι η διαφορά της ευαισθησίας του κύριου άξονα μείον 5 dB για τον άξονα των 30°, μείον του λογαρίθμου της απόστασης πηγής-

ακροατή ($d_2 = \sqrt{8^2 + 10^2} = 12.80m$). Αντίστοιχα ο ακροατής στη θέση των 60m λαμβάνει τη στάθμη L₃ που εκπέμπεται από την δεξιά χοάνη, η οποία ισούται με: $L_3 = 103 dB - 22 dB - 20 \log_{10}(40.79m) = 48.78 dB$. Τέλος η υπέρθεση των 3 ασυσχέτιστων στάθμεων στη θέση ακρόασης των 60m υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{T1} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{67.36 dB}{10}} + 10^{\frac{75.85 dB}{10}} + 10^{\frac{48.78 dB}{10}} \right) = 76.43 dB$$

Τα σχήματα 63 και 64 απεικονίζουν αναλυτικά τους υπολογισμούς που έγιναν στο χαρτί, καθώς και τους υπολογισμούς για τις συνολικές στάθμες του απευθείας πεδίου για τις θέσεις ακρόασης των 70, 80m.

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{8^2 + 60^2} \Rightarrow d_1 = 60.53 m & \text{ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 60m:} \\ L_1 &= 103 dB - 0 dB - 20 \log_{10}(60.53m) \Rightarrow L_1 = 67.36 dB & \tan^{-1} \frac{8}{60} \\ d_2 &= \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_2 = 12.80m & \\ L_2 &= 103 dB - 5 dB - 20 \log_{10}(12.80m) \Rightarrow L_2 = 75.85 dB & \\ d_3 &= \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_3 = 40.79m & \\ L_3 &= 103 dB - 22 dB - 20 \log_{10}(40.79m) \Rightarrow L_3 = 48.78 dB & \\ L_{T1} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{67.36 dB}{10}} + 10^{\frac{75.85 dB}{10}} + 10^{\frac{48.78 dB}{10}} \right) \Rightarrow L_{T1} = 76.43 dB & \boxed{L_{T1} = 76.43 dB} \\ \text{ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 70m:} \\ d_1 &= \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_1 = 70.45 m \\ L_1 &= 103 dB - 0 dB - 20 \log_{10}(70.45m) \Rightarrow L_1 = 66.04 dB \\ d_2 &= \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_2 = 21.54m \\ L_2 &= 103 dB - 1 dB - 20 \log_{10}(21.54m) \Rightarrow L_2 = 75.33 dB \\ d_3 &= \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_3 = 31.04m \\ L_3 &= 103 dB - 20 dB - 20 \log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_3 = 53.16 dB \\ L_{T2} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{66.04 dB}{10}} + 10^{\frac{75.33 dB}{10}} + 10^{\frac{53.16 dB}{10}} \right) \Rightarrow L_{T2} = 75.83 dB & \boxed{L_{T2} = 75.83 dB} \end{aligned}$$

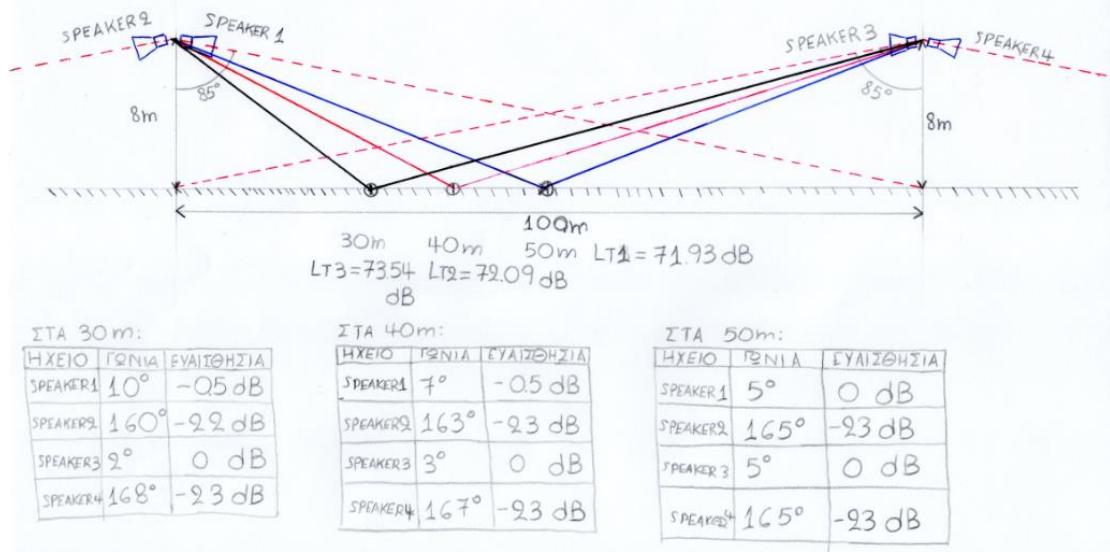
Σχήμα 63. Αναλυτική απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις συνολικές στάθμες L_{T1} και L_{T2}, στις θέσεις ακρόασης 60m και 70m αντίστοιχα.

$$\begin{aligned} \text{ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 80m:} \\ d_1 &= \sqrt{8^2 + 80^2} \Rightarrow d_1 = 80.39m \\ L_1 &= 103 dB - 0 dB - 20 \log_{10}(80.39m) \Rightarrow L_1 = 64.89 dB \\ d_2 &= \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 = 31.04m \\ L_2 &= 103 dB - 0 dB - 20 \log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_2 = 73.16 dB \\ d_3 &= \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_3 = 21.54m \\ L_3 &= 103 dB - 18 dB - 20 \log_{10}(21.54m) \Rightarrow L_3 = 58.33 dB \\ L_{T3} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{64.89 dB}{10}} + 10^{\frac{73.16 dB}{10}} + 10^{\frac{58.33 dB}{10}} \right) \Rightarrow L_{T3} = 73.88 dB & \boxed{L_{T3} = 73.88 dB} \end{aligned}$$

Σχήμα 64. Αναλυτική απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, της συνολικής στάθμης απευθείας πεδίου L_{T3} στη θέση ακρόασης των 80m.

4.3 Μαθηματικό μοντέλο 2^{ης} διάταξης

Μια άλλη διάταξη ηχο-συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί, απεικονίζεται στο σχήμα 65, όπου για αυτό το διάγραμμα αναλύονται οι υπολογισμοί που έγιναν στο χαρτί.



Σχήμα 65. Ενδεικτικό ηχο-σύστημα για τη σήραγγα Μαλιακός-Κλειδί.

Το σχήμα 65 απεικονίζει ένα τμήμα ενός ενδεικτικού ηχο-συστήματος που έχει εφαρμογή για το τούνελ Μαλιακός-Κλειδί. Οι χοάνες που είναι απλωμένες κατά μήκος όλης της σήραγγας, έχουν απόσταση 100m μεταξύ τους και είναι τοποθετημένες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων. Επίσης οι κύριοι άξονες των χοανών έχουν ρυθμιστεί ώστε, οι χοάνες να σημαδεύουν ανά 100m, δηλαδή στη θέση όπου ξεκινάει το ζεύγος των επόμενων χοανών. Όπως και στο κεφάλαιο 4.2 έτσι και εδώ για τους υπολογισμούς επιλέχτηκε η χοάνη TUNNEL500-DUP-40(T), η οποία παρουσιάζει μέγιστη εκπομπή ευαισθησίας στον κύριο άξονα 103 dB/1m. Οι υπολογισμοί βασίζονται στη λογική που περιγράφει το κεφάλαιο 4.2, όμως εδώ πέρα η κάθε θέση ακρόασης λαμβάνει τέσσερεις στάθμες απευθείας πεδίου, παραδείγματος χάρη, ο ακροατής στη θέση των 30m δέχεται τις L_1 και L_2 από το αριστερό ζεύγος χοανών (SPEAKER1 και SPEAKER2 αντίστοιχα), ενώ τις L_3 και L_4 από το δεξί ζεύγος ηχείων. Η υπέρθεση για τις 4 στάθμες στη θέση ακρόασης των 30m δίνει: $L_{T3} = 73.54 \text{ dB}$. Επίσης οι πίνακες στο σχήμα 65 δίνουν τις ευαισθησίες διαφόρων αξόνων που αντιστοιχούν σε διάφορες μοίρες. Οι πίνακες αυτοί υπολογίστηκαν από το κατακόρυφο πολικό διάγραμμα της χοάνης: TUNNEL500-DUP-40(T) που υπάρχει στο κεφάλαιο 1.7.2. Οι στάθμες $L_1 - L_4$ για τη θέση των 30m δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις: Για το ηχείο 1: $L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log(31.04m) = 72.66 \text{ dB}$, δηλαδή η απευθείας στάθμη του ηχείου 1 είναι η διαφορά της ευαισθησίας στον κύριο άξονα της χοάνης μείον 0.5 dB (ευαισθησία στον άξονα 10°) μείον τον λογάριθμο της απόστασης 31.04m, όπου 31.04m είναι η απόσταση πηγής-ακροατή και υπολογίζεται από το πυθαγόρειο θεώρημα. Η απευθείας στάθμη που εκπέμπεται από το ηχείο 2 δίνεται από την εξισώση: $L_2 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log(31.04m) = 51.16 \text{ dB}$, όπου 103 dB: Η μέγιστη εκπομπή ευαισθησίας, - 22 dB: Η μείωση της ευαισθησίας που παρουσιάζεται στο πίσω τμήμα της χοάνης (άξονας 160°), ενώ η απόσταση πηγής-ακροατή παραμένει η ίδια, γιατί η χοάνη 2 είναι σε

ζεύγος με την χοάνη 1. Με αντίστοιχο τρόπο, η απευθείας στάθμη που εκπέμπεται από το ηχείο 3 υπολογίζεται από την εξίσωση: $L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log(70.45m) = 66.04 \text{ dB}$, και αντίστοιχα η στάθμη από το ηχείο 4:

$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log(70.45m) = 43.04 \text{ dB}$. Τέλος η υπέρθεση για τις τέσσερεις στάθμες, στη θέση των 30m υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L_{T3} = 10 \log \left(10^{\frac{72.66 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{51.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{43.04 \text{ dB}}{10}} \right) = 73.54 \text{ dB}$$

Το σχήμα 66 απεικονίζει αναλυτικά τους υπολογισμούς από τις απευθείας στάθμες και τη συνολική στάθμη για θέση ακρόασης 30 μέτρων. Αντίστοιχα τα σχήματα 67, 68 απεικονίζουν τους υπολογισμούς της συνολικής στάθμης απευθείας πεδίου, για θέσεις ακροατή στα 40 και 50m.

Paited Speakers - Opposite Directions (Main Axis@100m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 30m:

$$\text{SPEAKER 1: } D_1 = \sqrt{30^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 72.66 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{30^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 51.16 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{70^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 66.04 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{70^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 43.04 \text{ dB}$$

$$L_{T3} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{72.66 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{51.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{43.04 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow L_{T3} = 73.54 \text{ dB}$$

Σχήμα 66. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου ($L_1 - L_4$) και της υπέρθεσης (L_{T3}) για θέση ακρόασης 30m.

Paired Speakers - Opposite Direction (Main Axis @ 100m)

SPEAKER 1: ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 40m:

$$D_1 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 \approx 40.8 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 70.28 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 40.8 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 47.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 67.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 44.36 \text{ dB}$$

$$LT_2 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{70.28 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{47.78 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{44.36 \text{ dB}}{10}}{10} \right)$$

$$\Rightarrow LT_2 = 72.09 \text{ dB}$$

Σχήμα 67. Υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου (L_{T2}) για θέση ακρόασης 40 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite Directions (Main Axis @ 100m)
ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ 50m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 68.91 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$\text{Όμοιωση: } D_2 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 45.91 \text{ dB}$$

Τα SPEAKER 3,4 εχουνε ίδιες καιρες & ευαισθησιες με Speaker 1,2. Επιστρ σημαδευσ οχην
Ιδια θεση αρα:

SPEAKER 3: $L_3 = 68.91 \text{ dB}$

SPEAKER 4: $L_4 = 45.91 \text{ dB}$

$$LT_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{45.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{45.91 \text{ dB}}{10}}{10} \right)$$

$$\Rightarrow LT_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{71.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{48.91 \text{ dB}}{10}}{10} \right) \Rightarrow LT_1 = 71.93 \text{ dB}$$

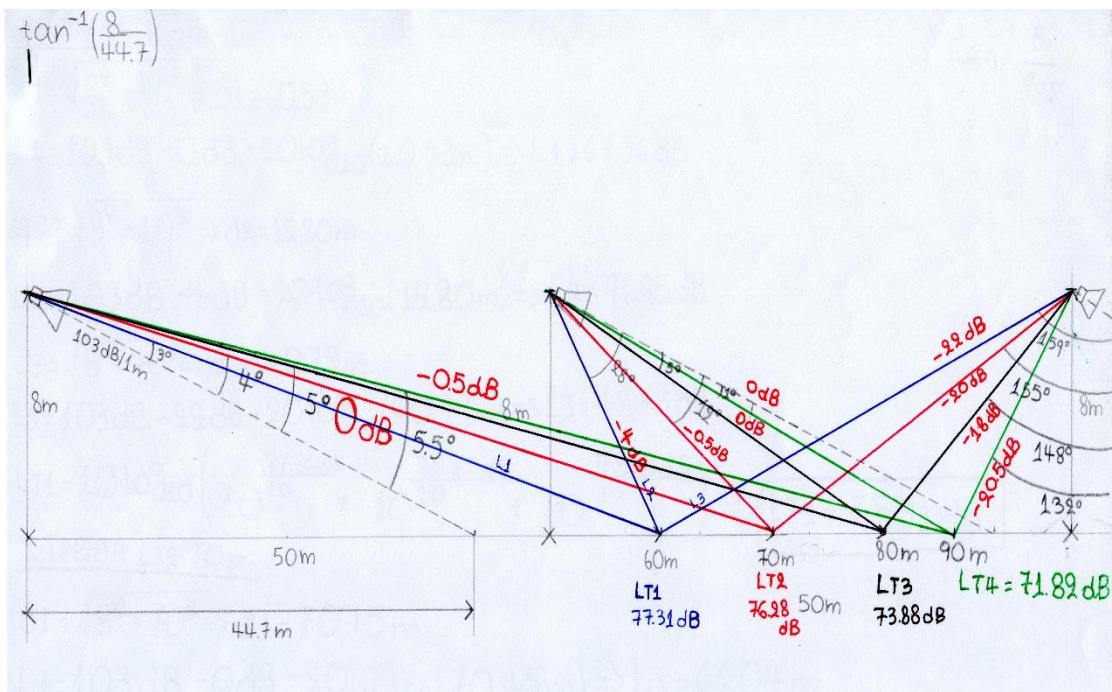
Σχήμα 68. Υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου (L_{T1}) για θέση ακρόασης 50 μέτρων.

4.4 Η κάλυψη στο 1^ο μοντέλο

Το παρών κεφάλαιο εξετάζει, ποια είναι η καλύτερη περίπτωση του πρώτου μοντέλου ηχο-συστήματος, (δηλαδή των διαδοχικών χοανών ανά διαστήματα 50 μέτρων), με βάση την ομαλή κάλυψη του απευθείας πεδίου στην επιφάνεια ακρόασης. Για να υπάρξει ομαλή κάλυψη, θα πρέπει η διαφορά στάθμης από θέση σε θέση στην περιοχή ακρόασης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Στους υπολογισμούς που έγιναν στο χαρτί εξετάστηκε ο παράγοντας αυτός. Οι υπολογισμοί στο χαρτί αφορούσαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις του πρώτου μοντέλου. Στην πρώτη περίπτωση οι κύριοι άξονες των χοανών σημαδεύονται ανά 44.7 μέτρα, στην δεύτερη περίπτωση ανά 50 μέτρα, ενώ στην τρίτη ανά 60 μέτρα. Σε όλες τις περιπτώσεις οι υπολογισμοί, αφορούσαν τις ίδιες θέσεις ακρόασης στα 60, 70, 80 και 90 μέτρα. Οι ενότητες 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 περιγράφουν αναλυτικά τα διαγράμματα και τους υπολογισμούς, για τις συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου αυτών των τριών περιπτώσεων, ενώ στην ενότητα 4.4.4 εξετάζεται αντίστοιχα η κάλυψη.

4.4.1 1^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 44.7 m

Η περίπτωση αυτή βασίζεται στη διάταξη (μοντέλο) του 1^{ου} ηχο-συστήματος, με τον κύριο άξονα των πηγών να σημαδεύεται ανά 44.7 μέτρα. Το σχήμα 69 δείχνει ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος της σήραγγας που αφορά την περίπτωση αυτή.



Σχήμα 69. Διαδοχικές χοάνες ανά 50 m, με τις πηγές να σημαδεύονται ανά 44.7 m. Οι ακροατές (θέσεις 60... 90 m) δέχονται στάθμες απευθείας πεδίου από όλες τις χοάνες.

Τα σχήματα 70, 71, 72 δείχνουν πως υπολογίζονται οι συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου του σχήματος 69.

ΛΗ ΛΤ1 60m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 60^2} \Rightarrow d_1 = 60.53m$$

$$L_1 = 103dB - 0dB - 20\log_{10}(60.53m) \Rightarrow L_1 = 67.36dB$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_2 = 12.80m$$

$$L_2 = 103dB - 4dB - 20\log_{10}(12.80m) \Rightarrow L_2 = 76.85dB$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_3 = 40.79m$$

$$L_3 = 103dB - 22dB - 20\log_{10}(40.79m) \Rightarrow L_3 = 48.78dB$$

$$LT_1 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{67.36dB}{10}} + 10^{\frac{76.85dB}{10}} + 10^{\frac{48.78dB}{10}} \right) \Rightarrow LT_1 = 77.31dB$$

ΣΤΑΘΜΗ ΛΤ2 70m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_1 = 70.45m$$

$$L_1 = 103dB - 0dB - 20\log_{10}(70.45m) \Rightarrow L_1 = 66.04m$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_2 = 21.54m$$

$$L_2 = 103dB - 0.5dB - 20\log_{10}(21.54m) \Rightarrow L_2 = 75.83dB$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_3 = 31.04m$$

$$L_3 = 103dB - 20dB - 20\log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_3 = 53.16dB$$

Σχήμα 70. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου και υπέρθεση τους στις θέσεις ακρόασης 60, 70 μέτρων (Συνέχεια στο σχήμα 71).

$$LT_2 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{66.04dB}{10}} + 10^{\frac{75.83dB}{10}} + 10^{\frac{53.16dB}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow LT_2 = 76.28dB$$

ΣΤΑΘΜΗ ΛΤ3 80m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 80^2} \Rightarrow d_1 = 80.39m$$

$$L_1 = 103dB - 0dB - 20\log_{10}(80.39m) \Rightarrow L_1 = 64.89dB$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 = 31.04m$$

$$L_2 = 103dB - 0dB - 20\log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_2 = 73.16dB$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_3 = 21.54m$$

$$L_3 = 103dB - 18dB - 20\log_{10}(21.54) \Rightarrow L_3 = 58.33dB$$

$$LT_3 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{64.89dB}{10}} + 10^{\frac{73.16dB}{10}} + 10^{\frac{58.33dB}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow LT_3 = 73.88dB$$

Σχήμα 71. Υπολογισμοί για τις συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου για θέσεις ακροασή στα 70, 80 m.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{44.7}\right) \text{ για θεση ακροασης 90m:}$$

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 90^2} \Rightarrow d_1 = 90.35 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(90.35 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 63.38 \text{ dB}$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_2 \approx 40.8 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 70.78 \text{ dB}$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_3 = 12.80 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 20.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(12.80 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 60.35 \text{ dB}$$

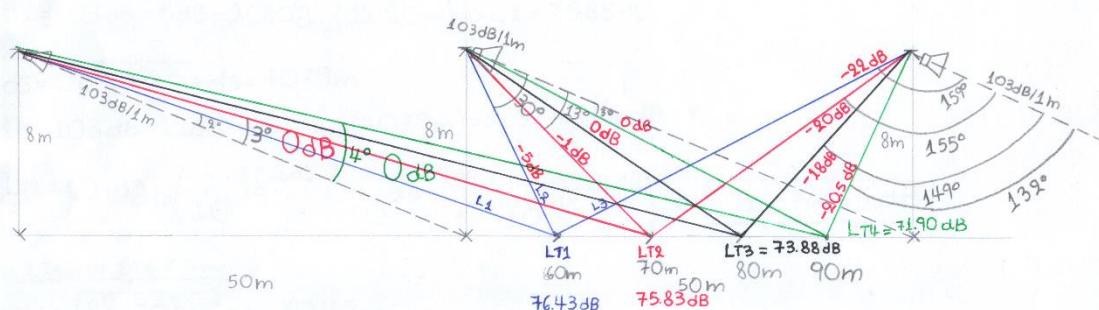
$$L_{T4} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{63.38 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{70.78 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{60.35 \text{ dB}}{10}}{10} \right) \Rightarrow L_{T4} = 71.82 \text{ dB}$$

Σχήμα 72. Υπολογισμοί της συνολικής στάθμης απευθείας πεδίου για θέση ακρόασης 90 μέτρων.

4.4.2 2^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 50 m

Η περίπτωση αυτή είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφεται στην ενότητα 4.4.1, δηλαδή υπάρχουν διαδοχικές χοάνες ανά διαστήματα 50 μέτρων, σε ύψος 8 μέτρα πάνω από τον δρόμο. Όμως αυτή τη φορά οι χοάνες σημαδεύονται ανά 50 μέτρα, δηλαδή εκεί που ξεκινάει η επόμενη. Το σχήμα 73 αναπαριστά το διάγραμμα του συστήματος, ενώ τα σχήματα 74, 75, 76 απεικονίζουν τους υπολογισμούς στο χαρτί για στάθμες απευθείας πεδίου και υπέρθεσης τους στις θέσεις ακρόασης 60, 70, 80, 90 μέτρων.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{50}\right)$$



Σχήμα 73. Διαδοχικές χοάνες ανά διαστήματα 50 m, με τις πηγές να σημαδεύονται και αντές στα 50 m, οι ακροατές στις θέσεις (60....90 m) λαμβάνουν στάθμες απευθείας κύματος από όλες τις χοάνες.

ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 60m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 60^2} \Rightarrow d_1 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 67.36 \text{ dB}$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_2 = 12.80 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(12.80 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 75.85 \text{ dB}$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_3 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 48.78 \text{ dB}$$

$$LT_1 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{75.85 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{48.78 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow LT_1 = 76.43 \text{ dB}$$

ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 70m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_1 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 66.04 \text{ dB}$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_2 = 21.54 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 1 \text{ dB} - 20 \log_{10}(21.54 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 75.33 \text{ dB}$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_3 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 53.16 \text{ dB}$$

$$LT_2 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{75.33 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{53.16 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow LT_2 = 75.83 \text{ dB}$$

Σχήμα 74. Λεπτομερή απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για στάθμες απευθείας κύματος και υπέρθεση τους στις θέσεις ακρόασης 60, 70 μέτρων.

ΣΤΑΘΜΗ ΣΤΑ 80m:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 80^2} \Rightarrow d_1 = 80.39 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(80.39 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 64.89 \text{ dB}$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 73.16 \text{ dB}$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_3 = 21.54 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 18 \text{ dB} - 20 \log_{10}(21.54 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 58.33 \text{ dB}$$

$$LT_3 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{64.89 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{73.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{58.33 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow LT_3 = 73.88 \text{ dB}$$

Σχήμα 75. Λεπτομερή απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, της συνολικής στάθμης απευθείας πεδίου για θέση ακροατή στα 80 μέτρα.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{50}\right) \text{ ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ } 90m:$$

$$x_1 = \sqrt{8^2 + 90^2} \Rightarrow d_1 = 90.35m$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(90.35m) \Rightarrow L_1 = 63.88 \text{ dB}$$

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_2 = 40.8m$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8m) \Rightarrow L_2 = 70.78 \text{ dB}$$

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_3 = 12.80m$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 20.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(12.80m) \Rightarrow L_3 = 60.35 \text{ dB}$$

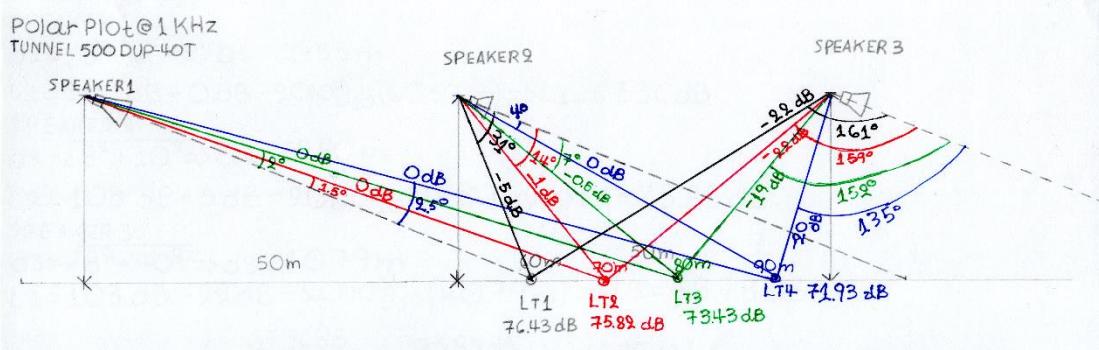
$$LT4 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{63.88 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{70.78 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{60.35 \text{ dB}}{10}}{10} \right) \Rightarrow LT4 = 71.90 \text{ dB}$$

Σχήμα 76. Υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απευθείας πεδίου στη θέση ακρόασης των 90 μέτρων.

4.4.3 3^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 60 m

Η περίπτωση αυτή, επίσης βασίζεται στη πρώτη διάταξη ηχο-συστήματος (διαδοχικές χοάνες ανά διαστήματα 50 μέτρων), όμως οι κύριοι άξονες των πηγών είναι προσανατολισμένοι ανά 60 μέτρα. Το σχήμα 77 αναπαριστά ένα ενδεικτικό τμήμα αυτού του συστήματος για θέσεις ακρόασης 60, 70, 80 και 90 μέτρων, ενώ τα σχήματα 78 – 81 δείχνουν τους υπολογισμούς για τις στάθμες απευθείας πεδίου και υπέρθεσης τους σε αυτές τις θέσεις ακροατών.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{60}\right)$$



Σχήμα 77. Ενδεικτικό τμήμα της 3^{ης} περίπτωσης (διαδοχικές χοάνες ανά απόσταση 50 μέτρων, με τους άξονες των πηγών να σημαδεύονται ανά 60 μέτρα). Οι ακροατές στις θέσεις 60...90 μέτρων λαμβάνουν απευθείας κύματα από όλες τις χοάνες.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{60}\right)$$

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ @ 60m:

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 60^2} \Rightarrow d_1 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 67.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_2 = 19.80 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(19.80 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 75.85 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_3 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 48.78 \text{ dB}$$

$$L_{T1} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{75.85 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{48.78 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow L_{T1} = 76.43 \text{ dB}$$

Σχήμα 78. Αναλυτικοί υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου για θέση ακρόασης 60 μέτρων.

$$\tan^{-1}\left(\frac{8}{60}\right)$$

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ @ 70m:

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_1 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 66.04 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_2 = 21.54 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 1 \text{ dB} - 20 \log_{10}(21.54 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 75.33 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_3 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 51.16 \text{ dB}$$

$$L_{T2} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{75.33 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{51.16 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow L_{T2} = 75.82 \text{ dB}$$

Σχήμα 79. Αναλυτικοί υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου για θέση ακρόασης 70 μέτρων.

$$\ln^{-1}\left(\frac{8}{60}\right)$$

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ @ 80m:

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 80^2} \Rightarrow d_1 = 80.4m$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(80.4m) \Rightarrow L_1 = 64.89 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 = 31.04m$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_2 = 72.66 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 20^2} \Rightarrow d_3 = 21.54m$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 1.9 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(21.54m) \Rightarrow L_3 = 57.33 \text{ dB}$$

$$LT3 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{64.89 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{72.66 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{57.33 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow LT3 = 73.43 \text{ dB}$$

Σχήμα 80. Αναλυτικοί υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου για θέση ακρόασης 80 μέτρων.

$$\ln^{-1}\left(\frac{8}{60}\right)$$

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ 90m:

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 90^2} \Rightarrow d_1 = 90.35m$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(90.35m) \Rightarrow L_1 = 63.88 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 40^2} \Rightarrow d_2 \approx 40.8m$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(40.8m) \Rightarrow L_2 = 70.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 10^2} \Rightarrow d_3 = 12.8m$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(12.8m) \Rightarrow L_3 = 60.85 \text{ dB}$$

L

$$LT4 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{63.88 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{70.78 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{60.85 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow LT4 = 71.93 \text{ dB}$$

Σχήμα 81. Αναλυτικοί υπολογισμοί στο χαρτί της συνολικής στάθμης απενθείας πεδίου για θέση ακροασής στα 90 μέτρα.

4.4.4 Λιερεύνηση της κάλυψης

Αυτή η ενότητα περιγράφει, ποια είναι η καλύτερη περίπτωση της πρώτης διάταξης ηχο-συστήματος (δηλαδή των διαδοχικών χοανών ανά διαστήματα 50 μέτρων), με βάση την ομοιόμορφη κάλυψη. Οι πίνακες 10, 11, 12 συνοψίζουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών στο χαρτί, όπου αναφέρονται οι συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου (dB), στις θέσεις ακρόασης των 60, 70, 80 και 90 μέτρων, καθώς και η απόκλιση στάθμης για τις θέσεις αυτές. Επίσης αναφέρεται η μέση τιμή μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης στάθμης ($M_{max-min}$) καθώς και η διακύμανση. Με βάση τους πίνακες 10 – 12 προκύπτει, ότι από τις τρείς περιπτώσεις, η καλύτερη είναι αυτή που οι κύριοι άξονες των ηχείων είναι προσανατολισμένοι ανά 50 μέτρα ($\tan^{-1}(8/50)$), διότι έχει τη μικρότερη διαφορά στάθμης από τη μία θέση ακρόασης στην άλλη.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤ. (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤ. ΘΕΣΗ -ΘΕΣΗ (dB)
60	77.31	1.03
70	76.28	2.4
80	73.88	
90	71.82	2.06
$M_{max-min} = 74.565 \text{ dB} + - 2.745 \text{ dB}$		

Πίνακας 10. Συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου για θέσεις ακροασών 60 έως 90 μέτρα, όταν οι κύριοι άξονες των πηγών σημαδεύονται ανά 44.7 μέτρα, (περίπτωση $\tan^{-1}(8/44.7)$).

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤ. (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤ. ΘΕΣΗ -ΘΕΣΗ (dB)
60	76.43	0.6
70	75.83	1.95
80	73.88	
90	71.90	1.98
$M_{max-min} = 74.165 \text{ dB} + - 2.265 \text{ dB}$		

Πίνακας 11. Συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου για θέσεις ακροασών 60 έως 90 μέτρα, όταν οι κύριοι άξονες των πηγών σημαδεύονται ανά 50 μέτρα, (περίπτωση $\tan^{-1}(8/50)$).

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤ. (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤ. ΘΕΣΗ -ΘΕΣΗ (dB)
60	76.43	0.61
70	75.82	2.39
80	73.43	
90	71.93	1.5
Mmax-min = 74.18 dB + - 2.25 dB		

Πίνακας 12. Συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου για θέσεις ακροατών 60 έως 90 μέτρα, όταν οι κύριοι άξονες των πηγών σημαδεύουν ανά 60 μέτρα, (περίπτωση $\tan^{-1}(8/60)$).

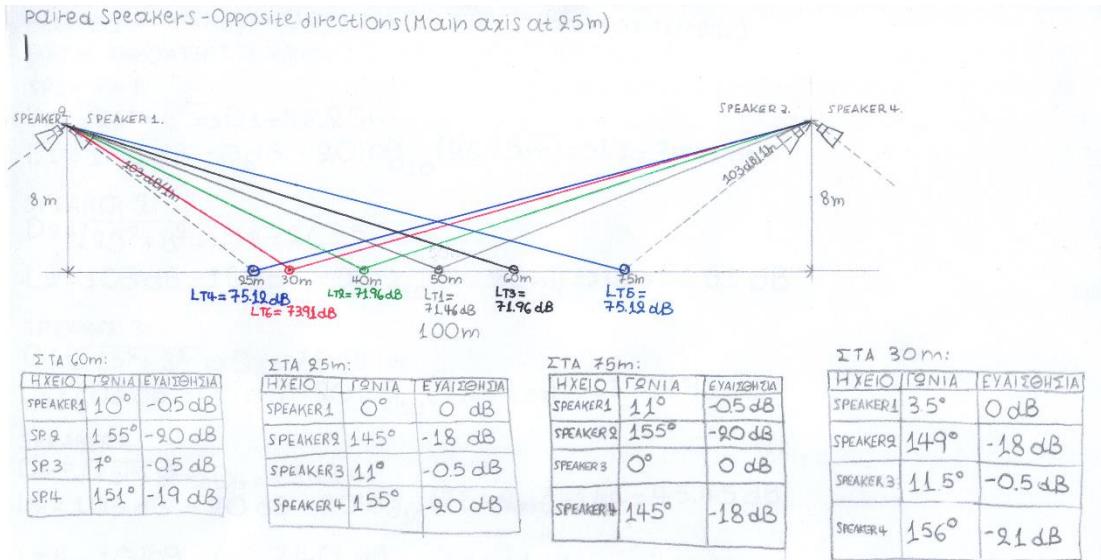
4.5 Η κάλυψη στο 2^o μοντέλο

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει, ποια περίπτωση του δεύτερου μοντέλου ηχο-συστήματος έχει την ποιο ομαλή κάλυψη. Το δεύτερο μοντέλο, αφορά διαδοχικές χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, που είναι τοποθετημένες ανά διαστήματα 100 μέτρων. Για αυτή τη διάταξη, έγιναν υπολογισμοί στο χαρτί τριών διαφορετικών περιπτώσεων, ενός ενδεικτικού τμήματος της σήραγγας. Στη πρώτη περίπτωση οι κύριοι άξονες των χοανών σημαδεύουν ανά 25 μέτρα, στη δεύτερη περίπτωση ανά 50 μέτρα, ενώ στη 3^η ανά 100 μέτρα. Οι ενότητες 4.5.1 – 4.5.3 απεικονίζουν τα διαγράμματα και τους υπολογισμούς, για τις συνολικές στάθμες απευθείας πεδίου για τις περιπτώσεις αυτές. Ενώ η ενότητα 4.5.4 διερευνά ποια από τις τρείς περιπτώσεις έχει την καλύτερη κάλυψη.

4.5.1 1^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 25 m

Το σχήμα 82, δείχνει μια περίπτωση του 2^o μοντέλου, για το οποίο έγιναν υπολογισμοί στο χαρτί. Οι υπολογισμοί έγιναν για ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Οι υπολογισμοί αφορούν τις στάθμες απευθείας πεδίου, που λαμβάνει ο ακροατής από όλες τις χοάνες, πχ ο ακροατής στα 25 μέτρα δέχεται δύο κύματα από αριστερά (SPEAKER 1, SPEAKER 2) και δύο από δεξιά (SPEAKER 3, SPEAKER 4) όπου προκύπτει υπέρθεση στις στάθμες, στη θέση ακρόασης των 25 μέτρων. Οι υπολογισμοί έγιναν στις θέσεις ακρόασης των: 25, 30, 40, 50, 60 και 75 μέτρων. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι, για θέσεις ακρόασης κοντά στη πηγή, οι στάθμες απευθείας κύματος είναι μεγάλες, ενώ στις απομακρυσμένες θέσεις οι στάθμες ελαττώνονται. Επίσης το 2^o μοντέλο ηχο-συστήματος, φαίνεται να έχει συμμετρικό χαρακτήρα, πχ $L(25m) = L(75m) = 75.12$ dB, ενώ τα σχήματα 83 – 88 απεικονίζουν με λεπτομέρεια τους υπολογισμούς στο χαρτί για τις θέσεις ακρόασης: 25 – 75 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite directions (Main axis at 25m)



Σχήμα 82. 2^o μοντέλο, χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, με τους κύριους άξονες των πηγών να σημαδεύονται ανά θέσης 25 m (1^η Περίπτωση).

Lifted Speakers - Opposite Direction (Main axis at 25m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ ΣΤΑ 25m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 74.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 1.8 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 56.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 64.95 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 2.1 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 45.45 \text{ dB}$$

$$L_{T4} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{74.61}{10}} + 10^{\frac{56.61}{10}} + 10^{\frac{64.95}{10}} + 10^{\frac{45.45}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow L_{T4} = 75.19 \text{ dB}$$

Σχήμα 83. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για απευθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και η υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης 25 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite directions (Main axis at 25m)
ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 30m.

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_1 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 73.16 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 = 31.04 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 18 \text{ dB} - 20 \log_{10}(31.04 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 55.16 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_3 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 65.54 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$d_4 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_4 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 9.1 \text{ dB} - 20 \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 45.04 \text{ dB}$$

$$L_{T6} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{73.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{55.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{65.54 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{45.04 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\boxed{L_{T6} = 73.91 \text{ dB}}$$

Σχήμα 84. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις απενθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους για θέση ακρόασης 30 μέτρων.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 40m:

Paired speakers - opposite directions
(main axis at 25m)

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 70.28 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 19 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 51.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 66.86 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 47.36 \text{ dB}$$

$$L_{T2} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{70.28 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{51.78 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{66.86 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{47.36 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{L_{T2} = 71.96 \text{ dB}}$$

Σχήμα 85. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις απενθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους για θέση ακρόασης 40 μέτρων.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ ΣΤΑ 50m:

Paired Speakers - Opposite directions
(Main axis at 25m)

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 68.41 \text{ dB} \checkmark$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 48.91 \text{ dB} \checkmark$$

SPEAKER 3:

$$\text{Αντίστοιχα: } L_3 = 68.41 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$\text{Αντίστοιχα: } L_4 = 48.91 \text{ dB}$$

$$L_{T1} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{68.41 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{48.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{68.41 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{48.91 \text{ dB}}{10}}{10} \right)$$

$$\Rightarrow L_{T1} = 71.46 \text{ dB} \checkmark$$

Σχήμα 86. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις απευθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους για θέση ακρόασης 50 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite directions (Main axis at 25m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ ΣΤΑ 60m:

Speaker 1:

$$D = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D = 60.53 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 66.86 \text{ dB}$$

Speaker 2:

$$D = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D = 60.53 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 47.36 \text{ dB}$$

Speaker 3:

$$D = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D = 40.79 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 70.28 \text{ dB}$$

Speaker 4:

$$D = 40.79 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 19 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 51.78 \text{ dB}$$

$$\boxed{L_{T1} = 71.96 \text{ dB}}$$

Σχήμα 87. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις απευθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους για θέση ακρόασης 60 μέτρων.

aited SPEAKERS - Opposite Directions (Ναινάριστα 25m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 75m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 64.95 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 45.45 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 74.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 18 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 56.61 \text{ dB}$$

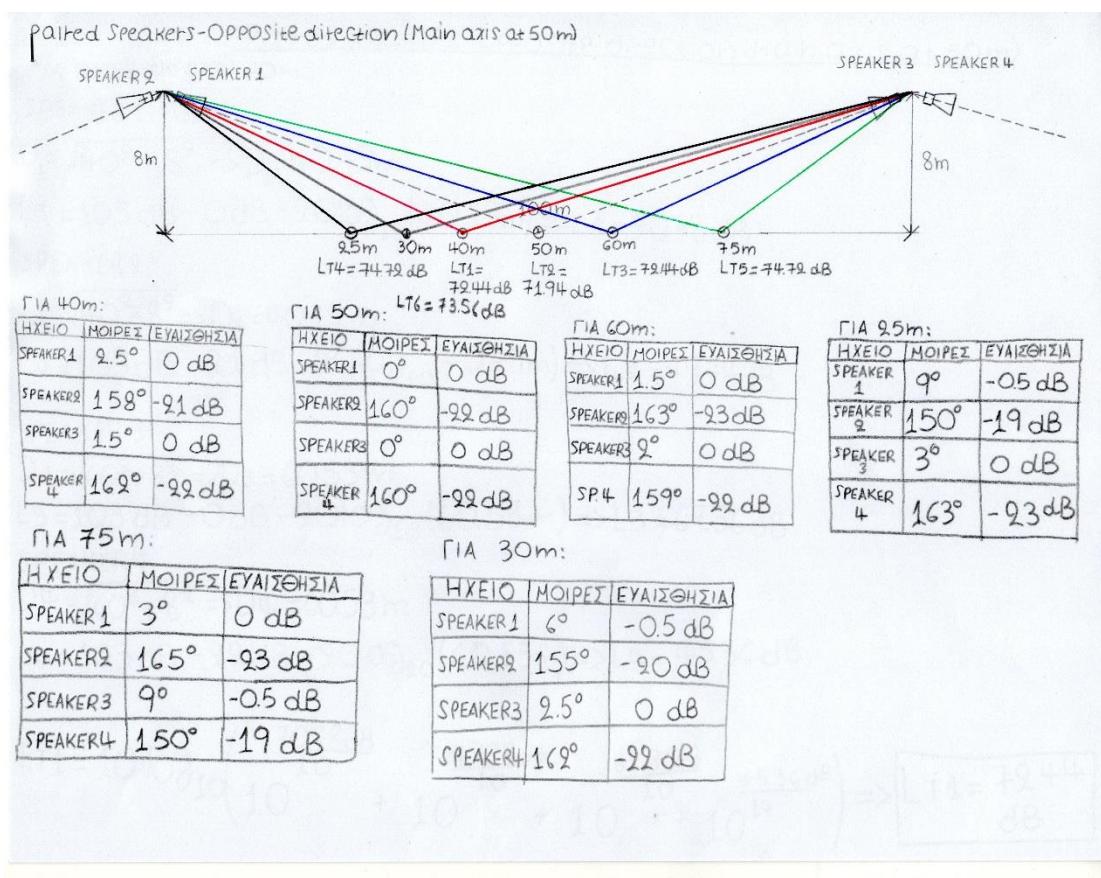
$$L_T = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{64.95 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{45.45 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{74.61 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{56.61 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow L_T = 75.12 \text{ dB}$$

Σχήμα 88. Απεικόνιση υπολογισμών στο χαρτί, για τις απευθείας στάθμες που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους για θέση ακρόασης 75 μέτρων.

4.5.2 2^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 50 m

Όπως στη περίπτωση της ενότητας 4.5.1 έτσι και εδώ, τα ηχεία είναι σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων ανά διαστήματα 100 μέτρων. Η διαφορά όμως εδώ είναι πως οι κύριοι άξονες των ηχείων είναι προσανατολισμένοι ανά θέση 50 μέτρων. Δηλαδή οι χοάνες σημαδεύουν στο μέσο του διαστήματος μεταξύ των ζευγών των πηγών. Όπως στην ενότητα 4.5.1 έτσι και εδώ, έγιναν υπολογισμοί για τις απευθείας στάθμες και η υπέρθεση τους στις ίδιες θέσεις ακρόασης (25, 30, 40, 50, 60, 75 m). Το σχήμα 89 απεικονίζει το ηχο-σύστημα αυτής της περίπτωσης. Επίσης όπως στην 1^η περίπτωση (4.5.1) έτσι και εδώ το σύστημα φαίνεται συμμετρικό, δηλαδή η στάθμη στη θέση ακρόασης 75 μέτρων ισούται με αυτή στη θέση των 25 μέτρων, οι στάθμες στις θέσεις 40, 60 μέτρων είναι ίσες κτλ. Τα σχήματα 90 έως 95 απεικονίζουν αναλυτικά τους υπολογισμούς που έγιναν στο χαρτί για τις θέσεις ακρόασης. Οι υπολογισμοί αφορούν ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος για την περίπτωση αυτή.



Σχήμα 89. Χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων με την κάθε πηγή να σημαδεύει στο κέντρο της απόστασης των 100 μέτρων. Ο κάθε ακροατής λαμβάνει στάθμες απευθείας πεδίου από όλες τις πηγές, όπου γίνεται υπέρθεση στη θέση ακρόασης. Οι πίνακες δείχνουν ποια είναι η μείωση ευαισθησίας της κάθε χοάνης για μοίρες εκτός κύριου άξονα.

Paired Speakers - Opposite direction (Main axis at 50m):

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 25m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 74.11 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 19 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 55.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 65.45 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 42.45 \text{ dB}$$

$$L_{T4} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{74.11 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{55.61 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{65.45 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{42.45 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow L_{T4} = 74.79$$

Σχήμα 90. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 25 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite direction (Main axis at 50m)

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ 30m:

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_1 \approx 31 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(31 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 72.67 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 30^2} \Rightarrow d_2 \approx 31 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(31 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 53.17 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_3 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 66.04 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$d_4 = \sqrt{8^2 + 70^2} \Rightarrow d_4 = 70.45 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(70.45 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 44.04 \text{ dB}$$

$$L_{T6} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{72.67 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{53.17 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{44.04 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow L_{T6} = 73.56 \text{ dB}$$

Σχήμα 91. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 30 μέτρων.

Paired speakers - Opposite direction (Main axis at 50m)

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ 40m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 70.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 21 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 49.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 67.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 45.36 \text{ dB}$$

$$L_{T1} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{70.78 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{49.78 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{45.36 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow \boxed{L_{T1} = 72.44 \text{ dB}}$$

Σχήμα 92. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 40 μέτρων.

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ ΣΤΑ 50m:

Paired speakers - Opposite direction
(main axis at 50m)

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 68.91 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 46.91 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 68.91 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 46.91 \text{ dB}$$

$$L_{T2} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{46.91 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{46.91 \text{ dB}}{10}} \right) \\ \Rightarrow \boxed{L_{T2} = 71.94 \text{ dB}}$$

Σχήμα 93. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 50 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite direction (Main axis at 50m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΤΗ ΣΤΑ 60m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 67.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$\text{Όμοιως: } D_2 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 44.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 70.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$\text{Όμοιως: } D_4 = 40.79 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.79 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 48.78 \text{ dB}$$

$$LT_3 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{44.36 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{70.78 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{48.78 \text{ dB}}{10}} \right) \Rightarrow$$

$$\boxed{LT_3 \approx 72.44 \text{ dB}}$$

Σχήμα 94. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 60 μέτρων.

Paired Speakers - Opposite direction (Main axis at 50m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ: 75m

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 65.45 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{75^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 75.42 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(75.42 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 42.45 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 74.11 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{25^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 26.25 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 19 \text{ dB} - 20 \log_{10}(26.25 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 55.61 \text{ dB}$$

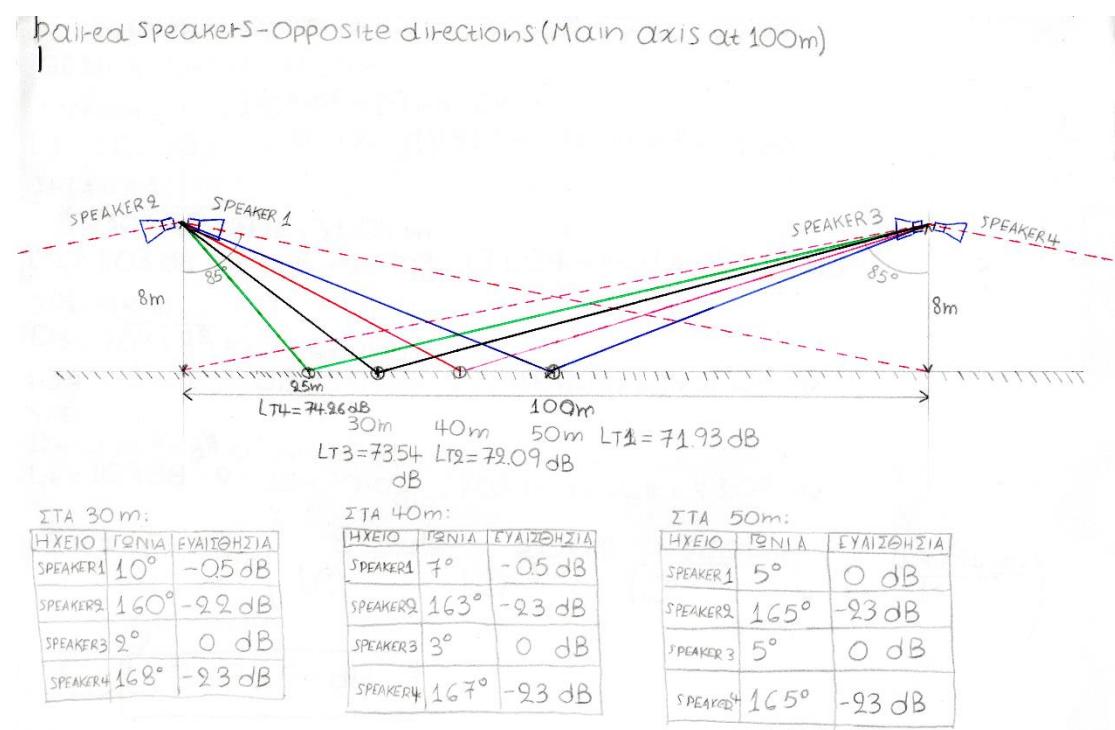
$$LT_5 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{65.45 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{42.45 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{74.11 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{55.61 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{LT_5 = 74.72 \text{ dB}}$$

Σχήμα 95. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου όλων των ηχείων και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 75 μέτρων.

4.5.3 3^η Περίπτωση – Κύριοι άξονες προσανατολισμένοι ανά 100 m

Όπως στις ενότητες 4.5.1, 4.5.2 έτσι και σε αυτή την περίπτωση, οι χοάνες είναι ζεύγη πηγών αντίθετων κατευθύνσεων τοποθετημένες ανά 100 μέτρα, με τη διαφορά ότι, ο κύριος άξονας της δεξιάς χοάνης σημαδεύει στη θέση του επόμενου ζεύγους πηγών, ενώ ο κύριος της αριστερής σημαδεύει στο προηγούμενο ζεύγος πηγών, δηλαδή οι πηγές είναι προσανατολισμένες ανά θέσεις των 100 μέτρων. Το σχήμα 96 δείχνει ένα ενδεικτικό τμήμα του συστήματος για μια τέτοια περίπτωση. Οι υπολογισμοί στο χαρτί αφορούν τις στάθμες απευθείας πεδίου που λαμβάνει ο ακροατής από όλες τις πηγές καθώς και την υπέρθεση τους, για ίδιες θέσεις ακρόασης με τις προηγούμενες ενότητες. Τα σχήματα 97 – 100 δείχνουν αναλυτικά τους υπολογισμούς αυτούς.



Σχήμα 96. Χοάνες σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων τοποθετημένες ανά 100 μέτρα. Οι πηγές είναι προσανατολισμένες ανά θέσεις 100 μέτρων, πχ το SPEAKER1 σημαδεύει στο επόμενο ζεύγος, ενώ το SPEAKER3 στο προηγούμενο. Οι πίνακες δείχνουν την μείωση της ενασθησίας των πηγών για ίδιες θέσεις ακρόασης εκτός του κύριου άξονα. Οι πίνακες σχεδιάστηκαν με σκοπό να γίνουν οι υπολογισμοί στις θέσεις ακρόασης.

Mixed Speakers - Opposite directions (Main axis at 100m)

ΓΙΑ ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ @ 25m

SPEAKER 1:

$$d_1 = \sqrt{8^2 + 25^2} \Rightarrow d_1 = 26.25m$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 1 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(26.25m) \Rightarrow L_1 = 73.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$d_2 = \sqrt{8^2 + 25^2} \Rightarrow d_2 = 26.25m$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 21 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(26.25m) \Rightarrow L_2 = 53.61 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$d_3 = \sqrt{8^2 + 75^2} \Rightarrow d_3 = 75.42m$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(75.42m) \Rightarrow L_3 = 65.45 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$d_4 = \sqrt{8^2 + 75^2} \Rightarrow d_4 = 75.42m$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 22.5 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(75.42m) \Rightarrow L_4 = 42.95 \text{ dB}$$

$$LT4 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{73.61 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{53.61 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{65.45 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{42.95 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow LT4 = 74.26 \text{ dB}$$

Σχήμα 97. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου που δέχεται ο ακροατής από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 25 μέτρων.

Mixed Speakers - Opposite Directions (Main Axis @ 100m)

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 30m:

$$SPEAKER 1: D_1 = \sqrt{30^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 31.04m$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log(31.04m) \Rightarrow L_1 = 72.66 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{30^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 31.04m$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 22 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(31.04m) \Rightarrow L_2 = 51.16 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{70^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 70.45m$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(70.45m) \Rightarrow L_3 = 66.04 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{70^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 70.45m$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10}(70.45m) \Rightarrow L_4 = 43.04 \text{ dB}$$

$$LT3 = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{72.66 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{51.16 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{66.04 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{43.04 \text{ dB}}{10}} \right)$$

$$\Rightarrow LT3 = 73.54 \text{ dB}$$

Σχήμα 98. Υπολογισμοί για στάθμες απευθείας πεδίου που δέχεται ο ακροατής από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 30 μέτρων.

Raised Speakers - Opposite Direction (Main Axis @ 100m)

SPEAKER 1: ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΣΤΑ 40m:

$$D_1 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 \approx 40.8 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 70.28 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$D_2 = \sqrt{40^2 + 8^2} \Rightarrow D_2 = 40.8 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(40.8 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 47.78 \text{ dB}$$

SPEAKER 3:

$$D_3 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_3 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_3 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_3 = 67.36 \text{ dB}$$

SPEAKER 4:

$$D_4 = \sqrt{60^2 + 8^2} \Rightarrow D_4 = 60.53 \text{ m}$$

$$L_4 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(60.53 \text{ m}) \Rightarrow L_4 = 44.36 \text{ dB}$$

$$LT_2 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{70.28 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{47.78 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{67.36 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{44.36 \text{ dB}}{10}}{10} \right)$$

$$\Rightarrow LT_2 = 72.09 \text{ dB}$$

Σχήμα 99. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου που δέχεται ο ακροατής από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 40 μέτρων.

Raised Speakers - Opposite Directions (Main Axis @ 100m)
ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ 50m:

SPEAKER 1:

$$D_1 = \sqrt{50^2 + 8^2} \Rightarrow D_1 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_1 = 103 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_1 = 68.91 \text{ dB}$$

SPEAKER 2:

$$\text{Όμοιωση: } D_2 = 50.63 \text{ m}$$

$$L_2 = 103 \text{ dB} - 23 \text{ dB} - 20 \log_{10}(50.63 \text{ m}) \Rightarrow L_2 = 45.91 \text{ dB}$$

Τα SPEAKER 3,4 έχουνε ίδιες μοιρές Ευαισθησίες με Speaker 1,2. Επίσης σημειώνουμε ότι η θέση αριστερά:

$$\text{SPEAKER 3: } LT_3 = 68.91 \text{ dB}$$

$$\text{SPEAKER 4: } LT_4 = 45.91 \text{ dB}$$

$$LT_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{68.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{45.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{45.91 \text{ dB}}{10}}{10} \right)$$

$$\Rightarrow LT_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{71.91 \text{ dB}}{10}}{10} + \frac{\frac{48.91 \text{ dB}}{10}}{10} \right) \Rightarrow LT_1 = 71.93 \text{ dB}$$

Σχήμα 100. Υπολογισμοί για στάθμες απενθείας πεδίου που δέχεται ο ακροατής από όλες τις χοάνες και υπέρθεση τους στη θέση ακρόασης των 50 μέτρων.

4.5.4 Λιερεύνηση της κάλυψης

Στην ενότητα αυτή διερευνάται ποιο σύστημα έχει την ομαλότερη κάλυψη, για τις τρείς περιπτώσεις των ενοτήτων 4.5.1 – 4.5.3. Οι πίνακες 13 – 15 αφορούν το μοντέλο των πηγών σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, για τη πρώτη περίπτωση που οι χοάνες σημαδεύουν ανά θέση 25 μέτρων, για τη δεύτερη περίπτωση που οι πηγές προσανατολίζονται ανά θέση 50 μέτρων και αντίστοιχα για την τρίτη περίπτωση (ανά 100 μέτρα). Οι πίνακες δείχνουν τη συνολική στάθμη που δέχονται οι ακροατές από όλα τα απευθείας κύματα, στις θέσεις ακρόασης των 25, 30, 40 και 50 μέτρων, τη διαφορά στάθμης από θέση σε θέση καθώς και τη μέση τιμή μεταξύ μέγιστης – ελάχιστης στάθμης με τη διακύμανση τους. Με βάση τους πίνακες 13 – 15, προκύπτει ότι η καλύτερη περίπτωση είναι αυτή, που οι κύριοι άξονες των ηχείων σημαδεύουν ανά 100 μέτρα, διότι οι διαφορές στις στάθμες μεταξύ θέσεων ακρόασης είναι μικρότερες από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, επίσης υπάρχει μικρότερη διακύμανση (+- 1.165 dB έναντι +- 1.39, 1.83 dB) σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΕΣΗ-ΘΕΣΗ (dB)
25	75.12	1.21
30	73.91	1.95
40	71.96	
50	71.46	0.5

Mmax-min = 73.29 dB + - 1.83 dB

Πίνακας 13. Συνολική στάθμη απευθείας πεδίου στις θέσεις ακρόασης 25...50 μέτρων όταν οι πηγές σημαδεύουν ανά θέση 25 μέτρων.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΕΣΗ-ΘΕΣΗ (dB)
25	74.72	1.16
30	73.56	1.12
40	72.44	
50	71.94	0.5

Mmax-min = 73.33 dB + - 1.39 dB

Πίνακας 14. Συνολική στάθμη απευθείας πεδίου στις θέσεις ακρόασης 25...50 μέτρων όταν οι πηγές σημαδεύουν ανά θέση 50 μέτρων.

ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΑΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ (dB)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΕΣΗ-ΘΕΣΗ (dB)
25	74.26	0.72
30	73.54	1.45
40	72.09	
50	71.93	0.16
Mmax-min = 73.095 dB + - 1.165 dB		

Πίνακας 15. Συνολική στάθμη απευθείας πεδίου στις θέσεις ακρόασης 25...50 μέτρων όταν οι πηγές σημαδεύουν ανά θέση 100 μέτρων.

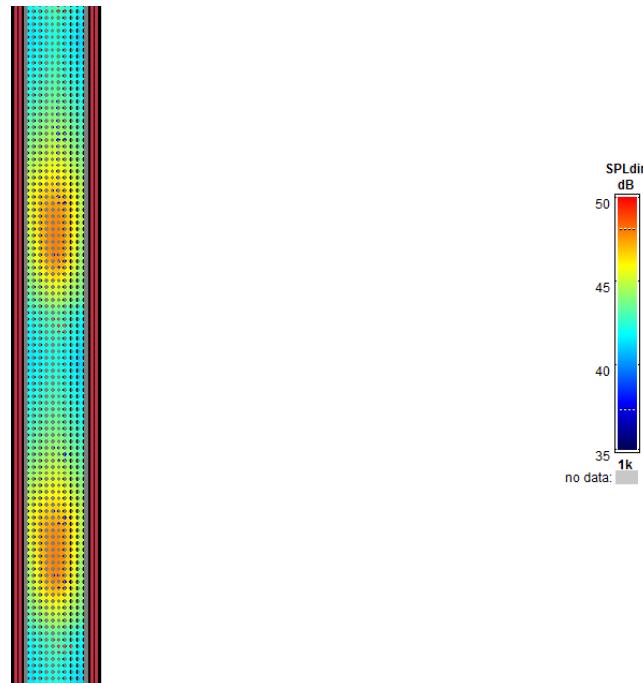
4.6 Ακουστικοί παράμετροι 1^{ον} μοντέλου

Με βάση την ενότητα 4.4.4 η ομαλότερη κάλυψη υπάρχει στο μοντέλο των διαδοχικών χοανών ανά διαστήματα 50 μέτρων, με τις πηγές να σημαδεύουν και αυτές ανά 50 μέτρα. Στο κεφάλαιο 4.6 γίνεται περεταίρω διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών για το μοντέλο αυτό, μέσο εξομοίωσης στο λογισμικό CATT Acoustic. Οι ακουστικοί παράμετροι που μελετήθηκαν είναι: Οι απευθείας στάθμες σε όλη τη περιοχή ακρόασης στη μπάντα του 1 KHz, αντίστοιχα οι απευθείας στάθμες για όλες τις μπάντες των συχνοτήτων, καθώς και κάποια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ποιότητα της ομιλίας. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε, ο λόγος του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ίχο (U_{50} @ 1 KHz και σε όλες τις μπάντες), ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI), καθώς και η ευκρίνεια της ομιλίας (D_{50}) σε όλες τις μπάντες.

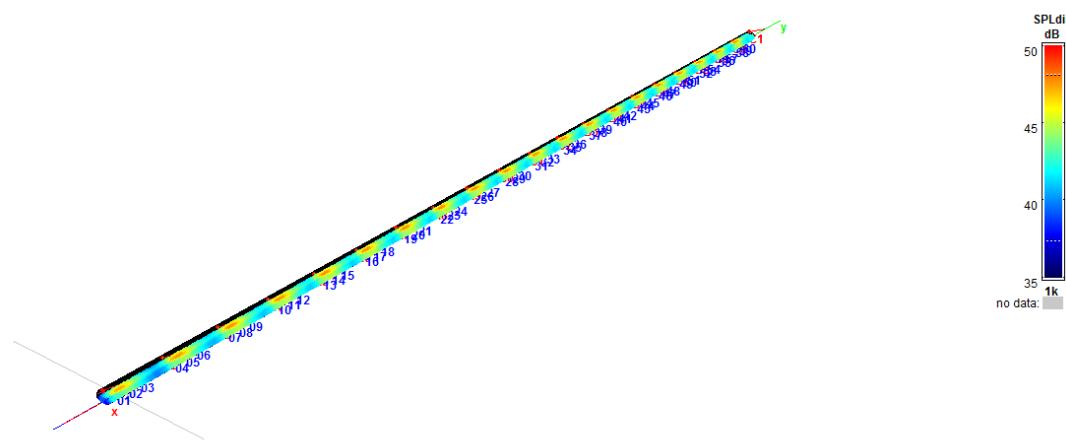
4.6.1 Απευθείας στάθμες στα 1 KHz

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την κάλυψη του απευθείας πεδίου στη μπάντα των 1 KHz, σε όλη την περιοχή ακρόασης, δηλαδή εξετάζεται το φαινόμενο σε όλο τον δρόμο της σήραγγας. Τα σχήματα 101, 102 είναι διαγράμματα που προκύπτουν ως αποτέλεσμα, από την εξομοίωση του CATT Acoustic. Το σχήμα 101 αφορά κάλυψη, όπου απεικονίζεται μια κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος, ενώ το σχήμα 102 απεικονίζει την κάλυψη κατά μήκος όλου του δρόμου. Το CATT Acoustic έκανε τους υπολογισμούς με βάση τα απευθείας κύματα που λαμβάνει ένας ακροατής από όλες τις χοάνες και την υπέρθεση τους για οποιοδήποτε σημείο ακρόασης. Επίσης από τα διαγράμματα προκύπτει ότι για θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές οι στάθμες απευθείας πεδίου είναι μεγάλες, ενώ σε απομακρυσμένες θέσεις οι στάθμες ελαττώνονται. Το σχήμα 103 δείχνει ένα τμήμα από τους υπολογισμούς για απευθείας

στάθμες, που έγιναν μέσο εξομοίωσης στο CATT Acoustic για όλη τη περιοχή ακρόασης. Οι υπολογισμοί αυτοί ανοίχτηκαν σε φορμάτ λογιστικού φύλλου (Excel), όπου μέσο του Excel υπολογίστηκαν κάποια στατιστικά δεδομένα, όπως η μέγιστη, ελάχιστη ακουστική στάθμη, ο μέσος όρος, η μέση τιμή ανάμεσα στη μέγιστη – ελάχιστη στάθμη (Mmax-min) και η διακύμανση (Πίνακας 16).



Σχήμα 101. Μια κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος, που απεικονίζει την κάλυψη από τις απευθείας στάθμες στα 1 KHz.



Σχήμα 102. Απεικόνιση της κάλυψης κατά μήκος όλου του δρόμου για τη μπάντα των 1 KHz.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "project_1_map_SPLdir_1K - Microsoft Excel". The ribbon menu is visible at the top, with tabs like ΑΡΧΕΙΟ, ΚΕΝΤΡΙΚΗ, ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΕΛΙΔΑΣ, ΤΥΠΟΙ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ, and ΠΡΟΒΟΛΗ. The main content area contains a table with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Map direct	SPLdir	1 kHz	dB									
2	Project:	project											
3	Creator:	CATT-Acoustic v9.1b (build 1.03) / TUCT v1.1b:2.02											
4	Date/Time:	#####											
5	Air abs.:	on											
6	Interferer off												
7													
8	Layer:	1 of	1 Nx:	9 Ny:	1002								
9		-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
10	-4	37,42	38,13	38,97	39,99	40,82	41,49	42	42,39	42,83	43,12	43,29	43,34
11	-3	38,18	38,8	39,72	40,82	41,7	42,38	42,88	43,42	43,96	44,34	44,59	44,78
12	-2	38,8	39,32	40,33	41,51	42,42	43,1	43,6	44,35	45,01	45,5	45,84	46,1
13	-1	39,21	39,65	40,74	41,97	42,9	43,58	44,08	45,03	45,78	46,36	46,77	46,97
14	0	39,35	39,76	40,88	42,13	43,07	43,75	44,29	45,28	46,07	46,68	47,1	47,27
15	1	39,22	39,65	40,76	42,01	42,94	43,6	44,08	45,02	45,76	46,33	46,73	46,92
16	2	38,86	39,33	40,39	41,64	42,58	43,18	43,62	44,33	44,95	45,4	45,71	45,95
17	3	38,31	38,83	39,81	41,08	42,04	42,58	42,95	43,39	43,88	44,19	44,37	44,51
18	4	37,63	38,2	39,08	40,34	41,4	41,87	42,18	42,38	42,74	42,95	43,02	42,99
19	x-axis												

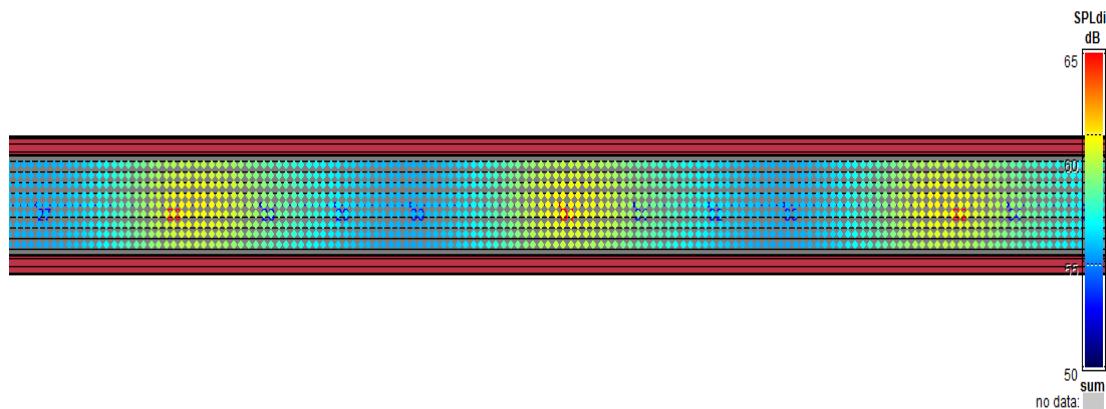
Σχήμα 103. Αρχείο λογιστικού φύλλου (Excel) που απεικονίζει ένα τμήμα από υπολογισμούς απευθείας πεδίου στα 1 KHz, που έγιναν μέσω εξομοίωσης στο CATT Acoustic.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ:	78.01 dB
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ:	67.42 dB
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ:	74.11643 dB
Mmax-min:	72.715+- 5.295 dB

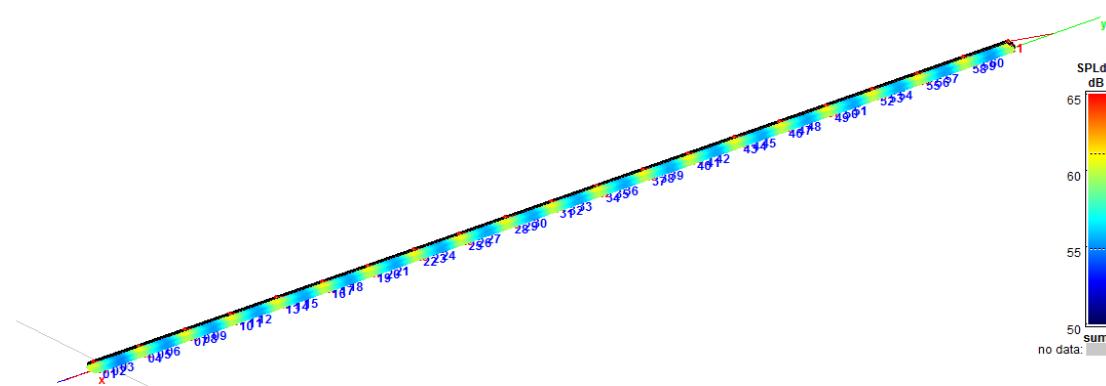
Πίνακας 16. Στατιστικά δεδομένα (μέγιστης στάθμης, ελάχιστης στάθμης, μέσης τιμής, M_{max-min} και διακύμανσης) της κάλυψης απευθείας πεδίου @ 1 KHz, που προέκυψαν επεξεργάζοντας τα αποτελέσματα της εξομοίωσης στο Excel.

4.6.2 Κάλυψη σε όλες τις συχνότητες

Η ενότητα αυτή περιγράφει την κάλυψη του απευθείας πεδίου, για όλες τις μπάντες συχνοτήτων, σε όλη τη περιοχή ακρόασης της σήραγγας. Τα σχήματα 104, 105 προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εξομοίωσης στο CATT Acoustic. Αυτά τα σχήματα απεικονίζουν ακουστικές στάθμες σε διάφορα σημεία ακρόασης, όπου η κάθε στάθμη προκύπτει από την υπέρθεση των απευθείας κυμάτων όλων των ηχείων, για το αντίστοιχο σημείο αυτό. Το σχήμα 104 αναφέρεται σε μία κάτοψη ενός ενδεικτικού τμήματος του ηχο-συστήματος, όπου απεικονίζει την κάλυψη του απευθείας πεδίου σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Ενώ το σχήμα 105 δείχνει την κάλυψη απευθείας πεδίου για όλες τις μπάντες, σε όλη τη περιοχή ακρόασης, δηλαδή σε όλον τον δρόμο του τούνελ. Έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης με πρόγραμμα Excel, όπου προσδιορίστηκαν κάποια στατιστικά δεδομένα, όπως η μέγιστη, ελάχιστη ακουστική στάθμη, η μέση τιμή, το Mmax-min και η διακύμανση (Πίνακας 17).



Σχήμα 104. Μια κάτοψη από ένα τμήμα του ηχο-συστήματος που απεικονίζει τη κάλυψη απευθείας πεδίου σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι οι ακουστικές στάθμες έχουν μεγάλες τιμές σε θέσεις ακρόασης κοντά στις χοάνες και μικρότερες τιμές σε απομακρυσμένες θέσεις.



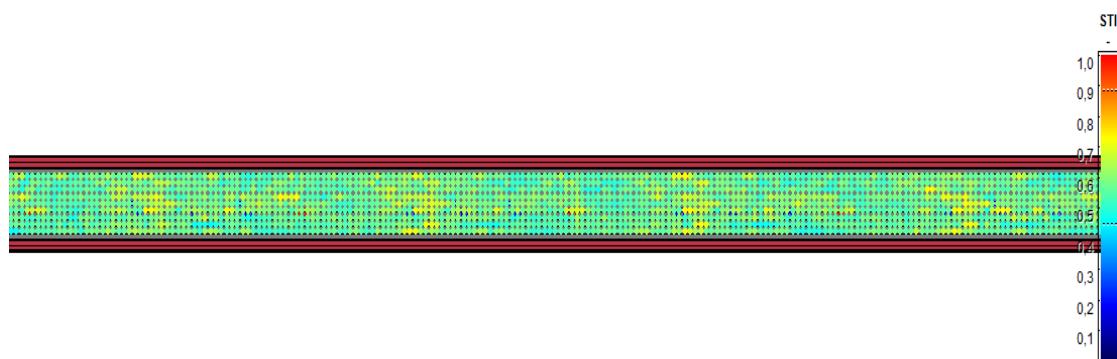
Σχήμα 105. Απεικόνιση της κάλυψης απευθείας πεδίου για όλες τις μπάντες, κατά μήκος όλου του δρόμου (Περιοχή ακρόασης).

ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ:	91.08 dB
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ:	84.88 dB
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ:	87.7831 dB
Mmax-min:	87.98 dB +/- 3.1 dB

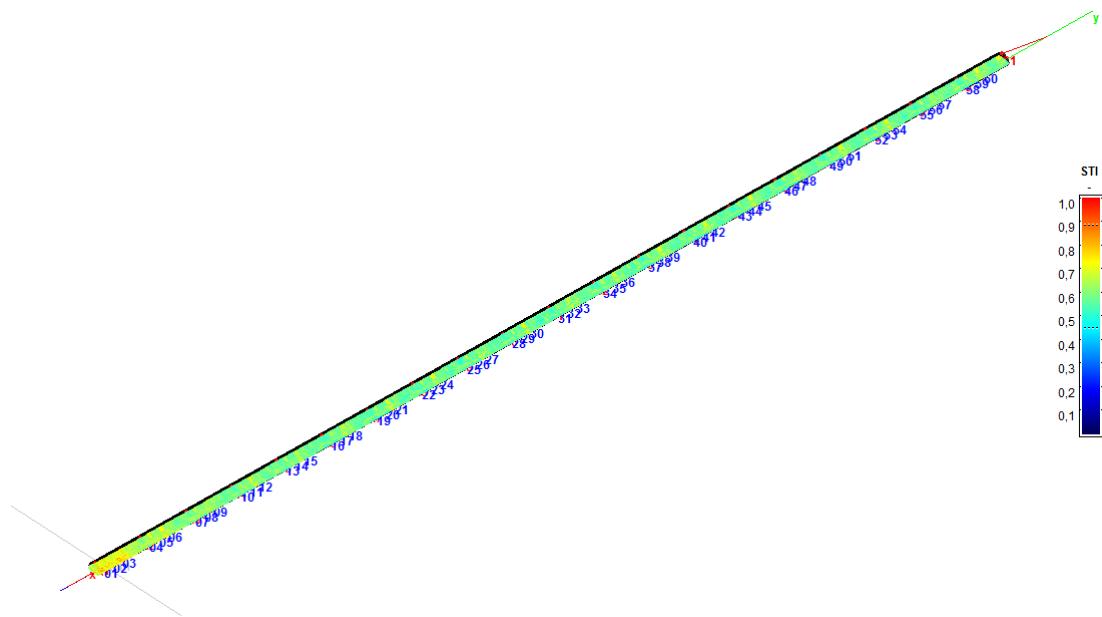
Πίνακας 17. Στατιστικά δεδομένα (μέγιστη, ελάχιστη στάθμη, μέση τιμή, $M_{max-min}$, διακύμανση) της κάλυψης απευθείας πεδίου για όλες μπάντες. Υπολογίστηκαν μέσω προγράμματος Excel, ανοίγοντας το αρχείο αποτελεσμάτων της εξομοίωσης.

4.6.3 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας

Η ενότητα αυτή εξετάζει την ποιότητα ομιλίας, με βάση το δείκτη μετάδοσης ομιλίας (STI). Οι τιμές του STI κυμαίνονται από 0, δηλαδή κακή μετάδοση ομιλίας, έως 1 που αντιστοιχεί σε εξαιρετική ποιότητα μετάδοσης ομιλίας. Τα σχήματα 106, 107 προκύπτουν από εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 106 είναι μια κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του τούνελ, όπου δείχνει τις STI τιμές για διάφορες θέσεις ακρόασης, ενώ το σχήμα 107 απεικονίζει το STI σε όλη την επιφάνεια ακρόασης, κατά μήκος όλου του δρόμου της σήραγγας. Από τα σχήματα 106, 107 φαίνεται ότι οι STI τιμές που υπάρχουν σε όλη τη περιοχή ακρόασης, κυμαίνονται στο περίπου κάτω από το 0.6 με 0.7. Χρησιμοποιώντας το Excel έγινε επεξεργασία του αρχείου αποτελεσμάτων STI της εξομοίωσης, όπου η μέση STI τιμή σε όλη τη περιοχή ακρόασης ισούται με 0.59. Έτσι με βάση τον πίνακα 6 από το κεφάλαιο του STI προκύπτει ότι οι ποιότητα μετάδοσης ομιλίας είναι καλή. Επίσης σε μία θέση ακρόασης η μέγιστη STI τιμή βρέθηκε στα 0.883 ενώ η ελάχιστη STI τιμή στα 0.447.



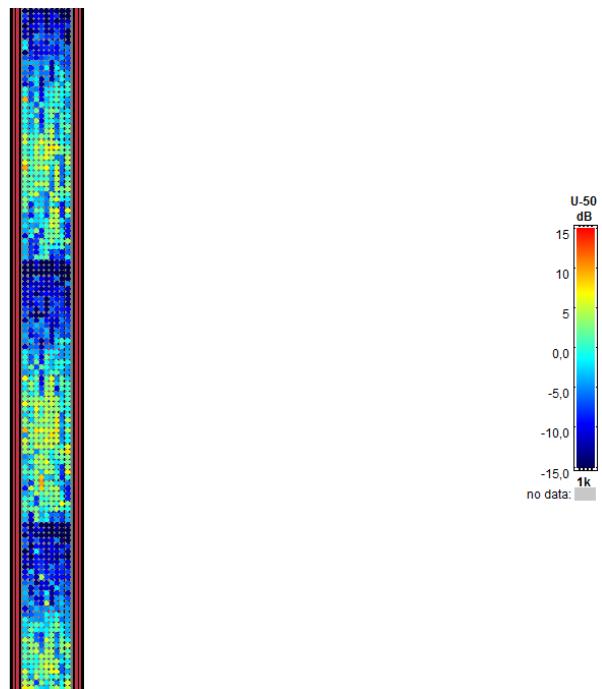
Σχήμα 106. Μια κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος που απεικονίζει τις STI τιμές για διάφορες θέσεις ακρόασης.



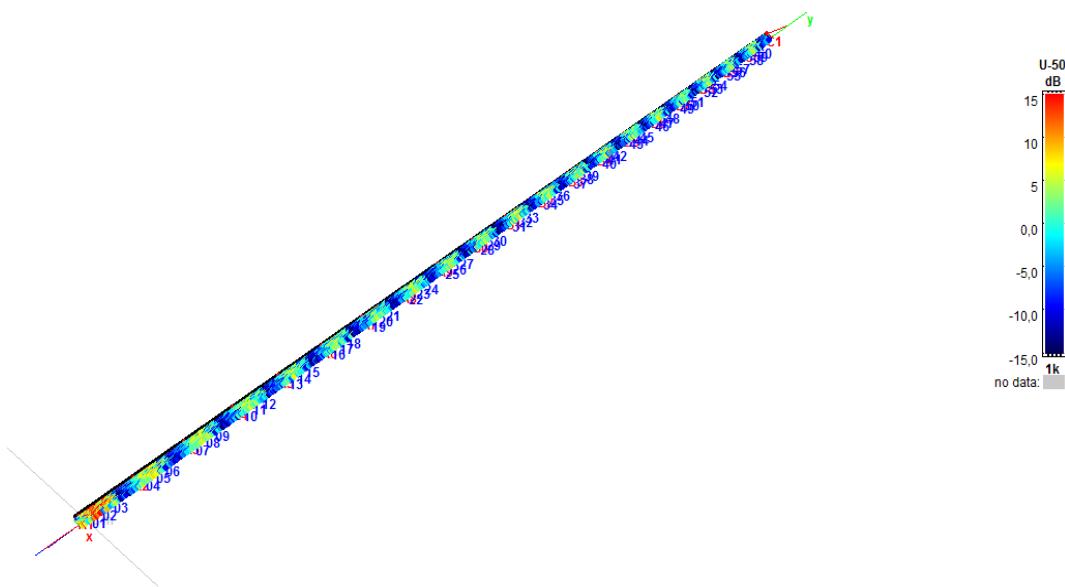
Σχήμα 107. Γενική απεικόνιση του STI σε όλη τη περιοχή ακρόασης, δηλαδή για θέσεις ακροατών κατά μήκος όλου του δρόμου.

4.6.4 U_{50} για συχνότητα 1 KHz

Η συγκεκριμένη ενότητα εξετάζει την απόδοση του ηχο-συστήματος, με βάση τον λόγο του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο (U_{50}) στη μπάντα συχνοτήτων του 1 KHz. Τα σχήματα 108, 109 προκύπτουν από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 108 απεικονίζει μια κάτοψη, από ένα τμήμα του ηχο-συστήματος στο τούνελ. Στο σχήμα 108 διακρίνονται τιμές U_{50} , για διάφορες θέσεις στην επιφάνεια ακρόασης. Επίσης το σχήμα 109 απεικονίζει U_{50} τιμές για θέσεις ακρόασης, σε όλο το δρόμο της σήραγγας. Το U_{50} ισούται με το λόγο ενέργειας της πρώιμης άφιξης στον ακροατή, προς την αργοτερημένη ενέργεια (ανακλάσεις μαζί με θόρυβο περιβάλλοντος). Έτσι σε θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές, λόγω της υψηλής στάθμης του απευθείας πεδίου θα υπάρχουνε υψηλές τιμές U_{50} . Αυτό αντικατοπτρίζεται στα σχήματα 108, 109. Το σχήμα 110 δείχνει στο Excel ένα τμήμα των αποτελεσμάτων U_{50} , για θέσεις ακρόασης σε όλο το τούνελ, μέσο εξομοίωσης στο CATT Acoustic. Στο Excel η μέση τιμή U_{50} για όλη την επιφάνεια ακρόασης, δηλαδή για τις θέσεις ακρόασης σε όλο το δρόμο, βρέθηκε στα - 2.8654 dB. Σε μια θέση ακρόασης η ελάχιστη U_{50} τιμή είναι: - 22.24 dB. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτή τη θέση, υπάρχουν πολλές ανακλάσεις και θόρυβοι περιβάλλοντος, κατά συνέπεια κακή ακουστική απόδοση. Αντίστοιχα η μέγιστη τιμή U_{50} βρέθηκε 18.57 dB, που σημαίνει ότι σε αυτή τη θέση ακρόασης υπάρχει υψηλή απόδοση του ήχου.



Σχήμα 108. Απεικόνιση μίας κάτοψης ενός ενδεικτικού τμήματος του ηχο-συστήματος, όπου φαίνονται οι U_{50} τιμές (@ 1 KHz) για διάφορες θέσεις ακρόασης.



Σχήμα 109. Απεικόνιση των U_{50} για θέσεις ακρόασης κατά μήκος όλου του δρόμου της σήραγγας (για όλη την περιοχή ακρόασης – @ 1 KHz).

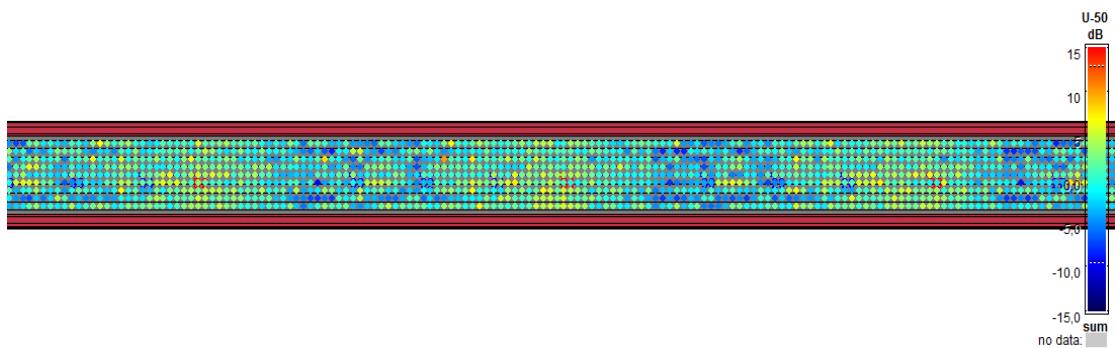
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1 Map meas:	U-50	dB	1 kHz						
2 Bkg noise:		28	dB						
3 Project:	project								
4 Creator:	CATT-Acoustic v9.1b (build 1.03) / TUCT v1.1b:2.02								
5 Date/Time	#####								
6 Air abs.:	on								
7 Interferer off									
8 Adapt ray: off									
9 No of rays	500	Diffractio	off						
10 Ech. lengt	1000	ms							
11									
12 Layer:	1 of		1 Nx:		9 Ny:		1002		
13	-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5
14	-4	3,67	-7,41	4,26	-1,91	4,53	5,85	5,34	18,27
15	-3	9,75	-8,71	-3,64	-1,49	2,89	6,34	5,15	16,72
16	-2	1,04	-6,93	-2,48	-2,91	7,67	11,63	12,63	10,3
17	-1	-0,01	7,81	-0,88	-2,88	4,87	-5,25	-5,45	11,43
18	0	8,07	4,17	-1,58	-0,98	4,52	15,55	18,57	16,73
19	1	10,2	6,66	8,25	-1,83	8,26	2,26	10,34	1,08
20	2	8,79	4,62	2,48	1,94	1,6	4,81	10,54	6,67
21	3	11,64	6,35	2,93	4,82	-0,43	6,47	4,15	4,91
22	4	4,96	8,04	13,37	5,06	7,38	-1,27	-2,36	5,7
23	x-axis								

Σχήμα 110. Απεικόνιση ενός τμήματος των U_{50} τιμών για διάφορες θέσεις ακροατών, κατά μήκος όλης της περιοχής ακρόασης.

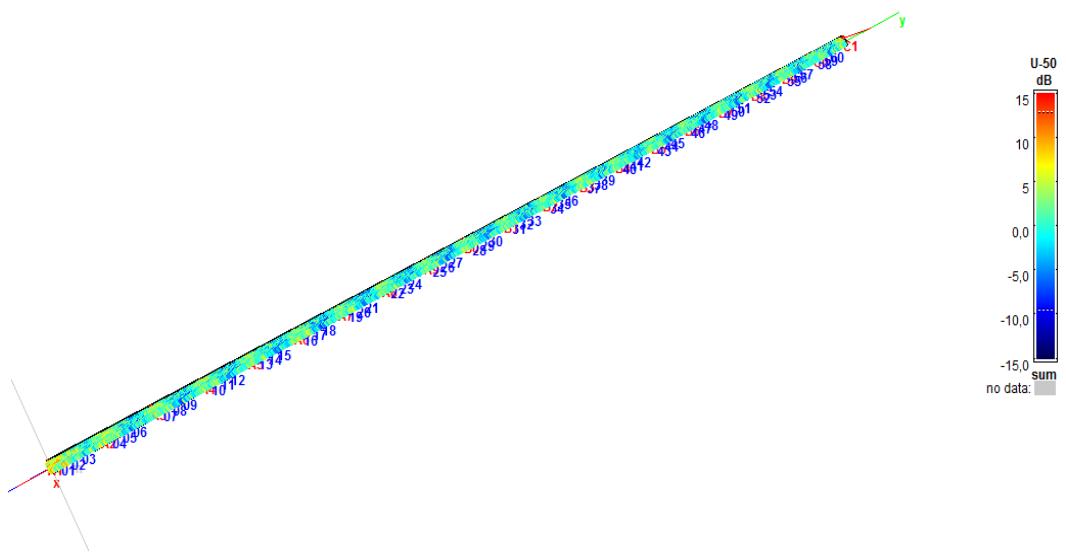
4.6.5 U_{50} σε όλες τις συχνότητες

Το κεφάλαιο αυτό αφορά τον λόγο του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο, (U_{50}) για όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Τα σχήματα 111, 112 προκύπτουν από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 111 είναι μια κάτοψη, από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος, όπου απεικονίζει τις τιμές U_{50} , για διάφορες θέσεις ακρόασης. Ενώ το σχήμα 112 δείχνει τις U_{50} τιμές, για θέσεις ακροατών κατά μήκος όλου του δρόμου, δηλαδή σε όλη τη περιοχή ακρόασης. Όπως με τα σχήματα 108, 109 του κεφαλαίου 4.6.4, έτσι και στα σχήματα 111, 112, φαίνεται ότι σε θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές, υπάρχουν υψηλές τιμές U_{50} . Αυτό οφείλεται στο ότι σε θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές υπάρχουν μεγάλες στάθμες απευθείας κύματος, κατά συνέπεια, μεγάλη ενέργεια πρώιμης άφιξης ομιλίας. Με το Excel η μέση τιμή U_{50} για όλη την επιφάνεια ακρόασης, βρέθηκε: 0.300375 dB. Η ελάχιστη τιμή U_{50} βρέθηκε: -9.49 dB, που σημαίνει ότι σε αυτή τη θέση ακρόασης υπάρχουν πολλές ανακλάσεις και θόρυβοι περιβάλλοντος, κατά συνέπεια φτωχή ακουστική απόδοση. Ενώ σε μία άλλη θέση

ακρόασης, η μέγιστη U_{50} τιμή βρέθηκε 12.78 dB και σε αυτή τη θέση υπάρχει η καλύτερη απόδοση της ομιλίας.



Σχήμα 111. Κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα της σήραγγας, που απεικονίζει τις U_{50} τιμές (σε όλες τις μπάντες) για διάφορες θέσεις ακρόασης.



Σχήμα 112. Απεικόνιση των U_{50} τιμών για όλες τις μπάντες, κατά μήκος όλης της περιοχής ακρόασης.

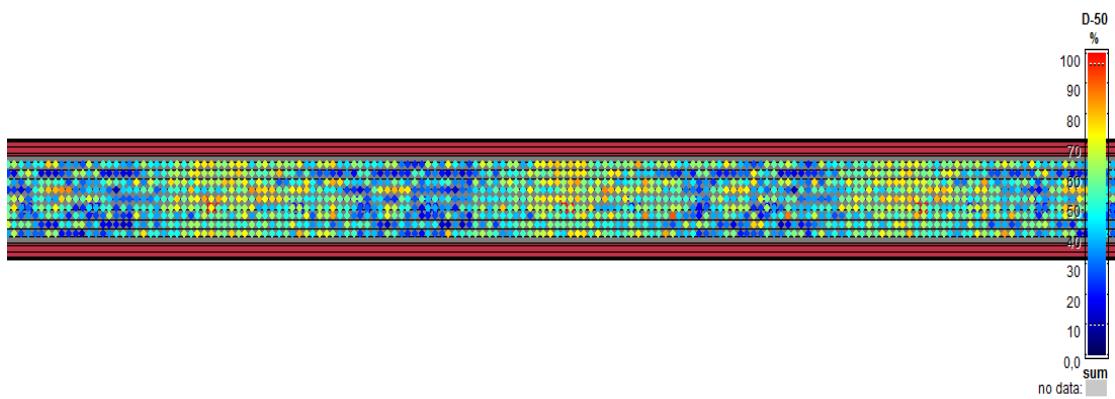
The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "project_1_map_U-50_sum - Microsoft". The ribbon menu is visible at the top with tabs like ΑΡΧΕΙΟ, ΚΕΝΤΡΙΚΗ, ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΕΛΙΔΑΣ, ΤΥΠΟΙ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ, and ΠΡΟΒΟΛΗ. The main content area displays a table with data and a large matrix of numerical values.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Map meas U-50	dB	sum									
2	Bkg noise:	45	38	32	28	25	23	21	19	dB	35,8 dBA	(NCB:28)
3	Project:	project										
4	Creator:	CATT-Acoustic v9.1b (build 1.03) / TUCT v1.1b:2.02										
5	Date/Time:	#####										
6	Air abs.:	on										
7	Interferer off											
8	Adapt ray:	off										
9	No of rays:	500	Diffraction:	off								
10	Ech. lengt:	1000	ms									
11												
12	Layer:	1	of	1 Nx:		9 Ny:		1002				
13		-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
14		-4	6,98	2,56	7,86	7,23	4,3	3,76	3,38	6,93	3,62	4,91
15		-3	4,89	2,21	6,32	5,39	2,24	5,14	8,24	3,72	7,9	6,87
16		-2	5,11	5,19	9,3	7,07	6,12	3,59	8,52	4,91	8,67	4,71
17		-1	3,63	0,96	4,08	4,39	5,1	8,48	7,01	10,23	9,87	4,36
18		0	10,97	8,31	6,9	5,98	6,63	5,6	5,33	11,54	9,17	4,24
19		1	7,71	7,13	8,67	4,11	5,79	9,43	6,33	9,65	8,24	10,44
20		2	3,87	4,75	4,16	7,51	5,87	2,88	5,15	3,22	5,22	7,2
21		3	5,64	6,13	6,48	4,29	8,06	3,86	4,02	2,76	2,81	4,21
22		4	4,96	8,4	10,31	4,43	5,96	1,85	1,01	5,88	2,55	-0,14
23	x-axis											

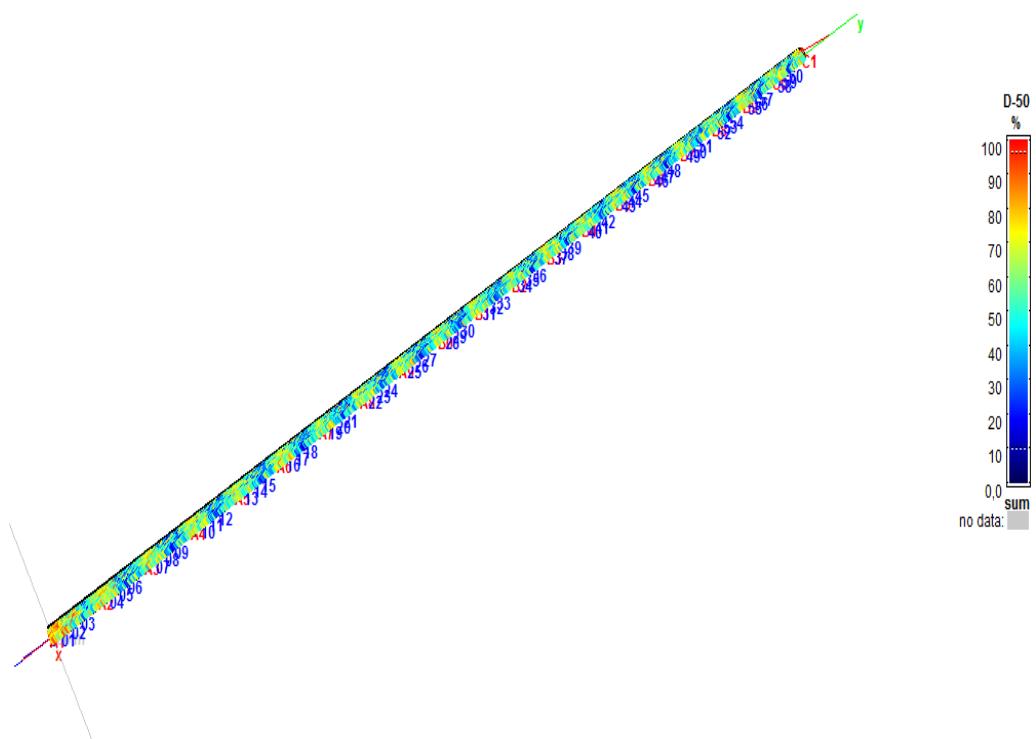
Σχήμα 113. Ενδεικτικό τμήμα των αποτελεσμάτων U_{50} (για όλες τις μπάντες) στο Excel για όλη την επιφάνεια ακρόασης.

4.6.6 D_{50} σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων

Η ενότητα αυτή εξετάζει την ευκρίνεια της ομιλίας (D_{50}), για όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Το D_{50} σχετίζει την ενέργεια του πρώιμου κύματος, με τη συνολική ακουστική ενέργεια του χώρου. Τα σχήματα 114, 115 προκύπτουν από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 114 αποτελεί μια κάτοψη, από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος, της σήραγγας. Στο σχήμα φαίνονται τιμές D_{50} , για διάφορες θέσεις ακροατών. Επίσης το σχήμα 115 απεικονίζει D_{50} τιμές για θέσεις ακρόασης, σε όλο το δρόμο της σήραγγας, (κατά μήκος όλης της επιφάνειας ακρόασης). Το D_{50} ορίζεται ως λόγος της ενέργειας, του πρώιμου κύματος, προς την ανακλώμενη ενέργεια που φτάνει στον ακροατή μέσα σε 50 ms. Έτσι σε θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές λόγω της υψηλής στάθμης του απευθείας πεδίου, θα υπάρχουν υψηλές τιμές D_{50} , το οποίο αντικατοπτρίζεται στα σχήματα 114, 115. Σε αντίθεση με το δείκτη U_{50} , ο D_{50} δεν λαμβάνει υπόψη το θόρυβο φόντου. Επίσης έγινε επεξεργασία του αρχείου αποτελεσμάτων της εξομοίωσης στο Excel, όπου η μέση τιμή D_{50} για όλη την επιφάνεια ακρόασης βρέθηκε: 52.21 %, ενώ οι ελάχιστες και οι μέγιστες D_{50} τιμές βρέθηκαν: 10.17 % και αντίστοιχα 95.93 %.



Σχήμα 114. Κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα της σήραγγας, όπου απεικονίζονται D_{50} τιμές για όλες τις μπάντες συχνοτήτων, σε διάφορες θέσεις ακρόασης.



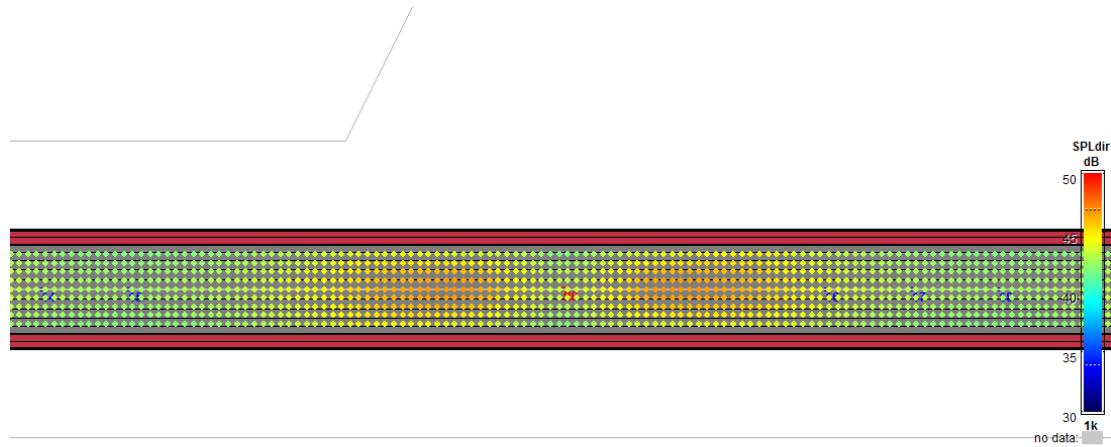
Σχήμα 115. Απεικόνιση D_{50} τιμών για θέσεις ακρόασης κατά μήκος όλου του δρόμου.

4.7 Ακουστικοί παράμετροι 2^{ον} μοντέλου

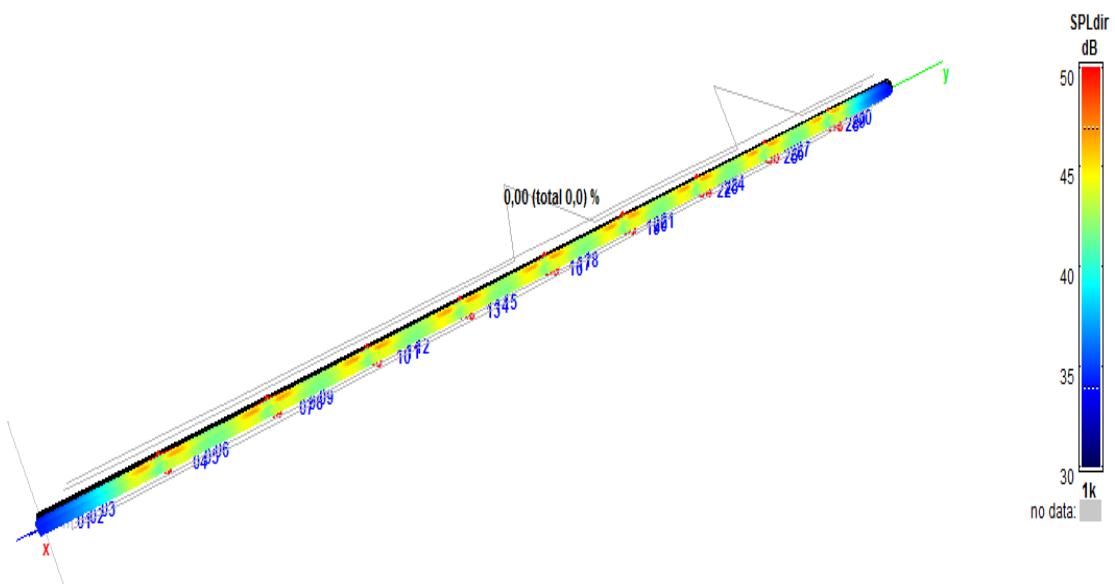
Στο μοντέλο των διαδοχικών χοανών σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, η περίπτωση που έχει την καλύτερη κάλυψη (σύμφωνα με την ενότητα 4.5.4), είναι αυτή που οι κύριοι άξονες των πηγών σημαδεύουν ανά 100 μέτρα. Στο κεφάλαιο 4.7 γίνεται περεταίρω μελέτη για τη περίπτωση αυτή, μέσω του λογισμικού CATT Acoustic. Οι ακουστικοί παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι: η κάλυψη του απευθείας πεδίου, σε όλη τη περιοχή ακρόασης (στα 1 KHz και σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων), καθώς και κάποια ακουστικά χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με την απόδοση της ομιλίας, όπως ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI), ο λόγος του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο (U_{50} @ 1 KHz και U_{50} σε όλες τις μπάντες), καθώς και η ευκρίνεια της ομιλίας (D_{50} για όλες τις μπάντες συχνοτήτων).

4.7.1 Απευθείας στάθμες στα 1 KHz

Αυτή η ενότητα περιγράφει την κάλυψη, για απευθείας στάθμες, στη μπάντα συχνοτήτων του 1 KHz. Τα σχήματα 116, 117 προκύπτουν από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 116 αποτελεί μια κάτοψη, από ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος της σήραγγας. Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται ακουστικές στάθμες για διάφορες θέσεις ακροατών. Οι στάθμες αυτές προκύπτουν, από τα απευθείας κύματα που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και την υπέρθεση τους σε διάφορα σημεία ακρόασης. Επίσης το σχήμα 117 απεικονίζει στάθμες απευθείας πεδίου, για θέσεις ακρόασης, κατά μήκος όλου του δρόμου. Στα σχήματα 116, 117 φαίνεται ότι οι θέσεις ακρόασης κοντά στις πηγές, έχουν μεγάλες ακουστικές στάθμες. Ο πίνακας 18, περιέχει τη μέση τιμή στάθμης όλης της επιφάνειας ακρόασης, τη μέγιστη στάθμη, την ελάχιστη στάθμη και το Mmax-min (διακύμανση). Αυτά τα μεγέθη υπολογίστηκαν, επεξεργάζοντας το αρχείο αποτελεσμάτων της εξομοίωσης στο Excel.



Σχήμα 116. Κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του τούνελ. Απεικόνιση για στάθμες απευθείας πεδίου (@ 1 KHz) για διάφορες θέσεις ακρόασης.



Σχήμα 117. Απεικόνιση για στάθμες απευθείας πεδίου (@ 1 KHz) κατά μήκος όλου του δρόμου.

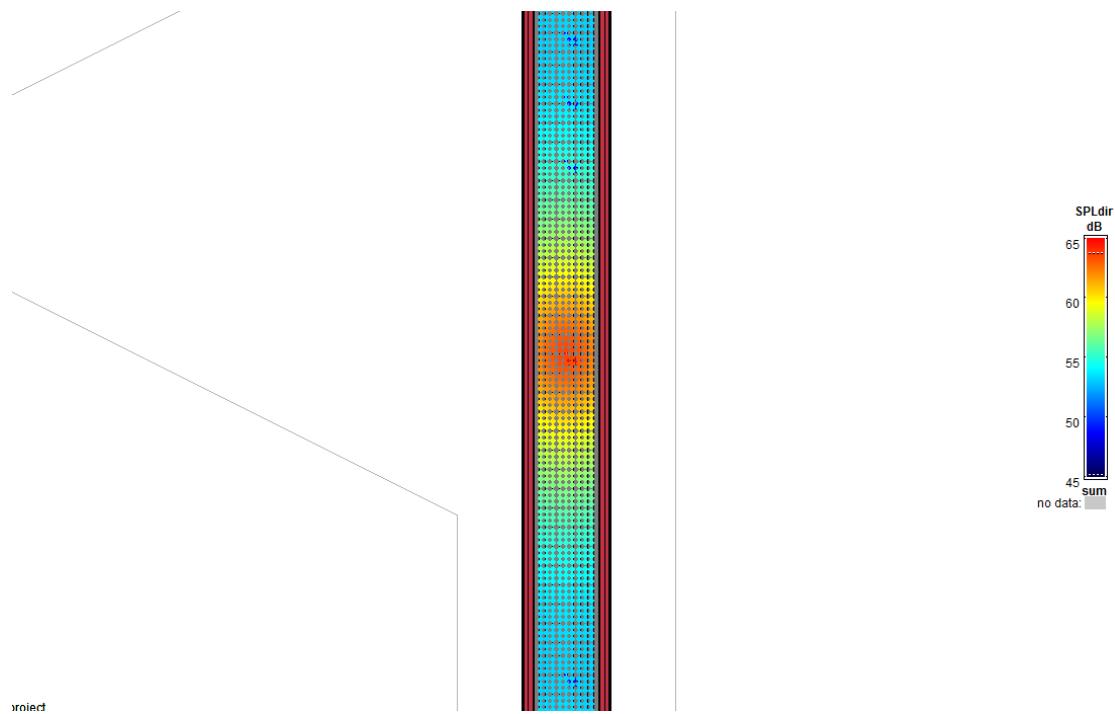
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ:	73.03 dB
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ:	76.86 dB
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ:	63.98 dB
Mmax-min:	70.42 dB +- 6.44 dB

Πίνακας 18. Μέση τιμή στάθμης απευθείας πεδίου σε όλη την επιφάνεια ακρόασης, μέγιστη, ελάχιστη ακουστική στάθμη, διακύμανση.

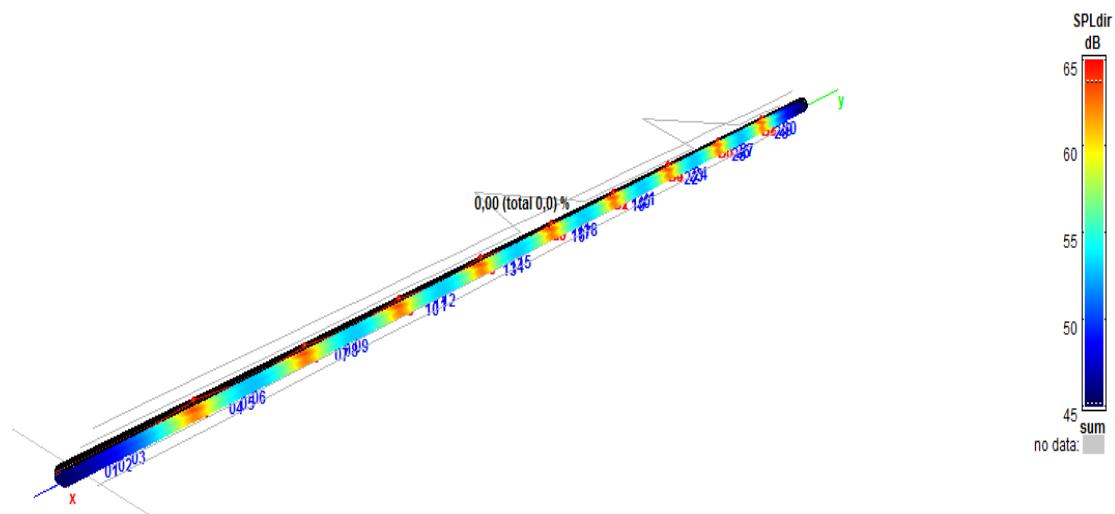
4.7.2 Απευθείας στάθμες σε όλες τις συχνότητες

Η ενότητα αυτή αφορά την κάλυψη του απευθείας πεδίου, για όλες τις μπάντες συχνοτήτων, όλης της περιοχής ακρόασης. Τα σχήματα 118, 119 προκύπτουν από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 118 απεικονίζει ένα τμήμα του ηχοσυστήματος σε κάτοψη. Στο σχήμα διακρίνονται ακουστικές στάθμες απευθείας πεδίου για διάφορες θέσεις ακροατών. Επίσης το σχήμα 119 δείχνει μια γενική απεικόνιση της κάλυψης, για θέσεις ακροατών σε όλη τη περιοχή ακρόασης. Οι ακουστικές στάθμες, προκύπτουν από τα απευθείας κύματα που εκπέμπονται από όλες τις χοάνες και την υπέρθεση τους σε κάθε σημείο ακρόασης, δηλαδή οι υπολογισμοί του CATT Acoustic βασίζονται στη λογική των υπολογισμών που έγιναν στο χαρτί. Στα σχήματα 118, 119 φαίνεται ότι σε θέσεις ακρόασης κοντά στις χοάνες, οι απευθείας στάθμες είναι μεγάλες, ενώ σε απομακρυσμένες θέσεις ακροατών οι ακουστικές στάθμες ελαττώνονται. Έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης στο Excel (αρχείο του CATT Acoustic), όπου υπολογίστηκαν: η μέση τιμή της στάθμης απευθείας πεδίου για όλη την επιφάνεια ακρόασης, η μέγιστη – ελάχιστη ακουστική στάθμη και η διακύμανση (Πίνακας 19). Επίσης συγκρίνοντας τους πίνακες 18 – 19

προκύπτει ότι οι απευθείας στάθμες σε όλες τις μπάντες είναι υψηλότερες σε σχέση με τις απευθείας στάθμες στα 1 KHz.



Σχήμα 118. Απεικόνιση μιας κάτοψης για ένα ενδεικτικό τμήμα του ηχο-συστήματος. Στο σχήμα φαίνεται η κατανομή των απευθείας πεδίου για όλες τις μπάντες συχνοτήτων, για διάφορες θέσεις ακροατών.



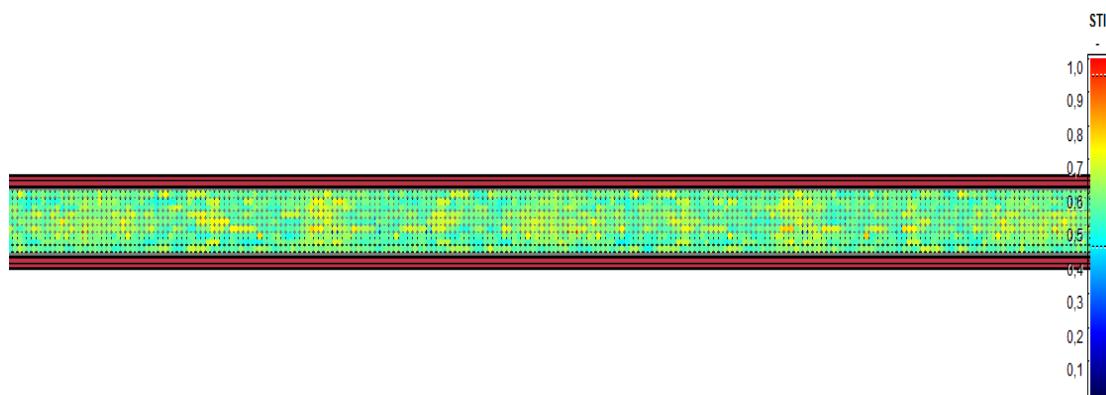
Σχήμα 119. Απεικόνιση για στάθμες απευθείας πεδίου σε θέσεις ακροατών κατά μήκος όλου του δρόμου, δηλαδή σε όλη τη περιοχή ακρόασης.

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ:	85.66 dB
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ:	93.63 dB
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ:	75.24 dB
Mmax-min:	84.435 dB +- 9.195 dB

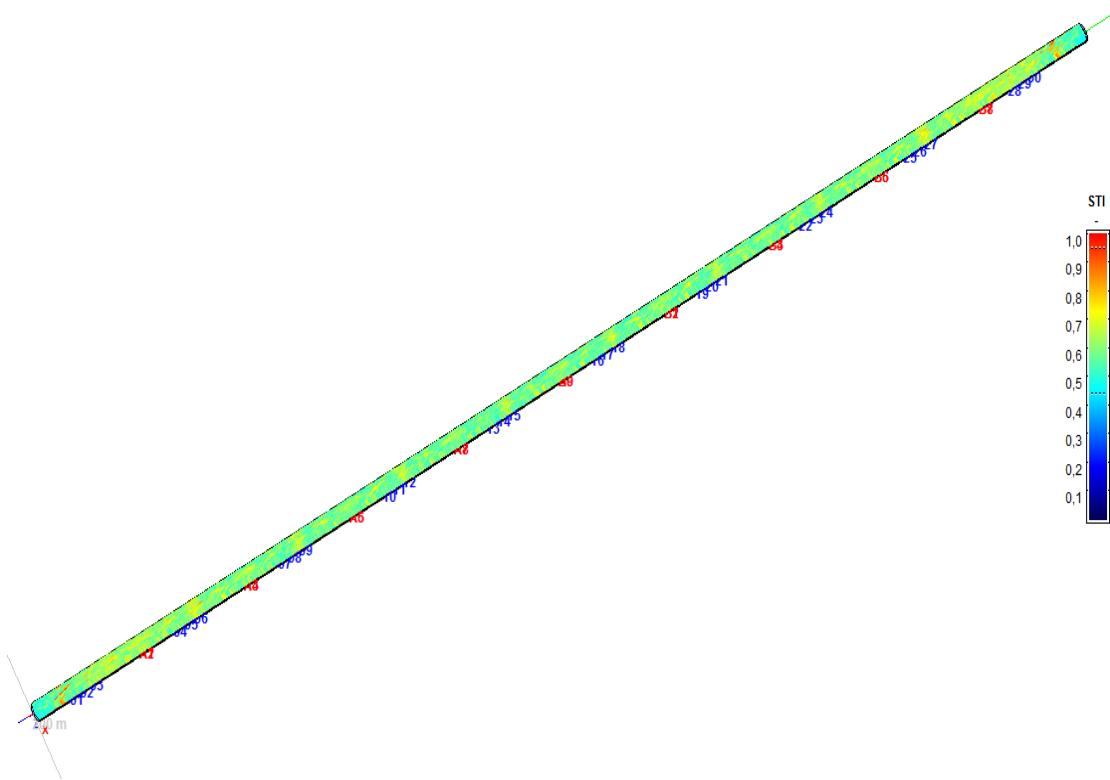
Πίνακας 19. Μέση τιμή ακουστικής στάθμης, μέγιστη – ελάχιστη τιμή και διακύμανση, του απευθείας πεδίου για όλες τις μπάντες συχνοτήτων.

4.7.3 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας

Στη συγκεκριμένη ενότητα διερευνάται η απόδοση της ομιλίας, με βάση το δείκτη μετάδοσης ομιλίας (STI). Τα σχήματα 120, 121 προκύπτουν από εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 120 είναι μια κάτοψη από ένα κομμάτι, του ενδεικτικού ηχο-συστήματος της σήραγγας. Στο σχήμα απεικονίζονται οι STI τιμές, για διάφορες θέσεις ακρόασης. Ενώ το σχήμα 121 απεικονίζει τις STI τιμές, σε όλη την περιοχή ακρόασης (κατά μήκος όλου του δρόμου). Από τα σχήματα 120, 121 φαίνεται ότι οι STI τιμές κυμαίνονται από περίπου 0.4 έως 0.9. Επίσης σε θέσεις ακρόασης κοντά στις χοάνες, παρατηρούνται υψηλές STI τιμές, λόγω στις μεγάλες στάθμες από τα απευθείας κύματα. Το σχήμα 122 δείχνει στο Excel ένα τμήμα STI τιμών, που προέκυψε από την εξομοίωση στο CATT Acoustic. Επίσης στο σχήμα 122 φαίνονται οι ρυθμίσεις της εξομοίωσης, για στάθμες θορύβου φόντου στις μπάντες συχνοτήτων από 125 Hz έως 16 KHz (κόκκινο πλαίσιο σχήμα 122). Με το Excel η μέση STI τιμή όλης της επιφάνειας ακρόασης, υπολογίστηκε στα: 0.601794. Αυτή η τιμή σύμφωνα με τον πίνακα 6, θεωρείται καλή ποιότητα μετάδοσης ομιλίας (γιατί βρίσκεται μεταξύ 0.6 – 0.75). Η καλύτερη ποιότητα μετάδοσης ομιλίας βρέθηκε σε μία θέση ακρόασης που η μέγιστη STI τιμή ισούται με: 0.947, ενώ αντίστοιχα η μικρότερη STI τιμή υπολογίστηκε στα: 0.437.



Σχήμα 120. Μια κάτοψη από ένα ενδεικτικό τμήμα του τούνελ, όπου απεικονίζονται STI τιμές για διάφορες θέσεις ακρόασης.



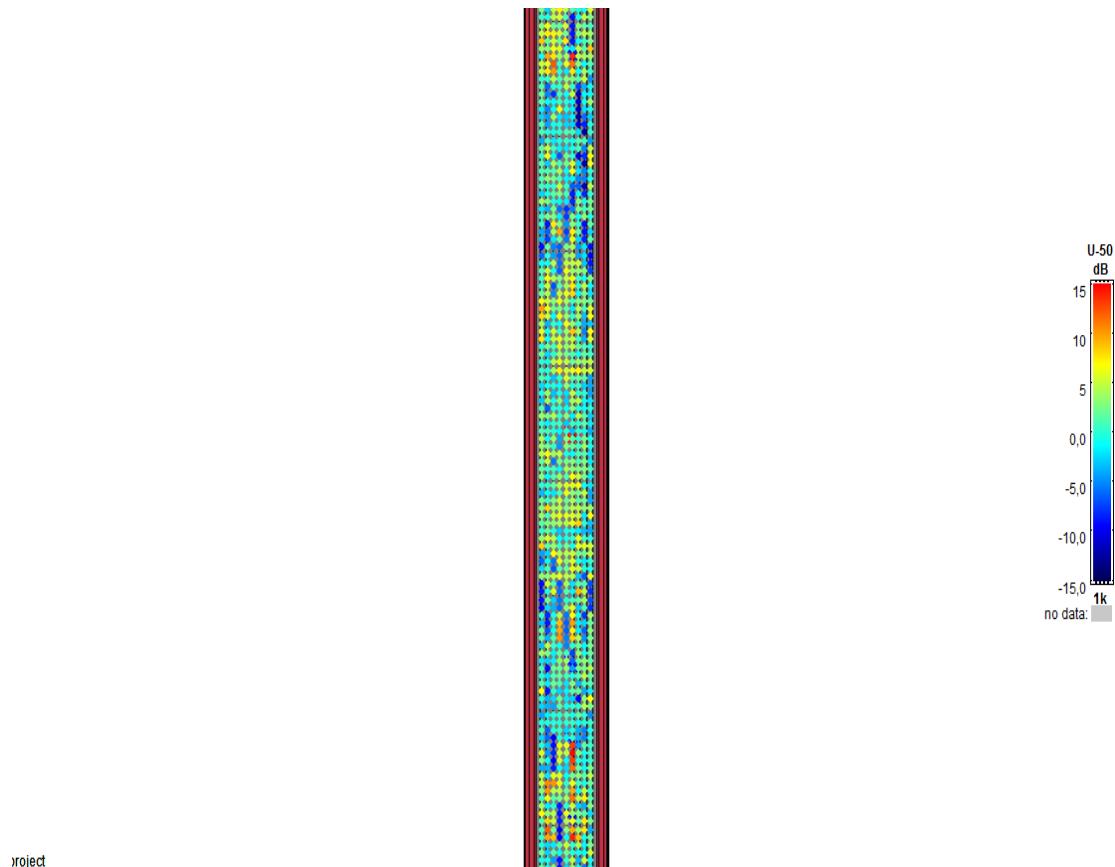
Σχήμα 121. Απεικόνιση των STI για θέσεις ακρόασης σε όλη τη περιοχή ακρόασης (κατά μήκος όλου του δρόμου της σήραγγας).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Map meas STI	-		IECED3 mā Masking on								
2	Bkg noise:	45	38	32	28	25	23	21	0	dB		35,8 dBA (NCB:28)
3	Eqx:	0	0	0	0	0	0	0	0	dB		
4	Project:	project										
5	Creator:	CATT-Acoustic v9.1b (build 1.03) / TUCT v1.1b:2.02										
6	Date/Time:	#####										
7	Air abs.:	on										
8	Interferer:	off										
9	Adapt ray:	off										
10	No of rays	500	Diffractio	off								
11	Ech. lengt	1000	ms									
12												
13	Layer:	1 of		1 Nx:		9 Ny:		1002				
14		-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
15	-4	0,547	0,546	0,564	0,499	0,491	0,493	0,508	0,511	0,519	0,641	0,617
16	-3	0,48	0,481	0,456	0,456	0,476	0,526	0,525	0,561	0,568	0,485	0,5
17	-2	0,487	0,468	0,466	0,546	0,557	0,546	0,507	0,477	0,483	0,559	0,543
18	-1	0,508	0,491	0,534	0,487	0,512	0,481	0,532	0,496	0,509	0,56	0,546
19	0	0,521	0,513	0,482	0,45	0,52	0,525	0,481	0,546	0,566	0,529	0,61
20	1	0,515	0,54	0,654	0,722	0,538	0,597	0,484	0,508	0,514	0,589	0,535
21	2	0,476	0,52	0,519	0,544	0,504	0,588	0,644	0,658	0,512	0,544	0,548
22	3	0,49	0,494	0,481	0,509	0,501	0,483	0,479	0,478	0,651	0,65	0,525
23	4	0,464	0,484	0,488	0,505	0,499	0,525	0,462	0,509	0,508	0,483	0,5
24	x-axis											
25												

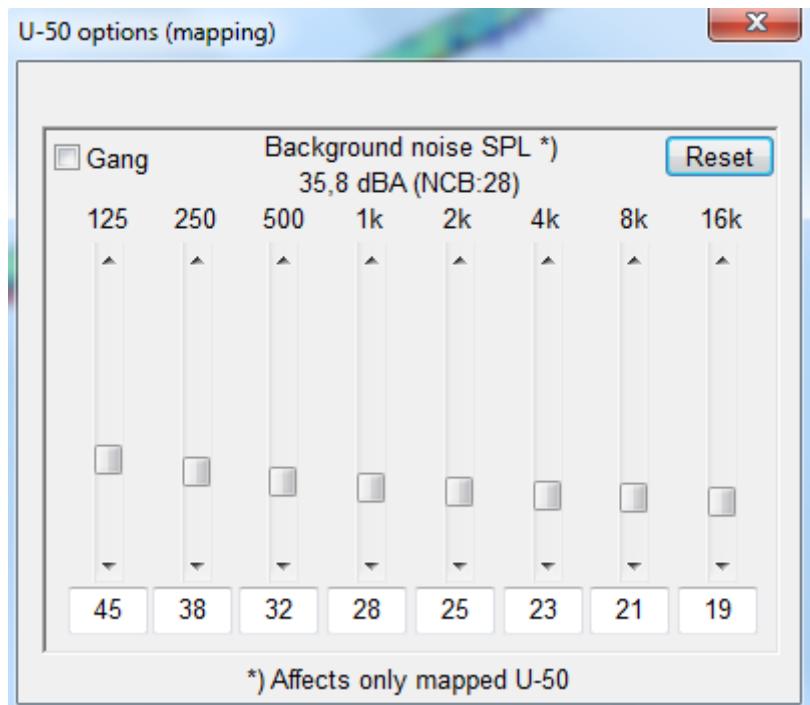
Σχήμα 122. Απεικόνιση στο Excel ενός μέρους των STI τιμών της εξομοίωσης. Οι στάθμες θορύβου φόντου αφορούν τις μπάντες συχνοτήτων: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz, 8 και 16 KHz (κόκκινο πλαίσιο).

4.7.4 U₅₀ στη μπάντα συχνοτήτων του 1 KHz

Η ενότητα αυτή εξετάζει την απόδοση της ομιλίας, με βάση τον λόγο του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο (U₅₀), για τη μπάντα συχνοτήτων του 1 KHz. Το σχήμα 123 είναι αποτέλεσμα εξομοίωσης στο CATT Acoustic. Το σχήμα 123 αφορά μία κάτοψη, από ένα μέρος του ηχο-συστήματος στη σήραγγα. Στο σχήμα απεικονίζονται U₅₀ τιμές (@ 1 KHz), για διάφορες θέσεις ακρόασης. Το U₅₀ ορίζεται ως λόγος ενέργειας της πρώιμης άφιξης ομιλίας, προς την αργοπορημένη άφιξη μαζί με το θόρυβο. Έτσι στις θέσεις ακροατών κοντά στις χοάνες, λόγω στις υψηλές στάθμες του απευθείας κύματος εμφανίζονται μεγάλες τιμές U₅₀ και αυτό αναπαρίσταται στο σχήμα 123. Το σχήμα 124 είναι ένα παράθυρο των ρυθμίσεων U₅₀ της εξομοίωσης, όπου ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τον θόρυβο φόντου (L_{BN}), για μπάντες συχνοτήτων από 125 Hz έως 16 KHz. Η μέση τιμή U₅₀ στα 1 KHz όλης της επιφάνειας ακρόασης βρέθηκε: U₅₀ = 1.353 dB. Σε μία θέση ακρόασης, η μέγιστη U₅₀ τιμή βρέθηκε: U₅₀ = 20.99 dB, που σημαίνει ότι σε αυτή τη θέση υπάρχει καλή απόδοση του ήχου, λόγο του μεγάλου απευθείας κύματος και των μικρών ανακλάσεων, ενώ η χαμηλότερη ακουστική απόδοση εντοπίστηκε στα: -16.76 dB.



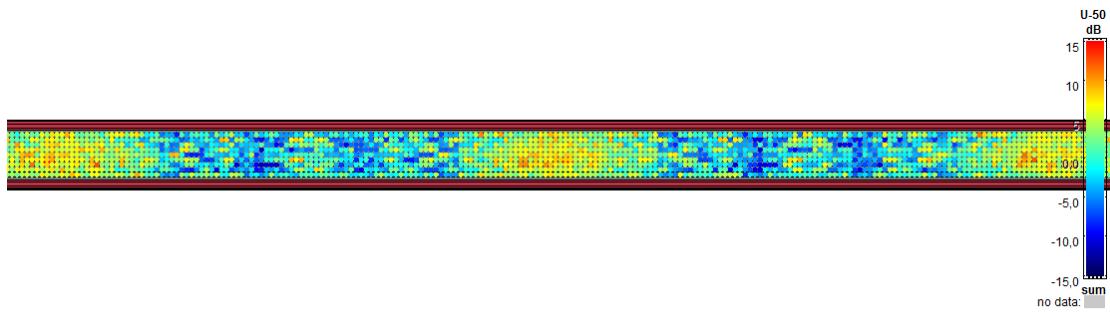
Σχήμα 123. Κάτοψη από ένα μέρος του ενδεικτικού ηχο-συστήματος της σήραγγας. Απεικονίζονται τιμές U₅₀ (@ 1 KHz) για διάφορες θέσεις ακρόασης.



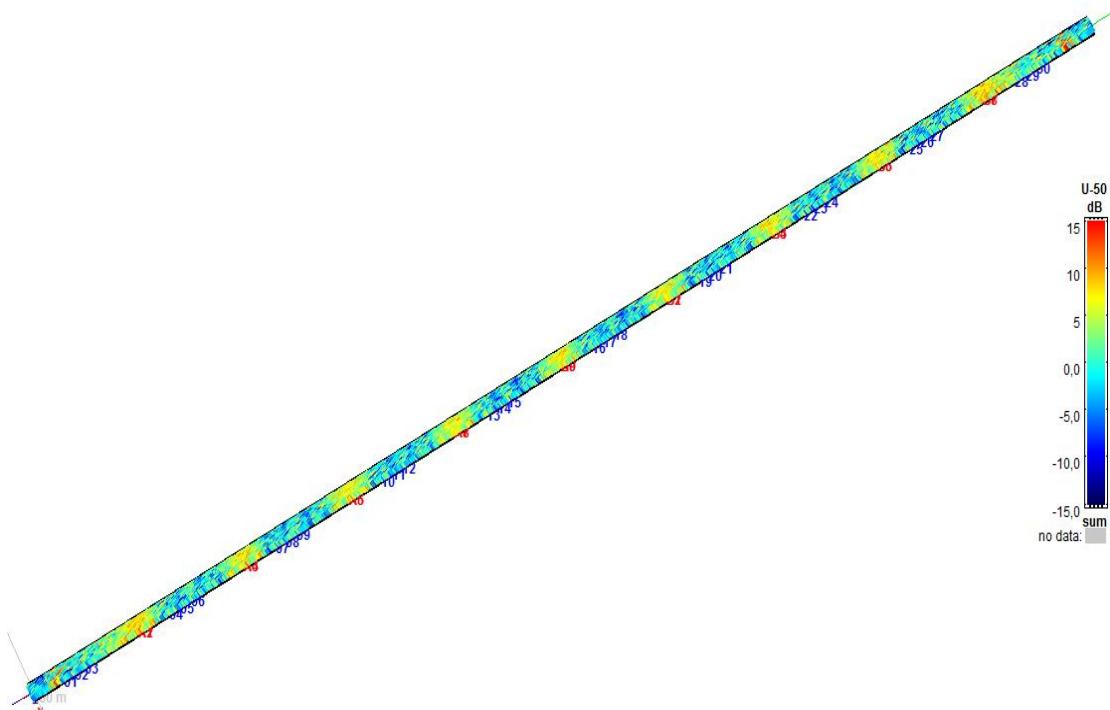
Σχήμα 124. Ρυθμίσεις U_{50} , επιλογή στάθμης θορύβου φόντου (L_{BN}) για μπάντες συχνοτήτων από 125 Hz έως 16 KHz.

4.7.5 U_{50} σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων

Εδώ πέρα πάλι εξετάζεται η ακουστική απόδοση, με βάση τον λόγο U_{50} , αλλά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Τα σχήματα 125, 126 προκύπτουν από εξομοίωση στο CATT Acoustic. Το σχήμα 125 αφορά μια κάτοψη, από ένα τμήμα του ενδεικτικού ηχο-συστήματος στο τούνελ, στο σχήμα αυτό απεικονίζονται οι U_{50} τιμές (dB), για διάφορες θέσεις ακροατών και για όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Επίσης το σχήμα 126, δείχνει πως κυμαίνονται οι U_{50} τιμές, σε όλη τη περιοχή ακρόασης. Όπως στην ενότητα 4.7.4 έτσι και εδώ, οι θέσεις ακρόασης κοντά στις χοάνες, έχουν υψηλές U_{50} τιμές λόγω των ισχυρών πρώτων αφίξεων και αυτό αντικατοπτρίζεται στα σχήματα 125, 126. Επεξεργάζοντας με το Excel το αρχείο αποτελεσμάτων της εξομοίωσης (σχ. 127), η μέση τιμή U_{50} για όλη την επιφάνεια ακρόασης υπολογίστηκε στα: $U_{50} = 1.185$ dB. Η μεγαλύτερη U_{50} τιμή σε μία θέση ακρόασης, βρέθηκε: $U_{50} = 15.99$ dB, όπου λόγω από τις ισχυρές στάθμες του απευθείας πεδίου και των μικρών ανακλάσεων, η θέση αυτή έχει αρκετά καλή απόδοση της ομιλίας. Αντιθέτως η χειρότερη ακουστική απόδοση έχει: $U_{50} = -15.21$ dB.



Σχήμα 125. Κάτοψη από ένα κομμάτι του ηχο-συστήματος. Στις περιοχές γύρω από τα ηχεία παρατηρούνται υψηλές U_{50} τιμές, λόγω του ισχυρού απευθείας πεδίου και των πρώιμων ανακλάσεων.



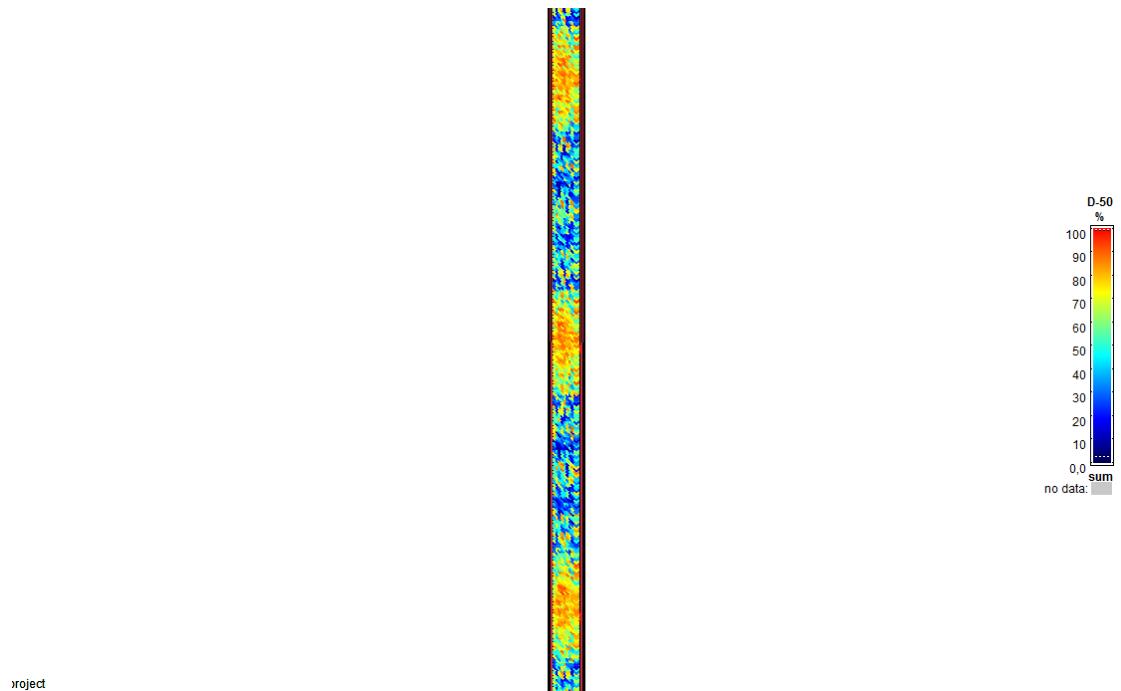
Σχήμα 126. Γενική απεικόνιση του U_{50} για όλες τις μπάντες συχνοτήτων, κατά μήκος όλου του δρόμου (σε όλη τη περιοχή ακρόασης).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1 Map meas: U-50		dB	sum								
2 Bkg noise:	45	38	32	28	25	23	21	19 dB	35,8 dBA	(NCB:28)	
3 Project:	project										
4 Creator:	CATT-Acoustic v9.1b (build 1.03) / TUCT v1.1b:2.02										
5 Date/Time:	#####										
6 Air abs.:	on										
7 Interferer:	off										
8 Adapt ray:	off										
9 No of rays	500	Diffractio	off								
10 Ech. lengt	1000 ms										
11											
12 Layer:	1 of		1 Nx:		9 Ny:		1002				
13	-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
14	-4	2,6	2,88	3,01	-4,26	-4,36	-3,75	-0,92	-0,31	-2,63	-10,49
15	-3	-2,53	-2,87	-6,04	-5,95	-3,54	-4,84	-4,74	-9	-8,59	-2,37
16	-2	-4,36	-5,03	-2,74	4,46	3,66	2,26	-5,7	-2,59	-1,94	-7,16
17	-1	-2,04	-4,03	2,16	-2,97	-2,19	-3,14	-6,24	-1,75	-1,45	-7,25
18	0	-4,25	-4,31	-2,19	-4,09	-4,6	-6,52	-1,65	7,03	5,62	-0,64
19	1	-6,11	-5,24	3,67	1,58	-1,25	6,49	-1,4	-1,66	-0,15	-6,83
20	2	-2,95	-3,06	-5,67	2,23	0,93	2,27	0,29	1,21	-2,01	-0,88
21	3	0,48	-1,37	1,64	2,03	-2,36	-3,15	-0,04	-3,71	0,47	0,92
22	4	-5,91	-5,18	-5,68	-4,05	-2,05	-3,4	-2,86	-1,84	-2	-3,19
23	x-axis										

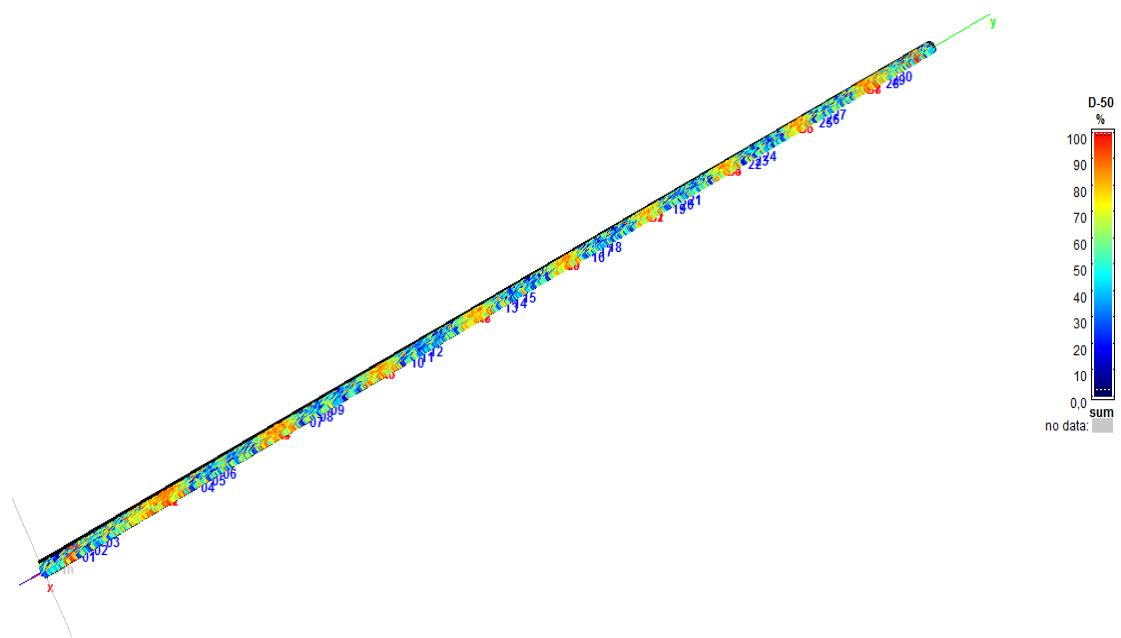
Σχήμα 127. Μια ενδεικτική απεικόνιση στο Excel, του αρχείου αποτελεσμάτων U_{50} της εξομοίωσης.

4.7.6 D_{50} σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει την ακουστική απόδοση, με βάση την ευκρίνεια ομιλίας (D_{50}), σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Τα σχήματα 128, 129 προκύπτουν από την εξομοίωση του CATT Acoustic. Το σχήμα 128 απεικονίζει μια κάτοψη, από ένα μέρος του ηχο-συστήματος της σήραγγας. Στο σχήμα διακρίνονται D_{50} τιμές (%), σε διάφορες θέσεις ακρόασης. Το σχήμα 129 απεικονίζει D_{50} τιμές (%), σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων, για θέσεις ακρόασης σε όλη τη σήραγγα. Το D_{50} ορίζεται ως λόγος ενέργειας, του απευθείας κύματος, προς το ανακλώμενο κύμα, που φτάνει στον ακροατή μέσα σε 50 ms. Έτσι οι θέσεις ακρόασης κοντά στις χοάνες, θα έχουν υψηλές D_{50} τιμές, λόγω από τις μεγάλες στάθμες απευθείας πεδίου. Αυτό αντικατοπτρίζεται στα σχήματα 128, 129. Χρησιμοποιώντας το Excel και το αρχείο αποτελεσμάτων της εξομοίωσης, υπολογίστηκε η μέση D_{50} τιμή, όλης της επιφάνειας ακρόασης στα: $D_{50} = 56.79\%$. Επίσης η θέση ακρόασης, με την καλύτερη απόδοση της ομιλίας, έχει $D_{50} = 98.75\%$, ενώ η θέση ακρόασης με τη χειρότερη ποιότητα ομιλίας, έχει $D_{50} = 2.95\%$.



Σχήμα 128. Απεικόνιση μιας κάτοψης, από ένα ενδεικτικό τμήμα του τούνελ. Στις περιοχές γύρω από τα ηχεία, παρατηρούνται υψηλές D_{50} τιμές, λόγω του ισχυρού απευθείας πεδίου.



Σχήμα 129. Απεικόνιση D_{50} τιμών, για θέσεις ακρόασης σε όλο τον δρόμο της σήραγγας (κατά μήκος όλης της περιοχής ακρόασης).

5 Συμπεράσματα-επίλογος

Αυτή η διπλωματική περιγράφει μια έρευνα, πάνω στα ηχο-συστήματα ανακοινώσεων για σήραγγες. Συνήθως, τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα array ηχείων, τοποθετημένα κατά μήκος της σήραγγας. Σκοπός της διπλωματικής ήταν η εύρεση του κατάλληλου ηχο-συστήματος, το οποίο να παρέχει την καλύτερη απόδοση ήχου, σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις ακρόασης. Έτσι σε περίπτωση μιας καταστροφής, ο επιβάτης να αντιληφθεί το μήνυμα κινδύνου και να εγκαταλείψει με ασφάλεια τη σήραγγα. Για το τούνελ Μαλιακός-Κλειδί, δύο ενδεικτικές διατάξεις συστημάτων έχουν προταθεί. Η 1^η αφορά διαδοχικά ηχεία ίδιας κατεύθυνσης, τοποθετημένα ανά διαστήματα 50 m, ενώ η 2^η αφορά ηχεία σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, τοποθετημένα ανά 100 m.

Για κάθε διάταξη μελετήθηκαν παραλλαγές περιπτώσεων, μέσω υπολογισμών στο χαρτί. Επειδή μια σήραγγα θεωρείται ένας κλειστός χώρος με μεγάλη αντήχηση και δεν μπορεί να προστεθεί υλικό απορρόφησης, ο μόνος τρόπος για να βελτιωθεί η ακουστική απόδοση, είναι να χρησιμοποιηθούν ηχεία υψηλής κατευθυντικότητας. Για αυτό στους υπολογισμούς στο χαρτί (όπως και στην εξομοίωση) επιλέχθηκε η χοάνη: Tunnel 500/DUP-40T. Για τη 1^η διάταξη έγιναν υπολογισμοί στο χαρτί, τριών διαφορετικών περιπτώσεων: A) Οι κύριοι άξονες από όλες τις χοάνες, σημαδεύουν ανά 44.7 m B) Οι κύριοι άξονες όλων των χοανών σημαδεύουν ανά 50 m και Γ) αντίστοιχα ανά 60 m. Κριτήριο για την επιλογή, του καλύτερου ηχο-συστήματος της 1^{ης} διάταξης, ήταν να υπάρχει ομαλή κατανομή ακουστικής στάθμης για όλους τους ακροατές, έτσι ως καλύτερη περίπτωση επιλέχθηκε αυτή των 50 μέτρων. Επίσης για το ηχο-σύστημα σε ζεύγη αντίθετων κατευθύνσεων, έγιναν επίσης υπολογισμοί στο χαρτί, για τρείς διαφορετικές περιπτώσεις. Στη 1^η περίπτωση οι κύριοι άξονες όλων των χοανών, σημαδεύουν ανά θέση 25 μέτρων, στη 2^η περίπτωση ανά θέση 50 μέτρων και αντίστοιχα ανά θέση 100 μέτρων. Πάλι εδώ έγινε επιλογή της καλύτερης περίπτωσης ηχο-συστήματος, με κριτήριο ποια από τις τρείς περιπτώσεις, αποδίδει ομαλή ακουστική στάθμη σε όλους τους ακροατές. Έτσι ως καλύτερη περίπτωση επιλέχθηκε η διάταξη ηχο-συστήματος, όπου οι κύριοι άξονες των χοανών, σημαδεύουν ανά θέση 100 μέτρων. Κατόπιν έγινε εξομοίωση των δύο καλύτερων περιπτώσεων ηχο-συστημάτων, μέσω λογισμικού CATT Acoustic, ώστε να εξακριβωθεί ποια από τις δύο περιπτώσεις, αποδίδει τον καλύτερο ήχο στο χώρο, για όσο το δυνατόν περισσότερους ακροατές.

Ο πίνακας 20 συγκρίνει την ακουστική απόδοση, της καλύτερης περίπτωσης του 1^{ου} μοντέλου (διαδοχικών χοανών ανά 50 m), με τη καλύτερη περίπτωση του 2^{ου} μοντέλου (διαδοχικών χοανών ανά 100 m). Επίσης ο πίνακας 20 συνοψίζει τις ακουστικές παραμέτρους, που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 4.6, 4.7. Στο πίνακα συμπεριλαμβάνεται η μέση τιμή του απευθείας πεδίου, όλης της επιφάνειας ακρόασης και η διακύμανση (Mmax-min @ 1KHz και σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων), καθώς και οι μέσες τιμές STI, U₅₀, D₅₀ για όλη την επιφάνεια ακρόασης. Από το πίνακα συμπεραίνουμε ότι το ηχο-σύστημα της περίπτωσης 1, έχει σε γενικές γραμμές, μεγαλύτερες ακουστικές στάθμες και ομαλότερη κάλυψη (λόγω μικρής διακύμανσης) σε σχέση με την περίπτωση 2. Όμως το ηχο-σύστημα της 2^{ης} περίπτωσης, έχει υψηλότερη ακουστική απόδοση και καλύτερη απόδοση ομιλίας στον ακροατή. Το ηχο-σύστημα των διαδοχικών χοανών ανά 100 m (με τους κύριους άξονες των πηγών να

σημαδεύουν ανά 100 m) έχει υψηλότερες μέσες τιμές STI, U₅₀ και D₅₀ σε όλη την επιφάνεια ακρόασης, σε σχέση με τις διαδοχικές χοάνες ανά 50 m (που οι κύριοι άξονες σημαδεύουν και αυτοί στα 50 m).

	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1. (ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΧΟΑΝΩΝ ΑΝΑ 50m)	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2. (ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΧΟΑΝΩΝ ΑΝΑ 100 m)
Mmax-min @ μπάντα 1 KHz	72.715 dB +/- 5.295 dB	70.42 dB +/- 6.44 dB
Mmax-min @ ίδιες τις μπάντες συχνοτήτων	87.98 dB +/- 3.1 dB	84.435 dB +/- 9.195 dB
STI	0.59	0.601794
U50 @ μπάντα 1 KHz	- 2.8654 dB	1.353 dB
U50 @ ίδιες τις μπάντες συχνοτήτων	0.300375 dB	1.185 dB
D50 @ ίδιες τις μπάντες συχνοτήτων	52.21 %	56.79 %

Πίνακας 20: Σύγκριση ακουστικών χαρακτηριστικών των δύο καλύτερων περιπτώσεων.

6 Αναφορές

- [1] Start, E. 'Design of voice alarm systems for traffic tunnels: Optimization of speech intelligibility.' *Duran Audio* (2013): 12
- [2] Axys Tunnel by Harman, 'Public Address Solutions for Tunnels: Intelligent solutions for delivering speech intelligibility', http://www.optimusaudio.com/arxius/documents_marques/axys_tunnels/AXYS_Tunnels_brochure.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [3] Ridley P, Spearrit D 2011, *Evaluation of speech transmission in a road tunnel*, Brisbane,https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p137.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [4] NFPA International (2002), *National Fire Alarm Code*, NFPA 72, 2002
- [5] Pincus M. (2006), *A review of NFPA 72 requirements for emergency communications*, Convention Paper 6793, 120th Convention, Audio Engineering Society, May 20-23 2006.
- [6] P J Patrick 2011, *Practical Considerations for designing Road Tunnel Public address Systems*, Proceedings of ACOUSTICS, 2-4 November 11, Gold Coast, Australia
- [7] The AXYS ABF-260 brochure, www.optimusaudio.com/arxius/documents_marques/axys_tunnels/ABF260_brochure.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [8] Axys tunnel by Harman, *ABF-260/100W PA6 V0*, datasheet rev 1.0, https://3e7777c294b9bcaa5486-bc95634e606bab3d0a267a5a7901c44d.ssl.cf2.rackcdn.com/product_documents/3863_1464864829/AXYS_ABF-260_100W_PA6_V0_Data_v1p0_original.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [9] DNH, *Tunnel-500/DUP-40(T)*, TUNNEL-CATALOGUE www.dnh.no/uploads/filter/Tunnel.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [10] *Intelligibility results for 'Soundsystem Roetunnel, Netherlands (test-setup)* <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ivpXHOZgws4J:ateis.ae/download/1/1/56/Measuring%2520results%2520A73%2520Roertunnel%2520with%2520LCS70T%2520horn.doc+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=gr> (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [11] Kang J (2002), *Acoustics of long spaces*, Thomas Telford Publishing, London, 2002
- [12] Ahnert W, Schmidt W, (2006) *Appendix to Easera: Fundamentals to Perform acoustical measurements*. Berlin

- [13] Gimbott F, Roy A, (1993) – *Automatic Echo Determination in Measured Room Impulse Responses*. AES Preprint 3573 New York
- [14] Kutruff H Spon Press (2009), *Room Acoustics. Fifth edition*. London & New York
- [15] Dynacord – Press Release, *Safety in Germany's longest road tunnel assured by Dynacord Promatrix*, March 2014, <https://dynacord.com/news-details.php?id=317&country=TW> (Τελευταία πρόσβαση: 15/1/2019)
- [16] Yokohama S, Tachibana H, Sakamoto S, Okano T, 2007 *Study on the speech intelligibility of public address system in a tunnel* Inter-noise 2007 28-31 August Istanbul
- [17] Davis D, Patronis E, Brown P (2013), *Sound System Engineering, Fourth Edition*. Focal press
- [18] Bradley J S, Reich R, Norcross S G (1999), *On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility*, Journal of the Acoustical Society of America, 106, 1820-1828
- [19] Yang W S, Bradley J S (2009), *Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children*, Journal of the Acoustical Society of America, 125, 922-933
- [20] Bradley J S (1986), *Speech intelligibility studies in classrooms*, Journal of the Acoustical Society of America, 80, 846-854
- [21] IEC 60268-16 3rd edition 2003-5 Sound system equipment, objective rating of the speech intelligibility by speech transmission index
- [22] Marshall A H (1967), *A note on the importance of room cross-section in concert halls*, J. Sound. Vib. 1967;5(1):100-112
- [23] Barron M, Marshall AH (1981), *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure*, J. Sound. Vib. 1981;77(2):211-232
- [24] Pätynen J, Tervo S, Robinson PW, Lokki T 2014, *Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics*, Proc. Natl. Acad. Sci. 2014;111(12):4409-4414.
- [25] Bradley JS, Soulodre GA (1995). *Objective measures of listener envelopment*. J. Acoust. Soc. Am. 1995;98:2590-2597.
- [26] International Organization for Standardization. ISO 3382-1:2009. Acoustics – measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces.

- [27] ISO 14257 2001, Acoustics – Measurement and parametric description of spatial sound distribution curves in workrooms for evaluation of their acoustical performance, First edition, <https://www.evs.ee/preview/iso-14257-2001-en.pdf> (Τελευταία πρόσβαση: 16/1/2019)
- [28] Παπανικολάου Π (2005), *Ηλεκτρακουστική*, 2^η Έκδοση, UNIVERSITY STUDIO PRESS
- [29] Friberg R (1975), Noise reduction in industrial halls obtained by acoustical treatment of ceiling and walls, *Noise Control and Vibration Reduction* 6 75-79
- [30] West M (1973), *The sound attenuation in an open-plan office*, *Applied Acoustics* 6 35-56.
- [31] West M, Parkin P H (1975), *The effect of furniture and boundary conditions on the sound attenuation in a landscaped office: Part 1*, *Applied Acoustics* 8 43-66
- [32] West M, Parkin P H (1978), *Effect of furniture and boundary conditions on the sound attenuation in a landscaped office: Part 2 – Screens*, *Applied Acoustics* 11 171-218
- [33] Hodgson M (1996), *Sound propagation curves in industrial workrooms: statistical trends and empirical prediction models*, *Journal of Building Acoustics* 3(1) 25-32.
- [34] Keränen J, Hongisto V, Olkinuora P, Airo E 2000, *An exact method to determine the influence of noise control measures in workplaces*, Proceedings of Internoise, 27-30 August 2000, Nice, France.
- [35] Sorainen E, Kokkola H (2000), *Optimal noise control in a carpentry plant*, *Applied Acoustics* 61(1) 37-43.
- [36] ISO 3741 Acoustics 1999. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – precision methods for reverberation rooms, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [37] Rossi M (1988), *Acoustics and Electroacoustics*, Translated by Patrick Rupert Windsor Roe, ARTECH HOUSE INC
- [38] Kutruff H (1979), *Room Acoustics*, Applied Science Publishers, London
- [39] Marshall L (2006), *Architectural Acoustics*, from the Applications of Modern Acoustics Series, Elsevier Inc
- [40] Thiele R (1953), *Directional Distribution and Time Sequence of Return of Sound in Rooms*, *Acustica* vol. 3, no. 2

- [41] Sylvio R. Bistafa, Bradley J S (2000), *Reverberation time and maximum background noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*, J. Acoust. Soc. Am, vol. 107, no. 2, Melville NY
- [42] Bradley J S (1986), *Predictors of speech intelligibility in rooms*, J. Acoust. Soc. Am, 80(3), Melville NY
- [43] Barron M, Lee L J (1988), *Energy Relations in Concert Auditoria I*, J. Acoust. Soc. Am, 84, Melville NY
- [44] Bradley J S (1991), *A comparison of three classical concert halls*, J. Acoust. Soc. Am, 89, No 3, Melville NY
- [45] Beranek L Leo (1962), *Music, Acoustics & Architecture. Original Edition*, Cambridge MA
- [46] Beranek Leo (1996), *How They Sound, Concert and Opera Halls*, Acoustical Society of America, Woodbury NY
- [47] Barron M (1993), *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London: Spon Press. Routledge, reprinted 1998
- [48] Barron M (1988), *Subjective study of British symphony concert halls*, Acustica 66 1988
- [49] Ando Y (1985), *Concert Hall Acoustics*, New York, NY: Springer-Verlag, 1985
- [50] Cremer L, Muller A H (1982), *Principles and Applications of Room Acoustics, vol. 1-2*, New York, NY: Applied Science Publishers, 1982
- [51] JBL Professional (2000), *Speech intelligibility – A JBL Professional Technical Note*, Technical Notes, Vol 1, No 26. Northridge, CA: JBL Professional, Aug. 2000
- [52] Peutz V M A (1971), *Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room*, J. Audio Engineering Society 19 (11), New York, NY

