

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Πτυχιακή Εργασία:

**Χρήση περιβαλλοντικά φιλικών μεθόδων για τη
μείωση του θορύβου μεταφορών**

Του Σπουδαστή:

Τζιβελέκη Εμμανουήλ

Εποπτεύοντες Καθηγητές:

- 1) **Κωνσταντίνος Μαυρίδης**
- 2) **Ιωάννης Γιαννάκης**

Πάτρα, Ιούλιος 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η έκθεση στον θόρυβο από δρόμους και σιδηροδρόμους είναι διαδεδομένη, και το πρόβλημα αυξάνεται, πρωτίστως σαν συνέπεια της συνεχόμενης αστικοποίησης και της ανάπτυξης του τομέα μεταφορών. Ο θόρυβος της κυκλοφορίας προκαλεί ενόχληση και διαταραχές του ύπνου, καθώς επίσης παρεμβαίνει στην ξεκούραση, στην συγκέντρωση, στην επικοινωνία του λόγου και στη μάθηση. Υπάρχει επίσης μία ισχυρή, αυξανόμενη υποστήριξη για την αιτιώδη συνάφεια μεταξύ της μακροπρόθεσμης έκθεσης στο θόρυβο οδικής κυκλοφορίας και τις καρδιαγγειακές παθήσεις, συμπεριλαμβανομένης της υπέρτασης και του εμφράγματος του μυοκαρδίου.

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος μετριασμού του θορύβου είναι να μειώσουμε την εκπομπή του θορύβου στην πηγή του, για παράδειγμα, μέσω του κανονισμού, να απαιτούνται λιγότερο θορυβώδεις κινητήρες, λάστιχα ή οδοστρώματα, ή ακόμα με τον περιορισμό του όγκου της ροής κυκλοφορίας και την θέσπιση αυστηρότερων ορίων ταχύτητας. Ωστόσο η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων είναι δύσκολη για οικονομικούς και πολιτικούς λόγους καθώς επίσης και λόγω πολεοδομίας. Ως εκ τούτου, η μείωση θορύβου στην πηγή, πρέπει να συμπληρωθεί με τις μεθόδους που δρουν στο θόρυβο κατά την διαδρομή του, στο δέκτη. (Ο σκοπός αυτής της έρευνας είναι να ενθαρρύνει την εφαρμογή αυτών των νέων και φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων τέτοιου είδους).

Οι περιβαλλοντικές μέθοδοι για τη μείωση των θορύβων από τις μεταφορές, παρουσιάζονται από έρευνες με συνδυασμό φυσικών και τεχνητών μέσων.

Διάφορες στρατηγικές μείωσης που μπορούν να επιτύχουν οικονομικώς αποδοτικές βελτιώσεις χρησιμοποιώντας νέα σχέδια εμποδίων. Η φύτευση των δέντρων ή θάμνων, η επεξεργασία εδάφους και οδικής επιφάνειας, καθώς επίσης και το πρασίνισμα της οικοδόμησης των προσόψεων των κτιρίων και των στεγών τους. Οι περιοχές με βλάστηση εκτιμώνται ιδιαίτερα σε αστικό και αγροτικό περιβάλλον. Τα ευεργετικά αποτελέσματα του πρασινίσματος σημαίνει ότι το κόστος νέου πρασινίσματος ή η συντήρηση του παλαιών πρασινισμένων επιφανειών είναι συχνά εύκολο να δικαιολογηθεί ακόμα και χωρίς να ληφθεί υπόψιν το όφελος από τη μείωση του περιβαλλοντικού θορύβου. Σκοπός είναι η εύρεση καλύτερων τρόπων χρήσης των περιοχών με βλάστηση και των ανακυκλωμένων υλικών, για τη μείωση του θορύβου από το δρόμο και το σιδηρόδρομο και να βελτιώσει το αντιληπτό ηχητικό περιβάλλον. Η μείωση θορύβου αξιολογήθηκε από την άποψη των μειώσεων ηχητικών επιπέδων, αντιληπτικών αποτελεσμάτων και ανάλυση κόστους και οφέλους.

Οι καταστάσεις θορύβου κυκλοφορίας είναι συχνά σύνθετες και μόνο ένα μέτρο μετρίασης του θορύβου είναι σπανίως επαρκές. Κάποιες επιλογές που αναφέρονται πιο κάτω, κάθε μία από αυτές, βοηθούν στη μείωση του θορύβου κατά 2-3 dB (A), επομένως ένας σωστός συνδυασμός των επιλογών που έχουμε, είναι απαραίτητος για να έχουμε μεγαλύτερη επίδραση. Άλλες μεμονωμένες μειώσεις θορύβου αναμένονται να μειώσουν το θόρυβο κατά 10 dB (A) ή και περισσότερο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις εκτιμώμενες μειώσεις θορύβου, έχουν υπολογισθεί με τη χρήση προηγμένων αριθμητικών μεθόδων, αντί να μετρηθούν σε πραγματικές συνθήκες, επομένως μία μη αμελητέα αβεβαιότητα αναμένεται στην πραγματική κατάσταση. Για την ελαχιστοποίηση αυτής της αβεβαιότητας, οι μέθοδοι εκτίμησης επικυρώνονται και εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές. Επιπροσθέτως, έχει εκτιμηθεί, για επιλεγμένες περιπτώσεις, η βλάβη στην απόδοση εξ' αιτίας των μετεωρολογικών φαινομένων με την μοντελοποίηση των επιπτώσεων του αέρα και των αναταραχών.

Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται δρουν με την αξιοποίηση διαφόρων ακουστικών φαινομένων που επηρεάζουν τον ήχο κατά τη διαδρομή του από την πηγή στο δέκτη. Το κεφάλαιο 1 αναθεωρεί τις γενικές αρχές της υπαίθριας διάδοσης του θορύβου, και ειδικά τα φαινόμενα τα οποία είναι σχετικά με την αποδοτικότητα των μεθόδων μείωσης που παρουσιάζονται παρακάτω.

Η συμβατική λύση ελέγχου του θορύβου είναι να δημιουργηθούν ηχοπετάσματα και με την πάροδο των χρόνων έχουν ανακαλυφθεί πολλές πληροφορίες για το σχήμα τους. Ωστόσο, υπάρχει χώρος για καινούριες ιδέες, όπως είναι προφανές στο κεφάλαιο 2, λύσεις όπως τα χαμηλού ύψους πρασινισμένα ηχοπετάσματα και τα πρασινισμένα καλύμματα.

Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει λεπτομερείς αναλύσεις της ακουστικής απόδοσης των φυτών και του εδάφους, και απεικονίζει πως η ακουστική απορρόφηση του εδάφους (χωμάτων) μπορεί να ενισχυθεί με την επιλογή των σωστών φυτών με χαμηλή ανάπτυξη.

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει αντίστοιχα αποτελέσματα για φράκτες, δέντρα και ζώνες δέντρων, και την επίδρασή τους στη διάθλαση, αντανάκλαση και περίθλαση των ήχων.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Εμμανουήλ Τζιβελέκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται και περιβαλλοντικά φιλικοί μέθοδοι για τη μείωση του θορύβου από μεταφορές από μέσα μαζικής μεταφοράς.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μείωση θορύβου και στους δείκτες μείωσης θορύβου.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια καινοτόμα ηχοπετάσματα που χρησιμοποιούν φυσικούς τρόπους μείωσης του θορύβου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επίδραση της βλάστησης στο θόρυβο σε ένα αστικό περιβάλλον.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ακουστικά χαρακτηριστικά δέντρων, φρακτών και θάμνων με σκοπό τη μείωση του θορύβου από μέσα μαζικής μεταφοράς.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη μείωση του θορύβου κυκλοφορίας	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Αρχές της μείωσης του θορύβου	10
1.2.1 Δύναμη πηγής	10
1.2.2 Αποτελέσματα διάδοσης	17
1.2.3 Δείκτες θορύβου	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Καινοτόμα ηχοπετάσματα	28
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Αστικοί δρόμοι	30
2.2.1 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης	30
2.2.2 Προσθήκη χαμηλών ηχοπετασμάτων βλάστησης μεταξύ λωρίδων	32
2.2.3 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα κοφίνωσης	34
2.3 Δρόμοι τραμ	35
2.3.1 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματα	35
2.3.2 Χτίζοντας χαμηλά ηχητικά ηχοπετάσματα με κρυστάλλους	36
2.3.3 Προσθήκη χαμηλών ηχοπετασμάτων βλάστησης ανάμεσα στις λωρίδες	38
2.3.4 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης στις άκρες των γεφυρών	39
2.4 Αυτοκινητόδρομοι	40
2.4.1 Κάλυψη συμβατικού ηχοπετάσματος με υπόστρωμα βλάστησης	40

2.4.2 Προσθήκη μιας σειράς δέντρων πίσω από συμβατικό ηχοπέτασμα	42
2.4.3 Προσθήκη καλυμμάτων βλάστησης στις κορυφές των ηχοπετασμάτων	44
2.4.4 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματα γης κατά μήκος επιχωματωμένης υποδομής	46
2.4.5 Χτίζοντας αναχώματα σύνθετης μορφής	48
2.4.6 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης στις άκρες γεφυρών	50
2.5 Σιδηρόδρομοι	52
2.5.1 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματά κατά μήκος επιχωματωμένης υποδομής	52
2.5.2 Χτίζοντας αναχώματα συνθέτου σχήματος	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ακουστική επίδοση του χωμάτινου υποστρώματος και του υποστρώματος βλάστησης σε ένα αστικό περιβάλλον

55

3.1 Εισαγωγή	55
3.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασίες μέτρησης	57
3.3 Η επίδραση της υγρασίας στην απορρόφηση της από το χώμα	58
3.4 Μοντελοποίηση ακουστικών ιδιοτήτων των χωμάτων	62
3.5 Φυτά χαμηλής ανάπτυξης	66
3.6 Μοντελισμός των ακουστικών ιδιοτήτων των φυτών	67
3.7 Απορρόφηση του χώματος παρουσία ενός φυτού	81
3.8 Μοντελοποιώντας το συντελεστή τυχαίας πρόσπτωσης του χώματος με και χωρίς φυτά	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ακουστικά χαρακτηριστικά δέντρων, φρακτών και θάμνων

90

4.1 Εισαγωγή	90
4.2 Απορρόφηση των φύλλων	91
4.2.1 Μετρώντας την απορρόφηση των φύλλων	92
4.2.2 Μετρώντας τις δονήσεις των φύλλων	94
4.3 Αντανάκλαση και περίθλαση από τη βλάστηση	96
4.4 Διασκορπισμός λόγω βλάστησης	97
4.4.1 Μετρώντας το διασκορπισμό από ένα σωρό από φύλλα στο εργαστήριο	98

4.4.2 Διασκορπισμός από ένα δέντρο	99
4.4.3 Οπτικοποίηση διασκορπισμού στα πολλαπλά στρώματα σε μια ζώνη βλάστησης	102

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Μείωση του θορύβου κυκλοφορίας

Δεδομένου ότι ο θόρυβος από την επίγεια μεταφορά (δρόμους και σιδηρόδρομους) επηρεάζει δυσμενώς την υγεία και την ευημερία, το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τις κύριες πηγές τέτοιων θορύβων, τις γενικές αρχές της υπαίθριας μετάδοσης του ήχου, τα βασικά της μείωσής του και το σύνδεσμο μεταξύ των δεικτών του θορύβου και της αντίληψης. Για να γεφυρώσουμε το κενό μεταξύ των υπαρχόντων επιπέδων έκθεσης του θορύβου και τις τρέχουσες κατευθυντήριες τιμές, οι οποίες υποστηρίζονται από έρευνα για την υγεία, προτείνεται η χρήση πολλών μέτρων, θεωρώντας ότι η μείωση του θορύβου θα γίνει και στην πηγή αλλά και κατά τη διάδοσή του. Ένα μείγμα κλασσικών και νέων μηχανικών προσεγγίσεων ελέγχου του ήχου, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης του χώρου όπου θα κινηθεί, που ενσωματώνει μακροπρόθεσμες προοπτικές μεγάλης κλίμακας σε αστικούς και αγροτικούς σχεδιασμούς, απαιτείται για να επιτραπούν τα οικονομικώς αποδοτικά μέτρα μείωσης. Η δύναμη της πηγής (εξατμίσεις) και η μείωσή τους παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, εστιάζοντας στον κυρίαρχο θόρυβο της οδικής κυκλοφορίας. Σε αυτό το μοντέλο, φαίνονται οι φασματικές ιδιότητες των πηγών έντασης, καθώς επίσης και η εξάρτηση από την ταχύτητα οδήγησης.

1.1 Εισαγωγή

Επαρκείς στοιχεία από μεγάλες επιδημιολογικές μελέτες υποδεικνύουν ο περιβαλλοντολογικός θόρυβος επηρεάζει την ανθρώπινη υγεία και ευημερία. Τα κοινωνικά τιμήματα του κυκλοφοριακού θορύβου είναι αρκετά σημαντικά. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) (Π.Ο.Υ.) έχει εκτιμήσει ότι το βάρος των ασθενειών που σχετίζονται με την κυκλοφορία στην ενωμένη Ευρώπη ως απώλεια 1.6 εκατομμύρια αναπροσαρμοσμένων χρόνων ζωής λόγω αναπηρίας, κάθε χρόνο. Τα πιο διαδεδομένα επιβλαβή αποτελέσματα του θορύβου της κυκλοφορίας είναι η διατάραξη του ύπνου και η ενόχληση, και που τα δύο μαζί φτάνουν το 92% (56% και 36% αντιστοίχως) της απώλειας του ύπνου. Η κύρια πηγή του θορύβου είναι η οδική κυκλοφορία, όπου υποβάλλει το 54% του ευρωπαϊκού πληθυσμού που ζει σε μεγάλες αστικές περιοχές, σε ημερήσια έκθεση στο θόρυβο άνω των 55 dB έξω από τις οικίες του. Για το θόρυβο των σιδηροδρομικών και εναέριων κυκλοφοριών, τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 8% και 4%. Ενώ το 54% του ευρωπαϊκού πληθυσμού εκτίθεται σε 55 dB κυκλοφοριακού θορύβου έξω από τις οικίες του, 14% του ευρωπαϊκού πληθυσμού εκτίθεται σε 55-59 dB και 20% σε 60-65 dB θορύβου. Για αυτό το λόγο, για τον

ευρωπαϊκό πληθυσμό που κατοικεί σε μεγάλες αστικές περιοχές, η φυσιολογική έκθεση στο θόρυβο χαρακτηρίζεται, κατά προσέγγιση, από L_{den} αριθμούς της τάξης των 60 dB, ωστόσο η έκθεση σε θόρυβο άνω των 65 dB δεν είναι ασυνήθιστη. Ακριβολογώντας, η έκθεση στο θόρυβο της τάξεως των 65-70 dB είναι συνήθης για τις περισσότερες προσόψεις κοντά σε δρόμους σε αστικές περιοχές. Σύμφωνα με τις οδηγίες του Π.Ο.Υ., οι τιμές για το θόρυβο στις κοινότητες αναφέρουν ότι τα επίπεδα εξωτερικού θορύβου κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύκτας δε θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 50 dB ήπια ενόχληση ενώ οι οδηγίες για πολλές χώρες της Ε.Ε. επιτρέπουν τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας της τάξης των 55 dB κατά προσέγγιση. Είναι σύνηθες να υπάρχει ένα χάσμα της τάξης των 10 dB περίπου ανάμεσα στα πραγματικά επίπεδα εκπομπής θορύβου και στα επίπεδα που αναφέρει ο Π.Ο.Υ. περισσότερα από 65 dB, κατά προσέγγιση

Στο σχεδιασμό νέων υποδομών και κατοικιών είναι δύσκολο να γεφυρώσεις το χάσμα ανάμεσα στην πραγματική έκθεση στους ήχους και στις τιμές που αναφέρονται στις τιμές του Π.Ο.Υ. Η πολιτική αξιοπιστία διακυβεύεται. Η απαίτηση της εφαρμογής των οδηγιών για νέες κατοικίες ή υποδομές για λόγους υγείας είναι προβληματική όταν έχουμε περιορισμένες στο να απαλύνουμε τις υπάρχουσες συνθήκες θορύβου σήμερα. Περαιτέρω υπάρχει ακόμα ένα χάσμα που ανέρχεται στα τουλάχιστον 5 dB ανάμεσα στα επίσημα επίπεδα και εκείνα που διέπουν ένα καλό περιβάλλον.

Η επίτευξη επαρκούς βελτίωσης συνεπάγεται τη χρήση όλων των διαθέσιμων εργαλείων. Θα πρέπει να είμαστε έτοιμοι να συνδυάσουμε κλασσικές και νέες μηχανικές μεθόδους ελέγχου του ήχου και να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα της ηχοληψίας. Η μείωση του θορύβου από τα Ι.Χ. είναι δύσκολη και χρονοβόρα για μηχανικούς και πολιτικούς λόγους, για αυτό τα προβλήματα του θορύβου πρέπει να αντιμετωπιστούν από μέτρα και από την πλευρά των εισροών αλλά και των εκπομπών. Επιπροσθέτως, η μακροπρόθεσμη και η μεγάλης κλίμακας προοπτική στις αστικές και αγροτικές περιοχές πρέπει να βελτιωθούν, έτσι ώστε να αποφευχθεί να βλάψουμε το περιβάλλον του ήχου και να εφαρμόσουμε αποδοτικές μεθόδους μείωσης του θορύβου. Ο σχεδιασμός του ακουστικού περιβάλλοντος θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην διαδικασία σχεδιασμού όσο πιο νωρίς γίνεται και θα πρέπει πάντα να είναι ενεργός. Δηλαδή, μέτρα που είναι ευνοϊκά σε ένα καλό ακουστικό περιβάλλον θα πρέπει να εφαρμοστούν αν και μπορεί να μην υπάρχει πρόβλημα θορύβου ακόμα.

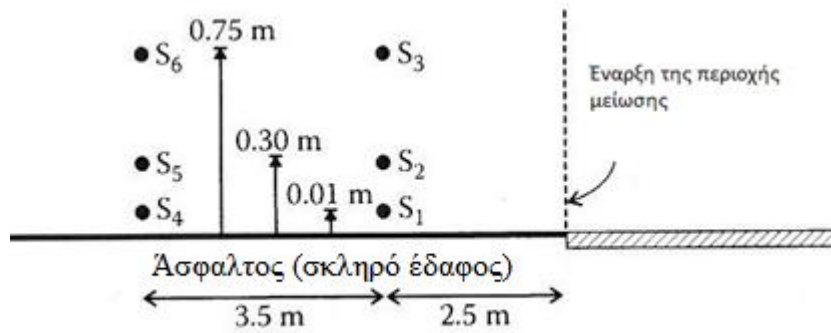
1.2 ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Το επίπεδο του θορύβου που φτάνει σε έναν παραλήπτη καθορίζεται από δύο κύριους παράγοντες: η δύναμη της πηγής και το μονοπάτι της διάδοσης. Για τη μείωση του θορύβου από σιδηροδρόμους και δρόμους, θα πρέπει να απευθυνθούμε και στους δύο παράγοντες δηλαδή και στην πλευρά της εκπομπής και της εισροής.

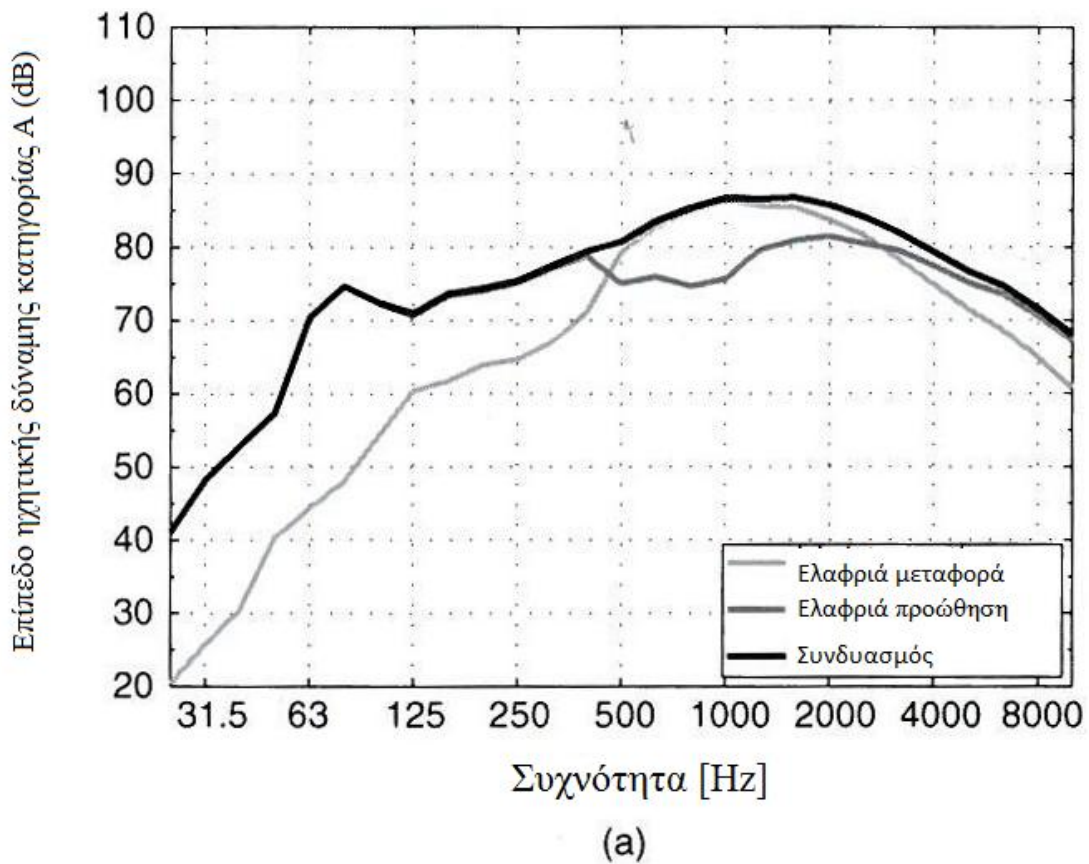
1.2.1 Δύναμη πηγής

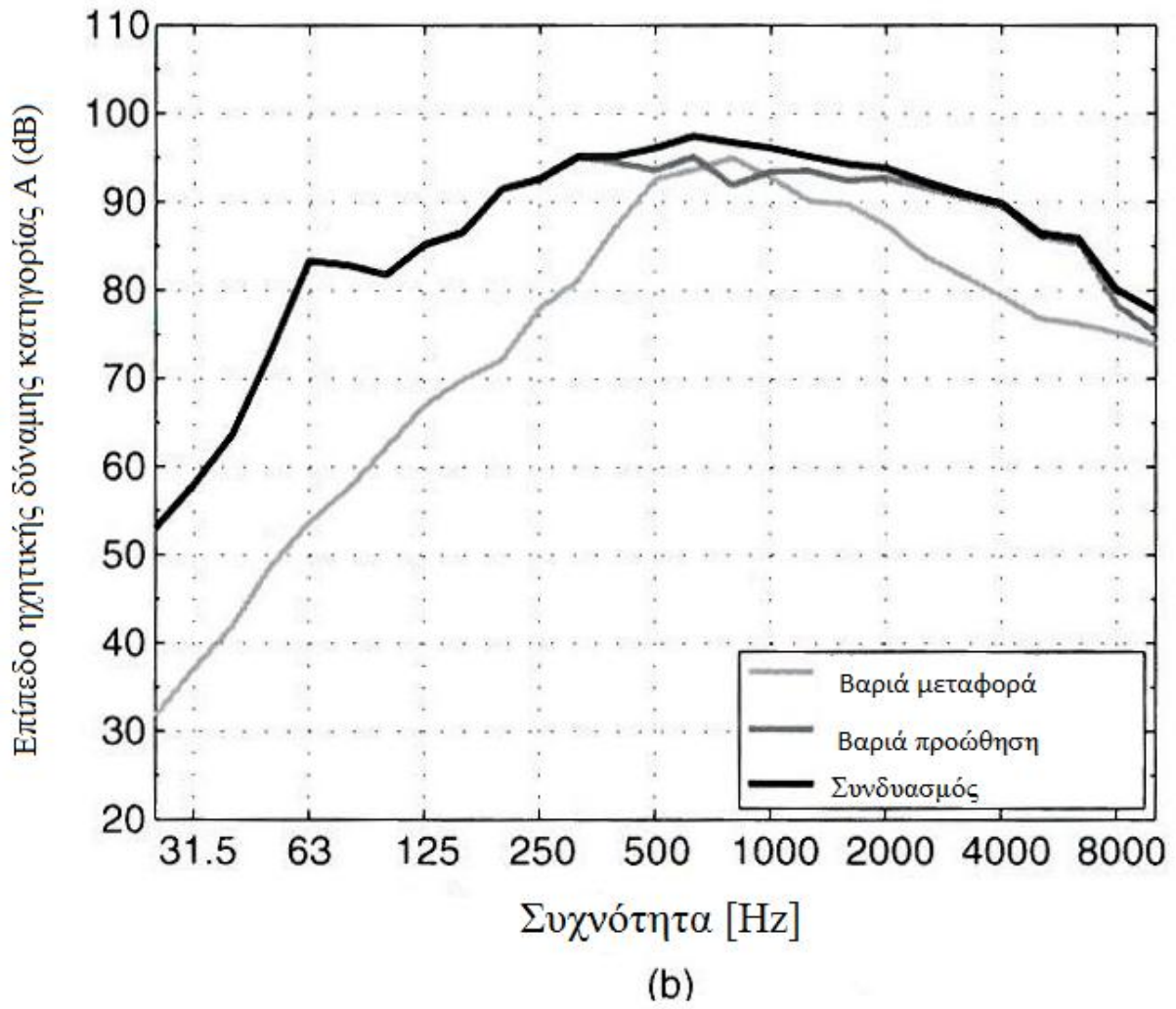
Αρχικά, πρέπει να μειώσουμε την εκπομπή του θορύβου όσο είναι εφικτό. Για τα οχήματα του δρόμου, η πηγές θορύβου είναι δύο ειδών : 1) η (πηγή μεταφοράς), που προέρχεται από την επαφή του δρόμου με το ελαστικό και 2) η πηγή προώθησης, που προέρχεται από την μηχανή και τον τρόπο μετάδοση της κίνησης, και για μηχανές εσωτερικής καύσης, επίσης από σύστημα εξάτμισης, εισαγωγή αέρα, ανεμιστήρες, γεννήτριες και άλλα βοηθητικά συστήματα. Υπάρχουν και οι πηγές θορύβου που οφείλονται στην αεροδυναμική, οι οποίες γίνονται κυρίαρχες σε μεγάλες ταχύτητες οδήγησης. Οι εκπομπές θορύβου των οχημάτων του δρόμου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα για το οποίο είναι υπεύθυνοι τρεις παράγοντες : η κατασκευαστική εταιρεία του δρόμου, η εταιρεία παραγωγής ελαστικών και οι ιδιοκτήτες του δρόμου. Η προώθηση του θορύβου είναι κυρίως συνδεδεμένη με την αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ για το θόρυβο μεταφοράς είναι υπεύθυνοι και οι τρεις παράγοντες.

Σαν αποτέλεσμα των Ευρωπαϊκών σχεδίων HARMONOISE (μία εναρμονισμένη Ευρωπαϊκή μέθοδος για την αξιολόγηση του περιβαλλοντολογικού θορύβου) και IMAGINE (βελτιωμένες μέθοδοι για την αξιολόγηση των γενικών αντίκτυπων του θορύβου στο περιβάλλον), έχουν αναπτυχθεί ορισμένα μοντέλα πηγών για τα οχήματα του δρόμου. Το πρωτότυπο μοντέλο HARMONOISE, περιγράφει ένα μέσο όχημα κάθε τύπου, σε κατάσταση οδήγησης, σε σχέση με το οδόστρωμα. Το σχήμα 1.1 δείχνει τη γεωμετρία των πηγών και υποδεικνύει το πόσο κοντά στις συσκευές μείωσης του θορύβου του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένων και των επίγειων επεξεργασιών, μπορούν να τοποθετηθούν. Στην προεπιλεγμένη αστική υπόθεση, υποθέτουμε ότι το 95% των οχημάτων είναι ελαφριά και το υπόλοιπο 5% είναι φορτηγά.

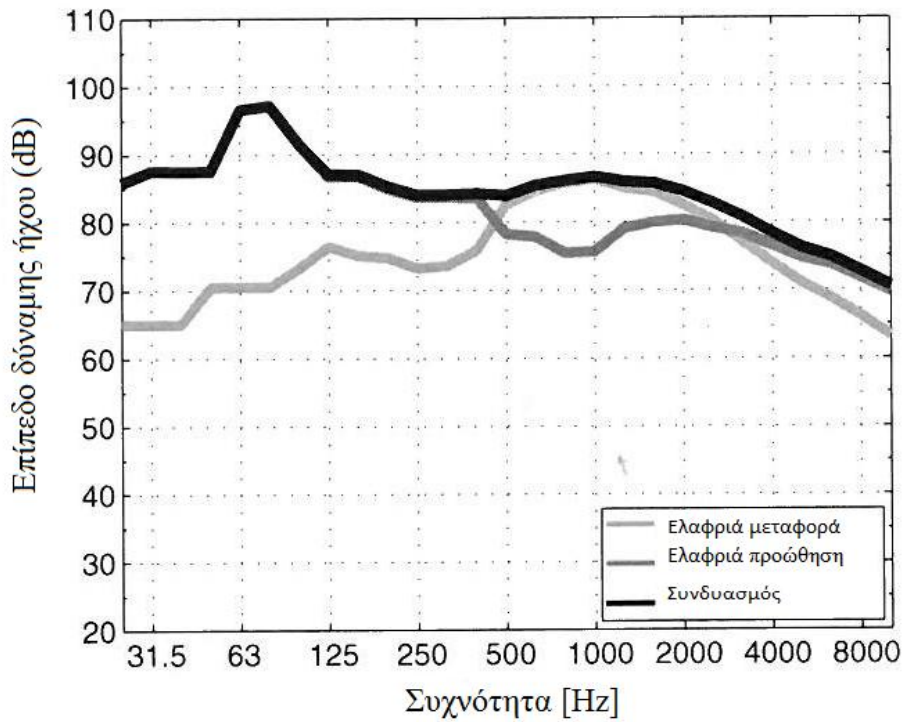


Εικόνα 1.1 : Θέσεις πηγών S1-S6 και η πλησιέστερη θέση των εργασιών απόσβεσης του θορύβου. Οι πηγές S1 και S4 είναι μεταφορές ενώ οι άλλες είναι προώθησης, οι χαμηλές, S2 και S5 είναι για ελαφριά οχήματα ενώ οι, οι υψηλές, S3 και S6 για βαριά.

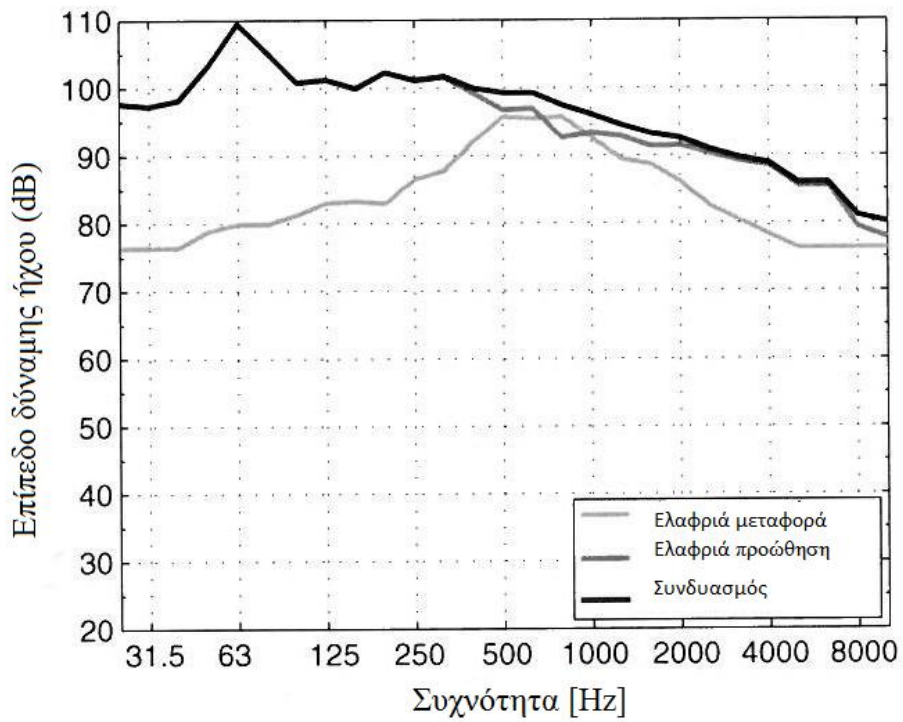




Εικόνα 1.2 : Φάσματα των πηγών θορύβου για ελαφριά (a) και βαριά (b) οχήματα.



(c)



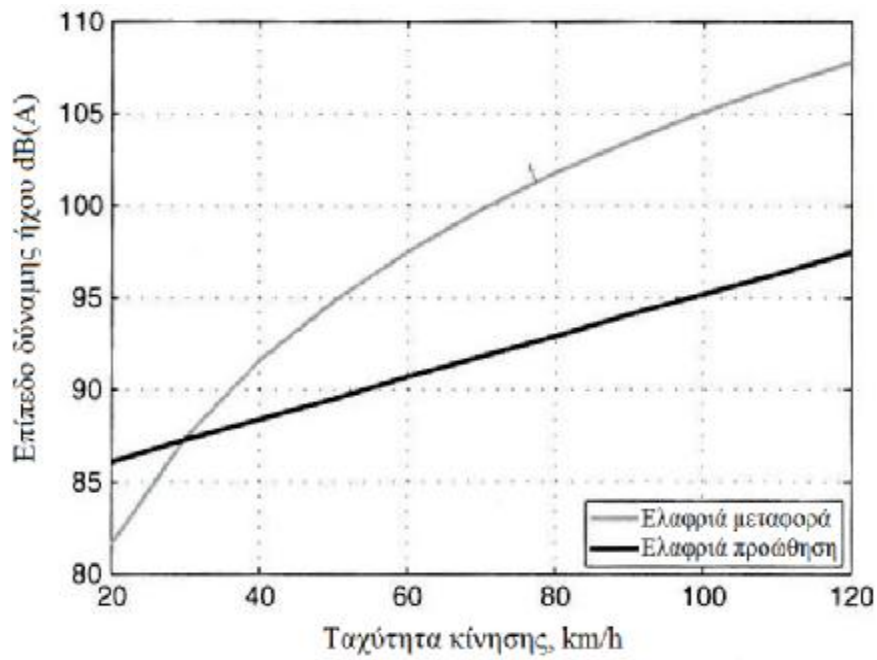
(d)

Εικόνα 1.2 (Συνέχεια) : Φάσματα των πηγών θορύβου για ελαφριά οχήματα (c) και αστάθμιστα (d) επίπεδα ταχύτητας κίνησης 50 km/h.

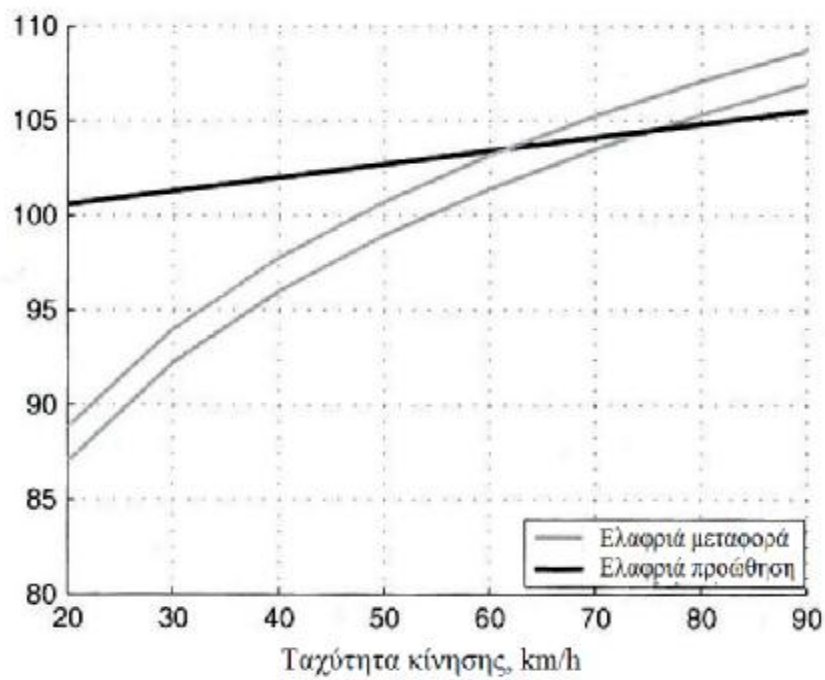
Η ταχύτητα του οχήματος είναι 50χμ/ώρα και η ροή είναι 20.000 οχήματα ανά 24 ώρες. Τα προεπιλεγμένα ύψη για τους δέκτες που χρησιμοποιούνται είναι 1.5 και 4 μέτρα.

Το σχήμα 1.2 (a)-(d) δείχνει τα φάσματα δύναμης που χρησιμοποιούνται για τις πηγές μεταφοράς και προώθησης στα 50 χλμ/ώρα ταχύτητα οδήγησης, και σαν βάρος αλλά και σαν γραμμικό επίπεδο. Ο μέγιστος θόρυβος προώθησης λαμβάνεται σε χαμηλότερες συχνότητες, εδώ στα 80 Hz, που συσχετίζεται με την ταχύτητα του κινητήρα, ή με το ποσοστό ανάφλεξης. Η επικράτηση του θορύβου προώθησης σε χαμηλές συχνότητες, είναι επίμονη μέχρι και στα 400 Hz για ελαφριά οχήματα, ενώ η αντίστοιχη επικράτηση για βαριά οχήματα είναι καθ' όλο το φάσμα των συχνοτήτων εκτός από περίπου τα 800 Hz όπου η μεταφορά είναι το ίδιο δυνατή. Λαμβάνοντας υπόψιν τους μονούς αριθμούς dB (A) στα 50 χλμ/ώρα, ο θόρυβος από τη μεταφορά επικρατεί για τα ελαφριά οχήματα και ο θόρυβος προώθησης επικρατεί στα βαριά οχήματα.

Για τις δυνάμεις των διαφορετικών πηγών θορύβου σαν λειτουργία της ταχύτητας οδήγησης, ένα πιο πρόσφατο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε, το οποίο διατυπώθηκε στην κοινή ερευνητική ευρωπαϊκή πρωτοβουλία CNOSSOS-EU. Το σχήμα 1.3(a) (b) δείχνει τους μονούς αριθμούς dB(A) συναρτήσει της ταχύτητας οδήγησης. Για τα ελαφριά οχήματα, ο θόρυβος της μεταφοράς φαίνεται να κυριαρχεί πάνω από τα 30 χλμ/ώρα, ενώ για τα βαριά η μετάβαση εμφανίζεται στα περίπου 70 χλμ/ώρα εξαρτώμενη από τον υποτιθέμενο αριθμό αξόνων των τροχών (τα γραφήματα στο σχήμα 1.3 είναι για τέσσερις και έξι άξονες). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός είναι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για την κατάσταση αναφοράς. Για παράδειγμα, τα οχήματα που αυξάνουν την ταχύτητα τους ή η οδήγηση σε ανηφόρα, οδηγεί σε αυξημένο θόρυβο προώθησης, ενώ η χρήση δρόμου με μικρότερα κομμάτια πέτρας ή πορώδεις επιφάνειες οδηγούν σε μειωμένο θόρυβο μεταφοράς. Επιπλέον, η οδήγηση του καθενός και το όχημα, οδηγούν σε ξεχωριστά αποτελέσματα. Λόγω των φασματικών και χρονικών χαρακτηριστικών, ο θόρυβος προώθησης μπορεί να γίνει αντιληπτός ακόμα και όταν ο θόρυβος έλξης κυριαρχεί στα σταθμισμένα επίπεδα της κατηγορίας οχημάτων.



(a)



(b)

Εικόνα 1.3 : Η εξάρτηση της ταχύτητας από πηγές μεταφοράς και προώθησης για ελαφριά (a) και για βαριά (b) οχήματα. Για το θόρυβο προώθησης των βαρειών οχημάτων, οι δύο καμπύλες που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε τέσσερις και έξι άξονες με λάστιχα.

Η επίδραση πολλών μεθόδων μείωσης ήχου, συμπεριλαμβανομένης και της μόνωσης προσώπων, είναι κανονικά καλύτερη στις υψηλές παρά στις χαμηλές συχνότητες (i.e. ένα αυξημένο ποσοστό των πηγών θορύβων προώθησης.)

Οι πιθανές μέθοδοι της μείωσης των εκπομπών θορύβου από πηγές προώθησης (propulsion sources) περιλαμβάνουν:

- Βελτιωμένο προστατευτικό κάλυμμα για κινητήρα και για μετάδοση δύναμης
- Βελτιωμένο σφράγισμα του χώρου του κινητήρα
- Βελτιωμένοι σιγαστήρες ήχου για την μείωση του θορύβου και την εισαγωγή αέρα και συστημάτων εξάτμισης

Οι μέθοδοι μείωσης του θορύβου που προέρχονται από τα ελαστικά αυτοκινήτου περιλαμβάνουν την ανάπτυξη λιγότερων θορυβωδών ελαστικών για μικρότερες μέγιστες ταχύτητες (150χλμ/ώρα) σε μια συνδυασμένη προσπάθεια, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής αντίστασης κύλισης, που θα μείωνε την κατανάλωση του καυσίμου.

Για την μείωση του θορύβου μεταφοράς (τριβής) που προέρχεται από τους δρόμους, τα μέτρα περιλαμβάνουν τον έλεγχο της ποιότητας των νέων επιφανειών, την παρακολούθηση των επιφανειών του οδοστρώματος, βελτιστοποίηση της υφής του οδοστρώματος, χρησιμοποιώντας μικρότερες πέτρες (κυρίως σχετικές στις Σκανδιναβικές χώρες) , και χρησιμοποιώντας ανοιχτή πορώδης άσφαλτο.

Για τους σιδηροδρόμους, τα μέτρα μείωσης της προώθησης θορύβου συμπεριλαμβάνουν τη μείωση του θορύβου από τις μηχανές και τους ανεμιστήρες καθώς και από τον αεροδυναμικό θόρυβο. (Συγκεκριμένα για τρένα σε μεγαλύτερες ταχύτητες). Τα πιθανά μέτρα για την μείωση του θορύβου προώθησης που προέρχονται από τροχούς και σιδηροδρομικές ράγες, περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση των φρένων για να μην παραμορφώνουν τους τροχούς και κάνουν θόρυβο (συγκεκριμένα στην περίπτωση της εμπορικής αμαξοστοιχίας), την παρακολούθηση και την συντήρηση της ποιότητας των σιδηροδρομικών ραγών, των ραγών μείωσης ήχου, εξασφαλίζοντας καλά θεμέλια για τις ράγες, και την παρεμπόδιση του σφυρίγματος με την χρήση μιας αρκετά ευρείας κυρτότητας της πορείας των ραγών καθώς και επαρκή τριβή. (με τη χρήση τροποποιητών τριβής), συγκεκριμένα για μετρό και τραμ. Οι πολιτικά καθορισμένες οριακές τιμές και οι μέθοδοι δοκιμών θα μπορούσαν να οδηγήσουν την ανάπτυξη λιγότερο θορυβωδών οχημάτων. Επιπλέον τα πολιτικά μέσα μπορούν να

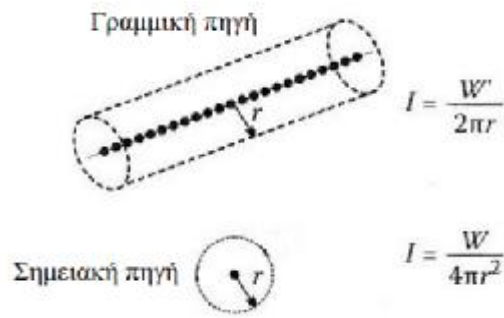
επηρεάσουν την αγορά, για παράδειγμα, με το να ενθαρρύνουν την χρήση λιγότερο θορυβωδών οχημάτων και ελαστικών. Επιπλέον, η αγορά των οχημάτων (Ι.Χ., λεωφορεία, φορτηγά, τραμ) από δημοτικές και εθνικές κυβερνήσεις, θα μπορούσε να καθοδηγείται εντονότερα από τις οριακές τιμές εκπομπής θορύβου.

1.2.2 Αποτελέσματα διάδοσης

Καθώς ο ήχος διαδίδεται προς τα έξω από μία πηγή, οι παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο του ήχου στο δέκτη, σχετίζονται με την απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη, τις ιδιότητες του μέσου (αέρα) στον οποίο ο ήχος διαδίδεται και στις ιδιότητες του ορίου, αυτά είναι το υλικό εδάφους και το προφίλ, συμπεριλαμβανομένων των ηχοπετασμάτων και άλλων εμποδίων.

A) Απόσταση

Στον ελεύθερο χώρο, ο ήχος από μια σημειακή πηγή, εξαπλώνεται σφαιρικά και μειώνεται 6 dB σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης του από την πηγή ενώ ο ήχος από μια γραμμική πηγή εξαπλώνεται κυλινδρικά και μειώνεται 3 dB σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης του. Οι προβλέψεις του μέγιστου επιπέδου θορύβου της οδικής κυκλοφορίας, είναι βασισμένα σε ένα μόνο όχημα ως πηγή θορύβου, ενώ για το μέσο όρο ή ισοδύναμο επίπεδο ήχου (αυτά είναι, L_{den} και L_{Aeq} , 24 ώρες, στα οποία χρησιμοποιείται η μέση ενέργεια ανά το χρόνο) θεωρούμε πως η πηγή είναι όλο το μήκος του δρόμου. Για αυτό το λόγο το μέγιστο επίπεδο θορύβου μειώνεται κατά 6dB με κάθε διπλασιασμό της απόστασης του από τον δρόμο, ενώ το ισοδύναμο επίπεδο μειώνεται κατά 3dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης, θεωρώντας έναν μακρύ ίσιο δρόμο και μία αμελητέα επιρροή από το έδαφος, τον αέρα και άλλους περιβαλλοντολογικούς παράγοντες (βλ. σχήμα 1). Μια παρόμοια αρχή ισχύει και για τον σιδηροδρομικό θόρυβο, ωστόσο πολλαπλές πηγές κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής μπορούν να συμβάλλουν ταυτόχρονα στο μέγιστο επίπεδο. Γενικά, όταν κάνουμε χαρτογραφημένους, υπολογισμούς, ολόκληρο το δίκτυο της κυκλοφορίας πρέπει να θεωρείται μαζί με τις υπάρχουσες συνθήκες διάδοσης.

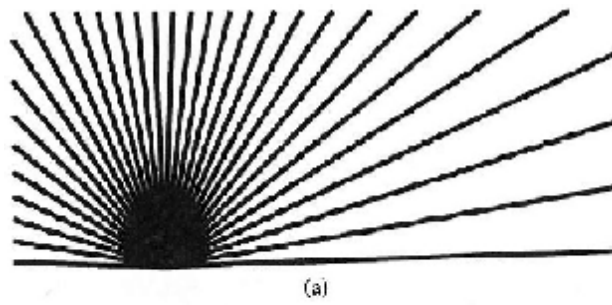


Εικόνα 1.4 : Για μια γραμμική πηγή, η ένταση του ήχου, στην ακτινική κατεύθυνση, I , φθίνει αντιστρόφως ανάλογα της ακτινικής απόστασης, r , ενώ για μια σημειακή πηγή, η ένταση φθίνει αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της ακτινικής απόστασης. Επειδή η στάθμη του ήχου μεταβάλλεται ως $10 \log_{10} (I)$, οι δύο περιπτώσεις αντιστοιχούν σε μείωση της τάξης των 3 και 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης, αντίστοιχα. Η δύναμη της πηγής δίνεται ως η δύναμη ανά μονάδα μήκους, W' (σε Watt ανά meters), για τη γραμμική πηγή και σαν δύναμη W (σε Watt), για τη σημειακή πηγή.

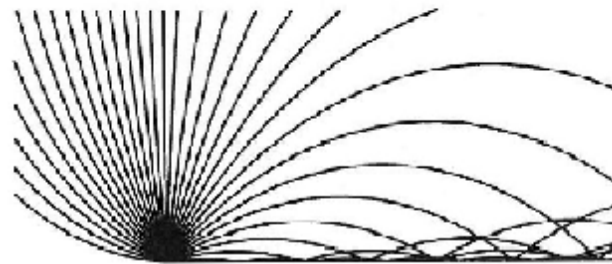
B) Μέσο

Οι ακουστικές ιδιότητες του μέσου αέρα διάδοσης θορύβου αφορούν τις μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η ταχύτητα του αέρα και η θερμοκρασία. Τα μεγαλύτερα αποτελέσματα τέτοιων παραγόντων εμφανίζονται όταν οδηγηθούν στην διάθλαση, αυτό είναι, η καμπύλη στην πορεία που ακολουθεί ο ήχος. Ο βαθμός διάθλασης καθορίζεται από το σχεδιάγραμμα της ταχύτητας του αέρα και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε σχέση με το υψόμετρο, και το αποτέλεσμα συνήθως αυξάνεται με την απόσταση διάδοσης. Σαν αποτέλεσμα της καμπής προς τα κάτω, που μπορεί να προκύψει στην περίπτωση υπήνεμης διάδοσης του ήχου (δηλ. ο άνεμος φυσάει από την κατεύθυνση της πηγής του ήχου και προς το δέκτη) ή της θερμοκρασιακής αναστροφής (η θερμοκρασία αυξάνεται με το υψόμετρο, τα επίπεδα θορύβου μπορεί να αυξηθούν ουσιαστικά. Αντιθέτως, η καμπύλη προς τα πάνω, για παράδειγμα, κάτω από συνθήκες αντιθέτου ανέμου, μπορεί να μειώσουν κατά πολύ τα επίπεδα σε σχέση με τις περιπτώσεις χωρίς τέτοια διάθλαση. Το σχήμα 1.5 (a) - (d) δείχνει την καμπυλότητα των διαδρομών των ακτινών που προέρχονται από μια σημειακή πηγή κάτω από 4 διαφορετικού τύπου διαθλαστικές περιπτώσεις: καθόλου διάθλαση, αέρας, με αρνητική κλίση θερμοκρασίας και αυξανόμενη θερμοκρασία. Αυτές οι γραφικές

παραστάσεις υποθέτουν μια γραμμικώς μεταβλητή ταχύτητα ήχου με το ύψος (σταθερή κλίση), που αναγκάζουν τις ακτίνες να είναι τόξα κύκλων. Αν και το κυκλικό μοντέλο τοξοειδών ακτινών είναι κατά προσέγγιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τα πιο σχετικά βασικά φαινόμενα. Χωρίς διάθλαση (Σχήμα 1.5(a)), η πυκνότητα των ακτινών είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης και η μειωνόμενη πυκνότητα σε ακτινική απόσταση από την πηγή αντιστοιχεί στην φθορά με την απόσταση. Με την διάθλαση προς τα πάνω, (Αριστερή μεριά του Σχήματος 1.5 (b) και οι δύο πλευρές του 1.5 (c)), μία σκοτεινή περιοχή δημιουργείται στην οποία δεν εισέρχονται καθόλου ακτίνες ήχου, ωστόσο με την διάθλαση προς τα κάτω, ο ήχος εστιάζει κατά μήκος των δρόμων, όπου συμβαίνουν πολλαπλές αντανακλάσεις στην επιφάνεια του εδάφους σε μεγαλύτερες αποστάσεις (δεξιά μεριά του Σχήματος 1.5(b) και οι δύο του 1.5(d)) θα πρέπει να σημειωθεί ότι και τα δύο αυτά αποτελέσματα είναι μόνο μοντελοποιημένα κατά προσέγγιση χρησιμοποιώντας την θεωρία των ακτινών. Η θεωρία των ακτινών στηρίζεται σε προσέγγιση υψηλής συχνότητας, σύμφωνα με την οποία τα αποτελέσματα του μέσου και του οριακού σε κάποια απόσταση μακριά από κάθε ακτίνα δεν λαμβάνονται υπόψη, αλλά μπορούν να αντιμετωπιστούν σε ένα εκτεταμένο μοντέλο. Για παράδειγμα, μια τμηματική αντίσταση αλλαγής εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας το σχέδιο της ζώνης Fresnel και το μη μηδενικό ηχητικό πεδίο σε μια σκιά διάθλασης μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια περίθλαση με την προσθήκη μιας συνεισφοράς από το διασκορπισμό της διαταραχής. Μια καλύτερη μοντελοποίηση ταχύτητας του ανέμου είναι ένα λογαριθμικό προφίλ. Το αποτέλεσμα στο ηχητικό πεδίο ενός λογαριθμικού προφίλ ανέμου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6 για (a) καθόλου διάθλαση, (b) διάδοση αντίθετα στην κατεύθυνση του ανέμου και (c) διάδοση ήχου κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Είναι φανερό πως η προς τα πάνω διάθλαση, κάτω από προσήνεμες (κατά της φοράς του ανέμου) συνθήκες (b), οδηγεί

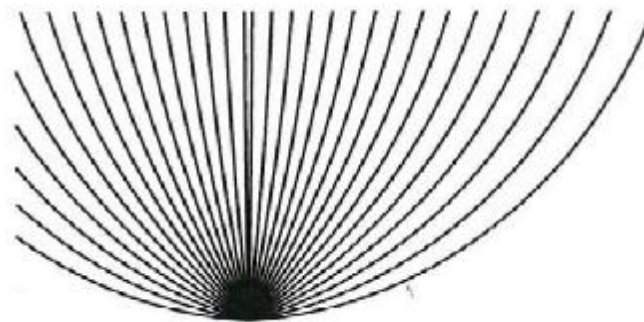


(a)

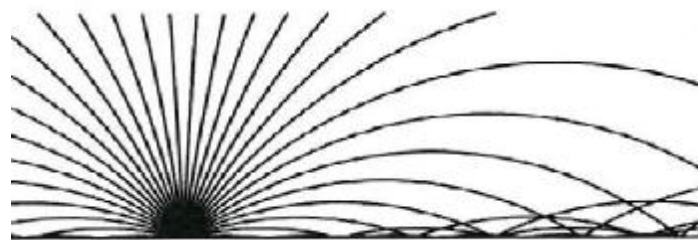


(b)

Εικόνα 1.5 : Οι ακτίνες για (a) ομογενή ατμόσφαιρα, (b) ο άνεμος φυσάει από τα αριστερά προς τα δεξιά.



(c)

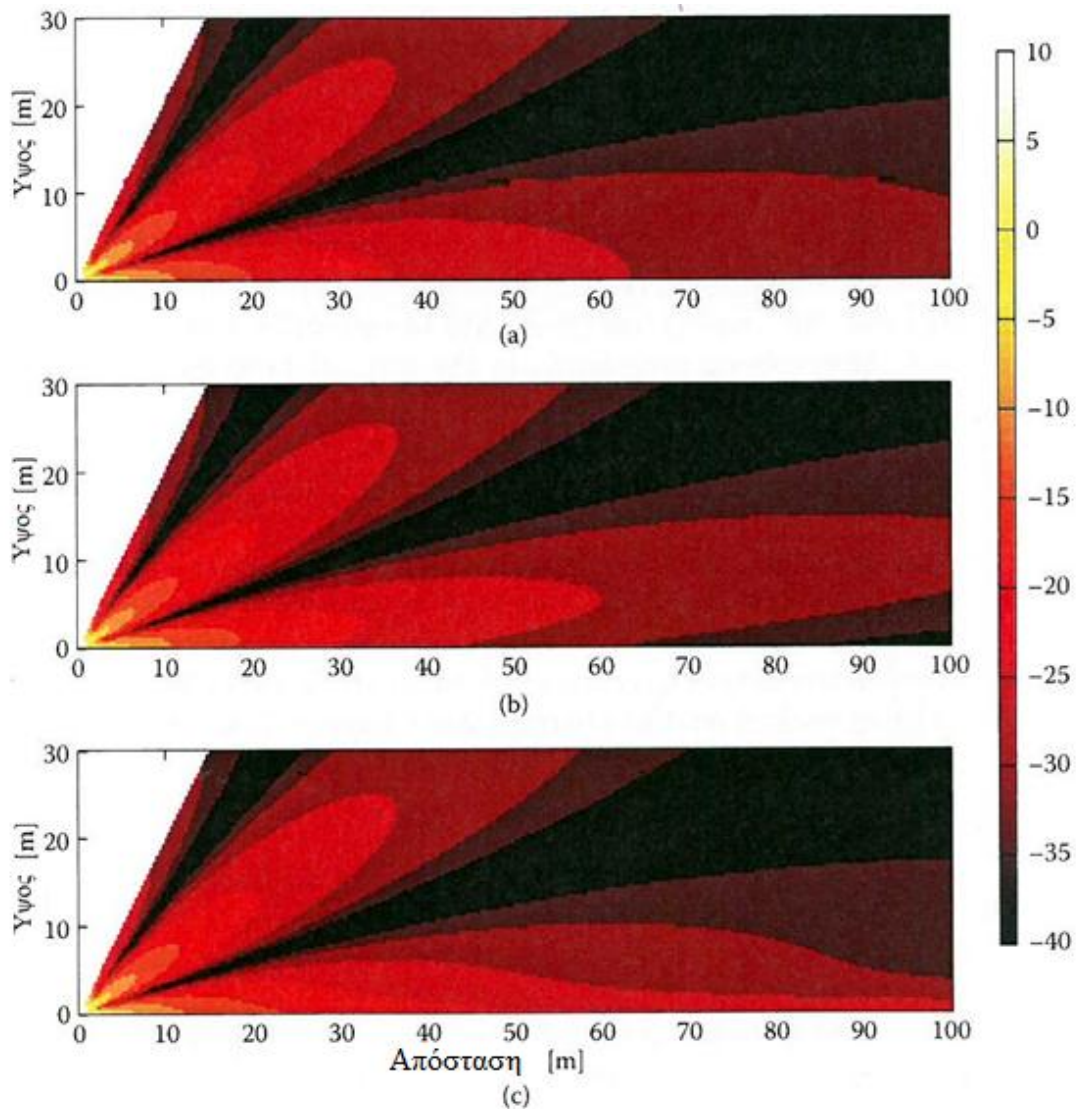


(d)

Εικόνα 1.5: Ακτίνες για (c) διάθλαση προς τα πάνω, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας με το υψόμετρο, και (b) διάθλαση προς τα κάτω, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας με το υψόμετρο.

στο σχηματισμό μιας σκοτεινής περιοχής κοντά στο έδαφος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η διάθλαση προς τα κάτω, κάτω από υπήνεμες συνθήκες (c), φαίνεται να προκαλούν ένα αυξημένο επίπεδο θορύβου κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους.

Στο μοντέλο μηχανικής πρόβλεψης, που είναι αποτέλεσμα των έργων HARMONOISE και IMAGINE,



Εικόνα 1.6 : Το υπολογισμένο ηχητικό πεδίο με τη χρήση της μεθόδου παραβολικής εξίσωσης σε μία μόνο συχνότητα των 500 Hz (a) μία ομογενή ατμόσφαιρα, (b) αρνητική κλίση και (c) θετική κλίση. Οι υπολογισμοί θεωρώντας σκληρό έδαφος και μια σημειακή πηγή στο ύψος του 1.5 m. Το χρώμα αντιστοιχεί στο επίπεδο ήχου που σχετίζεται με το επίπεδο ελεύθερου θορύβου 1 m από την πηγή του ήχου.

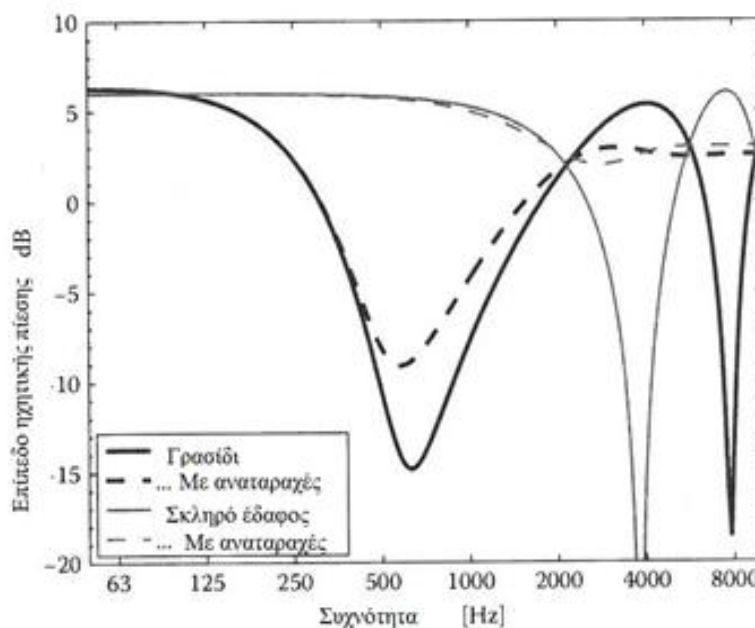
χρησιμοποιούνται συνδυασμοί γραμμικών και λογαριθμικών προφίλ ταχυτήτων για τη μοντελοποίηση διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών, χωρισμένες σε πέντε κατηγορίες ταχύτητας ανέμου και πέντε κατηγορίες σταθερότητας (καθορίζεται από την κάλυψη των σύννεφων και την ώρα της ημέρας). Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα πως η διάθλαση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το θόρυβο οδικής κυκλοφορίας ακόμα και σε μέτριες αποστάσεις διάδοσης. Σε μία απόσταση 40 m από τον αυτοκινητόδρομο, το προβλεπόμενο αποτέλεσμα είναι αμελητέο, ενώ σε μία απόσταση των 160 m, το επίπεδο του ήχου της κατηγορίας βάρους A είχε προβλεφθεί να αυξηθεί κατά περίπου 2-3 dB (A). Οι συνθήκες ήταν υπήνεμες, ενώ όταν ήταν προσήνεμες, παρατηρείται μείωση μέχρι 9 dB (A), για κατηγορία ταχύτητας του ανέμου 3 (3-6 m/s άνεμος σε ύψος 10m), με αναφορά στην κατηγορία ταχύτητας του ανέμου 1 (0-1 m/s άνεμος σε ύψος 10m) και κατηγορία ευστάθειας 3 (συννεφιά). Σε απόσταση 320m, προβλέφθηκαν, μία αύξηση των έως 7 dB (A) και μία μείωση των 13 dB (A) το πολύ, με τη χρήση των ίδιων συνθηκών αναφοράς. Τα αποτελέσματα από μία αντίστοιχη μελέτη μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση της ανάπτυξης του μοντέλου δείχνοντας πως συμφωνούν συνολικά.

Η θερμοκρασία, η υγρασία και λιγότερο η στατική πίεση επηρεάζουν το βαθμό της εξασθένησης του αέρα, δηλαδή, τη μοριακή απορρόφηση του ήχου κατά τη διάδοσή του. Τα αποτελέσματα αυτής της εξασθένησης είναι σημαντικά κυρίως σε μεγάλες συχνότητες. Η ατμοσφαιρική αναταραχή, με τη μορφή τυχαίων διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ανέμου και στη θερμοκρασία του, παραμορφώνει τα ηχητικά κύματα. Τα αποτελέσματα μπορεί να θεωρηθούν ως ο διασκορπισμός του ήχου στις σκοτεινές περιοχές και η μειωμένη δύναμη της θετικής αλλά και αρνητικής παρεμβολής. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σημαντικά κυρίως στις μεγάλες συχνότητες.

Γ) Όρια

Σε επίπεδο έδαφος, μπορούν να φτάσουν στον δέκτη και ο θόρυβος απευθείας από την πηγή και μετά από αντανάκλαση στο έδαφος. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ απευθείας και αντανακλώμενο ήχο, ονομάζεται επίγεια επίδραση (η επίδραση του εδάφους). Σε κάποιες συχνότητες, ο απευθείας και ο αντανακλώμενος ήχος αλληλοεξουδετερώνονται μερικώς και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα επίπεδα του ήχου να είναι πιο χαμηλά από συχνότητες τα δύο ηχητικά αυτά κύματα ενισχύουν το ένα το άλλο, κάνοντας το επίπεδο να

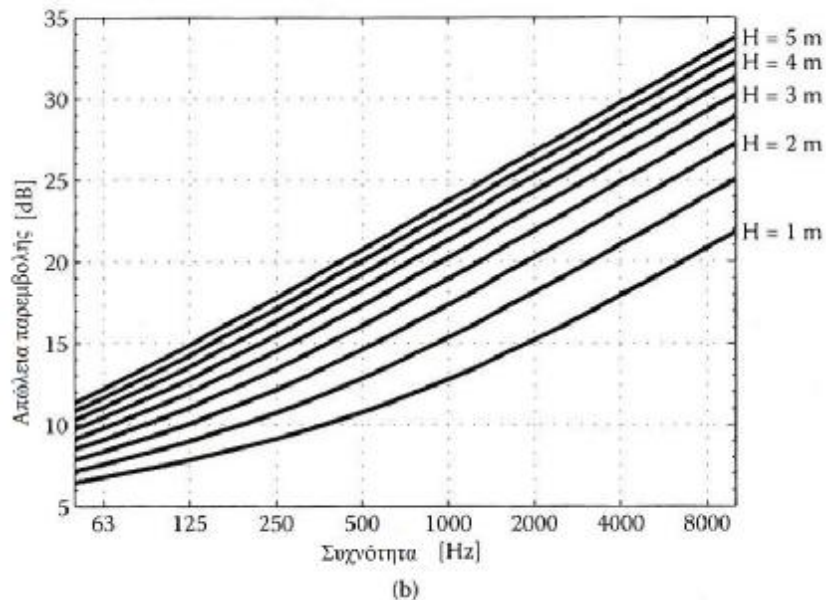
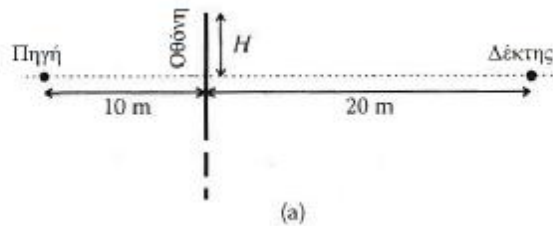
είναι ψηλότερα από εάν το έδαφος δεν υπήρχε. Για τον κυκλοφοριακό θόρυβο που διαδίδεται πάνω από έναν ηχητικά σκληρό έδαφος όπως είναι η ασφαλτος, τα δύο ηχητικά κύματα προθέτονται μεταξύ τους και κανονικά αυτό οδηγεί στην αύξηση του θορύβου. Ωστόσο, πάνω από ένα ακουστικά μαλακό έδαφος όπως είναι το γκαζόν (χορτάρι) , τα δύο κύματα μπορεί να αλληλοεξουδετερωθούν σε μια σχετικά ευρεία περιοχή συχνοτήτων, με αποτέλεσμα το επίπεδο του θορύβου να είναι πιο χαμηλό από το εάν το έδαφος να μην υπήρχε. Σε υψηλότερες συχνότητες, η συνοχή μεταξύ απευθείας και από αντανάκλαση ήχου κανονικά μειώνεται προς μια ενεργειακή άθροιση των δύο συντελεστών, αυτό είναι λόγω των επιπτώσεων του στροβιλισμού ή στην τυχαία τραχύτητα του εδάφους.



Εικόνα 1.7 : Η επίδραση του εδάφους απεικονίζεται ως πίεση του ήχου σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο σε συνάρτηση της συχνότητας, για γρασίδι και για σκληρό έδαφος, Μια σημειακή πηγή βρίσκεται σε ύψος 0.75 m και ο δέκτης σε ύψος 1.5 m σε απόσταση 50 m. Το μοντέλο ακουστικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε είναι σύμφωνα με το μοντέλο δύο παραμέτρων για σκληρό, φθαρμένο γκαζόν, από το οποίο υπολογίζεται ο σφαιρικός συντελεστής ανάκλασης.

Το σχήμα 1.7 απεικονίζει την επίδραση του εδάφους για ένα έδαφος τύπου γρασίδι και ένα σκληρό (αυτό είναι η πυκνή επιφάνεια της ασφάλτου) για μια σημειακή πηγή σε ύψος 0,75m και έναν δέκτη σε ύψος 1.5m τοποθετημένα σε απόσταση 50m μακριά. Το αποτέλεσμα εμφανίζεται και για μία ομογενή ατμόσφαιρα και με εκτιμώμενη απώλεια λόγω στροβιλισμού. Το επίπεδο ηχητικής πίεσης είναι σχεδιασμένο σε σχέση με το ελεύθερο

πεδίο, αυτό είναι σε σύγκριση με μία περίπτωση που έχει τις ίδιες θέσεις σε πηγή και δέκτη, αλλά δεν έχει επιφάνεια εδάφους. Όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα, το έδαφος προκαλεί μια αύξηση περίπου των 6dB στην μέγιστη παρεμβολή, η οποία είναι η αναμενόμενη πίεση που διπλασιάζεται για την επίπεδη γεωμετρία. (τα ύψη της πηγής και του δέκτη είναι μικρά σε σχέση με την απόσταση διάδοσης. Στο όριο χαμηλής συχνότητας και οι δύο τύποι (εδαφών) εδάφους οδηγούν σε μέγιστη παρεμβολή. Η πρώτη εμπύθιση παρέμβασης για το σκληρό έδαφος λαμβάνεται κατά στα 4,000Hz για το έδαφος τύπου γρασίδι η πρώτη εμπύθιση παρέμβασης γίνεται σε μικρότερη συχνότητα, 500Hz - 1.000Hz , και είναι πολύ πιο ευρεία. Η διαφορά στη συμπεριφορά μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική αλλαγή στα επίπεδα θορύβου τύπου A από το δρόμο και το σιδηρόδρομο, ακόμα και όταν συμπεριλαμβάνονται ρεαλιστικές μειώσεις που συνδέονται. Η επίδραση των αναταράξεων φαίνεται να περιορίζει τα βάθη των εμπυθίσεων και τα ύψη των κορυφών με ένα ποσό το οποίο αυξάνεται με συχνότητα και που τελικά προκαλεί μηδενική συνοχή μεταξύ απευθείας και αντανακλώμενου ήχου και μια καθαρή ενεργειακή άθροιση στο όριο των υψηλών συχνοτήτων. Όταν μοντελοποιούμε μια κατάσταση πραγματικής κίνησης χρησιμοποιώντας πολλαπλές πηγές ήχου και συνεισφέρουν ταυτόχρονα, το σχέδιο παρεμβολής αλλοιώνεται, και ως εκ τούτου πηγαίνει πιο κοντά στην πραγματικότητα.



Εικόνα 1.8 : Η ακουστική απώλεια παρεμβολής μιας λεπτής, σκληρής οθόνης που εκτείνεται στο άπειρο κατά το ήμισυ (η επιφάνεια του εδάφους δε συμπεριλαμβάνεται). Γεωμετρία (a). Απώλεια παρεμβολής σε dB (b) για διάφορα ύψη, H , πάνω από τη γραμμή της όρασης, των 1 έως 5 μέτρων σε βήματα του 0.5 μέτρου.

Για συμβατικά ηχοπετάσματα, το ύψος είναι η πρωταρχική ιδιότητα, υποθέτοντας ότι η μετάδοση του ήχου μέσα ή γύρω από τις πλευρές του εμποδίου, είναι αμελητέα. Για να απεικονίσουμε τη γενική επίδοση του εμποδίου, η απώλεια παρεμβολής μιας λεπτής, σκληρής οθόνης σε απουσία της επιφάνειας του εδάφους είναι σχεδιασμένη στο σχήμα 1.8 (a)(b) σαν συνάρτηση της συχνότητας, , για ένα μεταβαλλόμενο ύψος της οθόνης και του δέκτη. Για μια επίπεδη και ακουστικά σκληρή επιφάνεια εδάφους ακριβώς από κάτω από την πηγή του δέκτη, η απώλεια παρεμβολής θα μειωνόταν περίπου κατά 6dB. (για υψηλότερες οθόνες, η μείωση τείνει να είναι 6dB, ενώ για κοντινότερες οθόνες οι πολλαπλές αντανακλάσεις μεταξύ των ακρών της οθόνης και του εδάφους μεταβάλλουν την συμπεριφορά). Η απώλεια παρεμβολής είναι χαμηλή σε χαμηλότερες συχνότητες και αυξάνεται με την συχνότητα. Σε υψηλότερες συχνότητες, τείνει να αυξηθεί κατά 3dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Σε χαμηλότερες συχνότητες, η εξάρτηση στο ύψος της

οθόνης είναι πιο αδύναμη απ' ότι στις υψηλότερες. Σε πραγματικές καταστάσεις, η απώλεια παρεμβολής μπορεί να μειωθεί ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, κυρίως προς τα κάτω διάθλαση κάτω υπήνεμες (αντίθετα στη φορά του ανέμου) συνθήκες διάδοσης και διασκόρπιση από αναταραχές σε υψηλότερες συχνότητες.

Εάν το πάνω μέρος του ηχοπετάσματος διευρυνθεί, το ακουστικό αποτέλεσμα θα βελτιωθεί περαιτέρω. Αναλόγως λαμβάνοντας υπόψη την τοποθεσία του ηχοπετάσματος, καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται εάν το ηχοπέτασμα τοποθετηθεί κοντά είτε στην πηγή είτε στον δέκτη. Σε ένα εσωτερικό περιβάλλον της πόλης, ίσως είναι προτιμότερο, επομένως, να χρησιμοποιούνται τα ηχοπετάσματα σχετικά χαμηλά εάν μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στις πηγές της κυκλοφορίας. Για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης τέτοιων φραγμάτων το πλάτος τους μπορεί να μεγαλώσει και τα υλικά στις κορυφές και στις προσόψεις τους πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά. Τα υλικά πρέπει να είναι ακουστικά μαλακά (πορώδη) , και σε αστικά περιβάλλοντα να χαρακτηρίζονται από πολλαπλές ανακλάσεις του ήχου, ειδικότερα είναι σημαντικό να διαλέξουμε ακουστικά απορροφητικά υλικά. Γενικά, σημαντικές αντανάκλασεις μπορούν να εμφανιστούν από τις προσόψεις σε φαράγγια των δρόμων, από τα πρόσωπα των ηχητικών φραγμάτων και στα σώματα των οχημάτων, ειδικά για μεγάλα, βαριά οχήματα δρόμου και σιδηροδρόμου.

Γενικά, ο αστικός σχεδιασμός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την έκθεση στο θόρυβο αντιμετωπίζοντας την τοποθέτηση και ρύθμιση των επίγειων μεταφορικών μέσων σε συνδυασμό με τις κτηριακές μορφές και λειτουργίες. Οι επεξεργασίες στη στέγη και την πρόσοψη χρησιμοποιούνται για την μείωση των επιπέδων θορύβου σε προστατευόμενες περιοχές, όπως η εσωτερική αυλή (ακάλυπτος), που αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ενόχλησης με την εφαρμογή της ιδέας «ήσυχη πλευρά» στις κατοικίες. Έρευνες μελετούν διάφορες μεθόδους που δρουν επί του ορίου, συμπεριλαμβανομένου μαλακώματος του σκληρού εδάφους, την εκτράχυνση του επίπεδου εδάφους, κατάλληλος σχεδιασμός ηχοπετάσματος και την χρήση ακουστικών απορροφητικών υλικών, όπως υπόστρωμα βλάστησης σε ηχοπετάσματα, προσόψεις και στέγες (ταράτσες).

Στους υπολογισμούς της χαρτογράφησης του θορύβου, όλες οι παραπάνω επιπτώσεις διάδοσης θα μπορούσαν να εξεταστούν και τα αποτελέσματα των ηχοπετασμάτων και ο τύπος του εδάφους και η μορφολογία του θα μπορούσε να εκτιμηθεί. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τοπικά μετεωρολογικά στατιστικά επιτρέπει σε κάποιον να εκτιμήσει την διαδοχή της εκπομπής του θορύβου λόγω των επιπέδων των διαφόρων μετεωρολογικών

συνθηκών. Ωστόσο, οι απλοποιήσεις που έχουν γίνει στις τωρινές μεθόδους χαρτογράφησης θορύβου σημαίνει ότι, τα ακουστικά αποτελέσματα πολλών εργαλείων μείωσης που έχουν παρουσιαστεί δεν είναι εμφανή. Επομένως η βελτιωμένη φυσική μοντελοποίηση θα επιτρέψει την περεταίρω εξέλιξη στις μεθόδους χαρτογράφησης του θορύβου.

1.2.3 Δείκτες θορύβου

Για να εκτιμήσουμε τις επιδράσεις στην υγεία και την ευημερία των διαφόρων μέτρων μείωσης πρέπει να κρατήσουμε κατά νου ότι τα επίπεδα θορύβου μιας τιμής είναι δείκτες περιορισμένης ακρίβειας. Δύο διαφορετικά ηχητικά περιβάλλοντα, τα οποία είναι, να ακούς ένα μακρινό αυτοκινητόδρομο ή έναν κοντινό αστικό δρόμο, μπορεί να δώσει την ίδια τιμή L_{den} . Επιπλέον, ακόμα για τον ίδιο ήχο, η απάντηση ποικίλει μεταξύ των ατόμων. Διαφορετικά χρονικά πρότυπα παίζουν ένα ρόλο όπως και τα φασματικά χαρακτηριστικά, δηλαδή, χαρακτήρας χαμηλής συχνότητας στη σκιά ενός ηχοπετάσματος σε σύγκριση με τον πιο φωτεινό απευθείας ήχο από ένα κοντινό όχημα. Όταν εξετάσουμε την αντιλαμβανόμενη ενόχληση, έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε από κοινού αυτές τις απόψεις με ήχους του φόντου, το οποίο μπορεί να είναι ακόμα και θετικό, όπως στην περίπτωση των ήχων από πηγές νερού και πουλιά που κελαηδάνε. Ο χρονικός χαρακτήρας επηρεάζει έντονα την διαταραχή (ή πρόσκαιρος) του ύπνου το οποίο είναι έντονα συνδεδεμένο με έναν αριθμό συμβάντων (όπως τα αυτοκίνητα που περνάνε).

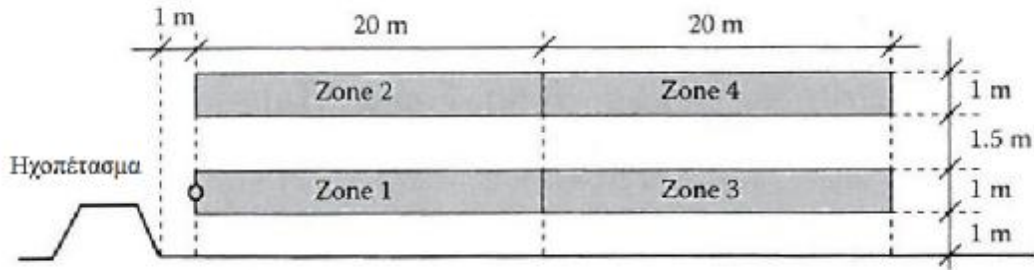
Τα φασματικά αποτελέσματα των διαφόρων μέτρων μείωσης πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Στην περίπτωση της μόνωσης σε πρόσοψη, για παράδειγμα, ο θόρυβος που μπλοκάρεται από ένα ηχοπέτασμα δεν θα μειωθεί τόσα dB(A) όσο θα μειωνόταν ένας ανεμπόδιστος θόρυβος που μεταφέρεται μέσα από ένα παράθυρο, λόγω της αλλαγής χαμηλής συχνότητας που προκαλείται από ένα ηχοπέτασμα. Δηλαδή εάν χρησιμοποιηθούν μαζί πολλά εργαλεία μείωσης την ίδια στιγμή, τα μεμονωμένα ξεχωριστά νούμερα των αποτελεσμάτων σε dB(A) δεν μπορούν να προστεθούν για να προβλεφθεί το συνολικό αποτέλεσμα. Η προσεκτικότητα ισχύει αυστηρά όταν τα ξεχωριστά αποτελέσματα είναι ίδια σε όλες τις συχνότητες. Συνήθως είναι πιο εύκολο να μειώσουμε τις υψηλότερες συχνότητες στο θόρυβο χρησιμοποιώντας παθητικές μεθόδους απορρόφησης ή μείωσης της μετάδοσης. Για να μειώσουμε τα τμήματα χαμηλότερης συχνότητας χρειάζονται συνήθως μεγαλύτερες συσκευές, ή κάποιος να χρησιμοποιήσει ηχητικούς απορροφητές ή ακόμα και ενεργά στοιχεία, όπως τα μεγάφωνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Καινοτόμα ηχοπετάσματα

Τα καινοτόμα ηχοπετάσματα που χρησιμοποιούν φυσικά υλικά έχουν φανεί αρκετά αποτελεσματικές, υποσχόμενες λύσεις για την απόσβεση του θορύβου επίγειας κυκλοφορίας σε αγροτικές και αστικές περιοχές. Σε αυτό το κεφάλαιο, η ακουστική απόδοση από ένα μεγάλο σύνολο τέτοιων καινοτόμων λύσεων έχει εκτιμηθεί αριθμητικά σε διάφορες περιβαλλοντολογικές διαμορφώσεις και τύπους υποδομών μεταφορών: αστικούς δρόμους, τραμ, αυτοκινητόδρομους και σιδηρόδρομους. Για αστικούς δρόμους, ηχοπετάσματα με χαμηλού ύψους βλάστηση (έως 1m) και με κοφίνωση (κλουβί γεμισμένο με χώμα και πέτρες) μελετώνται. Φαίνεται ότι η μείωση του θορύβου είναι μέγιστη 5 dB(A) σε έναν δρόμο με τέσσερις λωρίδες. Εάν τοποθετηθούν επιπλέον ηχοπετάσματα μεταξύ των λωρίδων κυκλοφορίας η μείωση μπορεί να φτάσει τα 10 dB(A) μέχρι τα 5m σε ύψος (περισσότερα όταν βρίσκεται πιο κοντά στο έδαφος). Για αστικούς δρόμους τραμ, χαμηλού αναχώματα και ηχοπετάσματα με κρύσταλλα προτείνονται και αξιολογούνται. Η προσθήκη ενός επιπλέον απορροφητικού χαμηλού ηχοπετάσματος μεταξύ των λωρίδων, καθώς επίσης και η πρόθεση ενός χαμηλού με ηχοπετάσματος βλάστησης στην άκρη μιας γέφυρας επί ένα μονοπάτι πεζών, επίσης εξετάζονται. Η απώλεια παρεμβολής είναι μεγάλη, μέχρι και 15 dB(A), επειδή το καινοτόμο ηχοπέτασμα μπορεί να χτιστεί πολύ κοντά στις πηγές θορύβου. Στις αγροτικές περιοχές (αυτοκινητόδρομοι και σιδηρόδρομοι), η ακουστική απόσβεση εξαιτίας των διαδοχικών σειρών δέντρων πίσω από ένα συμβατικό τεσσάρων μέτρων ψηλό ηχοπέτασμα, η πρόθεση ενός καλύμματος με βλάστηση πάνω στο ηχοπέτασμα έχουν μελετηθεί.

2.1 Εισαγωγή

Οι περισσότεροι υπολογισμοί διάδοσης του θορύβου διεξάχθηκαν σε αρκετές έρευνες για τέσσερις διαφορετικές ζώνες δεκτών ύψους ενός μέτρου και μήκους είκοσι μέτρων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Οι χαμηλότερες ζώνες 1 και 3(1 έως 2m σε ύψος) {που εκτείνεται σε ύψος από 1 έως 3m} βρίσκονται σε ύψη περίπου 1.50m πάνω από το έδαφος (ποδηλάτης, πεζός ή και τα ισόγεια κτηρίων). Οι ανώτερες ζώνες 2 και 4 (που εκτείνονται σε ύψος από 3.50 ως 4.50m) βρίσκονται σε ύψη κοντά στα 4m πάνω από το έδαφος. (1^{ος} όροφος κτηρίων).



Εικόνα 2.1 : Ορισμός για τις τέσσερις ζώνες δέκτη και το δέκτης των πεζών (κύκλος).

Θα εξηγηθούν αποτελέσματα από σχετικές έρευνες που σκοπό έχουν να κατευθύνουν μελλοντικούς ερευνητές στη βελτίωση μεθόδων και τεχνικών μείωσης του ήχου ή έστω ελέγχου του. Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων που διεξήχθησαν εκτιμήθηκαν σε σχέση με τους ακόλουθους ποσοτικούς στόχους όπως μετρήθηκαν σε δέκτη τοποθεσίας ύψους 4m παράλληλα σε ένα διάδρομο επιφάνειας μεταφοράς σε σύγκριση με μια μη επεξεργασμένη κατάσταση.

- Για την παραγωγή σχεδίων για χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης (ή χαμηλά ηχοπετάσματα με την χρήση φυσικών υλικών) , η οποία οδηγεί σε ελάχιστη ηχητική μείωση της τάξεως των 6 dB(A) σε αστικές περιοχές και 3 dB(A) σε αγροτικές, σε μια τοποθεσία δέκτη ύψους 4m παράλληλα σε ένα δεδομένο διάδρομο επίγειων μεταφορών σε σύγκριση με μία μη επεξεργασμένη κατάσταση.
- Για την παραγωγή σχεδίων για συνδυασμό των καινοτόμων ηχοπετασμάτων και σχηματισμένου εδάφους , η οποία οδηγεί σε ελάχιστη ηχητική μείωση (της τάξεως) των 3 dB(A) σε μια τοποθεσία δέκτη ύψους τεσσάρων μέτρων παράλληλα σε ένα διάδρομο επίγειων μεταφορών , σε σύγκριση με μια περίπτωση που υπάρχει ένα ευθύ ηχοπέτασμα μόνο του.
- Για την παραγωγή σχεδίων για συνδυασμό των καινοτόμων ηχοπετασμάτων και βλάστηση (στις κορυφές των φραγμάτων, δέντρα πίσω από το ηχοπέτασμα κ.ο.κ.) η οποία οδηγεί σε ελάχιστη ηχητική μείωση της τάξεως των 3dB(A) σε τοποθεσία δέκτη ύψους 4 m. Παράλληλα σε ένα δρόμο επίγειων μεταφορών, σε σύγκριση με μια περίπτωση όπου υπάρχει ένα ενιαίο ίσιο ηχοπέτασμα.

Όλες οι παραπάνω τιμές αυξάνονται κατά 2 dB(A) για θέσεις δεκτών σε ύψος 1.5 m. οι στόχοι αυτοί φαίνονται στον πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1 : Στόχοι μείωσης θορύβου

	Μείωση θορύβου σε dB(A)				
	Αστικό περιβάλλον		Αγροτικό περιβάλλον		
Μέθοδος μείωσης θορύβου	4 m ^α	1.5 m ^α	4 m ^α	1.5 m ^α	Μείωση σε σχέση με :
Χαμηλό ηχοπέτασμα	6	8	3	5	Καμία θεραπεία
Χαμηλό ανάχωμα	6	8	3	5	Καμία θεραπεία
Κάλυμμα υποστρώματος			3	5	Άκαμπτο ηχοπέτασμα ύψους 4 μέτρων
Καπέλο βλάστησης			3	5	Άκαμπτο ηχοπέτασμα ύψους 4 μέτρων
Αναχώματα			3	5	Άκαμπτο ηχοπέτασμα ύψους 4 μέτρων

^α είναι το ύψος του δέκτη.

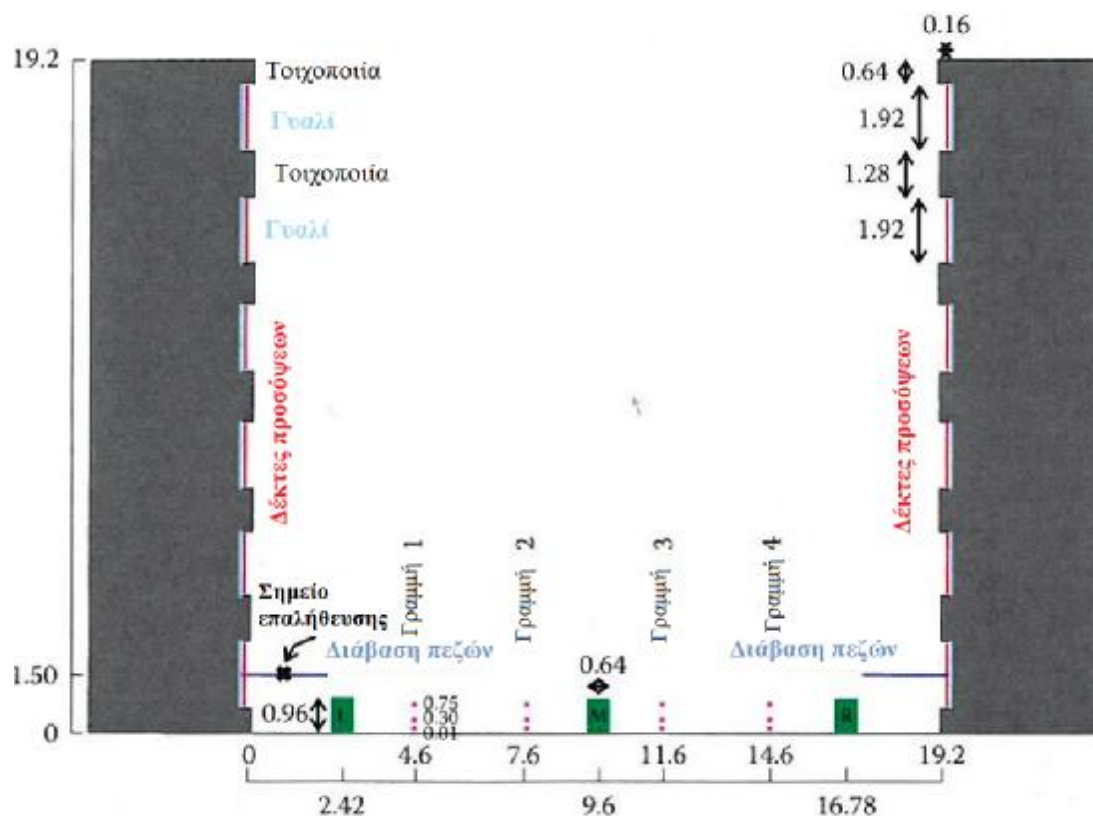
2.2 ΑΣΤΙΚΟΙ ΔΡΟΜΟΙ

2.2.1 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης

Θεωρήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί μικρών εμποδίων (ύψους 0.96m, πλάτους 0.64m) σε έναν τυπικό αστικό δρόμο, συμπεριλαμβανομένου ενός ξεχωριστού εμποδίου στην πλευρά του δρόμου ή στην μέση αυτού (αριστερά, δεξιά ή στην μέση, βλ. σχήμα 2.2), δύο ηχοπετάσματα (αριστερά και δεξιά), ή τρία ηχοπετάσματα (αριστερά, δεξιά ή στην μέση). Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας ήταν τα ακόλουθα: 95% ελαφριά οχήματα και 5% βαριά, με μέση ταχύτητα μεταξύ 30 και 70cm/h. Οι αντανάκλασεις μεταξύ απέναντι προσόψεων

οδηγεί σε μία ισχυρή αύξηση στα επίπεδα της πίεσης του ήχου του θορύβου οδικής κυκλοφορίας. Ο ρεαλισμός των εξομοιώσεων αυξήθηκε με το να θεωρηθούν τέσσερις λωρίδες κυκλοφορίας και τρία ύψη δεκτών ακολουθώντας τα μοντέλα πηγής δύναμης της οδικής κυκλοφορίας των Harmonoise/Imagine και με τη χρήση σχεδιασμένων προσόψεων συμπεριλαμβανομένου κάποιου διάχυτου διασκορπισμού που μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα των χαμηλών εμποδίων.

Τα ηχοπετάσματα και στις δύο μεριές του τεσσάρων λωρίδων του δρόμου αλλά και στη μέση, θεωρήθηκαν πως θα είναι με βλάστηση με το τυπικό υπόστρωμα που χρησιμοποιείται για βλάστηση τοίχου επειδή δείχνουν καλές ακουστικές ιδιότητες. Οι μετρημένες ιδιότητες των υλικών αυτών χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς. Οι γεωμετρικές λεπτομέρειες του φαράγγιού του δρόμου φαίνονται στο Σχήμα 2.2.



Εικόνα 2.2 : Ρύθμιση αριθμητικής μελέτης για οθόνες χαμηλού ύψους σε φαράγγι του δρόμου.

Συμπεράσματα:

Σε ένα μη αντηχητικό περιβάλλον, τα χαμηλά ηχοπετάσματα θα πρέπει να τοποθετηθούν κοντά στην πηγή, γιατί μόνο κάτω από αυτή τη συνθήκη ο θόρυβος της μηχανής σε λειτουργία μπορεί να ασφαλισθεί.

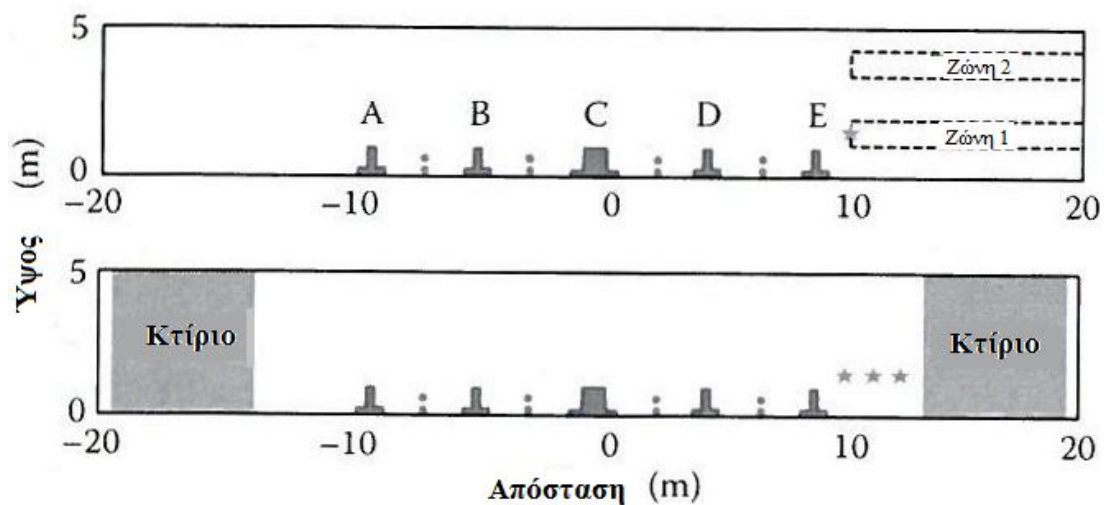
Σε ηχητικά περιβάλλοντα, όπως τα φαράγγια των δρόμων, το κύριο αποτέλεσμα δεν είναι τόσο η προστασία που παρέχεται από τα μικρά ηχοπετάσματα αλλά η προσθήκη της απορρόφησης. Τότε, οι ιδιότητες των επιφανειών των ηχοπετασμάτων αυτών είναι πολύ σημαντικές. Υπολογισμοί έδειξαν πως στην περίπτωση πλήρως άκαμπτων οθονών (περίπτωση Αριστερά + Μέση + Δεξιά), λαμβάνεται μόνο 1 dB (A) απώλεια παρεμβολής. Η χρήση της βλάστησης στο υπόστρωμα του τοίχου επιτρέπει στα χαμηλά ηχοπετάσματα να απορροφούν τον ήχο αρκετά καλά σε χαμηλές συχνότητες. Επειδή οι ταχύτητες των οχημάτων σε αστικούς δρόμους είναι μάλλον χαμηλές, με ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του θορύβου στις χαμηλότερες συχνότητες να προέρχεται από την πρόωση του οχήματος, η προσθήκη αυτού του τύπου υπόστρωμα στα ηχοπετάσματα είναι ειδικού ενδιαφέροντος.

Σαν εναλλακτική λύση μόνο για τη χρήση απορροφητικών εμποδίων στο επίπεδο του δρόμου, η απορρόφηση μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στις προσόψεις. Για τη μείωση των επιπέδων της πίεσης του ήχου, το κύριο σημείο εστίασης θα πρέπει να είναι το κάτω μέρος της πρόσοψης. Οι προβλεπόμενες απώλειες παρεμβολής είναι μάλλον μέτριες, αλλά η μέθοδος ακόμη μπορεί να εξετασθεί δεδομένης της έλλειψης λύσεων της μείωσης του ήχου σε τέτοιες περιπτώσεις.

2.2.2 Προσθήκη χαμηλών ηχοπετασμάτων βλάστησης μεταξύ λωρίδων

Ο στόχος ήταν να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα θωράκισης στην προσθήκη ενός χαμηλού απορροφητικού ηχοπετάσματος μεταξύ 2 λωρίδων κυκλοφορίας, όταν ένα χαμηλό ηχοπέτασμα ήταν ήδη χτισμένο στην άκρη της υποδομής, κατά μήκος της διάβασης πεζών. Οι υπολογισμοί έγιναν για ηχοπετάσματα ύψους 1m, κατασκευασμένα από υπόστρωμα βλάστησης (πάχους 40cm) με ένα λεπτό, άκαμπτο πυρήνα. Θεωρήθηκε ένας αστικός δρόμος τεσσάρων λωρίδων (Β και D είναι τα ηχοπετάσματα ανάμεσα στις λωρίδες, Σχήμα 2.3), με 95% ελαφριά και 5% βαριά οχήματα με ταχύτητα 50 km/h. Μια περιοχή 50cm εκατέρωθεν των ηχοπετασμάτων κρατήθηκε για λόγους ανάγκης, καταλήγοντας έτσι σε μια ελάχιστη

απόσταση μεταξύ εμποδίου και οχήματος 0.5m. Εξομοιώθηκαν τρεις περιπτώσεις : ανοιχτός χώρος (χωρίς κτίρια), κτίρια στην πλευρά του δέκτη και κτίρια και στις δυο πλευρές.



Εικόνα 2.3 : Θέσεις δεκτών των πεζών (*) και πιθανές τοποθεσίες των χαμηλών ηχοπετασμάτων (με ή χωρίς κτίρια) : A-B-C-D-E, B και D είναι τα ηχοπετάσματα ανάμεσα στις λωρίδες.

Συμπεράσματα:

Το αποτέλεσμα θωράκισης της προσθήκης ενός χαμηλής απορροφητικότητας εμποδίου μεταξύ δυο λωρίδων κυκλοφορίας μπορεί να είναι σημαντικό. Συστήνεται η χρήση αυτής της αρχής για τη δημιουργία περιοχών προστατευμένων από το θόρυβο κοντά στις οδικές υποδομές, το οποίο μπορεί να επιθυμητό όταν ένα μονοπάτι ποδηλατιστών βρίσκεται κατά μήκος του δρόμου ή όταν ο δρόμος περνάει μέσα από μια πλατεία, ένα αστικό πάρκο ή μια περιοχή αναψυχής.

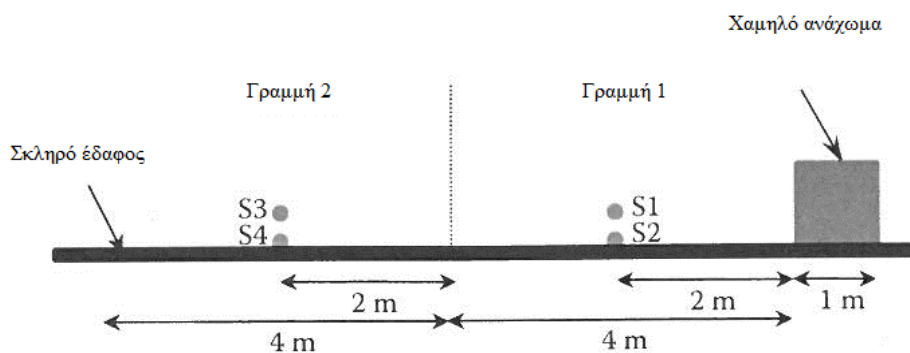
Αυτή η αρχή θα μπορούσε να εφαρμοστεί επίσης σε αρκετά φαρδιά φαράγγια δρόμων (λεωφόροι) όπου ο θόρυβος του περιβάλλοντος για τους πεζούς στα πεζοδρόμια ή για τους ποδηλάτες που κινούνται κατά μήκος του δρόμου συχνά είναι πολύ υψηλός. Αυτό το είδος δράσης θα βελτιώνει την ποιότητα του περιβάλλοντος αυτών των περιοχών (είσοδοι σε εμπορικά, υπαίθριες καφετέριες και τουριστικοί διάδρομοι).

Το αποτέλεσμα της θωράκισης είναι επίσης αποτελεσματικό για τους χαμηλότερους ορόφους (έως 5m ύψος) των κτιρίων, που βρίσκονται κατά μήκος των αστικών δρόμων.

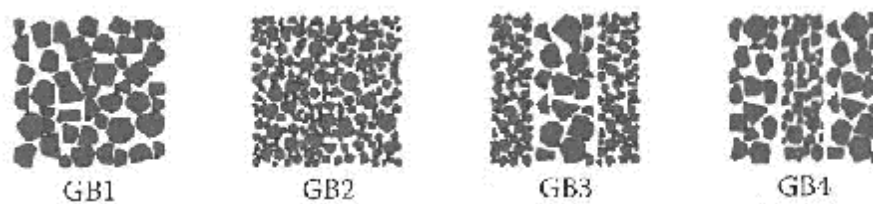
Ωστόσο, για υψηλότερα πατώματα, τέτοιου είδους ηχοπετάσματα έχουν μόνο μικρό αντίκτυπο στη μείωση του θορύβου.

2.2.3 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα κοφίνωσης

Στόχος ήταν να αξιολογήσουμε το αποτέλεσμα της προστασίας ηχοπετασμάτων 1 m x 1 m φτιαγμένα από πέτρες (κοφίνωση) σε ανοιχτή περιοχή. Οι εξομοιώσεις διεξήχθησαν σε περίπτωση δύο λωρίδων αστικού δρόμου (Σχήμα 2.4) με 100% ελαφριά οχήματα (50km/h). Προσομοιώθηκαν τεσσάρων διαφορετικών ειδών κοφίνωσης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μεγέθη πετρών (Σχήμα 2.5)



Εικόνα 2.4 : Ρύθμιση αστικού δρόμου με ηχοπετάσματα κοφίνωσης.



Εικόνα 2.5 : Γεωμετρίες μελετημένων ηχοπετασμάτων κοφίνωσης : ομογενή (GB1 και GB2) και στρωματικές δομές (GB3 και GB4).

Συμπεράσματα:

Η χρήση της κοφίνωσης στα ηχοπετάσματα μπορεί να συνιστάται κατά μήκος αστικών δρόμων και διαθέτουν μέτρα εύκολης εφαρμογής.

Η λύση αυτή είναι αποτελεσματική για χαμηλούς δέκτες που βρίσκονται σε προστατευμένη περιοχή, όχι και τόσο κοντά στο ηχοπέτασμα. Ως εκ τούτου, συνίσταται η διατήρηση ενός χώρου τουλάχιστον ενός μέτρου μεταξύ του ηχοπετάσματος κοφίνωσης και το διάδρομο η τον ποδηλατόδρομο.

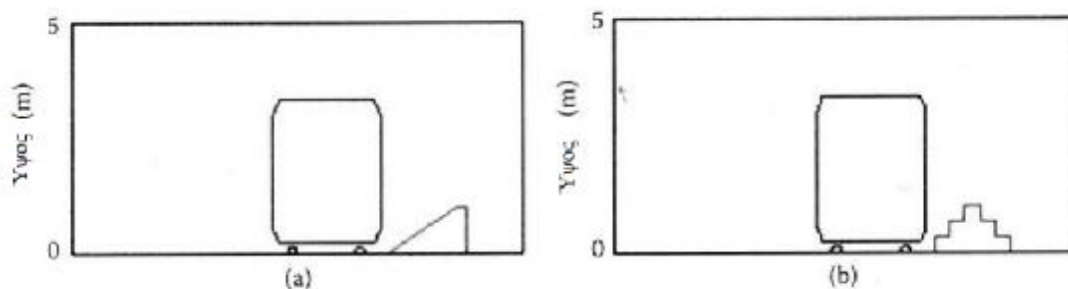
2.3 ΔΡΟΜΟΙ TRAM

2.3.1 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματα

Στόχος ήταν να αξιολογήσουμε το αποτέλεσμα προστασίας των αναχωμάτων γης με χλωρίδα σε ανοιχτές περιοχές (χωρίς κοντινά κτίρια) των οποίων το ύψος είναι 1 m και το εμβαδόν διατομής είναι 1 m². Οι γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 2.6 και οι ράγες των τραμ δύο κατευθύνσεων (με ταχύτητα κίνησης 30 km/h) στο Σχήμα 2.7 (a)(b).



Εικόνα 2.6 : Γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων (B1 ως B6)



Εικόνα 2.7 : (a) Γενική επισκόπηση για τα αναχώματα B2 και (b) B5 για ρύθμιση τραμ (κοντινότερο τραμ).

Συμπεράσματα:

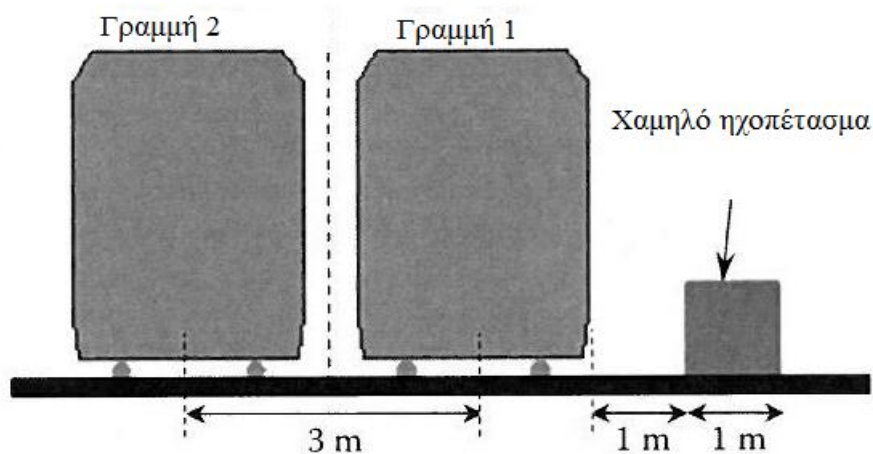
Τα χαμηλά αναχώματα γης αποδείχθηκαν πως είναι πιθανή λύση για την προστασία από το θόρυβο για τους δέκτες του πρώτου ορόφου των κοντινών κτιρίων (έως και πέντε μέτρα σε

ύψος). Στην περίπτωση του επίπεδου εδάφους, προτείνεται η χρήση τους όταν η τοποθέτηση τους μπορεί να γίνει κοντά στην πηγή του θορύβου, δηλαδή κατά μήκος του τραμ.

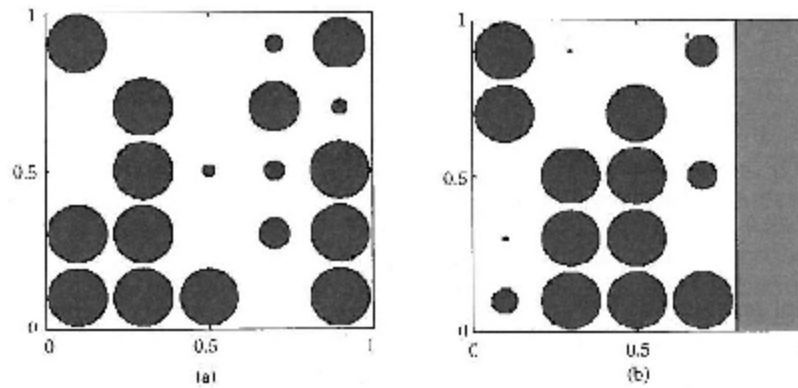
Προτείνονται τα σχήματα χαμηλών αναχωμάτων ‘τετράγωνα’ ή τα ‘σκαλιά’ (σχήματα B1, B5 και B6 από το σχέδιο 2.6) αντί των πιο συμβατικών τριγωνικών σχημάτων (B2, B3 και B4).

2.3.2 Χτίζοντας χαμηλά ηχητικά ηχοπετάσματα με κρυστάλλους

Στόχος ήταν η αξιολόγηση, σε μια ανοιχτή περιοχή, τα αποτελέσματα προστασίας των 1 x 1 m ηχοπετασμάτων φτιαγμένα από οριζόντιους ξύλινους κυλίνδρους, σε απόσταση ο ένας από τον άλλον (ηχητικοί κρύσταλλοι). Οι εξομοιώσεις διεξήχθησαν για μια περίπτωση σε ένα τραμ δύο κατευθύνσεων (Σχήμα 2.8) με την ταχύτητα τους στα 30 km/h. Δύο τύποι καινοτόμων εμποδίων μελετήθηκαν : με και χωρίς τα ίδια, άκαμπτα ηχοπετάσματα ύψους ενός μέτρου στο πίσω μέρος (Σχήμα 2.9 (a)(b)). Το έδαφος θεωρείται σκληρό.



Εικόνα 2.8 : Ρύθμιση τραμ με ηχοπέτασμα κρυστάλλων

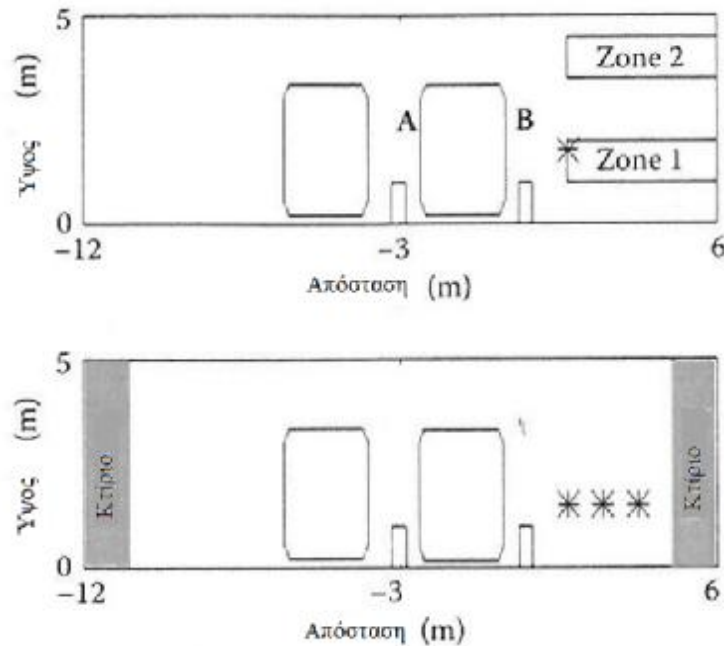


Εικόνα 2.9 : Παράδειγμα ρυθμίσεων ηχητικών κρυστάλλων (οι πηγές αριστερά, οι δέκτες δεξιά). Ξύλινοι κύλινδροι : μόνοι τους (a) ή βοηθώντας ένα χαμηλό, ίσιο ηχοπέτασμα (b).

Συμπεράσματα:

Οι λύσεις που βασίζονται σε ηχητικούς κρυστάλλους κατά μήκος του τραμ μπορεί να μην είναι εύκολο να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν. Από την άλλη, η χρήση τέτοιων συστημάτων θορύβου μπορεί να προάγεται για αισθητικούς λόγους.

Η λύση αυτή είναι αποδοτική μόνο για χαμηλούς δέκτες, μόνο όταν βρίσκονται στην προστατευμένη περιοχή και όταν δεν βρίσκονται τόσο κοντά στο ηχοπέτασμα. Ως εκ τούτου συνιστάται η διατήρηση ενός χώρου τουλάχιστον ενός μέτρου μεταξύ του ηχοπετάσματος και του ποδηλατοδρόμου ή της διάβασης πεζών.



Εικόνα 2.10 : Θέσεις δεκτών των πεζών (*) και πιθανές τοποθεσίες των χαμηλών ηχοπετασμάτων (με ή χωρίς κτίρια) : A-B, A είναι το ηχοπέτασμα ανάμεσα στις λωρίδες.

2.3.3 Προσθήκη χαμηλών ηχοπετασμάτων βλάστησης ανάμεσα στις λωρίδες

Στόχος ήταν να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα της προστασίας της προσθήκης ενός χαμηλής απορροφητικότητας ηχοπέτασμα μεταξύ των ραγών του τραμ όταν ένα χαμηλό ηχοπέτασμα είναι ήδη χτισμένο στην άκρη της υποδομής και κατά μήκος του δρόμου. Οι προβλέψεις διεξήχθησαν για 1 m ηχοπετάσματα κατασκευασμένα από υπόστρωμα βλάστησης (πάχους 40 cm) με ένα λεπτό άκαμπτο πυρήνα. Η διαμόρφωση ήταν τραμ δύο κατευθύνσεων με ταχύτητα κίνησης 30 km/h. (Το ηχοπέτασμα ανάμεσα στις λωρίδες είναι ένα βλ. Σχήμα 2.10). Εξομοιώθηκαν τρεις αστικές περιπτώσεις : ανοιχτή περιοχή (χωρίς κτίρια), κτίριο στην πλευρά του δέκτη και κτίρια και στις δύο πλευρές.

Συμπεράσματα:

Το αποτέλεσμα της προστασίας της προσθήκης ενός χαμηλής απορροφητικότητας ηχοπετάσματος μεταξύ δύο τραμ μπορεί να είναι σημαντικό. Η λύση αυτή προτείνεται για τη δημιουργία περιοχών προστατευμένες από το θόρυβο κοντά στις υποδομές των ραγών του

τραμ, δηλαδή, όταν είναι κατασκευασμένος ένας ποδηλατόδρομος κατά μήκος του τραμ ή όταν το τραμ περνάει μέσα από πλατεία, αστικό πάρκο ή μια περιοχή αναψυχής.

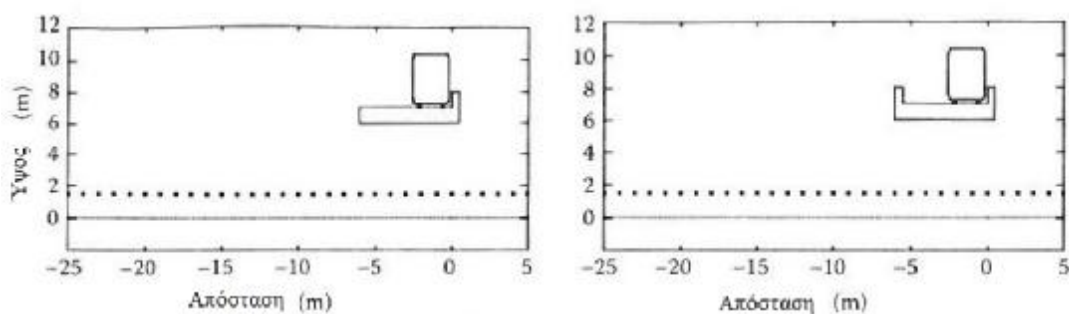
Η αρχή αυτή θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε αρκετά ανοιχτούς δρόμους (λεωφόροι) όπου ο θόρυβος του περιβάλλοντος για τους πεζούς ή τους ποδηλάτες που κινούνται κατά μήκος του δρόμου είναι πολύ υψηλός. Ενέργεια τέτοιου τύπου θα βελτίωνε την ποιότητα τέτοιων χώρων.

Τα αποτελέσματα της προστασίας είναι επίσης αποτελεσματικά για τους πρώτους ορόφους των κτιρίων (έως 5 m) χτισμένα κατά μήκος των δρόμων και των τραμ. Ωστόσο, για υψηλότερα πατώματα, τέτοιου είδους απορροφητικών χαμηλών ηχοπετασμάτων έχουν μικρό αντίκτυπο στη μείωση του θορύβου.

2.3.4 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης στις άκρες των γεφυρών

Εδώ, εξετάζεται η επιπλέον απόσβεση του θορύβου που παρέχεται από ένα απορροφητικό ηχοπέτασμα 1 m (που αποτελείται από ένα υπόστρωμα βλάστησης πλάτους 40 cm, που περιβάλλει ένα λεπτό άκαμπτο πυρήνα), σε σύγκριση με ένα μη απορροφητικό ηχοπέτασμα χτισμένο στην άκρη μιας γέφυρας ύψους έξι μέτρων (είτε στη μία πλευρά είτε και στις δύο), στην περίπτωση των δύο κατευθύνσεων του τραμ (με ταχύτητα κίνησης 30 km/h), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.

Εδώ η εστίαση γίνεται στον πεζό, σε μια διάβαση πεζών, ή σε ένα ποδηλατιστή που κινείται κάτω από τη γέφυρα και του δέκτες να βρίσκονται σε ύψος 1.5 m. (τελείες στο Σχήμα 2.11).



**Εικόνα 2.11 : Επισκόπηση γέφυρας με ηχοπέτασμα στη μια ή και στις δύο πλευρές :
Περίπτωση τραμ.**

Συμπεράσματα:

Το αποτέλεσμα της προστασίας της προσθήκης ενός χαμηλής απορροφητικότητας ηχοπετάσματος στην άκρη των γεφυρών μπορεί να είναι μεγάλο, για τις υποδομές και των τραμ και των δρόμων. Προτείνεται η χρήση χαμηλών ηχοπετασμάτων για τη βελτίωση των περιοχών κάτω από τις γέφυρες, ιδιαίτερα όπου έχουν σχεδιαστεί διάδρομοι για πεζούς και ποδηλάτες.

Να σημειωθεί πως η προσθήκη ενός απορροφητικού ηχοπετάσματος ύψους ενός μέτρου στην άκρη των γεφυρών δεν εμποδίζει τους επιβάτες των τραμ να δουν το τοπίο πέρα από τη γέφυρα. Το ελαφρύ βάρος του υποστρώματος βλάστησης το καθιστά κατάλληλο προϊόν για γέφυρες.

Με τη δημιουργία περιοχών προστατευμένες από το θόρυβο κάτω από γέφυρες, προωθούνται οι φιλικόι προς το περιβάλλον τρόποι μεταφοράς (ποδηλασία, περπάτημα) καθώς και περιοχές αναψυχής κατά μήκος των ποταμών όπου τα φυσικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος πρέπει να διατηρηθούν.

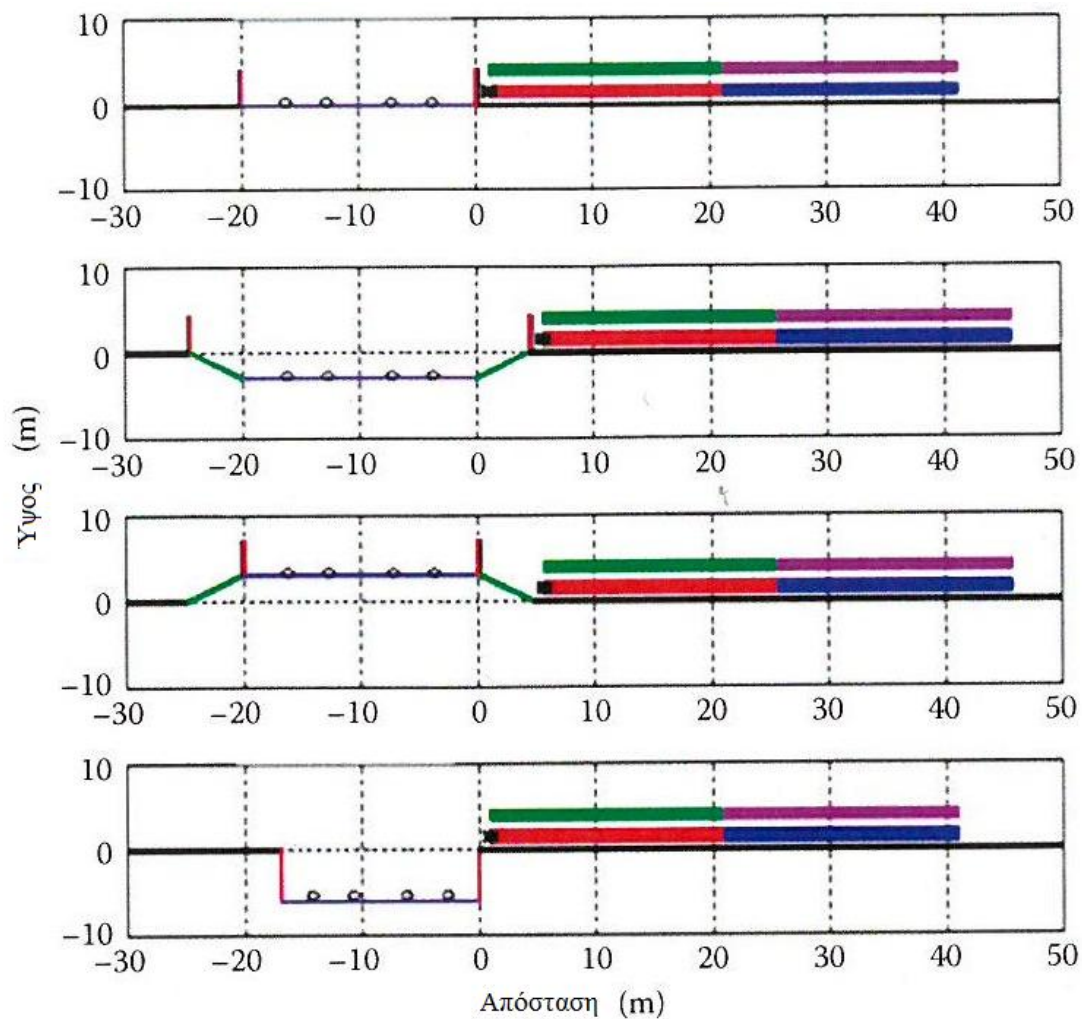
2.4 ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΙ

2.4.1 Κάλυψη συμβατικού ηχοπετάσματος με υπόστρωμα βλάστησης

Εκτιμήθηκε η ακουστική απόσβεση λόγω κάλυψης ενός συμβατικού ύψους τεσσάρων μέτρων άκαμπτο ηχοπέτασμα, με ένα υπόστρωμα βλάστησης σε έναν αυτοκινητόδρομο τεσσάρων λωρίδων. Το μοντελοποιημένο σενάριο αποτελείται από 85% ελαφριά οχήματα (120 km/h) και 15% βαριά (90 km/h). Εξετάστηκαν τέσσερις διαμορφώσεις : επίπεδο έδαφος, κατωφερής δρόμος (3m κάτω από το επίπεδο έδαφος), δρόμος σε ανάχωμα (3m πάνω από το επίπεδο έδαφος) και χαντάκια, πλάτους 17 και 20 m (6m βαθιά). (Στο σχήμα 2.12, όπου το υπόστρωμα βλάστησης εφαρμόστηκε στη μεριά των ηχοπετασμάτων/χαντακιών που 'βλέπει' στο δρόμο).

Το υπόστρωμα βλάστησης μπορεί να καλύπτει μερικώς (μισή επιφάνεια) ή ολόκληρα τα ίσια , άκαμπτα ηχοπετάσματα (ή τοίχους στην περίπτωση των χαντακιών) τις επιφάνειες που 'βλέπουν' στο δρόμο. Στην περίπτωση της μερικής κάλυψης, διαφορετικές μετρήσεις δοκιμάστηκαν : το κατώτερο μισό, το μεσαίο μισό, το ανώτερο μισό και εναλλακτική λωρίδα του μισού μέτρου από το κατώτερο μέρος προς το ανώτερο (

άκαμπτο/απορροφητικό/άκαμπτο και ούτω καθεξής). Οι υπολογισμοί διεξήχθησαν για τις τέσσερις ζώνες και τη θέση του δέκτη των πεζών (Σχήμα 2.1).



Εικόνα 2.12 : Γεωμετρίες των τεσσάρων εδάφους (από πάνω ως κάτω) : επίπεδο, συμπίεμένο, επιχωματωμένο και χαντάκι. Τα χρώματα δείχνουν τις τέσσερις ζώνες δεκτών και ο κύκλος είναι η θέση του δέκτη στο πεζοδρόμιο.

Συμπεράσματα:

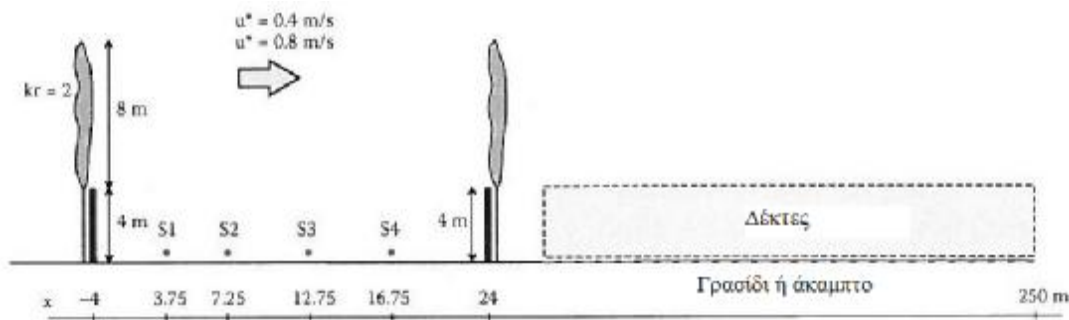
Η μείωση του θορύβου που αποκτάται από ένα υπόστρωμα βλάστησης από άκαμπτα ηχοπετάσματα είναι κοντά με εκείνη που παρατηρείται στα συμβατικά απορροφητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τέτοια συμβατικά ηχοπετάσματα και διαμόρφωση χαντακιών (ύψους αρκετών μέτρων). Έτσι το υπόστρωμα βλάστησης φαίνεται να είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος εναλλακτικής μεταχείρισης για τα περισσότερα συμβατικά και

άκαμπτα ηχοπετάσματα και τοίχους. Η προσθήκη ζωντανών φυτών δεν επηρεάζει σημαντικά την ακουστική απορρόφηση του στρώματος του χώματος και μπορεί να την ενισχύσει, ανάλογα με το μέγεθος των φύλλων.

Η λύση αυτή με τη χρήση του χωμάτινου υποστρώματος θα αυξήσει τη βλάστηση κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων και, ως εκ τούτου, θα βελτιώνει τη σφαιρική εμφάνιση ενός συμβατικού απορροφητικού ηχοπετάσματος, θα συνεισφέρει στη βιοποικιλότητα και θα βοηθούσε στην αποφυγή των γκράφιτι ενώ θα παρείχε ισοδύναμη ακουστική απόδοση. Εάν ο δρόμος βρίσκεται σε χαντάκι ή τομή, έχειδειχθεί πως όταν ο δέκτης δεν είναι πολύ κοντά στην άκρη του πάνω μέρους του δρόμου, η μείωση θορύβου μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης έχει επισημανθεί ότι καλύπτοντας τα χαμηλότερα μέρη των τοίχων του χαντακιού, δίνει μεγαλύτερες μειώσεις από όταν καλύπτονται τα υψηλότερα μέρη. Εξ' άλλου, η παρουσία φυτών μπορεί να συνεισφέρει οπτικά σε μια πιο ευχάριστη ατμόσφαιρα και το υπόστρωμα μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οπότε, αυτού του τύπου λύση συνίσταται για τέτοιες περιορισμένες ρυθμίσεις.

2.4.2 Προσθήκη μιας σειράς δέντρων πίσω από συμβατικό ηχοπέτασμα

Το μέγεθος της προστατευόμενης περιοχής και το μέγεθος της μείωσης του θορύβου που παρέχεται από τα ηχοπετάσματα μειώνονται σημαντικά σε υπήνεμες συνθήκες (με τη φορά του ανέμου). Το αποτέλεσμα των γραμμών των δέντρων, που παίζουν το ρόλο των ανεμοφρακτών κάτω από υπήνεμες συνθήκες, αξιολογήθηκε για μια τυπική κατάσταση κυκλοφοριακού θορύβου. Σε κάθε πλευρά του δρόμου, είναι παρών ένα άκαμπτο, ίσιο ηχοπέτασμα ύψους τεσσάρων μέτρων, συνορεύοντας με το δρόμο (Σχήμα 2.3). Η κυκλοφορία αποτελείται από 100% ελαφριά οχήματα και η ταχύτητά τους κυμαίνεται μεταξύ 30 και 130 km/h. Ορίζεται μια υπήνεμος ζώνη δέκτη. Λόγω της συνεπαγόμενης διάθλασης του ήχου από τον άνεμο, αναμένεται μια προς τα κάτω διάθλαση στη σκοτεινή ζώνη, περιορίζοντας έτσι την προστασία του ηχοπετάσματος.



Εικόνα 2.13 : Εγκατάσταση για σειρές δέντρων πίσω από ίσια ηχοπετάσματα ύψους 4 m.

Συμπεράσματα:

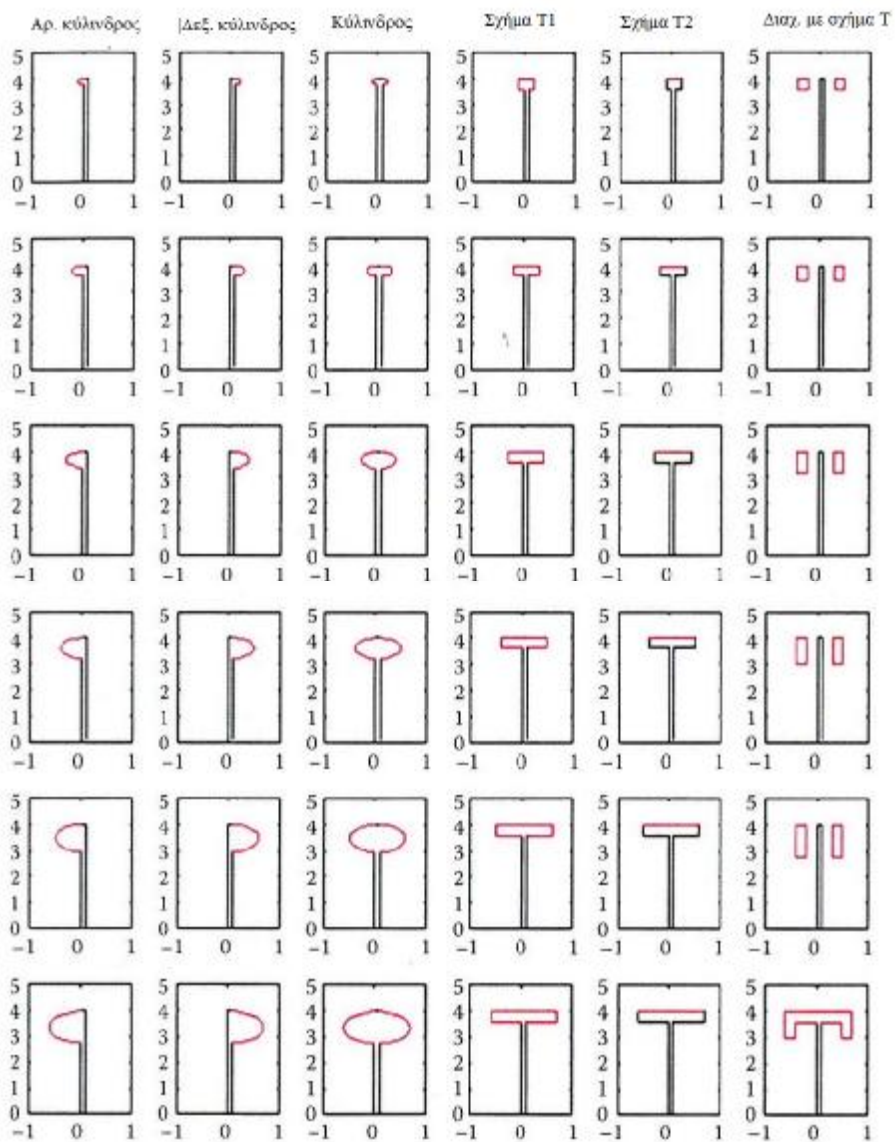
Η χρήση μιας σειράς δέντρων πίσω από συμβατικά ηχοπετάσματα είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε ρύθμιση αυτοκινητοδρόμου με ανοιχτά πεδία, όπου η δύναμη του ανέμου είναι μεγαλύτερη λόγω έλλειψης ανεμικού στεγάστρου από το περιβάλλον. Θα πρέπει να εξετασθεί η χρήση ενός αεροδυναμικά λείου αναχώματος. Ωστόσο, ένα ανάχωμα εδάφους απαιτεί περισσότερο χώρο από ένα συμβατικό ηχοπέτασμα, οπότε οι σειρές δέντρων πίσω από τα ηχοπετάσματα θα ήταν μια πρακτική λύση σε περιπτώσεις με περιορισμένο χώρο. Επίσης επιτρέπει τη μετασκευή των ηχοπετασμάτων όταν έχουν εντοπισθεί προβλήματα σχετικά με τον άνεμο.

Εν απουσία του ανέμου, η υψηλή σειρά δέντρων θα οδηγήσει στον προς τα κάτω διασκορπισμό του ήχου. Τα αποτελέσματα είναι μικρότερα από ± 1 dB (A) για θόρυβο αυτοκινητοδρόμου. Το αρνητικό του προς τα κάτω διασκορπισμού πρέπει να ζυγισθεί κατά της φοράς του ανέμου και την ταχύτητα διανομής του ανέμου σε δεδομένες τοποθεσίας και, ειδικά, του προσανατολισμού του δρόμου, και κατά συνέπεια, το ηχοπέτασμα σε σχέση με την κατεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου είναι κάποιας σπουδαιότητας. Οι θόλοι των δέντρων μπορούν να 'σχεδιαστούν' περαιτέρω, ειδικά με το να αφεθούν κενά ή με την αλλαγή της πυκνότητας των θόλων με την επιλογή ειδών. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν το που θα παρατηρηθούν οι μέγιστες βελτιώσεις στη μείωση του ήχου σε ανεμώδεις καταστάσεις. Σε ένα επιτυχημένο σχέδιο, οι μέγιστες βελτιώσεις θα πρέπει να συμπίπτουν με την τοποθεσία που θα αναμένονται να έχουν οι δέκτες. Κενά και λιγότερο πυκνοί θόλοι θα διανέμουν θετικά αποτελέσματα σε μια υπήνεμο ζώνη, αλλά η έκταση της αποκατάστασης της προστασίας που ήταν αρχικά χαμένη από τον άνεμο (εν απουσία δέντρων) θα είναι πιο περιορισμένη.

Η τοποθέτηση σειρών δέντρων πίσω από ηχοπετάσματα είναι κοινή πρακτική, κυρίως για να καταστεί δυνατή η καλύτερη ενσωμάτωση των κάθετα ανεγερθέντων τοίχων θορύβου στο τοπίο. Η ανάλυση αυτή δείχνει πως υπάρχουν επίσης έμμεσα ακουστικά οφέλη και συγκεκριμένα, την πρόληψη και τη διαμόρφωση της διάθλασης.

2.4.3 Προσθήκη καλυμμάτων βλάστησης στις κορυφές των ηχοπετασμάτων

Εδώ, παρουσιάζονται αποτελέσματα από αξιολογήσεις της αποτελεσματικότητας των καλυμμάτων βλάστησης των ηχοπετασμάτων (υπόστρωμα βλάστησης κατάλληλο για να φυτρώσει βλάστηση) πάνω σε ένα υπάρχον άκαμπτο ηχοπέτασμα ύψους τεσσάρων μέτρων. Οι προβλέψεις που διεξήχθησαν αφορούν ένα ανεγερθέν ηχοπέτασμα κατά μήκος ενός αυτοκινητοδρόμου τεσσάρων λωρίδων με στατιστικά 85% ελαφριά οχήματα (120 km/h) και 15% βαριά (90 km/h). Τα διαφορετικά σχέδια των καλυμμάτων παρουσιάζονται στο Σχέδιο 2.14.



Εικόνα 2.14 : Γεωμετρίες και συμβολισμοί των καλυμμάτων βλάστησης που μελετήθηκαν (το κόκκινο είναι το απορροφητικό υπόστρωμα).

Συμπεράσματα:

Όσο πιο χαμηλή η θέση του δέκτη και όσο πιο κοντά είναι στο ηχοπέτασμα, τόσο πιο αποδοτικό είναι το υπόστρωμα βλάστησης. Έτσι, η λύση αυτή πρέπει να αφιερωθεί

- Στους πεζούς και ποδηλάτες που κινούνται πίσω από το ηχοπέτασμα (λίγα μέτρα μακριά το πολύ) για τη δημιουργία ενός μονοπατιού προστατευμένου από το θόρυβο, και

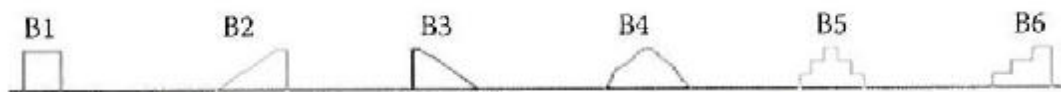
- Σε μικρές περιοχές αναψυχής, κήπους ή εισόδων κτιρίων που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 20 m πίσω από το ηχοπέτασμα.

Στην περίπτωση των ημικυλινδρικών καλυμμάτων προτείνεται πως θα πρέπει να βρίσκονται στην πλευρά του δέκτη στο ηχοπέτασμα, επειδή προσφέρουν μεγαλύτερη μείωση θορύβου με αυτή τη ρύθμιση.

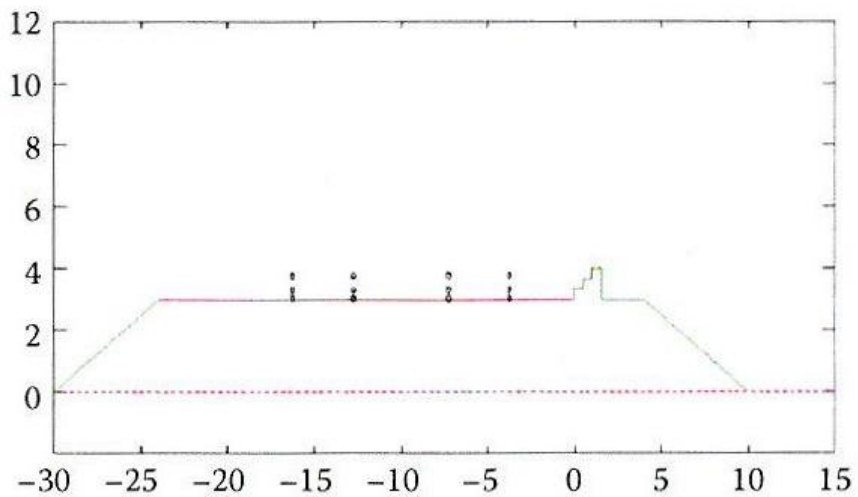
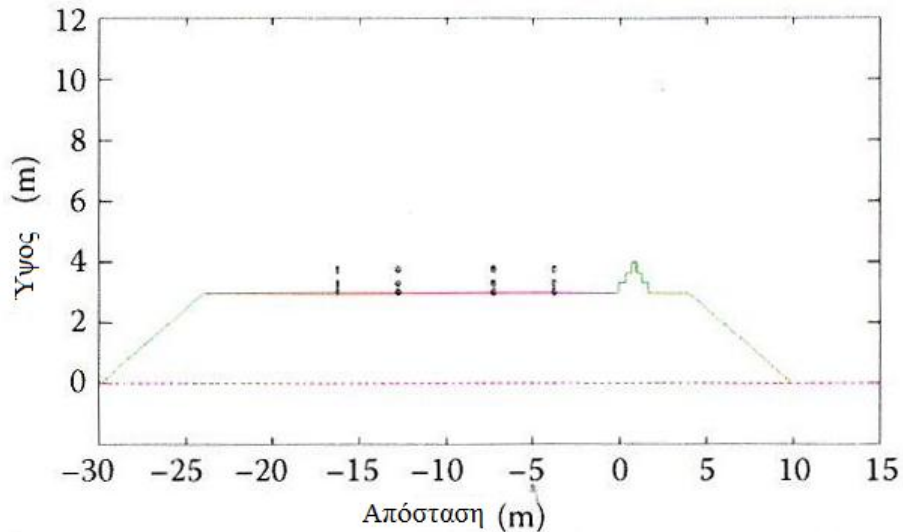
2.4.4 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματα γης κατά μήκος επιχωματωμένης υποδομής

Σκοπός ήταν η αξιολόγηση του αποτελέσματος προστασίας χαμηλών αναχωμάτων γης σε ανοιχτές περιοχές (χωρίς γύρω κτίρια) των οποίων το ύψος είναι 1 m και εμβαδόν διατομής 1 m². Οι γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων δίνονται στα Σχέδια 2.15 και 2.16.

Θεωρήσαμε έναν αυτοκινητόδρομο τεσσάρων λωρίδων σε τριών μέτρων ανάχωμα σε ανοιχτή έκταση. Το μοντελοποιημένο σενάριο απαρτιζόταν από 85% ελαφριά οχήματα στα 120 km/h και 15% βαριά στα 90% km/h.



Εικόνα 2.15 : Γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων ύψους 1 m (B1 ως B6).



Εικόνα 2.16 : Γενική επισκόπηση για τα αναχώματα B5 και B6 για ρύθμιση αυτοκινητοδρόμου.

Συμπεράσματα:

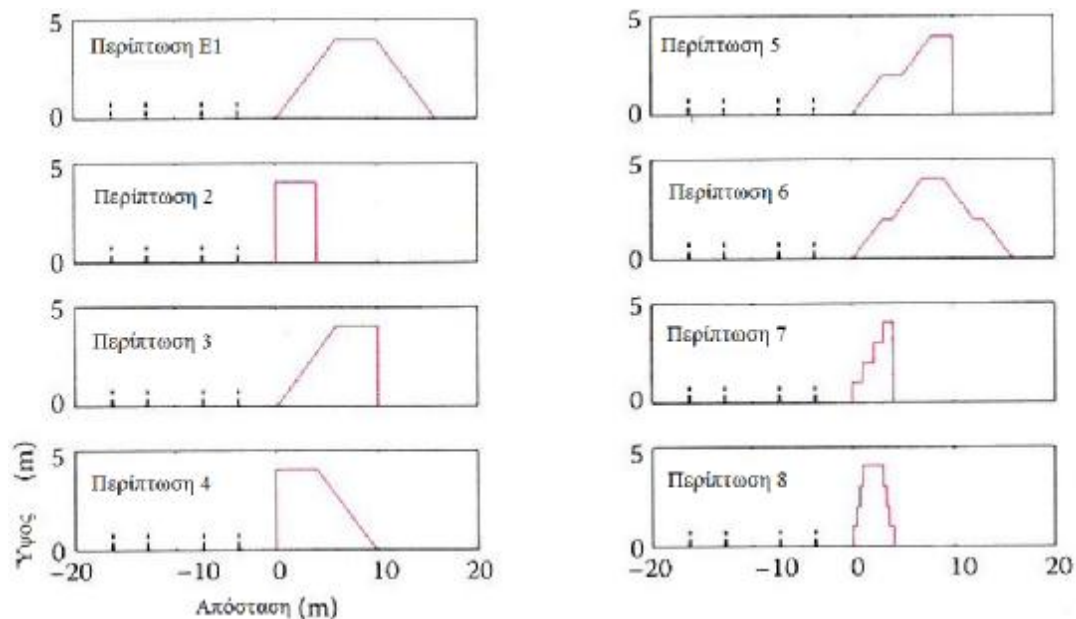
Τα χαμηλά αναχώματα αποδείχθηκαν πως είναι μια πιθανή προστασία από το θόρυβο για δέκτες ύψους μέχρι 5 m. Η χρήση τέτοιου είδους μείωσης θορύβου προτείνεται μόνο όταν ο αυτοκινητόδρομος έχει επιχωματωθεί (τουλάχιστον λίγα μέτρα ύψος) ή όταν το υψόμετρο της περιοχής του δέκτη είναι χαμηλότερο κατά λίγα μέτρα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς της υποδομής.

Προτείνεται επίσης το χτίσιμο των χαμηλών αναχωμάτων ‘τετράγωνα’ ή ‘σκαλιά’ (B1, B5, B6 στο Σχήμα 2.15) αντί των πιο συμβατικών ‘τριγώνων’ (B2, B3, B4).

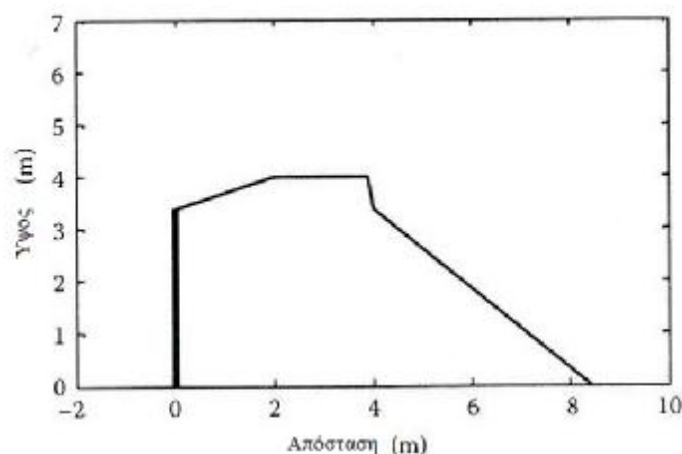
2.4.5 Χτίζοντας αναχώματα σύνθετης μορφής

Σκοπός ήταν η αξιολόγηση του αποτελέσματος προστασίας αναχώματος τεσσάρων μέτρων σύνθετης μορφής κατά μήκος αυτοκινητοδρόμων. Οι προβλέψεις διεξήχθησαν για ένα σενάριο κυκλοφορίας από αποτελείται από 85% ελαφριά οχήματα στα 120 km/h και 15% βαριά στα 90 km/h. Να σημειωθεί ότι αυτή η επίδοση προστασίας εκφράζεται ως η επιπλέον απόσβεση θορύβου σε σχέση με μια κατάσταση αναφοράς : τεσσάρων μέτρων ψηλό ίσιο, άκαμπτο ηχοπέτασμα τοποθετημένο στην άκρη της υποδομής του δρόμου ή του σιδηροδρόμου.

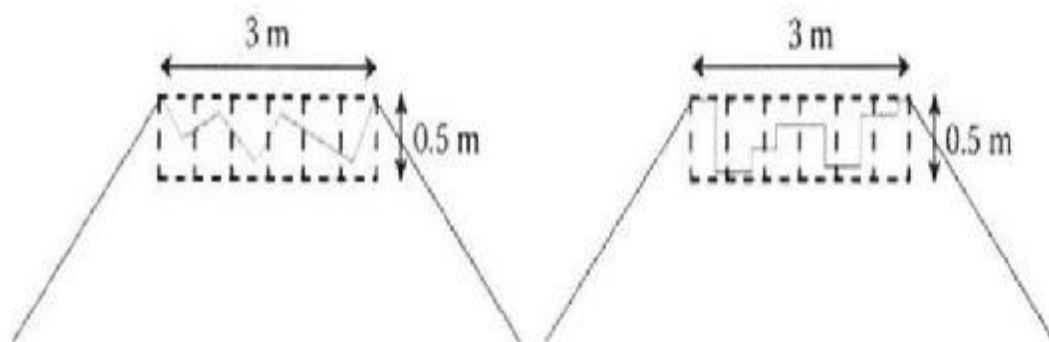
Θεωρήθηκαν απλές μη επίπεδες γεωμετρίες που φαίνονται στο Σχέδιο 2.17. Το πρώτο ανάχωμα (E1) είναι ένα συμβατικό τραπεζοειδές ανάχωμα (κόκκινες γραμμές). Πραγματοποιήθηκαν επίσης βελτιστοποιήσεις για το σχεδιασμό μιας βελτιστοποιημένης συσκευής μείωσης του ήχου κατά μήκος ενός αυτοκινητοδρόμου με το συνδυασμό ενός αναχώματος με ένα ίσιο, άκαμπτο ή με κλίση ηχοπέτασμα, με το μέσο ύψος να περιορίζεται στα τέσσερα μέτρα (ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 2.18).



Εικόνα 2.17 : Γεωμετρίες των οκτώ αναχωμάτων που μελετήθηκαν για την περίπτωση του αυτοκινητοδρόμου (η γη με χόρτα φαίνεται με κόκκινο).



Εικόνα 2.18 : Ένα παράδειγμα συνδυασμού ενός αναχώματος (λεπτή γραμμή) και ενός ηχοπετάσματος (παχιά γραμμή).



Εικόνα 2.19 : Ένα παράδειγμα τριγωνικών και ορθογώνιων αυλακώσεων.

Σε άλλη εργασία, μελετήθηκε το ακουστικό αποτέλεσμα της εισαγωγής ενός προφίλ ύψους (σε μορφή αυλακιών βάθους 50 cm) στην ανώτερη επιφάνεια ενός τραπεζοειδούς ανάχωμα, τα αυλάκια είναι τριγωνικά ή τετραγωνικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Να σημειωθεί ότι τα υψηλότερα σημεία του προφίλ είναι κάτω από το όριο των τεσσάρων μέτρων.

Τελικά μελετήθηκε το αποτέλεσμα της σημειακής τραχύτητας (προφίλ πολεμίστρες ή κρένελ) σε διαφορετικά επίπεδα σε ένα, δύο ή τρία πρόσωπα του αναχώματος αυτού.

Συμπεράσματα:

Προτείνεται τα αναχώματα κατά μήκος αυτοκινητοδρόμων να είναι σχεδιασμένα να έχουν :

- Σχήμα E4 (το πηγαίο πρόσωπο του αναχώματος κατακόρυφο, ή περίπου κατακόρυφο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό ενός ηχοπετάσματος ή μιας κοφίνωσης με ένα ανάχωμα) και

- Σχήμα E5 ή E6 (η μη ομαλότητα προστίθεται για να αποκτηθεί το σχήμα ‘σκαλιών’).

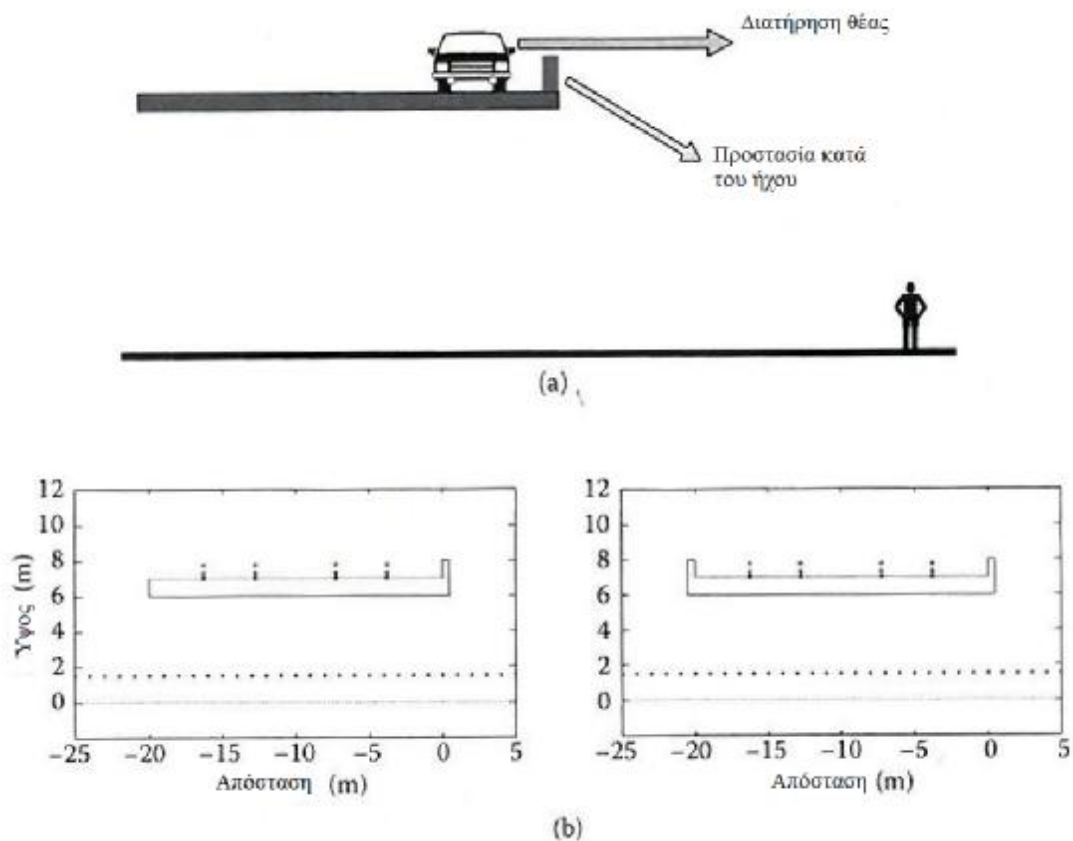
2.4.6 Χτίζοντας χαμηλά ηχοπετάσματα βλάστησης στις άκρες γεφυρών

Αξιολογήθηκε η επιπλέον απόσβεση του θορύβου λόγω του απορροφητικού ηχοπετάσματος ύψους ενός μέτρου (αποτελείται από ένα υπόστρωμα βλάστησης πλάτους 40 cm, που περιβάλλει έναν λεπτό, άκαμπτο πυρήνα), σε σχέση με ένα μη απορροφητικό ηχοπέτασμα. Οι προβλέψεις διεξήχθησαν για ένα ή διάφορα ηχοπετάσματα χτισμένα κατά μήκος της μιας ή και των δύο ακρών μιας γέφυρας ύψους έξι μέτρων, που έχει έναν αυτοκινητόδρομο τεσσάρων λωρίδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20(a)(b). Η σύνθεση της κυκλοφορίας θεωρήθηκε ότι είναι 85% ελαφριά οχήματα στα 120 km/h και 15% βαριά στα 90 km/h.

Εδώ η εστίαση γίνεται στους πεζούς και τους ποδηλάτες που περνάνε κάτω από τη γέφυρα, των οποίων οι δέκτες βρίσκονται σε ύψος 1 m (γραμμές με τις κουκίδες).

Συμπεράσματα:

Το αποτέλεσμα της προστασίας της προσθήκης ενός χαμηλού ηχοπετάσματος στις άκρες των γεφυρών μπορεί να είναι μεγάλο. Η χρήση τους προτείνεται για τη βελτίωση του ηχητικού περιβάλλοντος κάτω από τις γέφυρες, ιδιαίτερα εκεί όπου έχουν σχεδιαστεί τα μονοπάτια των πεζών και των ποδηλατιστών.



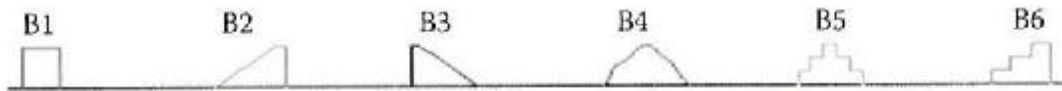
Εικόνα 2.20 : (a) Μια απεικόνιση των αποτελεσμάτων του ηχοπετάσματος στη γέφυρα και (b) οι γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό με ένα ηχοπέτασμα (αριστερά) στη μια πλευρά ή και στις δύο (δεξιά).

Κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι η προσθήκη ενός απορροφητικού ηχοπετάσματος ύψους 1 m στις άκρες των γεφυρών δεν αποτρέπει τους οδηγούς από το να δουν το τοπίο πέρα από τη γέφυρα. Επιπλέον, το μικρό βάρος του υποστρώματος βλάστησης το κάνει κατάλληλο για γέφυρες. Με τη δημιουργία περιοχών προστατευμένες από το θόρυβο κάτω από γέφυρες, προωθούνται οι φιλικόι προς το περιβάλλον τρόποι μεταφοράς (ποδηλασία, περπάτημα) καθώς και περιοχές αναψυχής.

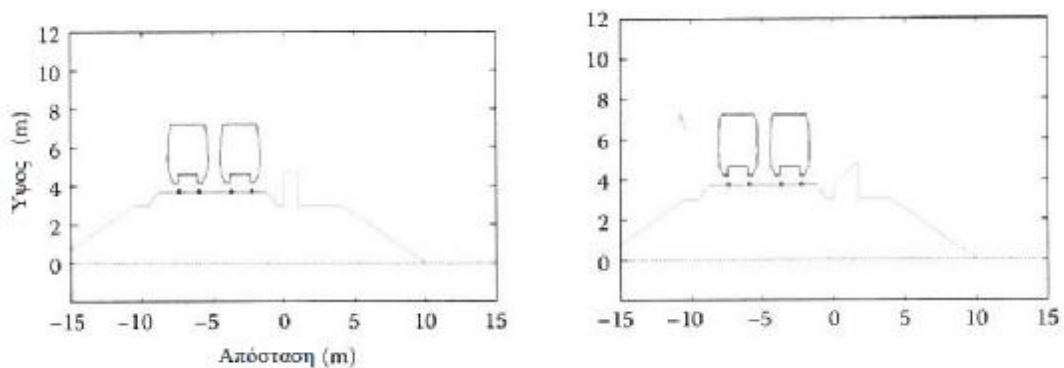
2.5 ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΟΙ

2.5.1 Χτίζοντας χαμηλά αναχώματα κατά μήκος επιχωματωμένης υποδομής

Στόχος ήταν να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα προστασίας χαμηλών αναχωμάτων με βλάστηση σε ανοιχτές περιοχές (χωρίς κτίρια τριγύρω) των οποίων το ύψος είναι 1 m και το εμβαδόν διατομής 1 m². Οι γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων φαίνονται στο Σχήμα 2.21.



Εικόνα 2.21 : Γεωμετρίες των μελετημένων αναχωμάτων ύψους 1 m (B1 ως B6).



Εικόνα 2.22 : Γενική επισκόπηση για αναχώματα B1 και B2 για ρύθμιση σιδηροδρόμου TGV.

Θεωρήθηκε ένας σιδηρόδρομος δύο κατευθύνσεων, μεγάλης ταχύτητας τρένο (TGV τρένα υψηλών ταχυτήτων, με ταχύτητα κίνησης 300 km/h) σε ανάχωμα ύψους 3 m. Να σημειωθεί ότι τα αναχώματα είναι ένα μέτρο πάνω από το επίπεδο του αναχώματος (πάχους 50 cm), έτσι ώστε το συνολικό τους ύψος να είναι 1.5 m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22.

Συμπεράσματα:

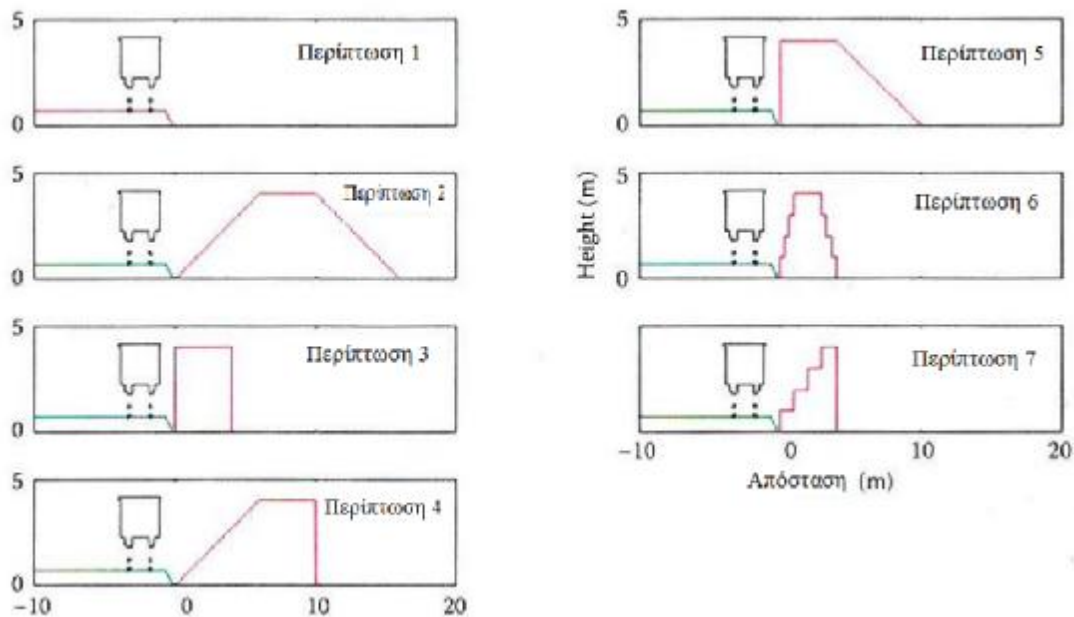
Τα χαμηλά αναχώματα αποδείχθηκαν πως είναι ενδεχόμενη λύση προστασίας κατά του θορύβου, για θέσεις δεκτών ύψους έως και 5 μέτρα. Η χρήση τέτοιων λύσεων απόσβεσης του θορύβου, προτείνονται μόνο όταν οι σιδηρόδρομοι TGV είναι σε ανάχωμα (ύψους τουλάχιστον λίγων μέτρων) ή όταν το υψόμετρο της περιοχής του δέκτη είναι χαμηλότερο κατά λίγα μέτρα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς της υποδομής.

Προτείνεται το χτίσιμο χαμηλών αναχωμάτων σχήματος ‘σκαλιών’ ή ‘τετραγώνων’ (σχήματα B1, B5 και B6 στο Σχήμα 2.21) αντί των πιο συμβατικών τριγωνικών σχημάτων (B2, B3 και B4).

2.5.2 Χτίζοντας αναχώματα σύνθετου σχήματος

Στόχος ήταν να αξιολογήσουμε το αποτέλεσμα προστασίας των σύνθετων σχημάτων, ύψους τεσσάρων μέτρων, αναχωμάτων κατά μήκος σιδηροδρόμου (TGV τρένο μεγάλης ταχύτητας , με ταχύτητα κίνησης 300 km/h και με φορτίο 90 km/h). Να σημειωθεί ότι η απόδοση της προστασίας εκφράζεται ως η επιπλέον απόσβεση θορύβου σε σχέση με μία κατάσταση αναφοράς : 4 μέτρων ίσιο, άκαμπτο ηχοπέτασμα που βρίσκεται στην άκρη της υποδομής της σιδηρογραμμής.

Θεωρήθηκαν απλές μη επίπεδες γεωμετρίες που φαίνονται στο Σχήμα 2.23. Το πρώτο ανάχωμα (E1) είναι ένα συμβατικό τραπεζοειδές ανάχωμα.



Εικόνα 2.23 : Γεωμετρία του χωρίς ανάχωμα και των επτά αναχωμάτων που μελετήθηκαν για τις περιπτώσεις των τρένων (γη με χόρτα με κόκκινο, με πράσινο είναι τα χαλίκια).

Συμπεράσματα:

Τα ύψους τεσσάρων μέτρων αναχώματα αποδείχθηκαν πως είναι πιο χρήσιμα δίπλα σε σιδηροδρόμους παρά αυτοκινητοδρόμους. Προτείνεται τα αναχώματα να σχεδιαστούν για να έχουν το σχήμα E4 (το 'πηγαίο' πρόσωπο του αναχώματος είναι κατακόρυφο, ή περίπου κατακόρυφο). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό ηχοπετάσματος με χωμάτινο ανάχωμα.

Επειδή η επιπλέον απόσβεση στο δέκτη των πεζών μπορεί να αυξηθεί κατά 5-6 dB(A), η κίνηση αυτή προτείνεται για τη μείωση έκθεσης στο θόρυβο σε περιοχές όπου οι άνθρωποι περπατούν ή κάνουν ποδήλατο ακριβώς πίσω από το ανάχωμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Ακουστική επίδοση του χωμάτινου υποστρώματος και του υποστρώματος βλάστησης σε ένα αστικό περιβάλλον

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα μετρημένα και προβλεπόμενα δεδομένα για τον ακουστικό συντελεστή απορρόφησης με ή χωρίς ζωντανά φυτά. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν ότι η ικανότητα του χώματος να απορροφά τον ήχο ελέγχεται από το πορώδες του χώματος και από την υγρασία του. Φαίνεται ότι αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο μοντέλο ρευστού και την προσέγγιση της μήτρας μεταφοράς. Η ίδια προσέγγιση μοντελοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της απορροφητικότητας ενός φυτού με και χωρίς χώμα. Η ικανότητα ενός ζωντανού φυτού να απορροφά τον ήχο ελέγχεται από το ύψος του φυτού, την πυκνότητα των φύλλων της περιοχής (LAD) και την κυρίαρχη γωνία προσανατολισμού των φύλλων. Γενικά, φυτά με υψηλό δείκτη LAD και γωνία προσανατολισμού των φύλλων, είναι ικανά να απορροφήσουν μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας του ήχου και σε όλη την ευρύτερη περιοχή των συχνοτήτων. Φαίνεται ότι τα ζωντανά φυτά μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την απορροφητικότητα του πηλώδους χώματος, με σχετικά χαμηλό ποσοστό ανοιχτών, διασυνδεδεμένων πόρων σε όλο το φάσμα συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Στην περίπτωση της μικρής συχνότητας του χώματος, η παρουσία ζωντανών φυτών ενισχύει την ικανότητα του χώματος να απορροφά τον ήχο σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Ο συντελεστής απορρόφησης που διαχέεται σε αυτά τα συστήματα χώματος-φυτών μπορεί να σχεδιαστεί να είναι ίδιος ή υψηλότερος από αυτό που θα περιμέναμε από τεχνητούς απορροφητές μέσω μιας προσεκτικής επιλογής του ζωντανού φυτού.

3.1 Εισαγωγή

Το φύλλωμα και οι φράκτες φυτών έχουν πολλές σημαντικές λειτουργίες για το περιβάλλον μας, ειδικά σε πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα. Παράγουν οξυγόνο, καθαρίζουν τον αέρα και έχουν το ρόλο οπτικών αισθητικών στοιχείων, ανεμοφρακτών και φυσικό περιβάλλον για πουλιά και έντομα. Τα φυτά που μεγαλώνουν σε προσόψεις κτιρίων (Σχήμα 3.1) συνεισφέρουν στο ισορροπημένο μικροκλίμα με την ικανότητα τους να αποθηκεύουν υγρασία. Ωστόσο, τα φυτά σπανίως χρησιμοποιούνται για έλεγχο του θορύβου σε αστική ανάπτυξη επειδή πιστεύεται, εδώ και πολύ καιρό, ότι δε διαθέτουν καμία χρήσιμη ακουστική

ιδιότητα. Σκοπός της έρευνας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό είναι να ερευνήσει το δυναμικό της χρήσης των φυτών σε στοιχεία ελέγχου του θορύβου και να καθορίσει τα χαρακτηριστικά αυτά των φυτών που τα κάνουν ιδιαίτερος καλά σε ό,τι αφορά τις ιδιότητες τους στην απορρόφηση και μετάδοση του ήχου. Οι αναφερθείσες έρευνες έχουν διεξαχθεί υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες καθώς και σε εξωτερικούς χώρους. Επιπλέον, έχουν υιοθετηθεί εμπειρικά και θεωρητικά μοντέλα τα οποία έχουν εφαρμοσθεί για την επεξήγηση των συντελεστών της παρατηρούμενης απόσβεσης και απορρόφησης και για την πρόβλεψη των ακουστικών ιδιοτήτων των φυτών όταν χρησιμοποιούνται σαν μέρος της αστικής αρχιτεκτονικής και της αρχιτεκτονικής του τοπίου.

Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου τούτου εξετάζει την πειραματική διάταξη και διαδικασίες μέτρησης, το πως τα συστήματα χώματος-φυτού μελετώνται σε σωλήνα αντίστασης. Εξηγείται η θεωρία πίσω από τα μέτρα αντίστασης. Το επόμενο μέρος συγκρίνει δύο διαφορετικά είδη χώματος και την επίδοσή τους όταν βρέχονται. Το μέρος που ακολουθεί μελετά την απόκριση ενός μοντέλου για χώματα με διαφορετικά επίπεδα διαπότισης. Η μελέτη των χαμηλά αναπτυσσόμενων φυτών σχηματίζει το τελευταίο μέρος όπου τα συστήματα χώματος-φυτού μοντελοποιούνται και με τη χρήση της προσέγγισης της μήτρας μεταφοράς.



Εικόνα 3.1 : Φωτογραφία ζωντανής πρόσοψης στη Λυών, Γαλλία.

3.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασίες μέτρησης

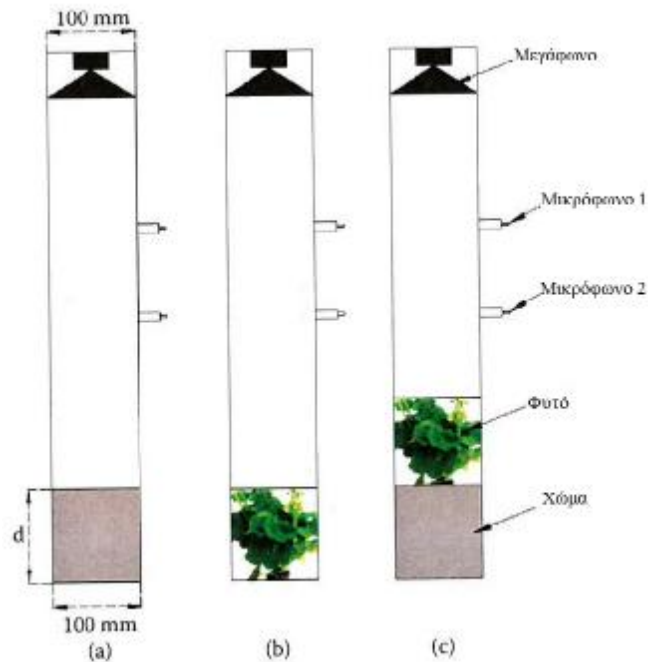
Για το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού πράσινου στοιχείου ελέγχου του θορύβου, είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πεδίου του ήχου στο φυτό και του πορώδους χώματος που υποστηρίζει την ανάπτυξη αυτού του φυτού. Είναι φυσικό να υποθέσουμε ότι αυτές οι αλληλεπιδράσεις ελέγχονται από το εμβαδόν των φύλλων, την πυκνότητα του εμβαδού των φύλλων, το πορώδες του χώματος, το μέγεθος των πόρων και η διανομή της υγρασίας στο χώμα.

Ένας απλός τρόπος να καθορίσουμε την ικανότητα των φυτών να απορροφούν τον ήχο είναι να μετρήσουμε το επίπεδο κύμα της, το συντελεστή απορρόφησης κανονικής πρόσπτωσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ενός δείγματος φυτού με ή χωρίς χώμα σε έναν αρκετά μεγάλο σωλήνα αντίστασης. Αυτή η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2 το οποίο δείχνει πως μόνο το χώμα, μόνο το φυτό και το φυτό πάνω από το χώμα μπορούν να εισαχθούν στο σωλήνα αντίστασης.

Εξ 'αιτίας της τυχαίας γεωμετρίας του ζωντανού δείγματος φυτού, είναι αδύνατο να καθορίσουμε την ακριβή θέση του επιπέδου αναφοράς, από το οποίο η απόσταση από την κορυφή του φυτού (x_1) στη μακρύτερη τοποθεσία του μικροφώνου μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια (Σχήμα 3.2(b)(c)). Ως εκ τούτου, είναι πιθανή η απευθείας μέτρηση μόνο της απόλυτης τιμής του συντελεστή ακουστικής αντανάκλασης, r , που δίνεται από τον τύπο :

$$r = |r| e^{i\varphi} = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2ik_0 x_1} \quad (3.1)$$

όπου H_{12} είναι η μετρούμενη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ δύο μικροφώνων, H_1 είναι η συνάρτηση μεταφοράς για το προσπίπτον κύμα μεταξύ δύο θέσεων μικροφώνων, H_R είναι η συνάρτηση μεταφοράς για το κύμα που αντανακλάται,



Εικόνα 3.2 : Σχηματική απεικόνιση του σωλήνα αντίστασης με (a) μόνο χώμα, (b) μόνο το φυτό και (c) φυτό πάνω από το χώμα.

και k_0 είναι ο αριθμός κύματος. Εξ 'αιτίας της ασάφειας στη θέση του επιπέδου αναφοράς, είναι αδύνατο να καθοριστεί ο όρος $i\phi$ στην Εξίσωση (3.1), ο οποίος χρειάζεται για τον υπολογισμό της αντίστασης της πολύπλοκης ακουστικής επιφάνειας του δείγματος του φυτού. Ως εκ τούτου, τα ακόλουθα μέρη θα ασχοληθούν μόνο με το συντελεστή ακουστικής απορρόφησης, ο οποίος υπολογίζεται από :

$$\alpha = 1 - |r|^2, \quad (3.2)$$

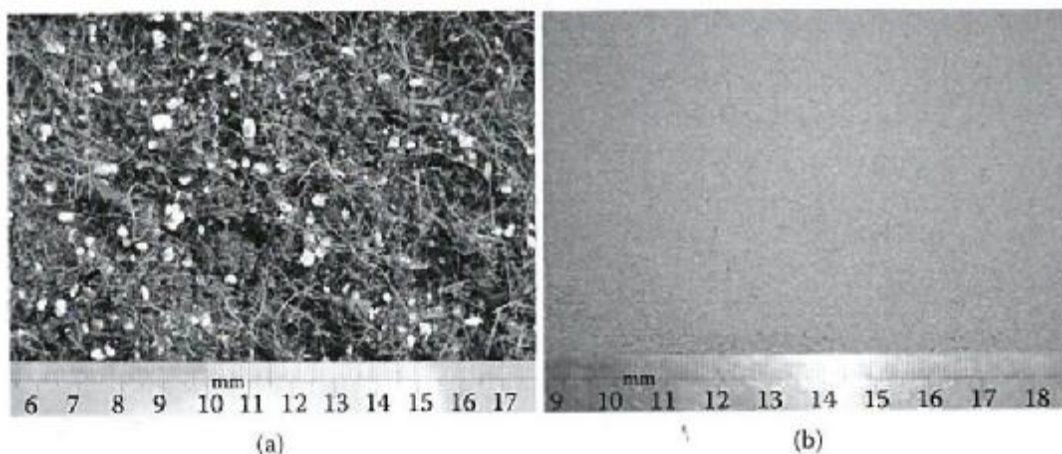
όπου το α είναι ο συντελεστής ακουστικής απορρόφησης.

3.3 Επίδραση της υγρασίας στην απορρόφηση από το χώμα

Τα φυτά βρίσκονται σε χώμα από το οποίο παίρνουν τα θρεπτικά συστατικά και το νερό για να αναπτυχθούν. Από έρευνες ότι η υγρασία του χώματος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ακουστικές του ιδιότητες. Αυτό το μέρος σκοπεύει να απεικονίσει την επιρροή της υγρασίας στην ακουστική απορρόφηση σε δύο ειδών χωμάτων : (1) σε υψηλής πυκνότητας πηλώδες

(αργιλώδες) χώμα που χρησιμοποιείται σε συνηθισμένα παρτέρια, και (2) σε ελαφρύ υπόστρωμα ειδικού χώματος, για χρήση σε κατακόρυφους «ζωντανούς» τοίχους. Ο συντελεστής ακουστικής απορρόφησης για αυτά τα χώματα εξετάζεται εδώ, μέσω εργαστηριακών μελετών, όπου η περιεκτικότητα σε νερό μεταβάλλεται συστηματικά.

Μπορεί να υποστηριχθεί ότι η αναλογία των διασυνδεδεμένων πόρων (το πορώδες), η κατανομή μεγέθους του πόρου και η προκύπτουσα αντίσταση ροής του αέρα είναι τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία ελέγχουν τις ακουστικές ιδιότητες του συστήματος φυτού-χώματος. Εδώ εξετάζουμε τις ακουστικές και σχετικών μη ακουστικών ιδιοτήτων των δύο τύπων χώματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φυσικό περιβάλλον για τα φυτά. Αυτά τα χώματα είναι ένα υπόστρωμα χώματος μικρής πυκνότητας, και ένα πηλώδες χώμα μεγάλης πυκνότητας που χρησιμοποιείται φύτευση σε κήπο σε ολόκληρο το Ηνωμένο Βασίλειο. Το σχέδιο 3.3 είναι φωτογραφίες αυτών των χωμάτων. Το πορώδες, ϕ , ενός τυπικού πηλώδους χώματος είναι μεταξύ $0.26 < \phi < 0.48$, ανάλογα με το στοίβαγμα. Το χαμηλής πυκνότητας υπόστρωμα χώματος, έχει πολύ μεγαλύτερο πορώδες που είναι μεταξύ $0.70 < \phi < 0.85$. Αυτό το υλικό αποτελείται από περλίτη, ένα άμορφο ηφαιστειακό γυαλί που έχει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, ίνες καρύδας και υδρόφιλο πολυμερές ζελέ. Σε σύγκριση με το πηλώδες χώμα, έχουμε λίγη ή καθόλου συμπίεση σε χαμηλής συχνότητας χώμα και αυτό το υπόστρωμα είναι σε θέση να διατηρήσει τουλάχιστον τρεις φορές το βάρος του σε νερό λόγω της παρουσίας του υδρόφιλου πολυμερούς ζελέ. Η υφή και η ποσότητα της διατηρημένης υγρασίας καθορίζουν την κατανομή μεγέθους του πόρου, ο οποία ελέγχει τις ακουστικές ιδιότητες του χώματος. Σε αυτά τα πειράματα, τα δείγματα των χωμάτων παρασκευάστηκαν για ομοιομορφία σε όλο το βάθος. Αυτό εξασφαλίστηκε με τη λήψη πέντε πυρήνων από το έδαφος και την ανάμιξή τους πλήρως για να αντιπροσωπεύουν τις μέσες συνθήκες σε μία περιοχή. Έπειτα το χώμα ζυγίστηκε προσεκτικά για την εξασφάλιση της σταθερότητας της πυκνότητας από δείγμα σε δείγμα και τοποθετήθηκε μέσα ειδικό χώρο αποθήκευσης δειγμάτων για δοκιμές. Η πυκνότητα του χωμάτινου υποστρώματος τυπικά είναι 250 kg/m^3 , ενώ η πυκνότητα του πηλώδους χώματος είναι 1.200 kg/m^3 .



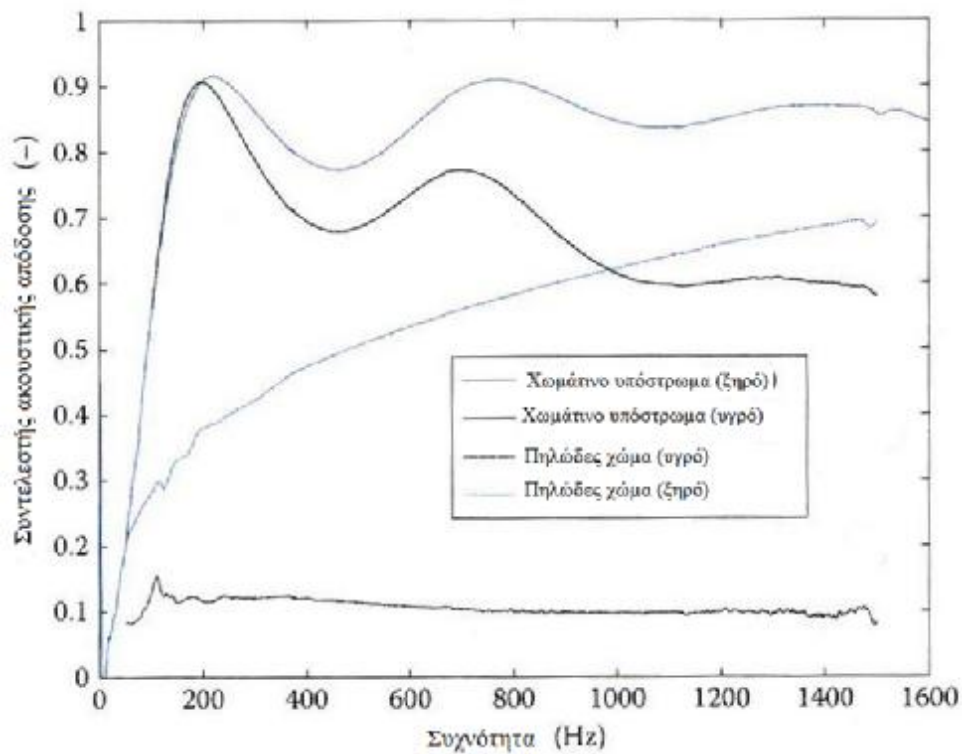
Εικόνα 3.3 : (a) υπόστρωμα χώματος και (b) πηλώδες χώμα.

Προκειμένου να απεικονισθεί η επίδραση της υγρασίας στον ακουστικό συντελεστή του χώματος, ένα ελεγχόμενο ποσό νερού μπορεί να ψεκασθεί στην επιφάνεια του χωμάτινου δείγματος, το οποίο βρίσκεται σε έναν ειδικά κατασκευασμένο χώρο αποθήκευσης δειγμάτων. Αυτός ο χώρος μπορεί να αφεθεί για ένα χρονικό διάστημα, το οποίο είναι αρκετό για το προστιθέμενο νερό να απορροφηθεί πλήρως από το χωμάτινο δείγμα πριν να μετρηθεί ο συντελεστής ακουστικής του απορρόφησης, με τη βοήθεια ενός σωλήνα αντίστασης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2(a).

Γενικά, υπάρχουν τρεις σημαντικές επιπτώσεις στην ακουστική απορρόφηση που συνδέονται με την παρούσα υγρασία στο χώμα. Αυτές σχετίζονται με (1) τη μείωση στο πορώδες του χώματος, (2) την αύξηση της αντίστασης της ροής του εδάφους και (3) με τη συγκέντρωση του χώματος η οποία διεγείρεται από την επικάλυψη σωματιδίων πηλού (αργίλου) τα οποία είναι επικαλυμμένα με το μηνίσκο του νερού. χωμάτινου στρώματος όταν το νερό εφαρμόζεται εξωτερικά. Σαν αποτέλεσμα παρατηρείται μία μείωση στο μέγεθος των πόρων και αυτό φαίνεται στο συντελεστή ακουστικής απορρόφησης του χώματος. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.4, το οποίο δείχνει μία φανερή μείωση στο συντελεστή ακουστικής απορρόφησης όταν ο όγκος του νερού $V_w = 100 \text{ cm}^3$ προστέθηκε σε όγκο χωμάτινου δείγματος $V_t = 1.5 \text{ lt}$ (πάχους 200 mm και διαμέτρου 100 mm). Εξ' αιτίας των διαφορών στο πορώδες του πηλώδους χώματος και του χωμάτινου υποστρώματος, η προσθήκη μιας σχετικά μικρής ποσότητας νερού έχει σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα στην ακουστική απορρόφηση αυτών των δύο ειδών χωμάτων. Το επίπεδο της μείωσης του συντελεστή απορρόφησης εξηγείται από την αλλαγή στο βαθμό διαπότισης (S_t) που έχουν

υποστεί αυτά τα δύο δείγματα. Ο βαθμός διαπότισης καθορίζεται από την ακόλουθη έκφραση :

$$Sr = V_w / V_u, \quad (3.3)$$



Εικόνα 3.4 : Το αποτέλεσμα του βαθμού διαπότισης στον συντελεστή απορρόφησης του χωμάτινου και του πηλώδες χώματος.

όπου ο όγκος των κενών είναι

$$V_u = V_\varphi, \quad (3.4)$$

V είναι ο συνολικός όγκος του δείγματος υλικού.

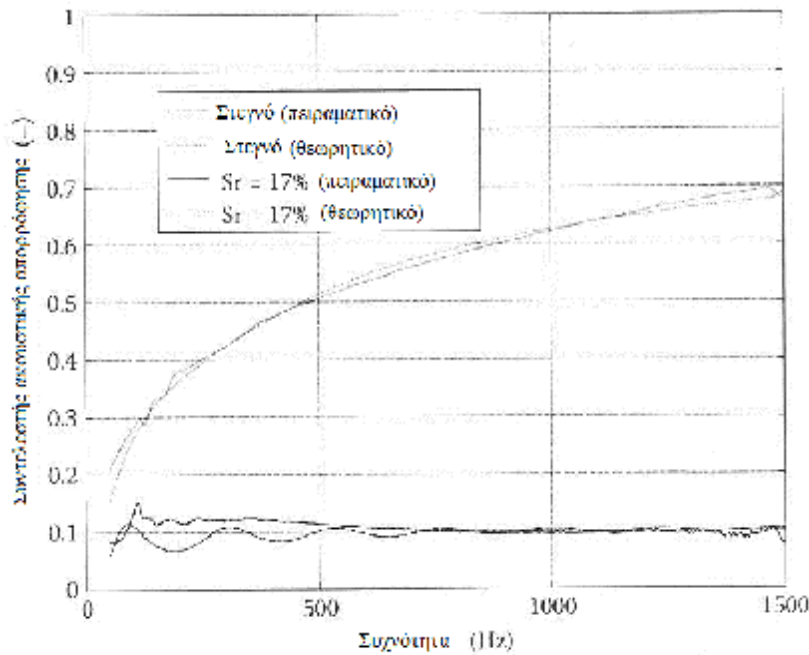
Είναι ξεκάθαρο ότι το χωμάτινο υπόστρωμα μπορεί να διατηρήσει πολύ παραπάνω υγρασία από το πηλώδες χώμα εξ' αιτίας του μεγαλύτερου πορώδους (δύο φορές μεγαλύτερο από

εκείνο του πηλού). Αυτό εξηγείται από την παρουσία του όρου πορώδες στον παρονομαστή της εξίσωσης (3.3). Ως εκ τούτου, η προσθήκη 100 cm^3 νερού στο χωμάτινο υπόστρωμα έχει σαν αποτέλεσμα μία σχετικά μικρή, 9%, αύξηση στο βαθμό της διαπότισης.

Η αλλαγή των συντελεστών απορρόφησης που φαίνεται στο σχήμα 3.4 σε διαφορετικές συχνότητες, είναι διαφορετική για τα δύο χωμάτινα δείγματα. Στην περίπτωση του πηλώδους χώματος, υπάρχει μία σχεδόν επτά φορές συνολική μείωση στον παρατηρούμενο συντελεστή απορρόφησης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Στην περίπτωση του χαμηλής πυκνότητας χωμάτινου υποστρώματος, αυτή η αλλαγή είναι σχετικά μικρή (μέγιστο 1,5 φορά) και περιορίζεται στο υψηλότερο εύρος συχνοτήτων μόνο. Η συμπεριφορά αυτή μας επιτρέπει να καταλήξουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα : (1) στην περίπτωση του πηλώδους χώματος με μικρότερους πόρους, το αποτέλεσμα της προσθήκης νερού είναι πιο βαθύ και η κατανομή της υγρασίας πιο ομοιόμορφη κατά μήκος όλου του δείγματος και (2) το αποτέλεσμα του προστιθέμενου νερού στην περίπτωση του χαμηλής πυκνότητας χωμάτινου υποστρώματος είναι πιο πολύπλοκο και φαίνεται να περιορίζεται στο ανώτερο στρώμα του χώματος μέσω του οποίου χορηγήθηκε το νερό.

3.4 Μοντελοποίηση ακουστικών ιδιοτήτων των χωμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο προηγούμενο τμήμα παρέχουν μία βάση για την επιλογή κατάλληλων μεθόδων μοντελοποίησης για την πρόβλεψη των θεμελιωδών ακουστικών ιδιοτήτων των χωμάτων, όπως και τη χαρακτηριστική αντίσταση και τον πολύπλοκο αριθμό κύματος. Το ξηρό χώμα ή το χώμα με χαμηλό βαθμό διαπότισης χαρακτηρίζεται από σχετικά ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους των πόρων. Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο τριών παραμέτρων, που προτείνεται από αρκετές έρευνες, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα ομοιόμορφο μέγεθος πόρων και περιορισμένο πορώδες. Αυτό το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει καλά και στην περίπτωση του πηλώδους χώματος με σχετικά υψηλό βαθμό διαπότισης, S_r , δεδομένου ότι η κατανομή της υγρασίας είναι σχετικά ομοιόμορφη. Τα πηλώδες χώματα αποτελούνται από πόρους οι οποίοι είναι σχετικά μικροί σε μέγεθος (περίπου 40-60 μm διάμετρος). Ως εκ τούτου, σε αυτά τα πορώδη μέσα υπάρχουν ισχυρές τριχοειδείς δυνάμεις που βοηθούν στην επίτευξη μιας σχετικά ομοιόμορφης κατανομής της υγρασίας. Η επίδοση του μοντέλου απεικονίζεται στο σχήμα 3.5,



Εικόνα 3.5 : Μετρούμενος και προβλεπόμενος συντελεστής απορρόφησης ηλώδους χώματος σε διαφορετικές καταστάσεις διαπότισης.

όπου οι τιμές του μετρούμενου και προβλεπόμενου συντελεστή απορρόφηση παρουσιάζονται για ένα δείγμα πάχους 200mm ηλώδους χώματος σε διαφορετικούς βαθμούς διαπότισής του με νερό. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες αξίες των μη ακουστικών παραμέτρων : (1) αντίσταση ροής $\sigma = 47 \text{ kPa s m}^{-2}$, $\phi = 0.45$, και στρεβλότητα $\alpha_{\infty} = 1.00$ για ξηρό χώμα και (2) $\sigma = 110 \text{ kPa s m}^{-2}$, $\phi = 0.1$, και στρεβλότητα $\alpha_{\infty} = 11.15$ για υγρό χώμα. Υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών του συντελεστή απορρόφησης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων.

Από την άλλη, τα πορώδη μέσα, όπως το χαμηλής πυκνότητας χωμάτινο υπόστρωμα, αποτελείται από πόρους σχετικά μεγάλης διαμέτρου (200 μm και πάνω). Αυτό το χώμα περιέχει επίσης ένα τμήμα των μεσοπόρων (< 1 mm κλίμακα), οι οποίοι δημιουργούνται γύρω από τα σωματίδια περλίτη και πολυμερούς τζελ που είναι σχετικά μεγάλα. Εάν η ανώτερη επιφάνεια αυτού του υλικού ψεκαστεί με μία σχετικά μικρή ποσότητα νερού (αυτή είναι, $S_r < 10\%$), τότε αναμένεται ότι η υγρασία θα διαπεράσει μόνο τα λίγα πρώτα χιλιοστά του δείγματος μόνο για να απορροφηθεί από τα σωματίδια πολυμερούς τζελ που περιορίζεται στην κορυφή. Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα ένα υλικό με διαστρωμάτωση μεγέθους πόρων. Οι ακουστικές ιδιότητες αυτού του πολυστρωματικού υλικού δεν μπορούν

πλέον να μοντελοποιηθούν με τη χρήση της υποθετικής ομοιόμορφης κατανομής μεγέθους πόρων και απαιτούνται πληροφορίες σχετικά με τη διαστρωμάτωση μεγέθους πόρων.

Μία σχετικά απλή μέθοδος για λογαριασμό της διαστρωμάτωσης αυτής είναι με τη χρήση μοντέλου δύο στρωμάτων. Με αυτό τον τρόπο, οι ακουστικές ιδιότητες του ανώτερου, ψεκασμένου με νερό, στρώματος και αυτές του κατώτερου, ξηρού χωμάτινου στρώματος μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση δύο σετ μη ακουστικών παραμέτρων. Η αντίσταση επιφανείας μιας στοιβάς δύο στρωμάτων με διαφορά χαρακτηριστικών ακουστικής αντίστασης και σταθερές διάδοσης προβλέπονται από την ακόλουθη έκφραση :

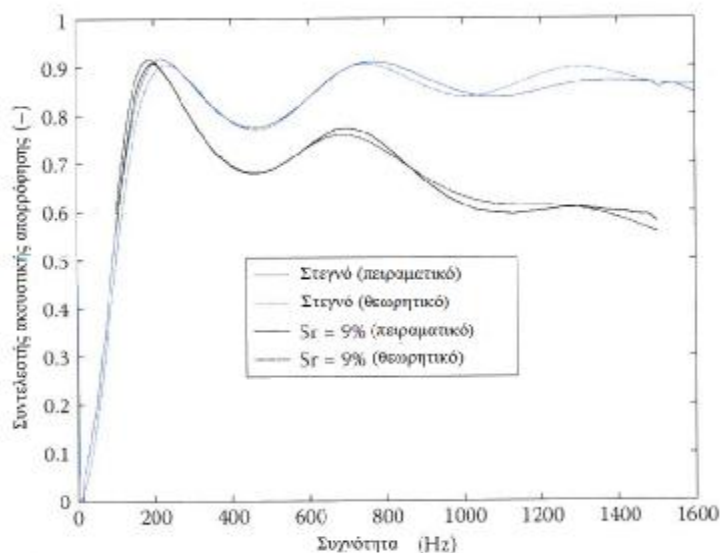
$$Z(\omega) = \frac{Z_t(\bar{Z}_b + Z_t \tanh(-i\bar{k}_t d_t))}{Z_t + \bar{Z}_b \tanh(-i\bar{k}_t d_t)} \quad (3.5)$$

όπου \bar{Z}_t , \bar{K}_t είναι η χαρακτηριστική αντίσταση και αριθμός κύματος στο ανώτερο στρώμα, διαδοχικά, και d_t είναι το πάχος του ανώτερου στρώματος. Στην παραπάνω έκφραση, η αντίσταση εισόδου του κάτω στρώματος είναι $Z_b = \bar{Z}_b \coth(-i\bar{K}_b d_b)$, όπου \bar{Z}_b , \bar{K}_b είναι η χαρακτηριστική αντίσταση και αριθμός κύματος στο κατώτερο στρώμα, διαδοχικά. Ομοίως, η μεταβλητή d_b αντιστοιχεί στο πάχος του κατώτερου στρώματος. Μία διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε για άντληση των τιμών των d_b , d_t και τεσσάρων άλλων μη ακουστικών παραμέτρων που χρειάζονται για την πρόβλεψη του συντελεστή ακουστικής απορρόφησης του χωμάτινου υποστρώματος, $S_r = 9\%$. Οι παράμετροι αυτοί είναι η αντίσταση ροής στο ανώτερο στρώμα, η αντίσταση ροής στο κατώτερο στρώμα, το πορώδες του κατώτερου στρώματος και η στρεβλότητα. Το πορώδες και η διανομή του μεγέθους των πόρων του ανώτερου στρώματος υποτέθηκε ότι είναι σταθερή και ίση με τις μέσες τιμές που λήφθηκαν για την περίπτωση του δείγματος ξηρού υλικού. Το μοντέλο που προτάθηκε από έρευνα χρησιμοποιήθηκε μαζί με την Εξίσωση (3.5) για την πρόβλεψη των τιμών των \bar{Z}_t και \bar{K}_t . Στην περίπτωση του ξηρού χωμάτινου υποστρώματος, υιοθετήθηκε ένα κανονικό μοντέλο ενός ενιαίου στρώματος και υποτέθηκε ότι οι πόροι είναι τριγωνικού σχήματος και η κατανομή των μεγεθών τους έγινε λογαριθμικά με το λογαριθμικό μέτρο της τυπικής απόκλισης, \bar{S} .

Το σχήμα 3.6 παρουσιάζει το φάσμα των μετρούμενων και προβλεπόμενων συντελεστών ακουστικής απορρόφησης για ξηρό χωμάτινο υπόστρωμα και για χωμάτινο υπόστρωμα με

την εφαρμογή 100 cm^3 νερού στην επιφάνειά του ($S_r = 9\%$). Οι τιμές των μη ακουστικών παραμέτρων για στεγνό χωμάτινο υπόστρωμα ήταν: (1) η αντίσταση ροής $\sigma = 6.87 \text{ kPa s m}^{-2}$, πορώδες $\phi = 0.72$, στρεβλότητα $\alpha_\infty = 1.89$, και τυπική απόκλιση σε μέγεθος πόρων $S_{\tau\alpha} = 0.3$ για το στεγνό, ομοιόμορφο πάχους 200mm στρώμα χωμάτινου υποστρώματος και (2) $\sigma_t = 24.0 \text{ kPa s m}^{-2}$, $\sigma_b = 2.84 \text{ kPa s m}^{-2}$, $\phi_t = 0.70$, $\phi_b = 0.72$, $\alpha_\infty^{(t)} = 1.00$, $\alpha_\infty^{(b)} = 1.20$, $S_{\tau\alpha} = S_{b\tau\alpha} = 1.10$, και $d_t = 0.0075 \text{ m}$, $d_b = 0.1925 \text{ m}$ για το στρωματοποιημένο στρώμα του υγρού χωμάτινου υποστρώματος. Εδώ, οι δείκτες t και b αντιπροσωπεύουν το ανώτερο (top) και το κατώτερο (bottom) στρώματα, αντίστοιχα. Εδώ, οι μη ακουστικές παράμετροι ανακτήθηκαν με τη χρήση μιας τεχνικής βελτιστοποίησης επειδή είναι αδύνατη η απευθείας μέτρησή τους.

Οι τιμές που λήφθηκαν κατά στο στάδιο της βελτιστοποίησης παρήγαγαν τιμές παραμέτρων που βγάζουν καλό φυσικό νόημα. Δηλώνουν πως η αντίσταση ροής του ανώτερου στρώματος του χωμάτινου υποστρώματος, είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του κατώτερου. Αυτό συμφωνεί με την υγρασία κοντά στην κορυφή. Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης μπορούν να εξηγηθούν από το πορώδες του κατώτερου στρώματος το οποίο δεν επηρεάζεται από την υγρασία. Ωστόσο, η κατανομή μεγέθους των πόρων στα ανώτερα και κατώτερα στρώματα αυξάνεται επειδή το προστιθέμενο νερό έχει αυξήσει το μέγεθος των σωματιδίων του πολυμερούς τζελ.

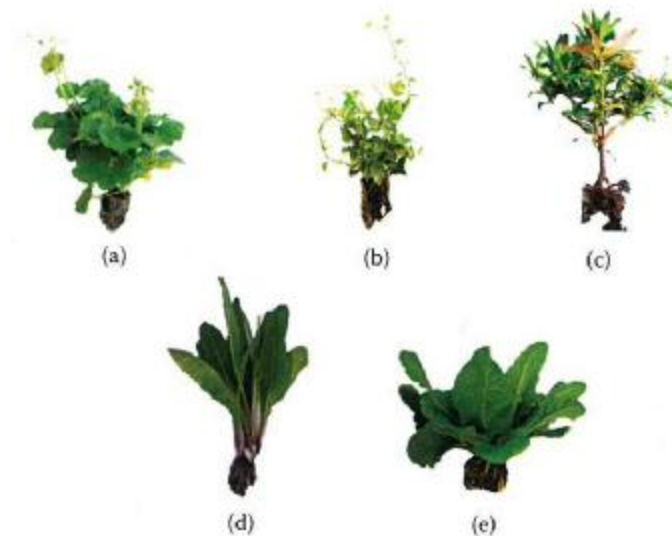


Εικόνα 3.6 : Μετρούμενος και προβλεπόμενος συντελεστής απορρόφησης χαμηλής πυκνότητας χωμάτινο υπόστρωμα σε διαφορετικές καταστάσεις διαπότισης.

Η αντίσταση ροής του ανώτερου στρώματος είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή του κατώτερου. Το εκτιμώμενο πάχος του ανώτερου στρώματος είναι 7.5 mm, το οποίο είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος των σωματιδίων του πολυμερούς τζελ στην διευρυμένη κατάστασή τους. Στην περίπτωση του ξηρού χωμάτινου υποστρώματος, είναι αρκετό να υποθέσουμε ότι μπορεί να υιοθετηθεί το μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων.

3.5 Φυτά χαμηλής ανάπτυξης

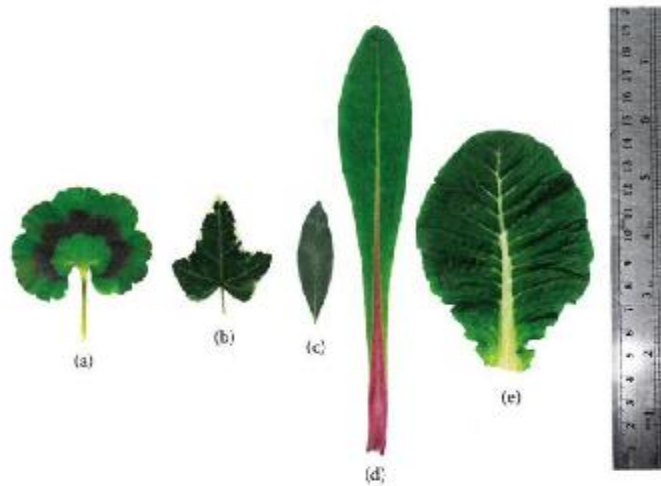
Για την καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ του συντελεστή απορρόφησης ενός φυτού και κάποιων βασικών χαρακτηριστικών των φύλλων, μπορούμε να εξετάσουμε πέντε δείγματα καθένα από πέντε διαφορετικά είδη φυτών που έχουν αντιπροσωπευτικό εύρος από μορφολογία φύλλων, περιοχές και προσανατολισμός. Αυτά τα πέντε είδη φυτών, είναι *γεράνι*, *κισσός*, *ιαπωνική ανδρομέδα*, *καλοκαιρινό νυχτολούλουδο* και *χειμερινό νυχτολούλουδο* (σχήμα 3.7).



**Εικόνα 3.7 : Πέντε δείγματα φυτών που χρησιμοποιήθηκαν στα ακουστικά πειράματα :
(a) Γεράνι, (b) κισσός, (c) ιαπωνική ανδρομέδα, (d) καλοκαιρινό νυχτολούλουδο, (e)
χειμερινό νυχτολούλουδο**

Οι φωτογραφίες στο Σχήμα 3.8 φαίνονται τα φύλλα των από καθένα από τα πέντε είδη αυτών των φυτών. Το σχήμα αυτό απεικονίζει ότι η μορφολογία των φυτών που μελετήθηκε, είναι επαρκώς διαφορετική από φυτό σε φυτό, από την άποψη του σχήματος των φύλλων και τις διαστάσεις αυτών. Έχει ενδιαφέρον η μέτρηση και η ανάλυση των χαρακτηριστικών των

ακόλουθων φύλλων των φυτών: μέσο πάχος ενός ενιαίου φύλλου (h_f), μέσο βάρος ενός ενιαίου φύλλου (w_f), μέση επιφάνεια ενός ενιαίου φύλλου (a_f), αριθμός φύλλων στο φυτό (n_f), ισοδύναμο ύψος φυτού (h_f), ισοδύναμος όγκος που καταλαμβάνει το φυτό (V_f) και η κυρίαρχη γωνία του προσανατολισμού των φύλλων (θ_f).



Εικόνα 3.8 : Φωτογραφίες των φύλλων από τα πέντε φυτά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη δουλειά : (a) Γεράνι, (b) κισσός, (c) ιαπωνική ανδρομέδα, (d) καλοκαιρινό νυχτολούλουδο, (e) χειμερινό νυχτολούλουδο

Ο πίνακας 3.1 παρέχει μια σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών του φυλλώματος των φυτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί το συνολικό εμβαδόν των φύλλων του φυτού (S_f), η επιφανειακή πυκνότητα (ρ_f), το συνολικό βάρος των φύλλων του φυτού (W_p) και το εμβαδόν της πυκνότητας των φύλλων (A_u). Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει μια περίληψη των χαρακτηριστικών φυτών που προέρχονται από αυτά τα δεδομένα.

3.6 Μοντελοποίηση των ακουστικών ιδιοτήτων των φυτών

Για να κατανοήσουμε τις ακουστικές ιδιότητες ενός φυτού, είναι βολικό να το εκπροσωπήσουμε στη μορφή ενός ισοδύναμου υγρού, επειδή είναι επίσης κοινό να προβλέψουμε τις ακουστικές ιδιότητες του χώματος με ένα μοντέλο που αντιμετωπίζει το έδαφος ως ένα ισοδύναμο υγρό μέσο. Σε αυτή την περίπτωση, η ακουστική απορρόφηση ενός συστήματος φυτού-χώματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση μιας προσέγγισης

μεταφοράς μήτρας (βλ. Εξίσωση (3.5)) δεδομένου ότι η χαρακτηριστική αντίσταση, \hat{Z} , και ο αριθμός κύματος, \hat{K} , για κάθε ένα από τα δύο ισοδύναμα στρώματα σε αυτό το σύστημα είναι γνωστά.

Πίνακας 3.1 : Τα βασικά χαρακτηριστικά των φύλλων των δειγμάτων των φυτών

Είδη φυτών	Μέσο πάχος φύλλου (mm) h_f	Μέσο βάρος φύλλου (g) w_f	Μέσο εμβαδόν φύλλου, (m ²) a_f	Αριθμός φύλλων στο φυτό, n_f	Εκτιμώμενο ύψος φυτού, (m) h_p	Ισοδύναμος όγκος που καταλαμβάνει το φυτό, (m ³) V_p	Πυκνότητα εμβαδόν φύλλων (m ⁻¹), A_v	Κυρίαρχη γωνία προσανατολ. Φύλλων, (μοίρες) θ_f
Γεράνι-1	0.55	2.57	0.0044	15	0.20	0.0016	42	85(±5)
Γεράνι-2	0.68	2.40	0.0043	14	0.17	0.0013	45	
Γεράνι-3	0.64	2.56	0.0041	13	0.17	0.0013	40	
Γεράνι-4	0.65		0.0044	15	0.20	0.0016	42	
Γεράνι-5	0.63	1.53	0.0027	16	0.18	0.0014	30	
Κισσός-1	0.36	0.13	0.00062	83	0.27	0.0021	24	
Κισσός-2	0.31		0.00064	92	0.17	0.0013	44	36(±10)
Κισσός-3	0.36	0.08	0.00066	83	0.17	0.0013	41	
Κισσός-4	0.38	0.13	0.00072	110	0.17	0.0013	59	
Κισσός-5	0.31	0.06	0.00039	59	0.17	0.0013	17	
Ιαπωνική Ανδρομέδα-1	0.52	0.17	0.00038	362	0.28	0.0022	63	30(±20)
Ιαπωνική Ανδρομέδα-2	0.53	0.24	0.00061	366	0.33	0.0026	86	
Ιαπωνική Ανδρομέδα-3	0.53	0.15	0.00032	228	0.27	0.0021	34	
Ιαπωνική Ανδρομέδα-4	0.58	0.24	0.00045	526	0.33	0.0026	91	
Ιαπωνική Ανδρομέδα-5	0.51		0.00062	320	0.29	0.0023	87	
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-1	0.35	3.20	0.0066	18	0.23	0.0018	66	14(±15)
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-2	0.31	2.55	0.0056	21	0.28	0.0022	54	
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-3	0.30	3.60	0.0063	32	0.24	0.0019	107	
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-4	0.27	3.82	0.0067	19	0.28	0.0022	58	
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-5	0.26	2.12	0.0043	24	0.25	0.002	52	
Χειμερινό νυχτολούλουδο-1	0.50	2.19	0.0051	22	0.1	0.0008	143	72(±15)
Χειμερινό νυχτολούλουδο-2	0.51	1.60	0.0054	19	0.095	0.0007	138	
Χειμερινό νυχτολούλουδο-3	0.59	2.03	0.0053	22	0.11	0.0009	136	
Χειμερινό νυχτολούλουδο-4	0.57	1.93	0.005	16	0.1	0.0008	102	
Χειμερινό νυχτολούλουδο-5	0.53	2.83	0.0066	17	0.09	0.0007	159	

Πίνακας 3.2 : Οι παράμετροι για τα δείγματα των φύλλων των φυτών που προέρχονται από τις πληροφορίες του Πίνακα 3.1

Είδη φυτών	Συν. Εμβαδόν φύλλων στο φυτό, Sf (m ²)	Πυκνότητα επιφάνειας φυτού, ρf (kg/m ²)	Συνολικό βάρος φύλλων, κορμού (κοτσάνι), Wp (kg)	Πυκνότητα εμβαδόν φύλλων (m ⁻¹), Av
Γεράνι-1	0.066	0.58	0.045	42
Γεράνι-2	0.060	0.56	0.045	45
Γεράνι-3	0.053	0.62	0.039	40
Γεράνι-4	0.066	0.54	0.047	42
Γεράνι-5	0.043	0.57	0.034	30
Κισσός-1	0.050	0.21	0.017	24
Κισσός-2	0.059	0.20	0.023	44
Κισσός-3	0.055	0.12	0.021	41
Κισσός-4	0.079	0.18	0.021	59
Κισσός-5	0.023	0.15	0.013	17
Ιαπωνική Ανδρομέδα-1	0.138	0.45	0.081	63
Ιαπωνική Ανδρομέδα-2	0.223	0.39	0.115	86
Ιαπωνική Ανδρομέδα-3	0.073	0.47	0.053	34
Ιαπωνική Ανδρομέδα-4	0.237	0.53	0.112	91
Ιαπωνική Ανδρομέδα-5	0.198	0.39	0.084	87
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-1	0.119	0.48	0.074	66
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-2	0.118	0.46	0.074	54
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-3	0.202	0.57	0.110	107
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-4	0.127	0.57	0.063	58
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-5	0.103	0.49	0.048	52
Χειμερινό νυχτολούλουδο-1	0.112	0.43	0.059	143
Χειμερινό νυχτολούλουδο-2	0.103	0.30	0.057	138
Χειμερινό νυχτολούλουδο-3	0.117	0.38	0.076	136
Χειμερινό νυχτολούλουδο-4	0.080	0.39	0.055	102
Χειμερινό νυχτολούλουδο-5	0.112	0.43	0.054	159

Η χρήση αυτού του μοντέλου επιτρέπει την εξέταση των απωλειών λόγω του ιξώδες και της απαγωγής θερμότητας του ηχητικού κύματος καθώς αυτό διαδίδεται διαμέσου του φυλλώματος των φυτών και διαμέσου του στρώματος του πορώδους εδάφους. Πιστεύεται ότι αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να εξηγήσουν το φάσμα συντελεστή ακουστικής απορρόφησης που παρατηρήθηκε στα πειράματα του σωλήνα αντίστασης με τα φυτά.

Όπως φαίνεται σε προηγούμενα τμήματα, το εμπειρικό μοντέλο μπορεί να διαθέσει ικανοποιητικές προβλέψεις των θεμελιωδών ακουστικών ιδιοτήτων των χωμάτων. Σε αυτό το τμήμα, θα χρησιμοποιήσουμε το ίδιο μοντέλο για να προβλέψουμε τις ακουστικές ιδιότητες των φυτών χαμηλής ανάπτυξης. Φαίνεται ότι αυτό το μοντέλο βασίζεται στο πορώδες και τη στρεβλότητα που γίνεται να μετρηθούν απευθείας και συνδέονται με τη μορφολογία του φυτού.

Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις δύο παραμέτρους βελτιώνει την ακρίβεια του προβλεπόμενου συντελεστή ακουστικής απορρόφησης ενός ακουστικού μέσου στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η ίδια στενή εφαρμογή δεν μπορεί να επιτευχθεί με ένα ενιαίο μοντέλο παραμέτρου βασισμένο μόνο στην ισοδύναμη αντίσταση ροής.

Το πορώδες ενός φυτού μπορεί να υπολογισθεί από :

$$\varphi = V_f / V_p, \quad (3.6)$$

όπου $V_f = S_f h_f$ είναι ο όγκος του φυλλώματος των φυτών και V_p ο συνολικός ισοδύναμος όγκος που καταλαμβάνεται από το φυτό.

Το πορώδες του χώματος μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση ειδικών διαδικασιών. Στην περίπτωση του χώματος είναι δυνατόν να μετρηθεί η αντίσταση ροής και η στρεβλότητα απευθείας και με ακρίβεια με τη χρήση της τυπικής διαδικασίας που ορίζεται από το ISO 9053. Ωστόσο, η επί τόπου μετρούμενη τιμή της αντίστασης ροής του χαλαρού χώματος εξαρτάται έντονα από το βαθμό συμπίεσης του χώματος, το οποίο είναι το οποίο είναι δύσκολο να ταιριάζουν ακριβώς με αυτό που επιτυγχάνεται όταν έχουμε το ίδιο χωμάτινο δείγμα στο σωλήνα αντίστασης. Η μεταβλητότητα ανάμεσα σε αυτό που μετριέται στο εργαστήριο και στο πεδίο μπορεί να είναι σχετικά υψηλή.

Οι μετρήσεις της αντίστασης ροής ενός φυτού σε εργαστηριακό περιβάλλον είναι προβληματικές επειδή είναι αδύνατο να υπολογισθεί με ακρίβεια το πάχος του φυτού που εισέρχεται στο σωλήνα αντίστασης ροής και η πτώση πίεσης σε όλο το δείγμα χώματος, είναι σχετικά μικρή για να μετρηθεί με ακρίβεια για το εύρος ταχύτητας ροής που προτείνεται από το πρότυπο ISO 9053 (reference8). Επίσης η στρεβλότητα ενός φυτού είναι αδύνατο να μετρηθεί με ακρίβεια επειδή οι υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης απαιτούν το ακριβές πάχος του δείγματος υλικού. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, ο μετρούμενος συντελεστής ακουστικής απορρόφησης για κάθε ένα δείγμα φυτών ξεχωριστά μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε ένα πρότυπο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Για αυτό το σκοπό, μπορούμε να θέσουμε την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση για την ελαχιστοποίηση της ακόλουθης διαφορά

$$\sum_{n=1}^N \left| a^{\exp(f_n)} - a^{\text{th}}(f_n, \mathbf{x}) \right| \rightarrow \min \quad (3.7)$$

όπου $a^{\text{th}}(f_n)$ είναι το μετρούμενο φάσμα του συντελεστή απορρόφησης, $a^{\text{th}}(f_n, \mathbf{X}, \varphi)$

το προβλεπόμενο φάσμα του συντελεστή απορρόφησης, f_n η συχνότητα του ήχου, και

$\mathbf{x} = \{\sigma, \alpha_\infty, d_e\}$ το μεταβλητό διάνυσμα στο οποίο το d_e είναι το ισοδύναμο ύψος του φυτού.

Στην περίπτωση του χώματος, το μεταβλητό διάνυσμα ήταν $\mathbf{x} = \{\sigma, \alpha_\infty\}$ επειδή το πάχος του χωμάτινου στρώματος προσδιορίστηκε με ακρίβεια. Η διαδικασία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, Εξίσωση (3.7), μπορεί να βασιστεί στη μέθοδο αναζήτησης άμεσης βελτιστοποίησης Nelder-Mead.

Σε αυτή τη δουλειά, χρησιμοποιούμε το μοντέλο Miki. Το μοντέλο αυτό προτείνει τις ακόλουθες εκφράσεις για την χαρακτηριστική αντίσταση :

$$Z_b(f) = \frac{\sqrt{\alpha_\infty}}{\varphi} \left\{ 1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.63z} + 0.107i \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.63z} \right\} \quad (3.8)$$

και ο πολύπλοκος αριθμός κύματος :

$$K_b(f) = \left\{ 1 + 0.109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.61z} + 0.160i \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.61z} \right\} \quad (3.9)$$

Εδώ το φ είναι το πορώδες, α_∞ η στρεβλότητα, σ η αντίσταση ροής, f η συχνότητα του ήχου και c_0 η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Η χαρακτηριστική αντίσταση και ο πολύπλοκος αριθμός κύματος μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της επιφάνειας αντίστασης και το επίπεδο κύμα, το συντελεστή απορρόφησης κανονικής πρόσπτωσης ενός σκληρά υποστηριζόμενου στρώματος πάχους d σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - 1}{z_s + 1} \right|^2, \quad (3.10)$$

όπου

$$z_s = z_b \coth(-ik_b d), \quad (3.11)$$

Ο πίνακας 3.3 παρουσιάζει μία περίληψη των αποτελεσματικών μη ακουστικών ιδιοτήτων για τα πέντε είδη φυτών που έχουμε συμπεράνει με τη χρήση του υιοθετημένου ισοδύναμου μοντέλου του ρευστού και της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο πίνακας 3.4 δίνει μία περίληψη αυτών των παραμέτρων για τους δύο τύπους των χωμάτων και παρουσιάζει μία σύγκριση μεταξύ τις απευθείας μετρούμενες τιμές του πορώδες και της αντίστασης ροής των δύο τύπων χώματος και εκείνων που προέκυψαν μέσω του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Το σχήμα 3.9 παρουσιάζει το μετρούμενο φάσμα συντελεστή απορρόφησης για τα πέντε είδη φυτών. Οι γκρι περιοχές σε αυτά τα πέντε γραφήματα δείχνουν τη μεταβλητότητα στα δεδομένα του πειράματος τα οποία ελήφθησαν από τη συλλογή των αποτελεσμάτων τα οποία ελήφθησαν από τα πέντε δείγματα κάθε είδους φυτού. Οι μαύρες γραμμές στα γραφήματα αντιστοιχούν στα φάσματα του συντελεστή απορρόφησης που προβλέπεται για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των φυτών κάθε είδους τα οποία αναφέρονται στον Πίνακα 3.1.

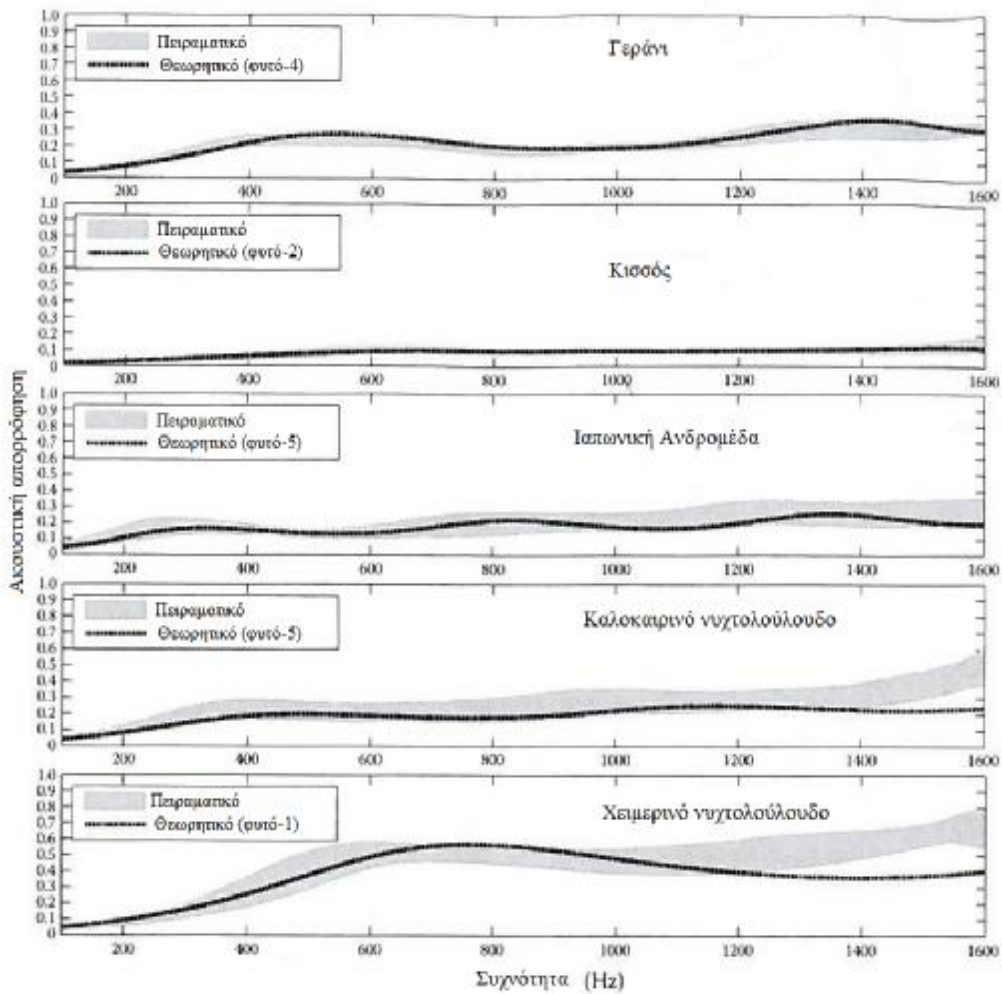
Πίνακας 3.3 : Οι συμπερασματικές και οι μετρούμενες μη ακουστικές ιδιότητες των φυτών

Είδη φυτών	Αποτελεσματική αντίσταση ροής (Pa*s/m ²)	Πορώδες	Αποτελεσματική στρεβλότητα	Αποτελεσματικό πάχος	Σχετικό σφάλμα στο συντελεστή απορρόφησης (%)
Γεράνι-1	63.28	0.98	2.10	0.14	2.7
Γεράνι-2	54.71	0.98	1.49	0.16	0.3
Γεράνι-3	35.16	0.98	1.64	0.16	2.5
Γεράνι-4	75.16	0.98	1.82	0.13	2.3
Γεράνι-5	44.25	0.98	1.37	0.15	0.8
Κισσός-1	7.59	0.99	1.00	0.19	0.8
Κισσός-2	9.09	0.99	1.02	0.18	0.2
Κισσός-3	8.16	0.99	1.12	0.17	0.2
Κισσός-4	19.25	0.99	1.44	0.15	1.0

Κισσός-5	6.80	0.99	1.00	0.15	2.5
Ιαπωνική Ανδρομέδα-1	14.65	0.98	1.21	0.25	4.0
Ιαπωνική Ανδρομέδα-2	14.00	0.98	1.28	0.33	2.1
Ιαπωνική Ανδρομέδα-3	9.77	0.98	1.35	0.23	2.7
Ιαπωνική Ανδρομέδα-4	21.07	0.96	1.04	0.35	1.2
Ιαπωνική Ανδρομέδα-5	13.55	0.96	1.30	0.28	0.4
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-1	22.46	0.96	1.12	0.23	0.0
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-2	16.60	0.96	1.06	0.25	0.5
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-3	39.78	0.96	1.04	0.28	1.0
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-4	16.86	0.96	1.28	0.29	1.4
Καλοκαιρινό νυχτολούλουδο-5	15.15	0.96	1.08	0.25	0.6
Χειμερινό νυχτολούλουδο-1	511.95	0.96	2.04	0.08	0.4
Χειμερινό νυχτολούλουδο-2	505.80	0.96	1.85	0.08	1.8
Χειμερινό νυχτολούλουδο-3	318.61	0.90	1.00	0.18	5.6
Χειμερινό νυχτολούλουδο-4	258.30	0.96	1.59	0.11	0.4
Χειμερινό νυχτολούλουδο-5	285.66	0.96	1.74	0.10	0.7

Σχόλιο	Αντίσταση ροής (Pa*s/m ²)	Αντίσταση ροής (Pa*s/m ²)	Πορώδες (Αναμενόμενο)	Πορώδες	Στρεβλότητα	Πάχος (m)	Σχετικό σφάλμα στο συντελεστή απορρόφησης (%)
Σχίσμα	7,6	7,218	0.76	0.76	1.36	0.07	0.1
Πλάκες	566,35	620,65	0.39	0.39	2.05	0.10	2.0

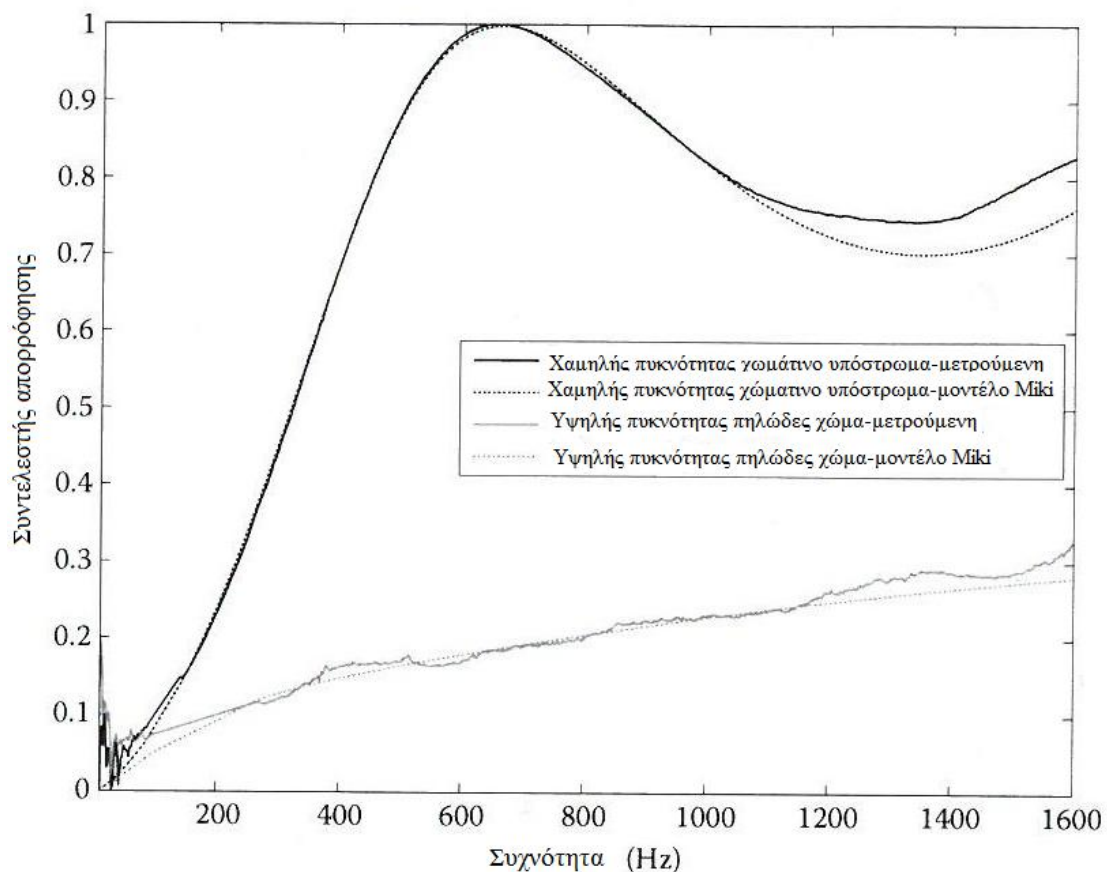
Πίνακας 3.4 : Οι συμπερασματικές και οι μετρούμενες μη ακουστικές ιδιότητες των χωμάτων



Σχήμα 3.9 : Οι πληροφορίες του συντελεστή απορρόφησης για τα πέντε δείγματα φυτών από τα πέντε διαφορετικά είδη φυτών και το φάσμα του συντελεστή απορρόφησης για ένα συγκεκριμένο φυτό που προβλέφθηκε με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου ρευστού.

Το σχήμα 3.10 παρουσιάζει τα φάσματα του μετρούμενου και του προβλεπόμενου συντελεστή απορρόφησης για τους δύο τύπους χωμάτων. Ο Πίνακας 3.3 και 3.4 επίσης παρουσιάζουν το σχετικό σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου και του προβλεπόμενου φάσματος του συντελεστή απορρόφησης. Αυτό το μέσο σφάλμα στον προβλεπόμενο συντελεστή απορρόφησης υπολογίστηκε με τη χρήση της ακόλουθης έκφρασης :

$$E = \frac{\sum_{n=1}^N |\alpha^{\text{exp}}(f_n) - \alpha^{\text{th}}(f_n, x_0)|}{\sum_{n=1}^N \alpha^{\text{exp}}(f_n)} \times 100\% \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.10 : Το μετρούμενο και προβλεπόμενο φάσμα του συντελεστή απορρόφησης για τα χώματα που χρησιμοποιούν το ισοδύναμο μοντέλο ρευστού.

Τα δεδομένα του συντελεστή απορρόφησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9 δηλώνουν ότι τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας στο προσπίπτων ακουστικό κύμα. Συγκεκριμένα ο συντελεστής απορρόφησης ενός δείγματος ύψους 100 mm χειμερινού νυχτολούλουδου, μπορεί να απορροφήσει 60% της ενέργειας του προσπιπτόμενου ακουστικού κύματος στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 700 και 900 Hz. Τα άλλα φυτά φαίνεται να φαίνεται να είναι λιγότερο αποτελεσματικοί απορροφητές και το ποσοστό της

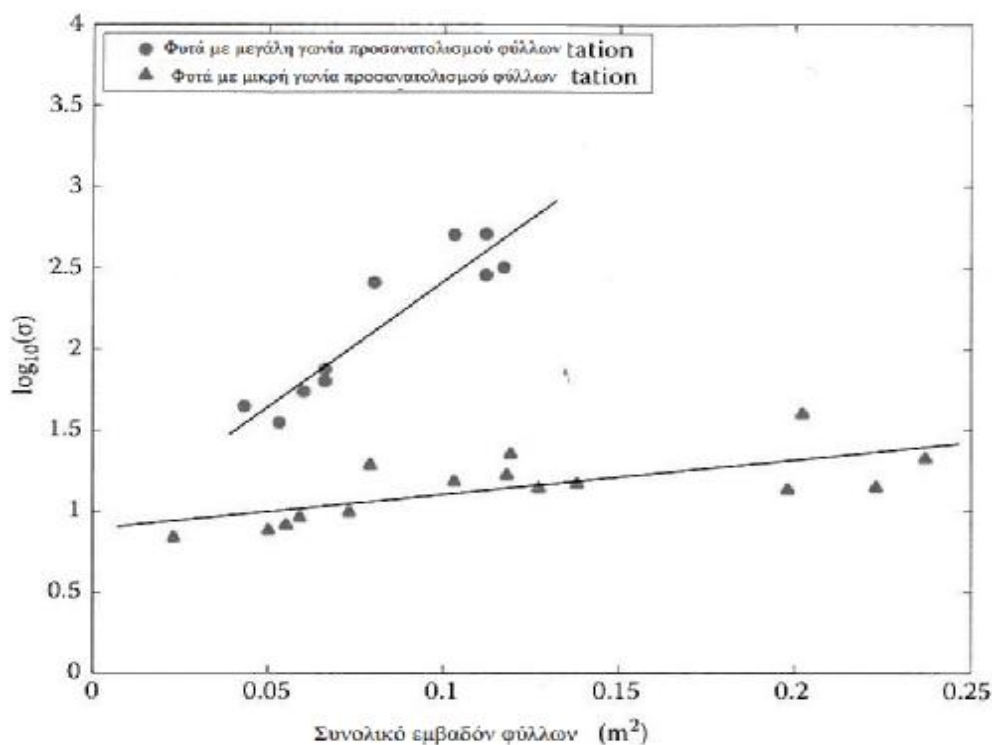
προσπίπτουσας ενέργειας που απορροφάται δεν υπερβαίνει το 35%. Το συνολικό εμβαδόν των φύλλων των φυτών αυτών είναι μικρότερο από αυτό του *νυχτερινού νυχτολούλουδου*.

Ο μικρότερος συντελεστής απορρόφησης βρίσκεται στην περίπτωση του *κισσού*, ο οποίος έχει το μικρότερο εμβαδόν φύλλων ανάμεσα στα άλλα τέσσερα φυτά (βλ. Σχήμα 3.9). Την υψηλότερη μεταβλητότητα στην τυπική απόκλιση τη βρίσκουμε στο *χειμερινό νυχτολούλουδο* (0.16). Αυτό μπορεί να έχει σχέση με τα φύλλα του νυχτολούλουδου που διασκορπούν πιο πολλή ακουστική ενέργεια σε σύγκριση με τα φυτά με μικρότερο εμβαδόν επιφανείας των φύλλων, όπως ο *κισσός* (0.03). Το μέσο εμβαδόν ενός φύλλου του *νυχτερινού νυχτολούλουδου* είναι περίπου 0.006 m^2 , ενώ το εμβαδόν επιφανείας των φυτών *κισσού* είναι περίπου δέκα φορές μικρότερο. Όσο αυξάνει η συχνότητα του ήχου πάνω από τα 1.200 Hz, τόσο αυξάνει και η διαφορά μεταξύ του μετρούμενου και προβλεπόμενου φάσματος του συντελεστή απορρόφησης, ειδικά για φυτά με σχετικά υψηλό συνολικό εμβαδόν φύλλων. Σε αυτό το καθεστώς συχνοτήτων, ο διασκορπισμός από τα φύλλα γίνεται πιο έντονος και είναι αδύνατον να προβλεφθεί με ακρίβεια με τη χρήση του θετού ισοδύναμου μοντέλου του ρευστού. Το σχετικό σφάλμα στο συντελεστή απορρόφησης φαίνεται να είναι μεγαλύτερο σε φυτά με μεγάλο συνολικό εμβαδόν φύλλων. Για να μετρηθεί το ποσοστό της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργεια που διαχέεται που οφείλεται σε αποτελέσματα διασκορπισμού και αδρανειακά/ιξώδες αποτελέσματα, το εύρος των συχνοτήτων του σωλήνα αντίστασης, πρέπει να επεκταθεί. Αυτό παρουσιάζει μια πειραματική πρόκληση αφού το μέγεθος του σωλήνα αντίστασης, που χρειάζεται για το αντιπροσωπευτικό δείγμα φυτού, πρέπει να είναι σχετικά μεγάλο έτσι ώστε η μέγιστη συχνότητα να παραμείνει περιορισμένη για να ικανοποιεί την προσέγγιση του επίπεδου κύματος.

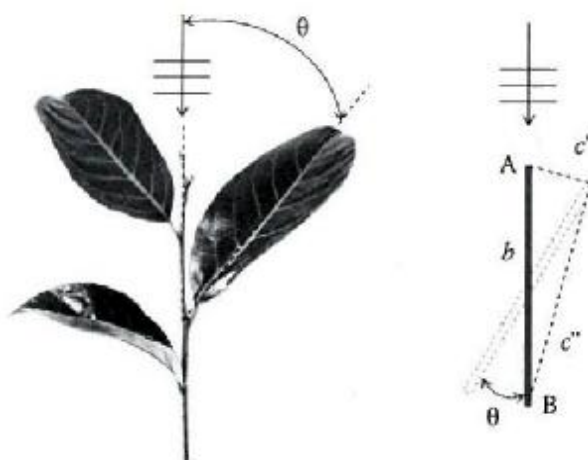
Το φάσματα των προβλεπόμενων και μετρούμενων συντελεστών απορρόφησης του σχήματος 3.9 δηλώνουν ότι η προσέγγιση του ισοδύναμου μοντέλου του ρευστού μπορεί να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις (με προβλεπόμενο σφάλμα $E < 2\%$, Εξίσωση (3.12)) της ακουστικής συμπεριφοράς των χωμάτων.

Υπάρχει μία σημαντική διαφορά στην ικανότητα αυτών των δύο τύπων χωμάτων να απορροφούν τον ήχο. Ένα στρώμα πάχους 70 mm από μικρής πυκνότητας χωμάτινο υπόστρωμα, μπορεί να απορροφήσει από 70% έως 100% της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας, εύρους συχνοτήτων μεγαλύτερο των 400 Hz. Αυτή η απόδοση ακουστικής απορρόφησης είναι κοντά με αυτή που αναμένεται από ένα στρώμα υαλοβάμβακα ή κάποιο παρόμοιου πάχους. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε ακόλουθα μέρη, δείχνουν ότι η

παρουσία ζωντανών φυτών σε τέτοιου είδους χώμα δεν οδηγεί σε ουσιαστική αύξηση του συντελεστή απορρόφησης. Η απορρόφηση του στρώματος από πηλώδες χώμα, πάχους 100 mm, είναι περιορισμένη στο 30% της προσπίπτουσας ενέργειας σε όλο το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Το πορώδες του πηλώδους χώματος είναι σχετικά μικρό, ενώ η αντίσταση ροής είναι σχετικά μεγάλη. Συνεπώς, υπάρχει μεγάλη δυσαναλογία μεταξύ της αντίστασης του αέρα και αυτής του εδάφους, που παρεμποδίζει τη διείσδυση της προσπίπτουσας ακουστικής ενέργειας στην πορώδη δομή του χώματος. Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στα ακόλουθα τμήματα, δείχνουν ότι η παρουσία ζωντανών φυτών σε τέτοιου είδους χώμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του συντελεστή απορρόφησης του χώματος. Τώρα έχει ενδιαφέρον να συγκρίνουμε τις συμπερασματικές τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3, με κάποια μορφολογικά χαρακτηριστικά φυτών για να κατανοήσουμε καλύτερα, το πώς αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν την ακουστική απορρόφηση των φυτών. Η ανάλυση του μετρούμενου φάσματος συντελεστή απορρόφησης (Σχήμα 3.9) και των χαρακτηριστικών των φυτών που βρίσκονται στον Πίνακα 3.1, υποδηλώνει ότι η ικανότητα των φυτών να απορροφούν τον ήχο σχετίζεται καλύτερα στο εμβαδόν των φύλλων μέσα στον όγκο που καταλαμβάνεται από το φυτό. Το σχήμα 3.11 παρουσιάζει την εξάρτηση της αποτελεσματικής αντίστασης ροής στο συνολικό εμβαδόν των φύλλων. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτό το σχήμα απεικονίζουν ότι η συμπεριφορά της αποτελεσματικής αντίστασης ροής ακολουθεί δύο ξεχωριστά πρότυπα. Φαίνεται ότι αυτά τα πρότυπα ελέγχονται από την κυρίαρχη γωνία του προσανατολισμού των φύλλων. Το σχήμα 3.2 παρουσιάζει γραφικά τον ορισμό του προσανατολισμού των φύλλων που λαμβάνεται εδώ σε σχέση με το μίσχο (κοτσάνι) του φυτού που μεγαλώνει στην κατεύθυνση του κανονικού προσπιπτόμενου ηχητικό κύμα.



Εικόνα 3.11 : Εξάρτηση της αντίστασης ροής από το συνολικό εμβαδόν των φύλλων.



Εικόνα 3.12 : Ορισμός της κυρίαρχης γωνίας προσανατολισμού των φύλλων.

Σύμφωνα με τα δεδομένα για την κυρίαρχη γωνία του προσανατολισμού των φύλλων (βλ. Σχήμα 3.12), τα φυτά που έχουν ερευνηθεί μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες δύο ομάδες : (1) στα φυτά των οποίων τα φύλλα προσανατολίζονται σε μεγάλο βαθμό παράλληλα με την κατεύθυνση του προσπιπτόμενου ηχητικού κύματος (μικρή γωνία προσανατολισμού), και (2) στα φυτά των οποίων τα φύλλα προσανατολίζονται σε μεγάλο βαθμό κάθετα στην κατεύθυνση του προσπιπτόμενου ηχητικού κύματος (μεγάλη γωνία προσανατολισμού).

Αυτή η γωνία προσδιορίζει το αποτελεσματικό μήκος της διαδρομής που ακολουθεί το προσπίπτων ηχητικό κύμα που διαδίδεται μέσω του φύλλου του φυτού με χαρακτηριστική διάσταση φύλλου (b) και κυρίαρχη γωνία του προσανατολισμού των φύλλων (θ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Προφανώς, το αποτελεσματικό μήκος της διαδρομής του προσπίπτων ηχητικού κύματος μεταξύ δύο σημείων A και B, ελέγχει τη μέγιστη τιμή της στρεβλότητας που πρέπει να υιοθετηθεί για την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ του ισοδύναμου μοντέλου του ρευστού και τα πειραματικά δεδομένα για το συντελεστή ακουστικής απορρόφησης. Φαίνεται λογικό να υποθέσουμε ότι τα φύλλα που φαίνονται στο Σχήμα 3.12 πρέπει να είναι κεντραρισμένα να μείνουν στη μέση ακριβώς της διαδρομής του προσπίπτων κύματος που διαδίδεται μεταξύ κάποιων αυθαίρετων σημείων A και B. Σε αυτή την περίπτωση, η παρεμπόδιση που δημιουργείται από αυτό το φύλλο θα είναι συμμετρική, έτσι ώστε το αποτελεσματικό μήκος της διαδρομής, $c = c' + c''$ (βλ. Σχήμα 3.12, δεξιά), που διαδίδεται από αυτό το ηχητικό κύμα είτε από την αριστερή, είτε από τη δεξιά πλευρά του φύλλου, θα είναι ίδια. Εδώ υποτίθεται ότι το εμβαδόν της πυκνότητας των φύλλων που μελετήθηκαν είναι σχετικά μεγάλη. Για αυτό, τα φύλλα είναι πυκνά τοποθετημένα, έτσι ώστε το ύψος του φυτού και το μήκος του μίσχου (κοτσανιού) των φύλλων έχουν μικρό ή μηδενικό αποτέλεσμα στη μέγιστη τιμή της στρεβλότητας. Σε αυτή την περίπτωση, είναι εύκολο να φανεί ότι το αποτελεσματικό μήκος της διαδρομής για το ακουστικό κύμα που διαδίδεται μέσω του φυτού ελέγχεται μόνο από τη γωνία των φύλλων και δίνεται από :

$$c = b (\cos(\frac{\theta}{2}) + 2\sin(\frac{\theta}{2})) \quad (3.13)$$

(Σύμφωνα με τον ορισμό του παράγοντα δομής από τους Zwicker και Korsten). Η στρεβλότητα εκφράζεται ως :

$$\alpha_{\infty} = c / b = \cos(\frac{\theta}{2}) + 2\sin(\frac{\theta}{2}) \quad (3.14)$$

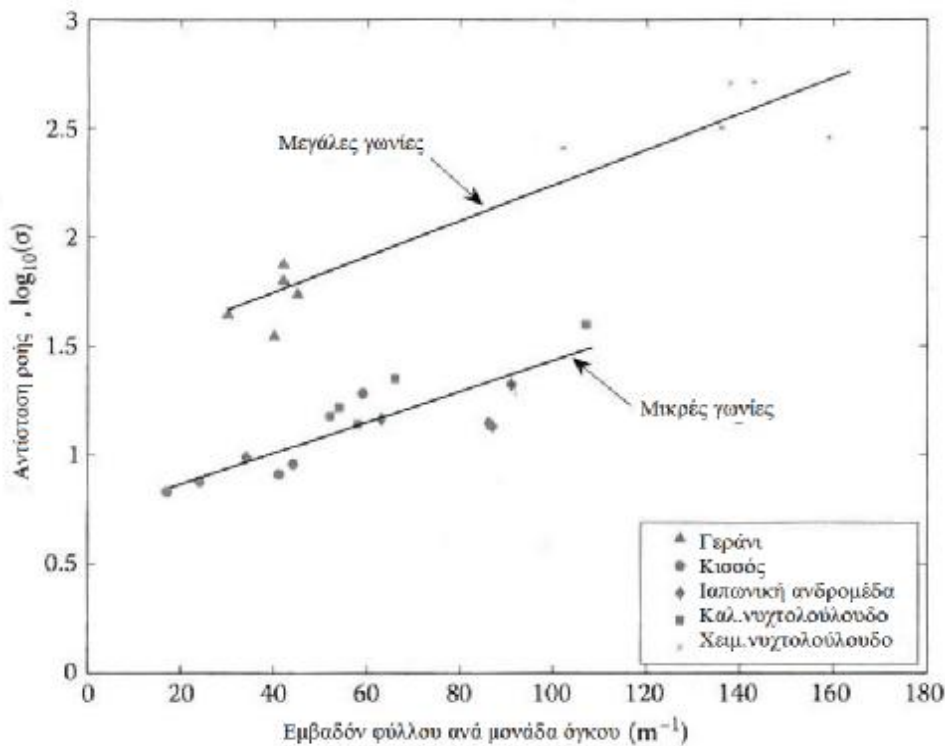
Αυτό συνεπάγεται ότι η μέγιστη θεωρητική τιμή της στρεβλότητας για ένα φυτό με προσανατολισμό φύλλων κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος διάδοσης, το οποίο είναι, $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\alpha_{\infty} = 3/\sqrt{2} \cong 2.12$.

Το αποτέλεσμα της κυρίαρχης γωνίας προσανατολισμού των φύλλων, αυτή είναι η αποτελεσματική στρεβλότητα, είναι ιδιαίτερα εμφανής στο Σχήμα 3.13, το οποίο παρουσιάζει την αντίσταση ροής σαν συνάρτηση της αναλογίας του εμβαδού των φύλλων στον όγκο που καταλαμβάνει το φυτό (πυκνότητα εμβαδού των φύλλων). Αυτά τα δεδομένα μας επιτρέπουν

να προτείνουμε δύο ημιεμπειρικές σχέσεις μεταξύ της αποτελεσματική αντίσταση ροής ενός φυτού και την πυκνότητα εμβαδού των φύλλων του :

$$\log_{10} \sigma = 0.0083A_u + 1.413, \text{ για } \theta > 70^\circ \quad (3.15)$$

$$= 0.0067A_u + 0.746, \text{ για } \theta > 40^\circ \quad (3.16)$$



Εικόνα 3.13 : Η αντίσταση ροής σε συνάρτηση με την πυκνότητα εμβαδού των φύλλων.

Αυτές οι σχέσεις είναι εκθετικές. Οι εκθετικές σχέσεις μεταξύ της αντανάκλασης του φωτός και του δείκτη εμβαδού των φύλλων, έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν από ερευνητές που δούλευαν επάνω στην τηλεσκόπηση της βιομάζας. Υπάρχει μία σημαντική διαφορά στις τιμές της αποτελεσματικής αντίστασης ροής μεταξύ διαφορετικών φυτών (βλ. Πίνακα 3.3). Η μέγιστη τιμή της αντίστασης ροής είναι για το χειμερινό νυχτολούλουδο, δείγμα 1 ($511 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$). Η ελάχιστη τιμή της αντίστασης ροής είναι για τον κισσό, δείγμα 5 ($6.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$). Αυτά τα δύο είδη φυτών χαρακτηρίζονται από τη μεγαλύτερη (143 m^{-1}) και μικρότερη (17 m^{-1}) πυκνότητα εμβαδού φύλλων, αντίστοιχα. Από την άποψη του φάσματος του συντελεστή απορρόφησης, τα φυτά αυτά εκθέτουν το υψηλότερο και το χαμηλότερο φάσμα του συντελεστή απορρόφησης, αντίστοιχα.

3.7 Απορρόφηση του χόματος παρουσία ενός φυτού

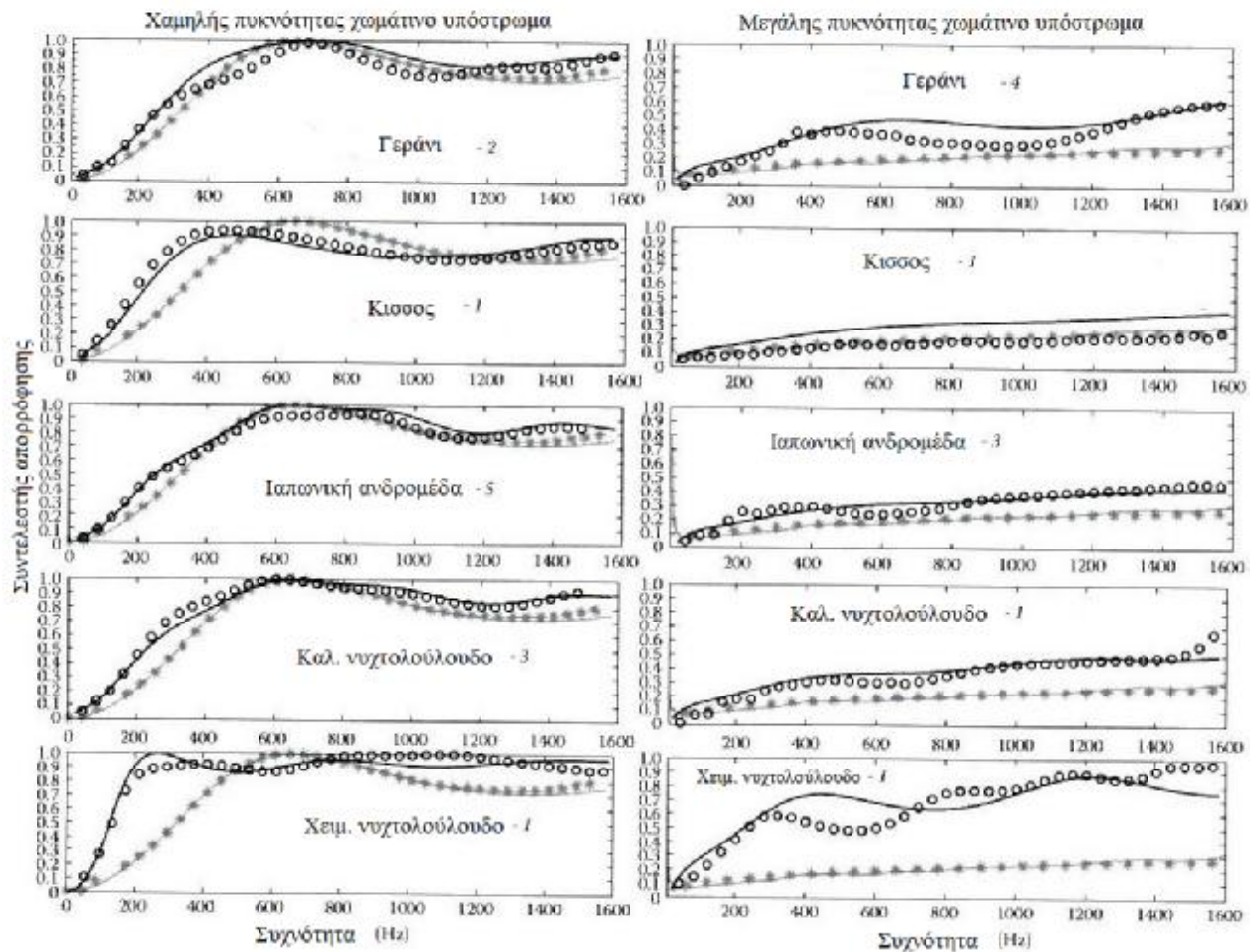
Τα μετρούμενα και τα συμπερασματικά χαρακτηριστικά των χωμάτων και των φυτών μπορούν τώρα να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του συντελεστή ακουστικής απορρόφησης ενός χωμάτινου στρώματος στο οποίο τοποθετήθηκε το δείγμα του φυτού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της προσέγγισης του προτύπου της μήτρας μεταφοράς, που συζητήθηκε σε προηγούμενα τμήματα. Σε αυτό το πείραμα, το δείγμα του φυτού δε φυτεύτηκε μέσα στο χώμα, απλώς τοποθετήθηκε στο ανώτερο χωμάτινο στρώμα έτσι ώστε να μην ενοχληθεί η πορώδη δομή του.

Μία σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου συντελεστή απορρόφησης για το χωμάτινο στρώμα μόνο και το σύστημα φυτού-χώματος, και του μετρούμενου συντελεστή απορρόφησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14 για τους δύο τύπους χωμάτων και πέντε τύπους φυτών που μελετήθηκαν σε αυτή τη δουλειά. Το κάθε δείγμα φυτού που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς για κάθε είδος υποδεικνύονται στις λεζάντες των γραφημάτων και οι κατάλληλες μη ακουστικές παράμετροι βρίσκονται στον Πίνακα 3.3. Η υφή των δύο χωμάτων καθορίζει την κατανομή μεγέθους πόρων που ελέγχει τις ακουστικές τους ιδιότητες. Η παρουσία των ινών, των μεγάλων σωματιδίων περλίτη και του πολυμερούς τζελ στο υπόστρωμα δημιουργεί μεγαλύτερους πόρους, και ως εκ τούτου, έχει σημαντική επιρροή στο συντελεστή ακουστικής του απορρόφησης, ενώ η υφή του μεγάλης πυκνότητας, πηλώδους χόματος είναι λεπτότερο με στενά τοποθετημένα σωματίδια, τα οποία έχουν διάμετρο μικρότερη των 2 mm.

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι διαφορετικά είδη φυτών έχουν σημαντικά αποτελέσματα στο συντελεστή απορρόφησης του χόματος. Η παρουσία ενός φυτού στην κορυφή μεγάλης πυκνότητας, πηλώδους χόματος οδηγεί σε μία αισθητή αύξηση του συντελεστή απορρόφησης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (βλ. Σχήμα 3.14). Η μεγαλύτερη αύξηση (έως 50%) παρατηρείται στην περίπτωση των φυτών με το μεγαλύτερο εμβαδόν πυκνότητας φύλλων, αυτό είναι στην περίπτωση που φυτεύεται το *χειμερινό νυχτολούλουδο*. Αντιθέτως, τα φυτά με σχετικά μικρό εμβαδόν πυκνότητας φύλλων, έχουν μικρό ή καθόλου αποτέλεσμα στο μετρούμενο συντελεστή απορρόφησης αυτού του τύπου χόματος, αυτό είναι ο *κισσός* ή η *ιαπωνική ανδρομέδα*. Το θετό ισοδύναμο μοντέλο του ρευστού μπορεί να προβλέψει το φάσμα του συντελεστή απορρόφησης του συστήματος φυτού χόματος με σφάλμα του $\pm 8\%$. Οι πιο ακριβείς προβλέψεις έχουν επιτευχθεί στην περίπτωση του *καλοκαιρινού νυχτολούλουδου*, της *ιαπωνικής Ανδρομέδας* και του *γερανιού* (σφάλμα

μικρότερο του 3.5%) και για τους δύο τύπους χωμάτων. Οι λιγότερο ακριβείς προβλέψεις έχουν επιτευχθεί στην περίπτωση του *χειμερινού νυχτολούλουδου* (+-4.8%) και του *κισσού* (+-8%). Σε αυτό μπορεί να αποδοθεί μια μεγάλη μεταβλητότητα στον πειραματικά καθορισμένο συντελεστή απορρόφησης για το *χειμερινό νυχτολούλουδο* που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Ο συντελεστής απορρόφησης του *χειμερινού νυχτολούλουδου* φαίνεται να είναι ευαίσθητος στις αλλαγές της κυρίαρχης γωνίας του προσανατολισμού των φύλλων και της σύνθεσης των φυτών, το οποίο επιτεύχθηκε στο πείραμα όταν αυτό το φυτό τοποθετήθηκε στην κορυφή του στρώματος του πηλώδους χώματος. Αυτά μπορεί να μην είναι πανομοιότυπα στα πειράματα με το φυτό μόνο και το φυτό συν το χώμα. Στην περίπτωση του *κισσού*, το μοντέλο βάζει μεγαλύτερη τιμή στο συντελεστή απορρόφησης του χώματος παρουσία του φυτού. Η μείωση στο συντελεστή απορρόφησης του χώματος παρουσία του *κισσού* επίσης έχει παρατηρηθεί σε άλλα πειράματα. Μπορεί να υποστηριχθεί ότι είναι μάλλον δύσκολο να γίνει ακριβής πρόβλεψη για τον *κισσό* επειδή έχουν χαμηλό εμβαδόν ανά μονάδα όγκου και μικρό βάρος φύλλων. Η παρουσία του *καλοκαιρινού νυχτολούλουδου*, της *ιαπωνικής Ανδρομέδας* και του *γερανιού* στην κορυφή του χωμάτινου υποστρώματος χαμηλής πυκνότητας, έχει σχετικά μικρό αποτέλεσμα στο συντελεστή απορρόφησης του χώματος (βλ. Σχήμα 3.14, αριστερά).

Η παρουσία του *χειμερινού νυχτολούλουδου* έχει σαν αποτέλεσμα μία αύξηση ποσοστού έως 80% στο συντελεστή απορρόφησης σε συχνότητες κάτω των 400 Hz. Υπάρχει μία 15 - 20% αύξηση στο συντελεστή απορρόφησης σε συχνότητες κάτω των 400 Hz και μία 10 - 15% αύξηση σε συχνότητες πάνω από τα 800 Hz όταν το *χειμερινό νυχτολούλουδο* προστίθεται σε χωμάτινο υπόστρωμα μικρής πυκνότητας. Γενικά, υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ των πρότυπων και των προβλεπόμενων φασμάτων ακουστικής απορρόφησης με μέγιστο σφάλμα 8% στην περίπτωση που ο *κισσός* τοποθετηθεί στην κορυφή του πηλώδους χώματος.



Εικόνα 3.14 : Μετρούμενο και προβλεπόμενο φάσμα συντελεστή απορρόφησης για τα πέντε είδη φυτών με χαμηλής πυκνότητας χωμάτινο υπόστρωμα και υψηλής πυκνότητας πηλώδες χώμα με τη χρήση του μοντέλου μήτρας μεταφοράς.

3.8 Μοντελοποιώντας το συντελεστή τυχαίας πρόσπτωσης του χώματος με και χωρίς φυτά

Σε προηγούμενα τμήματα, φάνηκε ότι είναι δυνατόν να προβλέψουμε το επίπεδο κύμα, το συντελεστή ακουστικής απορρόφησης κανονικής πρόσπτωσης του χώματος με τη χρήση ενός μοντέλου που αντιμετωπίζει το έδαφος ως ένα ισοδύναμο υγρό μέσο. Φαίνεται επίσης πως το ίδιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλεφθεί ο συντελεστής ακουστικής απορρόφησης κανονικής πρόσπτωσης των φυτών. Η ακουστική απορρόφηση του συστήματος χώμα-φυτό προσδιορίστηκε με τη χρήση της προσέγγισης μήτρας μεταφοράς δεδομένου ότι η χαρακτηριστική αντίσταση και η σταθερά διάδοσης για καθένα από τα δύο

ισοδύναμα στρώματα σε αυτό το σύστημα είναι γνωστά. Η χρήση του ισοδύναμου μοντέλου του ρευστού μας δίνει τη δυνατότητα να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω του ιξώδους και η απαγωγή θερμότητας του ηχητικού κύματος όπως αυτό διαδίδεται μέσω του φυλλώματος του φυτού και του πηλώδους και πορώδους χωμάτινου στρώματος. Πιστεύεται πως αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να εξηγήσουν το φάσμα του συντελεστή ακουστικής απορρόφησης που παρατηρείται στα πειράματα του σωλήνα αντίστασης με τα φυτά.

Εδώ επεκτείνουμε το ίδιο μοντέλο ισοδύναμο ρευστού για την εξομοίωση του συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης. Χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (3.8) και (3.9) για την πρόβλεψη του εξαρτώμενου από τη γωνία συντελεστή απορρόφησης ενός σκληρά υποστηριζόμενου πορώδους δείγματος. Σε αυτή την περίπτωση, υποθέτουμε πως ο συντελεστής απορρόφησης του χώματος ή του φυτού μπορεί να είναι εξαρτώμενος από τη γωνία, οπότε οι Εξισώσεις (3.10) και (3.11) γίνονται :

$$\alpha(\varphi) = 1 - \left| \frac{Z_s(\varphi) - 1}{Z_s(\varphi) + 1} \right|^2 \quad (3.17)$$

και

$$z_s(\varphi) = z_b / \cos\varphi \coth(-ik_b d \cos\varphi) \quad (3.18)$$

αντίστοιχα. Εδώ, φ είναι η γωνία πρόσπτωσης.

Μία κοινή έκφραση για το συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης είναι :

$$\bar{\alpha} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\varphi) \cos\varphi \sin\varphi d\varphi \quad (3.19)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης μπορεί να προσεγγισθεί με οποιαδήποτε από τις ακόλουθες εκφράσεις :

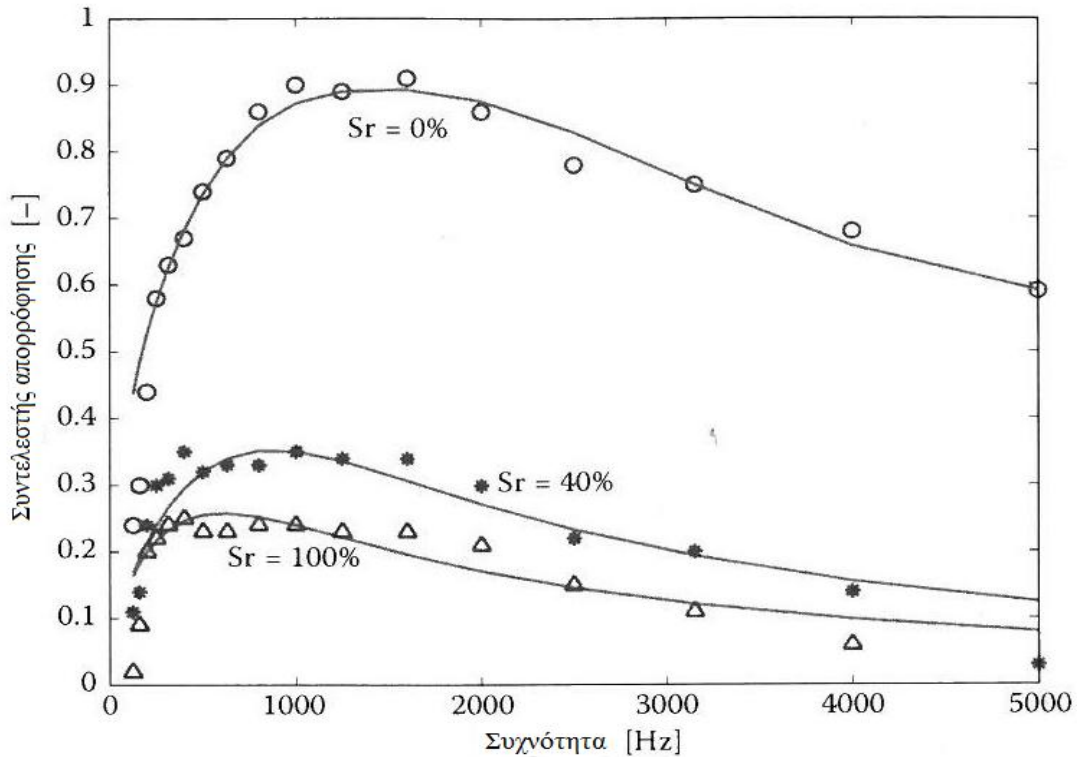
$$\bar{\alpha} = \frac{4}{Z_g} \left[\ln(1 + Z_g) - \frac{Z_g}{1 + Z_g} \right] \quad \text{ή} \quad \bar{\alpha} = \frac{8}{Z_g^2} \left[1 + Z_g - \frac{Z_g}{1 + Z_g} - 2 \ln(1 + z_g) \right] \dots\dots(3.20)$$

$$\text{Όπου} \quad Z_g = \frac{1 + \sqrt{\alpha(0)}}{1 - \sqrt{\alpha(0)}} \quad (3.21)$$

είναι η λεγόμενη ισοδύναμη αντίσταση.

Το χώμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν ένα μικρής πυκνότητας χωμάτινο υπόστρωμα του οποίου τα χαρακτηριστικά συζητήθηκαν σε προηγούμενους τομείς. Το αποτέλεσμα της συμπίεση του χώματος όταν τοποθετείται στο θάλαμο αντήχησης και το αποτέλεσμα της προσθήκης νερού στο χωμάτινο αυτό υπόστρωμα, είναι μάλλον πολύπλοκα και φαίνεται να περιορίζονται στο ανώτερο στρώμα του χώματος. Ως εκ τούτου, πρέπει άμεσα να προσδιορίσουμε το αποτέλεσμα της υγρασίας στο συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα χωμάτινο υπόστρωμα. Ελεγχόμενα ποσά νερού προστέθηκαν στο πορώδες χώμα για την εξομοίωση μιας σειράς συνθηκών διαπότισης με νερό. Το σχήμα 3.15 δείχνει το μετρούμενο συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης για το χώμα σε τρία διαφορετικά στάδια διαπότισης : $S_r = 0,40$ και 100% .

Το χωμάτινο υπόστρωμα που χρησιμοποιείται εδώ αποτελείται από πόρους με σχετικά μεγάλη διάμετρο. Επίσης περιέχει ένα ποσοστό μεσοπόρων (> 1 mm κλίμακα) που δημιουργούνται γύρω από τα σωματίδια περλίτη και πολυμερούς τζελ, τα οποία είναι σχετικά μεγάλα. Εάν η άνω επιφάνεια του υλικού αυτού ψεκασθεί με νερό, τότε το νερό τείνει να διαπεράσει τα πρώτα χιλιοστά του χωμάτινου δείγματος μόνο για να απορροφηθεί από τα σωματίδια του πολυμερούς τζελ που περιορίζονται στην κορυφή. Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα ένα υλικό με διαστρωμάτωση μεγέθους πόρων. Οι ακουστικές ιδιότητες αυτού του πολυστρωματικού υλικού δε μπορεί πλέον να μοντελοποιηθεί με τη χρήση της υπόθεσης της ομοιόμορφης κατανομής μεγέθους πόρων και χρειάζονται πληροφορίες για τη διαστρωμάτωση μεγέθους πόρων.



Εικόνα 3.15 : Ο μετρούμενος (σημάδια) και ο μοντελοποιημένος (συμπαγείς γραμμές) συντελεστής τυχαίας πρόσπτωσης ενός χωμάτινου υποστρώματος πάχους 100 mm σε διαφορετικά στάδια διαπότισης.

Με αυτό τον τρόπο, οι ακουστικές ιδιότητες του ανώτερου, διαποτισμένου με νερό, και του κατώτερου, σχετικά ξηρού, χωμάτινου στρώματος μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση δύο ζευγάρια μη ακουστικών παραμέτρων. Το σχήμα 3.15 δείχνει, το συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης που προβλέπεται για τα τρία επίπεδα της διαπότισης με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου ρευστού και της προσέγγισης δύο στρωμάτων μήτρας μεταφοράς. Οι τύποι χρησιμοποιούν το συντελεστή απορρόφησης υπό κανονική πρόσπτωση, για τον υπολογισμό του ίδιου συντελεστή υπό τυχαία πρόσπτωση, δηλαδή για $\varphi = 0$ υπολογίζει το συντελεστή σε όλα τα επιμέρους φάσματα συχνοτήτων για το επίπεδο κύμα. Ο πίνακας 3.5 παρουσιάζει τις μη ακουστικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή απορρόφησης, όπως παρατηρήθηκε.

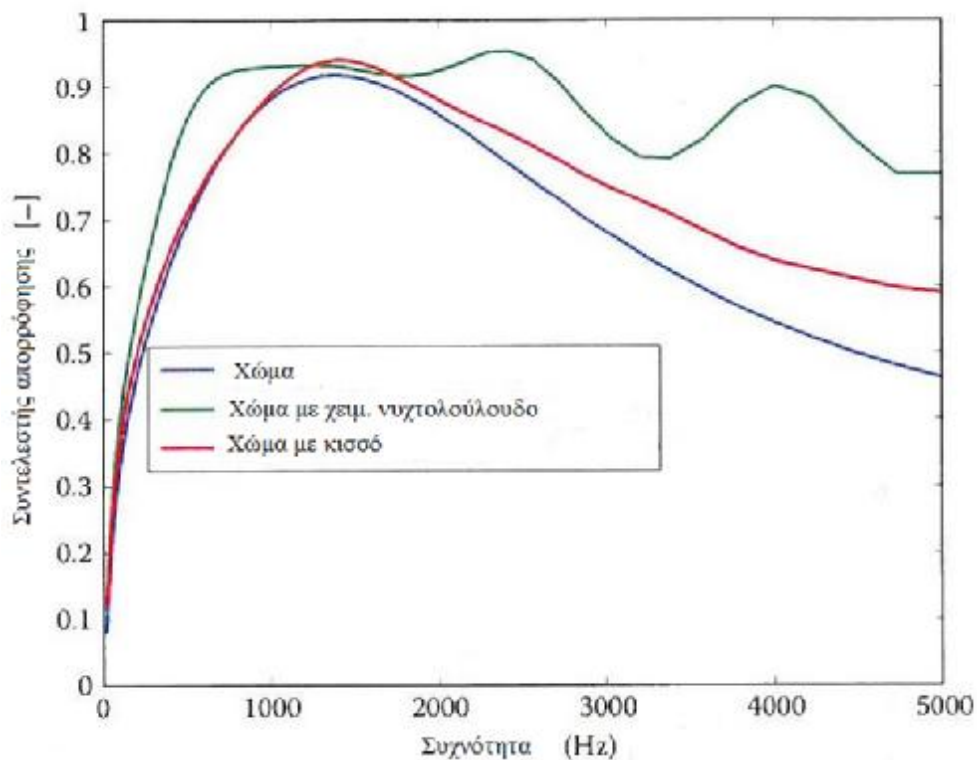
Ο συντελεστής απορρόφησης του χώματος μπορεί να ενισχυθεί με την προσθήκη ενός φυτού με σχετικά μεγάλο εμβαδόν πυκνότητας φύλλων και γωνία προσανατολισμού των φύλλων.

Εδώ, η μεγαλύτερη αύξηση (μέχρι και 50%) παρατηρήθηκε στην περίπτωση του *χειμερινού νυχτολούλουδου* ή του *γερασιού*, φυτεμένα σε χώμα μεγάλης πυκνότητας.

Πίνακας 3.5 : Οι μη ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

Βαθμός διαπότισης (%)	Στρώμα	Αντίσταση ροής (Pa*s*m ⁻²)	Πορώδες	Στρεβλότητα	Πάχος στρώματος (mm)
0	Ανώτερο	7.65 x 10 ³	0.25	1.0	16.0
0	Κατώτερο	1.11 x 10 ³	1.0	1.0	84.0
40	Ανώτερο	7.65 x 10 ³	0.01	1.0	3.4
40	Κατώτερο	7.65 x 10 ³	1.0	1.0	96.6
100	Ανώτερο	7.65 x 10 ³	0.01	1.0	6.0
100	Κατώτερο	7.65 x 10 ³	1.0	1.0	94.0

Χώματα μικρής πυκνότητας, μεγάλης διαπερατότητας, εμφανίζουν μεγάλες τιμές ακουστικής απορρόφησης, όπως αυτές που συναντάμε στην περίπτωση του υαλοβάμβακα παρόμοιου πάχους. Η παρουσία του φυτού σε τέτοιου είδους χώμα έχει σημαντική επίδραση στο επίπεδο κύμα, στο φάσμα του συντελεστή απορρόφησης κανονικής πρόσπτωσης στις χαμηλές συχνότητες. Έχει τώρα ενδιαφέρον να μελετήσουμε το συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης, σε χώμα με και χωρίς φυτά. Για το σκοπό αυτό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα μη ακουστικά χαρακτηριστικά κάποιων φυτών, μαζί με τα χαρακτηριστικά του χώματος που προέρχονται από προηγούμενα τμήματα. Θα υιοθετήσουμε το ίδιο ισοδύναμο μοντέλο ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων του ακόλουθου συστήματος τριών στρωμάτων : στρώμα φυτού, ανώτερο και κατώτερο στρώμα χώματος.



Εικόνα 3.16 : Η προσομοίωση του συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης ξηρού χόματος με και χωρίς φυτό.

Πίνακας 3.6 : Οι μη ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

Φυτό	Αντίσταση ροής (Pa*s*m-2)	Πορώδες	Πορώδες (α)	Ύψος φυτού (mm)
Χειμ. Νυχτολούλουδο	512	0.96	2.05	80
Κισσός	9	0.99	1.1	180

Το σχήμα 3.16 παρουσιάζει το συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης του χόματος με και χωρίς φυτό. Οι παράμετροι του χόματος που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εξομοίωση, αντιστοιχούν στο δείγμα ξηρού χόματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5. Δύο διαφορετικά φυτά θεωρήθηκαν εδώ : Το χειμερινό νυχτολούλουδο και ο κισσός. Αυτά τα φυτά

χαρακτηρίζονται από σημαντικές διαφορές στο εμβαδόν της πυκνότητας των φύλλων. Το εμβαδόν της πυκνότητας των φύλλων του δείγματος του *χειμερινού νυχτολούλουδου* ήταν 141 m^{-1} ενώ για τον *κισσό* ήταν 41 m^{-1} . Οι άλλες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εξομοίωση φαίνονται στον Πίνακα 3.6. Τα χαρακτηριστικά αυτά αναπαρήχθησαν από τον Πίνακα 3.3 για τα δείγματα του *κισσού-2* και του *χειμερινού νυχτολούλουδου-1*.

Είναι ξεκάθαρο από τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 3.16 πως η παρουσία ενός σχετικά μικρού φυτού έχει αισθητό αποτέλεσμα στο συντελεστή απορρόφησης τυχαίας πρόσπτωσης του χώματος. Στην περίπτωση ενός φυτού με σχετικά μικρό εμβαδόν πυκνότητας φύλλων (*κισσός*), η αύξηση του συντελεστή απορρόφησης του χώματος είναι σχετικά μικρή (κάτω από 13%) και περιορίζεται κυρίως σε υψηλό εύρος συχνοτήτων πάνω από 1.000 Hz. Στην περίπτωση ενός φυτού με πολύ μεγαλύτερο εμβαδόν πυκνότητας φύλλων (*χειμερινό νυχτολούλουδο*), η αύξηση αυτή είναι πολύ πιο έντονη κάτω από τα 1.000 Hz (έως 15% στα 600 Hz) και πάνω από αυτά (έως 35% στα 4.000 Hz).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Ακουστικά χαρακτηριστικά δέντρων, φρακτών και θάμνων.

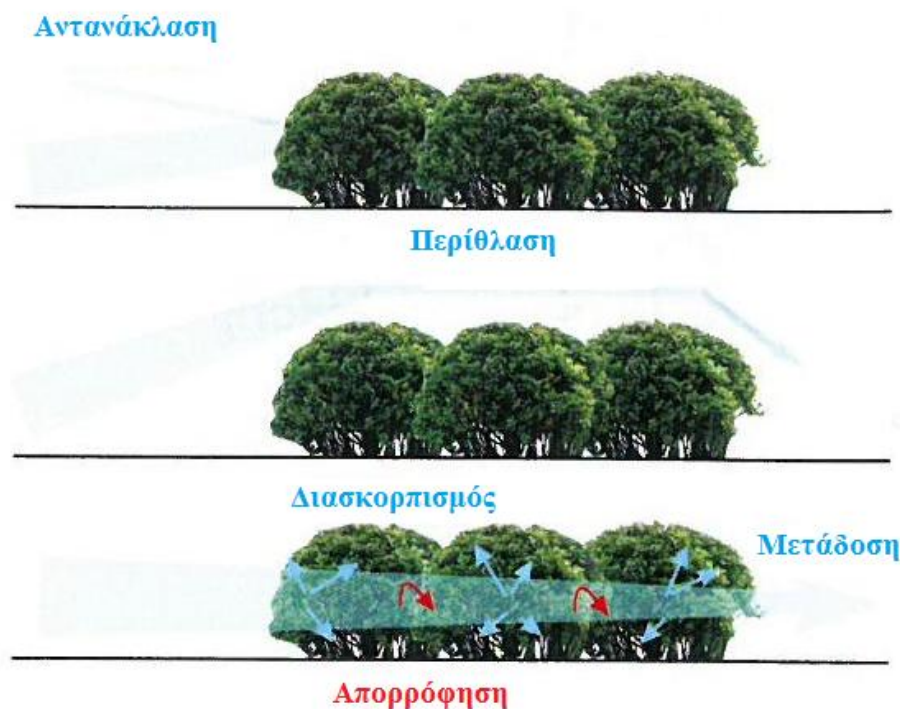
Αυτό το τμήμα εξετάζει και απεικονίζει τις βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηχητικών κυμάτων και βλάστησης. Μόνο η απορρόφηση από φυτικά στοιχεία, αποτέλεσμα των ιξωδοθερμικών επιδράσεων και των αποσβεννύμενων δονήσεων στις επιφάνειές τους, οδηγεί σε αποτελεσματική απόσβεση της ακουστικής ενέργειας στο ηχητικό κύμα. Ο διασκορπισμός του ήχου, με την απομάκρυνση της ηχητικής ενέργειας μακριά από την άμεση διαδρομή μεταξύ μιας πηγής και ενός δέκτη, μπορεί να είναι αποτελεσματικός καθώς και για τη μείωση των επιπέδων θορύβου σε ένα δέκτη. Η ανάκλαση και η διάθλαση στη βλάστηση θεωρούνται μικρής σημασίας σε εφαρμογές τυπικού θορύβου οδικής κυκλοφορίας. Οι βασικές αυτές αλληλεπιδράσεις απεικονίζονται από μετρήσεις σωλήνων αντιστάσεως, δονήσεων φύλλων, τυποποιημένης διασκόρπισης σε αντηχητικό δωμάτιο, επίσης από επί τόπου πειράματα διασκορπισμού κοντά σε δέντρα και από αριθμητικούς υπολογισμούς.

4.1 Εισαγωγή

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ηχητικών κυμάτων και βλάστησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί είτε ως άμεσες ακουστικές επιδράσεις είτε ως έμμεσες. Οι άμεσες (βλ. σχήμα 4.1) συνδέονται με δύο κύριες διαδικασίες, από τις οποίες η μία είναι η ανακατανομή της ηχητικής ενέργειας και η άλλη είναι η απορρόφηση. Η ανακατανομή του ήχου συμβαίνει με αντανάκλαση, διάθλαση και διασκορπισμό όταν έρχεται σε επαφή με στοιχεία φυτού, όπως κορμούς, κλαδιά και φύλλα. Μόνο η απορρόφηση οδηγεί σε αποτελεσματική απώλεια της ακουστικής ενέργειας, η οποία στην πραγματικότητα σημαίνει μεταφορά για τη θερμότητα. Παρ' όλα αυτά, η ανακατανομή της ηχητικής ενέργειας μπορεί να είναι αποτελεσματική στη μείωση του θορύβου σε ένα μόνο δέκτη επίσης. Εδώ θα συζητηθούν μετρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις που απεικονίζουν τέτοιες άμεσες αλληλεπιδράσεις.

Τα έμμεσα ακουστικά αποτελέσματα οφείλονται σε δευτερεύουσα δράση εξαιτίας της παρουσίας της βλάστησης. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι αυτά τα αποτελέσματα είναι λιγότερο σημαντικά από τα άμεσα και συχνά τα ξεπερνούν. Η ανάπτυξη ενός ακουστικά μαλακό χόμα κάτω από βλάστηση, που ονομάζεται *πάτωμα δάσους*, είναι το αποτέλεσμα της ριζοβολίας του φυτού και το σχηματισμό στρώματος μαυροχώματος που αποτελείται από φυτικά υπολείμματα. Επίσης η αλλαγή της μικροκλιματολογίας από τους θόλους, με τη σειρά

τους επηρεάζουν τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης του ήχου, μπορεί να είναι μία πολύ σημαντική έμμεση επίδραση.



Εικόνα 4.1 : Απεικόνιση των απευθείας αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ηχητικών κυμάτων και της βλάστησης.

4.2 Απορρόφηση των φύλλων

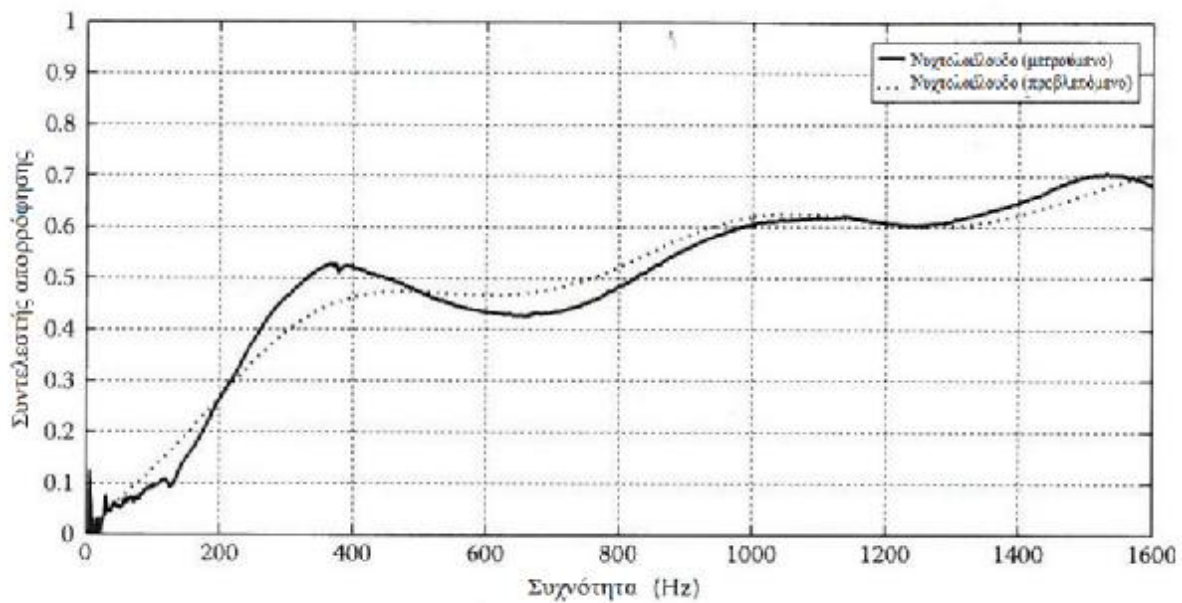
Δύο φυσικά φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε απορρόφηση του ήχου. Αρχικά, στην επιφάνεια μεταξύ της επιφάνειας ενός φύλλου και του αέρα, η απορρόφηση προκαλείται από ιξωδοθερμικές επιδράσεις. Δεύτερον, τα ηχητικά κύματα χάνουν μέρος της ενέργειάς τους με το να κάνουν να φύλλα να πάλλονται. Τα φύλλα ακολουθούν την ταλάντωση των προσπιπτόντων κυμάτων. Μέρος της ενέργειας των παλλόμενων φύλλων επανεκπέμπεται και αυτή η ενέργεια τότε γίνεται πάλι ήχος που μεταφέρεται από τον αέρα. Ένα άλλο μέρος των δονήσεων αυτών θα αποσβεσθεί, επειδή τα φύλλα είναι συνδεδεμένα σε άλλα μέρη του φυτού που είναι πιο άκαμπτα. Με τον τρόπο αυτό, μέρος της ενέργειας του ηχητικού κύματος μετατρέπεται σε θερμότητα.

4.2.1 Μετρώντας την απορρόφηση των φύλλων

Οι αντανακλάσεις του ήχου από διαφορετικά φύλλα φυτών χαμηλής ανάπτυξης έχουν μετρηθεί σε έναν σωλήνα αντίστασης (Σχήμα 4.2 (a) – (d)). Αυτός ο τρόπος είναι ο παραδοσιακός τρόπος μέτρησης τον συντελεστή ακουστικής απορρόφησης υλικού, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου. Όπως με πολλά υλικά, υπάρχει μία αύξηση στις απορροφητικές ιδιότητες των φύλλων. Σε χαμηλές συχνότητες, ο συντελεστής απορρόφησης είναι κοντά στο μηδέν. Σε ένα τέτοιο πείραμα, όλοι οι μηχανισμοί απορρόφησης παρατηρούνται ταυτοχρόνως και δε γίνεται να ξεχωρισθούν τα ιξωδοθερμικά και τα λόγω ταλάντωσης αποτελέσματα. Γι' αυτό, η σχετική τους σπουδαιότητα είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα δείγματα των φυτών. Κάποια φυτά απορροφούν δύσκολα τον ήχο, ενώ για άλλα, τα αποτελέσματα είναι αρκετά έντονα (βλ. παραδείγματα σχήματος 4.2 (b) (d)). Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ακουστική απορρόφηση έχουν αναγνωρισθεί. Οι βασικές παράμετροι είναι το εμβαδόν πυκνότητας φύλλων (η ποσότητα της επιφάνειας που παρουσιάζεται από όλα τα φύλλα σε ένα δεδομένο όγκο του φυτού) και η κυρίαρχη γωνία των φύλλων σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης του ήχου. Το εμβαδόν πυκνότητας φύλλων συνδέεται στενά με την τριβή που φαίνεται από τον αέρα που κινείται μέσα από το φυτό, που μετριέται σαν αντίσταση ροής. Γενικά, μία υψηλή αντίσταση ροής, αποτρέπει τα ηχητικά κύματα από το να διεισδύσουν σε ένα υλικό. Ωστόσο, το τελευταίο, είναι ουσιώδες στην απόκτηση της απορρόφησης ακουστικής ενέργειας. Η κυρίαρχη γωνία των φύλλων καθορίζει τη στρεβλότητα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η παράκαμψη που πρέπει να κάνει το ηχητικό κύμα όταν ταξιδεύει μέσω ενός υλικού, σχετικό με τη διάδοση ευθείας γραμμής. Η απορρόφηση των φυτών ενισχύεται όταν ο ήχος είναι προσπίπτων σε σωστές γωνίες στην επιφάνεια των φύλλων. Η απορρόφηση των φύλλων που εξαρτάται από τη συχνότητα μπορεί να προβλεφθεί με λογικά απλά αριθμητικά μοντέλα.

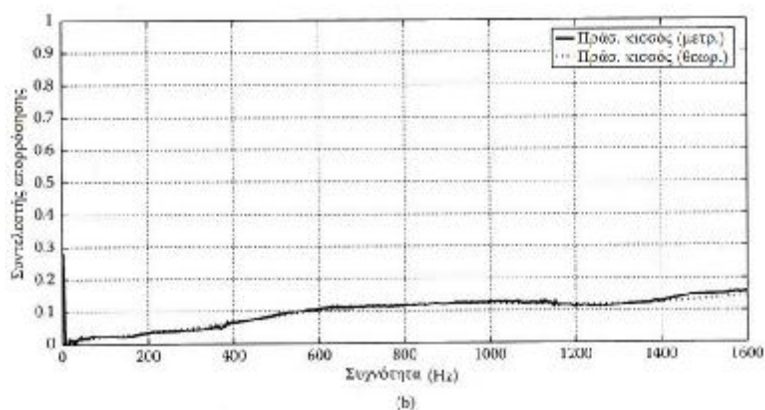


(c)



(d)

Εικόνα 4.2 : Μετρήσεις απορρόφησης (σε σωλήνα αντίστασης) των φύλλων (εν απουσία χρώματος) των χαμηλά αναπτυσσόμενων φυτών. Οι διαφορές στην απορρόφηση μεταξύ των ειδών μπορεί να είναι μεγάλες. Ο κισσός (a, b) είναι ένα παράδειγμα χαμηλά αναπτυσσόμενου φυτού, ενώ τα φύλλα του νυχτολούλουδου (c, d) οδηγούν σε μεγαλύτερη απορρόφηση. Τα βασικά χαρακτηριστικά των φυτών επιτρέπουν ακριβή πρόβλεψη της αντίστασης της απορρόφησης στη συχνότητα του ήχου για κάθε φυτό.



Εικόνα 4.2 : (Συνέχεια)

4.2.2 Μετρώντας τις δονήσεις των φύλλων

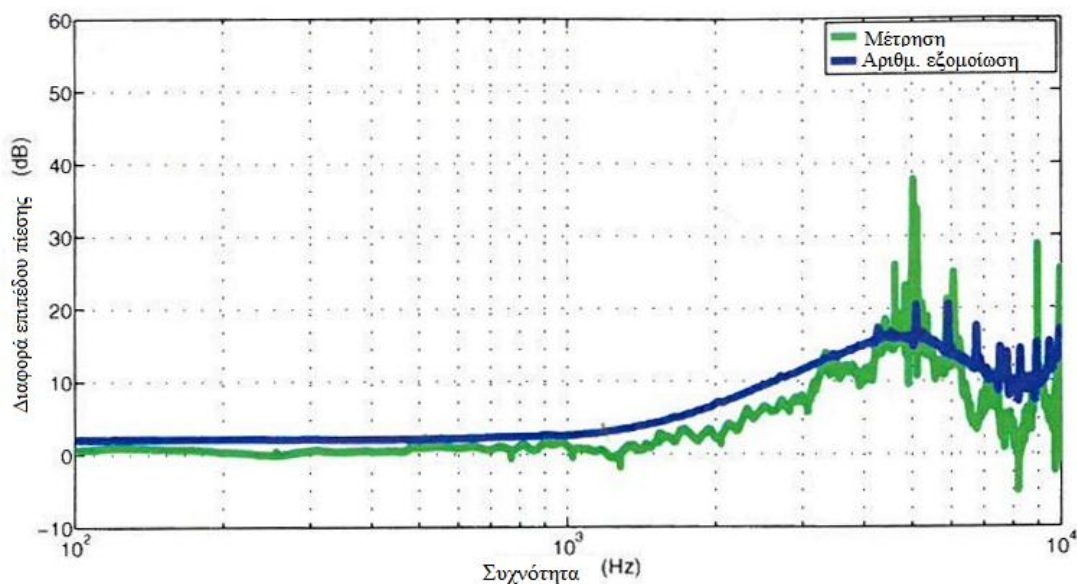
Οι δονήσεις των φύλλων έχουν μετρηθεί σε θάλαμο χωρίς ηχώ (Σχήμα 4.3). Ένα φύλλο τοποθετήθηκε μπροστά από ένα ηχείο, και ένας laser μετρητής δονήσεων Doppler (LDV) κατευθύνθηκε σε ένα σημείο στο φύλλο. Με αυτόν τον τρόπο, οι δονήσεις του υπό μελέτη φύλλου θα μπορούν να παρακολουθούνται.

Αυτές οι μετρήσεις δείχνουν πως τα φύλλα δονούνται από τον εισερχόμενο ήχο, εκθειάζοντας μια διακύμανση της πίεσης σε σχέση με το χρόνο παρόμοια αυτής του εισερχόμενου από τον αέρα ηχητικού κύματος. Να σημειωθεί πως αυτές οι ταλαντώσεις είναι πολύ γρήγορες για να τις αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι.

Η μετρούμενη διαφορά πίεσης στο φύλλο (1 cm μπροστά και 1 cm πίσω από το επίπεδο του φύλλου) υποδηλώνει ότι οι δονήσεις του φύλλου μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση του ήχου. Ωστόσο, αυτό το υψηλής συχνότητας αποτέλεσμα τυπικά κοντά στα 4-5 kHz και ισχυρή έχει με το μέγεθος των φύλλων. Τα μικρότερα φύλλα αναμένεται να εμφανίζουν τέτοια αποτελέσματα σε ακόμα μεγαλύτερες ηχητικές συχνότητες. Για μεγαλύτερα φύλλα, αυτά τα αποτελέσματα αναμένονται σε κάπως μικρότερες συχνότητες. Η ακανόνιστη μορφή της μετρούμενης καμπύλης δείχνει τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις και αντηχήσεις του φύλλου που σχετίζεται, για παράδειγμα, με την παρουσία κυμάτων που κάμπτονται στο μη ομοιόμορφο επίπεδο του φύλλου. Παρ 'όλα αυτά, αυτή η γενική συμπεριφορά μπορεί να μοντελοποιηθεί αριθμητικά αρκετά καλά υποθέτοντας ομοιόμορφες ιδιότητες των φύλλων (Σχήμα 4.4).



Εικόνα 4.3 : Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των δονήσεων για ένα φύλλο στο ηχητικό πεδίο με ένα laser μετρητή δονήσεων Doppler, σε συνδυασμό με τη μέτρηση πτώσης ακουστικής πίεσης πάνω από το φύλλο.



Εικόνα 4.4 : Μετρημένη και εξομοιωμένη (με ένα αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος) πτώση πίεσης πάνω από ένα φύλλο δάφνης.

4.3 Αντανάκλαση και περίθλαση απο τη βλάστηση

Η αντανάκλαση του ήχου θα συμβεί μεταξύ μιας ζώνης με βλάστηση και μιας χωρίς όσο υπάρχει επαρκή αλλαγή στις ιδιότητες διάδοσης. Επιπλέον αντανακλάσεις μπορεί να προέρχονται από βαθύτερα μέσα σε μια ζώνη βλάστησης επίσης. Οι κορμοί των δέντρων θεωρούνται πρωταγωνιστές στην αντανάκλαση του θορύβου οδικής κυκλοφορίας. Με την αυξανουσα συχνότητα και της πυκνότητας των δέντρων, οι αντανακλάσεις γίνονται πιο προφανείς. Η ηχητική ενέργεια που αντανακλάται πίσω στην πηγή δε θα φτάσει ένα δέκτη πίσω από τη βλάστηση.

Μετρήσεις έδειξαν ότι, σε σχετικές συχνότητες σε θόρυβο οδικής κυκλοφορίας, οι αντανακλάσεις είναι περίπου 10 dB χαμηλότερες από τον απευθείας ήχο στην άκρη ενός δάσους (μέση διάμετρος κορμού ίση με 27 cm, για περιοχή βασικού κορμού 0.5%). Αυτό σημαίνει μια σχετικά μικρή συνεισφορά από τις αντανακλάσεις στα συνολικά επίπεδα της πίεση του ήχου στην πλευρά του δέκτη. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα, στις εκρήξεις, τέτοιες αντανακλάσεις θα μπορούσαν να είναι σχετικές επειδή εμφανίζονται χωρισμένες σε χρόνο και μπορούν ακόμα να έχουν μεγάλο εύρος (οδηγώντας σε ακουστική ηχώ). Ωστόσο, η οδική κυκλοφορία είναι μία συνεχόμενη πηγή και τέτοιες αντανακλάσεις δε θα μπορούν ούτε να παρατηρηθούν, ούτε θα οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα.

Η διάθλαση είναι ένας όρος για τις φυσική διαδικασία της καμψής του ήχου γύρω από αντικείμενα. Η διάθλαση είναι ο λόγος για τον οποίο δεν έχουμε απόλυτη ησυχία πίσω από ένα τοίχο θορύβου, ακόμα και όταν η πηγή δεν είναι ορατή από τη μεριά του δέκτη. Η διάθλαση είναι εντονότερη κοντά στις άκρες στέρεων αντικειμένων. Συνεπώς, δεν αναμένονται ισχυρά αποτελέσματα διαθλάσεως κοντά σε ζώνη βλάστησης. Συγκεκριμένα, η ηχητική ενέργεια που μεταδίδεται μέσω ζώνης με βλάστηση θα είναι πιο σημαντική από μέρος της ηχητικής ενέργειας που διαθλάστηκε πάνω από την κορυφή ή που διαθλάστηκε κατά μήκος των πλευρών της.

4.4 Διασκορπισμός λόγω βλάστησης

Στη βλάστηση, συμβαίνουν πολλαπλοί διασκορπισμοί. Ο ήχος που προσπίπτει σε έναν κορμό, κλαδί ή φύλλο θα αλλάξει την κατεύθυνση διάδοσης και έπειτα θα διασκορπιστεί εκ νέου από κοντινά στοιχεία βλάστησης. Σαν αποτέλεσμα, μέρος της ηχητικής ενέργειας θα αφήνει συνεχώς την άμεση διαδρομή μεταξύ πηγής και δέκτη κατά τη διάδοση μέσω ζώνης με βλάστηση, αποδίδοντας χαμηλότερα επίπεδα πίεσης σε αυτό το δέκτη.

Ο διασκορπισμός οδηγεί σε ανακατεύθυνση της ηχητικής ενέργειας, σε αντίθεση με την απορρόφηση όπου η ηχητική ενέργεια χάνεται με την μετατροπή της σε θερμότητα. Ωστόσο, το κύριο μέρος της ηχητικής ενέργειας θα συνεχίσει να ακολουθεί την άμεση διαδρομή μεταξύ πηγής και δέκτη. Στην περίπτωση πολλών αλληλεπιδράσεων, για παράδειγμα, για μεγάλες αποστάσεις διάδοσης μέσω της βλάστησης, μπορούν να ληφθούν θετικά αποτελέσματα σχετικά με τη διάδοση του ήχου εν απουσία της βλάστησης. Αυτό δε συμβαίνει μόνο εξ' αιτίας της ανακατεύθυνσης της ηχητικής ενέργειας, αφού πολλαπλοί διασκορπισμοί επίσης, επιτρέπουν περισσότερη απορρόφηση.

Ο διασκορπισμός θα γίνει έντονος όταν οι διαστάσεις των αντικειμένων είναι κοντά στο μήκος κύματος του ήχου. Υψηλές συχνότητες σημαίνουν μικρά μήκη κύματος, ενώ χαμηλές συχνότητες σημαίνουν μεγάλα μήκη κύματος. Με δεδομένες τις τυπικές διαστάσεις των στοιχείων στους θόλους, ο διασκορπισμός του φυλλώματος είναι ένα συχνό φαινόμενο που διακρίνεται πάνω από τα 2 kHz. Επίσης ανάμεσα σε κορμούς, θα έχουμε πολλαπλούς διασκορπισμούς. Η τελευταία επίδραση συμβαίνει σε πολύ μικρότερες συχνότητες δεδομένου ότι εμπλέκονται μεγαλύτερα κτίρια. Αυτό σημαίνει ότι ο διασκορπισμός από τους κορμούς, που επηρεάζει τις συχνότητες του ήχου που είναι κοντά στα μέγιστα στο τυπικό φάσμα, μπορεί να επηρεάσει τα συνολικά επίπεδα αποτελεσματικά.

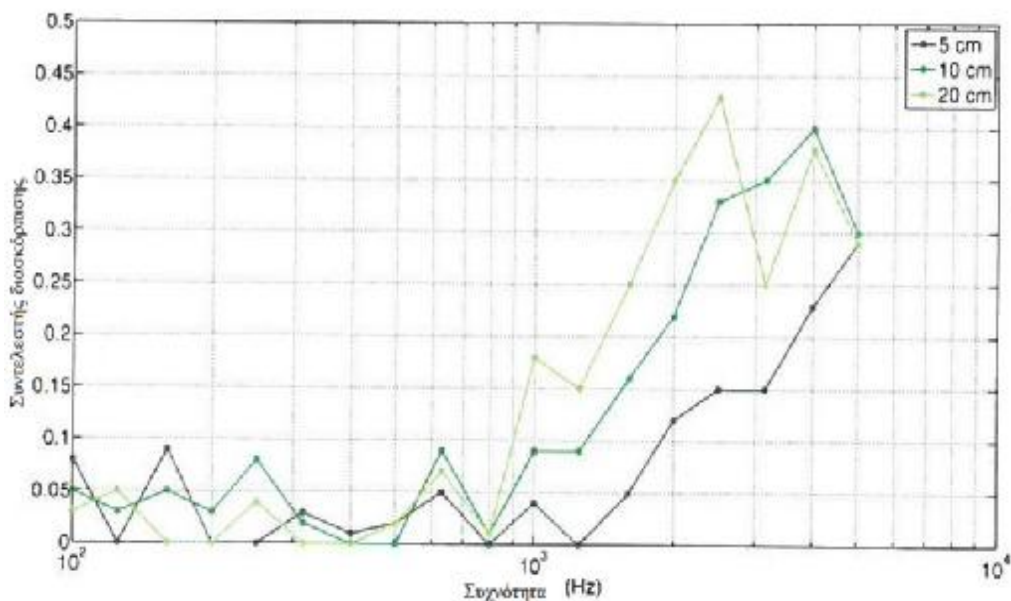
4.4.1 Μετρώντας το διασκορπισμό από ένα σωρό από φύλλα στο εργαστήριο

Ο συντελεστής διασκορπισμού από ένα σωρό από φύλλα έχει μετρηθεί σε έναν αντηχητικό θάλαμο με τη χρήση ενός στρεφόμενου τραπέζιου (Σχήμα 4.5), ακολουθώντας μία τυποποιημένη διαδικασία μέτρησης. Έχει τιμές μεταξύ 0 και 1, και δείχνει το κλάσμα της ακουστικής ενέργειας που αντανακλάται με μη κατοπτρικό τρόπο. Η τιμή του 0 σημαίνει πως δεν έχουμε καθόλου διασκορπισμό και δείχνει μια παρόμοια συμπεριφορά όπως αυτή σε μία εντελώς επίπεδη επιφάνεια. Η τιμή του 1 σημαίνει πως όλες οι αντανακλάσεις από μία επιφάνεια μπορούν να θεωρηθούν ως διασκορπισμός. Η χρήση μίας τέτοιας πειραματικής διάταξης χρειάζεται επειδή οι ιδιότητες του διασκορπισμού μπορεί να εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης του ήχου, και χρειάζεται καλά μελετημένος μέσος όρος για την επίτευξη ουσιαστικών αποτελεσμάτων.

Αυτό το πείραμα δείχνει καθαρά πως ο διασκορπισμός από το φύλλωμα είναι μία ενέργεια υψηλής συχνότητας. Κάτω από το 1 kHz, δεν παρατηρούνται σχετικά αποτελέσματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6. Συνεπώς, το φύλλωμα θα επηρεάσει μόνο μέρος του φάσματος οδικής κυκλοφορίας που περιέχει λιγότερη ενέργεια.



Εικόνα 4.5 : Ένα στρεφόμενο τραπέζι για τη μέτρηση του συντελεστή διασκόρπισης μιας δέσμης φύλλων.



Εικόνα 4.6 : Ο συντελεστής διασκόρπισης μιας δέσμης φύλλων σε συνάρτηση της συχνότητας.

Οι ιδιότητες διασκορπισμού εξαρτώνται επίσης από το βαθμό κάλυψης της βλάστησης και το πάχος του στρώματος αυτής.

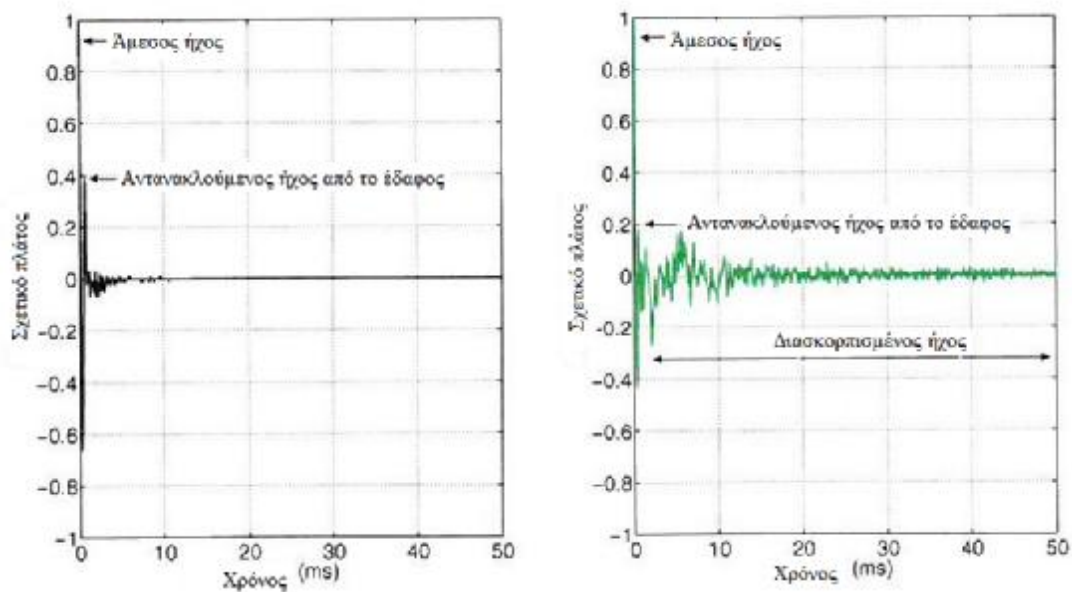
4.4.2 Διασκορπισμός από ένα δέντρο

Ο διασκορπισμός από τα κλαδιά, παρακλάδια και φύλλα στην κορώνα του δέντρου μετρήθηκε και βρέθηκε να είναι ορισμένος (Σχήμα 4.7). Λόγω των πολλαπλών διαδικασιών διασκορπισμού, τα ηχητικά κύματα μένουν αρκετά μέσα στο θόλο του δέντρου και ο ήχος φεύγει σταδιακά. Λόγω παρατεταμένης διαδρομής διάδοσης, θα υπάρξει μία αύξηση στη γεωμετρική εξάπλωση του ήχου και περισσότερες αλληλεπιδράσεις (δλδ. απορρόφηση) με τα στοιχεία του θόλου. Ο χρόνος αντήχησης, ο οποίος είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στην ακουστική δωματίου, μπορεί να δώσει μία εκτίμηση για το μέγεθος της διαδικασίας του πολλαπλού διασκορπισμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτή, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος παραμονής του ήχου στο θόλο και τόσο μεγαλύτερη η επιρροή του δέντρου που εκθέτει στο ηχητικό πεδίο.

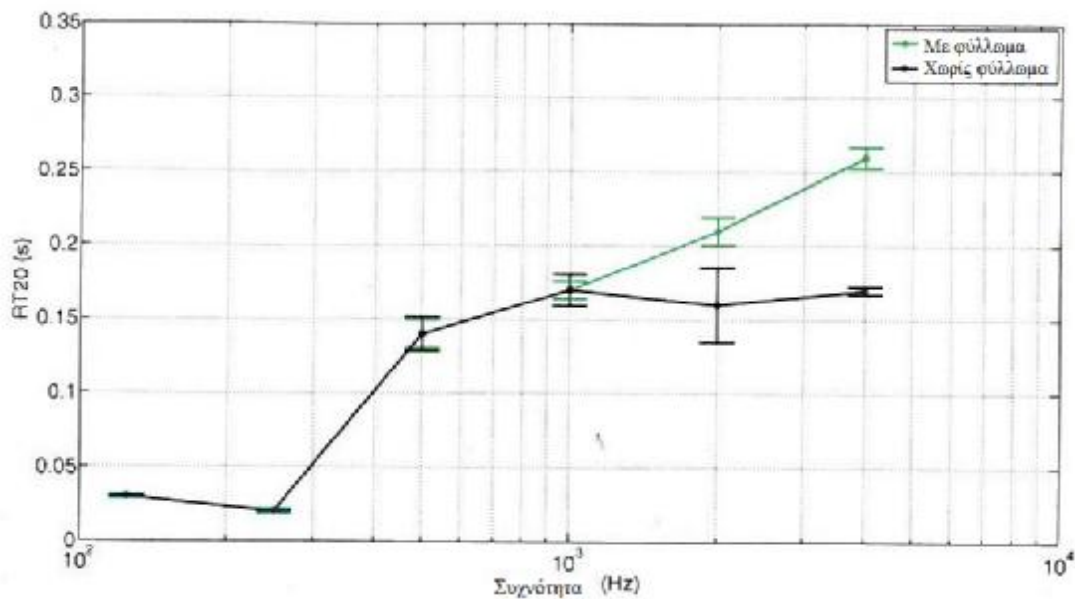
Διεξήχθησαν πολλές επί τόπου μετρήσεις. Με αυξανόμενο μέγεθος κορώνας και ηχητική συχνότητα, ο πολλαπλός διασκορπισμός μέσα στην κορώνα γίνεται εντονότερος. Ακόμα και

χωρίς φύλλωμα, το δέντρο είναι ένα καλό αντικείμενο διασκορπισμού. Στα φύλλα, ο χρόνος αντήχησης είναι αυξημένος, ειδικά πάνω από το 1 kHz (Σχήμα 4.8), ο οποίος συμφωνεί με τις προαναφερθείσες εργαστηριακές μετρήσεις.

Ανάλογα με την εφαρμογή, ο διασκορπισμός από ένα δέντρο μπορεί να είναι επιθυμητός αλλά και ανεπιθύμητος. Σε ένα αστικό περιβάλλον, οι πολλαπλές αντανακλάσεις του ήχου μεταξύ προσόψεων κτιρίων μπορεί να ενισχύσει σε μεγάλο βαθμό τον ήχο. Το αποτέλεσμα της αντήχησης είναι γνωστή σαν η (ακουστική) επίδραση του φαραγγιού του δρόμου.



Εικόνα 4.7 : Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου του της διάδοσης του παλμού κοντά σε ένα μεγάλο δέντρο (b), με την πηγή και το δέκτη να είναι στις απέναντι πλευρές του δέντρου. Για σύγκριση τα ίδια αποτελέσματα φαίνονται στην περίπτωση της διάδοσης του ήχου σε ανοιχτό πεδίο (a).

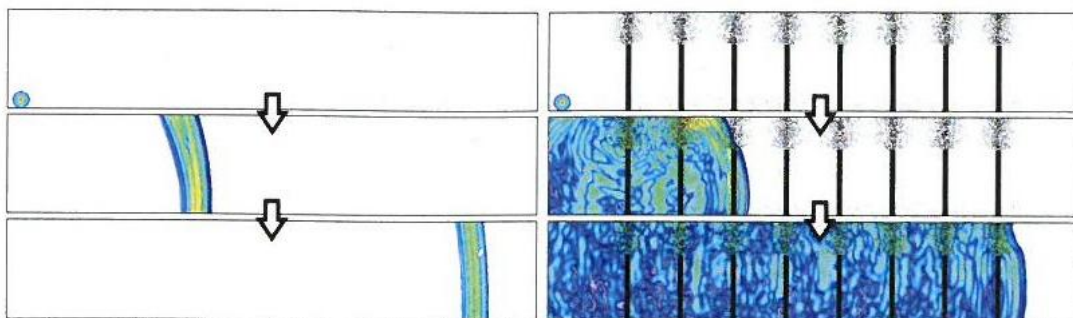


Εικόνα 4.8 : Ο χρόνος αντίληψης, σαν ποσοτική παράμετρος για το βαθμό διασκόρπισης του ήχου στο θόλο του δέντρου, με και χωρίς φύλλωμα, σε συνάρτηση με τη συχνότητα του ήχου.

Τα δέντρα μπορούν να μειώσουν την αντίληψη με το να ανακατευθύνουν μέρος του ήχου να εγκαταλείψει το δρόμο προς τα πάνω μετά από τις αλληλεπιδράσεις με τα στοιχεία του θόλου, χωρίς έτσι να συμβάλλει πια σε αυτή την αντίληψη του δρόμου. Η απευθείας διάδοση του ήχου μεταξύ μιας πηγής θορύβου οδικής κυκλοφορίας και των ψηλότερων πατωμάτων των κτιρίων εν μέρει θα ανακατευθυνθεί, έτσι ώστε να φτάσει στις προσόψεις αυτές λιγότερος ήχος. Από την άλλη, τα δέντρα στους δρόμους μπορεί να οδηγήσουν σε ελαφριά αυξημένα επίπεδα της πίεσης του ήχου λόγω του προς τα κάτω διασκορπισμού όταν και η πηγή και ο δέκτης είναι κάτω από τη βάση του θόλου. Αυτό είναι ξεκάθαρα ανεπιθύμητο. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα μπορεί να παρατηρηθεί κοντά σε ένα τοίχος θορύβου με μια σειρά δέντρων από πίσω του. Ωστόσο, λόγω της υψηλής συχνότητας φύσης αυτού του προς τα κάτω διασκορπισμού μέσα στην ακουστική ζώνη σιάς, αυτό αποδείχθηκε πειραματικά πως είναι μικρό πρόβλημα στις εφαρμογές θορύβου οδικής κυκλοφορίας. Τα θετικά αποτελέσματα σχετικά με την αντιανεμική λειτουργία της σειράς των δέντρων πίσω από ένα τείχος θορύβου είναι πολύ μεγαλύτερο.

4.4.3 Οπτικοποίηση διασκορπισμού στα πολλαπλά στρώματα σε μια ζώνη βλάστησης

Η αριθμητική τεχνική που λαμβάνει υπόψιν την καμπυλότητα του μετώπου του κύματος (γνωστή ως μέθοδος του πλήρους κύματος) επιτρέπει την οπτικοποίηση των διαδικασιών πολλαπλού διασκορπισμού σε μία ζώνη βλάστησης. Ο διασκορπισμός εμφανίζεται στην υπόροφη βλάστηση, στο στρώμα του κορμού και επίσης από τους θόλους. Με αυτό τον τύπο μοντέλου, οι όγκοι που καταλαμβάνονται από τους κορμούς μπορούν να συμπεριληφθούν ρητά και η τοποθέτηση των κορμών μπορεί να αναλυθεί λεπτομερώς. Ο διασκορπισμός από μικρότερα στοιχεία στο θόλο και από στρώμα θάμνων απομιμούνται χρησιμοποιώντας μια διανομή στοιχείων διασκορπισμού, με μία πάνω από το έδαφος βιομάζας παρόμοιας με εκείνης σε πραγματική βλάστηση. Το σχήμα 4.9 δείχνει καθαρά τη συσσώρευση ενός ιδιαίτερα διάχυτου ηχητικού πεδίου μέσα σε μία ζώνη βλάστησης, σε αντίθεση με το κυλινδρικό ακτινοβολό μοτίβο στην περίπτωση ενός δρόμου εν απουσία μιας ζώνης βλάστησης.



Εικόνα 4.9 : Στιγμιότυπα της διανομής εξομοιωμένου ηχητικού πεδίου σε τρεις στιγμές κατά τη διάδοση μέσω ανοιχτού πεδίου (αριστερά) και ζώνης βλάστησης (δεξιά) που ελήφθησαν με τη χρήση μιας 3D πεπερασμένης διαφοράς, υπολογισμός πεδίο του χρόνου. Ένας ακουστικός παλμός αρχικά διεγείρεται (πάνω γραμμή) και φαίνεται (μεσαία και κάτω γραμμή) η ανάπτυξη του πεδίου του ήχου (εξάπλωσης του μετώπου κύματος) κατά τη διάδοση. Η χρωματική κλίμακα είναι αυθαίρετη : το πορτοκαλί και το κίτρινο δείχνουν ζώνες υψηλά επίπεδα ακουστικής πίεσης, το πράσινο ενδιάμεσα και το μπλε χαμηλά. Οι πολλαπλές διεργασίες διασκορπισμού σε διαφορετικά στρώματα της ζώνης βλάστησης φαίνεται καθαρά στα δεξιά διαγράμμ

Βιβλιογραφία :

1. WHO. 2011. *Burden of disease from environmental noise*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.
2. European Environment Agency (EEA). 2013. NOISE- Noise observation and information service for Europe. Online at: www.eea.europa.eu/data-and-maps/explore-interactive-maps/promotions/noise-2014-noise-observation-and-information-service-for-europe (retrieved December 11, 2013).
3. WHO. 2000. *Guidelines for community noise*. Geneva: World Health Organization.
4. Kihlman, T., and M. E. Nilson. 2010. 40-45 dB- Criteria for a good sound environment in urban areas. Paper presented at the *Proceedings of the Inter-noise 2010*, INCE, Lisbon.
5. Kephelopoulos, S., M. Paviotti, and F. Anfosso – Ledee. 2012. *Common noise assessment methods in Europe* (CNOSSOS-EU). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
6. HARMONOISE. 2005. *Validation of the Harmonoise models*. Harmonoise Technical Report no. HAR28TR-041109-TNO11. TNO-TPD, The Netherlands.
7. Defrance, J., P. Jean, F. Koussa, T. Leissing, K. Attenborough, S. Taherzadeh, D. Botteldooren, T. Van Renterghem, K. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira, J. Forssen, J. Kang, A. Mandon, and R. Rohr. 2011. *State of the art of experience and models* (FP7 HOSANNA deliverable 2.1). Online at: <http://www.greener-cities.eu/>
8. Defrance, J., K. Attenborough, K. Horoshenkov, F. Koussa, P. Jean, and T. Van Renterghem. 2011. *Choice and adaptation of models* (FP7 HOSANNA deliverable 2.2). Online at: <http://www.greener-cities.eu/>
9. Defrance, J., P. Jean, F. Koussa, K. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira, T. Van Renterghem, J. Kang, Y. Smyrnova, and J. Forssen. 2013. *Application to innovations* (FP7 HOSANNA deliverable 2.3). Online at: <http://www.greener-cities.eu/>
10. T. Van Renterghem, P. Jean, and Defrance, J. 2012. *Improving microclimatology by trees, shrubs, and bushes* (FP7 HOSANNA deliverable 3.3). Online at: <http://www.greener-cities.eu/>

11. ISO.1998. Acoustics –Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes. Part 2: Transfer- function method (ISO 10534-2). Geneva, Switzerland: International Standards Organization.
12. Horoshenkov, K. V., and M. H. Mohamed/ 2006. Experimental investigation of the effects of water saturation on the acoustic admittance of sandy soils. *The Journal of the Acoustical Society of America* 120: 1910.
13. Miki, Y. 1990. Acoustic properties of porous materials- Generalization of empirical models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 11 (25-28).
14. Horoshenkov, K. V., A. Khan, and H. Benkeira. 2013. Acoustic properties of the low growing plants. *Journal of the Acoustical Society of America* 133 (5): 2554- 2565.
15. ISO. 1990, Acoustics-Materials for acoustic applications: Determination of airflow resistance (ISO 9053:1991). Geneva, Switzerland: International Standards Organization.
16. Heiskanen, J. 2006. Estimating above ground biomass and leaf area index in mountain birch forest using ASTER satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1135-1158.
17. ISO. 2003. Acoustics- Measurement of the sound absorption in the reverberation room (ISO 354: 2003). Geneva, Switzerland: International Standards Organization.
18. *Acoustics- Measurement of Random-Incident Absorption and Scattering Coefficients of Vegetation*. 2004. ISO 17497-1 (ISO, Geneva, Switzerland.).
19. Van Renterghem, T., and D. Botteldooren. 2002. Effect of row of trees behind noise barriers in wind. *Acta Acustica United with Acustica* 88(6): 869-878.
20. Defrance, J., P. Jean, F. Koussa, T. Van Renterghem, J. Kang, and Y. Smyrnova. 2014. Innovative barriers. In *Environmental methods for transport noise reduction*, eds. M. E. Nilson, R. Klæboe, and J. Bengtsson (pp. 19- 47). Oxford, U.K.: Spon Press.
21. Van Renterghem, T., D. Botteldooren. 2003. Numerical simulation of the effect of trees on downwind noise barrier performance. *Acta Acustica United with Acustica* 89(5): 764-778.

22. Van Renterghem, T., D. Botteldooren, and K. Verheyen. 2012. Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration* 331 (10): 2404-2425.
23. WHO. 2009. *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.