

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ**

**Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας**  
**Περιβάλλοντος**

**ΟΛΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ-ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ**  
**ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ**

**Παπαδόπουλος Νικόλαος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Ασημακόπουλος**

**Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Πειραιώς**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των επιπέδων θορύβου από ένα δρόμο σε ένα πεδίο υπολογισμού με σταθερό ή μεταβλητό βήμα, η ανάλυση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών και η εκτίμηση των επιπτώσεων του στον άνθρωπο.

Για τον υπολογισμό του θορύβου εξετάστηκαν 5 μοντέλα: το αμερικάνικο μοντέλο, *FHWA*, και η βελτιωμένη έκδοση του, η βρετανική μέθοδος, *CRTN*, το γερμανικό μοντέλο, *RLS-90*, το σουηδικό μοντέλο, *STL-86*, και το ιαπωνικό μοντέλο, *ASJ- 1993*.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια: Πολυπαραμετρική ανάλυση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου υπολογισμού του θορύβου, ανάλυση των αποτελεσμάτων του σε ομοιόμορφο και μεταβλητό υπολογιστικό πεδίο και τέλος στατιστική επεξεργασία των υπολογισμών για την εκτίμηση των επιπτώσεων του θορύβου στον άνθρωπο.

### Αποτελέσματα:

1. Από το σύνολο των μοντέλων, η μέθοδος που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου σε πεδίο ομοιόμορφου ή μεταβλητού διαμερισμού είναι η νεότερη έκδοση του βρετανικού μοντέλου, *CRTN*, καθώς αποτελεί μια μέθοδο απλή, εφαρμόσιμη για πλήθος περιπτώσεων, αξιόπιστη και βεβαίως αναγνωρίσιμη.
2. Αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό σύστημα εκτίμησης των επιπέδων θορύβου, με δυνατότητα λήψης μέτρων αντιμετώπισης όχλησης με τη δημιουργία ηχοπετασμάτων ή τη μείωση της ταχύτητας των οχημάτων και τέλος σύγκριση των αποτελεσμάτων των μέτρων με τη βοήθεια ισοθορυβικών καμπυλών. Στο σύστημα αυτό ενσωματώθηκαν οι λειτουργίες του μεταβλητού υπολογιστικού πεδίου και της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

3. Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος, η ταχύτητα των οχημάτων, η κλίση του οδοστρώματος και τα ηχοπετάσματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στα εκτιμώμενα επίπεδα θορύβου σε αντίθεση με την απόσταση του αποδέκτη από το έδαφος και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.
4. Με τη χρήση μεταβλητών υπολογιστικών πεδίων για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου σε μια περιοχή μειώνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος υπολογισμού και βελτιώνονται τα αποτελέσματα των ισοθορυβικών καμπυλών.
5. Από τη στατιστική επεξεργασία του πεδίου για το μοντέλο προσομοίωσης με και χωρίς ηχοπέτασμα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ηχοπέτασμα επιδρά και στην κατανομή της επιβάρυνσης του πληθυσμού. Έτσι, με τη χρήση του ηχοπετάσματος μειώνεται η μέση τιμή και η ασυμμετρία, και αυξάνεται η τυπική απόκλιση της κατανομής επιβάρυνσης του πληθυσμού σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Διονύσιο Ασημακόπουλο, για την ανάθεση του θέματος αλλά και το συνεχές ενδιαφέρον του.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Γιώργο Αραμπατζή, για την ειδική βιβλιογραφία που μου υπέδειξε σχετικά με τα μεταβλητά πεδία και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ το κ. Γιώργο Γούλα για την πολύτιμη βοήθεια του, τη συμπαράσταση του, καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μελετητή κ. Δημήτριο Αργυρόπουλο, Πολιτικό Μηχανικό-Περιβαλλοντολόγο που μου παρείχε την κατάλληλη υλικοτεχνική υποδομή και με βοήθησε σημαντικά στη δημιουργία και την εφαρμογή του μοντέλου υπολογισμού του θορύβου που υποβάλλεται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ν. Ι Παπαδόπουλος

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....</b>	<b>4</b>
2.1 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ .....	4
2.1.1 Δείκτες Κυκλοφοριακού Θορύβου .....	5
2.1.2 Όρια Δεικτών Κυκλοφοριακού Θορύβου .....	5
2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	6
2.3 ΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ.....	7
2.4 ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ.....	7
2.5 ΚΛΙΜΑΚΑ ΤΩΝ ΟΚΤΑΒΩΝ .....	9
<b>3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.....</b>	<b>11</b>
3.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ .....	11
3.1.1 Η ανθρώπινη ακοή .....	11
3.1.2 Παρεμβολή στην ομιλία .....	17
3.1.3 Παρενόχληση του ύπνου .....	19
3.2 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ .....	20
<b>4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΘΟΡΥΒΟΥ .....</b>	<b>24</b>
4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	24
4.1.1 Ανάλυση χαρακτηριστικών πηγής θορύβου.....	24
4.1.2 Μετάδοση του θορύβου.....	28
4.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....	34
4.2.1 Πρώτα μοντέλα.....	34
4.2.2 Νέα μοντέλα.....	35
4.2.3 Σύγκριση εμπειρικών μοντέλων .....	39
<b>5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ .....</b>	<b>42</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	42
5.2 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ .....	42
5.2.1 Παράλληλα .....	43
5.2.2 Μη παράλληλα.....	46
5.2.3 Πολλαπλά εμπόδια.....	51

5.3 ΠΕΔΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ .....	53
5.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ .....	55
<b>6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ .....</b>	<b>56</b>
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	56
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΡΟΜΟΥ .....	56
6.3 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΔΡΟΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΣΗ ΑΠΟΔΕΚΤΗ .....	57
6.4 ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ .....	59
6.5 ΠΕΔΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ .....	60
6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ .....	66
<b>7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....</b>	<b>68</b>
7.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	68
7.1.1 Κυκλοφοριακός φόρτος .....	69
7.1.2 Ύψος του αποδέκτη .....	70
7.1.3 Ταχύτητα οχημάτων .....	71
7.1.4 Ποσοστό βαρέων οχημάτων .....	72
7.1.5 Κλίση .....	73
7.1.6 Ηχοπετάσματα .....	74
7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΔΙΟΥ .....	78
7.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ .....	82
<b>8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ .....</b>	<b>85</b>
<b>9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>92</b>
<b>10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>97</b>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1: Ηχητικό φάσμα για (α) ένα καθαρό τόνο, (β) ήχο αποτελούμενο από πολλούς καθαρούς τόνους και (γ) ήχο με συνεχές φάσμα (φυσικός θόρυβος).....	8
Σχήμα 3.1: Τομή του ανθρώπινου αυτιού .....	12
Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα της ανατομίας του αυτιού.....	13
Σχήμα 3.3: Καμπύλες ίσης ακουστότητας .....	14
Σχήμα 3.4: Συντελεστές διόρθωσης A, B και C .....	15
Σχήμα 3.5: Μέγιστες αποστάσεις σε υπαίθριους χώρους στις οποίες η συζήτηση είναι κατανοητή σε ικανοποιητικό βαθμό για σταθερά επίπεδα θορύβου .....	18
Σχήμα 3.6: Διαδρομές του κύματος του ήχου από την πηγή στον αποδέκτη. ....	21
Σχήμα 3.7: Οφέλη από το σχήμα των ηχοπετασμάτων λόγω πάχους.....	23
Σχήμα 3.8: Οφέλη από το σχήμα των ηχοπετασμάτων λόγω πολλαπλών άκρων .....	23
Σχήμα 4.1: Καμπύλη υπολογισμού έντασης ήχου από δύο πηγές.....	28
Σχήμα 4.2: Μετάδοση θορύβου από επίγειες και εναέριες πηγές.....	29
Σχήμα 4.3: Σφαιρικά ηχητικά κύματα .....	30
Σχήμα 4.4: Τυπική γεωμετρία φράγματος θορύβου .....	33
Σχήμα 5.1: Το τμήμα κάλυψης του ηχοπετάσματος είναι εκτός των ορίων και για τις δυο περιπτώσεις. ....	45
Σχήμα 5.2: Το ηχοπέτασμα καλύπτει μερικώς το οδικό τμήμα. ....	45
Σχήμα 5.3: Το ηχοπέτασμα καλύπτει πλήρως το οδικό τμήμα.....	46
Σχήμα 5.4: Περιστροφή του ηχοπετάσματος με τη μέθοδο των σημείων τομής. Το εμπόδιο που προκύπτει είναι ισοδύναμο με το αρχικό. ....	47

Σχήμα 5.5: Περιστροφή του ηχοπετάσματος με τη μέθοδο των σημείων τομής. Το εμπόδιο που προκύπτει δεν ανταποκρίνεται στο αρχικό εμπόδιο. Το προβληματικό σημείο είναι το $K'$ .....	48
Σχήμα 5.6: Η γεωμετρική θέση του αποδέκτη R βρίσκεται εντός της γραμμοσκιασμένης προβληματικής περιοχής.....	49
Σχήμα 5.7: Με χρήση του αντιδιαμετρικού σημείου του $K'$ ως προς το O, $K''$ , το νέο τμήμα ( $K''\Lambda'$ ) είναι ισοδύναμο προς το αρχικό εμπόδιο. ....	50
Σχήμα 5.8: Περιστροφή του εμποδίου με τη μέθοδο των σημείων τομής. Στην περίπτωση αυτή το προβληματικό σημείο είναι το $\Lambda'$ .....	50
Σχήμα 5.9: Παρεμβολή 2 ηχοπετασμάτων μεταξύ του οδικού τμήματος (AB) και του αποδέκτη R. ....	51
Σχήμα 5.10: Απεικόνιση σε στάδια της διαδικασίας πολλαπλών εμποδίων.....	52
Σχήμα 6.1: Φόρμα εισαγωγής των χαρακτηριστικών του δρόμου. ....	57
Σχήμα 6.2: Φόρμα εισαγωγής των συντεταγμένων του δρόμου.....	58
Σχήμα 6.3: Φόρμα εισαγωγής των συντεταγμένων του εμποδίου. ....	59
Σχήμα 6.4: Φόρμα εισαγωγής των δεδομένων του πεδίου. ....	60
Σχήμα 6.5: Ομοιόμορφο πεδίο υπολογισμού του θορύβου. ....	61
Σχήμα 6.6: Πεδίο μεταβλητού βήματος, εξαρτώμενο από τη θέση του οδικού τμήματος. ....	61
Σχήμα 6.7: Φόρμα εισαγωγής των δεδομένων του προχωρημένου πεδίου. ....	63
Σχήμα 6.8: Πεδίο μεταβλητού διαμερισμού ανεξάρτητου του οδικού τμήματος.....	64
Σχήμα 6.9: Φόρμα επεξεργασίας και αποθήκευσης αποτελεσμάτων και στατιστικών στοιχείων.....	66
Σχήμα 7.1: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με τον κυκλοφοριακό φόρτο.....	69
Σχήμα 7.2: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος του αποδέκτη.....	70



Σχήμα 7.3: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με την ταχύτητα των οχημάτων.....	71
Σχήμα 7.4: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με το ποσοστό των βαρέων οχημάτων. ....	72
Σχήμα 7.5: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με την κλίση του οδοστρώματος. ....	73
Σχήμα 7.6: Ισοθρουβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου χωρίς ηχοπέτασμα. ....	75
Σχήμα 7.7: Ισοθρουβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου με ηχοπέτασμα κοντά και μακριά από το δρόμο με ύψη 3m (Σχήμα α και γ) και 5m (Σχήμα β, δ).....	75
Σχήμα 7.8: Επίπεδα θορύβου σε συνάρτηση με την θέση του αποδέκτη.....	76
Σχήμα 7.9: Επίπεδα θορύβου σε συνάρτηση με τα ηχοπετάσματα. ....	77
Σχήμα 7.10: Ισοθρουβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου με α) ομοιόμορφο βήμα 1m β) μεταβλητό βήμα 1 έως 20m και γ) ομοιόμορφο βήμα 20m. ....	80
Σχήμα 7.11: Πλήθος σημείων υπολογισμού σε συνάρτηση με το πεδίο. ....	81
Σχήμα 7.12: Γραφική απεικόνιση του αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται από το θόρυβο του οδικού τμήματος σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου εκφρασμένα σε $L_{10}$ (18h) χωρίς ηχοπέτασμα. ....	83
Σχήμα 7.13: Γραφική απεικόνιση των αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται από το θόρυβο του οδικού τμήματος σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου εκφρασμένα σε $L_{10}$ (18h) με ηχοπέτασμα. ....	83
Σχήμα 8.1: Γεωγραφική θέση του οδικού έργου .....	85
Σχήμα 8.2: Πεδίο υπολογισμού των επιπέδων θορύβου στο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας.....	89
Σχήμα 8.3: Ισοθρουβικές καμπύλες για το παλαιό οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας. Έτος 2003 .....	89
Σχήμα 8.4: Ισοθρουβικές καμπύλες για το νέο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας. Έτος 2005. ....	90

Σχήμα 8.5: Ισοροπυβικές καμπύλες για το νέο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας.

Έτος 2020. .... 90

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1: Συχνότητες της κλίμακας των οκτάβων .....	10
Πίνακας 3.1: Συντελεστές βαρύτητας A για τις βαθμίδες της κλίμακας των οκτάβων..	15
Πίνακας 3.2: Μέγιστοι επιτρεπόμενοι χρόνοι έκθεσης σε επίπεδα θορύβου. ....	16
Πίνακας 3.3: Κριτήρια παρεμβολής θορύβου στην ομιλία για εσωτερικούς χώρους ....	18
Πίνακας 3.4: Συνοπτικός πίνακας αποδοτικότητας των ηχοπετασμάτων συναρτήσει του υλικού, του πάχους και της πυκνότητάς τους.....	22
Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές πίεσης και οι αντίστοιχες τιμές σε dB για διάφορες πηγές θορύβου.....	27
Πίνακας 7.1: Συνοπτικός πίνακας μοντέλου δρόμου απείρου μήκους .....	68
Πίνακας 7.2: Στοιχεία δρόμου και πεδίου .....	68
Πίνακας 7.3: Συνοπτικός πίνακας με τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης των ηχοπετασμάτων.....	74
Πίνακας 7.4: Συνοπτικός πίνακας από τα αποτελέσματα του θορύβου χωρίς και με ηχοπέτασμα.....	76
Πίνακας 7.5: Συνοπτικός πίνακας με τα δεδομένα εισόδου του παραπάνω μοντέλου ...	79
Πίνακας 7.6 : Συνοπτικός πίνακας στατιστικών στοιχείων για την περίπτωση του παραδείγματος χωρίς και με ηχοπέτασμα.....	82
Πίνακας 8.1: Φόρτος και Σύνθεση της κυκλοφορίας .....	87
Πίνακας 8.2 : Συνοπτικός πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου οδικού τμήματος .....	87
Πίνακας 8.3: Συνοπτικός πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οδικού τμήματος .....	88

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες τα επίπεδα θορύβου στα οποία εκτίθεται ο αστικός πληθυσμός αυξάνονται διαρκώς. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε αύξηση των παραπόνων από πολίτες στις αρμόδιες υπηρεσίες καθώς και των μηνύσεων σχετικών με οχλήσεις λόγω θορύβου. Επίσης έχει τεθεί σε ισχύ και κατάλληλη νομοθεσία. Επομένως, ο θόρυβος αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα για τον αστικό σχεδιασμό, την κατασκευή των κτιρίων και τη δημόσια διοίκηση.

Στη βιβλιογραφία, το πρόβλημα του οδικού θορύβου αναλύεται συνήθως σε τέσσερα στάδια:

- Ανάλυση της πηγής
- Υπολογισμός των επιπέδων θορύβου (θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα)
- Εκτίμηση των επιπτώσεων σε σχέση με τη διατάραξη του ύπνου, τη δυσκολία στην επικοινωνία και άλλες δραστηριότητες.
- Εισαγωγή μέτρων αντιμετώπισης του θορύβου

Εντούτοις, στην πράξη η ανάλυση του οδικού θορύβου περιορίζεται κυρίως στα πρώτα δυο στάδια και δεν γίνεται αναφορά στην πληθώρα των επιπτώσεων, με αντίκτυπο στην συνολική αντιμετώπιση του προβλήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη δυνατότητας επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των υπολογισμών από τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά προγράμματα που κυκλοφορούν. Ως αποτέλεσμα, δεν υπάρχουν στοιχεία για την κατανομή της επιβάρυνσης στον πληθυσμό σε συγκεκριμένο εύρος επιπέδων θορύβου, γεγονός το οποίο δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο την εκτίμηση των επιπτώσεων.

Το δεύτερο πρόβλημα στην ανάλυση του οδικού θορύβου σχετίζεται με τους αρκετά χρονοβόρους υπολογισμούς για τη λεπτομερή αποτύπωση σε χάρτες θορύβου μεγάλων πεδίων ή μεγάλων οδικών τμημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η χρήση ενός μεταβλητού υπολογιστικού πεδίου το οποίο πυκνώνει κοντά στο οδικό τμήμα, όπου παρατηρούνται έντονες μεταβολές των επιπέδων θορύβου και αραιώνει όσο απομακρύνεται από το οδικό τμήμα, όπου οι μεταβολές είναι σημαντικά μικρότερες.

Δημιουργήθηκε επίσης ένα υπολογιστικό σύστημα εκτίμησης των επιπέδων θορύβου με δυνατότητα εισαγωγής μέτρων αντιμετώπισης, όπως η δημιουργία ηχοπετασμάτων ή η μείωση της ταχύτητας των οχημάτων, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μέτρων με τη βοήθεια ισοθορυβικών καμπυλών. Παράλληλα, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων εφαρμογής που εμφανίζουν τα εμπορικά λογισμικά προγράμματα που κυκλοφορούν στην αγορά έχουν ενσωματωθεί στο λογισμικό που αναπτύχθηκε και οι παρακάτω λειτουργίες.

- **Εκτίμηση επιβάρυνσης πληθυσμού:** Κατανομή της επιβάρυνσης του πληθυσμού της περιοχής σε συνάρτηση με το ακουστικό περιβάλλον τους.
- **Υπολογιστικό πεδίο μεταβλητού διαμερισμού:** Μεταβολή του βήματος του πεδίου ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος, πράγμα που μειώνει σημαντικά το συνολικό χρόνο υπολογισμού και βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Οι βασικοί χρήστες των μοντέλων προσομοίωσης εκπομπής και διάδοσης του οδικού θορύβου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 5 βασικές ομάδες:

- **Μηχανικούς Οδοποιίας,** για τον έλεγχο του σχεδίου τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές, την εισαγωγή ηχοπετασμάτων και επιπροσθέτως τον καθορισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ του δρόμου και των κτηρίων.

- **Μηχανικούς Ακουστικής**, για βελτίωση της αρχιτεκτονικής του έργου τους ή για πιο γενικές εφαρμογές,
- **Ειδικούς επιστήμονες**, για τον έλεγχο της εφαρμογής της νομοθεσίας
- **Ειδικούς Ακουστικούς**, για να ετοιμάσουν τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- **Σύμβουλους Ακουστικής**

## **2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

### **2.1 Νομοθεσία**

Στην Ελλάδα ευρίσκεται σε ισχύ νομοθεσία που αφορά στο θόρυβο που προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως από μηχανήματα εργοταξίου και οδικό θόρυβο. Η νομοθεσία αυτή περιλαμβάνει :

- Υπ. Απόφαση 56206/1613/ΦΕΚ 570/Β/9.9.86 περί "Προσδιορισμού της ηχητικής εκπομπής των μηχανημάτων και συσκευών εργοταξίου σε συμμόρφωση προς τις οδηγίες 79/113/ΕΟΚ, 81/1051/ΕΟΚ, 85/405/ΕΟΚ".
- Υπ. Απόφαση 69001/1921 ΦΕΚ 751/Β/18.10.88 περί "Εγκρισης τύπου ΕΟΚ για την οριακή τιμή στάθμης Θορύβου μηχανημάτων και συσκευών Εργοταξίου".
- Υπ. Απόφαση Α5/2375 ΦΕΚ 689/Β/18 "Περί της χρήσεως κατασιγασμένων αεροσφυρών".

Για τον οδικό θόρυβο βρίσκεται σε ισχύ μόνο η υπουργική απόφαση 17252/1992 σχετικά με το καθορισμό δεικτών και ανωτάτων επιτρεπομένων ορίων θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία σε οδικά και συγκοινωνιακά έργα.

Η νομοθεσία αυτή αφορά σε όλους τους νέους αυτοκινητοδρόμους και στις νέες χαράξεις για βελτίωση υφισταμένων οδικών τμημάτων που πραγματοποιούνται. Καθώς και τις οδούς ταχείας κυκλοφορίας μαζί με τις εγκαταστάσεις που τις συνοδεύουν και μόνο για τα τμήματά τους εκείνα που ευρίσκονται σε απόσταση μικρότερη ή ίση των 200 m από το κοντινότερο όριο εγκεκριμένου Σχεδίου Πόλης. Στην κατηγορία των οδικών και συγκοινωνιακών έργων για τα οποία απαιτείται θεσμοθέτηση ανωτάτου ορίου κυκλοφοριακού θορύβου εμπίπτουν και οι νέοι ή βελτιούμενοι, σύμφωνα με τα παραπάνω, άξονες του εθνικού οδικού δικτύου, και του επαρχιακού δικτύου, οι κύριοι αστικοί άξονες, κλπ. (Κατηγορία Α' - Ομάδα Ι & ΙΙ της ΚΥΑ, 69269/5387),

τηρουμένου και πάλι του περιορισμού λόγω απόστασης, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο.

### **2.1.1 Δείκτες Κυκλοφοριακού Θορύβου**

Με βάση την παραπάνω νομοθεσία ως *Δείκτης Κυκλοφοριακού Θορύβου* (Δ.Κ.Θ) για την ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του θορύβου που προέρχεται από τα οδικά και συγκοινωνιακά έργα και τις συνοδές τους εγκαταστάσεις, καθορίζεται είτε:

α) *Η Ισοδύναμη συνεχής Στάθμη Θορύβου* (Equivalent Continuous Sound Level),  $L_{eq}$  που εκφράζει τη σταθερή εκείνη στάθμη θορύβου, η οποία σε ορισμένη χρονική περίοδο, έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με αυτό του πραγματικού θορύβου, σταθερού ή μεταβαλλόμενου, κατά την ίδια χρονική περίοδο από 08.00 έως 20.00 h και κατά συνέπεια ο δείκτης καθορίζεται ως  $L_{eq}$  (8-20 h), είτε

β) *Ο Δείκτης  $L_{10}$  (18 h)* που είναι η αριθμητική μέση τιμή των 18 ξεχωριστών ωριαίων τιμών του  $L_{10}$  (από 6.00-24.00), δηλαδή της στάθμης η οποία ξεπερνιέται κατά το 10% της αντίστοιχης χρονικής περιόδου μέτρησης.

Και στις δύο ανωτέρω περιπτώσεις το μετρούμενο μέγεθος είναι η Α- σταθμισμένη στάθμη ηχητικής πίεσης η οποία εκφράζεται σε Decibel ή σε συντομία σε dB(A).

### **2.1.2 Όρια Δεικτών Κυκλοφοριακού Θορύβου**

Ως ανώτατα επιτρεπόμενα όρια των ανωτέρω περιγραφόμενων Δεικτών Κυκλοφοριακού Θορύβου καθορίζονται με την νομοθεσία τα ακόλουθα:

α) Για το δείκτη  $L_{eq}$  (8-20 h.) τα 67 dB(A) και

β) Για το δείκτη  $L_{10}$  (18 h) τα 70 dB(A) μετρούμενα σε απόσταση 2 m. από την πρόσοψη των πλησιέστερων, προς το οδικό έργο (ή/και της συνοδές του εγκαταστάσεις), κτηρίων της πολεοδομικής ενότητας.

2. Σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται ειδική ακουστική προστασία, όπως σχολικά συγκροτήματα, νοσοκομεία, χώροι πολιτιστικών και κοινωνικών εκδηλώσεων (π.χ.



θέατρα, αίθουσες συνεδρίων κλπ.), κοινωφελή ιδρύματα, γηροκομεία, οίκοι τυφλών κλπ., τα παραπάνω ανώτατα επιτρεπόμενα όρια μπορούν να μειωθούν κατά 5-10 dB(A) [Α.Π 17252/1992].

## **2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά**

Ως ήχος ορίζεται μια διαταραχή η οποία μεταδίδεται μέσω ενός ελαστικού μέσου με ταχύτητα η οποία καθορίζεται από τις ιδιότητες του μέσου. Το μέσο στο οποίο διαδίδεται ο θόρυβος είναι συνήθως ο αέρας, όμως σε μερικές περιπτώσεις εξετάζεται και η μετάδοσή του μέσω στερεών, όπως οι τοίχοι ενός κτηρίου. Παραδείγματα διάδοσης κυμάτων μπορούν να παρατηρηθούν και σε άλλες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, όταν μια πέτρα πέσει σε μια λίμνη δημιουργούνται κυκλικά κύματα, με κέντρο το σημείο που έπεσε η πέτρα και των οποίων η διάμετρος αυξάνεται. Αντίστοιχα, αν χτυπηθεί η μια άκρη ενός τεντωμένου σκοινιού, παρατηρείται ένα κύμα το οποίο μετακινείται προς την άλλη άκρη. Ο ήχος αποτελεί ένα τύπο κύματος, το οποίο ακούμε αλλά δε βλέπουμε. Το φυσικό μέγεθος που μεταβάλλεται άνω και κάτω του σημείου ισορροπίας κατά τη μετάδοση του ήχου στον αέρα, είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Τα κύματα του ήχου είναι δυνατό να προκληθούν από ένα παλλόμενο σώμα ή από στροβιλισμούς του αέρα. Ο μηχανισμός δημιουργίας του ήχου ονομάζεται πηγή του ήχου και λειτουργεί σαν μια πηγή ταλάντωσης, η οποία συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον αέρα προκαλώντας διαδοχικές περιοχές υψηλής και χαμηλής πίεσης οι οποίες απομακρύνονται από την πηγή [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά του θορύβου, τα οποία είναι απαραίτητα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και οι μέθοδοι για την αντιμετώπισή του.

### 2.3 Πίεση του ήχου

Η μεταβολή της πίεσης του αέρα σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση ονομάζεται πίεση του ήχου,  $p(t)$ . Η πίεση επομένως σε ένα συγκεκριμένο σημείο είναι ίση με:

$$P(t) = p(A) + p(t) \quad (2.1)$$

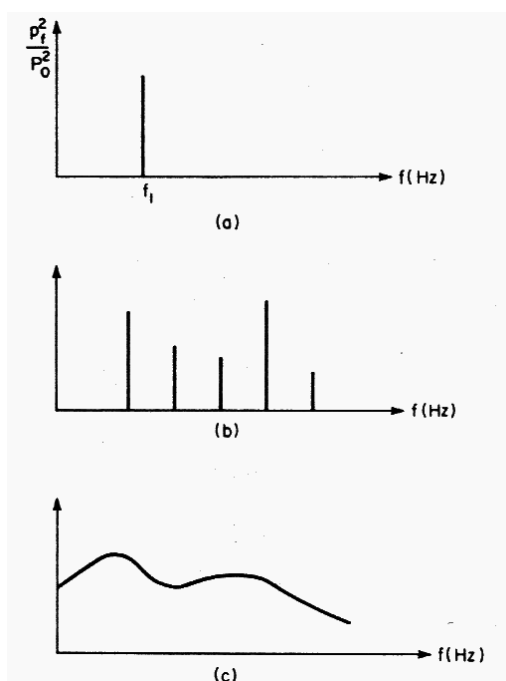
Η πίεση του ήχου μετριέται σε Pascal (Pa), ενώ η ατμοσφαιρική πίεση σε κανονικές συνθήκες είναι περίπου  $1,01 \times 10^5$  Pa. Η πίεση του ήχου είναι εξαιρετικά χαμηλή σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Για παράδειγμα ένας ακροατής σε απόσταση ενός μέτρου από έναν άνθρωπο που μιλά, αντιλαμβάνεται μεταβολές πίεσης περίπου 0,1 Pa, δηλαδή περίπου ενός εκατομμυριοστού της ατμοσφαιρικής.

Ο ήχος αποτελεί μια μεταβολή της πίεσης η οποία απομακρύνεται από την πηγή με ταχύτητα  $c$ . Στα ημιτονοειδή ή αρμονικά κύματα ήχου η συχνότητα και το μήκος κύματος συνδέονται με την ταχύτητα του ήχου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

### 2.4 Φάσμα του ήχου

Ο θόρυβος δεν αποτελεί ένα καθαρό τόνο (μια συγκεκριμένη συχνότητα), αλλά ένα συνδυασμό ενός μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Πολλές φορές είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την κατανομή της ενέργειας ως συνάρτηση της συχνότητας του ήχου. Υπάρχουν πολλές αιτίες για αυτό. Οι κύριοι μηχανισμοί θορύβου μιας πηγής είναι δυνατό να αναγνωριστούν από τις συχνότητες που παράγονται. Η εξασθένηση του ήχου στον αέρα αλλά και από φράγματα είναι συνάρτηση της συχνότητας του ήχου. Επίσης η ακοή του ανθρώπου αλλά και η αντίδρασή του στο θόρυβο εξαρτώνται από τη συχνότητα. Επομένως το φάσμα του ήχου έχει μεγάλη σημασία σε προβλήματα θορύβου.

Η γραφική απεικόνιση του φάσματος του ήχου αποδίδεται συνήθως ως διάγραμμα της ενέργειας του ήχου (αποδιδόμενη ως τετράγωνο της πίεσης του ήχου) ως προς τη συχνότητα του ήχου. Για παράδειγμα το φάσμα ήχου ενός καθαρού τόνου έχει τη μορφή του **σχήματος 2.1 α**, ενώ το φάσμα ενός ήχου που αποτελείται από πολλούς καθαρούς τόνους έχει τη μορφή του **σχήματος 2.1 β**. Οι φυσικοί θόρυβοι εμπεριέχουν ένα μεγάλο αριθμό συχνοτήτων, στην πραγματικότητα αποτελούν ένα φάσμα συχνοτήτων. Παράδειγμα ενός τέτοιου φάσματος φαίνεται στο **σχήμα 2.1 γ**.



Σχήμα 2.1: Ηχητικό φάσμα για (α) ένα καθαρό τόνο, (β) ήχο αποτελούμενο από πολλούς καθαρούς τόνους και (γ) ήχο με συνεχές φάσμα (φυσικός θόρυβος)

Για να προσδιοριστεί το φάσμα ενός τέτοιου ήχου πρέπει να μετρηθεί η ενέργεια ή το αντίστοιχο τετράγωνο της πίεσης του ήχου για κάθε συχνότητα. Για παράδειγμα, το φάσμα ενός ήχου μπορεί να προσεγγιστεί μετρώντας την ενέργειά του ανά Hz σε όλη την κλίμακα συχνοτήτων. Όργανα τέτοιας ακρίβειας, όμως, δεν υπάρχουν, αλλά και αν υπήρχαν θα χρειαζόνταν σχεδόν 20.000 μετρήσεις για να καλυφθεί το εύρος που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί (20-20.000 Hz). Για το λόγο αυτό και επειδή δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με τέτοια λεπτομέρεια το φάσμα κάθε ήχου γίνεται

χρήση της διατονικής κλίμακας των οκτάβων [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

## 2.5 Κλίμακα των οκτάβων

Η κλίμακα των οκτάβων αποτελεί ένα σύνολο από διαδοχικά διαστήματα συχνοτήτων που εκτείνεται σε όλο το εύρος των συχνοτήτων που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος. Τα όργανα μέτρησης του ήχου διαχωρίζουν ηλεκτρονικά τους ήχους σε αυτή την κλίμακα συχνοτήτων και μετρούν την αντίστοιχη πίεση του ήχου για κάθε βαθμίδα της κλίμακας. Το χαρακτηριστικό κάθε βαθμίδας είναι ότι το άνω όριο της συχνότητας είναι διπλάσιο από το κάτω όριο, δηλαδή:

$$f_u = 2f_1 \quad (2.2)$$

Κάθε βαθμίδα της κλίμακας των οκτάβων χαρακτηρίζεται από την κεντρική συχνότητα  $f_c$  η οποία προσδιορίζεται από τη παρακάτω σχέση :

$$f_c = f_1 \sqrt{2} = \frac{f_u}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

Οι συχνότητες της διατονικής κλίμακας αναφέρονται στον **πίνακα 2.1** [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

Πίνακας 2.1: Συχνότητες της κλίμακας των οκτάβων

Βαθμίδα	Συχνότητα[Hz]					
	Οκτάβα			1/3 της οκτάβας		
	Κάτω όριο	Μέσο	Άνω όριο	Κάτω όριο	Μέσο	Άνω όριο
12	11	16	22	14.1	16	17.8
13				17.8	20	22.4
14				22.4	25	28.2
15	22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
16				35.5	40	44.7
17				44.7	50	56.2
18	44	63	88	56.2	63	70.8
19				70.8	80	89.1
20				89.1	100	112
21	88	125	177	112	125	141
22				141	160	178
23				178	200	224
24	177	250	355	224	250	282
25				282	315	355
26				355	400	447
27	355	500	710	447	500	562
28				562	630	708
29				708	800	891
30	710	1000	1420	891	1000	1122
31				1122	1250	1413
32				1413	1600	1778
33	1420	2000	2840	1778	2000	2239
34				2239	2500	2818
35				2818	3150	3548
36	2840	4000	5680	3548	4000	4467
37				4467	5000	5623
38				5623	6300	7079
39	5680	8000	11360	7079	8000	8913
40				8913	10000	11220
41				11220	12500	14130
42	11360	16000	22720	14130	16000	17780
43				17780	20000	22390

### **3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ**

#### **3.1 Επιπτώσεις**

Ο θόρυβος, σε περιπτώσεις που είναι αρκετά δυνατός, μπορεί να επηρεάσει σοβαρά ανθρώπινες δραστηριότητες όπως ο ύπνος, η επικοινωνία και οι εργασίες που απαιτούν συγκέντρωση ή συνεργασία, ενώ είναι δυνατό να προκαλέσει ακόμη και προβλήματα ακοής. Η μελέτη των επιπτώσεων του θορύβου βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα, αφού διαφέρουν σημαντικά από άνθρωπο σε άνθρωπο. Είναι επομένως πιθανό οι επιπτώσεις και η αντίδραση μεμονωμένων ατόμων να διαφέρουν σημαντικά από αυτές που έχουν εκτιμηθεί.

Οι επίδραση του θορύβου στον άνθρωπο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ήχου. Σε γενικές γραμμές οι επιπτώσεις του θορύβου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση (η οποία συσχετίζεται με το επίπεδο της πίεσης του ήχου) και από την κατανομή των συχνοτήτων που εμπεριέχονται στον ήχο αυτό. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό στον οποίο ο θόρυβος ενοχλεί τους ανθρώπους είναι η διάρκεια του θορύβου, η χρονική στιγμή της ημέρας στην οποία εκπέμπεται, η παρουσία καθαρών τόνων και οι διακυμάνσεις της έντασής του [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

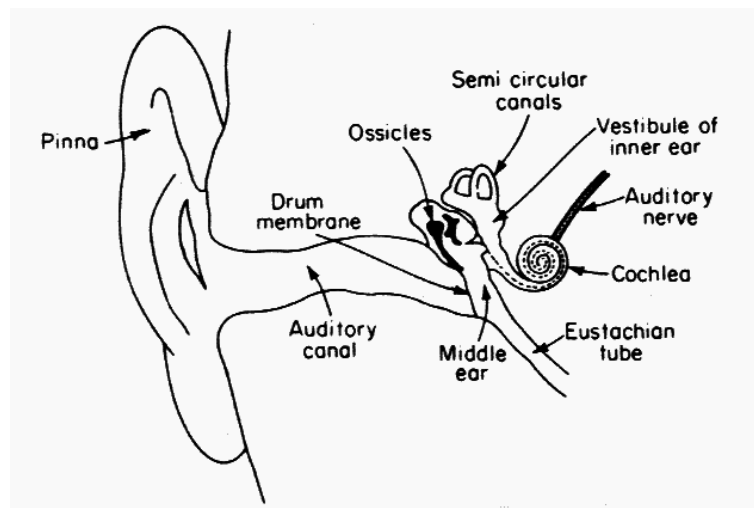
##### **3.1.1 Η ανθρώπινη ακοή**

Η ακοή είναι μια από τις πιο σημαντικές αισθήσεις, η οποία διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων. Το ανθρώπινο αυτί είναι ένα πολύ ευαίσθητο όργανο, το οποίο μπορεί να ανιληφθεί ήχους σε εύρος έντασης 140 dB (τα καλύτερα όργανα

μέτρησης του ήχου έχουν εύρος λειτουργίας μικρότερο από 50 dB) καθώς και συχνότητες από 20 ως 20.000 Hz.

Τομές του ανθρώπινου αυτιού φαίνονται στα **σχήματα 3.1 και 3.2**. Το αυτί διαχωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα:

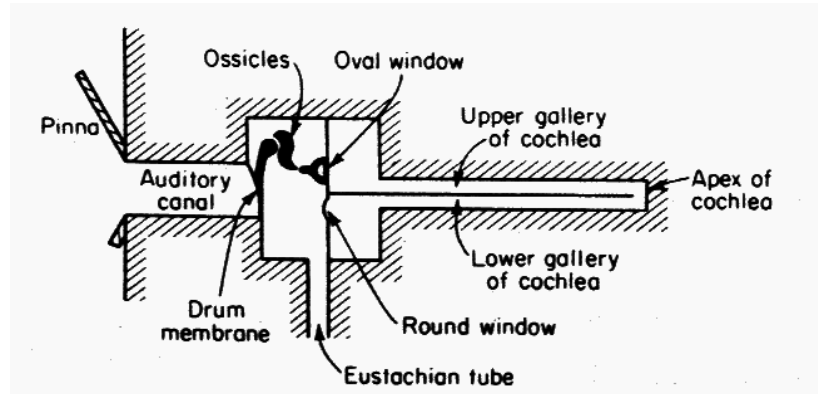
- Το εξωτερικό αυτί, το οποίο περιλαμβάνει το περύγιο του αυτιού, τον ακουστικό πόρο και το τύμπανο.
- Το μέσο αυτί, το οποίο αποτελεί μια κοιλότητα με αέρα η οποία περιέχει τρία μικρά οστά που ονομάζονται σφύρα, ακμών και αναβολέας, τα οποία μεταδίδουν τις δονήσεις του τυμπάνου στο εσωτερικό αυτί.
- Το εσωτερικό αυτί, το οποίο περιέχει όργανα τα οποία δίνουν στον άνθρωπο την αίσθηση της ισορροπίας και τον κοχλία που είναι ουσιαστικά το αισθητήριο όργανο της ακοής.



Σχήμα 3.1: Τομή του ανθρώπινου αυτιού

Το εξωτερικό αυτί συλλαμβάνει τους ήχους και τους μεταδίδει στο τύμπανο, όπου οι διαταραχές της πίεσης λόγω του ήχου, μετατρέπονται σε δονήσεις του τυμπάνου. Οι δονήσεις του τυμπάνου μεταφέρονται στο εσωτερικό αυτί από τα τρία οστά του μέσου αυτιού. Τα οστά αυτά είναι συνδεδεμένα με μικρούς μύες οι οποίοι έχουν ως

σκοπό να προστατεύουν το εσωτερικό αυτί από ισχυρούς θορύβους. Τέλος στο εσωτερικό του κοχλίου οι δονήσεις μετατρέπονται σε νευρικό σήμα το οποίο μεταφέρεται στον εγκέφαλο από το ακουστικό νεύρο.



Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα της ανατομίας του αυτιού

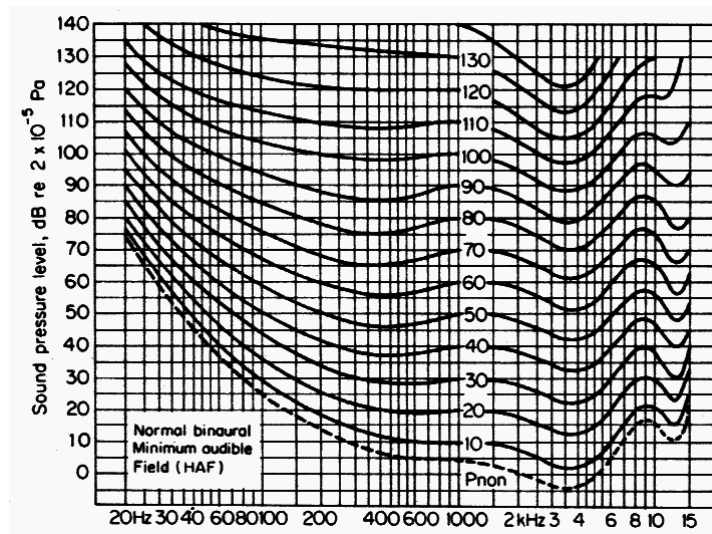
Οι λειτουργία όλων των επιμέρους τμημάτων του αυτιού εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου. Για παράδειγμα, ο ακουστικός πόρος φιλτράρει συγκεκριμένες συχνότητες, ενώ και η κίνηση των οστών του μέσου αυτιού επηρεάζεται από τη συχνότητα. Για το λόγο αυτό, η ακοή και η αντίληψη του ανθρώπου για την ένταση του ήχου εξαρτώνται από τη συχνότητα [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

### 3.1.1.1 Ένταση του ήχου

Η σχέση μεταξύ συχνότητας και έντασης όπως την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί έχει υπολογιστεί με βάση πειραματικές μετρήσεις. Στα πειράματα αυτά, άνθρωποι ζητούνται να ρυθμίσουν την ένταση ενός ήχου συγκεκριμένης συχνότητας έτσι ώστε να τον αντιλαμβάνονται σαν ίσης έντασης με έναν άλλο ήχο με συχνότητα 1.000 Hz. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι καμπύλες ίσης ακουστότητας των ήχων του **σχήματος 3.3**. Τα επίπεδα ίσης ακουστότητας μετρώνται σε Phons. Παρατηρώντας της καμπύλες αυτές φαίνεται ότι το ανθρώπινο αυτί είναι πιο ευαίσθητο σε ήχους συχνότητας 4.000 Hz, ενώ η ευαισθησία μειώνεται σημαντικά στις χαμηλές και πολύ υψηλές συχνότητες. Για παράδειγμα, το ανθρώπινο αυτί



αντιλαμβάνεται ως ίσης έντασης ήχους 40 dB στα 1,000 Hz, 51 dB στα 100 Hz και 32 dB στα 4.000 Hz.



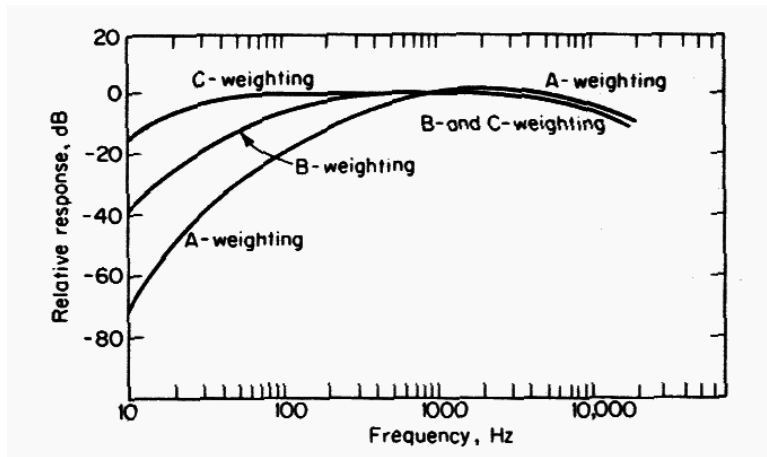
Σχήμα 3.3: Καμπύλες ίσης ακουστότητας

Επειδή η ένταση του ήχου αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες των επιπτώσεων του θορύβου στον άνθρωπο, η σχέση μεταξύ συχνότητας και έντασης όπως την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη σε προβλήματα και μελέτες σχετικές με το θόρυβο. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μεθόδων οι οποίες αποσκοπούν στην ανάπτυξη δεικτών αντίληψης της έντασης του θορύβου από τον άνθρωπο.

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή των συντελεστών διόρθωσης A, B και C που φαίνονται στο **σχήμα 3.4**. Οι καμπύλες του διαγράμματος αυτού αποτελούν προσεγγίσεις των αντιστρόφων των καμπυλών ίσης ακουστότητας στα 40, 70 και 100 phon αντίστοιχα. Η χρήση των συντελεστών διόρθωσης A είναι η πλέον διαδεδομένη και οι μετρήσεις του θορύβου σε αυτή την κλίμακα χρησιμοποιούν ως μονάδα μέτρησης το dB(A). Οι συντελεστές διόρθωσης A για κάθε βαθμίδα της κλίμακας των οκτάβων δίνονται στον **πίνακα 3.1**. [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

Πίνακας 3.1: Συντελεστές βαρύτητας A για τις βαθμίδες της κλίμακας των οκτάβων

Κεντρική συχνότητα βαθμίδας [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Συντελεστής διόρθωσης A [dB]	-42	-28	-18	-9	-3	0	+1.5	+0.5	+2



Σχήμα 3.4: Συντελεστές διόρθωσης A, B και C

### 3.1.1.2 Απώλεια ακοής

Η συνεχής έκθεση σε ισχυρό θόρυβο προκαλεί απώλεια ακοής η οποία μπορεί να οδηγήσει και σε μόνιμη κώφωση. Ως απώλεια ακοής ορίζεται η μετατόπιση του ορίου των ήχων που γίνονται αντιληπτοί λόγω επανειλημμένης έκθεσης σε θόρυβο. Για παράδειγμα, η έκθεση των εργατών ενός εργοστασίου σε υψηλά επίπεδα θορύβου για πολλά χρόνια μπορεί να προκαλέσει μερική απώλεια ακοής. Έχει αποδειχθεί ότι η διάρκεια της έκθεσης στο θόρυβο είναι εξίσου σημαντική όσο και η ένταση του θορύβου στην πρόκληση απώλειας ακοής.

Η απώλεια ακοής λόγω έκθεσης σε θόρυβο προκαλείται από βλάβες των νευρικών κυττάρων που βρίσκονται στο εσωτερικό του κοχλίου. Οι βλάβες αυτές προκαλούνται από συνεχή έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου και είναι μόνιμες, ενώ προς το παρόν δεν είναι δυνατό να επιδιορθωθούν με χειρουργική ή άλλου είδους επέμβαση. Επομένως, η απώλεια ακοής είναι μια σοβαρή και μη αντιστρεπτή αναπηρία.

Ένα πλήθος κριτηρίων για την προστασία των ανθρώπων από απώλεια ακοής έχει αναπτυχθεί από οργανισμούς σχετικούς με την υγεία και την ασφάλεια των εργαζόμενων. Στον **πίνακα 3.2** αναφέρονται οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές έκθεσης σε θόρυβο για εργαζόμενους σε βιομηχανίες. Τέτοια επίπεδα έκθεσης (έντασης και διάρκειας) που αναφέρονται στον πίνακα αυτό σπάνια συναντώνται σε μη εργασιακούς χώρους. Παρ' όλα αυτά όταν το επίπεδο του θορύβου ξεπεράσει τα 85 dB(A) υπάρχει κίνδυνος να προκληθούν απώλειες ακοής σε ανθρώπους, οπότε απαιτείται λεπτομερής ανάλυση.

Αντίστοιχα με τις τιμές του **πίνακα 3.2**, το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο θορύβου για συνεχή έκθεση όλες τις ημέρες του χρόνου (αντί των εργασιμών) και για όλη τη διάρκεια της ημέρας (αντί των 8 ωρών) είναι 70 dB(A). Το όριο αυτό αφορά την προστασία του κοινού από προβλήματα απώλειας ακοής λόγω ηχορύπανσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σε μελέτες με προβλήματα περιβαλλοντικού θορύβου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002 ].

Πίνακας 3.2: Μέγιστοι επιτρεπόμενοι χρόνοι έκθεσης σε επίπεδα θορύβου.

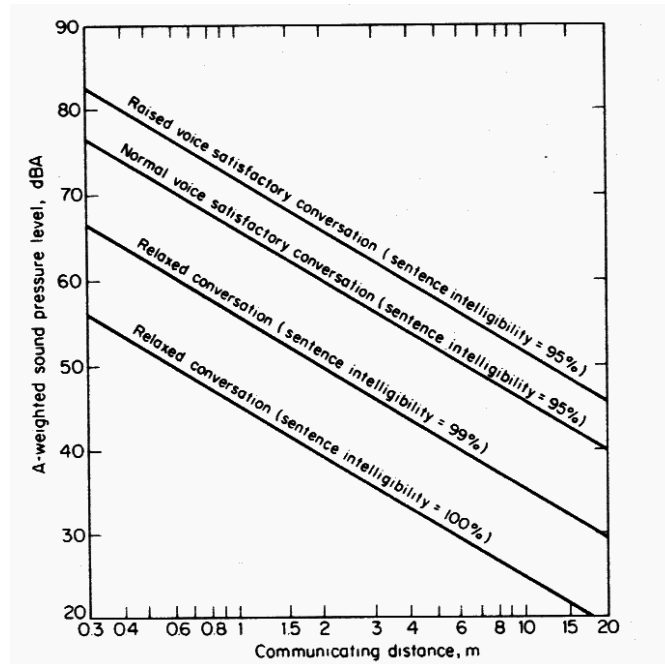
Μέγιστη διάρκεια ανά ημέρα [h]	Ένταση θορύβου[dB(A)]
8	90
6	92
4	95
2	100
1	105
½	110
¼ ή και λιγότερο	115

### 3.1.2 Παρεμβολή στην ομιλία

Η ομιλία αποτελεί την πιο σημαντική και απαραίτητη μορφή ανθρώπινης επικοινωνίας. Ο θόρυβος στο περιβάλλον μπορεί να παρεμβάλλεται στην ομιλία και να παρεμποδίζει την επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων είτε αυτή αφορά στη συζήτηση μεταξύ δύο ατόμων, είτε σε διάλεξη σε αίθουσα διδασκαλίας, είτε σε ακρόαση ραδιοφώνου ή τηλεόρασης. Ο βαθμός κάλυψης της ομιλίας από ανεπιθύμητους ήχους εξαρτάται από τον τρόπο που μιλά ο ομιλητής, την πολυπλοκότητα του θέματος για το οποίο μιλά, την ένταση της φωνής του, αλλά και από την οξύτητα της ακοής του ακροατή.

Διάφορες μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα, έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της παρεμβολής του θορύβου στην ομιλία. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τις, *Articulation Index (AI)*, *Speech Interference Level (SIL)*, και *Preferred Speech Interference Level (PSIL)*. Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι περιλαμβάνουν ανάλυση του φάσματος του θορύβου ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός παρεμβολής στην ομιλία. Για παράδειγμα η μέθοδος *PSIL* χρησιμοποιεί το επίπεδο πίεσης του ήχου στις οκτάβες με κεντρικές συχνότητες 500, 1.000 και 2.000 Hz. Στη συνέχεια προσδιορίζεται το επίπεδο του θορύβου στο οποίο είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ δύο ανθρώπων, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα την απόσταση μεταξύ των δύο ομιλητών και την προσπάθεια που καταβάλλουν κατά την ομιλία. Μια πιο απλή μέθοδος είναι αυτή που μετατρέπει το επίπεδο του θορύβου σε dB(A) και στη συνέχεια με χρήση του διαγράμματος του **σχήματος 3.5** προσδιορίζεται η παρεμβολή στην ομιλία. Το διάγραμμα του **σχήματος 3.5** ισχύει για εξωτερικούς χώρους και από αυτό προκύπτει ότι σε επίπεδο θορύβου 70 dB(A) μια άνετη συζήτηση είναι πρακτικά αδύνατη, ενώ ακόμη και με υψωμένη φωνή το ποσοστό κατανόησης

από τον ακροατή δεν είναι ικανοποιητικό για αποστάσεις άνω του 1,5 m. Για εσωτερικούς χώρους ισχύουν τα κριτήρια του **πίνακα 3.3**.



Σχήμα 3.5: Μέγιστες αποστάσεις σε υπαίθριους χώρους στις οποίες η συζήτηση είναι κατανοητή σε ικανοποιητικό βαθμό για σταθερά επίπεδα θορύβου

Πίνακας 3.3: Κριτήρια παρεμβολής θορύβου στην ομιλία για εσωτερικούς χώρους

Τύπος εσωτερικού χώρου	Επίπεδο θορύβου dB(A)
Αίθουσες συναυλιών, όπερες	21 ως 30
Αίθουσες συνεδρίων, μεγάλα θέατρα (άριστες συνθήκες)	Όχι περισσότερο από 30
Αίθουσες ραδιοφωνικών σταθμών, τηλεόρασης	Όχι περισσότερο από 34
Αίθουσες συνεδρίων, μικρά θέατρα, εκκλησίες (καλές συνθήκες)	Όχι περισσότερο από 42
Υπνοδωμάτια, νοσοκομεία, ξενοδοχεία (συνθήκες ύπνου, ξεκούρασης)	34 ως 47
Ιδιωτικά γραφεία, βιβλιοθήκες, αίθουσες διδασκαλίας	38 ως 47
Εσωτερικό σπιτιού (για συζήτηση, μουσική, τηλεόραση)	38 ως 47
Μεγάλα γραφεία, αίθουσες υποδοχής, εστιατόρια	42 ως 52
Εργαστήρια, σχεδιαστήρια, γραμματείες	47 ως 56
Αίθουσες υπολογιστών, μαγαζιά, κουζίνες	52 ως 61
Γκαράζ, αίθουσες ελέγχου εργοστασίων (αποδεκτές συνθήκες για επικοινωνία με ομιλία ή τηλέφωνο)	56 ως 66

Η παρεμβολή στην ομιλία χρησιμοποιείται συχνά ως κριτήριο που καθιστά αποδεκτό το επίπεδο του περιβαλλοντικού θορύβου. Όμως, επειδή ο θόρυβος δεν είναι σταθερός αλλά έχει διακυμάνσεις, το πρόβλημα των κριτηρίων αποδοχής του θορύβου είναι περισσότερο πολύπλοκο [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

### **3.1.3 Παρενόχληση του ύπνου**

Είναι γνωστό ότι ο θόρυβος είναι δυνατό να ξυπνήσει κάποιον ή να τον εμποδίζει να κοιμηθεί. Επίσης, ο θόρυβος επηρεάζει και την ποιότητα του ύπνου. Ο ύπνος διαχωρίζεται σε διάφορα στάδια από αγρύπνια ως βαθύ ύπνο και ο θόρυβος προκαλεί διαδοχικές μεταβάσεις από το ένα στάδιο στο άλλο. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την κατανόηση της φύσης του ύπνου, τις ευεργετικές του ιδιότητες και τη σχέση μεταξύ των διαφόρων σταδίων του ύπνου. Από τις έρευνες αυτές έχει εδραιωθεί η άποψη ότι ο θόρυβος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον ύπνο χωρίς να προκαλέσει υποχρεωτικά και αφύπνιση.

Η παρενόχληση του ύπνου από το θόρυβο διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από άνθρωπο σε άνθρωπο και εξαρτάται από πλήθος παραγόντων όπως, η ένταση και η διάρκεια του θορύβου, οι διακυμάνσεις του, η έλλειψη ύπνου, το φύλο των ανθρώπων, η ηλικία, η εξοικείωση με το θόρυβο και άλλα. Παρά το γεγονός ότι η παρενόχληση του ύπνου εξαρτάται από μια πλειάδα παραγόντων πέραν του θορύβου, είναι δυνατό να προκύψουν διάφορα συμπεράσματα από τη μελέτη του θορύβου. Η αφύπνιση από ελαφρύ ύπνο μπορεί να προκληθεί από θορύβους της τάξης των 30-40 dB(A). Ολική αφύπνιση από ένα θόρυβο προκαλείται στο 10% των περιπτώσεων για ήχο 40 dB(A) και στο 90% των περιπτώσεων για ήχο 80 dB(A). Η επιλογή ενός κριτηρίου για την αποφυγή παρενόχλησης του ύπνου αποτελεί δύσκολο πρόβλημα, όπου θα πρέπει να εξετάζονται και μακροχρόνιες επιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά επίπεδο θορύβου της τάξης

των 45 dB(A) είναι γενικά αποδεκτό για την προστασία του μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού από προβλήματα παρενόχλησης του ύπνου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

### **3.2 Μέτρα αντιμετώπισης του θορύβου**

Για τη μείωση των παραγόμενων επιπέδων θορύβου, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, που επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες, τις δεδομένες συνθήκες, τα τεχνικοοικονομικά κριτήρια και φυσικά τα ανεκτά όρια θορύβου στους αποδέκτες. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι που εφαρμόζονται για τη μείωση του θορύβου είναι η μείωση του ορίου ταχύτητας και τα ηχοπετάσματα. Θα πρέπει να εξεταστούν πολλοί παράγοντες για τον αναλυτικό σχεδιασμό ενός ηχοπετάσματος. Πρώτα από όλα, τα ηχοπετάσματα θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη απόδοση στα επιθυμητά όρια, με βάση τις ειδικές ακουστικές μελέτες ή τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

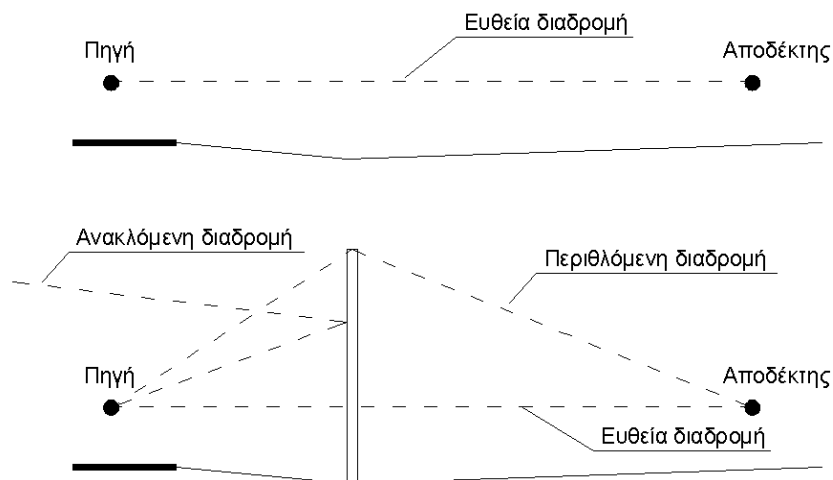
Πέρα από τις ακουστικές παραμέτρους των ηχοπετασμάτων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και μη ακουστικές παράμετροι, που είναι εξίσου σημαντικές. Ορισμένες από τις παραμέτρους αυτές είναι η ασφάλεια, η ανάκλαση του φωτός και η τύφλωση των οδηγών, η διασφάλιση της επικοινωνίας των περιοχών, η συντήρηση των ηχοπετασμάτων, ο εγκλωβισμός της διάχυσης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περίπτωση κλειστού σχεδιασμού και τέλος η αισθητική. Η διασφάλιση της επικοινωνίας των περιοχών και η οπτική ρύπανση αποτελούν βασικές παραμέτρους για την εναρμόνιση των ηχοπετασμάτων, στο ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο της περιοχής.

Σε γενικές γραμμές, τα ηχοπετάσματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Ανακλαστικά. (Διαφανή και μη διαφανή)
- Απορροφητικά
- Αναχώματα

- Συνδυασμός τύπων

Σχετικά με τις ακουστικές παραμέτρους, το υλικό του ηχοπετάσματος και η επιφάνειά του επιδρούν στον τρόπο ανάκλασης, απορρόφησης και σκέδασης του κύματος του θορύβου. Στο **σχήμα 3.6** δίνεται ένα απλό διάγραμμα στο οποίο παριστάνεται η διάδοση του θορύβου μεταξύ της πηγής και του αποδέκτη για το μεταφερόμενο θόρυβο μέσα από το υλικό και μέσω περίθλασης του κύματος από την άκρη του ηχοπετάσματος.



Σχήμα 3.6: Διαδρομές του κύματος του ήχου από την πηγή στον αποδέκτη.

Τα κυριότερα υλικά κατασκευής παρουσιάζονται ακολούθως:

- Χάλυβας. (Βαμμένος, γαλβανισμένος, ανοξείδωτος)
- Αλουμίνιο
- Πολυκαρβονικά ή ακρυλικά φύλλα
- Τσιμέντο, τούβλο ή ενισχυμένο τσιμέντο από γυαλί

Καθένα από αυτά τα υλικά έχουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

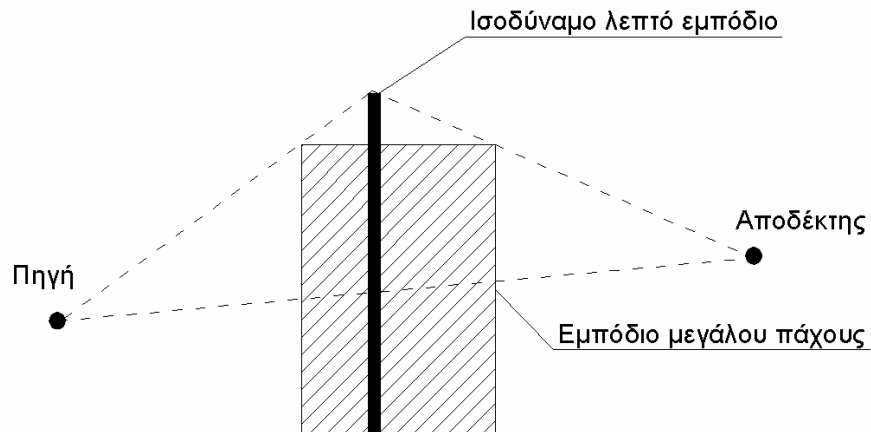


Στον **πίνακα 3.4** δίνονται οι τιμές μείωσης των επιπέδων θορύβου για κοινά υλικά για τυπικά φάσματα οδικού θορύβου.

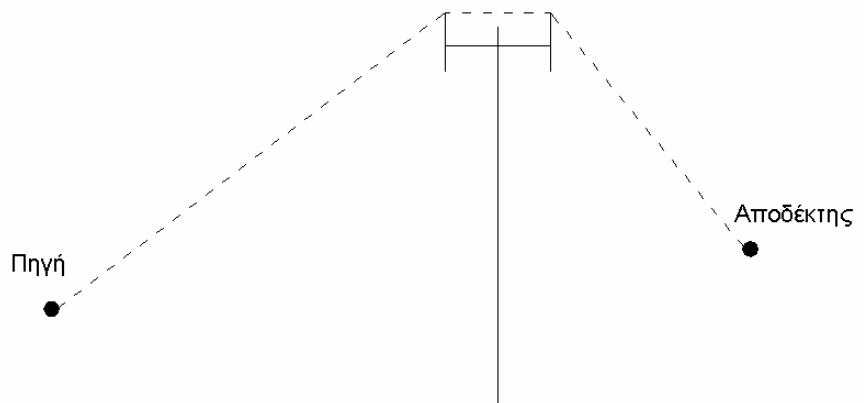
Πίνακας 3.4: Συνοπτικός πίνακας αποδοτικότητας των ηχοπετασμάτων συναρτήσει του υλικού, του πάχους και της πυκνότητάς τους

Υλικό	Πάχος	Πυκνότητα	Απόδοση
	mm	kg/m <sup>2</sup>	dB
Πολυκαρβονικές ενώσεις	8 – 12	10 – 14	30 – 33
Ακρυλικές ενώσεις	15	18	32
Ελαφρύ τσιμέντο	150	244	39
Ελαφρύ τσιμέντο	100	161	36
Τούβλο	150	288	40
Χάλυβας, 18 ga	1.27	9.8	25
Χάλυβας, 20 ga	0.95	7.3	22
Χάλυβας, 22 ga	0.79	6.1	20
Χάλυβας, 24 ga	0.64	4.9	18
Φύλλο αλουμινίου	1.59	4.4	23
Φύλλο αλουμινίου	3.18	8.8	25
Φύλλο αλουμινίου	6.35	17.1	27
Ξύλο	25	18	21
Κοντραπλακέ	13	8.3	20
Κοντραπλακέ	25	16.1	23
Συνδυασμός πολυεστέρα και μετάλλου	50 – 125	20 – 30	30 – 47

Πέρα από το υλικό κατασκευής, η αποδοτικότητα των ηχοπετασμάτων επηρεάζεται και από το σχήμα τους. Για παράδειγμα, ηχοπετάσματα με γωνίες ή καμπυλωτά σχήματα δεν είναι τόσο αποδοτικά σε σχέση με αυτά που έχουν κοφτερές άκρες. Επιπλέον, η αποδοτικότητα λεπτών ηχοπετασμάτων με δεδομένο ύψος μπορεί να αυξηθεί όσο πιο κοντά είναι η άκρη του με την πηγή. (**Σχήμα 3.7 και σχήμα 3.8**). Μάλιστα, δοκιμές ευρείας κλίμακας με ηχοπετάσματα με τρεις άκρες έχουν δείξει αύξηση της αποδοτικότητάς τους της τάξης των 3 dB(A) σε ορισμένες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.7: Οφέλη από το σχήμα των ηχοπετασμάτων λόγω πάχους



Σχήμα 3.8: Οφέλη από το σχήμα των ηχοπετασμάτων λόγω πολλαπλών άκρων

Συμπερασματικά λοιπόν, η επιλογή του κατάλληλου ηχοπετάσματος εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, όπως η θέση, το σχήμα και το υλικό κατασκευής. Έτσι, μόνο με τη σύνταξη ειδικών ακουστικών μελετών, που θα λαμβάνουν υπόψη τους όλες τις παραπάνω παραμέτρους, μπορεί να εξασφαλιστεί η επιθυμητή μείωση των επιπέδων θορύβου [Environmental Protection Department of Hong Kong, 2001].

## 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΘΟΡΥΒΟΥ

### 4.1 Θεωρητική Προσέγγιση

#### 4.1.1 Ανάλυση χαρακτηριστικών πηγής θορύβου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως ενέργεια η οποία δημιουργείται από μια ή πολλές πηγές και μεταδίδεται σε ένα μέσο (αέρα) μέχρι να φτάσει σε ένα αποδέκτη. Η πηγή του θορύβου μπορεί να χαρακτηριστεί από την ποσότητα της ακουστικής ενέργειας και από τις χρονικές στιγμές της ημέρας στις οποίες ενεργοποιείται η πηγή. Η μετάδοση του ήχου επηρεάζεται από τις ιδιότητες του μέσου στο οποίο μεταδίδεται και από την παρουσία αντικειμένων που επηρεάζουν την ελεύθερη μετάδοσή του, όπως δέντρα, βλάστηση, τοίχοι, κτίρια κλπ. Τα χαρακτηριστικά του θορύβου και η διαδρομή μετάδοσής του ως τον αποδέκτη, καθορίζουν την έκθεση του αποδέκτη στο θόρυβο [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

##### 4.1.1.1 Ισχύς και ένταση του ήχου

Όταν μια πηγή ήχου πάλλεται συμπιέζοντας και αποσυμπιέζοντας το μέσο διάδοσης του ήχου, μεταφέρεται ενέργεια στο μέσο αυτό. Η ενέργεια που μεταδίδεται στο ελαστικό μέσο από την πηγή ανά μονάδα χρόνου, ορίζεται ως ισχύς του εκπεμπόμενου ήχου. Η ποσότητα της ηχητικής ενέργειας που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου από μοναδιαία επιφάνεια ορίζεται ως ένταση του ήχου. Η σχέση μεταξύ διαταραχών πίεσης και έντασης του ήχου είναι:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}, \text{ W/m}^2 \quad (4.1)$$

όπου:

$p$  τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου της πίεσης [Pa]

$\rho$  πυκνότητα του αέρα [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = ταχύτητα μετάδοσης του ήχου [m/sec]

Έστω μια πηγή η οποία εκπέμπει ήχο ισχύος  $W$  ο οποίος μεταδίδεται μέσω μιας επιφάνειας  $A$ . Η ένταση του ήχου είναι τότε:

$$I = \frac{W}{A}, \text{ W/m}^2 \quad (4.2)$$

Η ένταση του ήχου σε απόσταση  $r$  από πηγή η οποία παράγει σφαιρικά κύματα δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}, \text{ W/m}^2 \quad (4.3)$$

που δηλώνει ότι η ένταση του ήχου από σημειακή πηγή μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### 4.1.1.2 Η κλίμακα Decibel

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διαταραχές της πίεσης τις οποίες μπορεί να ακούσει το ανθρώπινο αυτί είναι πολύ μικρές συγκριτικά με την ατμοσφαιρική πίεση. Το εύρος των πιέσεων όμως, από τον πιο ελαφρύ ήχο στον πιο δυνατό είναι πολύ μεγάλο. Για παράδειγμα, η χαμηλότερη διαταραχή πίεσης που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος σε συχνότητα 1.000 Hz είναι  $2 \times 10^{-5}$  Pa, ενώ για να προκληθεί πόνος στο αυτί απαιτείται πίεση περίπου 200 Pa. Το εύρος αυτό αντιστοιχεί σε διαφορές της τάξης του  $10^7$  (δεκάδων εκατομμυρίων), ενώ αντιστοιχεί σε διαφορές έντασης της τάξης του  $10^{14}$  (εκατοντάδων τρισεκατομμυρίων). Η κλίμακα Decibel χρησιμοποιείται για να μετατρέπει αυτό το μεγάλο εύρος αριθμών σε μια πιο ευέλικτη κλίμακα.

Με βάση την κλίμακα Decibel, μια ποσότητα  $Q$  συνδέεται με μια πρότυπη ποσότητα  $Q_0$  από την παρακάτω σχέση

$$decibel(Q) = 10 \cdot \log\left(\frac{Q}{Q_0}\right), \text{dBre}Q_0 \quad (4.4)$$

όπου “dBre $Q_0$ ” σημαίνει ότι η ποσότητα  $Q$  εκφράζεται σε decibels ως προς την πρότυπη ποσότητα  $Q_0$ . Στην περίπτωση του θορύβου, η ισχύς η ένταση και η μεταβολή της πίεσης εκφράζονται σε dB ως εξής:

### Ισχύς θορύβου

$$w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right), \text{dBre}W_0 \quad (4.5)$$

όπου  $W$  είναι η ισχύς του θορύβου ενώ η ποσότητα  $W_0$  είναι ίση με  $10^{-12}$  W

### Ένταση θορύβου

$$L_i = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \text{dBre}I_0 \quad (4.6)$$

όπου  $I$  είναι η ένταση του θορύβου ενώ η ποσότητα  $I_0$  είναι ίση με  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

### Μεταβολή της πίεσης

Τα περισσότερα όργανα μέτρησης του ήχου μετρούν μεταβολές της πίεσης και ο όρος “decibel” συνήθως αναφέρεται στο επίπεδο μεταβολής της πίεσης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ένταση του ήχου είναι ανάλογη του τετραγώνου της μεταβολής της πίεσης. Επομένως η μεταβολή της πίεσης σε decibel εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right), \text{dBrep}_0 \quad (4.7)$$

όπου  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa

Στον **πίνακα 4.1** αναφέρονται τυπικές τιμές πίεσης και οι αντίστοιχες τιμές σε dB για διάφορες πηγές θορύβου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές πίεσης και οι αντίστοιχες τιμές σε dB για διάφορες πηγές θορύβου

Πίεση[Pa]	Επίπεδο πίεσης[dB]	Πηγή θορύβου
20.0	120	Απογείωση αεροπλάνου στα 30m
6.32	110	Απογείωση αεροπλάνου στα 100m
0.632	90	Μοτοσικλέτα στα 10m
0.200	80	Χωματερή
0.0632	70	Αστικός δρόμος
0.0200	60	Συζήτηση
0.00632	50	Τυπικό γραφείο
0.00200	40	Δωμάτιο σπιτιού χωρίς τηλεόραση
0.000632	30	Υπνοδωμάτιο τη νύχτα

#### 4.1.1.3 Πολλαπλές πηγές ήχου

Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται να υπολογιστεί ο θόρυβος που φθάνει σε ένα αποδέκτη από περισσότερες από μια πηγές θορύβου. Ο συνολικός θόρυβος, όμως, δεν είναι το άθροισμα των επιμέρους πηγών, αφού τα decibel είναι σε λογαριθμική κλίμακα.

Έστω δύο πηγές ήχου, οι οποίες προκαλούν αντίστοιχα διαταραχή στην πίεση  $p_1$  και  $p_2$ .

Η συνολική ένταση του ήχου από τις δύο αυτές πηγές είναι:

Αν οι δύο πηγές είναι όμοιες:

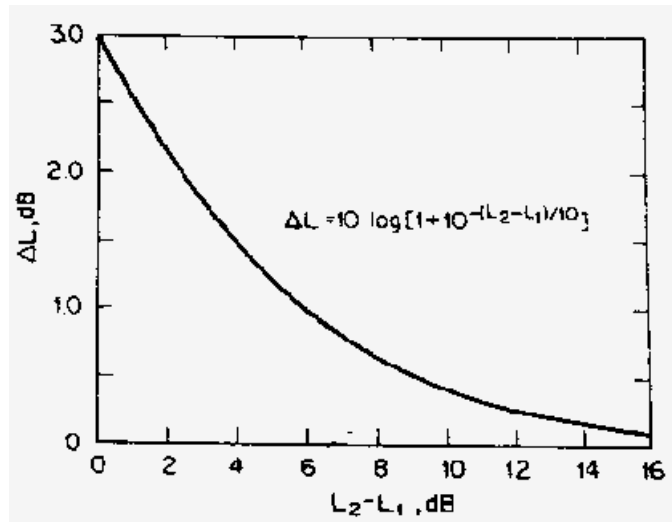
$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{2p_1^2}{p_o^2}\right) = L_{p1} + 10 \cdot \log 2 = L_{p1} + 3dB \quad (4.8)$$

Για  $N$  όμοιες πηγές:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{Np_1^2}{p_o^2}\right) = L_{p1} + 10 \log N \quad (4.9)$$

Στην καμπύλη του **σχήματος 4.1** είναι δυνατό να προσθέσουμε τον ήχο από δύο πηγές.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι αν η διαφορά των δύο πηγών είναι μεγαλύτερη από 10 dB τότε η επίδραση της μικρότερης πηγής στη μεγαλύτερη είναι λιγότερο από 0,5dB οπότε μπορεί και να αγνοηθεί [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].



Σχήμα 4.1: Καμπύλη υπολογισμού έντασης ήχου από δύο πηγές

#### 4.1.2 Μετάδοση του θορύβου

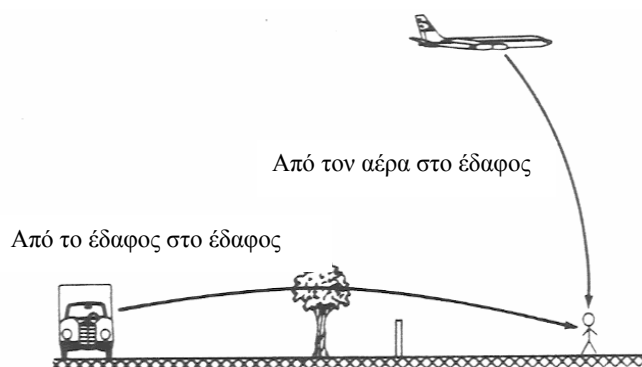
Η μετάδοση του ήχου από μια πηγή προς ένα αποδέκτη εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου στο οποίο μεταδίδεται ο ήχος και από την παρουσία αντικειμένων ή φραγμάτων στη διαδρομή μετάδοσης. Για παράδειγμα ο ήχος απορροφάται από τον αέρα. Αντικείμενα τα οποία βρίσκονται στη διαδρομή μετάδοσης προκαλούν διάθλαση, ανάκλαση και περίθλαση του ήχου. Επομένως ο θόρυβος που φθάνει σε ένα αποδέκτη εξαρτάται, εκτός από τα χαρακτηριστικά των πηγών θορύβου, και από τη διαδρομή μετάδοσης του ήχου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

##### 4.1.2.1 Μετάδοση του ήχου σε υπαίθριους χώρους

Η μετάδοση του ήχου σε υπαίθριους χώρους αποτελεί συνήθως μέρος των προβλημάτων θορύβου. Παρά το γεγονός ότι ο αποδέκτης μπορεί να βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο, η μετάδοση του ήχου γίνεται αρχικά μέσω του αέρα και στη συνέχεια μέσω του κτιρίου ή των ανοιγμάτων αυτού προς τον αποδέκτη. Επίσης το επίπεδο θορύβου σε εσωτερικό χώρο μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και το επίπεδο του θορύβου στο εξωτερικό του.

Η μετάδοση του ήχου σε υπαίθριους χώρους εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων συμπεριλαμβανομένων και των μετεωρολογικών συνθηκών. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μετάδοση του ήχου όπως η απορρόφηση από το έδαφος, τα φράγματα και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, ώστε να είναι δυνατό να εκτιμηθεί η μείωση του θορύβου στη διαδρομή μετάδοσης από την πηγή στον αποδέκτη.

Μια γενικευμένη περίπτωση ενός προβλήματος υπαίθριας μετάδοσης του θορύβου φαίνεται στο **σχήμα 4.2** με πηγές θορύβου στο έδαφος και στον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση η μετάδοση του θορύβου παρεμποδίζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες αλλά και από αντικείμενα που βρίσκονται στη διαδρομή μετάδοσης. Στη δεύτερη περίπτωση η μετάδοση του ήχου συνήθως επηρεάζεται μόνο από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

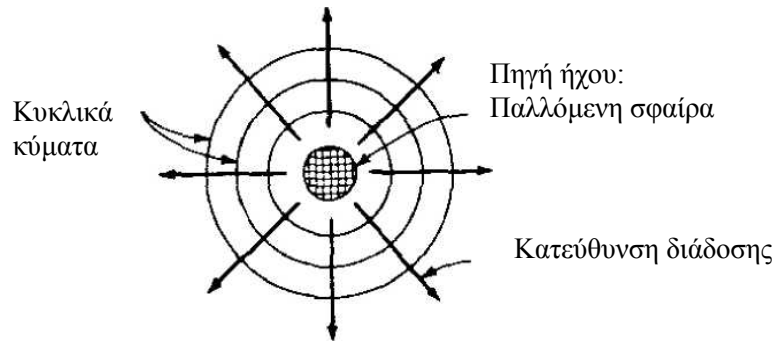


Σχήμα 4.2: Μετάδοση θορύβου από επίγειες και εναέριες πηγές.

#### 4.1.2.2 Εξάπλωση των ηχητικών κυμάτων

Το επίπεδο των διαταραχών στην πίεση του αέρα από ένα ήχο που προκαλείται από μια πηγή μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, λόγω της εξάπλωσης των ηχητικών κυμάτων.





Σχήμα 4.3: Σφαιρικά ηχητικά κύματα

Όπως φαίνεται και στο **σχήμα 4.3**, η ηχητική ενέργεια που εκπέμπεται κατανέμεται σε ολοένα και μεγαλύτερες σφαιρικές επιφάνειες καθώς τα ηχητικά κύματα απομακρύνονται από την πηγή. Η μείωση αυτή της έντασης του ήχου εκφράζεται ποσοτικά μέσω της **σχέσης 4.3**. Αντικαθιστώντας τη **σχέση 4.1** στη **σχέση 4.6** έχουμε:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{P^2}{\rho \cdot c \cdot I_o} \right) = 10 \log \left( \frac{P^2}{P_o^2} \right) + 10 \log \left( \frac{P_o^2}{\rho \cdot c \cdot I_o} \right) = L_p \quad (4.10)$$

αφού η ποσότητα  $P_o^2 / \rho c I_o$  είναι περίπου ίση με τη μονάδα για συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επίσης:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{\frac{W}{A}}{\frac{W_o}{A_o}} \right) = L_w - 10 \log A \quad (4.11)$$

Από τις σχέσεις 4.10 και 4.11 έχουμε:

$$L_w = L_p + 10 \log A \quad (4.12)$$

Για πηγές που παράγουν σφαιρικά κύματα ισχύει:

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.13)$$

όπου  $r$  είναι η απόσταση από την πηγή στον αποδέκτη.

Αντικαθιστώντας έχουμε:

$$L_p = L_w - 10 \log(4 \cdot \pi \cdot r^2) = L_w - 20 \log r - 11, \text{ dB} \quad (4.14)$$

Η ποσότητα  $20 \log r$  αντιπροσωπεύει τη μείωση των διαταραχών της πίεσης του αέρα σε απόσταση  $r$  [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### **4.1.2.3 Εξασθένηση του ήχου**

Ως εξασθένηση του ήχου ορίζεται η επιπλέον μείωση της πίεσης του ήχου που δεν οφείλεται στην εξάπλωση των ηχητικών κυμάτων, αλλά σε μια ή περισσότερες από τις παρακάτω αιτίες:

- Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από τον αέρα
- Εξασθένηση από χιόνι, βροχή ή ομίχλη
- Εξασθένηση από φράγματα ήχου
- Εξασθένηση λόγω βλάστησης
- Εξασθένηση λόγω ανομοιογένειας της ατμόσφαιρας και στροβιλισμών του αέρα

Οι παράμετροι αυτοί εξετάζονται στις παρακάτω παραγράφους [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### **Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από τον αέρα**

Καθώς ο ήχος μεταδίδεται στον αέρα, ένα μικρό ποσοστό του μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ποσότητα της ηχητικής ενέργειας που απορροφάται εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την υγρασία.

Ο άνεμος και οι στροβιλισμοί του αέρα, καθώς και οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας, προκαλούν σημαντικές αποκλίσεις από τις εμπειρικές σχέσεις. Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν περίθλαση και διάθλαση του ήχου που αποτελούν μηχανισμούς εντελώς διαφορετικούς από τη μετατροπή του ήχου σε θερμότητα. Η εξασθένηση λόγω περίθλασης και διάθλασης του ήχου μπορεί να είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μετάδοσης του ήχου σε αποστάσεις αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

Παρά το γεγονός ότι η απορρόφηση από τον αέρα αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα εξασθένησης του ήχου, σε μεγάλες αποστάσεις και ιδιαίτερα για υψηλές συχνότητες, η απορρόφηση αυτή σπάνια συνυπολογίζεται στη συνολική μείωση των επιπέδων του θορύβου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη ευαισθησία της απορρόφησης στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, παράγοντες των οποίων τις περισσότερες φορές είναι γνωστή μόνο η μέση τιμή. Για παράδειγμα, ακόμη και σε περιοχές όπου η χαμηλή υγρασία και οι υψηλές θερμοκρασίες συνεισφέρουν στη μεγαλύτερη απορρόφηση, ειδικά θορύβων υψηλής συχνότητας, οι συνθήκες αυτές διαρκούν συνήθως για τμήματα μόνο της ημέρας και για συγκεκριμένες εποχές του χρόνου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

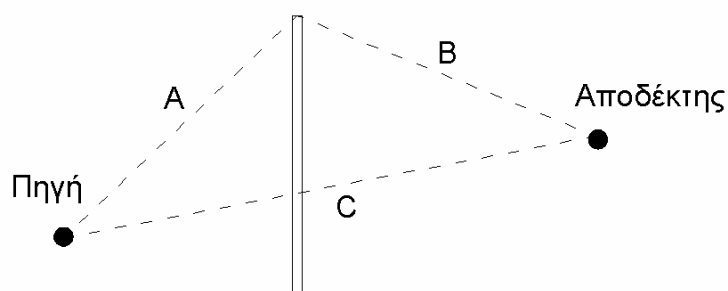
#### **Εξασθένηση λόγω βροχής, ομίχλης ή χιονιού**

Φαινόμενα όπως η βροχή, η ομίχλη το χιόνι ή αυξημένες ποσότητες σκόνης προκαλούν αμελητέα εξασθένηση του ήχου συγκριτικά με την απορρόφηση του ήχου από τον αέρα, οπότε συνήθως δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς προβλημάτων θορύβου [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### **Εξασθένηση λόγω φραγμάτων**

Τοίχοι ή φράγματα που βρίσκονται στη διαδρομή μετάδοσης μεταξύ μίας πηγής θορύβου και ενός αποδέκτη μπορεί να προκαλέσουν σημαντική μείωση του θορύβου.

Η τυπική γεωμετρία ενός φράγματος θορύβου φαίνεται στο **σχήμα 4.4**. Το φράγμα μπορεί να είναι ένας τοίχος, ένα ανάχωμα, ή οποιοδήποτε μη πορώδες αντικείμενο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ πηγής και αποδέκτη.



Σχήμα 4.4: Τυπική γεωμετρία φράγματος θορύβου

Η μείωση του θορύβου μπορεί να προσδιοριστεί υπολογίζοντας πρώτα τη διαφορά στο μήκος της διαδρομής μετάδοσης  $\delta$  και στην συνέχεια με βάση εμπειρικές σχέσεις που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα υπολογίζεται η συνολική μείωση λόγω φράγματος.

Λόγω της σημαντικής μείωσης των επιπέδων θορύβου από τα φυσικά φράγματα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την μείωση των επιπέδων θορύβου σε μια περιοχή σε αποδεκτά όρια [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### **Εξασθένηση λόγω βλάστησης**

Η εξασθένηση του θορύβου λόγω βλάστησης είναι δυνατό να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και της βλάστησης και στη βιβλιογραφία υπάρχουν εμπειρικές εξισώσεις, που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

#### **Εξασθένηση λόγω ανομοιογένειας της ατμόσφαιρας και στροβιλισμών του αέρα**

Οι επιπτώσεις του ανέμου και των μεταβολών της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα μπορεί να είναι σημαντικές (της τάξης των 10-30 dB ή και περισσότερο). Επειδή όμως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αποτελούν μη ελεγχόμενους παράγοντες, σε προβλήματα που αφορούν προστασία περιοχών από πηγές θορύβου, η επιπλέον εξασθένηση του θορύβου λόγω τέτοιων φαινομένων συνήθως θεωρείται μηδενική [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

## Μετάδοση του θορύβου σε εσωτερικούς χώρους

Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το επίπεδο του θορύβου στο εσωτερικό κάποιου κτιρίου γνωρίζοντας το επίπεδο του θορύβου στο εξωτερικό του. Πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι ο θόρυβος εξασθενεί κατά τη μετάδοσή του στο εσωτερικό ενός κτιρίου σύμφωνα με τις τιμές του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1.2-1 Τυπική εξασθένηση θορύβου κατά τη μετάδοσή του στο εσωτερικό τυπικής κατοικίας

	<b>Κλειστά παράθυρα</b>	<b>Παράθυρα μερικώς ανοιχτά</b>
Θόρυβος λεωφόρου	20 dB(A)	15 dB(A)
Θόρυβος αεροπλάνου	28 dB(A)	20 dB(A)

Η πραγματική εξασθένηση του θορύβου κατά τη μετάδοσή του στο εσωτερικό ενός κτιρίου εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου αλλά και από κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Ο ακριβής προσδιορισμός της εξασθένησης αυτής συνήθως γίνεται με πειραματικές μετρήσεις [Δ. Ασημακόπουλος και Ε. Γρηγοροπούλου, 2002].

## 4.2 Εμπειρικά μοντέλα

### 4.2.1 Πρώτα μοντέλα

Το πρώτο μοντέλο για τον υπολογισμό του οδικού θορύβου έδινε αποτελέσματα για ταχύτητες οχημάτων 35 με 45 μίλια την ώρα και για αποστάσεις μεγαλύτερες από 20 πόδια. Η βασική σχέση του μοντέλου ήταν

$$L_{50} = 68 + 8.5 \log(V) - 20 \log(D), \text{ dB} \quad (4.15)$$

Όπου,

$V$  Κυκλοφοριακός φόρτος εκφρασμένος σε οχήματα ανά ώρα και

$D$  Απόσταση από την γραμμική πηγή, σε πόδια

Το παραπάνω μοντέλο βελτιώθηκε στη μορφή της εξίσωσης:

$$L_{50} = C + 10 \log(V / D), \text{ dBA} \quad (4.16)$$

Όπου,

$C$  Σταθερά

Στην συνέχεια εισήχθη η ταχύτητα ως παράγοντας και το μοντέλο τροποποιήθηκε στη μορφή της εξίσωσης:

$$L_{50} = 3.5 + 10 \log(V \cdot S^3 / D), \text{ dB(A)} \quad (4.17)$$

Όπου,

$S$  Μέση ταχύτητα εκφρασμένη σε mph

Ωστόσο, η παραπάνω σχέση εφαρμοζόταν για ποσοστό βαρέων οχημάτων 20%, αλλά τα πειραματικά δεδομένα απείχαν από τα υπολογισμένα σε εύρος 1 dBA για ποσοστό βαρέων οχημάτων από 0 έως 40%. Για αυτό το λόγο προστέθηκε στο μοντέλο μια νέα παράμετρος,  $T$ , το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.

$$L_{50} = 20 + 10 \log(V \cdot S^2 / D) + 0.4(T), \text{ dB(A)} \quad (4.18)$$

Αργότερα, μπήκανε και άλλες παράμετροι, ενώ έγιναν αλλαγές και στον τρόπο έκφρασης του θορύβου, από  $L_{50}$  σε  $L_{10}$  και  $L_{eq}$  [Cambell Steele, 2000].

#### 4.2.2 Νέα μοντέλα

Το νέα μοντέλα πρόβλεψης τα οποία αναπτύσσονται σε αυτήν την παράγραφο, αντιπροσωπεύουν την ανταπόκριση των εθνών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ηχητικής ρύπανσης. Τα περισσότερα μοντέλα, θεωρούν τα οχήματα που παράγουν τον οδικό θόρυβο ως σημειακές πηγές, ωστόσο υπάρχουν και μερικά μοντέλα τα οποία θεωρούν τον οδικό θόρυβο ως μια γραμμική πηγή.

Μολονότι υπάρχει διεθνής πρότυπη μέθοδος (*ISO 9613-2, 1996*) για τον υπολογισμό της εξασθένησης του εξωτερικού ήχου, τα νέα μοντέλα δεν ακολουθούν την πρότυπη

μέθοδο στο τμήμα της διάδοσης του θορύβου. Ωστόσο, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται, είναι γενικά παρόμοιες με αυτές της μεθόδου αυτής.

Επίσης, σε αντίθεση με τα Ευρωπαϊκά μοντέλα που ενσωματώνουν υπομοντέλα για την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου, το αμερικάνικο και το βρετανικό μοντέλο θεωρούν τον κυκλοφοριακό φόρτο ως δεδομένο εισόδου.

Στις παρακάτω παραγράφους θα αναπτυχθούν τα κυριότερα μοντέλα και θα γίνει σύγκριση μεταξύ τους για να επιλεγθεί το βέλτιστο μοντέλο υπολογισμού του οδικού θορύβου [Cambell Steele, 2000].

#### **4.2.2.1 Το αμερικάνικο μοντέλο πρόβλεψης θορύβου FHWA**

Το μοντέλο *FHWA* αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, Δ/ση Μεταφορών, ενώ συμπεριλάμβανε και ένα υπολογιστικό πρόγραμμα. Το πρόγραμμα, αναπτύχθηκε επιπλέον, σε διάφορες επιτυχημένες εκδόσεις με την ονομασία *STAMINA*. Το μοντέλο βασίζεται στην θεωρία των σημειακών πηγών που μετακινούνται με σταθερή ταχύτητα. Ισχύει αποκλειστικά για ευθύγραμμους δρόμους και οχήματα με σταθερή ταχύτητα, αλλά ενσωματώνονται διάφορες μέθοδοι για την προσομοίωση καμπύλων δρόμων με πολλαπλές λωρίδες. Δυο είναι οι βασικές υποθέσεις που γίνονται σε αυτό το μοντέλο:

1. Τα οχήματα αντιστοιχούν σε σημειακές πηγές.
2. Η εξασθένιση λόγω διάδοσης οφείλεται μόνο στην επίδραση της απόστασης [FHWA, 1978].

Στην συνέχεια, το μοντέλο βελτιώθηκε, έτσι ώστε να εισάγονται στοιχεία από σχεδιαστικά προγράμματα, ενώ συμπεριλαμβάνει και πρόβλεψη για επιτάχυνση, διόδια κτλ. Άλλη βελτίωση ήταν η δυνατότητα εισαγωγής τύπου οχήματος με βάση τα πρότυπα επίπεδα μέσης εκπεμπόμενης ενέργειας. Η εξασθένιση της διάδοσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο, αλλά συνυπολογίζεται η απορρόφηση από την

ατμόσφαιρα και η τοπογραφία. Τέλος, το μοντέλο αυτό μπορεί να υπολογίσει και εξασθένιση λόγω ηχοπετασμάτων [Anderson GS, *et al*, 1996].

#### **4.2.2.2 Το βρετανικό μοντέλο πρόβλεψης θορύβου CRTN**

Το μοντέλο CRTN αναπτύχθηκε στην Αγγλία, Δ/νση Μεταφορών. Χρησιμοποιήθηκε κυρίως για το σχεδιασμό δρόμων. Τα επίπεδα θορύβου που προκύπτουν με αυτό το μοντέλο υπολογισμού εκφράζονται με τον Α-σταθμισμένο δείκτη κυκλοφοριακού θορύβου,  $L_{10-1h}$  ή  $L_{10}$  (18-h) dB(A), δηλαδή της *Στάθμης θορύβου*, η οποία *ξεπερνιέται κατά το 10% της αντίστοιχης χρονικής περιόδου μέτρησης*. Το μοντέλο αυτό υποθέτει μια γραμμική πηγή θορύβου με σταθερή ταχύτητα κυκλοφορίας και αποτελεί το μοναδικό εργαλείο για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός δρόμου από τις βρετανικές Αρχές.

Το μοντέλο εφαρμόζεται στην περίπτωση γραμμικής πηγής απείρου μήκους με ελεύθερη κυκλοφορία των οχημάτων σε απόσταση από τον αποδέκτη. Ωστόσο, συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο μέθοδοι για τον υπολογισμό μη γραμμικών δρόμων και τμήμα διάδοσης του θορύβου αντίστοιχο με αυτό του αμερικάνικου μοντέλου [United Kingdom Department of Transport and Welsh Office, 1975 και 1988].

#### **4.2.2.3 Το γερμανικό μοντέλο πρόβλεψης θορύβου RLS-90**

Το μοντέλο RLS-90 (Οδηγία για την προστασία από τον θόρυβο σε δρόμους) είναι η πρότυπη μέθοδος υπολογισμού του θορύβου στη Γερμανία. Έχει εφαρμογή σε αυτοκινητοδρόμους και χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων. Το μοντέλο βασίζεται στη θεωρία των σημειακών πηγών, ενώ έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης και του κυκλοφοριακού φόρτου. Η χρήση του μοντέλου προτείνεται για την περίπτωση εκτίμησης των επιπέδων θορύβου σε χώρους στάθμευσης ή όταν δεν υπάρχουν στοιχεία κυκλοφοριακών φόρτων [Cambell Steele, 2000].



#### **4.2.2.4 Το σουηδικό μοντέλο πρόβλεψης θορύβου *StL-86***

Το μοντέλο *StL-86* δημοσιεύθηκε από τη Δ/νση περιβάλλοντος της Σουηδίας. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα μοντέλο κυκλοφορίας, όπως και ένα μοντέλο θορύβου. Σε αυτό το μοντέλο κυκλοφορίας ο υπολογισμός της κυκλοφοριακής ροής χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για το μοντέλο του θορύβου. Όπως και στα υπόλοιπα μοντέλα, αυτό το μοντέλο θορύβου περιλαμβάνει ένα τμήμα υπολογισμού της εκπομπής και ένα τμήμα διάδοσης. Το τμήμα της διάδοσης περιλαμβάνει διορθώσεις από ανακλάσεις σε κτήρια κατά μήκος του δρόμου, λαμβάνει υπόψη εξασθένηση εξαιτίας κτηρίων ή εμποδίων μεταξύ του αποδέκτη και του δρόμου εξασθένηση λόγω απόστασης και λόγω οπτικής γωνίας του δρόμου. [Office federal de la protection de l' environnement, 1987]. Η χρήση του μοντέλου προτείνεται για την περίπτωση εκτίμησης των επιπέδων θορύβου από τραμ, ελαφρά τραίνα ή όταν δεν υπάρχουν στοιχεία κυκλοφοριακών φόρτων [Cambell Steele, 2000].

#### **4.2.2.5 Το ιαπωνικό μοντέλο πρόβλεψης θορύβου *ASJ-93***

Το μοντέλο *ASJ-93* συμπεριλαμβάνει τον απευθείας υπολογισμό του *Leq*. Αυτή είναι η μέθοδος Α. Το Ιαπωνικό μοντέλο περιλαμβάνει επίσης και μια εμπειρική μέθοδος που ονομάζεται Β. Η ισχύς της δεύτερης μεθόδου είναι μόνο για αποστάσεις μακριά από το δρόμο. Παρόλο που το μοντέλο συμπεριλαμβάνει στη μεθοδολογία του, μέθοδο υπολογισμού της εξασθένησης λόγω εμποδίων, σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματά αποκλίνουν από τις πειραματικές τιμές, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μικρών εμποδίων και στις πιο γενικές περιπτώσεις διάδοσης [Koyasu M, 1994]. Η χρήση του μοντέλου προτείνεται για την περίπτωση εκτίμησης των επιπέδων θορύβου σε δρόμους ελευθέρως κυκλοφορίας ή όταν δεν υπάρχουν στοιχεία κυκλοφοριακών φόρτων [Cambell Steele, 2000].

### 4.2.3 Σύγκριση εμπειρικών μοντέλων

Από το σύνολο των παραπάνω μοντέλων, η επιλογή του κατάλληλου για την περαιτέρω ανάλυση μοντέλου έγινε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- **Δεδομένα Εισόδου:** Ένα μοντέλο για να είναι εφαρμόσιμο και χρήσιμο σε κάθε περίπτωση εφαρμογής του, θα πρέπει να είναι γενικό, να λαμβάνει υπόψη του μεγάλο εύρος παραμέτρων και να απαιτούνται δεδομένα εισόδου, τα οποία να μπορούν εύκολα να υπολογιστούν ή τουλάχιστον να εκτιμηθούν. Ειδικά, η τελευταία παράμετρος, είναι πολύ σημαντική καθώς, στις περισσότερες των περιπτώσεων, πολύπλοκα μοντέλα προσομοίωσης αποτυγχάνουν τελικά να εφαρμοστούν στην πράξη λόγω του πλήθους δεδομένων εισόδου. Έτσι, πολύπλοκα μοντέλα που απαιτούν ειδικές παραμέτρους, για την εφαρμογή τους στις περισσότερες των περιπτώσεων λαμβάνονται οι προκαθορισμένες τιμές καθώς δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός των παραμέτρων, ή απαιτούνται χρονοβόρες διαδικασίες.

Από το σύνολο των παραπάνω μοντέλων η βρετανική μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος περιπτώσεων, καθώς έχει μεγάλο εύρος ισχύος, χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερα δεδομένα εισόδου πέρα από τις βασικές παραμέτρους του δρόμου (γεωμετρία, μέση ταχύτητα οχημάτων, ποσοστό βαρέων οχημάτων) και του περιβάλλοντα χώρου (Εμπόδια).

- **Αξιοπιστία:** Η αξιοπιστία αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο κατά την εφαρμογή ενός μοντέλου. Τα αποτελέσματά του θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.

Όλα τα παραπάνω μοντέλα, μέσα στο εύρος ισχύος τους, έχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με αποκλίσεις, βέβαια, από τις πειραματικές τιμές. Για το λόγο αυτό

χρειάζονται και αρκετές βελτιώσεις, καθώς έχουν σημαντικές ελλείψεις από το ιδανικό μοντέλο εκτίμησης των επιπέδων θορύβου.

- **Αποτελέσματα:** Τα αποτελέσματα του μοντέλου, θα πρέπει να δίνουν επιπλέον πληροφορίες, για να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τις επιπτώσεις του οδικού θορύβου στον αποδέκτη.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.1 οι επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο εξαρτώνται από την χρονική διάρκεια και την ένταση. Επομένως, ο καλύτερος δείκτης είναι αυτός που δίνει πληροφορίες για τις δυο παραπάνω παραμέτρους. Από την μια μεριά, ο δείκτης *Ισοδύναμης συνεχούς στάθμης θορύβου,  $L_{eq}$* , δίνει μια μέση τιμή της στάθμης σε ένα χρονικό διάστημα, το οποίο είναι συνήθως 12 ώρες, με αποτέλεσμα να μην δίνει πληροφορίες για τυχόν αυξομειώσεις των επιπέδων θορύβου στην μετρούμενη περίοδο. Από την άλλη, ο δείκτης *στάθμης θορύβου, η οποία ξεπερνιέται κατά το 10% των περιπτώσεων,  $L_{10}$*  δίνει επιπλέον πληροφορίες για την ένταση της ηχητικής ισχύος, ιδιαίτερα στην περίπτωση κυκλοφοριακού φόρτου αιχμής. Επομένως, τα μοντέλα προσομοίωσης που δίνουν τα αποτελέσματά τους εκφρασμένα με τον δείκτη *στάθμης θορύβου, η οποία ξεπερνιέται κατά το 10% των περιπτώσεων*, παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με τον δείκτη *Ισοδύναμης συνεχούς στάθμης θορύβου*.

Από τα 5 πιο συνήθη μοντέλα που χρησιμοποιούνται και αναπτύχθηκαν στις παραπάνω παραγράφους, μόνο το βρετανικό μοντέλο δίνει αποτελέσματα στάθμης, που ξεπερνιέται στο 10% των περιπτώσεων.

- **Αναγνώριση:** Η αξία του μοντέλου θα πρέπει να είναι αναγνωρίσιμη και στις χώρες εφαρμογής του, έξω από τα στενά Εθνικά Όρια της χώρας προέλευσης.

Η βρετανική μέθοδος είναι η μόνη που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και είναι αναγνωρισμένη από το σύνολο των μελετητών, ακουστικών, άλλων ειδικών επιστημόνων και από τις κατά τόπους υπηρεσίες περιβάλλοντος της Ελλάδας.

Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου σε πεδίο ομοιόμορφου ή μεταβλητού διαμερισμού είναι η νεότερη έκδοση του βρετανικού μοντέλου, καθώς αποτελεί μια μέθοδο απλή, εφαρμόσιμη για πλήθος περιπτώσεων, αξιόπιστη και βεβαίως αναγνωρίσιμη.

## **5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ**

### **5.1 Εισαγωγή**

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4 σχετικά με τις βασικές μεθόδους υπολογισμού του θορύβου, το μοντέλο, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου είναι η τυποποιημένη βρετανική μέθοδος, *CRTN*. Τα κυριότερα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό του θορύβου με τη μέθοδο αυτή είναι το ύψος του αποδέκτη, η ταχύτητα, κυκλοφορίας των οχημάτων, η κλίση του οδοστρώματος, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων, η απόσταση, τα τυχόν εμπόδια μεταξύ του αποδέκτη και του οδικού τμήματος και το μέγεθος του οδικού τμήματος. Στο παράρτημα παρατίθενται αναλυτικά οι εξισώσεις της βρετανικής μεθόδου και τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να εκτιμηθούν τα επίπεδα θορύβου σε σημειακό αποδέκτη.

### **5.2 Επέκταση της μεθόδου σε επιφάνεια δυο διαστάσεων**

Η βρετανική μέθοδος έχει εφαρμογή για ένα μόνο σημειακό αποδέκτη. Ωστόσο, για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου σε μια περιοχή, που συνήθως είναι το ζητούμενο, απαιτείται η επέκταση του μοντέλου αυτού για τον υπολογισμό του θορύβου σε πολλαπλά σημεία του πεδίου και μάλιστα σε προκαθορισμένες θέσεις και συντεταγμένες. Επομένως, είναι σκόπιμο να επεκταθεί το μοντέλο αυτό έτσι ώστε τα δεδομένα εισόδου του δρόμου και των ηχοπετασμάτων να ορίζονται με συντεταγμένες στο χώρο στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων *XYZ*.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται τα προβλήματα που προέκυψαν από την επέκταση του βρετανικού μοντέλου και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αντιμετώπισή τους. Ωστόσο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον συνιστά η προσέγγιση για τη θέση

των ηχοπετασμάτων ως προς το οδικό τμήμα και η εφαρμογή των εξισώσεων για τη διαμόρφωση του μεταβλητού διαμερισμού.

### 5.2.1 Παράλληλα

Με βάση τη βρετανική μέθοδο, στην περίπτωση των παράλληλων στο οδικό τμήμα ηχοπετασμάτων, θα πρέπει η περιοχή που βρίσκεται πίσω από το ηχοπέτασμα, να χωριστεί σε δυο ζώνες: Ζώνη φωτισμένη και ζώνη σκιών. Ο χωρισμός των ζωνών σε φωτισμένη και σκιών πραγματοποιείται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$h - 0.5 = \frac{h_{barrier} - 0.5}{R_{distance} - B_{distance}} R_{distance} \quad (5.1)$$

Όπου

$h$  Ύψος του αποδέκτη

$h_{barrier}$  Ύψος του εμποδίου

$R_{distance}$  Οριζόντια απόσταση του αποδέκτη από την γραμμική πηγή

$B_{distance}$  Απόσταση του εμποδίου από την γραμμική πηγή

Ανάλογα με το ύψος του αποδέκτη, διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- Αν  $h - 0.5 \geq \frac{h_{barrier} - 0.5}{R_{distance} - B_{distance}} R_{distance}$  (5.2)

τότε εφαρμόζονται οι συντελεστές της φωτισμένης ζώνης

- Αν  $h - 0.5 < \frac{h_{barrier} - 0.5}{R_{distance} - B_{distance}} R_{distance}$  (5.3)

τότε εφαρμόζονται ομοίως οι συντελεστές της ζώνης σκιών.

Εντούτοις, η διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση δεν πρέπει να εφαρμόζεται για όλο το μήκος του οδικού τμήματος, αλλά σε εκείνο το οδικό τμήμα, το οποίο καλύπτεται από το ηχοπέτασμα.

Από την ανάλυση των γεωμετρικών θέσεων του ηχοπετάσματος ως προς το οδικό τμήμα προέκυψαν συνολικά 6 περιπτώσεις, οι οποίες τελικά συνοψίστηκαν σε 3 κατηγορίες, ανάλογα με τον αν το ηχοπέτασμα δεν παρεμβάλλεται του οδικού τμήματος και του αποδέκτη (περίπτωση Α) , παρεμβάλλεται μερικώς (περίπτωση Β) ή πλήρως (περίπτωση Γ).

Το τμήμα κάλυψης του οδικού τμήματος προκύπτει από την προβολή του ηχοπετάσματος (ΚΛ) στην ευθεία (ε), η οποία διέρχεται από το οδικό τμήμα (ΑΒ). Τα σημεία Ε και Ζ υπολογίζονται από την προέκταση των τμημάτων (RΚ) και (RΛ) μέχρι να συναντήσουν την ευθεία (ε).

Πρακτικά, λοιπόν ανάλογα με την θέση των σημείων Ε, Ζ στην ευθεία (ε) ως προς το οδικό τμήμα (ΑΒ) υπολογίζεται η διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος. Για την ανάλυση των περιπτώσεων υπολογίζονται κάθε φορά οι συντεταγμένες των σημείων Ε, Ζ πάνω στην ευθεία (ε) και στην συνέχεια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την θέση τους ως προς το (ΑΒ) σε «Εξω και αριστερά», «Αριστερό όριο», «Εντός», «Δεξί όριο» και «Εξω και δεξιά».

### **Περίπτωση Α**

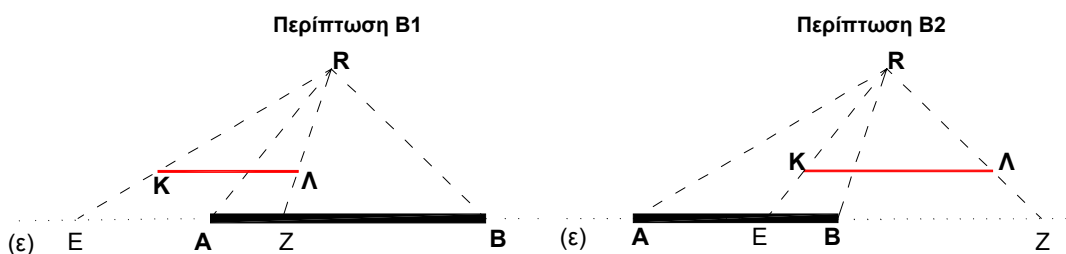
Τόσο στην περίπτωση Α1 όσο και στην περίπτωση Α2 του **σχήματος 5.1** το ηχοπέτασμα δεν παρεμβάλλεται ανάμεσα στο οδικό τμήμα και στον αποδέκτη, καθώς το τμήμα κάλυψης (ΕΖ) στην ευθεία (ε) του οδικού τμήματος βρίσκεται εκτός των ορίων (ΑΒ). Στην περίπτωση αυτή ο θόρυβος στον αποδέκτη (R) από το τμήμα (ΑΒ) υπολογίζεται χωρίς διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος.



Σχήμα 5.1: Το τμήμα κάλυψης του ηχοπετάσματος είναι εκτός των ορίων και για τις δυο περιπτώσεις.

### Περίπτωση Β

Και στις δυο περιπτώσεις B1 και B2 του σχήματος 5.2, το ηχοπέτασμα παρεμβάλλεται του οδικού τμήματος και του αποδέκτη R. Ωστόσο, το ηχοπέτασμα, δεν καλύπτει πλήρως το οδικό τμήμα. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να χωριστεί το οδικό τμήμα σε 2 υποτμήματα, από τα οποία στο ένα υποτμήμα το ηχοπέτασμα παρεμβάλλεται του οδικού τμήματος και του αποδέκτη και στο άλλο υποτμήμα το ηχοπέτασμα δεν παρεμβάλλεται. Έτσι, τελικά, ο συνολικός θόρυβος στον αποδέκτη θα προκύπτει από τη συμβολή του οδικού υπότμήματος (ZB) για την περίπτωση B1 και (AE) για την περίπτωση B2 χωρίς διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος και του υπόλοιπου οδικού τμήματος (AZ) και (EB), αντίστοιχα, όπου θα έχει υπολογιστεί και η διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος.

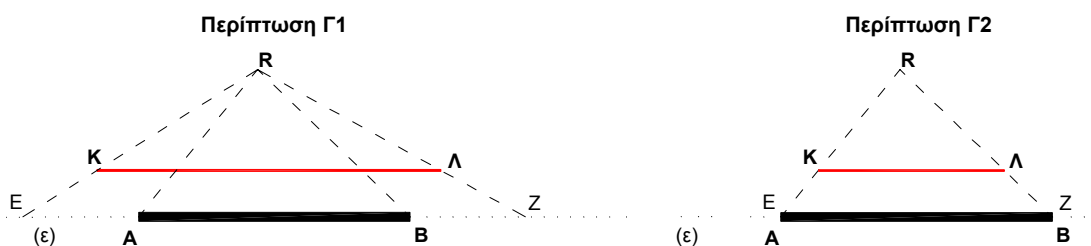


Σχήμα 5.2: Το ηχοπέτασμα καλύπτει μερικώς το οδικό τμήμα.



## Περίπτωση Γ

Τέλος, στην περίπτωση Γ το ηχοπέτασμα καλύπτει πλήρως το οδικό τμήμα, τόσο στη Γ1, όσο και στη Γ2. Το οδικό τμήμα δεν χωρίζεται σε επιμέρους υποτμήματα, καθώς η διόρθωση λόγω ηχοπετάσματος εφαρμόζεται εξολοκλήρου σε όλο το οδικό τμήμα (AB).



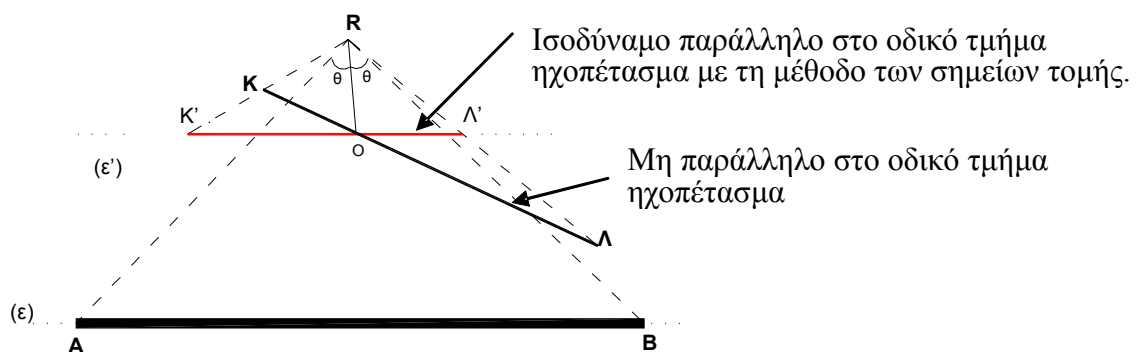
Σχήμα 5.3: Το ηχοπέτασμα καλύπτει πλήρως το οδικό τμήμα.

### 5.2.2 Μη παράλληλα

Όπως και στην περίπτωση των παράλληλων εμποδίων, η θέση του μη παράλληλου εμποδίου, παίζει καθοριστικό ρόλο για την εφαρμογή της διόρθωσης στο κατάλληλο οδικό υποτμήμα που θα εξαρτάται κάθε φορά από την καλυπτόμενη περιοχή. Με βάση την βρετανική μέθοδο, το εμπόδιο περιστρέφεται ως προς το σημείο O, έτσι ώστε να γίνει παράλληλο με το οδικό τμήμα, και στην συνέχεια εκτείνεται, αν είναι απαραίτητο, ώστε να γίνει ισοδύναμο με το μη παράλληλο τμήμα ως προς την καλυπτόμενη περιοχή. Ωστόσο, δεν προσδιορίζεται ο τρόπος που θα εκτείνεται το περιστρεμμένο ηχοπέτασμα, έτσι ώστε να είναι ισοδύναμο με το αρχικό. Το αναμενόμενο θα ήταν ότι ανεξαρτήτως της θέσης του ηχοπετάσματος ως προς το οδικό τμήμα και τον αποδέκτη, το ισοδύναμο εμπόδιο θα ήταν ένα τμήμα παράλληλο στο οδικό τμήμα (AB) το οποίο θα έχει αρχή και τέλος, τα σημεία τομής της ευθείας

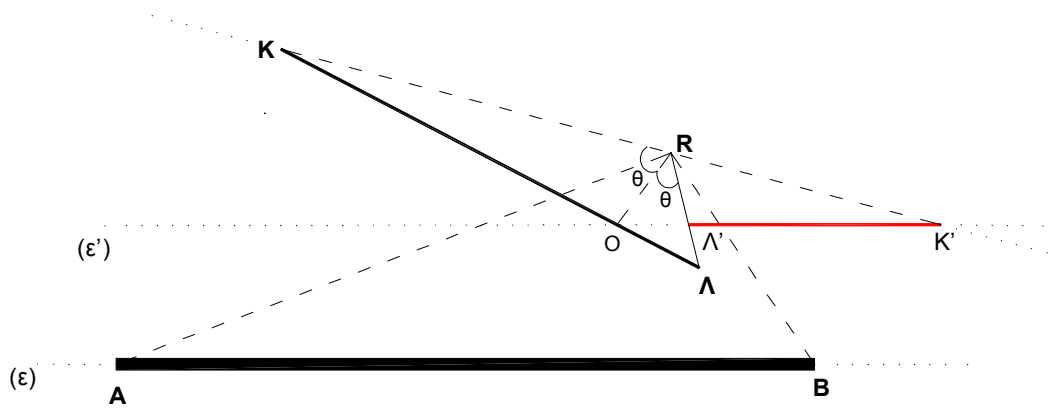
που διέρχεται από το  $O$  της παράλληλης με τον οδικό άξονα και των ευθειών που διέρχονται από τον αποδέκτη και τα άκρα του αρχικού εμποδίου.

Πράγματι, υπάρχει μια συγκεκριμένη περιοχή της θέσης του αποδέκτη, όπου η παραπάνω θεώρηση μπορεί να εφαρμοστεί και να αποδώσει ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με το ισοδύναμο ηχοπέτασμα, όπως φαίνεται στην περίπτωση  $A$  του **σχήματος 5.4**. Στην περίπτωση αυτή, το ηχοπέτασμα ( $K' \Lambda'$ ) που προκύπτει είναι πράγματι ισοδύναμο προς το αρχικό, καθώς παρεμβάλλεται και καλύπτει το οδικό τμήμα με όμοιο τρόπο σε σχέση με το αρχικό ηχοπέτασμα. Τα  $K'$ ,  $\Lambda'$  που καθορίζουν την αρχή και το τέλος του, υπολογίζονται από τα σημεία τομής της ευθείας ( $\epsilon'$ ) που διέρχεται από το σημείο  $O$  και είναι παράλληλη με το οδικό τμήμα ( $AB$ ) και τα τμήματα ( $RK$ ) και ( $R\Lambda$ ).



Σχήμα 5.4: Περιστροφή του ηχοπετάσματος με τη μέθοδο των σημείων τομής. Το εμπόδιο που προκύπτει είναι ισοδύναμο με το αρχικό.

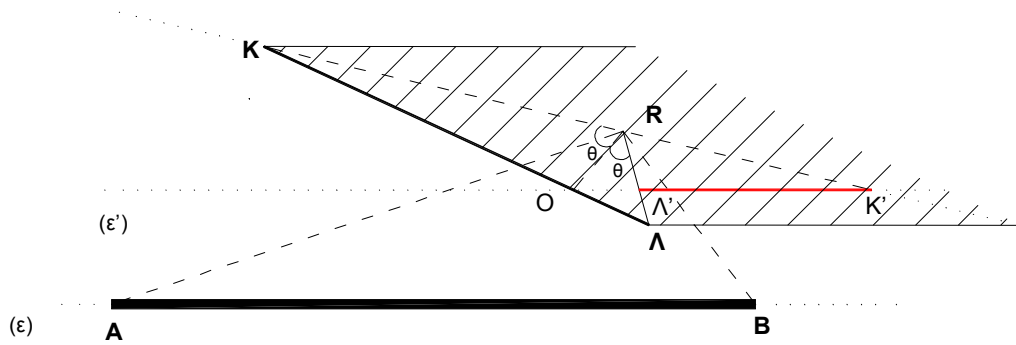
Ωστόσο, από την ανάλυση των γεωμετρικών θέσεων των μη παράλληλων εμποδίων ως προς το οδικό τμήμα προέκυψαν δυο ακόμα περιπτώσεις ( $B$  και  $\Gamma$ ), **σχήμα 5.5 και 5.6** στις οποίες η παραπάνω μεθοδολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί.



Σχήμα 5.5: Περιστροφή του ηχοπετάσματος με τη μέθοδο των σημείων τομής. Το εμπόδιο που προκύπτει δεν ανταποκρίνεται στο αρχικό εμπόδιο. Το προβληματικό σημείο είναι το  $K'$ .

Στο σχήμα 5.5 το εμπόδιο( $K' \Lambda'$ ) που προκύπτει δεν ανταποκρίνεται στο αρχικό εμπόδιο, καθώς δεν πέτυχε η περιστροφή του ηχοπετάσματος ως προς το  $O$  με βάση την προτεινόμενη μέθοδο κατά *CRTN*. Από την εξέταση διαφόρων εναλλακτικών θέσεων του αποδέκτη, προέκυψε ότι ο αποδέκτης  $R$  της περίπτωσης  $B$  βρίσκεται εντός μιας προβληματικής περιοχής, κατά την οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία των σημείων τομής, που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Στο σχήμα 5.6 η περιοχή αυτή έχει παρασταθεί ως μια γραμμοσκιασμένη ζώνη, τα όρια της οποίας καθορίζονται από το ηχοπέτασμα και τις ημιευθείες, που είναι παράλληλες στο οδικό τμήμα ( $AB$ ) και διέρχονται από την αρχή και το τέλος του ηχοπετάσματος, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.6: Η γεωμετρική θέση του αποδέκτη R βρίσκεται εντός της γραμμοσκιασμένης προβληματικής περιοχής.

Υπολογιστικά, η προβληματική περιοχή καθορίζεται με 2 κριτήρια:

- Τα ευθύγραμμα τμήματα που συνδέουν τον αποδέκτη με το οδικό τμήμα (RA και RB) να μην τέμνονται από το ηχοπέτασμα (KL)
- Ο αποδέκτης να βρίσκεται ανάμεσα στις ημιευθείες που διέρχονται από τα άκρα του ηχοπετάσματος και είναι παράλληλες με το δρόμο.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος εντοπίζεται πρώτα το προβληματικό σημείο και στην συνέχεια, αντικαθίσταται θέτοντας κάθε φορά το αντιδιαμετρικό του ως προς το O, έτσι ώστε κάθε φορά το σημείο O να βρίσκεται εντός του νέου ηχοπετάσματος.

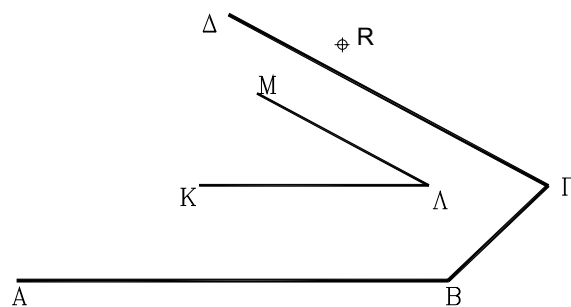
Στην περίπτωση B, αντικαθίσταται το προβληματικό σημείο K' με το αντιδιαμετρικό του ως προς το O, K''.



### 5.2.3 Πολλαπλά εμπόδια

Πολλαπλά εμπόδια εφαρμόζονται στην πράξη στην περίπτωση που υπάρχει ένα υφιστάμενο εμπόδιο ή ηχοπέτασμα, το οποίο δεν καλύπτει πλήρως τις προδιαγραφές μείωσης θορύβου. Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων, απαιτείται η τοποθέτηση νέου ηχοπετάσματος, κατάλληλου ύψους και μήκους, έτσι ώστε τα παραγόμενα επίπεδα θορύβου από το οδικό τμήμα να μην ξεπερνούν τα όρια της νομοθεσίας. Με βάση τη βρετανική μέθοδο η διόρθωση για πολλαπλά εμπόδια υπολογίζεται για κάθε ένα ξεχωριστό εμπόδιο και στη συνέχεια συνδυάζεται η μεγαλύτερη διόρθωση με τις άλλες διορθώσεις και επιλέγεται αυτή με την μεγαλύτερη απόλυτη τιμή.

Ωστόσο, η μέθοδος των πολλαπλών εμποδίων θα πρέπει να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που ο δρόμος δεν είναι ευθύγραμμος, ενώ έχουν τοποθετηθεί πολλαπλά ηχοπετάσματα παράλληλα με το δρόμο.

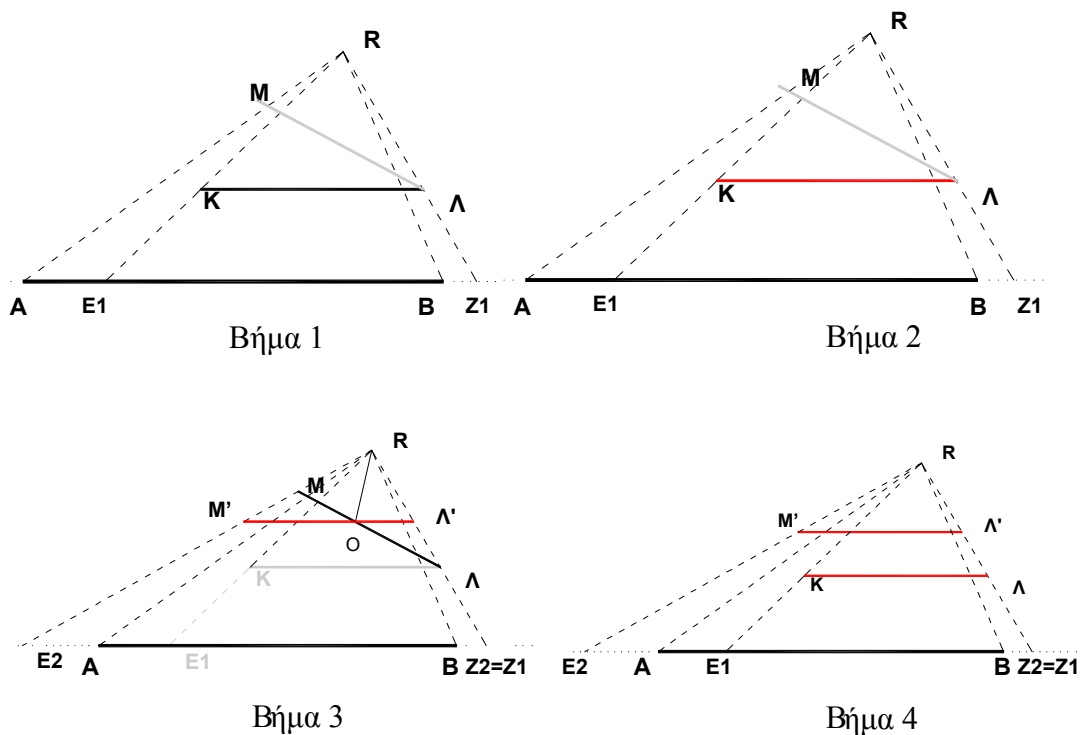


Σχήμα 5.9: Παρεμβολή 2 ηχοπετασμάτων μεταξύ του οδικού τμήματος (AB) και του αποδέκτη R.

Στην περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό της μείωσης λόγω ηχοπετάσματος στη θέση R του αποδέκτη, θα πρέπει να συνυπολογιστούν και τα 2 ηχοπετάσματα (KΛ) και (ΛΜ). Εφαρμόζοντας, τη μέθοδο των μη παράλληλων ηχοπετασμάτων που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στον υπολογισμό του θορύβου από το οδικό

τμήμα (AB) στη θέση R, αποδεικνύεται ότι η παραπάνω περίπτωση είναι ισοδύναμη με την περίπτωση δυο παράλληλων στο δρόμο ηχοπετασμάτων. Πράγματι, με βάση την βρετανική μέθοδο, περιστρέφεται μόνο το ηχοπέτασμα (ΛΜ) ως προς το (AB), καθώς το (ΚΛ) είναι ήδη παράλληλο στο (AB). Έτσι, προκύπτουν δυο εμπόδια (ΚΛ) και (Μ'Λ'), τα οποία αντιμετωπίζονται όπως στην περίπτωση δυο παράλληλων εμποδίων.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την περίπτωση των δυο ηχοπετασμάτων φαίνονται στο **σχήμα 5.10**



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση σε στάδια της διαδικασίας πολλαπλών εμποδίων

### 5.3 Πεδίο υπολογισμού

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος για τη δημιουργία ενός πεδίου υπολογισμού, σε κάθε σημείο του οποίου θα υπολογίζεται η τιμή του οδικού θορύβου είναι το ομοιόμορφο πλέγμα με σταθερό βήμα στον άξονα X και Y και όρια την αρχή και το τέλος του πεδίου. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση αυτή στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, γεγονός το οποίο δυσχεραίνει την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου για μεγάλα οδικά τμήματα ή για πολύ πυκνό πεδίο. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, πολλές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ακουστικής, κάνουν χρήση της μεθοδολογίας των πολλαπλών επεξεργαστών. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή, εκτός που είναι αρκετά δύσχρηστη στην πράξη, απαιτεί και αντίστοιχη υποδομή δικτύου υπολογιστών.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η χρήση της τεχνικής του μεταβλητού διαμερισμού χωρίς να μειώνεται, όμως, η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Αντίθετα μάλιστα, όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια, η χρήση μεταβλητού πεδίου εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα ισοθορυβικών καμπυλών.

Ο σχεδιασμός του μεταβλητού πεδίου εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από τη θέση του οδικού τμήματος. Πυκνώνει στις περιοχές, όπου οι μεταβολές στα επίπεδα θορύβου είναι έντονες και αραιώνει στις περιοχές όπου δεν μεταβάλλονται σημαντικά τα επίπεδα θορύβου. Όπως προκύπτει από τη θεωρία των κυμάτων και αποδεικνύεται με πειραματικές μετρήσεις, η ένταση του ήχου από σημειακή πηγή μεταβάλλεται

αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης με βάση τη σχέση  $I = \frac{W}{4\pi r^2}$ ,

όπου  $4\pi r^2$  είναι το εμβαδόν επιφάνειας της σφαίρας όπως μεταδίδεται ο ήχος στο χώρο. Επομένως, οι μεταβολές στα επίπεδα θορύβου μειώνονται όσο ο αποδέκτης, δηλαδή το σημείο υπολογισμού, απομακρύνεται από τη γραμμική πηγή θορύβου του



οδικού τμήματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι ένα πολύ πυκνό πεδίο μακριά από τον δρόμο δεν είναι απαραίτητο και βεβαίως επιβαρύνει χρονικά το συνολικό υπολογισμό των σημείων του πεδίου.

Για τη δημιουργία του μεταβλητού πεδίου, συνήθως χρησιμοποιούνται αλγεβρικές μεθόδους που βασίζονται σε γεωμετρική πρόοδο, εκθετικές, λογαριθμικές και υπερβολικές συναρτήσεις. Για το διαμερισμό του πεδίου χρησιμοποιήθηκε μια αλγεβρική μέθοδος που βασίζεται σε λογαριθμικές συναρτήσεις με δυνατότητα πύκνωσης είτε κοντά στο αριστερό είτε στο δεξιό είτε και στα δυο όρια του πεδίου [Peric M,1985].

Για πύκνωση στο αριστερό όριο χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$A = \frac{[(B+1) - (B-1)] \cdot \left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\left(1-\frac{i}{N}\right)}}{\left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\left(1-\frac{i}{N}\right)} + 1} \quad (5.4)$$

Για πύκνωση στο δεξί όριο:

$$B = B \cdot \frac{\left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\frac{i}{N}} - 1}{\left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\frac{i}{N}} + 1} \quad (5.5)$$

Για πύκνωση και στα δύο όρια

$$\Gamma = \frac{(B+1) \cdot \left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\left(2\frac{i}{N}-1\right)} - B + 1}{2 \cdot \left(\left(\frac{B+1}{B-1}\right)^{\left(2\frac{i}{N}-1\right)} + 1\right)} \quad (5.6)$$

Όπου,

$B$  Συντελεστής πύκνωσης

$N$  Πλήθος των σημείων του διαμερισμού

Το μέγεθος πύκνωσης εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου  $B$ . Όσο η τιμή του  $B$  αγγίζει την μονάδα, τόσο περισσότερο πυκνώνει το πεδίο στην περιοχή αυτή. Σε περίπτωση που η τιμή του  $B$  είναι μικρότερη ή ίση με την μονάδα, τότε δεν ορίζεται το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων.

Τα δεδομένα εισόδου για τη δημιουργία αυτού του μεταβλητού πεδίου είναι τα όριά του, το πλήθος των σημείων  $N$  και η τιμή της παραμέτρου πυκνότητας πεδίου  $B$ . Όμως, στις περισσότερες των περιπτώσεων, αντί των παραμέτρων  $B$ ,  $N$ , είναι γνωστά τα αρχικά και τελικά βήματα του πεδίου. Για την επίλυση του συστήματος ως προς το συντελεστή πύκνωσης  $B$  και το πλήθος των σημείων  $N$  γίνεται χρήση της τεχνικής δοκιμή και σφάλμα.

#### **5.4 Εκτίμηση Επιβάρυνσης Πληθυσμού**

Για την εκτίμηση του αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται σε συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου θεωρήθηκε ότι στο πεδίο υπολογισμού υπάρχει συγκεκριμένη πυκνότητα πληθυσμού και στη συνέχεια ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός του συνολικού αριθμού των κατοίκων για το συγκεκριμένο πεδίο υπολογισμού.
- Υπολογισμός των σημείων που βρίσκονται σε συγκεκριμένο εύρος επιπέδων θορύβου.
- Κατανομή του αριθμού των κατοίκων σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου.

## 6. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

### 6.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό σύστημα εκτίμησης των επιπέδων θορύβου με δυνατότητα εισαγωγής μέτρων αντιμετώπισης, όπως η δημιουργία ηχοπετασμάτων ή η μείωση της ταχύτητας των οχημάτων για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μέτρων, με τη βοήθεια ισοθροβικών καμπυλών. Για την εισαγωγή των δεδομένων στο υπολογιστικό σύστημα απαιτούνται τέσσερα βασικά βήματα, ενώ υπάρχει και ένα πέμπτο βήμα στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσής τους.

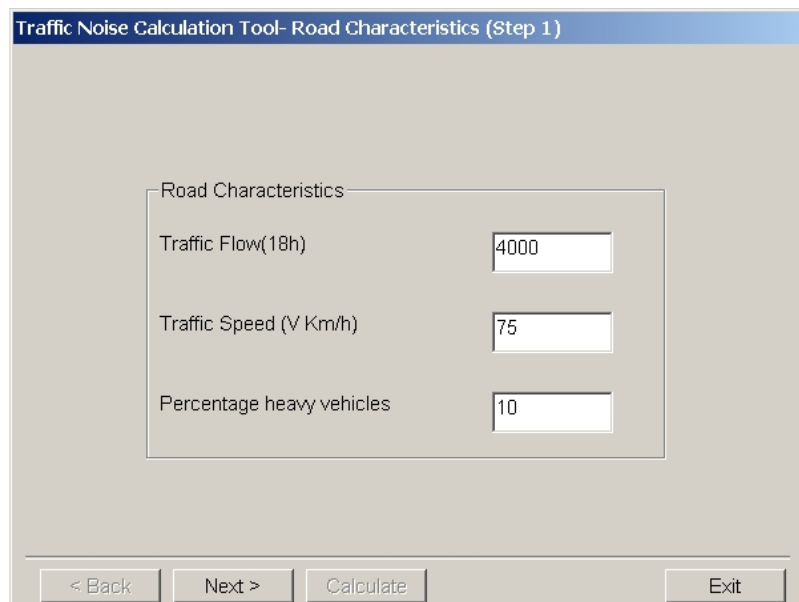
### 6.2 Χαρακτηριστικά δρόμου

Σε πρώτο στάδιο εισάγονται τα χαρακτηριστικά του δρόμου (**Σχήμα 6.1**).

- **Κυκλοφοριακός φόρτος σε 18h βάση:** Για να είναι ακριβή τα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου θα πρέπει να προκύπτουν είτε από συγκοινωνιακές μελέτες του δρόμου είτε από αναλυτικές μετρήσεις με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές για το χρόνο δειγματοληψίας και τη συχνότητα των μετρήσεων.
- **Ταχύτητα των οχημάτων εκφρασμένη σε Km/h:** Στην παράμετρο αυτή εισάγεται η ταχύτητα μελέτης του δρόμου, όπως προκύπτει από τη μελέτη της οδοποιίας. Συνήθως εισάγεται η μέγιστη ταχύτητα για την εκτίμηση των επιπτώσεων, δυσμενέστερο σενάριο, καθώς τα επίπεδα θορύβου αυξάνονται σε συνάρτηση με την ταχύτητα των οχημάτων.
- **Ποσοστό των βαρέων οχημάτων:** Η παράμετρος αυτή εκφράζει το ποσοστό % των οχημάτων με μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος μεγαλύτερο από 3,5 τόννους. Στο ποσοστό αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται τα ελαφρά φορτηγά. Σχετικά με τη σύνθεση

των οχημάτων, τα δεδομένα προκύπτουν σε κάθε περίπτωση από συγκοινωνιακές μελέτες ή πειραματικές μετρήσεις.

- Για τον έλεγχο της εισαγωγής των παραπάνω δεδομένων υπάρχει σύστημα ελέγχου λαθών, όταν το ποσοστό των βαρέων οχημάτων είναι μεγαλύτερο του 100%. Επίσης, ο κυκλοφοριακός φόρτος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 1.000 οχήματα/ 18h ή 200 οχήματα/ h, καθώς αποτελεί περιορισμό του βρετανικού μοντέλου.



Road Characteristics	
Traffic Flow(18h)	4000
Traffic Speed (V Km/h)	75
Percentage heavy vehicles	10

< Back   Next >   Calculate   Exit

Σχήμα 6.1: Φόρμα εισαγωγής των χαρακτηριστικών του δρόμου.

### 6.3 Συντεταγμένες δρόμου και θέση αποδέκτη

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι σημαντικότεροι παράμετροι για τον καθορισμό των συντεταγμένων του δρόμου και της θέσης του αποδέκτη.

- **Συντεταγμένες του δρόμου στους άξονες X, Y, Z:** Προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση του δρόμου στο πεδίο υπολογισμού απαιτούνται οι συντεταγμένες X, Y, ενώ από τη συντεταγμένη Z υπολογίζεται η κλίση του οδοστρώματος.

- **Ύψος του αποδέκτη:** Για τον υπολογισμό του θορύβου θα πρέπει να καθοριστεί το ύψος του αποδέκτη. Ουσιαστικά, θα εξεταστεί επίπεδη επιφάνεια με κλίση ίδια με την κλίση του δρόμου και σε ύψος όσο είναι το ύψος του αποδέκτη από το έδαφος. Συνήθως, το ύψος του αποδέκτη είναι 1,8 m, όσο είναι το μέσο ύψος του ανθρώπου. Ωστόσο, είναι σύνηθες να ορίζεται διαφορετικό ύψος ανάλογα με τη θέση του αποδέκτη.

Για τον έλεγχο της εισαγωγής των παραπάνω δεδομένων το πρόγραμμα έχει σύστημα ελέγχου λαθών για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Αν δεν πληκτρολογηθεί από τον χρήστη κάποιος αριθμός.
- Αν πληκτρολογηθεί δυο φορές το ίδιο σημείο X, Y, Z.
- Αν υπάρχει ένα μόνο σημείο, καθώς δεν αποτελεί οδικό τμήμα.
- Αν ένα σημείο είναι ελλιπές, δηλαδή δεν έχουν συμπληρωθεί και οι τρεις συντεταγμένες.

Traffic Noise Calculation Tool- Road Coordinates (Step 2)

Number of segments :  Receiver height  m

Input point coordinates manually or  for automatic input

	X	Y	Z
0	15	40	0
1	55	50	0
2	80	80	0
3	150	120	0
4			
5			
6			
7			
8			

Σχήμα 6.2: Φόρμα εισαγωγής των συντεταγμένων του δρόμου.

## 6.4 Συντεταγμένες ηχοπετάσματος

Στο στάδιο αυτό εξετάζεται αν η διάδοση του θορύβου είναι εμποδιζόμενη ή όχι. Σε περίπτωση που επιλεγθεί η εμποδιζόμενη διάδοση είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι παρακάτω παράμετροι:

- Ύψος του εμποδίου και
- Συντεταγμένες του εμποδίου.

Όπως και στην περίπτωση εισόδου των συντεταγμένων του δρόμου υπάρχει σύστημα ελέγχου λαθών και ανάλογα με το είδος του λάθους εμφανίζεται και το αντίστοιχο μήνυμα. Στο σύστημα ελέγχου λαθών υπάρχει επιπλέον ένας έλεγχος για τη σχέση του οδικού τμήματος με το ηχοπέτασμα. Στην περίπτωση που το ηχοπέτασμα έρχεται σε απόσταση μικρότερη από 3,5 m από την γραμμική πηγή θορύβου του δρόμου, τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα λάθους καθώς δεν μπορεί ένα ηχοπέτασμα να διέρχεται μέσα από τον δρόμο, όπου με βάση το μοντέλο έχει πλάτος  $(3,5+3,5) \text{ m} = 7 \text{ m}$ .

Traffic Noise Calculation Tool- Barrier Coordinates (Step 3)

No Obstructed Propagation

Obstructed Propagation

Input point coordinates manually or  
 for automatic input

Number of barrier segments :

Barrier Height

	X	Y
0	15	80
1	55	90
2	80	120
3	130	150
4		
5		
6		
7		
8		

Σχήμα 6.3: Φόρμα εισαγωγής των συντεταγμένων του εμποδίου.

## 6.5 Πεδίο Υπολογισμού

Για τον καθορισμό του πεδίου, όπου θα εκτιμηθούν τα επίπεδα θορύβου, πρέπει να καθοριστούν οι παρακάτω παράμετροι: Το μέγεθος και η μορφή του πεδίου.

- **Μέγεθος του πεδίου:** Το μέγεθος του πεδίου θα καθοριστεί από 2 σημεία στο επίπεδο, το αρχικό σημείο (Xstart, Ystart) και το τελικό σημείο (Xend, Yend). Ουσιαστικά, τα δυο σημεία θα ορίσουν την αρχή και το τέλος ενός επιπέδου παραλληλογράμμου με πλευρές παράλληλες προς τους άξονες και στο ύψος του αποδέκτη, όπου θα υπολογιστούν τα επίπεδα θορύβου (**Σχήμα 6.4**).

	X	Y
Start Point:	0	0
End Point:	200	200

Select grid type:

Uniform

	X	Y
Step:	1	1

Automatic

	X	Y
Step near the road:	1	1
Step far from the road:	20	20
Offset:	0	0

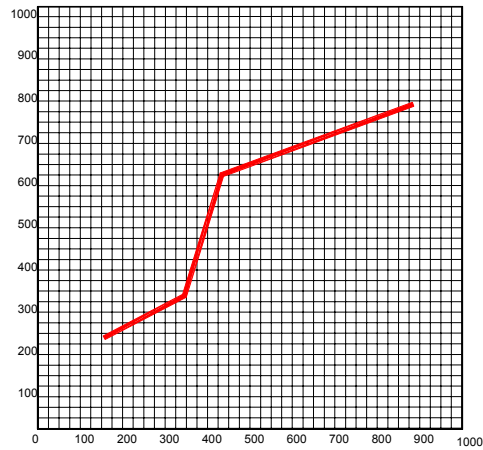
Advanced

Settings for Advanced grid...

< Back   Next >   Calculate   Exit

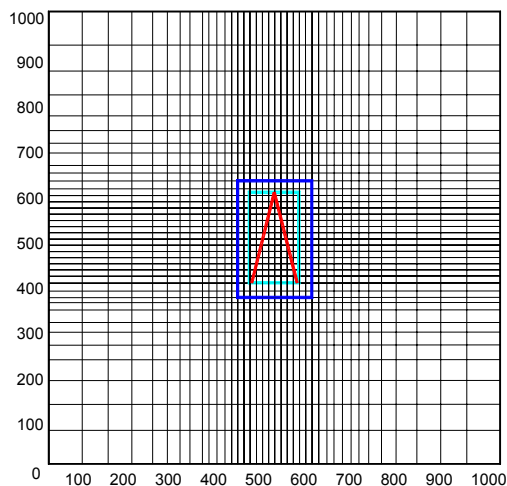
Σχήμα 6.4: Φόρμα εισαγωγής των δεδομένων του πεδίου.

- **Τύπος πεδίου:** Για τον καθορισμό του τύπου του πεδίου έχουν αναπτυχθεί τρεις περιπτώσεις:
  - **Ομοιόμορφο:** Στην περίπτωση αυτή σχηματίζεται ένα πεδίο με σταθερό βήμα στους άξονες X και Y. (**Σχήμα 6.5**)



Σχήμα 6.5: Ομοιόμορφο πεδίο υπολογισμού του θορύβου.

- **Πεδίο μεταβλητού διαμερισμού, το οποίο εξαρτάται από τη θέση του οδικού τμήματος:** Στην περίπτωση αυτή ενεργοποιούνται 6 παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν τα στοιχεία του μεταβλητού πεδίου. Με βάση τις συντεταγμένες του οδικού τμήματος, σχηματίζονται ουσιαστικά 2 πεδία υπολογισμού, με σκοπό να εξετάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι αλλαγές στα επίπεδα θορύβου κοντά στο δρόμο σε σχέση με τις αλλαγές σε μια περιοχή του πεδίου απομακρυσμένη από το δρόμο (**Σχήμα 6.6**).



Σχήμα 6.6: Πεδίο μεταβλητού βήματος, εξαρτώμενο από τη θέση του οδικού τμήματος.



- **Βήμα κοντά στο δρόμο:** Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται πολύ καλή ανάλυση του επίπεδου θορύβου κοντά στο δρόμο, συνήθως 1 m.
  - **Βήμα μακριά από το δρόμο:** Μακριά από το δρόμο οι αλλαγές στα επίπεδα θορύβου δεν είναι τόσο έντονες και επομένως δεν είναι απαραίτητη η λεπτομερής εξέταση του πεδίου. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, το βήμα θα πρέπει να είναι σαφώς μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που είναι κοντά στο δρόμο και το πεδίο λιγότερο λεπτομερές.
  - **Διευρυμένο πεδίο:** Πολλές φορές το πεδίο που ορίζεται από τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές των συντεταγμένων, δεν καλύπτει την μεταβλητότητα των επιπέδων θορύβου. Για την περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί ένα διαφορετικό πεδίο, διευρυμένο σε σχέση με το αρχικό. Έτσι, ένα διευρυμένο πεδίο κατά 25 m σημαίνει ένα πεδίο που το αρχικό σημείο και τελικό σημείο απέχει κατά 25 m από τις συντεταγμένες του οδικού τμήματος. Για παράδειγμα στο **σχήμα 6.6** το συνολικό πεδίο υπολογισμού είναι αυτό που ορίζεται από τα σημεία (0,0) και (1.000, 1.000), η γαλάζια γραμμή ορίζει το αρχικό πυκνό πεδίο από τις συντεταγμένες του οδικού τμήματος και η μπλε γραμμή ορίζει το διευρυμένο πυκνό πεδίο κατά 25 m τόσο στον άξονα του X, όσο και στον άξονα του Y.
- **Πεδίο μεταβλητού διαμερισμού, ανεξάρτητο από τη θέση του οδικού τμήματος:** Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μεγάλη ελευθερία για τον καθορισμό της ακριβούς μορφής του πεδίου. Οι επιπλέον παράμετροι που απαιτούνται για κάθε άξονα του πεδίου είναι ο αριθμός των σημείων, η πυκνότητα του πλέγματος και ο τύπος του μεταβλητού πεδίου (**Σχήμα 6.7**).

The image shows a software dialog box titled "Advanced Gridding". It is divided into two main sections: "Axle X" and "Axle Y".

**Axle X Section:**

- Number of points for X: 20
- Grid density: 1,002
- Radio buttons:
  - Left Boundary
  - Right Boundary
  - Both Boundary
  - Automatic gridding
  - Uniform Grid
  - Centre
- Offset: 0

**Axle Y Section:**

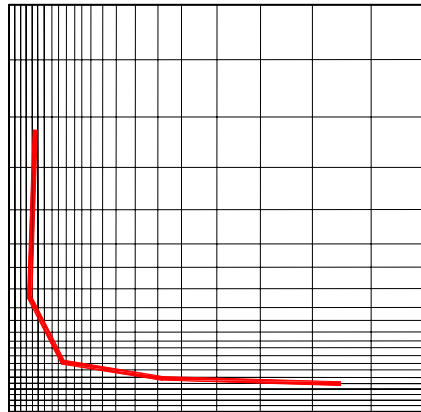
- Number of points for Y: 20
- Grid density: 1,002
- Radio buttons:
  - Left Boundary
  - Right Boundary
  - Both Boundary
  - Automatic gridding
  - Uniform Grid
  - Centre
- Offset: 0

An "Ok" button is located at the bottom center of the dialog box.

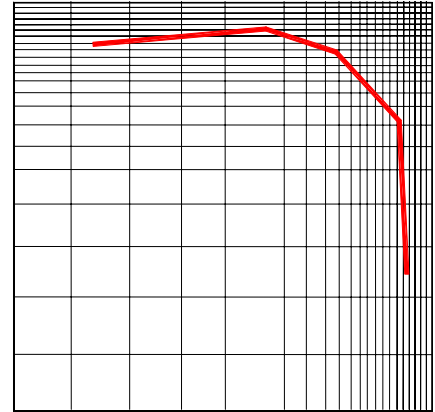
Σχήμα 6.7: Φόρμα εισαγωγής των δεδομένων του μεταβλητού υπολογιστικού πεδίου

- **Αριστερό όριο:** Στην περίπτωση αυτή το πεδίο αραιώνει από αριστερά προς τα δεξιά. Η μεταβολή του πεδίου εξαρτάται από την τιμή της πυκνότητας του πεδίου (**Σχήμα 6.8-α**).
- **Δεξιό όριο:** Στην περίπτωση αυτή το πεδίο πυκνώνει από αριστερά προς τα δεξιά (**Σχήμα 6.8-β**).
- **Διπλό πύκνωμα:** Στην περίπτωση αυτή το πεδίο πυκνώνει στα αριστερά και στα δεξιά του συνολικού πεδίου και στο κέντρο αραιώνει (**Σχήμα 6.8-γ**).

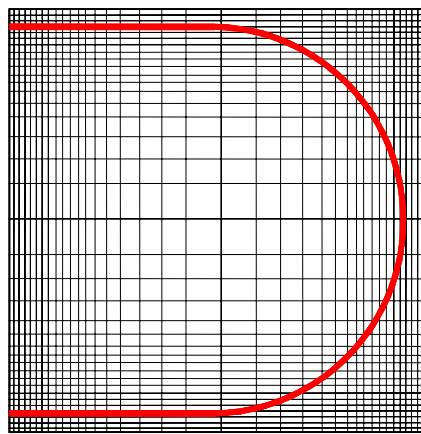
- **Κέντρο:** Στην περίπτωση αυτή σχηματίζεται ένα πυκνό πεδίο στο κέντρο των συντεταγμένων του οδικού τμήματος και το οποίο στη συνέχεια εκτείνεται με συνεχώς μεταβαλλόμενο βήμα που θα εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων (Σχήμα 6.8-δ).



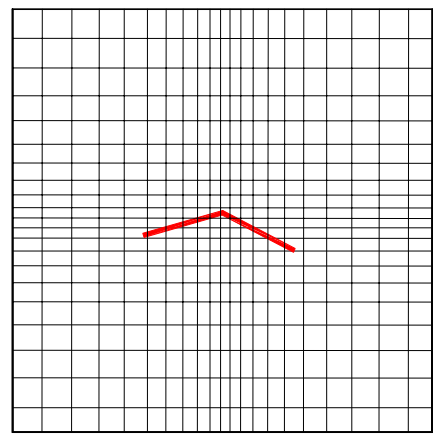
α) Αριστερό πύκνωμα



β) Δεξί πύκνωμα



γ) Διπλό πύκνωμα



δ) Πύκνωμα στο κέντρο

Σχήμα 6.8: Πεδίο μεταβλητού διαμερισμού ανεξάρτητου του οδικού τμήματος.

- **Πεδίο με σταθερό βήμα στον ένα άξονα και μεταβλητό βήμα στο άλλο:** Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα πεδίο με σταθερό διαμερισμό στον ένα άξονα και μεταβλητό διαμερισμό στον άλλον άξονα.

▪ **Πεδίο μεταβλητού διαμερισμού με βάση το πλήθος των σημείων:**

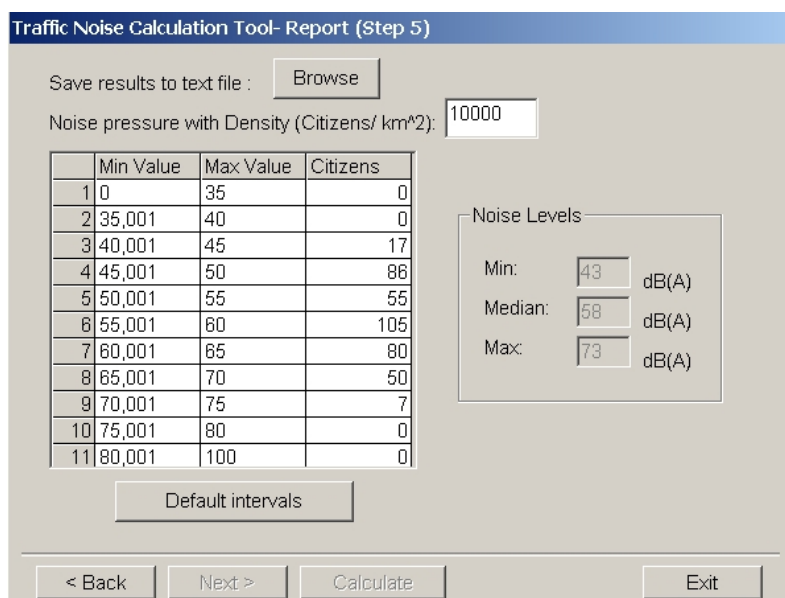
Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα πεδίο, το οποίο κατανέμει το σύνολο των σημείων του άξονα κατά 80% κοντά στο πεδίο με σταθερό διαμερισμό και κατά 20% στο υπόλοιπο πεδίο με μεταβλητό διαμερισμό. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να γίνει χρήση και της εντολής διεύρυνσης του πυκνού πεδίου. Σχηματικά το πεδίο είναι αντίστοιχο με αυτό του **σχήματος 6.6**.

Όπως στα προηγούμενα στάδια εισαγωγής των δεδομένων έτσι και στο στάδιο διαμόρφωσης του πεδίου έχει αναπτυχθεί σύστημα ελέγχου λαθών. Ανάλογα με το είδος του λάθους εμφανίζονται τα παρακάτω μηνύματα:

- Η πυκνότητα του πεδίου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα. Με βάση τη μέθοδο που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι εξισώσεις δεν ορίζονται όταν το B είναι μικρότερο ή ίσο με την μονάδα.
- Αν οι παράμετροι δεν είναι σωστά ορισμένοι ή είναι κενοί.
- Σε περίπτωση που έχει επιλεγθεί μεταβλητός τύπος πεδίου, θα πρέπει το οδικό τμήμα να είναι εντός του συνολικού πεδίου, καθώς η διαμόρφωση του πεδίου καθορίζεται αυτόματα σε συνάρτηση με τη θέση του οδικού τμήματος. Έτσι, στην περίπτωση που το συνολικό πεδίο δεν καλύπτει πλήρως τις συντεταγμένες του οδικού τμήματος, εμφανίζεται ένα μήνυμα λάθους.

## 6.6 Αποτελέσματα υπολογισμών

Εφόσον, ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, εκτιμώνται τα επίπεδα θορύβου σε κάθε σημείο του πεδίου και επεξεργάζονται στατιστικά τα αποτελέσματα. Από τη στατιστική ανάλυση εκτιμάται η κατανομή της επιβάρυνσης του πληθυσμού σε συνάρτηση με τα παραγόμενα επίπεδα θορύβου, καθώς επίσης υπολογίζονται η ελάχιστη, η μέση και μέγιστη τιμή των επιπέδων θορύβου στο υπολογιζόμενο πεδίο (Σχήμα 6.9).



Σχήμα 6.9: Φόρμα επεξεργασίας και αποθήκευσης αποτελεσμάτων και στατιστικών στοιχείων.

- **Κατανομή του αριθμού των κατοίκων σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου:**  
Μετά την ολοκλήρωση των στατιστικών υπολογισμών εμφανίζεται ένας πίνακας, στον οποίο παρουσιάζονται τα διαστήματα τιμών σε συνάρτηση με τον αριθμό των κατοίκων που επιβαρύνεται από το συγκεκριμένο εύρος επιπέδων θορύβου. Τα διαστήματα μπορούν να αλλάξουν, καθώς επίσης και η πυκνότητα του πληθυσμού. Βεβαίως, σε κάθε περίπτωση απαιτείται νέος υπολογισμός των πιέσεων θορύβου. Μάλιστα, τα αποτελέσματα του πίνακα, με κατάλληλη επεξεργασία από άλλα

προγράμματα, μπορούν να δώσουν γραφήματα κατανομής πίεσης θορύβου, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 7.

- Επίπεδα θορύβου: Το πρόγραμμα παρέχει κάποια βασικά στατιστικά στοιχεία για τα επίπεδα θορύβου. Έτσι, υπολογίζονται η ελάχιστη, η μέση και μέγιστη τιμή των επιπέδων θορύβου. Βεβαίως, ακολουθώντας την μεθοδολογία που αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο μπορεί να επεκταθεί η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια ειδικών εργαλείων.

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα αποθήκευσης των υπολογισμών των επιπέδων θορύβου σε αρχείο, για περαιτέρω επεξεργασία του. Επίσης, μπορούν να υπολογιστούν και να εμφανιστούν ισοθορυβικές καμπύλες, όπως φαίνονται στα σχήματα των κεφαλαίων 7 και 8.

## 7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

### 7.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι κυριότεροι παράμετροι για τον υπολογισμό του θορύβου βάση της βρετανικής μεθόδου είναι το ύψος του αποδέκτη, η ταχύτητα των οχημάτων, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η κλίση του οδοστρώματος, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων, η απόσταση και τα τυχόν εμπόδια μεταξύ του αποδέκτη και του οδικού τμήματος και τέλος το μέγεθος του οδικού τμήματος. Για τον κυκλοφοριακό φόρτο, το ύψος του αποδέκτη, την ταχύτητα των οχημάτων, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων και την κλίση θα χρησιμοποιηθεί ένα βασικό μοντέλο δρόμου με ένα οδικό τμήμα απείρου μήκους και θα υπολογιστούν τα επίπεδα θορύβου από την γραμμική πηγή του δρόμου σε απόσταση 10 m από την πλευρά του δρόμου.

Πίνακας 7.1: Συνοπτικός πίνακας μοντέλου δρόμου απείρου μήκους

Κυκλοφοριακός φόρτος (18h)	4000
Μέση ταχύτητα οχημάτων: (Km/h)	75
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	10%
Ύψος Αποδέκτη (m)	1.8

Για την περίπτωση των ηχοπετασμάτων χρησιμοποιείται ένα μοντέλο δρόμου με 3 ευθύγραμμα υποτμήματα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά σε ομοιόμορφο πεδίο.

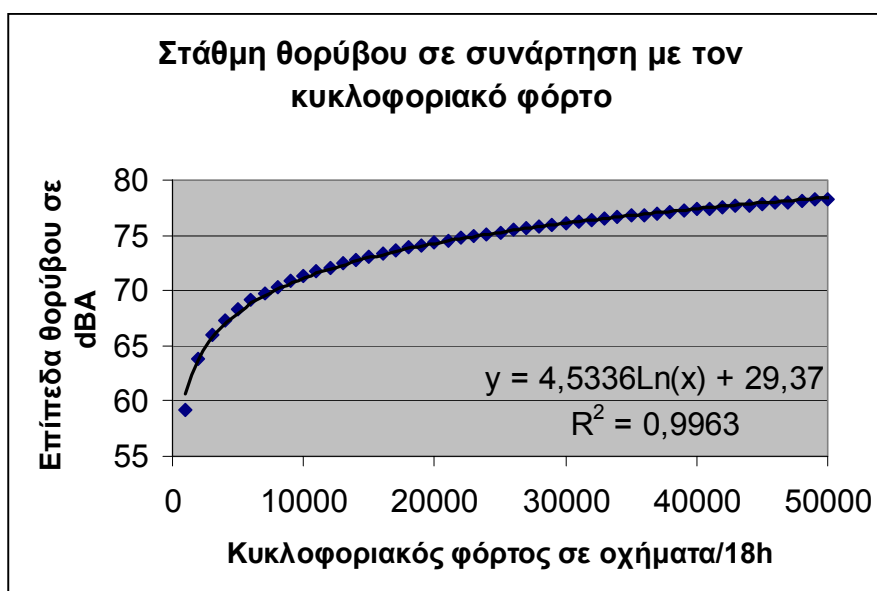
Πίνακας 7.2: Στοιχεία δρόμου και πεδίου

<b>Στοιχεία δρόμου</b>			
Συντεταγμένες			
Αριθμός σημείου	X	Y	Z
0	15	40	0
1	55	50	0
2	80	80	0
3	150	120	0
<b>Πεδίο</b>			
Τύπος πεδίου	Ομοιόμορφο		
	X	Y	Z
Αρχικό σημείο	0	0	1.8
Τελικό σημείο	200	200	1.8

Βήμα	1	1	-
------	---	---	---

### 7.1.1 Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος, αποτελεί ίσως μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στον υπολογισμό των επιπέδων θορύβου. Ο φόρτος μπορεί να είναι πολύ χαμηλός, της τάξεως των 1.000 οχημάτων/ ανά 18h, όπως για παράδειγμα ένα οδικό τμήμα το οποίο συνδέει δυο οικισμούς. Μια επαρχιακή οδός, έχει μεγαλύτερο φόρτο, που μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 2.000 έως 10.000 οχήματα/ ανά 18h. Τέλος, ένας τυπικός φόρτος αυτοκινητοδρόμου, όπως για παράδειγμα της Αθηνών- Θεσσαλονίκης, στο ύψος της εξόδου της Αττικής είναι 50.000 οχήματα/18h. Βεβαίως, οι παραπάνω φόρτοι μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά σε περίοδο γιορτών ή αργιών. Για το εύρος τιμών της κυκλοφοριακής ροής από 1.000 έως 50.000 οχήματα/ 18h τα επίπεδα θορύβου μεταβάλλονται όπως το **Σχήμα 7.1**



Σχήμα 7.1: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με τον κυκλοφοριακό φόρτο.

Από το σχήμα 7.1 προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θορύβου σε μια απόσταση 10 m από την γραμμική πηγή θορύβου αυξάνονται λογαριθμικά με βάση τη σχέση:



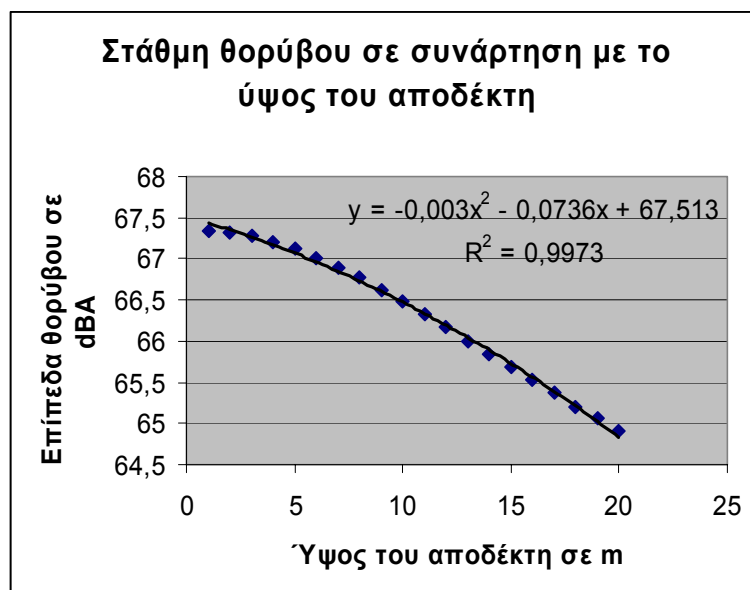
$$L_{10}(18h) = 4.5336 \ln(Q) + 29.37, \text{ dB(A)} \quad (7.1)$$

Όπου,  $Q$  ο κυκλοφοριακός φόρτος

Με βάση το **σχήμα 7.1** αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου από 1.000 σε 50.000 οχήματα/18h αυξάνονται τα επίπεδα θορύβου κατά 19 dB(A).

### 7.1.2 Ύψος του αποδέκτη

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το ύψος του αποδέκτη λαμβάνεται περίπου στο ύψος του ανθρώπου, 1,8 m από το έδαφος. Εντούτοις, ενδέχεται ο ευαίσθητος αποδέκτης να βρίσκεται σε ύψος σημαντικά μεγαλύτερο από το ύψος του ανθρώπου, όπως για παράδειγμα στον νιοστό όροφο ενός κτίσματος. Για το εύρος τιμών της παραμέτρου αυτής από 1 έως 20 m τα επίπεδα θορύβου μεταβάλλονται όπως το **Σχήμα 7.2**.



Σχήμα 7.2: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος του αποδέκτη.

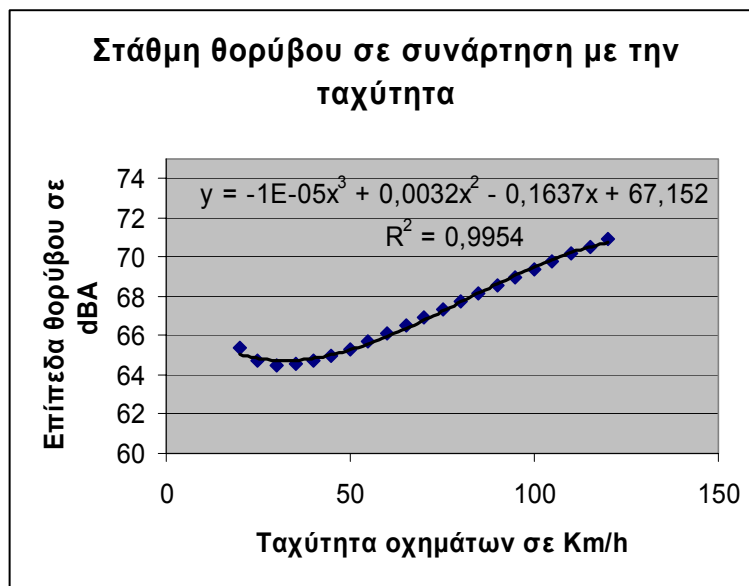
Από το **σχήμα 7.2** προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θορύβου σε μια απόσταση 10m από την γραμμική πηγή θορύβου μειώνονται με βάση τη σχέση:

$$L_{10}(18h) = -0.003 \cdot h^2 - 0.0736 \cdot h + 67.513, \text{ dB(A)} \quad (7.2)$$

Με βάση το **σχήμα 7.2** για αύξηση του ύψους από 1 σε 20 m μειώνονται τα επίπεδα θορύβου κατά 2,5 dB(A).

### 7.1.3 Ταχύτητα οχημάτων

Η ταχύτητα των οχημάτων αποτελεί και αυτή καθοριστική παράμετρος για τα παραγόμενα επίπεδα θορύβου. Μάλιστα, το όριο ταχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ένα απλό μέτρο για την μείωση των επιπέδων θορύβου ενός οδικού τμήματος. Η ταχύτητα μπορεί να είναι πολύ χαμηλή της τάξεως των 40 km/h, όπως για παράδειγμα σε ένα οδικό τμήμα το οποίο συνδέει δυο μικρούς οικισμούς. Μια επαρχιακή οδός, συνήθως έχει όριο ταχύτητας που μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 60 έως 80km/h. Τέλος, η ταχύτητα ενός αυτοκινητοδρόμου, όπως για παράδειγμα της Αθηνών- Θεσσαλονίκης, κυμαίνεται μεταξύ 100 με 120 km/h. Για το εύρος τιμών της παραμέτρου αυτής από 20 έως 120 km/h τα επίπεδα θορύβου μεταβάλλονται όπως το **Σχήμα 7.3**.



Σχήμα 7.3: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με την ταχύτητα των οχημάτων.

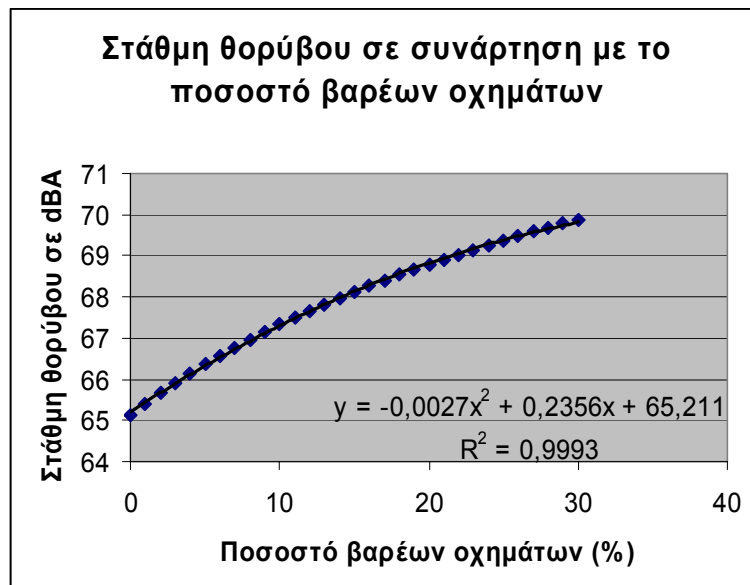
Από το **σχήμα 7.3** προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θορύβου σε μια απόσταση 10m από την γραμμική πηγή θορύβου στην αρχή μειώνονται μέχρι τα 30 km/h και την συνέχεια αυξάνονται συνεχώς μέχρι τα 120 km/h με βάση τη σχέση:

$$L_{10}(18h) = -10^{-5} \cdot u^3 + 0.0032 \cdot u^2 - 0.1637 \cdot u + 67.152, \text{ dB(A)} \quad (7.3)$$

Με βάση το **σχήμα 7.3** αύξηση της ταχύτητας από 20 σε 120 km/h αυξάνονται τα επίπεδα θορύβου κατά 4,5 dB(A).

#### 7.1.4 Ποσοστό βαρέων οχημάτων

Το ποσοστό των βαρέων οχημάτων είναι και αυτή μια άλλη παράμετρος που επιδρά στα παραγόμενα επίπεδα θορύβου. Τυπικές τιμές ποσοστού βαρέων οχημάτων είναι μεταξύ 10 έως 20%. Εντούτοις, στην περίπτωση που το οδικό τμήμα εξυπηρετεί αποκλειστικά μια βιομηχανική περιοχή ή ένα λατομείο το ποσοστό των βαρέων οχημάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Τυπικές, τιμές για την περίπτωση αυτή είναι 30 με 40%. Τέλος, στην περίπτωση που ο δρόμος εξυπηρετεί καθαρά κατοίκους παραθεριστικών περιοχών, το βαρέα οχήματα είναι ως επί το πλείστον λεωφορεία σε ποσοστό μόλις 5%. Για το εύρος τιμών της παραμέτρου αυτής από 0 έως 30% τα επίπεδα θορύβου μεταβάλλονται όπως το **Σχήμα 7.4**.



Σχήμα 7.4: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.

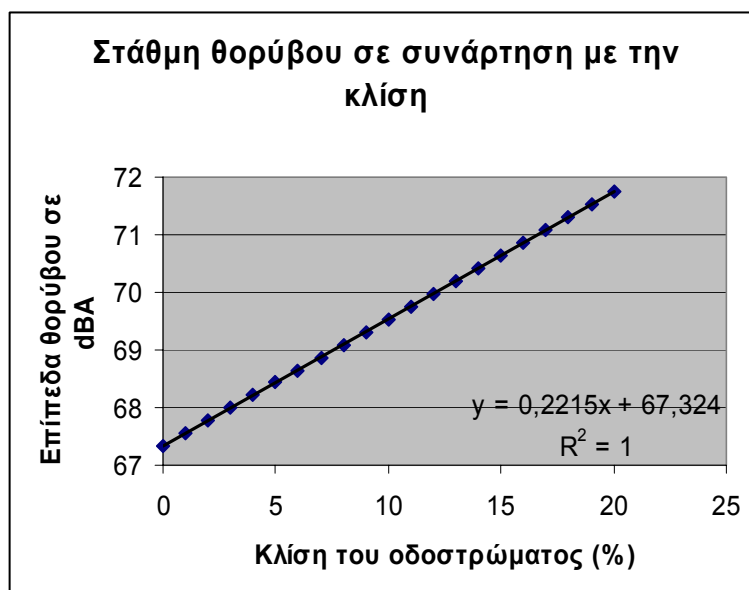
Από το **σχήμα 7.4** προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θορύβου σε μια απόσταση 10 m από την γραμμική πηγή θορύβου, αυξάνονται με συνεχώς μειούμενο ρυθμό με βάση τη σχέση:

$$L_{10}(18h) = -0.0027 \cdot p^2 + 0.2356 \cdot p + 65.211, \text{ dB(A)} \quad (7.4)$$

Με βάση το **σχήμα 7.4**, για αύξηση του ποσοστού των βαρέων οχημάτων από 0 σε 30% αυξάνονται τα επίπεδα θορύβου κατά 5 dB(A).

### 7.1.5 Κλίση

Η κλίση του δρόμου, είναι δεδομένο ότι συμβάλει στην αύξηση των επιπέδων θορύβου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, τα οχήματα καταναλώνουν επιπλέον ενέργεια, για την υπερνίκηση των βαρυτικών δυνάμεων. Βεβαίως, η κλίση παίζει ρόλο μόνο όταν είναι θετική. Όταν είναι αρνητική δεν υπάρχει καμία επίπτωση στα παραγόμενα επίπεδα θορύβου. Οι προδιαγραφές για την κλίση του οδοστρώματος εξαρτώνται από την ταχύτητα μελέτης του δρόμου. Για το εύρος τιμών της παραμέτρου αυτής από 0 έως 20 % τα επίπεδα θορύβου μεταβάλλονται όπως το **Σχήμα 7.5**.



Σχήμα 7.5: Στάθμη θορύβου σε συνάρτηση με την κλίση του οδοστρώματος.

Από το **σχήμα 7.5** προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θορύβου σε μια απόσταση 10 m από την γραμμική πηγή θορύβου μεταβάλλονται γραμμικά με βάση τη σχέση:

$$L_{10}(18h) = 0.2215 \cdot p + 67.324, \text{ dB(A)} \quad (7.5)$$

Με βάση το **σχήμα 7.5**, για αύξηση της κλίσης του δρόμου από 0 σε 20% αυξάνονται τα επίπεδα θορύβου κατά 4,5 dB(A).

### 7.1.6 Ηχοπετάσματα

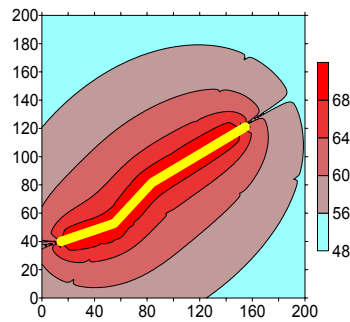
Το ηχοπέτασμα, αποτελεί βασικό μέτρο για την αντιμετώπιση των επιπέδων θορύβου σε μια περιοχή. Ωστόσο, η αποδοτικότητα του ηχοπετάσματος εξαρτάται από την ακριβή θέση ενός αποδέκτη ως προς το οδικό τμήμα. Καθώς με βάση τη θέση, αυτή θα υπολογιστεί η διαφορά στη διαδρομή του κύματος του ήχου από την πηγή λόγω περίθλασης, παράμετρος που υπεισέρχεται στην βρετανική μέθοδο. Οι παράμετροι που καθορίζουν την διαδρομή αυτή είναι οι συντεταγμένες του εμποδίου στο πεδίο και το ύψος του. Στην προκειμένη περίπτωση θα εξεταστούν δυο θέσεις του εμποδίου (μια κοντά στον αποδέκτη και μια κοντά στο οδικό τμήμα και σε 2 διαφορετικά ύψη (3 m και 5 m)).

Πίνακας 7.3: Συνοπτικός πίνακας με τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης των ηχοπετασμάτων

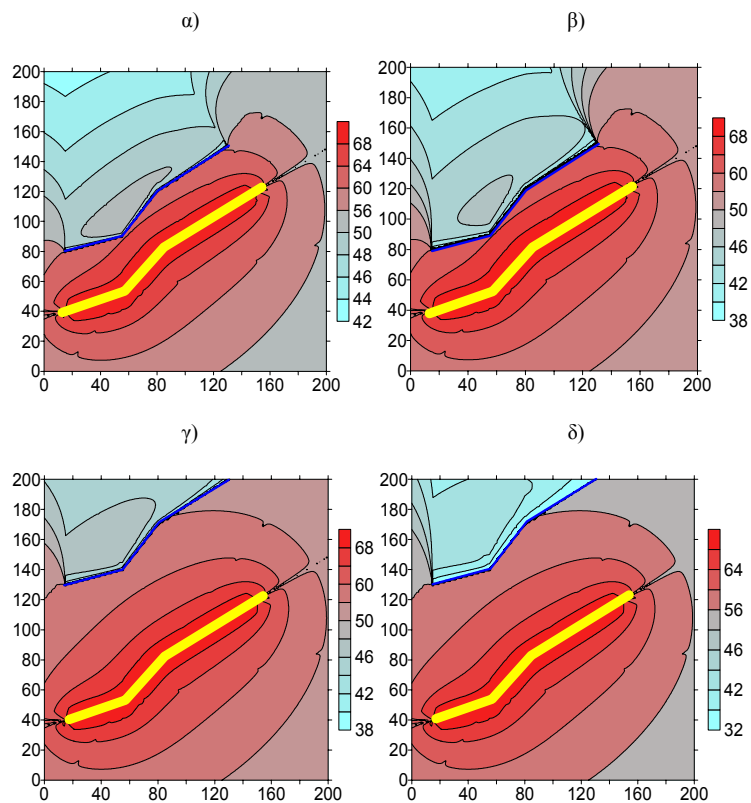
Στοιχεία Εμποδίου 1		
Τμήμα	Συντεταγμένες	
	X	Y
0	15	80
1	55	90
2	80	120
3	130	150
Στοιχεία Εμποδίου 2		
Τμήμα	Συντεταγμένες	
	X	Y
0	15	130
1	55	140
2	80	170
3	130	200

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων θεωρούνται δυο αποδέκτες και συγκρίνονται τα αποτελέσματα σε σχέση με τα επίπεδα θορύβου χωρίς ηχοπέτασμα.

- Θέση  $(X_1, Y_1) \equiv (60m, 100m)$  πίσω από το ηχοπέτασμα 1
- Θέση  $(X_2, Y_2) \equiv (60m, 150m)$  πίσω από το ηχοπέτασμα 2



Σχήμα 7.6: Ισοθορυβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου χωρίς ηχοπέτασμα.

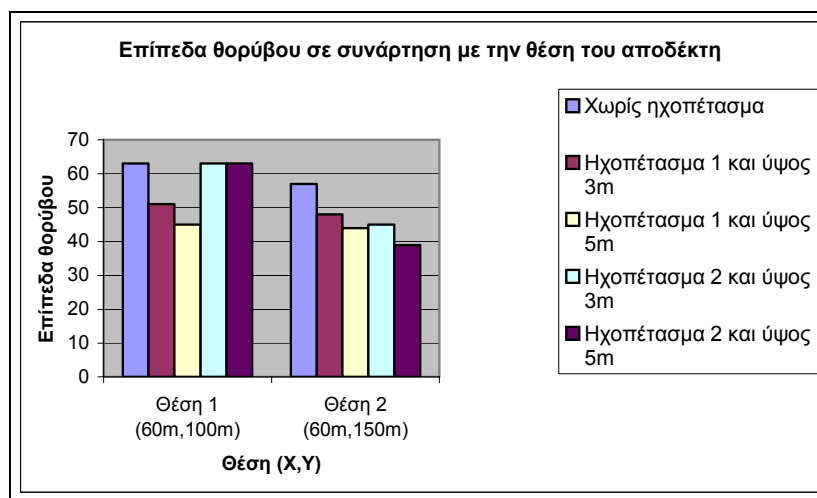


Σχήμα 7.7: Ισοθορυβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου με ηχοπέτασμα κοντά και μακριά από το δρόμο με ύψη 3m (Σχήμα α και γ) και 5m (Σχήμα β, δ).

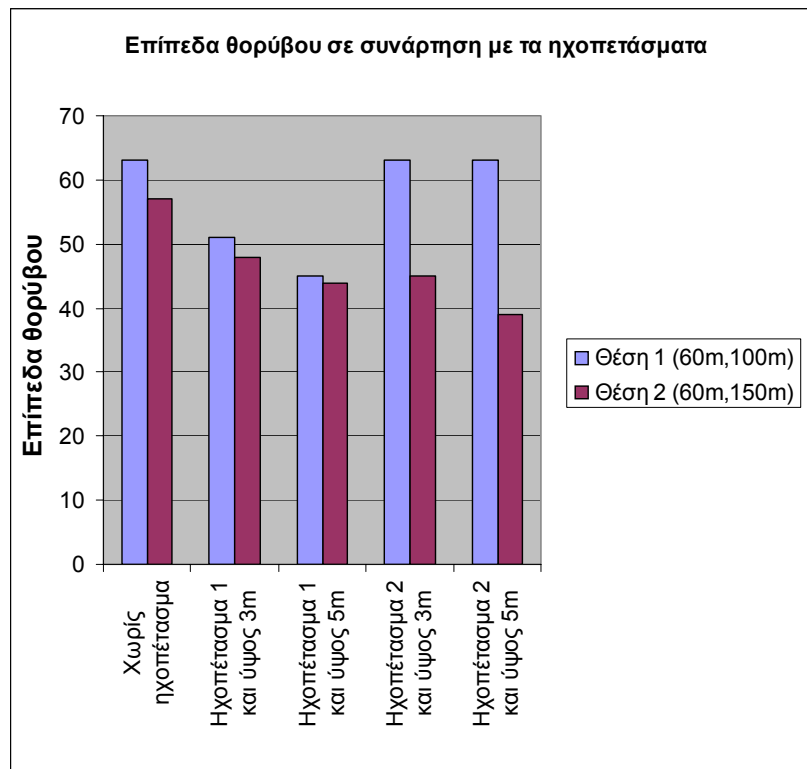
Τα αποτελέσματα των επίπεδων θορύβου στους αποδέκτες Θέση 1 και Θέση 2 δίνονται συνοπτικά στο **πίνακα 7.41** και παρουσιάζονται στα **σχήματα 7.8 και 7.9**.

Πίνακας 7.4: Συνοπτικός πίνακας από τα αποτελέσματα του θορύβου χωρίς και με ηχοπέτασμα.

Σχήμα	Περιγραφή	Θέση 1 ( $X_1, Y_1$ )≡(60m,100m)	Θέση 2 ( $X_2, Y_2$ )≡(60m,150m)
7.6	Βασικό μοντέλο χωρίς ηχοπέτασμα	63	57
7.7-α	Βασικό μοντέλο με ηχοπέτασμα 1 και ύψος 3m	51	48
7.7-β	Βασικό μοντέλο με ηχοπέτασμα 1 και ύψος 5m	45	44
7.7-γ	Βασικό μοντέλο με ηχοπέτασμα 2 και ύψος 3m	63	45
7.7-δ	Βασικό μοντέλο με ηχοπέτασμα 2 και ύψος 5m	63	39



Σχήμα 7.8: Επίπεδα θορύβου σε συνάρτηση με την θέση του αποδέκτη.



Σχήμα 7.9: Επίπεδα θορύβου σε συνάρτηση με τα ηχοπετάσματα.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μείωση λόγω απόστασης είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που δεν υπάρχει ηχοπέτασμα. Χωρίς ηχοπέτασμα η μείωση λόγω απόστασης είναι από 63 στα 56 dB(A), ενώ η μείωση λόγω απόστασης με το ηχοπέτασμα 1 για ύψος 3 m είναι από 51 στα 48 dB(A).
- Το ύψος του ηχοπετάσματος παίζει σημαντικότερο ρόλο όταν ο αποδέκτης είναι κοντά στο δρόμο, καθώς η κλίμακα των dB(A) είναι λογαριθμική. Κοντά στο δρόμο ηχοπέτασμα ύψους 3m και 5m μειώνει τα επίπεδα θορύβου κατά 12 και 18 dB(A). Μακριά από το δρόμο ηχοπέτασμα ύψους 3m και 5m μειώνει τα επίπεδα θορύβου κατά 9 και 13 dB(A).



## 7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΔΙΟΥ

Στις παραγράφους 7.1.1 έως 7.1.6, το πεδίο υπολογισμού ήταν ένα ομοιόμορφο πεδίο με βήμα 1m και αρκετά πυκνό έτσι ώστε να παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι μεταβολές των επιπέδων θορύβου στο πεδίο υπολογισμού.

Όπως φάνηκε όμως από τα αποτελέσματα των υπολογισμών οι μεταβολές στα επίπεδα θορύβου μειώνονται όσο ο αποδέκτης, δηλαδή το σημείο υπολογισμού, απομακρύνεται από τη γραμμική πηγή θορύβου του οδικού τμήματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι ένα πολύ πυκνό πεδίο μακριά από το δρόμο, δεν είναι απαραίτητο και βεβαίως επιβαρύνει γεωμετρικά το συνολικό χρόνο υπολογισμού των σημείων του πεδίου. Επίσης, είναι σύνηθες στην πράξη να εξετάζεται ένα οδικό τμήμα σε πολύ μεγάλο πεδίο υπολογισμού με αριθμό σημείων υπολογισμού που να απαιτεί ταχύτατους υπολογιστές και πολλές ώρες για την έκβαση των αποτελεσμάτων.

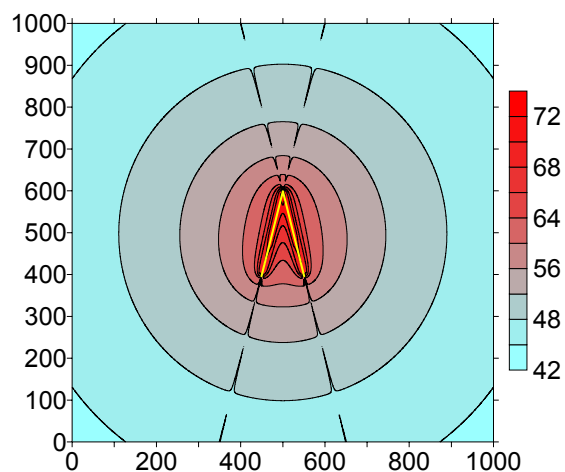
Για αυτούς τους λόγους, επιλέχθηκε ένα μοντέλο δρόμου, όπου οι μεταβολές στα επίπεδα θορύβου είναι πολύ έντονες κοντά στο οδικό τμήμα σε ένα πεδίο υπολογισμού συνολικής επιφάνειας 1 km<sup>2</sup>. Τα πεδία που εξετάστηκαν είναι τα παρακάτω:

- Ομοιόμορφο πεδίο με βήμα 1 m στους άξονες X και Y.
- Ένα μεταβλητό πεδίο το οποίο θα είναι πολύ πυκνό κοντά στο οδικό τμήμα με βήμα 1 m και βαθμιαία το βήμα θα αυξάνεται μέχρι τα 20 m σε συνάρτηση με την απόσταση μέχρι τα όρια του πεδίου.
- Ομοιόμορφο πεδίο με βήμα 20 m και στους δυο άξονες.

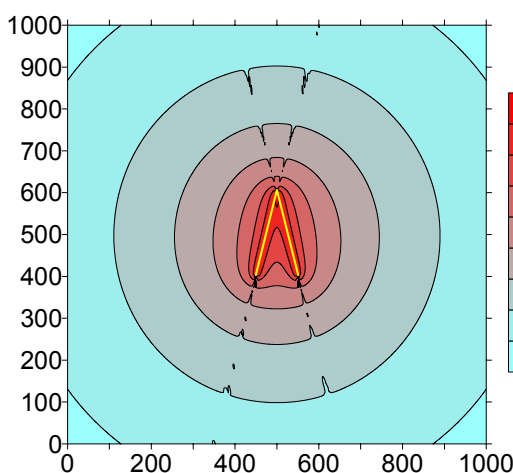
Πίνακας 7.5: Συνοπτικός πίνακας με τα δεδομένα εισόδου του παραπάνω μοντέλου

Κυκλοφοριακός φόρτος (18h)	4000		
Μέση ταχύτητα οχημάτων: (km/h)	75		
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	10%		
Ύψος Αποδέκτη (m)	1.8		
Στοιχεία δρόμου			
Αριθμός σημείου	Συντεταγμένες		
	X	Y	Z
0	450	400	0
1	500	600	0
2	550	400	0
Πεδίο 1			
Τύπος πεδίου:	Ομοιόμορφο		
Συντεταγμένες	X	Y	Z
Αρχικό σημείο	0	0	1.8
Τελικό σημείο	1000	1000	1.8
Βήμα	1	1	-
Πεδίο 2			
Τύπος πεδίου:	Μεταβλητό		
Συντεταγμένες	X	Y	Z
Αρχικό σημείο	0	0	1.8
Τελικό σημείο	1000	1000	1.8
Βήμα	1 έως 20	1 έως 20	-
Πεδίο 3			
Τύπος πεδίου:	Ομοιόμορφο		
Συντεταγμένες	X	Y	Z
Αρχικό σημείο	0	0	1.8
Τελικό σημείο	1000	1000	1.8
Βήμα	20	20	-

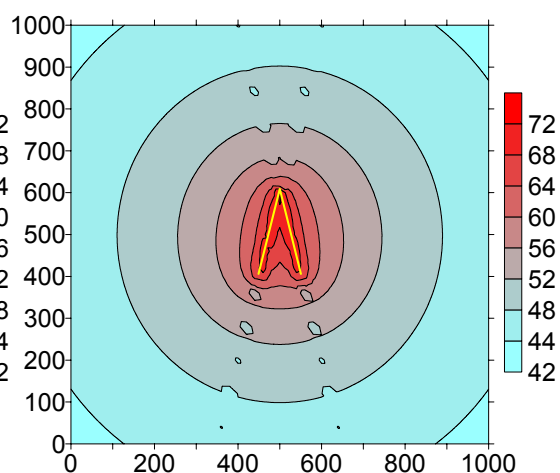
Το πλήθος των σημείων για το πεδίο 1  $N_i \times N_j$  είναι  $1001 \times 1001 = 1.002.001$  για το πεδίο 2 είναι  $201 \times 301 = 60.501$  και για το τρίτο πεδίο  $201 \times 201 = 40.401$ .



α) Πεδίο 1



β) Πεδίο 2



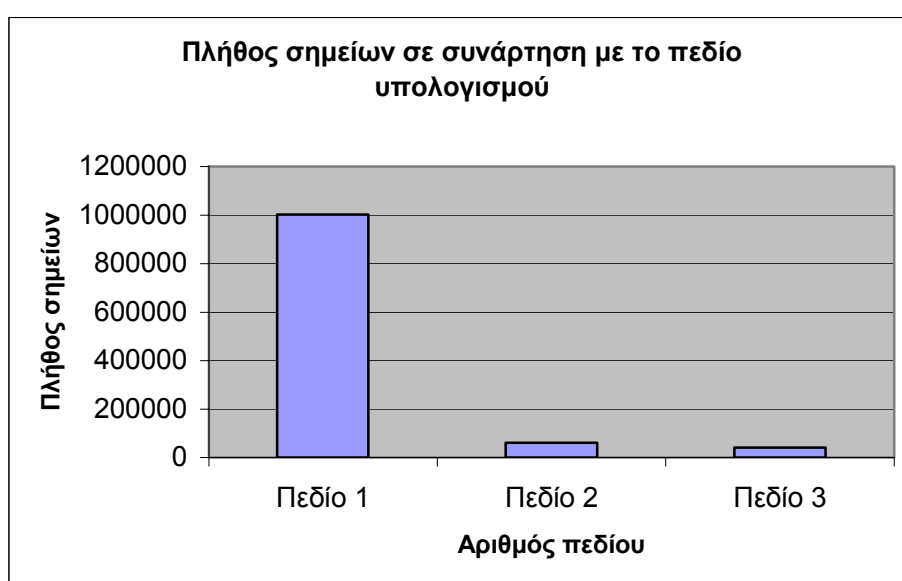
γ) Πεδίο 3

Σχήμα 7.10: Ισοθορυβικές καμπύλες μοντέλου δρόμου με α) ομοιόμορφο βήμα 1m β) μεταβλητό βήμα 1 έως 20m και γ) ομοιόμορφο βήμα 20m.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των γραφημάτων, το πεδίο 2 με το μεταβλητό βήμα παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα υπόλοιπα δυο πεδία. Και μάλιστα σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα και από το πολύ πυκνό πεδίο, το οποίο παρουσιάζει έντονες μεταβολές των επιπέδων θορύβου στα σημεία, όπου δεν ορίζονται οι εξισώσεις της βρετανικής μεθόδου.

Πέρα από τα γραφήματα, χρονικά ο υπολογισμός στο πεδίο 1 είναι συγκριτικά **16.5 φορές** αργότερος από το πεδίο 2, και αυτό με τη σειρά του μόλις 50% πιο αργό από το πεδίο 3.

Τελικά, το πεδίο 3 έχει το μικρότερο υπολογιστικό χρόνο, και βεβαίως με τα χειρότερα αποτελέσματα. Το πεδίο 2 με ελαφρώς περισσότερα σημεία υπολογισμού αλλά καλύτερα κατανεμημένα στο πεδίο, δίνει ποιοτικότερα αποτελέσματα και από το πεδίο 1 που έχει πολύ πυκνό πεδίο σε όλο το πεδίο.



Σχήμα 7.11: Πλήθος σημείων υπολογισμού σε συνάρτηση με το πεδίο.

Συμπερασματικά λοιπόν, η χρήση πεδίων μεταβλητού διαμερισμού για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου προτείνεται ως η καλύτερη λύση για την πληρέστερη παρουσίαση των επιπέδων θορύβου σε ένα πεδίο υπολογισμού με ισοθορυβικές καμπύλες και κυρίως για την περίπτωση μεγάλων πεδίων, καθώς στην περίπτωση αυτή ο χρόνος υπολογισμού μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Βεβαίως, το βέλτιστο εύρος του βήματος θα διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο δρόμου.

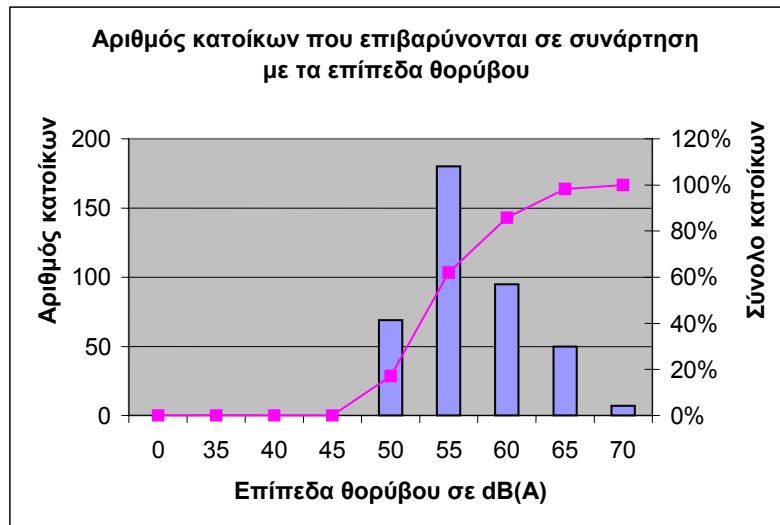
### 7.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω, μετά την εκτίμηση του θορύβου σε ένα πεδίο, υπολογίζεται ο αριθμός των κατοίκων που επιβαρύνεται για δεδομένη πυκνότητα πληθυσμού σε συγκεκριμένα διαστήματα επιπέδων θορύβου.

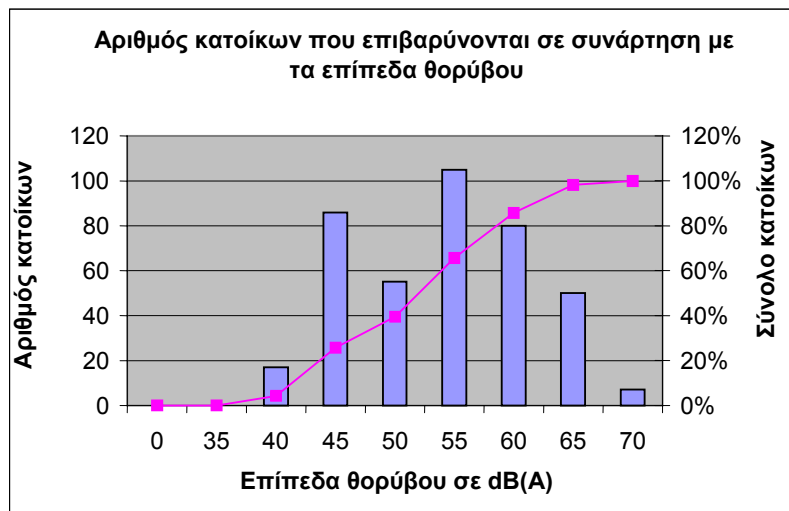
Στον **πίνακα 7.6** φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από την ανάλυση των επιπέδων θορύβου του βασικού μοντέλου που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 7.1 για την περίπτωση χωρίς ηχοπέτασμα και με ηχοπέτασμα, ενώ στα **σχήματα 7.12 και 7.13** φαίνεται σχηματικά η κατανομή των κατοίκων που επιβαρύνονται από συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου για τις παραπάνω περιπτώσεις.

Πίνακας 7.6 : Συνοπτικός πίνακας στατιστικών στοιχείων για την περίπτωση του παραδείγματος χωρίς και με ηχοπέτασμα.

Παράμετρος	Χωρίς ηχοπέτασμα	Με ηχοπέτασμα
Μέση τιμή	59,5	56,6
Διάμεσος	58,5	56,9
Τυπική απόκλιση	4,6	7,3
Διασπορά	21,2	53,8
Κύρτωση	-0,3	-0,9
Ασυμμετρία	0,7	0,01
Εύρος	24,6	29,7
Ελάχιστη τιμή	48,2	43,2
Μέγιστη	72,9	72,9
Αριθμός τιμών	2.403.906	40.401



Σχήμα 7.12: Γραφική απεικόνιση του αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται από το θόρυβο του οδικού τμήματος σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου εκφρασμένα σε  $L_{10}$  (18h) χωρίς ηχοπέτασμα.



Σχήμα 7.13: Γραφική απεικόνιση του αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται από το θόρυβο του οδικού τμήματος σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου εκφρασμένα σε  $L_{10}(18h)$  με ηχοπέτασμα.

Όπως φαίνεται τόσο από τον πίνακα 7.6, όσο και από το σχήμα 7.12 και σχήμα 7.13, η κατανομή των τιμών στο πεδίο εμφανίζει μια ελαφρά μετατόπιση προς τα δεξιά. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς η εξασθένιση του θορύβου αυξάνεται σε συνάρτηση

με την απόσταση και με συνεχώς μειούμενο ρυθμό. Επομένως, στο δεδομένο πεδίο υπολογισμού η συχνότητα εμφάνισης επιπέδων θορύβου, και επομένως ο αριθμός των κατοίκων με βάση τη δεδομένη πυκνότητα που επιβαρύνονται με θόρυβο κάτω των 40 dB(A), είναι σχεδόν μηδενική. Μηδενική είναι και η πιθανότητα εμφάνισης επιπέδων θορύβου, με βάση τα δεδομένα κυκλοφορίας, μεγαλύτερη από 75 dB(A). Επίσης, οι πιέσεις στο ακουστικό περιβάλλον του 50% των κατοίκων στο πεδίο υπολογισμού δεν ξεπερνά τα 50 dB(A), ενώ μόνο το 14% των κατοίκων στο πεδίο υπολογισμού επιβαρύνονται πάνω από τα 60 dB(A).

Αν θεωρήσουμε ότι πρόκειται να κατασκευαστεί ένας δρόμος με αυτά τα χαρακτηριστικά στην Ελλάδα, τότε με βάση την υπάρχουσα νομοθεσία τα επίπεδα θορύβου για νέους οδικούς άξονες δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 70 dB(A). Ο αριθμός των κατοίκων που επιβαρύνεται με επίπεδα θορύβου μεγαλύτερα από τα όρια της νομοθεσίας, είναι με βάση το γράφημα και την παραπάνω στατιστική επεξεργασία μόνο 7 άτομα, δηλαδή το 2% του πληθυσμού του πεδίου. Με δεδομένο ότι οι κατοικίες είναι συνήθως σε απόσταση τουλάχιστον 10 m από τον άξονα του δρόμου, μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι δε θα υπάρξει υπέρβαση του ορίου της νομοθεσίας και επομένως, δε θα είναι σημαντικές οι επιπτώσεις από το συγκεκριμένο δρόμο [Δ. Ασημακόπουλος και Γ. Αραμπατζής, 2002].

Επομένως, με τη βοήθεια του παραπάνω υπολογιστικού συστήματος, είναι δυνατό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην στρατηγική μείωσης του οδικού θορύβου.

## 8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στα κεφάλαια 6 και 7 έγινε αναφορά σε ένα βασικό μοντέλο δρόμου με τυπικές τιμές των παραμέτρων. Βεβαίως, με τη χρήση του παραπάνω υπολογιστικού συστήματος μπορούν να εκτιμηθούν τα επίπεδα θορύβου σε πλήθος άλλων περιπτώσεων.

Στην παρόν κεφάλαιο θα εκτιμηθούν τα επίπεδα θορύβου για ένα οδικό έργο στην Ελλάδα, το οποίο μελετήθηκε την περίοδο 2003-2004, ενώ προβλεπόταν να ολοκληρωθεί η κατασκευή του κατά το έτος 2005. Το έργο αυτό αφορά την βελτίωση του επαρχιακού δρόμου «ΟΔΟΣ ΚΑΝΑΒΑΡΙ-ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ- ΔΟΜΒΡΑΙΝΑ-ΚΟΡΥΝΗ-ΘΙΣΒΗ-ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ (ΜΕ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗ ΔΟΜΒΡΑΙΝΑΣ)», στον νομό Βοιωτίας. Στο **σχήμα 8.1** φαίνεται η γεωγραφική θέση του έργου.

Σχήμα 8.1: Γεωγραφική θέση του οδικού έργου



Τα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του μοντέλου υπολογισμού του θορύβου καθώς επίσης και οι χάρτες 1: 200.000 και 1:50.000 για αυτό το οδικό έργο προέρχονται από την αντίστοιχη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, η οποία συντάχθηκε από το γραφείο «Αργυρόπουλος & Συνεργάτες».

Στοιχεία παραδοχών και εισόδων υπολογισμού:

- Κυκλοφοριακός φόρτος : ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) σε οχήματα/έτος ΕΜΗΚ(2003)= 1000, ΕΜΗΚ (2005) = 1650 και ΕΜΗΚ (2020) = 2700
- Φόρτος βαρέων οχημάτων = 7.0% του συνολικού φόρτου σταθερά για όλα τα χρονικά σενάρια. Στα βαρέα οχήματα συμπεριλαμβάνονται και τα λεωφορεία αλλά όχι τα ημιφορτηγά.
- Ενιαίος μέσος ετήσιος ρυθμός κυκλοφοριακής αύξησης = 4 %.
- Ταχύτητα λειτουργίας 80 χλμ/ώρα, ενώ 40 χλμ/ώρα πριν την κατασκευή
- Φόρτος 18 ώρου (06:00-24:00) = 90% της ΕΜΗΚ (24ωρο) σταθερά για όλα τα χρονικά σενάρια (δυσμενής περιβαλλοντικά θεώρηση)
- Χωρισμός των τμημάτων: Η χάραξη τμηματοποιείται αρχικά έτσι ώστε κάθε υποτμήμα να είναι περίπου ευθύγραμμο και στην συνέχεια το υποτμήμα αυτό χωρίζεται αν είναι απαραίτητο σε επιμέρους τμήματα με ομοιόμορφη κλίση. Συνολικά μελετώνται 7 ευθύγραμμα υποτμήματα με σταθερή κλίση.
- Κλίση μηκοτομής: Από 0.2 έως 6.2% ανάλογα με την Χ.Θ.
- Τύπος οδοστρώματος : standard αντιολισθηρό και όχι ειδικό αντιθορυβικό
- Μηδενική επιπρόσθετη μείωση λόγω πυκνής βλάστησης
- Μηδενική επιπρόσθετη μείωση λόγω ισχυρών ανέμων

Στον **πίνακα 8.1** παρουσιάζονται συνοπτικά η σύνθεση της κυκλοφορίας για τα έτη 2005 και 2020.

Πίνακας 8.1: Φόρτος και Σύνθεση της κυκλοφορίας

Τύπος οχήματος	Ετος λειτουργίας 2005		Ετος 2020	
	Ποσοστό	ΕΜΗΚ (οχ/d)	Ποσοστό	ΕΜΗΚ (οχ/d)
Επιβατικά	75%	1240	75%	2030
Ελαφρά diesel	15%	120	15%	190
Βαριά diesel	7%	250	7%	410
Δίκυκλα	3%	50	3%	80
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>100</b>	<b>1650</b>	<b>100</b>	<b>2700</b>

Χωρισμός οδού σε τμήματα. Από το σύνολο του οδικού έργου, επιλέχθηκε το τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας. (ΧΘ 28+000 έως ΧΘ 33+700).

Στον **πίνακα 8-2** παρουσιάζονται τα ευθύγραμμα τμήματα στα οποία χωρίστηκε το υφιστάμενο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας, ενώ στο **πίνακα 8-3** παρουσιάζονται τα ευθύγραμμα τμήματα στα οποία χωρίστηκε η νέα χάραξη.

Πίνακας 8.2 : Συνοπτικός πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου οδικού τμήματος

Σημείο	X	Y
0	3.9059	1978.5536
1	455.0570	1963.0029
2	615.8120	2051.1235
3	833.6091	2009.6549
4	1565.1597	2401.0800
5	1624.0309	2552.0367
6	1670.1040	2592.9741
7	1785.2866	2608.3257
8	1954.2213	2575.0640
9	2048.9271	2500.8650
10	2433.7795	2362.7974
11	2666.7046	2101.8215

12	2815.9886	2088.9104
13	2913.2540	2145.1993
14	3372.1077	2181.0326
15	3756.0501	2262.9075
16	4204.8828	2411.4936
17	4399.4136	2570.1261
18	4518.1361	2660.1883

Πίνακας 8.3: Συνοπτικός πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη οδικού τμήματος

Σημείο	X	Y	Z
0	308.589	1806.2001	116.46
1	764.6109	1490.6988	117.82
2	1910.5123	1420.5874	120.32
3	2682.2417	1093.401	119.8
4	3266.8852	1116.7715	126.27
5	3687.8286	1233.6238	147.89
6	3624.9375	1975.6394	187.34
7	4508.0651	2510.5702	181.98

Πεδίο Υπολογισμού: Για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου θεωρήθηκε ένα μεταβλητό πεδίο 4.520 χ 2620 με βήμα πλέγματος από 1 έως 20m

Το πεδίο υπολογισμού των επιπέδων θορύβου όπως και ο χωρισμός της οδού σε τμήματα δίνεται στο **σχήμα 8.2**.

Τα υπολογισμένα επίπεδα θορύβου σε όλο το πεδίο υπολογισμού με βάση το υπολογιστικό σύστημα δίνονται με τη βοήθεια των ισοθροβικών καμπυλών.

Σχήμα 8.2: Πεδίο υπολογισμού των επιπέδων θορύβου στο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας

Σχήμα 8.3: Ισοθορυβικές καμπύλες για το παλαιό οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας. Έτος 2003

Σχήμα 8.4: Ισορουβικές καμπύλες για το νέο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας.  
Έτος 2005.

Σχήμα 8.5: Ισορουβικές καμπύλες για το νέο οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας.  
Έτος 2020.

Όπως φαίνεται και από τα **σχήματα 8.3 έως 8.5** τα επίπεδα θορύβου σε απόσταση 10m από τον άξονα του υφιστάμενου δρόμου είναι 56 dB(A) για το έτος 2003. Μετά την ολοκλήρωση του έργου, τα επίπεδα θορύβου, στα όρια του οικισμού και σε απόσταση 250 m από τον άξονα του οδικού έργου θα είναι 52 dB(A) για έτος 2005 και 54 dB(A), για το έτος 2020, λόγω της ετήσιας αύξησης κατά 4% του κυκλοφοριακού φόρτου.

Επομένως, η κατασκευή του νέου οδικού έργου σε αυτό το οδικό τμήμα παράκαμψης Δομβραΐνας, θα έχει θετική επίπτωση στο ακουστικό περιβάλλον των κατοίκων του οικισμού, καθώς ακόμα και στην δυσμενέστερη περίπτωση (Έτος 2020) τα υπολογιζόμενα επίπεδα θορύβου θα είναι μειωμένα κατά 2dB(A) σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Συνολικά, και στις τρεις περιπτώσεις τα επίπεδα θορύβου υπολογίζονται αρκετά μικρότερα από τα 70 dB(A) που έχει θέσει η νομοθεσία ως όριο για νέους δρόμους.

Συμπερασματικά, τα επίπεδα θορύβου δεν θα ξεπεράσουν τα όρια της νομοθεσίας, και επομένως δεν απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για τη λήψη ιδιαίτερων μέτρων (όπως ηχοπετάσματα) [Δ. Αργυρόπουλος, 2004].

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του προβλήματος του οδικού θορύβου, την εκτίμηση, τις επιπτώσεις και τα μέτρα για την αντιμετώπιση του.

Για τον υπολογισμό του θορύβου εξετάστηκαν 5 μοντέλα:

- Το αμερικάνικο μοντέλο πρόβλεψης θορύβου, *FHWA*, και η βελτιωμένη έκδοση του
- Η βρετανική μέθοδος, *CRTN*
- Το γερμανικό μοντέλο, *RLS-90*
- Το σουηδικό μοντέλο, *STL-86* και
- Το ιαπωνικό μοντέλο, *ASJ- 1993*

Η επιλογή του κατάλληλου για την περαιτέρω ανάλυση μοντέλου έγινε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Δεδομένα Εισόδου
- Αξιοπιστία
- Αποτελέσματα
- Αναγνώριση

Από την ανάλυση των παραπάνω κριτηρίων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Από το σύνολο των μοντέλων η βρετανική μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος περιπτώσεων, καθώς έχει μεγάλο εύρος ισχύος, χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερα δεδομένα εισόδου πέρα από τις βασικές παραμέτρους του δρόμου και του περιβάλλοντα χώρου.

- Ως προς την αξιοπιστία τους, όλα τα παραπάνω μοντέλα, μέσα στο εύρος εφαρμογής τους, έχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με αποκλίσεις, βέβαια, από τις πειραματικές τιμές.
- Μόνο το βρετανικό μοντέλο δίνει αποτελέσματα στάθμης, που ξεπερνιέται στο 10% των περιπτώσεων.
- Η βρετανική μέθοδος είναι η μόνη που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και είναι αναγνωρισμένη από το σύνολο των μελετητών, ακουστικών, άλλων ειδικών επιστημόνων και από τις κατά τόπους υπηρεσίες περιβάλλοντος της Ελλάδας.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου σε πεδίο ομοιόμορφου ή μεταβλητού διαμερισμού, ήταν η νεότερη έκδοση του βρετανικού μοντέλου, καθώς αποτελεί μια μέθοδος απλή, εφαρμόσιμη για πλήθος περιπτώσεων, αξιόπιστη και βεβαίως αναγνωρίσιμη.

Στη συνέχεια επεκτάθηκε η βρετανική μέθοδος για να εφαρμοστεί σε επιφάνεια δυο διαστάσεων. Τα κυριότερα θέματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Διαχωρισμός του πεδίου σε φωτεινή ζώνη και ζώνη σκιών.
- Μερική κάλυψη του οδικού τμήματος από το ηχοπέτασμα. Αναλύθηκαν τρεις περιπτώσεις ως προς τη θέση του αποδέκτη.
- Περιστροφή του μη παράλληλου ηχοπετάσματος, έτσι ώστε να προκύψει ισοδύναμο ηχοπέτασμα παράλληλο στο οδικό τμήμα. Για την περιστροφή του εφαρμόστηκε η τεχνική των σημείων τομής, ενώ για την περίπτωση των προβληματικών περιοχών, χρησιμοποιήθηκε το αντιδιαμετρικό σημείο.
- Εφαρμογή της βρετανικής μεθόδου των πολλαπλών παράλληλων ηχοπετασμάτων στην περίπτωση των παράλληλων σε ένα δρόμο ηχοπετασμάτων.



- Για τη δημιουργία του μεταβλητού διαμερισμού επιλέχθηκε μια αλγεβρική μέθοδος, που βασίζεται σε λογαριθμικές συναρτήσεις με δυνατότητα πύκνωσης είτε κοντά στο αριστερό είτε στο δεξί είτε και στα δυο όρια του πεδίου. Η πύκνωση επιλέχθηκε κοντά στο δρόμο, όπου οι μεταβολές των επιπέδων θορύβου είναι πιο έντονες.

Για την εκτίμηση του αριθμού των κατοίκων που επιβαρύνονται σε συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου θεωρήθηκε ότι στο πεδίο υπολογισμού υπάρχει συγκεκριμένη πυκνότητα πληθυσμού και στη συνέχεια υπολογίστηκε το ποσοστό των σημείων για δεδομένα διαστήματα επιπέδων θορύβου.

Με βάση την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα για τις μεταβολές των υπολογιζόμενων επιπέδων θορύβου σε απόσταση 10m από τον άξονα του δρόμου. Έτσι τα επίπεδα θορύβου:

- Αυξάνονται λογαριθμικά με το κυκλοφοριακό φόρτο. Αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου από 1.000 σε 50.000 οχήματα/18h αυξάνει τα επίπεδα θορύβου κατά 19dB(A).
- Μειώνονται με το ύψος του αποδέκτη. Αύξηση του ύψους από 1 σε 20 m μειώνει τα επίπεδα θορύβου κατά 2,5 dB(A).
- Μεταβάλλονται με την ταχύτητα. Μειώνονται από τα 20 έως τα 30 km/h και στη συνέχεια αυξάνονται συνεχώς μέχρι τα 120 km/h. Αύξηση της ταχύτητας από 20 σε 120 km/h αυξάνει τα επίπεδα θορύβου κατά 4 dB(A).
- Αυξάνονται με συνεχώς μειούμενο ρυθμό σε σχέση με το ποσοστό των βαρέων οχημάτων. Αύξηση του ποσοστού των βαρέων οχημάτων από 0 σε 30% αυξάνει τα επίπεδα θορύβου κατά 5 dB(A).
- Αυξάνονται γραμμικά σε σχέση με την κλίση του δρόμου. Αύξηση της κλίσης του δρόμου από 0 σε 20% αυξάνει τα επίπεδα θορύβου κατά 4,5 dB(A).

Για την περίπτωση που στο πεδίο υπάρχει ηχοπέτασμα, η μείωση λόγω απόστασης είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που δεν υπάρχει ηχοπέτασμα. Για το συγκεκριμένο μοντέλο που αναλύθηκε, η μείωση λόγω απόστασης είναι από 63 στα 56 dB(A), ενώ η μείωση λόγω απόστασης με το ηχοπέτασμα που είναι κοντά στο δρόμο για ύψος 3 m είναι από 51 στα 48 dB(A).

Το ύψος του ηχοπετάσματος παίζει σημαντικότερο ρόλο όταν ο αποδέκτης είναι κοντά στο δρόμο, καθώς η κλίμακα των dB(A) είναι λογαριθμική. Κοντά στο δρόμο ηχοπέτασμα ύψους 3 m και 5 m μειώνει τα επίπεδα θορύβου κατά 12 και 18 dB(A) (από 63 σε 51 και 45, αντίστοιχα). Μακριά από το δρόμο ηχοπέτασμα ύψους 3 m και 5m μειώνει τα επίπεδα θορύβου κατά 9 και 13 dB(A). (από 57 σε 48 και 44 dB(A), αντίστοιχα).

Από την ανάλυση ευαισθησίας του πεδίου προκύπτει ότι η χρήση του μεταβλητού διαμερισμού μπορεί να εφαρμοστεί και για την εκτίμηση των επιπέδων θορύβου με σημαντική μείωση του χρόνου υπολογισμού, ενώ δίνει η μέθοδος αυτή και ποιοτικότερα αποτελέσματα.

Με βάση την στατιστική επεξεργασία του πεδίου για το μοντέλο προσομοίωσης με και χωρίς ηχοπέτασμα, οι επιπτώσεις στην κατανομή του πληθυσμού σε συνάρτηση με τα επίπεδα θορύβου, από το ηχοπέτασμα οδηγεί στη μείωση της μέσης τιμής κατά 2dB(A), την αύξηση της τυπικής απόκλισης κατά 3 dB(A) και τη μείωση της ασυμμετρίας για το συγκεκριμένο μοντέλου προσομοίωσης.

Τέλος, με τη βοήθεια του υπολογιστικού συστήματος, εκτιμήθηκαν τα επίπεδα θορύβου για το οδικό έργο «ΟΔΟΣ ΚΑΝΑΒΑΡΙ-ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ- ΔΟΜΒΡΑΙΝΑ-ΚΟΡΥΝΗ-ΘΙΣΒΗ-ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ (ΜΕ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗ ΔΟΜΒΡΑΙΝΑΣ)», στο νομό Βοιωτίας πριν και μετά την κατασκευή του δρόμου. Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τα προβλεπόμενα επίπεδα θορύβου για τα έτη

2005 και 2020, εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις στον άνθρωπο και αξιολογήθηκε το έργο σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson GS, Menge CW, Rossano CF, Armstrong RE, Ronning SA, Fleming GG, Lee FHWA traffic Noise model, version 1: Introduction to its capacities and screen components. The Wall Journal 1996; 22: 14-17
- Cambell Steele “A critical review of some traffic noise prediction models”, Applied Acoustics, 2000
- Department of the Environment and Welsh Office “Calculation of road traffic noise”. London: United Kingdom Joint Publication/HMSO, 1975
- EMPA. Modele de calcul de bruit du traffic routier pour ordinateur, 1ere partie: manuel d’ utilisation du logiciel STL-86 Berne: version 1.0 Office federal de la protection de l’ environnement, 1987
- Environmental Protection Department of Hong Kong “Guidelines on design of Noise” Barriers, 2001
- Federal Highway Administration National Technical Information Service, “Traffic noise prediction model US Washington”: Department of Transportation, , 1978
- Koyasu M. Method of Prediction and Control of road traffic noise in Japan. Inter-noise 94, Yokohama, 1994
- Peric M “A finite Volume Method for the prediction of Three- Dimensional fluid flow in complex ducts, Phd Thesis, University of London, pp 154-156,1985
- United Kingdom Department of Transport and Welsh Office “Calculation of Road Traffic Noise”, London:, 1988
- Α.Π 17252/1992 του ΥΠΕΧΩΔΕ «Καθορισμός δεικτών και ανωτάτων επιτρεπομένων ορίων θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία σε οδικά και συγκοινωνιακά έργα»

- Αργυρόπουλος Δ., «Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το οδικό έργο Θεσπιαία- Λεοντάριον- Δομβραΐνα, Πρόδρομος», 2004
- Ασημακόπουλος Δ., Γρηγοροπούλου Ε., «Ανάλυση Περιβαλλοντικών συστημάτων- Επιπτώσεις», ΕΜΠ, 2002
- Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ., «Τεχνικές Ανάλυσης Δεδομένων και λήψης αποφάσεων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2002

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

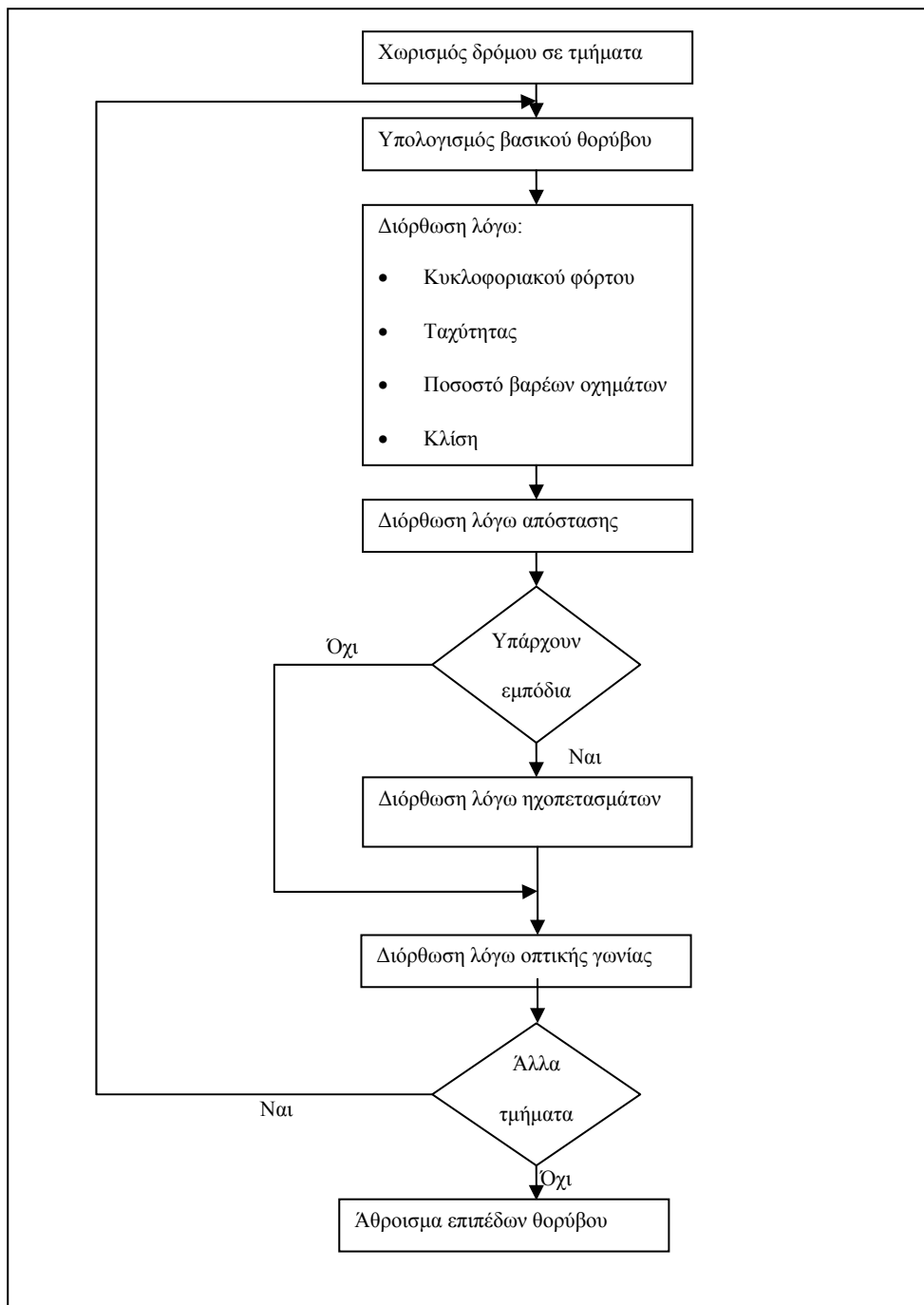
---

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ (CRTN)

Η βρετανική μέθοδος υπολογισμού του θορύβου κυκλοφορίας σε ένα σημείο αποδέκτη πραγματοποιείται σε 5 βασικά στάδια:

1. Διαιρείται το οδικό σχέδιο σε ένα ή περισσότερα τμήματα έτσι ώστε η μεταβολή του θορύβου μέσα στο τμήμα να είναι μικρή.
2. Υπολογίζεται το βασικό επίπεδο θορύβου σε μια απόσταση αναφοράς 10 μέτρων μακριά από την αριστερή άκρη του οδοστρώματος για κάθε υπό-τμήμα.
3. Αξιολογείται για κάθε τμήμα το επίπεδο θορύβου στο σημείο του αποδέκτη λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση λόγω απόστασης.
4. Διορθώνεται το επίπεδο θορύβου στο σημείο του αποδέκτη για να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα τοπογραφικού της περιοχής και το μέγεθος του τμήματος της γραμμικής πηγής
5. Συνδυάζονται οι συνεισφορές από όλα τα τμήματα για να προκύψει το επιθυμητό επίπεδο θορύβου στο σημείο του αποδέκτη για ολόκληρο το οδικό σχέδιο.

Τα ανωτέρω βήματα παρουσιάζονται διαγραμματικά στο σχήμα Π.1.



Σχήμα Π.1: Απεικόνιση του διαγράμματος ροής για την πρόβλεψη του οδικού θορύβου



### **Χωρισμός του οδικού σχεδίου στα επί μέρους τμήματα**

Εάν τα επίπεδα θορύβου ποικίλλουν σημαντικά κατά μήκος του δρόμου, ο δρόμος διαιρείται σε μικρότερο αριθμό χωριστών τμημάτων έτσι ώστε μέσα σε οποιοδήποτε τμήμα η μεταβολή των επιπέδων θορύβου να είναι μικρότερη από 2 dB(A). Κάθε τμήμα αντιμετωπίζεται ως χωριστή πηγή θορύβου και η συμβολή της καθορίζεται αναλόγως.

### **Υπολογισμός βασικής στάθμης θορύβου**

Το βασικό ωριαίο επίπεδο θορύβου εκτιμάται σε απόσταση 10 m από την άκρη του οδοστρώματος σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$L_{10}(1h) = 42.2 + 10 \log q, dBA \quad (\text{Π.1})$$

και το βασικό επίπεδο θορύβου 18-h

$$L_{10}(18h) = 29.1 + 10 \log Q, dBA \quad (\text{Π.2})$$

Όπου,

$q$  ωριαία κυκλοφοριακή ροή (οχήματα/ώρα)

$Q$  κυκλοφοριακή ροή 18-ωρου (οχήματα/ώρα)

Εδώ θεωρείται ότι η βασική ταχύτητα είναι  $V = 75$  km/h, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων  $p = 0$  και κλίση  $G = 0\%$ , Επίσης θεωρείται ότι η γραμμική πηγή είναι 3,5 m από την άκρη του δρόμου για τα οδοστρώματα που απέχουν λιγότερο από 5,0 m.

Σε περιπτώσεις όπου τα δύο οδοστρώματα απέχουν απόσταση μεγαλύτερη από 5,0 m ή όπου τα ύψη των εξωτερικών ακρών των δύο οδοστρωμάτων διαφέρουν περισσότερο από 1,0 m, το επίπεδο θορύβου που παράγεται από κάθε ένα από τα δύο οδοστρώματα αξιολογείται χωριστά και συνδυάζεται έπειτα χρησιμοποιώντας την εξίσωση **(Π.10)**.

Στην περίπτωση του μακρινού οδοστρώματος η γραμμική πηγή θεωρείται ότι είναι

3,5m από το μακρινό κράσπεδο και η αποτελεσματική άκρη του οδοστρώματος που χρησιμοποιείται στη διόρθωση απόστασης είναι 3,5 m πλησιέστερα από αυτό, δηλ. 7,0m από την άκρη του μακρύτερου οδοστρώματος.

Αν η ροή είναι μικρότερη από 200 οχήματα την ώρα ή 4000 οχήματα ανά 18 ώρο τότε λαμβάνεται η διόρθωση χαμηλής ταχύτητας K

$$K = -16.6(\log D)(\log C)^2 \quad (\text{Π.3})$$

$$\text{Όπου, } D = \frac{30}{d'} \text{ και } C = \frac{q}{200} \text{ ή } C = \frac{Q}{4000}$$

Η διόρθωση ισχύει μόνο για μικρές ροές και για απόσταση  $d' < 30$ .

**Διόρθωση για τη μέση ταχύτητα κυκλοφορίας, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων και την κλίση**

Η διόρθωση για το ποσοστό των βαρέων οχημάτων και της ταχύτητας κυκλοφορίας καθορίζεται από τους ακόλουθους τύπους.

$$\Delta_{pV} = 33 \log \left( V + 40 + \frac{500}{V} \right) + 10 \log \left( 1 + \frac{5p}{V} \right) - 68.8, dBA \quad (\text{Π.4})$$

Σε αυτήν την σχέση το ποσοστό των βαριών οχημάτων δίνεται

$$p = \frac{100f}{q} = \frac{100F}{Q} \quad (\text{Π.5})$$

Όπου,

$f$  ωριαίες ροές των βαρέων οχημάτων

$F$  18-ώρου ροές των βαρέων οχημάτων

Η εξίσωση (Π.2) εφαρμόζεται στα βασικά ωριαία ή επίπεδα 18-ώρου. Η τιμή του  $V$  που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (Π.2) εξαρτάται από το εάν ο δρόμος είναι επίπεδος ή έχει κλίση.

Για τους δρόμους με κλίση οι ταχύτητες είναι μειωμένες από τις τιμές που δίνονται από την ταχύτητα μελέτης του δρόμου. Έτσι τελικά η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα κυκλοφορίας υπολογίζεται από την ταχύτητα μελέτης αφαιρώντας την  $\Delta V$  που δίνεται στην εξίσωση Π.6. που εξαρτάται από το ποσοστό της κλίσης και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.

$$\Delta V = \left[ 0.73 + \left( 2.3 - \frac{1.15p}{100} \right) \frac{p}{100} \right] G, km/h \quad (\text{Π.6})$$

όπου το  $G$  είναι η κλίση που εκφράζεται ως ποσοστό.

#### Διόρθωση λόγω απόστασης

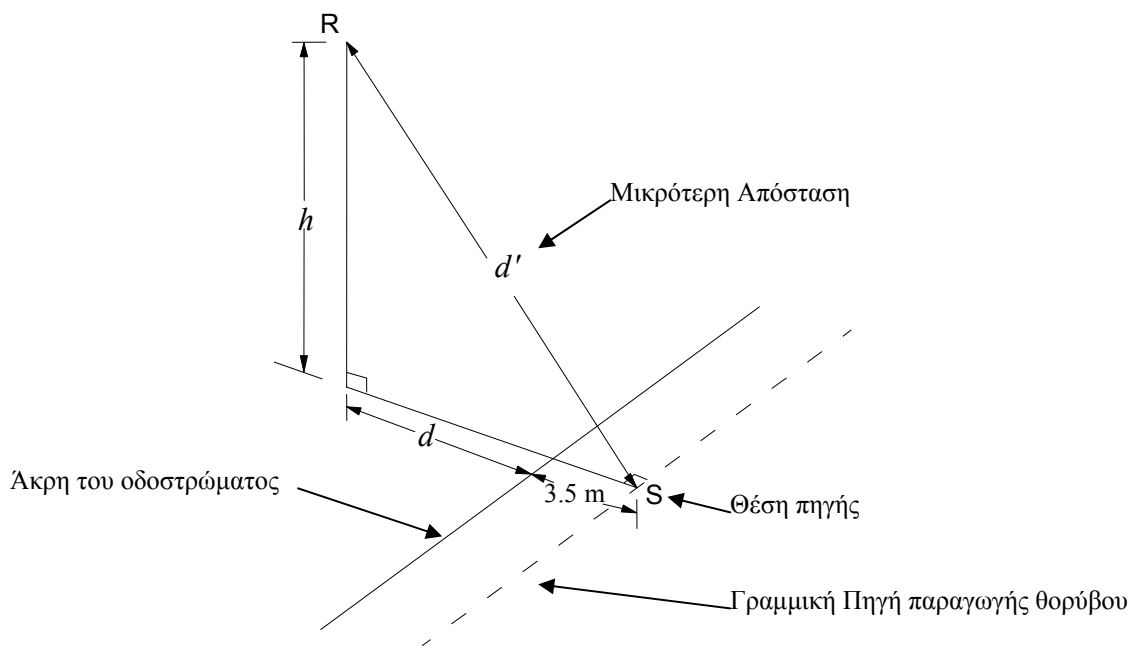
Για αποδέκτες που βρίσκονται σε αποστάσεις  $d > 4,0$  m από την άκρη του κοντινότερου οδοστρώματος, η διόρθωση λόγω απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta_d = 10 \log \left( \frac{d'}{13.5} \right), dBA \quad (\text{Π.7})$$

Όπου  $d'$  είναι η κοντινότερη απόσταση μεταξύ αποδέκτη και πηγής θορύβου και υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$d' = \sqrt{h^2 + (d + 3.5)^2} \quad (\text{Π.8})$$

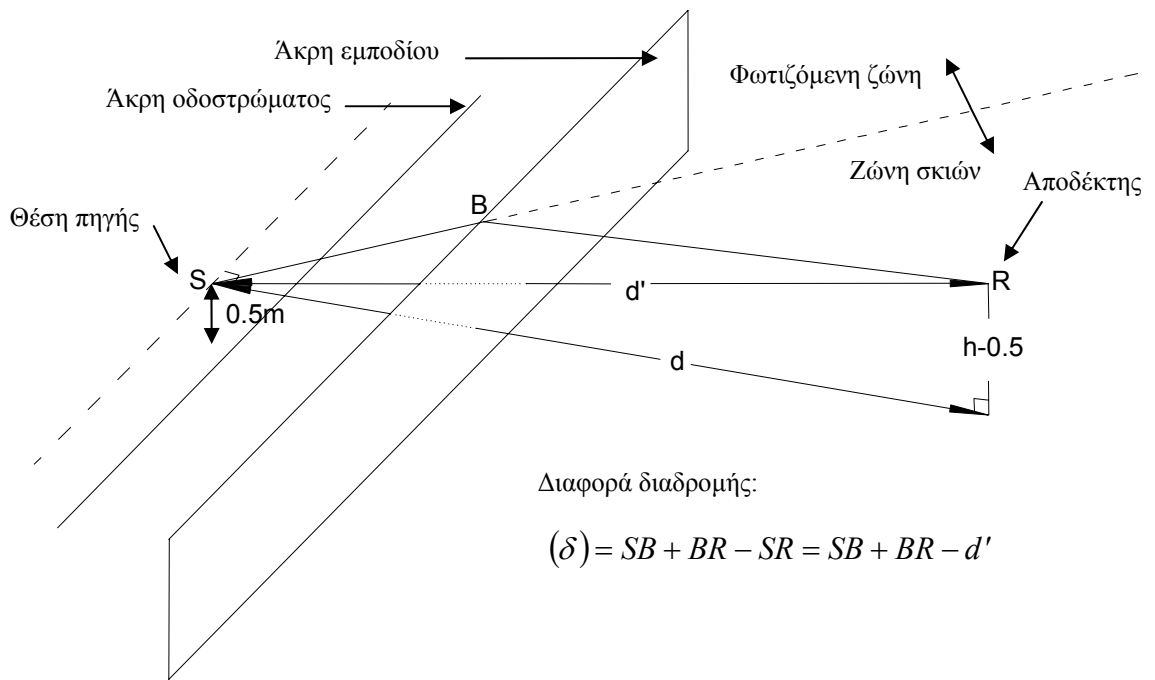
Στο **σχήμα Π.2** απεικονίζονται σχηματικά οι αποστάσεις  $d$  και  $d'$  από τον αποδέκτη και τη γραμμική πηγή του οδοστρώματος. Πρέπει να τονιστεί ότι ως πηγή θορύβου κυκλοφορίας λαμβάνεται μια γραμμή 0,5 m επάνω από το επίπεδο του οδοστρώματος και 3,5 m από την άκρη του δρόμου.



Σχήμα Π.2 Μια απεικόνιση της πιο σύντομης απόστασης μεταξύ ενός σημείου αποδέκτη και μιας γραμμικής πηγής που αντιπροσωπεύουν μια ροή κυκλοφορίας.

### Διάδοση με εμπόδια

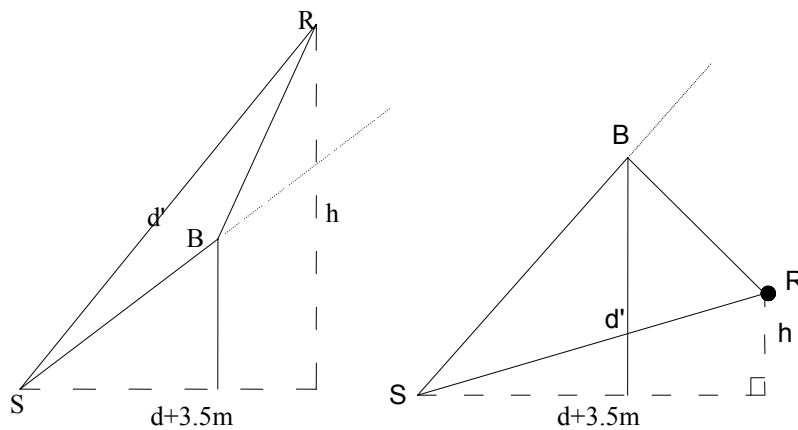
Η επίδραση των εμποδίων όπως τα κτήρια, οι τοίχοι, τα ηχοπετάσματα, κ.λπ. πρέπει να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό του θορύβου. Ο βαθμός επίδρασης εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις της πηγής S, του αποδέκτη R και του σημείου B, όπου περιθλάται το κύμα στην άκρη του εμποδίου. Η περιοχή μεταξύ του εμποδίου και του αποδέκτη διαιρείται σε φωτισμένη ζώνη και ζώνη σκιών επεκτείνοντας τη νοητή γραμμή SB όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο βαθμός επίδρασης υπολογίζεται από τη διαφορά της πορείας SBR και της ακτινικής πορείας SR.



Σχήμα Π.3 : Υπολογισμός της διαδρομής του κύματος

**A) Φωτισμένη ζώνη**

**B) Ζώνη Σκιών**



Διαφορά διαδρομής:  $(\delta) = SB + BR - d'$

Σχήμα Π.4: Ανεξάρτητα από τη ζώνη η διαφορά διαδρομής  $\delta$  προκύπτει από την ίδια βασική σχέση

Η διαφορά διαδρομής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διόρθωσης λόγω πιθανού εμποδίου, με βάση τη σχέση:

$$A = \sum_{i=0}^n A_i x^i, dBA \quad (\text{Π.8})$$

Όπου,

$$x = \log_{10} \delta,$$

$A_i$  συντελεστές πολυωνυμικής εξίσωσης

και οι τιμές  $n$  και για τις 2 ζώνες δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας Π.1: Συντελεστές για την εκτίμηση της διόρθωσης λόγω εμποδίου

	<b>Ζώνη Σκιών</b>	<b>Φωτισμένη Ζώνη</b>
A0	- 15.4	0
A1	- 8.26	+0.109
A2	-2.787	-0.815
A3	-0.831	+0.479
A4	- 0.198	+0.3284
A5	+0.1539	+0.04385
A6	+0.12248	0
A7	+ 0.02175	0

Εκτός των ορίων οι διορθώσεις καθορίζονται ως εξής:

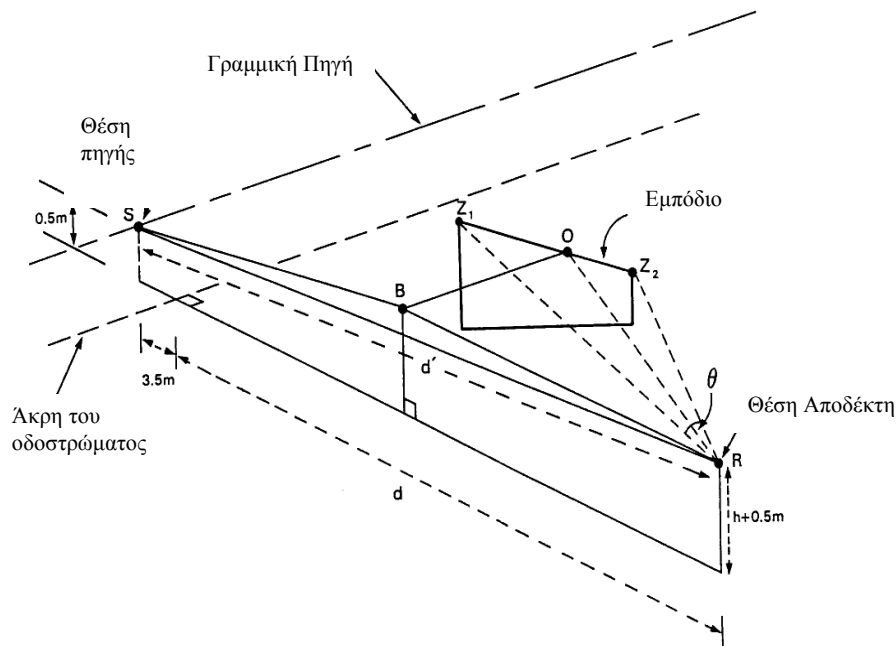
Πίνακας Π.2: Συντελεστές για την εκτίμηση της διόρθωσης λόγω εμποδίου ανάλογα με την περίπτωση

<b>Ζώνη Σκιών</b>	<b>Φωτισμένη Ζώνη</b>
Για $x < -3$ , $A = -5.0$	Για $x < -4$ , $A = -5.0$
Για $x > 1.2$ , $A = -30$	Για $x > 0$ , $A = 0$

Εάν το εμπόδιο είναι μη παράλληλο στη γραμμική πηγή τότε η πιθανή διόρθωση θα ποικίλει κατά μήκος εμποδίου.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το ηχοπέτασμα είναι παράλληλο με το οδικό τμήμα. Ωστόσο, με τη βρετανική μέθοδο μπορούν να αντιμετωπιστούν εμπόδια, όχι κατ' ανάγκη ηχοπετάσματα, όπως κτήρια τα οποία είναι αρκετά σύνηθες να είναι διαφορετικής διεύθυνσης από τη διεύθυνση του οδικού τμήματος. Στην περίπτωση αυτή, με βάση τη μέθοδο θα πρέπει να υπολογιστεί η γωνία  $\theta$ , που σχηματίζεται με τον αποδέκτη R. Η διχοτόμος της γωνίας αυτής κόβει το επάνω μέρος της άκρης του εμποδίου Z1 και Z2 στο σημείο O. Η γεωμετρική θέση του ζητούμενου σημείου B, είναι το σημείο συνάντησης της νοητής γραμμής SR μεταξύ του σημείου S και του αποδέκτη R με μια γραμμή παράλληλη στη γραμμική πηγή, η οποία περνά από το O. Στη συνέχεια, η διόρθωση υπολογίζεται όπως και στην περίπτωση των παράλληλων ηχοπετασμάτων με βάση τη διαφορά διαδρομής.

Για διαφορά διαδρομής  $\delta = SB + BR - SR$ , η τιμή της διόρθωσης προκύπτει από την ίδια σχέση όπως και για παράλληλο εμπόδιο.



Σχήμα Π.5: Υπολογισμός της διαδρομής  $\delta$  στην περίπτωση που το εμπόδιο δεν είναι παράλληλο με το δρόμο

### Πολλαπλά εμπόδια

Με τη βρετανική μέθοδος υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού διόρθωσης ακόμα και στην περίπτωση πολλαπλών εμποδίων. Όταν παρεμβάλλεται παραπάνω από ένα εμπόδιο μεταξύ της πηγής και του αποδέκτη ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια:

1. Όπου είναι δυνατόν, χωρίζεται ο δρόμος σε τμήματα με ένα και πολλαπλά εμπόδια.
2. Για κάθε τμήμα υπολογίζεται το βασικό επίπεδο θορύβου και λαμβάνονται υπόψη οι διορθώσεις λόγω απόστασης.
3. Για τα τμήματα που έχουν ένα εμπόδιο γίνονται οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.
4. Για τμήματα που έχουν διπλό εμπόδιο υπολογίζεται η διόρθωση λόγω εμποδίου από το καθένα από αυτά και στην συνέχεια συνδυάζεται η διόρθωση με βάση την παρακάτω εξίσωση

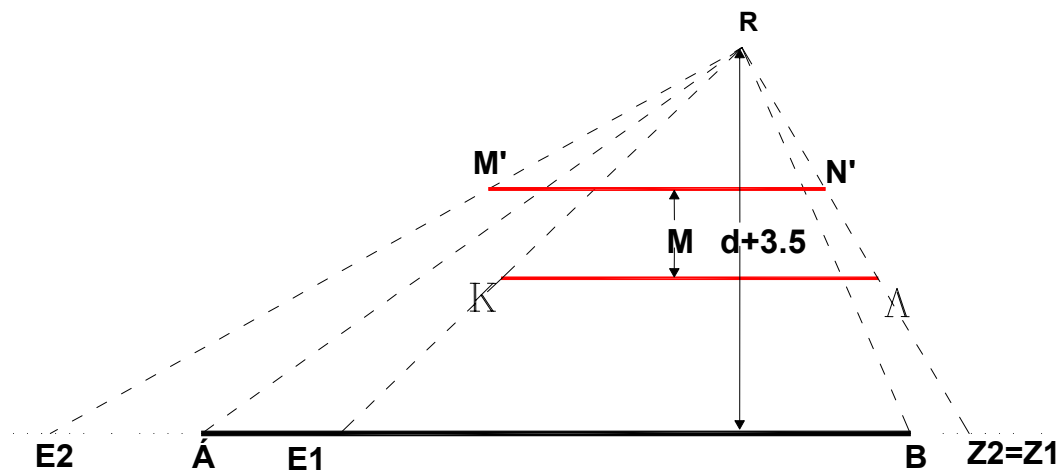
$$A_c = -10 \log \left[ \text{anti log} \left( -\frac{A_A}{10} \right) + \text{anti log} \left( -\frac{A_B J}{10} \right) - 1 \right] \quad (\text{Π.9})$$

Όπου  $A_A$  και  $A_B$  είναι οι διορθώσεις από το καθένα ξεχωριστά και

$$J = \left( \frac{M}{d + 3.5} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Π.10})$$

όπου  $M$  είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ της άκρης των 2 εμποδίων και  $d$  είναι η μικρότερη οριζόντια απόσταση μεταξύ του αποδέκτη και της άκρης του οδοστρώματος.





Σχήμα Π.6: Συνδυασμός διορθώσεων λόγω πολλαπλών εμποδίων

### Μέγεθος του τμήματος

Το επίπεδο θορύβου στον αποδέκτη μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μέγεθος του οδικού τμήματος και υπολογίζεται με βάση τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ορίων του τμήματος και του αποδέκτη. Αυτή η γωνία αναφέρεται συχνά ως οπτική γωνία και υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$$\Delta s = \log\left(\frac{\theta}{180}\right), dBA \quad (\text{Π.11})$$

### Συμβολή των επιπέδων θορύβου από όλα τα υπό-τμήματα

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας υπολογισμού απαιτεί το συνδυασμό των επιπέδων θορύβου από όλα τα υποτμήματα, τα οποία περιλαμβάνουν το συνολικό οδικό σχέδιο. Για ένα ενιαίο οδικό σχέδιο δε γίνεται καμία ρύθμιση. Για τα οδικά σχέδια που αποτελούνται από περισσότερα από ένα τμήματα το επίπεδο θορύβου στον αποδέκτη θα υπολογιστεί με συνδυασμό των επιπέδων θορύβου που προκύπτει από κάθε υποτμήμα.

$$L_{10}^{tot} = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (\text{Π.12})$$

όπου  $N$  ο αριθμός των υποτμημάτων και το  $Li$  υπολογίζεται από τη βασική σχέση κάνοντας όλες τις απαιτούμενες διορθώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

$$L_{10,i} = BNLL_{10} + K + \Delta_{pv,i} + \Delta_{G,i} + \Delta_{TD,i} + \Delta_{D,i} + A_i + \Delta_{s,i}, \quad (\text{Π.13})$$

### **Οδικοί Κόμβοι**

Οι υπολογισμοί των επιπέδων θορύβου από κόμβους επιτυγχάνονται με το συνδυασμό των συνεισφορών από κάθε μεμονωμένο μήκος του δρόμου χρησιμοποιώντας την κατάλληλη μέση ταχύτητα και αγνοώντας οποιαδήποτε αλλαγή ταχύτητας στον κόμβο [Department of Transport and Welsh Office, 1988].