ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

«Θόρυβος από την Οδική Κυκλοφορία-Μέτρα Αντιμετώπισης σε Υπεραστική Οδό -Εκτίμηση ορίου νέου Ευρωπαϊκού δείκτη L_{den}»

ΚΑΛΛΙΑΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Δρ.Β.ΓΚΕΚΑΣ(επιβλέπων)
Δρ.Γ.ΚΑΡΑΤΖΑΣ
Δρ.Ν. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ

Χανιά 2005

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αισθάνομαι τη υποχρέωση να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Γκέκα Βασίλειο για την πολύτιμη συνεργασία, την σημαντικότατη προσφορά των γνώσεων και της εμπειρίας του καθώς και για την άψογη συνεργασία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα πρέπει να δοθούν στους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κυρίους Καρατζά Γεώργιο και Νικολαΐδη Νικόλαο για τις παρατηρήσεις και προτάσεις τους σχετικά με την τελική μορφή της παρούσας εργασίας και για τις γνώσεις που μου μετέφεραν μέσα από την διδασκαλία τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Οφείλω να αναγνωρίσω την πολύτιμη συνεισφορά του κ. Ψύχα Κυριάκου της Διεύθυνσης Καταπολέμησης Θορύβου του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε χωρίς την ουσιαστική βοήθεια του οποίου θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αρχικά μελετάται ο θόρυβος σαν έννοια και αναλύεται η θεωρία σχετικά με τον ήχο. Παρατίθεται η υπάρχουσα Ελληνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τον θόρυβο που εκπέμπεται από τα οδικά συγκοινωνιακά έργα και τα διάφορα οχήματα. Περιγράφονται και αναλύονται οι παράγοντες που συμβάλλουν στην δημιουργία του κυκλοφοριακού θορύβου καθώς και τα διάφορα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Παρατίθενται και περιγράφονται μερικά από τα πιο γνωστά μοντέλα πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου και ειδικότερα του μοντέλου CRTN (Calculation of Road Traffic Noise) του Υπουργείου Μεταφορών της Μ.Βρετανίας. Εφαρμόζεται το μοντέλο CRTN σε υποθετική υπό κατασκευή υπεραστική οδό ώστε να γίνει εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου και να αξιολογηθούν διάφορα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Από ανάλυση δεδομένων του προγράμματος παρακολούθησης οδικού κυκλοφοριακού θορύβου της Αττικής Οδού προτείνεται η στάθμη του ορίου για τον δείκτη L_{den} της νέας Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τον θόρυβο 2002/49/ΕΚ.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο θόρυβος, που κοινά ορίζεται ως ο ανεπιθύμητος ήχος, αποτελεί ένα περιβαλλοντικό φαινόμενο στο οποίο εκτιθέμεθα πριν τη γέννησή μας και κατά τη διάρκεια της ζωής μας. Ο θόρυβος μπορεί επίσης να θεωρηθεί σαν ένας περιβαλλοντικός ρυπαντής, ένα παραπροϊόν που παράγεται σε συνάρτηση με πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Ως απόβλητα προϊόντα του τρόπου ζωής μας, παράγουμε δύο γενικούς τύπους ρυπαντών. Το ευρύ κοινό έχει αντιληφθεί καλά τον πρώτο τύπο (τα υπολείμματα μάζας που σχετίζονται με την ρύπανση του αέρα και των υδάτων) τα οποία παραμένουν στο περιβάλλον για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Ωστόσο, μόλις πρόσφατα η προσοχή έχει επικεντρωθεί στον δεύτερο τύπο ρύπανσης, τα ενεργειακά υπολείμματα όπως η απόβλητη θερμότητα από τις βιομηχανικές διεργασίες που προκαλεί τη θερμική ρύπανση των υδατορευμάτων μας.

Ο μέσος άνθρωπος έχει μικρή αντίληψη του τι είναι ο ήχος ή τι μπορεί να κάνει. Αυτό πιθανώς εξηγείται καλύτερα με το παράδειγμα ενός καλοπροαίρετου διευθυντή βιομηχανίας ο οποίος αποφάσισε να μειώσει το επίπεδο του θορύβου στο εργοστάσιο του, τοποθετώντας μικρόφωνα στο εσωτερικό του εργοστασίου ώστε να οδηγήσει τον θόρυβο μέσω ηχείων στον εξωτερικό χώρο [6].

Υπάρχουν τρεις βάσιμοι λόγοι η ευρεία αναγνώριση του θορύβου ως σημαντικού περιβαλλοντικού ρυπαντή και πιθανού κινδύνου, ή ως ελάχιστο ως αιτία υποβάθμισης της ποιότητας ζωής, αργεί να επέλθει:

1. Ο θόρυβος εάν οριστεί ως ο ανεπιθύμητος ήχος, είναι μία υποκειμενική εμπειρία.
2. Ο θόρυβος έχει σύντομο χρόνο εξασθένησης και κατά συνέπεια δεν παραμένει στο περιβάλλον για τόσο εκτεταμένες χρονικές περιόδους όσο η ρύπανση αέρα και υδάτων.
3. Οι φυσιολογικές και ψυχολογικές επιδράσεις στους ανθρώπους είναι συχνά «ύπουλες» και παρουσιάζονται τόσο σταδιακά που γίνεται δύσκολο να γίνει σύνδεση αιτίου-συνέπειας [1].

Οι συνέπειες του θορύβου ποικίλουν από την απλή παρεμπόδιση της ομιλίας και του ύπνου μέχρι σε ελάττωση της ακουστικής ικανότητας και επιτάχυνση και όξυνση συγκινησιακών διαταραχών [2].
Ορισμένα μέρη του πληθυσμού είναι περισσότερο ευπαθή στις ψηλότερες στάθμες θορύβου, παραδείγματος χάριν αυτοί που πάσχουν από υπέρταση ή που έχουν ψυχικά προβλήματα κλπ.
Εκτός των παραπάνω επιπτώσεων που αφορούν στην υγεία, η ενόχληση από το θόρυβο έχει επιπτώσεις στην ικανότητα απόδοσης του ατόμου και κατ' επέκταση στην Εθνική Οικονομία [4].
Τα οχήματα αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες ηχητικής ρύπανσης του περιβάλλοντος [3].
Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (XI Directorate General- Environment, Μάρτιος1994):

- 20-25% του πληθυσμού των πιο ανεπτυγμένων χωρών της Ε.Ε ενοχλείται από τον κυκλοφοριακό θόρυβο.
- 19% του συνολικού πληθυσμού κατοικούν σε περιοχές με υψηλά επίπεδα θορύβου.

Σύμφωνα με τον OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) :

- 50% του πληθυσμού του OECD (περισσότερο από 330 εκατομμύρια άτομα) κατοικούν σε περιοχές όπου τα επίπεδα θορύβου ξεπερνούν τα επίπεδα όχλησης.
- Ένα 15% (περισσότερο από 110 εκατομμύρια άτομα) ζουν σε περιοχές με υψηλά επίπεδα θορύβου.

Κατά συνέπεια η κυκλοφορία των οχημάτων θεωρείται η πιο ενοχλητική πηγή θορύβου στους αστικούς πληθυσμούς. Σύμφωνα με μελέτες και μετρήσεις που διεξήχθησαν από το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε):

- Περισσότερο από το 60% του πληθυσμού της Αθήνας και του Πειραιά ζουν κάτω από απαράδεκτα υψηλά επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου

Τα επίπεδα του θορύβου αιχμής κυμαίνονται μεταξύ 90-100 dB(A) όλες τις ημέρες, και δυστυχώς νύχτες, στις κύριες οδικές αρτηρίες των Αθηνών [4].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της θεωρίας του θορύβου και ειδικά του θορύβου που προέρχεται από την οδική κυκλοφορία καθώς και των διαφόρων εναλλακτικών τρόπων αντιμετώπισης του προβλήματος. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται το μοντέλο CRTN σε υποθετική υπό κατασκευή υπεραστική οδό ώστε να γίνει εκτίμηση του παραγόμενου θορύβου και να αξιολογηθούν διάφορα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Επίσης από ανάλυση δεδομένων του προγράμματος παρακολούθησης οδικού κυκλοφοριακού θορύβου της Αττικής Οδού προτείνεται η στάθμη του ορίου για τον δείκτη L_{den} της νέας Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τον θόρυβο 2002/49/ΕΚ η οποία περιγράφεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 2

Θόρυβος-Θεωρία

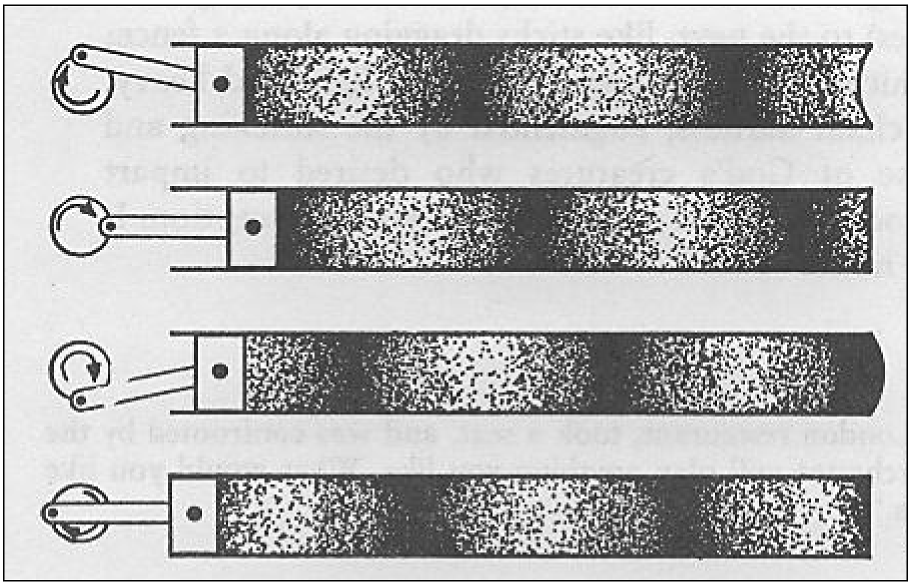
2.1 Ορισμοί

Ήχος γενικά είναι το αίτιο που διεγείρει το αισθητήριο της ακοής. Θόρυβος είναι κάθε ανεπιθύμητος ήχος που μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στην υγεία και την ποιότητα ζωής των ατόμων ή του πληθυσμού [2].

Ο ήχος είναι τόσο ένα φυσικό φαινόμενο όσο και μία υποκειμενική αίσθηση. Με την πρώτη έννοια, οριζόμενος ως είτε μία μορφή μηχανικής ενέργειας είτε ως μία ταλάντωση της πίεσης, ονομάζεται σαν ‘’ηχητικό κύμα” για την άμεση αναγνώρισή του. Με την δεύτερη έννοια, είναι το ερέθισμα της ακοής ή της ακουστικής αντίληψης ενός ‘’ηχητικού κύματος’’[5]. Στην συνέχεια ακολουθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου και η θεωρία του θορύβου γενικότερα.

2.2 Φυσικές ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων

Τα ηχητικά κύματα είναι αποτέλεσμα της δόνησης στερεών αντικειμένων ή του διαχωρισμού των ρευστών καθώς περνούν επάνω, γύρω από, ή διαμέσου οπών σε στερεά αντικείμενα. Η δόνηση και/ή ο διαχωρισμός προκαλεί στον περιβάλλοντα αέρα να υποστεί μεταβαλλόμενες συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις, σχεδόν με τον ίδιο τρόπο που ένα έμβολο πάλλεται μέσα σε έναν σωλήνα (Σχήμα 2.1) [1].



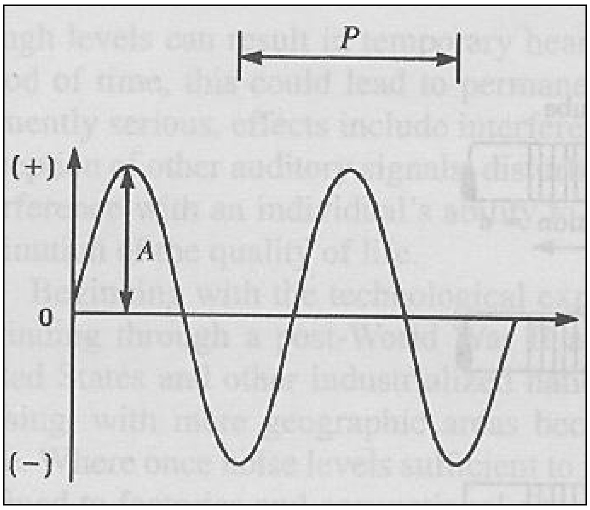
Σχήμα 2.1: Ένα έμβολο δημιουργεί ηχητικά κύματα που μεταδίδονται διαμέσου του αέρα [6].

Καθώς το πιστόνι πιέζεται προς τα δεξιά μέσα στον σωλήνα, τα μόρια του αέρα δίπλα του δεν είναι πρόθυμα να κινηθούν αλλά αντί αυτού στοιβάζονται στο μέτωπο του εμβόλου ($1^{ος}$ Νόμος του Νεύτωνα). Αυτά τα συμπιεσμένα μόρια τώρα δρουν σαν ένα ελατήριο, και απελευθερώνουν την ενέργεια τους με το να μεταπηδούν προς τα μπροστά, δημιουργώντας ένα κύμα συμπιεσμένων μορίων αέρα που κινείται διαμέσου του σωλήνα. Η δυναμική ενέργεια έχει μετατραπεί σε κινητική ενέργεια [6].

Ας υποθέσουμε ότι θα μπορούσαμε να σταθούμε σε ένα σημείο, έστω Α, στο μέσο του σωλήνα στο σχήμα 2.1. Επίσης ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα όργανο το οποίο θα μετράει την πίεση κάθε 0,000010 sec και να αναπαριστά τις τιμές σε ένα γράφημα. Εάν το πιστόνι ταλαντώνεται με έναν σταθερό ρυθμό οι συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις θα κινούνται κατά μήκος του σωλήνα με μία σταθερή ταχύτητα. Αυτή είναι η ταχύτητα του ήχου c [1]. Σε ελεύθερο πεδίο, ο ήχος μεταδίδεται με την ταχύτητα c οριζόμενη από τον τύπο

$$c = 20{,}05\sqrt{T_K}\, m/\sec$$

όπου T_K η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν (273+ ºC) [7]. Η άνοδος και η πτώση της πίεσης στο σημείο Α θα; Ακολουθεί μία κυκλική ή κυματοειδή μορφή σε μία ορισμένη ‘’περίοδο’’ χρόνου (Σχήμα 2.2) [1].



Σχήμα 2.2 Ημιτονοειδές κύμα που προκαλείται από εναλλασσόμενες συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις των μορίων του αέρα. Το πλάτος παρουσιάζεται από το Α ενώ η περίοδος είναι Ρ [1].

Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών κορυφών η διαδοχικών κοιλιών καλείται περίοδος (P). Το αντίστροφο αυτού, το οποίο είναι ο αριθμός των αφίξεων μίας κορυφής σε ένα δευτερόλεπτο ταλάντωσης καλείται συχνότητα (f). Η περίοδος και η συχνότητα συνδέονται με τον τύπο:

$$P = \frac{1}{f}$$

Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κορυφών ή κοιλιών της πίεσης καλείται μήκος κύματος (λ). Το μήκος κύματος (λ) και η συχνότητα συνδέονται με τον τύπο [6]:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Το πλάτος (A) του κύματος είναι το ύψος της κορυφής ή το βάθος της κοιλίας μετρούμενο από την γραμμή μηδενικής πίεσης (Σχήμα 2.2).

Από το σχήμα 2.2 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέση πίεση θα ήταν μηδέν αν επιλέγαμε έναν χρόνο μίας περιόδου. Αυτό θα ήταν το αποτέλεσμα ανεξάρτητα με το πλάτος. Αυτό φυσικά δεν μπορεί να είναι αποδεκτό. Η rms ηχητική πίεση προκύπτει από τον τύπο [1]:

$$p_{rms} = \left(\overline{p^2}\right)^{1/2} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T P^2(t)dt\right]^{1/2}$$

όπου p η πίεση σε κάθε χρονική στιγμή t και T η περίοδος της μέτρησης.

2.3 Ηχητική ενέργεια και πίεση

Ένα ηχητικό κύμα είναι ένα κύμα συμπίεσης, και το πλάτος είναι πλάτος πίεσης, και μετράται σε μονάδες πίεσης όπως το N/m^2 (pascal). Όπως και με άλλα κυματικά φαινόμενα η ένταση είναι το τετράγωνο του πλάτους, ή:

$$I = P^2$$

Όταν ένα άτομο ακούει ήχους διαφορετικών εντάσεων, η συνολική ένταση που ακούγεται δεν είναι το άθροισμα των εντάσεων των διαφόρων ήχων. Το ανθρώπινο αυτί τείνει γίνεται υπερφορτισμένο ή κορεσμένο με τον πάρα πολύ ήχο. Άλλη μια διαπίστωση αυτού του φαινομένου αποτελεί το γεγονός ότι η ανθρώπινη ακοή αθροίζει τις ηχητικές εντάσεις λογαριθμικά παρά γραμμικά. Μία μονάδα ονόματι bel εφευρέθηκε για την μέτρηση της ηχητικής έντασης [6].Το όνομα της προέρχεται από τον Alexander Graham Bell εφευρέτη του τηλεφώνου [1],[2]. Η ηχητική ένταση (IL, Intensity Level) ως [6] :

$$IL_b = \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

όπου I= ηχητική ένταση σε watts

I_0 = ένταση του ελάχιστα ακουστού ήχου, συνήθως $I_0 = 10^{-2}$ watts

Το bel είναι μία πολύ μεγάλη μονάδα. Η πιο εύκολη στη χρήση μονάδα που είναι και πιο κοινά χρησιμοποιούμενη είναι το 1/10 του bel, δηλαδή το decibel (dB). Η ηχητική ένταση σε dB ορίζεται ως

$$IL = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Αφού η ένταση είναι το τετράγωνο της πίεσης, μία ανάλογη εξίσωση μπορεί να γραφεί για επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL, Sound Pressure Level) σε dB:

$$SPL = 20\log_{10}\frac{P}{P_{ref}}$$

όπου SPL (dB)= το επίπεδο ηχητικής πίεσης σε dB

P= η πίεση του ηχητικού κύματος

P_{ref}= μία πίεση αναφοράς, γενικά επιλέγεται το όριο της ακοής,$2*10^{-5}$N/m^2 [6].

Μερικά τυπικά επίπεδα θορύβου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 [7]:

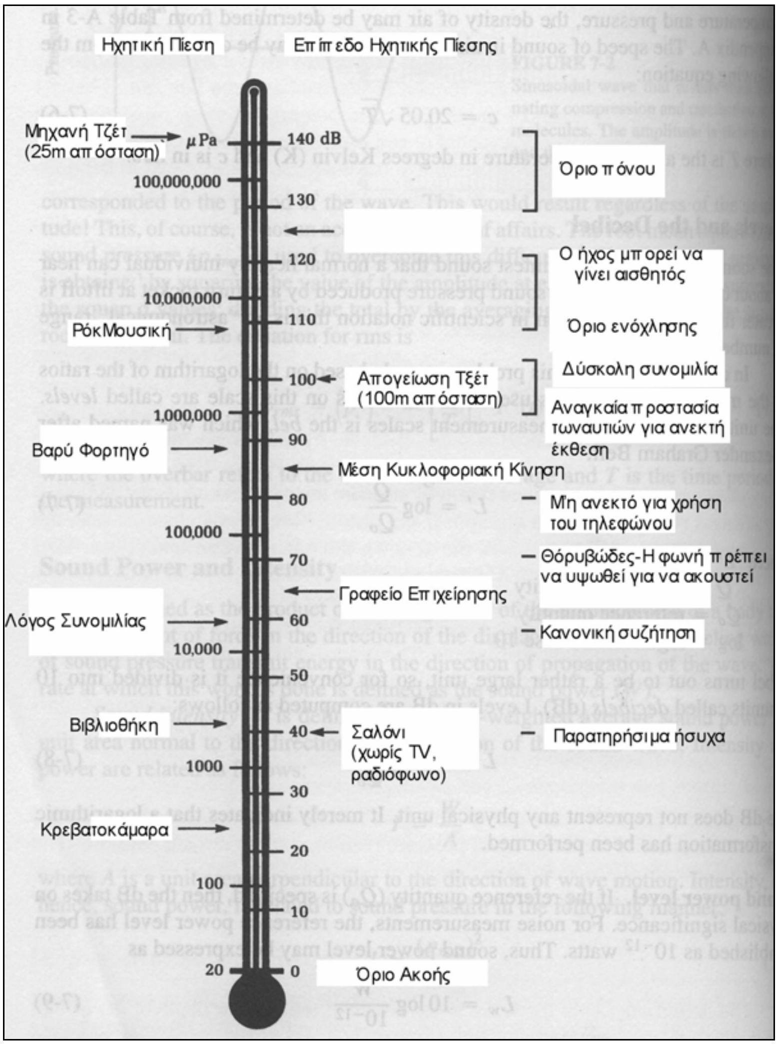
Πίνακας 2.1: Τυπικά επίπεδα θορύβου [7].

Πηγή	**Μέγιστο επίπεδο θορύβου, dB**
Απογείωση τζετ	140
Γραμμή παραγωγής αυτοκινήτων	125
Μύλος άλεσης	115
Λεωφορείο που επιταχύνει στα 12ft	112
Ροκ συγκρότημα στα 40ft	108

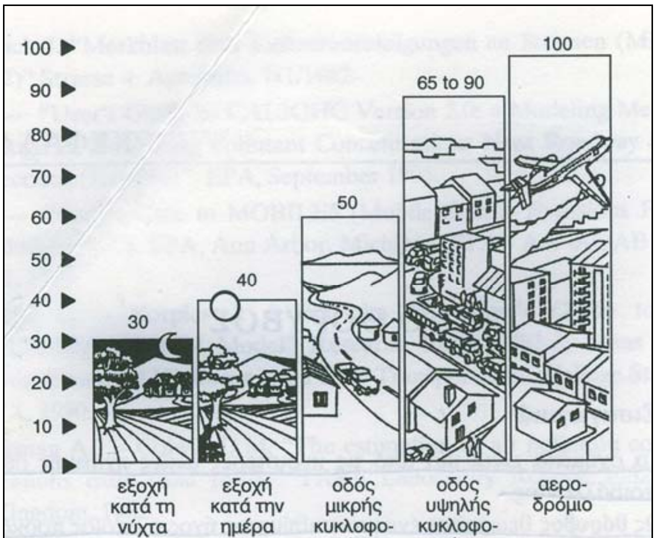
Η άνεση απαιτεί το επίπεδο του θορύβου να είναι της τάξης των 65 dB ή λιγότερο από όλες τις πηγές.

Η χρήση του dB ως μονάδα μέτρησης οφείλεται στο γεγονός ότι το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ανιχνεύσει ηχητικές πιέσεις που κυμαίνονται από $2*10^{-5}$ N/m^2 (pascal), το όριο της ακοής, έως πάνω από 200 N/m^2 , το όριο του πόνου. Αυτό το ευρύ φάσμα οδήγησε στη χρήση λογαριθμικής κλίμακας για την έκφραση των ηχητικών πιέσεων [7].

Στο σχήματα 2.3 και 2.4 παρουσιάζεται παραστατικά η κλίμακα dB [1].



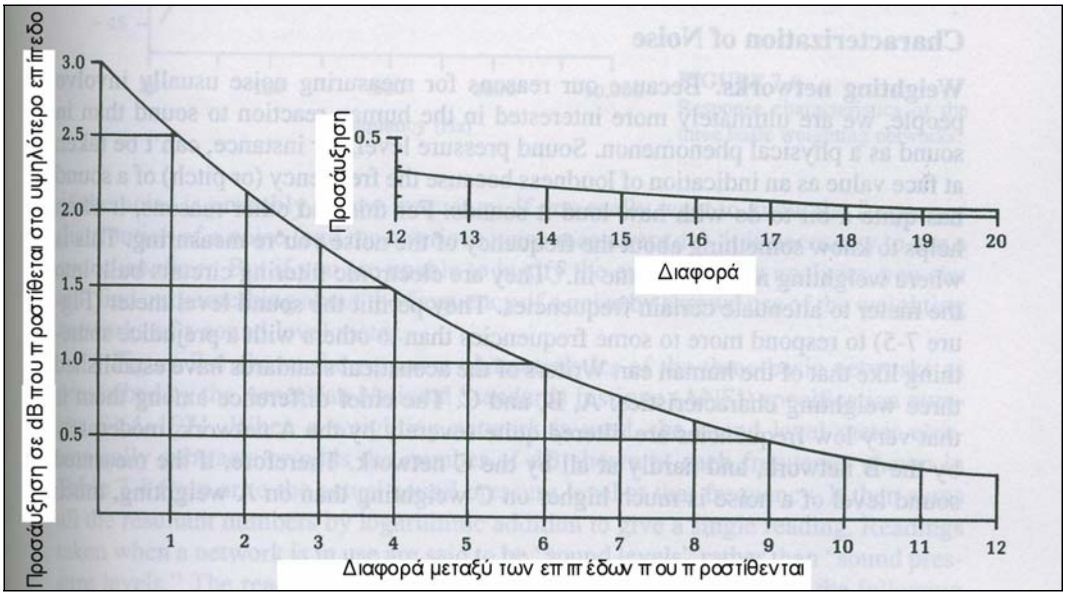
Σχήμα 2.3: Σχετική κλίμακα επιπέδων ηχητικής πίεσης [1].



Σχήμα 2.4: Ηχητική κλίμακα σε dB [3].

2.4 Πρόσθεση ηχητικών επιπέδων πίεσης

Εξαιτίας της λογαριθμικής τους φύσης, τα ντεσιμπέλ δεν προστίθενται και αφαιρούνται όπως άλλα φυσικά μεγέθη. Η πρόσθεση των λογαρίθμων των αριθμών είναι το ίδιο σαν να πολλαπλασιάζονται. Εάν έχουμε έναν θόρυβο 60 dB (ως προς 20 μPa) και προσθέσουμε άλλον ένα θόρυβο 60 dB (ως προς 20 μPa) έχουμε έναν θόρυβο 63 dB (ως προς 20 μPa). Το σχήμα 2.5 παρέχει μία γραφική επίλυση του προβλήματος της πρόσθεσης ήχων διαφόρων εντάσεων.



Σχήμα 2.5: Γραφική επίλυση της πρόσθεσης ντεσιμπέλ [1].

Για δουλειά με ηχορύπανση, τα αποτελέσματα θα πρέπει να αναφέρονται στον κοντινότερο ακέραιο αριθμό. Όταν πρέπει να προστεθούν διάφορες εντάσεις θα πρέπει να συνδυάζονται ανά δύο τη φορά, αρχίζοντας με τις χαμηλότερες εντάσεις και συνεχίζοντας μέχρις ότου μείνει ένας αριθμός. Άλλος τρόπος πρόσθεσης αποτελεί η μετατροπή των dB σε ηχητικές πιέσεις, πρόσθεση αυτών και εκ νέου μετατροπή σε dB [1]. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζεται επίσης η πρόσθεση ήχων διαφορετικών εντάσεων.

Πίνακας 2.2: Υπολογισμός συνδυασμένου επιπέδου ήχων διαφορετικής έντασης [5].

Διαφορά μεταξύ των επιπέδων που συνδυάζονται, dB	**Αριθμός ντεσιμπέλ που προστίθενται στο υψηλότερο επίπεδο ώστε να αποκτηθεί το συνδυασμένο επίπεδο**
0	3,01
0,5	2,76
1	2,54
1,5	2,32
2	2,12
2,5	1,94
3	1,75
3,5	1,6
4	1,45
4,5	1,31
5	1,18
5,5	1,08
6	0,97
7	0,78
8	0,63
9	0,51
10	0,41
11	0,33
12	0,27
13	0,21
14	0,17
15	0,14
16	0,11
17	0,09
18	0,07
19	0,06
20	0,05
24	0,02

2.5 Συχνότητα και ακουστότητα θορύβων- Χαρακτηρισμός θορύβων-Σταθμιστικά φίλτρα

Επειδή οι λόγοι για τους οποίους μετράται ο θόρυβος συνήθως εμπλέκουν ανθρώπους, εν τέλει είναι πιο ενδιαφέρουσα η ανθρώπινη αντίδραση στον ήχο παρά ο ήχος σαν φυσικό φαινόμενο . Το επίπεδο ηχητικής πίεσης για παράδειγμα (SPL, dB) δεν μπορεί σαν απόλυτη τιμή να αποτελέσει ένδειξη της ακουστότητας επειδή η συχνότητα ενός ήχου έχει αρκετά σχέση με το πόσο δυνατά ακούγεται. Για αυτόν και άλλους λόγους, συνήθως βοηθά η γνώση γύρω από τη συχνότητα του ήχου που μετράται [1].

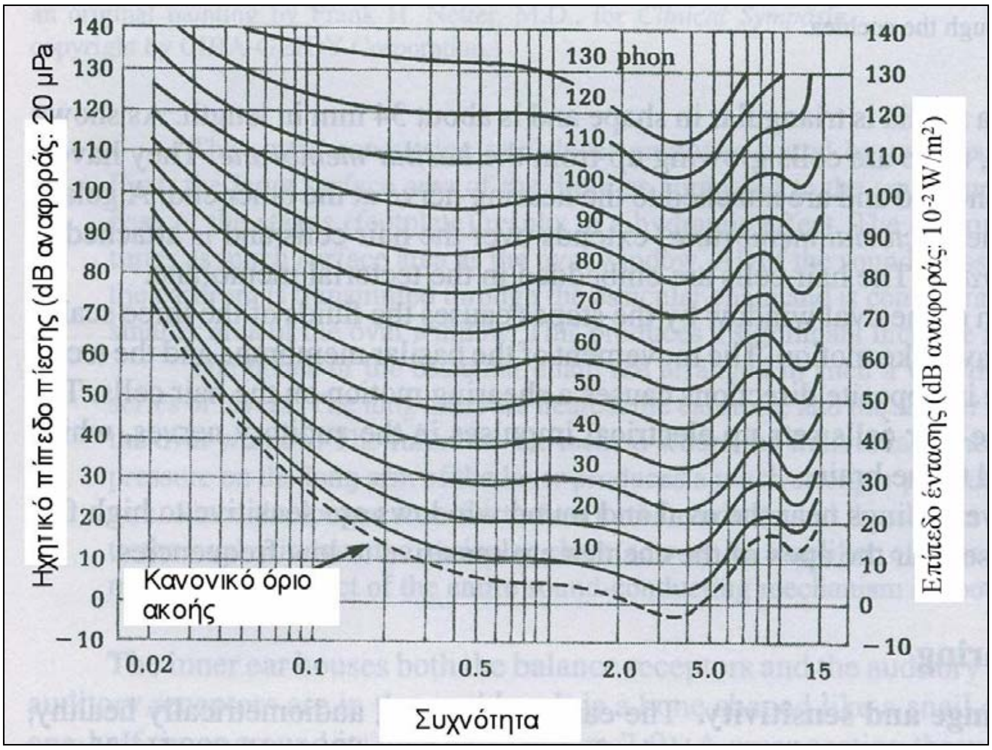
Ακουστότητα του θορύβου είναι το μέγεθος του υποκειμενικού αισθήματος, που δημιουργεί στον άνθρωπο και εξαρτάται από την ένταση και τη συχνότητα. Βασική μονάδα ακουστότητας είναι το sone, που εξ΄ ορισμού ισούται με την ακουστότητα καθαρού τόνου 1000Hz, όπως ακούγεται σε SPL 40 dB, κάτω από καθορισμένες συνθήκες ακροάσεως. Άλλη μονάδα μέτρησης της στάθμης ακουστότητας είναι το phon, που ισούται εξ΄ ορισμού με τη SPL(dB) σε 1000Hz, δηλαδή η κλίμακα των phons συμπίπτει με τα dB στη συχνότητα 1000 Hz. Για τις πρακτικές εφαρμογές, η σχέση μεταξύ των κλιμάκων phon και sone μπορεί να βρεθεί από τον τύπο [2] :

$$phon = 40 + \log_2 sone \qquad \text{ή} \qquad sone = 2^{phon-40}$$

όπου $\log_2$: λογάριθμος με βάση το 2 (= $\log_{10}/0,3$).

Το 1933, οι Fletcher και Munson διεξήγαγαν μία σειρά από πειράματα για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ συχνότητας και ακουστότητας. Ένας τόνος αναφοράς και ένας τόνος τεστ παρουσιάζονταν εναλλασσόμενα στα υποκείμενα άτομα του πειράματος. Τους ζητήθηκε να ρυθμίσουν το επίπεδο του ήχου του τόνου τεστ μέχρις ότου να ακούγεται όσο δυνατά όσο ο τόνος αναφοράς. Τα αποτελέσματα παραστάθηκαν γραφικά ως επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) σε dB σε συνάρτηση με την συχνότητα του τόνου τεστ (Σχήμα 2.6) [8]. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται παραστατικά το πεδίο ακουστότητας των διαφόρων καθαρών τόνων θορύβων, σε σχέση με τη συχνότητα [2].

Οι καμπύλες ονομάζονται Fletcher-Munson ή ισοϋψείς ίσης έντασης. Η συχνότητα αναφοράς είναι 1000Hz. Οι καμπύλες περιγράφονται σε phons. Η χαμηλότερη ισοϋψής (διακεκομμένη γραμμή) αντιπροσωπεύει “το όριο της ακοής”. Το πραγματικό όριο μπορεί να κυμαίνεται ως και +/-10 dB μεταξύ ατόμων με κανονική ακοή [8].



Σχήμα 2.6: Ισοϋψείς ίσης έντασης Fletcher-Munson [1].

Η μεγαλύτερη ακουστότητα παρατηρείται στην περιοχή των 1000-4000 Hz. Σε χαμηλές συχνότητες και εντάσεις η ακουστότητα ελαττώνεται πολύ γρήγορα. Όπως αναφέρθηκε, η ακουστότητα εξαρτάται από τον συνδυασμό έντασης και συχνότητας. Το ανθρώπινο αυτί με τον εγκέφαλο αποτελούν δέκτη, που διαφέρει από τα ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεως. Πχ ένας θόρυβος εντάσεως 50 dB, με συχνότητα 250 Hz, γίνεται αντιληπτός σαν πολύ πιο ασθενής από ίδιας εντάσεως θόρυβο με συχνότητα 1000 Hz (περίπου κατά 9 dB) [2].

Το αυτί του νέου, και ακουστικά υγιούς ενήλικά αρσενικού ανταποκρίνεται σε ηχητικά κύματα στην κλίμακα συχνότητας από 20 έως 16000 Hz. Τα νέα παιδιά και οι γυναίκες έχουν την ικανότητα να ανταποκριθούν σε συχνότητες έως 20000 Hz. Η ανθρώπινη ομιλία βρίσκεται στη περιοχή συχνοτήτων 500-2000 Hz. Το αυτί είναι πιο ευαίσθητο στην περιοχή συχνοτήτων από 2000 έως 5000 Hz. Η ανθρώπινη ομιλία βρίσκεται στη περιοχή συχνοτήτων 300-3000 Hz. Η μικρότερη αντιληπτή ηχητική πίεση σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων είναι τα 20μPa. Μία ηχητική πίεση των 20μPa στα 1000 Hz στον αέρα αντιστοιχεί σε μία μετατόπιση 1,0 nm στα μόρια του αέρα. Η θερμική κίνηση των μορίων του αέρα αντιστοιχεί σε ηχητική πίεση 1μPa. Εάν το αυτί μας ήταν πιο ευαίσθητο θα μπορούσαμε να ακούμε τα μόρια του αέρα να προσκρούουν στο αυτί μας σαν κύματα στην παραλία! [1].

Για να εκτιμήσουμε σωστά την υποκειμενική αντίληψη ενός θορύβου, θα έπρεπε κανονικά, επειδή είναι μίγμα διαφόρων συχνοτήτων, να μετρηθεί η ένταση του για κάθε συχνότητα πράγμα που είναι πρακτικά αδύνατο.

Για την απλούστευση του προβλήματος, χωρίζεται το φάσμα των ακουστών συχνοτήτων σε ομάδες που ονομάζονται οκτάβες (octave bands) και τελικά γίνεται μία μόνο μέτρηση για κάθε οκτάβα [2].

Οι στάνταρ οκτάβες και οι γεωμετρικές μέσες συχνότητές τους (κεντρικές συχνότητες) δίνονται στον πίνακα 2.3 [1]:

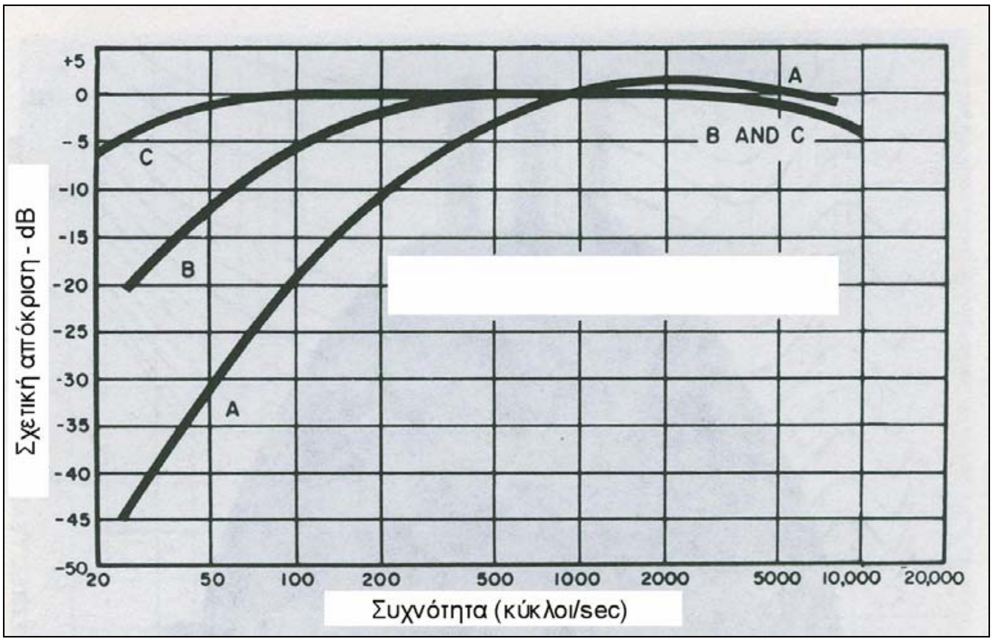
Πίνακας 2.3: Συνήθεις οκτάβες [1].

Όρια Συχνότητας Οκτάβας	**Κεντρική Συχνότητα**
22-44	31,5
44-88	63
88-175	125
175-350	250
370-700	500
700-1400	1000
1400-2800	2000
2800-5600	4000
5600-11200	8000
11200-22400	16000
22400-44800	31500

Σημειώνεται ότι κάθε οκτάβα έχει διπλάσιες συχνότητες της προηγούμενης. Τελικά ένα θόρυβος προσδιορίζεται απόλυτα με τη μέτρηση της εντάσεως σε κάθε οκτάβα. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στις περιπτώσεις ελέγχου πηγών , με χρήση ηχομονωτικών, τα οποία συνήθως είναι αποτελεσματικά σε μία περιοχή συχνοτήτων και γι' αυτό πρέπει να γίνει αναλυτικός προσδιορισμός των εντάσεων του θορύβου της πηγής σε κάθε οκτάβα, για να εκλεγεί το κατάλληλο μέσο.

Στην πράξη, για την εκτίμηση της ακουστότητας των θορύβων και των ενοχλήσεων, που προκαλούν στον άνθρωπο χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα σταθμιστικά φίλτρα [2].

Αποτελούν ηλεκτρονικά κυκλώματα φιλτραρίσματος ενσωματωμένα στους μετρητές ήχου να λειαίνουν ορισμένες συχνότητες. Επιτρέπουν στον μετρητή του επιπέδου του ήχου να αντιδρά περισσότερο σε κάποιές συχνότητες παρά σε άλλες με μία επιλεκτικότητα περίπου όμοια με αυτή του ανθρώπινου αυτιού. Οι συγγραφείς των ακουστικών στάνταρ έχουν καθιερώσει τρία χαρακτηριστικά στάθμισης: Α,Β και C. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι πολύ χαμηλές συχνότητες φιλτράρονται αρκετά αυστηρά από το κύκλωμα Α, μέτρια από το Β, και σχεδόν καθόλου από το C. Κατά συνέπεια, εάν το μετρούμενο επίπεδο θορύβου είναι πολύ υψηλότερο στην στάθμιση C παρά στην στάθμιση Α, μεγάλο μέρος του θορύβου είναι πιθανότατα χαμηλής συχνότητας. Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά απόκρισης των τριών βασικών σταθμιστικών κυκλωμάτων όπως προδιαγράφονται από το ANSI (American National Standards Institute).



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικά απόκρισης των τριών σταθμιστικών κυκλωμάτων Α,Β και C [6].

Όταν ένα σταθμιστικό κύκλωμα χρησιμοποιείται, ο μετρητής επιπέδου του ήχου αυτόματα αφαιρεί ή προσθέτει τον αριθμό των dB σε κάθε συχνότητα που φαίνεται στον πίνακα 2.4 από ή σε κάθε πραγματικό επίπεδο πίεσης σε αυτή τη συχνότητα. Έπειτα προσθέτει όλους τους αριθμούς που προκύπτουν με λογαριθμικής πρόσθεση ώστε να δώσει μία μόνο ένδειξη. Οι ενδείξεις που λαμβάνονται όταν χρησιμοποιείται ένα σταθμιστικό κύκλωμα λέγονται ηχητικά επίπεδα παρά ηχητικά επίπεδα πίεσης [1].

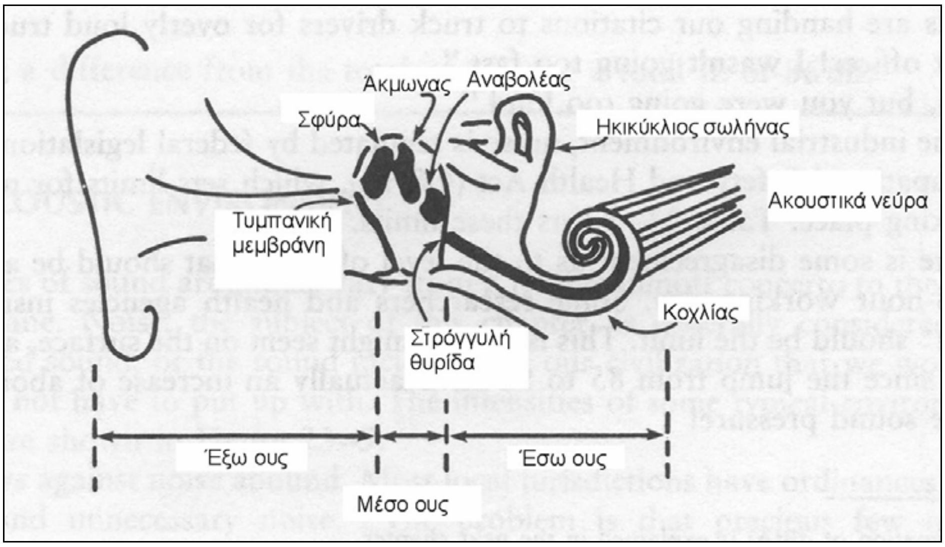
Πίνακας 2.4: Σταθμιστικές τιμές μετρητή ηχητικού επιπέδου [1].

Συχνότητα (Hz)	**Καμπύλη A (dB)**	**Καμπύλη B (dB)**	**Καμπύλη C (dB)**
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,9
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,5	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	0,6	0	0
1600	1,0	0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

Το φίλτρο A αντιστοιχεί περίπου στην απόκριση του ανθρώπινου αυτιού στην περιοχή 0-65 dB, το B από 65-86 dB και το C πάνω από 85 dB. Εκτεταμένη εμπειρία έχει δείξει ότι το φίλτρο A εξασφαλίζει την υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ των φυσικών μετρήσεων και της υποκειμενικής εκτίμησης της εντάσεως του θορύβου. Η μέτρηση με το φίλτρο A που συμβολίζεται με dB(A), είναι περίπου ισοδύναμη με την αντίληψη του ανθρώπινου αυτιού και εξυπηρετεί τις πρακτικές ανάγκες [2].

2.6 Ο μηχανισμός της ακοής

Το ανθρώπινο αυτί αποτελεί ένα εκπληκτικό όργανο. Αν φανταστούμε ότι θα έπρεπε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μία ζυγαριά για την ακριβή ζύγιση τόσο μίας μύγας όσο και ενός ελέφαντα [6].
Ένα σχήμα του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Σχέδιο του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος [6].

Τα ηχητικά κύματα πίεσης που προκαλούνται από τις δονήσεις θέτουν το τύμπανο (τυμπανική μεμβράνη. tympanic membrane) σε κίνηση. Αυτό ενεργοποιεί τα τρία κόκαλα στο μέσο αυτί. Τα οστά σφύρα, άκμωνας και αναβολέας ενισχύουν φυσικά την κίνηση που λαμβάνεται από το τύμπανο, και την μεταδίδουν στο εσωτερικό αυτί. Αυτή η γεμάτη υγρό κοιλότητα περιέχει τον κοχλία (cochlea), μία δομή σαν σαλιγκάρι στην οποία η φυσική κίνηση μεταδίδεται σε μικροσκοπικά τριχοειδή κύτταρα. Αυτά τα τριχοειδή κύτταρα αποκλίνουν, περίπου σαν φύκια που κινούνται λόγω του θαλάσσιου ρεύματος, και συγκεκριμένα κύτταρα αντιδρούν μόνο σε συγκεκριμένες συχνότητες. Η μηχανική κίνηση αυτών των τριχοειδών κυττάρων μετατρέπεται σε βιοηλεκτρικά σήματα και διαδίδονται στον εγκέφαλο μέσω των ακουστικών νεύρων [6].

2.7 Επιδράσεις του θορύβου στον άνθρωπο

2.7.1 Ελάττωση της ακουστικής οξύτητας

Με εξαίρεση της ρήξης του τυμπάνου από έντονο εκρηκτικό θόρυβο, το εξωτερικό και μέσο αυτί σπανίως τραυματίζονται από τον θόρυβο. Πιο συνηθέστερα, η απώλεια της ακοής είναι αποτέλεσμα νευρικής ζημιάς που περιλαμβάνει τραυματισμό των τριχοειδών κυττάρων. Δυο θεωρίες προσφέρονται για την εξήγηση του τραυματισμού που προκαλείται από τον θόρυβο. Η πρώτη είναι ότι οι υπερβολικές δυνάμεις συνάφειας τραυματίζουν μηχανικά τα τριχοειδή κύτταρα. Η δεύτερη είναι ότι η έντονη διέγερση από τον θόρυβο κάνει τα τριχοειδή κύτταρα να έχουν υψηλή μεταβολική δραστηριότητα, η οποία τα οδηγεί στο σημείο της μεταβολικής αστοχίας και κατά συνέπεια σε κυτταρικό θάνατο. Αν καταστραφούν τα τριχοειδή κύτταρα είναι ανίκανα επαναδημιουργίας.

Οι απώλειες ακοής μπορεί να είναι είτε προσωρινές είτε μόνιμες. Οι απώλειες ακοής λόγω θορύβου πρέπει να διαχωρίζονται από άλλες αιτίες ακουστικής απώλειας όπως το γήρας (presbycusis), ναρκωτικά, ασθένεια και χτυπήματα στο κεφάλι. Η προσωρινή μετακίνηση του ορίου ακοής (Temporary Treshold Shift, TTS) διακρίνεται από την μόνιμη μετακίνηση του ορίου ακοής

(Permanent Treshold Shift, PTS) από το γεγονός ότι στην TTS η αφαίρεση της υπερδιέγερσης λόγω θορύβου θα έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή επιστροφή στα βασικά ακουστικά όρια [1].

2.7.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την μετακίνηση του ορίου ακοής

1. Το επίπεδο του θορύβου: Τα επίπεδα του θορύβου πρέπει να ξεπερνούν τα 60-80 dbA πριν ο μέσος άνθρωπος υποστεί TTS.
2. Η κατανομή συχνοτήτων του ήχου: Ήχοι που έχουν την περισσότερη ενέργειά τους στις συχνότητες ομιλίας είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν μετακίνηση του ορίου απ' ότι ήχοι που έχουν την περισσότερη ενέργειά τους κάτω από τις συχνότητες ομιλίας.
3. Διάρκεια του ήχου: Όσο περισσότερο διαρκεί ένας ήχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετακίνηση του ορίου της ακοής.
4. Χρονική κατανομή της έκθεσης στον ήχο: Ο αριθμός και η διάρκεια των ήσυχων περιόδων μεταξύ των περιόδων ήχου επηρεάζουν την πιθανότητα μετακίνησης του ορίου.
5. Διαφορές μεταξύ των ατόμων στην ανεκτικότητα του ήχου ποικίλουν πολύ μεταξύ των ατόμων.
6. Ο τύπος του θορύβου- steady state, ατέρμονος, θόρυβος κρούσης : Η ανεκτικότητα σε υψηλές (peak) ηχητικές πιέσεις μειώνεται πολύ με την αύξηση της διάρκειας του ήχου [1].

2.7.1.2 Προσωρινή μετακίνηση του ορίου ακοής (TTS)

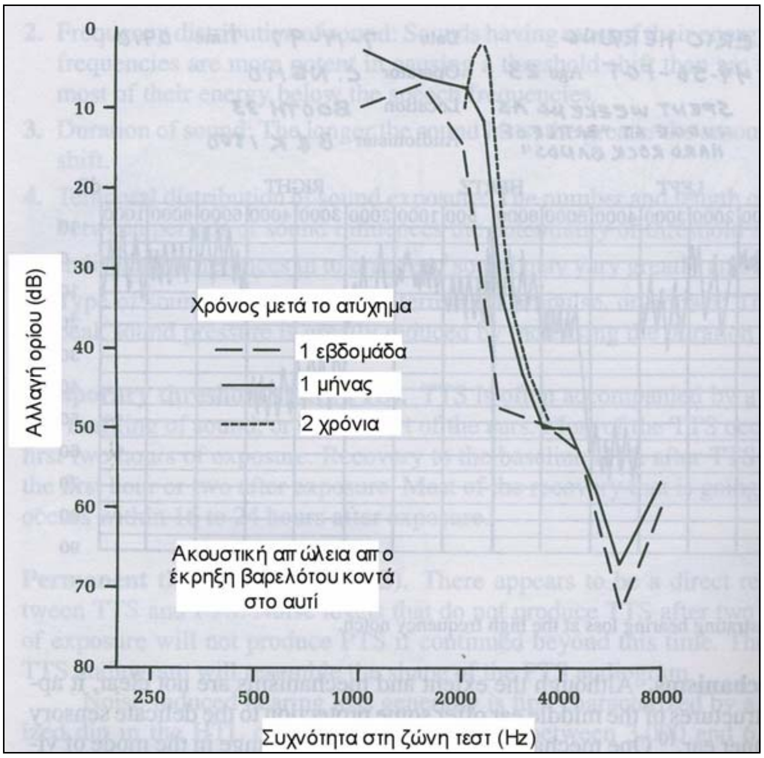
Η TTS συχνά συνοδεύεται από κουδούνισμα στο αυτί, μείωση του ήχου ή άβολο αίσθημα στα αυτιά. Οι περισσότερες TTS σημειώνονται κατά τη διάρκεια των πρώτων δύο ωρών της έκθεσης. Η επαναφορά στη βασικό ακουστικό επίπεδο αρχίζει την πρώτη ή δεύτερη ώρα μετά την έκθεση. Η περισσότερη επαναφορά που θα επιτευχθεί σημειώνεται μεταξύ 16-24 ωρών μετά την έκθεση.

2.7.1.3 Μόνιμη μετακίνηση του ορίου ακοής (PTS)

Φαίνεται πως υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ TTS και PTS. Τα επίπεδα θορύβου που δεν προκαλούν TTS έπειτα από δύο ή οκτώ ώρες έκθεσης δεν θα προκαλέσουν PTS εάν συνεχιστούν πέρα από αυτό τον χρόνο. Η απώλεια ακοής λόγω θορύβου πρωτίστως χαρακτηρίζεται από μία κατακόρυφα ευρισκόμενη βύθιση στη καμπύλη του ορίου ακουστικού επιπέδου (HTL) στις συχνότητες μεταξύ 3000 και 6000Hz [1].

2.7.1.4 Ακουστικό τραύμα

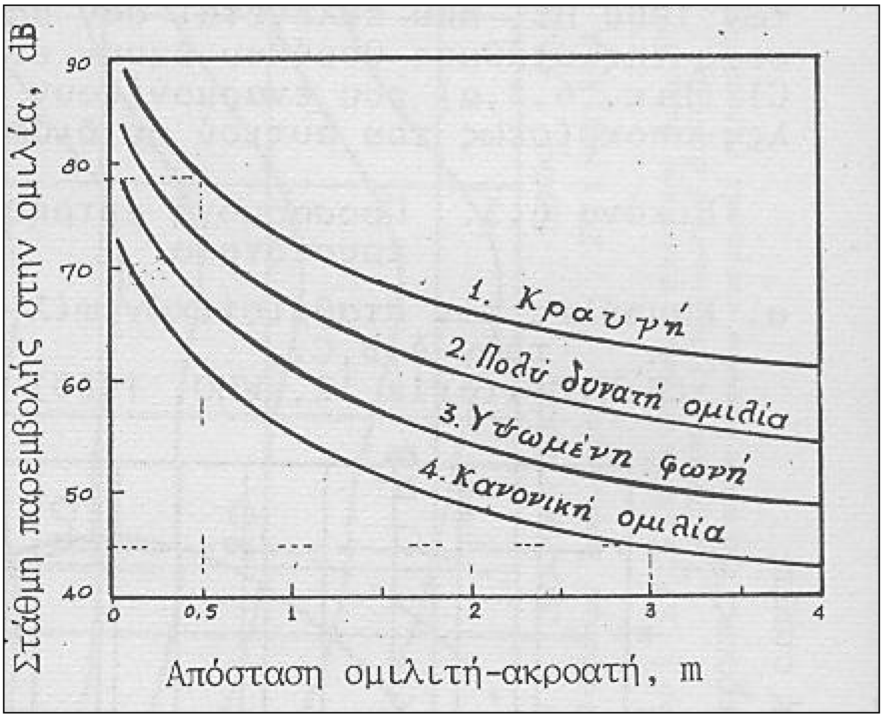
Το εξωτερικό και μέσο αυτί σπάνια τραυματίζονται από έντονο θόρυβο. Ωστόσο. Εκρηκτικοί ήχοι μπορούν να διαρρήξουν την τυμπανική μεμβράνη ή να μετατοπίσουν την αλυσίδα των ακουστικών οσταρίων. Η μόνιμη απώλεια ακοής που προκαλείται με την σύντομη έκθεση σε πολύ δυνατό θόρυβο ονομάζεται ακουστικό τραύμα [9]. Η ζημιά στο εξωτερικό ή μέσο αυτί μπορεί να συνοδεύει ή όχι το ακουστικό τραύμα. Το σχήμα 2.9 είναι ένα παράδειγμα ακουστικού γραφήματος που επιδεικνύει ένα ακουστικό τραύμα.



Σχήμα 2.9: Ένα παράδειγμα ακουστικού γραφήματος που επιδεικνύει ένα ακουστικό τραύμα [1].

2.7.2 Παρεμπόδιση ομιλίας

Όπως είναι γνωστό, ο θόρυβος μπορεί να παρεμβληθεί με την ικανότητα μας για επικοινωνία. Πολλοί θόρυβοι οι οποίοι δεν είναι αρκετά έντονοι ώστε να προκαλέσουν βλάβη στην ακοή μπορούν να παρεμβληθούν με την επικοινωνία διαμέσου του λόγου. Η παρεμπόδιση, ή κάλυψη (masking effect), είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του ομιλητή και του ακροατή και τα συστατικά συχνότητας των προφερόμενων λέξεων. Το επίπεδο της παρεμπόδισης συνομιλίας (Speech Interference Level, SIL) αναπτύχθηκε ως ένα μέτρο της δυσκολίας στη επικοινωνία που θα μπορούσε να είναι αναμενόμενο με διάφορα επίπεδα περιβάλλοντος θορύβου (background noise). Είναι πιο εύκολο να γίνεται λόγος με τους όρους των A-σταθμισμένων επιπέδων περιβάλλοντος θορύβου και της ποιότητας της επικοινωνίας μέσω της ομιλίας (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: Παρεμπόδιση επικοινωνίας [2].

2.7.3 Ψυχολογικά η συγκινησιακά αποτελέσματα

Παρ' ότι έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές συσχέτιση μεταξύ έκθεσης σε υψηλής στάθμης επαγγελματικό θόρυβο και νευρώσεων ή ερεθιστικότητας και ακόμη μεταξύ θορύβου περιβάλλοντος και ψυχικής υγείας, δεν φαίνεται ότι ο θόρυβος προκαλεί άμεσα ψυχικά νοσήματα. Μπορεί όμως να επιταχύνει και εντείνει την εκδήλωση λανθάνουσας νευρώσεως ή να αυξήσει υφιστάμενες συγκινησιακές διαταραχές (emotional disorders).

Ο θόρυβος προκαλεί δυσανασχέτηση και ερεθιστικότητα στα άτομα, μπορεί να οξύνει τις σχέσεις με τους άλλους, ελαττώνει την ανεκτικότητα στις αντίθετες και την απόδοση στην εργασία, προκαλεί ανωμαλίες και λάθη κατά την εκτέλεση λεπτών εργασιών, δυσχεραίνει την εκμάθηση στα παιδιά και καθυστερεί την αντίληψη των γεγονότων, π.χ σημάτων τροχαίας (κίνδυνος ατυχημάτων). Τα άτομα, που δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τον θόρυβο, στρέφουν την οργή τους εναντίον των άλλων και γίνονται φιλόνικοι και κακοδιάθετοι, αν και όχι υποχρεωτικά βίαιοι.

Εξάλλου ο θόρυβος επηρεάζει σοβαρά τον ύπνο, είτε με δυσκολία να αποκοιμηθεί το άτομο, είτε με αφύπνιση, είτε τέλος με διαταραχές και μετατροπή του ύπνου σε από βαθύ σε ελαφρότερο στάδιο, που είναι λιγότερο ξεκούραστο. Τα προβλήματα του ύπνου οδηγούν πολλά άτομα να κάνουν χρήση ηρεμιστικών και υπνωτικών φαρμάκων. Ο ανεπαρκής ύπνος ελαττώνει την απόδοση στην εργασία και εκθέτει γενικά τη υγεία σε κινδύνους. Πάντως πρέπει να σημειωθεί το άλλο άκρο, η έλλειψη δηλαδή αισθητού θορύβου π.χ 10 db(A) σε ηχοαπορροφητικό περιβάλλον δημιουργεί δυσάρεστο αίσθημα κενού και σε ένα βαθμό εντύπωση ανυπαρξίας [2].

2.7.4 Άλλα φυσιολογικά αποτελέσματα

Ο θόρυβος ανάλογα με την έντασή του μπορεί να προκαλέσει ποικιλία βιολογικών ανακλαστικών και αντιδράσεις, που επηρεάζουν την φυσιολογική λειτουργία πολλών οργάνων, με αποτέλεσμα:

- Αύξηση της αρτηριακής πιέσεως και του ρυθμού λειτουργίας της καρδιάς.
- Επιτάχυνση της αναπνοής
- Σύσπαση των μυών
- Πεπτικές διαταραχές, με πιθανό αποτέλεσμα έλκος
- Έκκριση ορμονών
- Δημιουργία κοπώσεως
- Επίδραση στη ισορροπία
- Άμεση διέγερση του εμβρύου και επίδραση στην κανονική του ανάπτυξη, είτε λόγω ανεπάρκειας εκκρίσεως ορμονών, είτε λόγω συσπάσεως της μητρικής αρτηρίας, που τροφοδοτεί με θρεπτικά υλικά και οξυγόνο το έμβρυο, με αποτέλεσμα λιποβαρή νεογέννητα παιδιά (κάτω των 2 ½ kg). Οι παρατηρήσεις προέρχονται από Ιαπωνική μελέτη σε περισσότερες από 1000 γεννήσεις, με υψηλό ποσοστό λιποβαρών νεογέννητων, σε θορυβώδεις περιοχές [2].

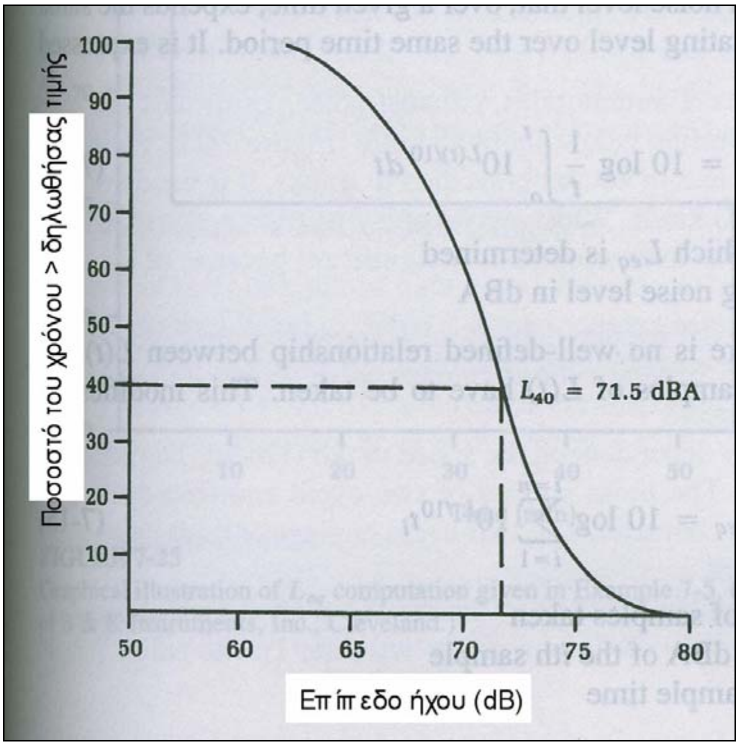
2.8 Συστήματα κατάταξης

2.8.1 Στόχοι ενός συστήματος κατάταξης

Ένα ιδανικό σύστημα κατάταξης του θορύβου είναι αυτό το οποίο επιτρέπει οι μετρήσεις από έναν μετρητή επιπέδου ήχου ή αναλυτή, να συνοψίζονται περιεκτικά και παράλληλα να αντιπροσωπεύουν την έκθεση στον θόρυβο με έναν τρόπο που έχει σημασία. Το ιδανικό σύστημα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την συχνότητα. Θα πρέπει να διαχωρίζει τον θόρυβο κατά τη νύχτα και την ημέρα και τέλος θα πρέπει να είναι ικανό να περιγράφει την αθροιστική έκθεση στον θόρυβο. Ένα στατιστικό σύστημα μπορεί να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις. Η πρακτική δυσκολία με ένα στατιστικό σύστημα κατάταξης είναι ότι θα αποδίδει ένα μεγάλο σετ παραμέτρων για κάθε τοποθεσία μέτρησης. Μία μεγαλύτερη παράταξη αριθμών θα χρειαζόταν για να χαρακτηριστεί μία γειτονιά. Είναι πρακτικά αδύνατον μία τόσο μεγάλη παράταξη αριθμών να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην επιβολή. Κατά συνέπεια έχει υπάρξει προσπάθεια να καθοριστεί μία μέτρηση μοναδικού αριθμού της έκθεσης σε θόρυβο. Οι ακόλουθες παράγραφοι περιγράφουν ένα από τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στο παρόν [1].

2.8.2 Η θεώρηση L_N

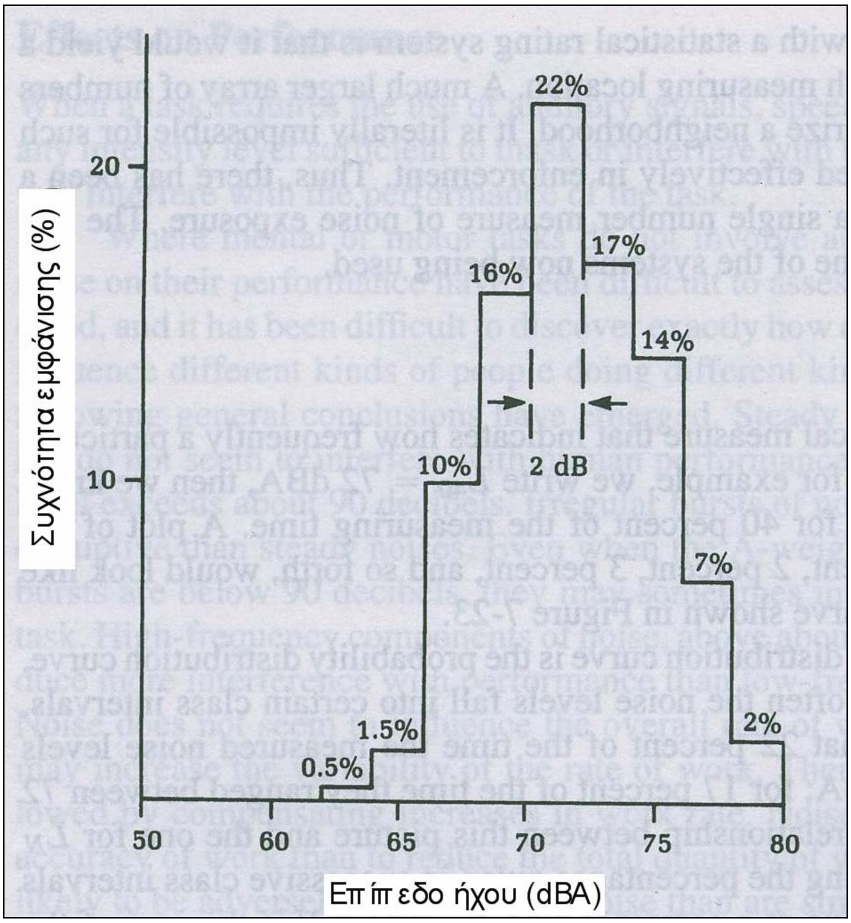
Η παράμετρος L_N είναι ένα στατιστικό μέτρο που υποδεικνύει πόσο συχνά ένα συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου υπερβαίνεται. Εάν για παράδειγμα, γράφεται L_{40}= 72 dB(A), τότε εννοείται ότι τα 72 dB(A) υπερβαίνονται για το 40% του χρόνου μέτρησης. Ένα γράφημα του L_N ως προς N όπου N=1%,2%,3% κτλ θα έμοιαζε με την αθροιστική καμπύλη κατανομής που φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Αθροιστική καμπύλη κατανομής [1].

Συμμαχική με την αθροιστική καμπύλη κατανομής είναι η καμπύλη κατανομής πιθανοτήτων. Μια γραφική παράσταση αυτής δείχνει πόσο συχνά τα επίπεδα θορύβου πέφτουν σε ορισμένα διαστήματα. Στο σχήμα 2.12 μπορούμε να δούμε ότι για το 22% του χρόνου τα μετρούμενα επίπεδα θορύβου κυμαίνονταν μεταξύ 70 και 72 dB(A). Για 17% του χρόνου κυμαίνονταν μεταξύ 72 και 74 dB(A) κοκ. Η σχέση μεταξύ αυτής της εικόνας και αυτής του L_N είναι αρκετά απλή. Με την πρόσθεση των ποσοστών που δίνονται στα διαδοχικά διαστήματα από τα δεξιά προς τα αριστερά, μπορούμε να φτάσουμε σε ένα αντίστοιχο L_N όπου N είναι το άθροισμα των ποσοστών και L είναι το χαμηλότερο όριο του πιο αριστερού διαστήματος που προστίθεται, κατά συνέπεια:

$$L(2+7+14+17)=72 \text{ dB(A)}$$



Σχήμα 2.12: Γράφημα κατανομής συχνοτήτων [1].

2.8.3 Η θεώρηση L_{eq}

Το ισοδύναμο συνεχές ενεργειακό επίπεδο (L_{eq}) μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μεταβλητό επίπεδο θορύβου. Αποτελεί το σταθερό επίπεδο θορύβου το οποίο, σε δεδομένο χρονικό διάστημα, αποδίδει το ίδιο ποσό ενέργειας όσο και το μεταβλητό επίπεδο στην ίδια χρονική περίοδο. Εκφράζεται από τη σχέση [1] :

$$L_{eq} = 10\log\frac{1}{t}\int_0^t 10^{L(t)10}\,dt$$

όπου t= ο χρόνος στον οποίο προσδιορίζεται το L_{eq}

L(t)= το χρονικά μεταβαλλόμενο επίπεδο θορύβου σε dB(A)

Γενικά, δεν υπάρχει καλά ορισμένη σχέση μεταξύ του L(t) και του χρόνου, και έτσι μία σειρά διακριτών δειγμάτων του L(t) πρέπει να ληφθούν. Αυτό μετατρέπει την εξίσωση σε:

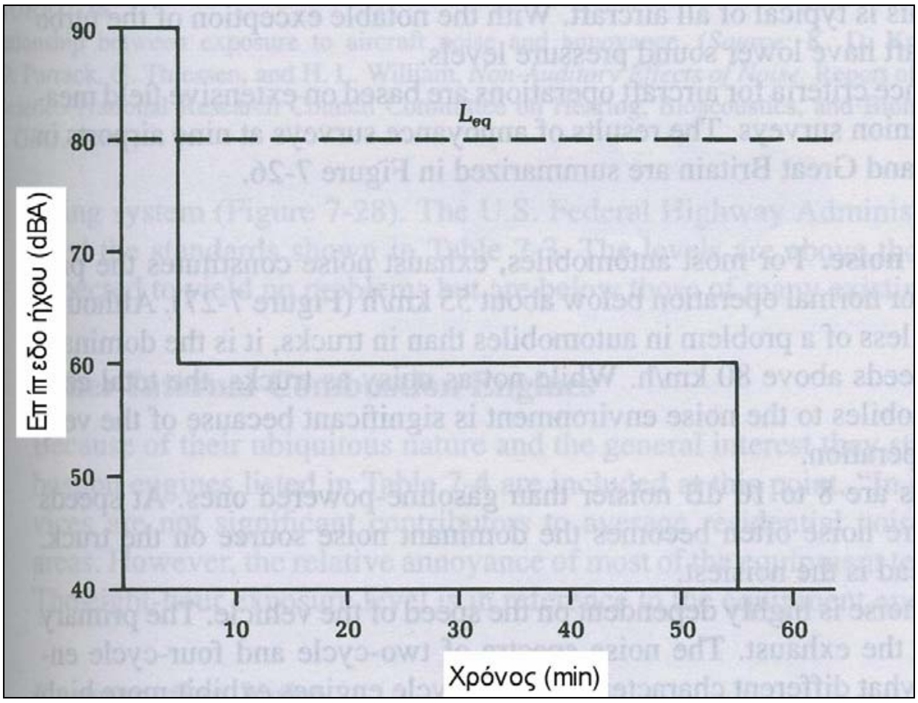
$$L_{eq} = 10\log\sum_{i=1}^{i=n} 10^{L_i/10}\,t_i$$

όπου n= ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται

L_i= το επίπεδο θορύβου σε dB(A) του i δείγματος

t_i= τμήμα του συνολικού χρόνου δειγματοληψίας

Το σχήμα 2.13 παρουσιάζει γραφικά τον υπολογισμό του L_{eq}. Το ισοδύναμο επίπεδο θορύβου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στη Γερμανία το 1965 ως μία κατάταξη ειδική για την αξιολόγηση της επίδρασης του αεροπορικού θορύβου στους γείτονες των αεροδρομίων. Χρησιμοποιείται και κατάταξη των υποκειμενικών επιδράσεων και άλλων μεταβλητών θορύβων όπως ο κυκλοφοριακός και ο βιομηχανικός θόρυβος [1].



Σχήμα 2.13: Γραφική επεξήγηση του L_{eq} [1].

Κεφάλαιο 3

Ελληνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται η νομοθεσία σχετικά με τον θόρυβο από την οδική κυκλοφορία τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ενδιαφέρον ιστορικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι η αρχαιότερη πιθανώς νομοθεσία για τον θόρυβο θεσπίστηκε στην Σύβαρη, αποικία των Αχαιών της Πελοποννήσου στον κόλπο του Τάραντα στην Ν. Ιταλία. Ιδρύθηκε τον 8^{o} π.Χ αιώνα και καταστράφηκε το 510 π.Χ από τους Κροτονιάτες. Όπως αναφέρει ο Αθήναιος (σοφιστής ή γραμματικός του Β' αιώνα μ.Χ) στους ''ΔΕΙΠΝΟΣΟΦΙΣΤΕΣ'' : ''Πρώτοι δε Συβαρίται και τας ποιούσας ψόφον τέχνας ουκ εώσιν επιδημείν τη πόλει (Σημ. τας ψοφούσας τέχνας εξώρισαν της πόλεως), οίον χαλκέων και τεκτόνων και των ομοίων, όπως αυτοίς πανταχόθεν αθόρυβοι ώσιν οι ύπνοι, ουκ εξήν δ' ουδ' αλεκτρυόνα εν τη πόλει τρέφεσθαι''. (Μετάφραση: Πρώτοι δε οι Συβαρίτες δεν επέτρεπαν να ασκούνται στην πόλη, οι τέχνες που προκαλούν θόρυβο (Σημ. τις θορυβώδεις τέχνες απομάκρυναν από την πόλη) , όπως των χαλκέων , των οικοδόμων και των παρόμοιων επαγγελμάτων, προκειμένου να είναι από κάθε πλευράς αθόρυβος ο ύπνος τους, δεν ήταν δε επιτρεπτό ούτε κόκορας να τρέφεται στη πόλη) [2].

3.1 Ο Νόμος 1650/86 <<Για την προστασία του περιβάλλοντος>> [10].

Το άρθρο 14 του Νόμου 1650/86 καθορίζει το ευρύτερο πλαίσιο της προστασίας από τον θόρυβο. Ο θόρυβος θεωρείται ως περιβαλλοντικός ρυπαντής και κατά συνέπεια το άρθρο ορίζει γενικά και σε ότι αφορά τα οχήματα [10]:

- Με προεδρικό διάταγμα <<καθορίζονται οι οριακές τιμές στάθμης θορύβου και δονήσεων σε χώρους κατοικίας ή συνάθροισης κοινού και τα όρια φόρτου θορύβου σε αντιθορυβικές ζώνες με κριτήριο τον περιορισμό της ενόχλησης και κατ' επέκταση την προστασία της υγείας, καθώς και οι τρόποι μέτρησής τους>> (Παρ. 1).
- Με κοινή απόφαση Υπουργού Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και του κατά περίπτωση αρμόδιου υπουργού καθορίζονται περιορισμοί στην παραγωγή εμπορία και χρήση κάθε είδους οχημάτων που κατά τη λειτουργία τους προκαλούν ηχητική ενόχληση. Επίσης με όμοια απόφαση λαμβάνονται μέτρα καταπολέμησης του θορύβου και από τα οχήματα που έχουν ήδη εισαχθεί ΄κατασκευασθεί στην Ελλάδα (Παρ. 2).
- Με κοινή απόφαση Υπουργού Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και του κατά περίπτωση αρμόδιου υπουργού <<ορίζονται αντιθορυβικές ζώνες κατά μήκος χώρων όπου κινούνται μέσα μεταφοράς, ιδίως δρόμων, λιμανιών, αεροδρομίων, γύρω από αρχαιολογικούς χώρους ή ιστορικούς χώρους και τοπία ή γύρω από χώρους κατοικίας, ανάπαυσης, νοσηλείας, εκπαίδευσης και πολιτιστικών εκδηλώσεων>> (Παρ. 6).
- Η παραπάνω απόφαση καθορίζει επίσης <<τα γεωγραφικά όρια της ζώνης, τα αντιθορυβικά μέτρα που πρέπει να ληφθούν, ώστε να

τηρούνται οι επιτρεπόμενοι φόρτοι θορύβου όπως καθορίζονται με τα προεδρικά διατάγματα της παρ.1>> (Παρ. 6).

3.2 Η Υπουργική Απόφαση 17252/92 <<Καθορισμός δεικτών και ανώτατων επιτρεπόμενων ορίων θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία σε οδικά και συγκοινωνιακά έργα>> [11].

Σκοποί της απόφασης 17252/92 αποτελούν:

1. Ο καθορισμός των πλέον αντιπροσωπευτικών δεικτών κυκλοφοριακού θορύβου για την ποσοτική και ποιοτική του αξιολόγηση.
2. Ο καθορισμός των ανώτατων οριακών τιμών των παραπάνω δεικτών και,
3. τα γεωγραφικά όρια εκατέρωθεν των οδικών και συγκοινωνιακών έργων, εντός των οποίων θα εφαρμόζονται οι διατάξεις της παρούσας απόφασης [11].

Το άρθρο 2 της απόφασης 17252/92 καθορίζει το πεδίο εφαρμογής της. Σύμφωνα με αυτό η απόφαση αφορά <<όλους τους νέους αυτοκινητόδρομους και τις προς βελτίωση υφιστάμενων τμημάτων πραγματοποιούμενες νέες χαράξεις καθώς και τις οδούς ταχείας κυκλοφορίας μαζί με τις σύνοδές τους εγκαταστάσεις και μόνο για τα τμήματα τους εκείνα που ευρίσκονται απόσταση μικρότερη η ίση των 200μ. από το κοντινότερο όριο εγκεκριμένου Σχεδίου Πόλης, της απόστασης μετρούμενης από το άκρο του καταστρώματος του οδικού άξονα ή εγκατάστασης.

Το άρθρο 3 ορίζει τους δείκτες Κυκλοφοριακού Θορύβου για την ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του θορύβου που προέρχεται από τα οδικά και συγκοινωνιακά έργα. Ως δείκτες καθορίζονται είτε

I. **Η Ισοδύναμη Συνεχής Στάθμη Θορύβου L_{eq}** (Equivalent Continuous sound Level), που εκφράζει την σταθερή εκείνη στάθμη θορύβου, η οποία σε ορισμένη χρονική περίοδο, έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με αυτό του πραγματικού θορύβου, σταθερού η μεταβαλλόμενου, κατά την ίδια χρονική περίοδο που για τους σκοπούς της παρούσης Απόφασης ορίζεται από 08.00 έως 20.00 ωρ. Και κατά συνέπεια ο δείκτης καθορίζεται ως L_{eq} (8-20 ωρ.), είτε
II. **Ο Δείκτης L_{10} (18 ώρες)** που είναι η αριθμητική μέση τιμή των 18 ξεχωριστών ωριαίων τιμών του L_{10} (από 6.00-24.00), δηλαδή της στάθμης η οποία υπερβαίνεται 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 dB(A).
Τέλος το άρθρο 4 ορίζει ως ανώτατα επιτρεπόμενα όρια των ανωτέρω περιγραφομένων δεικτών κυκλοφοριακού θορύβου τα ακόλουθα

- ✓ **Για τον δείκτη L_{eq} (8-20 ωρ.) τα 67 dB(A) και**
- ✓ **Για τον δείκτη L_{10} (18 ώρες) τα 70 dB(A)**

Μετρούμενο σε απόσταση 2,0 μ. από την πρόσοψη των πλησιέστερων, προς το οδικό έργο κτιρίων της πολεοδομικής ενότητας. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ειδική προστασία όπως χολικά συγκροτήματα, νοσοκομεία κτλ τα παραπάνω ανώτατα επιτρεπόμενα όρια δύνανται να μειώνονται κατά 5-10 dB(A) εντός του πεδίου εφαρμογής του άρθρου 2.

3.3 Η Οδηγία 2002/49/ΕΚ <<σχετικά με την αξιολόγηση και διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου>> [12].

Στόχος της οδηγίας 2002/49/ΕΚ αποτελεί όπως αυτό εκφράζεται σαφώς στο άρθρο 1 <<ο καθορισμός μίας κοινής προσέγγισης για την αποφυγή, πρόληψη ή περιορισμό βάσει ιεράρχησης προτεραιοτήτων, των δυσμενών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένης της ενόχλησης από έκθεση στον περιβάλλοντα θόρυβο>>.

Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται προοδευτικά οι ακόλουθες δράσεις:

I. προσδιορισμός της έκθεσης στον περιβάλλοντα θόρυβο με χαρτογράφηση θορύβου, σύμφωνα με κοινές στα κράτη μέλη μεθόδους αξιολόγησης.
II. μερίμνα ώστε να είναι διαθέσιμες στο κοινό πληροφορίες σχετικά με τον περιβάλλοντα θόρυβο και τις επιδράσεις του
III. θέσπιση σχεδίων δράσης από τα κράτη μέλη, βασισμένων στα αποτελέσματα της χαρτογράφησης του θορύβου, με στόχο την πρόληψη και τον περιορισμό του περιβάλλοντος θορύβου όπου χρειάζεται, ιδίως όπου τα επίπεδα έκθεσης μπορούν να έχουν επιβλαβείς επιδράσεις στην υγεία των ανθρώπων, καθώς και τη διαφύλαξη της ηχητικής ποιότητας του περιβάλλοντος όπου είναι καλή.

Το άρθρο 2 της οδηγίας περιγράφει το πεδίο εφαρμογής της το οποίο ορίζεται ότι καλύπτει τον θόρυβο στον οποίο εκτίθενται οι άνθρωποι σε <<περιοχές πυκνής δόμησης, σε δημόσια πάρκα ή άλλες ήσυχες περιοχές πολεοδομικών συγκροτημάτων, σε ήσυχες περιοχές της υπαίθρου, κοντά σε σχολεία κοντά σε νοσοκομεία, καθώς και κοντά σε άλλα κτίρια και περιοχές ευαίσθητες σε θορύβους>>.

Το άρθρο 3 περιέχει τους βασικούς ορισμούς για τους σκοπούς της οδηγίας.

Τα άρθρα 4,5 και 6 ορίζουν ότι:

Τα κράτη μέλη ορίζουν, στα ενδεδειγμένα επίπεδα, τις αρμόδιες αρχές και τους υπεύθυνους φορείς για την εφαρμογή της παρούσας οδηγίας, και ιδίως τις αρχές τις επιφορτισμένες με:

α) την εκπόνηση και, ενδεχομένως, την έγκριση χαρτών θορύβου και σχεδίων δράσης για τα πολεοδομικά συγκροτήματα, τους μεγάλους οδικούς και σιδηροδρομικούς άξονες και τα μεγάλα αεροδρόμια-

β) τη συγκέντρωση χαρτών θορύβου και σχεδίων δράσης

Τα κράτη μέλη εφαρμόζουν τους δείκτες θορύβου L_{den}, και L_{night}. κατά τα αναφερόμενα στο παράρτημα 1 για την προετοιμασία και την αναθεώρηση της στρατηγικής χαρτογράφησης θορύβου σύμφωνα με το άρθρο 7. Μέχρις ότου καταστεί υποχρεωτική η χρησιμοποίηση των κοινών μεθόδων αξιολόγησης για τον προσδιορισμό των L_{den} και L_{night} τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν για το σκοπό αυτό υπάρχοντες εθνικούς δείκτες θορύβου και συναφή δεδομένα, τα οποία θα πρέπει να μετατρέπονται στους προαναφερόμενους δείκτες. Αυτά τα δεδομένα δεν πρέπει να είναι παλαιότερα των τριών ετών.

Το άρθρο 7 της οδηγίας ορίζει ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να μεριμνούν ώστε <<το αργότερο στις 30 Ιουνίου2007, να έχουν εκπονηθεί και, ενδεχομένως, εγκριθεί από τις αρμόδιες αρχές στρατηγικοί χάρτες θορύβου για την κατάσταση που επικρατούσε το προηγούμενο ημερολογιακό έτος σε όλα τα πολεοδομικά συγκροτήματα άνω των 250 000 κατοίκων, για όλους τους μεγάλους οξικούς άξονες, όπου καταγράφεται κυκλοφορία άνω των έξι εκατομμυρίων οχημάτων ετησίως, για όλους τους μεγάλους σιδηροδρομικούς άξονες όπου διακινούνται άνω των 60 000 συρμών ετησίως, και για όλα τα μεγάλα αεροδρόμια εντός των επικρατειών τους.

Το αργότερο σας 30 Ιουνίου 2005, και ακολούθως ανά πενταετία, τα κράτη μέλη γνωστοποιούν στην Επιτροπή τους μεγάλους οδικούς άξονες, όπου καταγράφεται κυκλοφορία άνω των έξι εκατομμυρίων οχημάτων ετησίως, τους μεγάλους σιδηροδρομικούς άξονες όπου διακινούνται άνω των 60 000 συρμών ετησίως, τα μεγάλα αεροδρόμια και τα πολεοδομικά συγκροτήματα άνω των 250 000 κατοίκων, εντός των επικρατειών τους>> [12].

Το άρθρο 8 ορίζει σαφώς πως τα κράτη μέλη θα πρέπει να μεριμνούν ώστε το αργότερο μέχρι τις 18 Ιουλίου 2008 να έχουν εκπονηθεί από τις αρμόδιες αρχές σχέδια δράσης για τη διαχείριση εντός των επικρατειών τους, των προβλημάτων και των επιδράσεων του θορύβου.

Τα άρθρα 9 και 10 αναφέρονται στην ενημέρωση των πολιτών και τη συλλογή και δημοσίευση δεδομένων από τα κράτη μέλη και την επιτροπή.

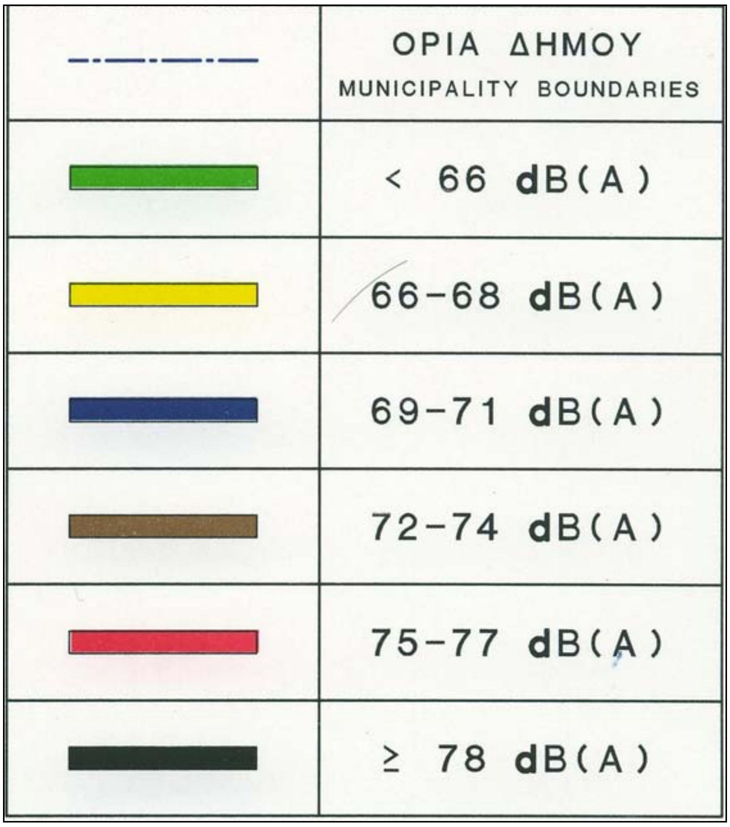
Το άρθρο 11 αναφέρεται στην επισκόπηση και τις εκθέσεις που υποβάλει η επιτροπή προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το συμβούλιο σχετικά με την εφαρμογή της παρούσας οδηγίας.

Συγκεκριμένα η έκθεση περιλαμβάνει <<μεταξύ άλλων εκτίμηση της ανάγκης δια περαιτέρω κοινοτικών δράσεων αναφορικά με τον περιβάλλοντα θόρυβο και ενδεχομένως προτείνει στρατηγικές για πτυχές όπως :¨

1. μακροπρόθεσμούς και μεσοπρόθεσμους στόχους μείωσης του αριθμού των ατόμων που υφίστανται επιβλαβή επίδραση από τον περιβάλλοντα θόρυβο, λαμβάνοντας ιδίως υπόψη τις κλιματολογικές και πολιτιστικές διαφορές
2. περαιτέρω μέτρα για τον περιορισμό του περιβάλλοντος θορύβου που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές, ιδίως από εξοπλισμό εξωτερικών χώρων, μεταφορικά μέσα και υποδομές και ορισμένες κατηγορίες βιομηχανικών δραστηριοτήτων, με βάση όσα μέτρα έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή ή είναι υπό συζήτηση προς έγκριση
3. προστασία ήσυχων περιοχών στη ύπαιθρο>>[12]

Ένα από τα παραδείγματα της εναρμόνισης της Ελλάδας προς τις κατευθύνσεις της οδηγίας 2002/49 αποτελεί και η χαρτογράφηση του θορύβου σε αστικές περιοχές. Ένα τμήμα χάρτη που απεικονίζει τη στάθμη του θορύβου στις οδούς του κέντρου των Αθηνών παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 ενώ στο σχήμα 3.2 δίνεται το υπόμνημα του χάρτη.

Σχήμα 3.1: Χαρτογράφηση αστικού θορύβου κέντρου Αθηνών [13].



Σχήμα 3.2: Υπόμνημα χάρτη σχήματος 3.1 [13].

3.4 Η ΚΥΑ 28340/2440/1992 <<Μέτρα για τον περιορισμό της ηχορύπανσης που προέρχεται από μοτοσικλέτες σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις των οδηγιών 78/1015, 87/56 και 89/238/ΕΟΚ>> [14].

Η ΚΥΑ 28340/2440/1992 προσδιορίζει τα απαραίτητα μέτρα για τον περιορισμό της ηχορύπανσης από μοτοσικλέτες. Στην απόφαση καθορίζονται τα όρια των ηχητικών επιπέδων των οποίων δεν επιτρέπεται υπέρβαση και τα οποία παρατίθενται στον πίνακα 3.1. Στην απόφαση περιγράφεται εκτενώς και η διαδικασία μέτρησης του θορύβου που προέρχεται από τις διατάξεις εξάτμισης των μοτοσικλετών.

Πίνακας 3.1: Οριακές τιμές ηχητικής στάθμης από μοτοσικλέτες [14].

Κατηγορίες μοτοσικλετών ανάλογα με τον κυβισμό (σε cm^3)	Οριακές τιμές του ηχητικού επιπέδου σε dB(A) και ημερομηνία έναρξης ισχύος για την έγκριση από εθνικής πλευράς ενός τύπου μοτοσικλέτας	
	Όρια σε dB(A)	Ημερομηνία ενάρξεως ισχύος για την έγκριση από εθνικής πλευράς
≤80	75	1-Οκτ-93
>80 ≤175	77	31-Δεκ-94
>175	80	1-Οκτ-93

3.5 Η ΚΥΑ 1011/22/19-Δ/1993 <<Αντικατάσταση των διατάξεων της απόφασης Γ-20/81567/898/1988 που αναφέρονται στην αποδεκτή ηχοστάθμη και στις διατάξεις εξατμίσεως των οχημάτων με κινητήρα>> [15].

Η ΚΥΑ 1011/22/19-Δ/1993 καθορίζει τις τιμές της αποδεκτής ηχοστάθμης που εκπέμπεται από οχήματα με μέγιστη από κατασκευής τους ταχύτητα πάνω από 25km/h. Στον πίνακα 3.2 παρατίθενται τα όρια τα οποία δεν πρέπει να υπερβαίνουν. Η μέθοδος μέτρησης παρατίθεται στο αντιστοιχο ΦΕΚ αναλυτικά

Πίνακας 3.2: Οριακές τιμές ηχητικής στάθμης οχημάτων εν κινήσει [15].

Κατηγορίες οχημάτων	Τιμή σε dB(A)
Οχήματα προοριζόμενα για τη μεταφορά προσώπων και περιέχοντα μέχρι εννέα θέσεις καθημένων, συμπεριλαμβανομένης και εκείνης του οδηγού	74
Οχήματα προοριζόμενα για τη μεταφορά προσώπων και εφοδιαμένα με άνω των εννέα θέσεις καθημένων, συμπεριλαμβανομένης και εκείνης του οδηγού, μέγιστης επιτρεπτής μάζας άνω των 3,5 τόνων και:	
>με κινητήρα ισχύος κάτω των 150 kW	78
> με κινητήρα ισχύος τουλάχιστον 150 kW	80
Οχήματα προοριζόμενα για τη μεταφορά προσώπων και εφοδιαμένα με άνω των εννέα θέσεις καθημένων, συμπεριλαμβανομένης και εκείνης του οδηγού, οχήματα προοριζόμενα για την μεταφορά εμπορευμάτων:	
>μέγιστης επιτρεπόμενης μάζας το πολύ 2 τόνων	76
>μέγιστης επιτρεπόμενης μάζας άνω των 2 τόνων και μέχρι 3,5 τόνους	77
Οχήματα προοριζόμενα για την μεταφορά εμπορευμάτων μέγιστης επιτρεπόμενης μάζας 'ανω των 3,5 τόνων:	77
>με κινητήρα ισχύος κάτω των 75 kW	78
>με κινητήρα ισχύος τουλάχιστον 75 kW αλλα κάτω των 150 kW	80
>με κινητήρα ισχύος τουλάχιστον 150 kW	

.

Κεφάλαιο 4

Θόρυβος από την Οδική Κυκλοφορία- Μέτρα αντιμετώπισης

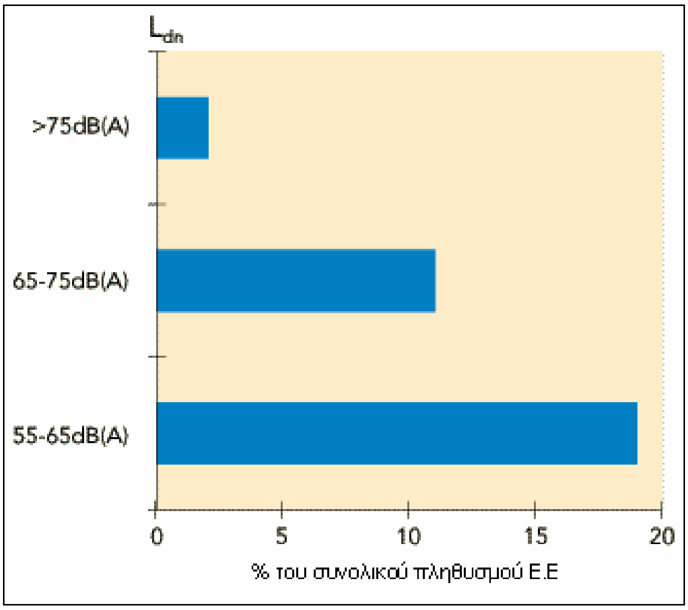
4.1 Εισαγωγή

Ο θόρυβος από την οδική κυκλοφορία αποτελεί ένα τυπικό πεδίο σύγκρουσης μεταξύ των ιδιωτικών αναγκών κίνησης και τις κοινωνικές φιλοδοξίες για λιγότερο θορυβώδεις τρόπους ζωής. Με περισσότερο από 80 εκατομμύρια πολίτες της Ε.Ε να υποφέρουν από απαράδεκτα υψηλά επίπεδα θορύβου υπάρχει μία ξεκάθαρη ανάγκη για τη Ευρώπη να αποκτήσει έναν ηγετικό ρόλο στην προώθηση νομοθεσίας με αντικειμενικούς σκοπούς, κοινών λύσεων και να επιτύχει μία κοινή κατανόηση της δυνατότητας για πρόοδο.

Το ενδιαφέρον της κοινής γνώμης δεν ήταν ποτέ τόσο μεγάλο, μερικώς και επειδή η συνολική αύξηση στην οδική κυκλοφορία έτεινα να εξισορροπεί με την πραγματική πρόοδο που επιτεύχθηκε από όλα τα τμήματα του τομέα των οδικών μεταφορών την τελευταία δεκαετία. Καθώς τα συστατικά του θορύβου από την οδική κυκλοφορία βρίσκονται κυρίως στον θόρυβο από το σύστημα προώθησης και στην αλληλεπίδραση μεταξύ δρόμου και ελαστικού, το μεγαλύτερο μέρος των μέτρων πρόληψης και θεραπείας αποτελείται από λιγότερο θορυβώδεις οδικές τεχνολογίες, συσκευές μείωσης θορύβου, στρατηγικές διαχείρισης κυκλοφοριακής κίνησης και μακροπρόθεσμες λύσεις σχεδιασμού κυκλοφοριακής κίνησης και χρήσης γης [16].

Η πραγματική πρόκληση κατά συνέπεια έγκειται στην αναγνώριση ενός συνδυασμού πραγματικών μέτρων που θα μειώσουν την συνολική εκπομπή θορύβου χωρίς να παρεμποδίσουν την κίνηση και τα αντίστοιχα κοινωνικοοικονομικά οφέλη. Παρότι ο θόρυβος αποτελεί μία υποκειμενική εμπειρία, είναι γενικά αποδεκτό ότι ένας ήχος 55dB(A) είναι ενοχλητικός ενώ ένα επίπεδο θορύβου της τάξης των 65 dB(A) θεωρείται αφόρητο. Με αυτό το μέτρο, και σύμφωνα με τις επίσημες στατιστικές, έως 250 εκατομμύρια Ευρωπαίοι υποφέρουν από οχλήσεις λόγω θορύβου, με ένα εκτιμούμενο κόστος στην κοινωνία της τάξης των 38 δις ευρώ [16].

Περίπου 120 εκατομμύρια άτομα στην Ε.Ε (περισσότερο από 30% του συνολικού πληθυσμού) είναι εκτεθειμένοι σε επίπεδα θορύβου από την οδική κυκλοφορία πάνω από 55 L_{dn} dB. Περισσότερα από 50 εκατομμύρια άτομα εκτίθενται σε επίπεδα θορύβου πάνω από 65 L_{dn} dB (Διάγραμμα 4.1) [17].



Διάγραμμα 4.1: Ποσοστό έκθεσης Ευρωπαϊκού πληθυσμού σε διάφορα επίπεδα θορύβου [17].

4.2 Πηγές του οδικού θορύβου

Ο θόρυβος που σχετίζεται με την ανάπτυξη των δρόμων έχει τέσσερις κύριες πηγές: α) τα οχήματα β) την τριβή μεταξύ των οχημάτων και της επιφάνειας του δρόμου γ) την οδηγική συμπεριφορά και δ) τις δραστηριότητες κατασκευής και συντήρησης [18].

4.2.1 Θόρυβος από τα οχήματα

Ο θόρυβος από τα οχήματα προέρχεται από τον κινητήρα, το σύστημα μετάδοσης, την εξάτμιση και την ανάρτηση και είναι μεγαλύτερος κατά την επιτάχυνση, σε ανηφόρες, κατά τη διάρκεια πέδησης, σε ανώμαλους δρόμους και σε κυκλοφοριακές συνθήκες σταματήματος-ξεκίνηματος. Η πτωχή συντήρηση των οχημάτων αποτελεί έναν παράγοντα που συνεισφέρει σε αυτή την πηγή θορύβου [18]. Ο θόρυβος διαφοροποιείται αναλόγως της κινητικής κατάστασης του οχήματος [19]. Πιο συγκεκριμένα:

Ένα μη εν κινήσει όχημα παράγει θόρυβο

- από τον κινητήρα (περίπου 78 dB (A))
- το σύστημα ψύξεως (φτερωτή) περίπου 82 dB (A)
- την εξάτμιση - 85 dB (A)
- τη διέλευση του αέρα μέσω του φίλτρου - 75 dB (A),

ενώ ένα εν κινήσει όχημα παράγει θόρυβο με

- την αεροδυναμική κίνηση του αμαξώματος (το μέγεθος εξαρτάται από τη διατομή κ.τ.λ.).
- την τριβή των ελαστικών - οδοστρώματος, κατά μέσο όρο 75 dB (A) για ταχύτητα < 60 km/h

• 95 dB (A) για ταχύτητα > 60 km/h [3].

Για τις εκπομπές θορύβου από τα οχήματα έχουν καθορισθεί ανώτατα όρια, με σκοπό τον περιορισμό του θορύβου στην πηγή (Πίνακας 4.1)

Πίνακας 4.1: Επιτρεπόμενη ένταση θορύβου οχημάτων [3].

Τυπος οχήματος	Ε.Ε	Η.Π.Α	Ελβετία	Ιαπωνία	Ο.Ο.Σ.Α (πρόταση)
Επιβατικά	77	-	75-77*	78	75
Φορτηγά ελαφρά (<3.5t)	78-79**	-	77-79*	78	75
Λεωφορεία (<3.5t)	78-79**	-	77-79*	78	75
Φορτηγά:					
Ισχύος μέχρι 150 kW	83	86	82	83	80
Άνω των 150 kW	84	86	84	83	80
Λεωφορεία ισχύος:					
<=150 kW	80	83	80	83	80
>150 kW	83	83	82	83	80
Μοτοσυκλετες 500cc	80	83	83	75	75
* οχήματα 4 ταχυτήτων ** αύξηση κατα 1dB(A) για οχήματα ντήζελ με άμεσο ψεκασμό Η μέτρηση της έντασης γίνεται σε απόσταση 7,5μ απο το όχημα και στη φάση επιτάχυνσης (ISOR362)					

Η τάση τα τελευταία χρόνια είναι τα επίπεδα θορύβου να μειωθούν. Σε αυτό συμβάλει και η μείωση του θορύβου στην πηγή (αυτοκίνητο) σύμφωνα με τα επιβαλλόμενα όρια στη βιομηχανία αυτοκινήτων [3], [20] (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2: Μεταβολή εκπομπής θορύβου οχημάτων [3].

	Γερμανία			Ιαπωνία		
Τυπος οχήματος	1970	1981	1985	1971	1979	1986
Επιβατικό	82	80	75	84	81	78
Λεωφορείο >3,5t	89	82	80	89	86	83
Φορτηγό μέχρι 3,5t	84	81	78	85	81	78
Φορτηγό άνω 12t	91	88	80	92	86	83

4.2.2 Θόρυβος από τον δρόμο

Ο θόρυβος τριβής από την επαφή μεταξύ των ελαστικών και της επιφάνειας του δρόμου συνεισφέρει σημαντικά στον συνολικό θόρυβο από την οδική κυκλοφορία. Το επίπεδο εξαρτάται από τον τύπο και την κατάσταση των ελαστικών και του οδοστρώματος. Ο θόρυβος τριβής είναι γενικά μεγαλύτερος σε μεγάλες ταχύτητες και κατά τη διάρκεια γρήγορης πέδησης [18]. Κατά μέσο όρο [3] :

- 75dB(A) για ταχύτητα < 60 km/h
- 95 dB(A) για ταχύτητα > 60 km/h

4.2.3 Θόρυβος από τη συμπεριφορά των οδηγών

Οι οδηγοί συνεισφέρουν στον οδικό θόρυβο με την χρήση της κόρνας, με τη δυνατή μουσική, με το να φωνασκούν και με το να προκαλούν τα ελαστικά τους να σκληρίζουν ως αποτέλεσμα ξαφνικού φρεναρίσματος η επιτάχυνσης.

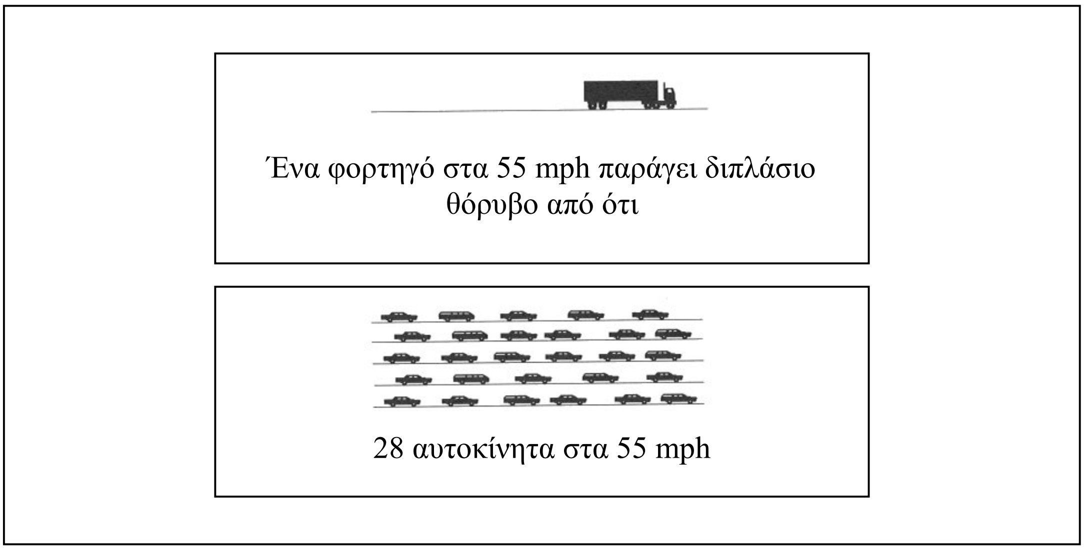
4.2.4 Θόρυβος από την κατασκευή και συντήρηση

Η κατασκευή και συντήρηση των δρόμων γενικά απαιτούν τη χρήση βαρέων οχημάτων, και παρόλο που αυτές οι δραστηριότητες μπορεί να είναι διαλείπουσες και περιορισμένες σε έκταση, συνεισφέρουν εντυπωσιακά ποσά θορύβου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξοπλισμού.

4.3 Παράγοντες που συνεισφέρουν στον κυκλοφοριακό θόρυβο.

4.3.1 Ο τύπος οχήματος

Οι διαφορετικοί τύποι οχημάτων παράγουν διαφορετικά επίπεδα θορύβου. Γενικά τα βαρέα οχήματα όπως τα μεταφορικά φορτηγά παράγουν περισσότερο θόρυβο από τα ελαφρά αυτοκίνητα (Σχήμα 4.1), και συχνά χρησιμοποιούν πέδηση μηχανής κατά την μείωση της ταχύτητάς τους. Τα πτωχά συντηρημένα οχήματα όπως αυτά με μη πλήρη συστήματα εξάτμισης ή φθαρμένα φρένα, είναι πιο θορυβώδη από τα καλά συντηρημένα. Επίσης ορισμένοι τύποι ελαστικών όπως τα ελαστικά χιονιού και εκτός δρόμου είναι εξαιρετικά θορυβώδη [18].



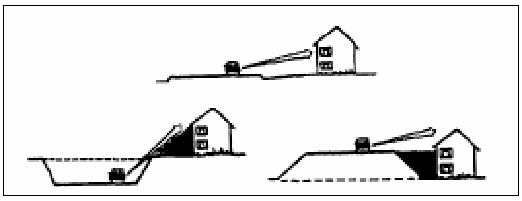
Σχήμα 4.1: Ακουστικό ισοδύναμο μεταξύ ελαφρών και βαρέων οχημάτων [21].

4.3.2 Η επιφάνεια του δρόμου

Τα φυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του δρόμου και του περιβάλλοντος χώρου παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του εξαγόμενου θορύβου. Οι καλά συντηρημένες ομαλές επιφάνειες είναι λιγότερο θορυβώδεις από ότι επιφάνειες ραγισμένες, με ζημιές και πρόχειρα επιδιορθωμένες. Οι σύνδεσμοι επέκτασης στις γέφυρες είναι ιδιαίτερα θορυβώδεις. Οι επιφάνειες πλησίον του δρόμου όπως χώμα με βλάστηση τείνουν να απορροφούν και να μετριάζουν τον θόρυβο, ενώ οι ανακλαστικές επιφάνειες όπως το τσιμέντο ή η άσφαλτος δεν έχουν κάποια ωφέλιμη λειτουργία [18].

4.3.3 Η γεωμετρία του δρόμου

Η κάθετη ευθυγράμμιση του δρόμου μπορεί να επηρεάσει τη ευκολία με τη οποία ο θόρυβος μπορεί να μεταδοθεί στους αποδεκτές πλησίον του δρόμου. Για παράδειγμα, η χωροθέτηση ενός δρόμου σε ένα άνοιγμα κάτω από το επίπεδο του εδάφους ή σε μία υπερυψωμένη πλατφόρμα μπορεί να εξυπηρετεί ώστε να μην επηρεάζονται οι αποδέκτες. Αυτή η ιδέα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Σχετικές θέσεις δρόμου-αποδέκτη και αντίστοιχη επίδραση [18].

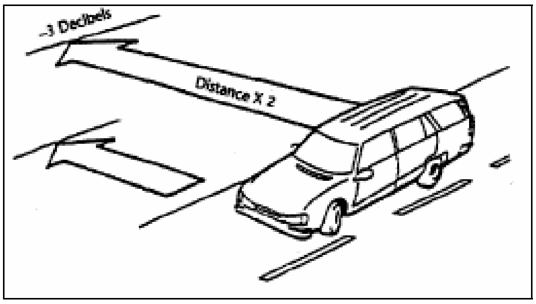
Επίσης, η παρουσία φυσικών ηχοπετασμάτων κατά μήκος του δρόμου μπορούν να μειώσουν τον θόρυβο. Τα οχήματα τείνουν να παράγουν τον περισσότερο θόρυβο κατά την κατάβαση και ανάβαση απότομων πλαγιών και σε απότομες στροφές. Αυτό σημαίνει ότι δρόμοι που έχουν τα άνωθεν χαρακτηριστικά θα τείνουν να είναι περισσότερο θορυβώδεις [18].

4.3.4 Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες

Οι καιρικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, και η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου μπορούν να παίξουν κάποιον ρόλο στον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο οι διάφορες περιοχές θα επηρεαστούν από τον οδικό θόρυβο. Η θερμοκρασία και η υγρασία καθορίζουν την πυκνότητα του αέρα, που με τη σειρά της επηρεάζει τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων. Τα περιβάλλοντα επίπεδα θορύβου, που σχετίζονται με την βιομηχανική και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, επηρεάζουν την αντίληψη του μεγέθους του θορύβου. Η τοπογραφία μπορεί επίσης να βοηθήσει στον καθορισμό της επίδρασης του θορύβου. Για παράδειγμα, ο θόρυβος που προέρχεται από δρόμους σε κοιλάδες βουνών ή φαράγγια τείνει να είναι πιο παρατηρήσιμος από αυτόν ενός δρόμου σε ένα επίπεδο τοπίο επειδή ο θόρυβος ανακλάται στης επιφάνειες της κοιλάδας. Με τον ίδιο τρόπο λόφοι και λοφίσκοι τείνουν να λειτουργούν ως φυσικά ηχοπετάσματα [18].

4.3.5 Χωρικές σχέσεις

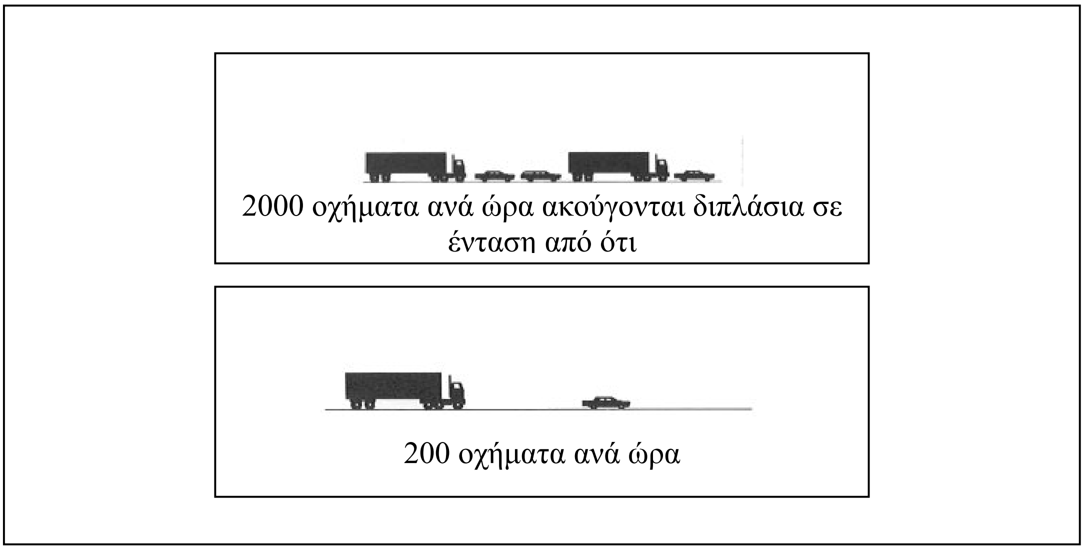
Ίσως ο πιο καθοριστικός παράγοντας της επίδρασης του θορύβου είναι η χωρική σχέση μεταξύ του δρόμου και των πιθανών αποδεκτών. Όσο πιο κοντά είναι ο δρόμος στους αποδέκτες, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση (Σχήμα 4.3). Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του πληθυσμού πλησίον του δρόμου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ατόμων που είναι πιθανό να είναι αποδέκτες, και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη η επίδραση [18].



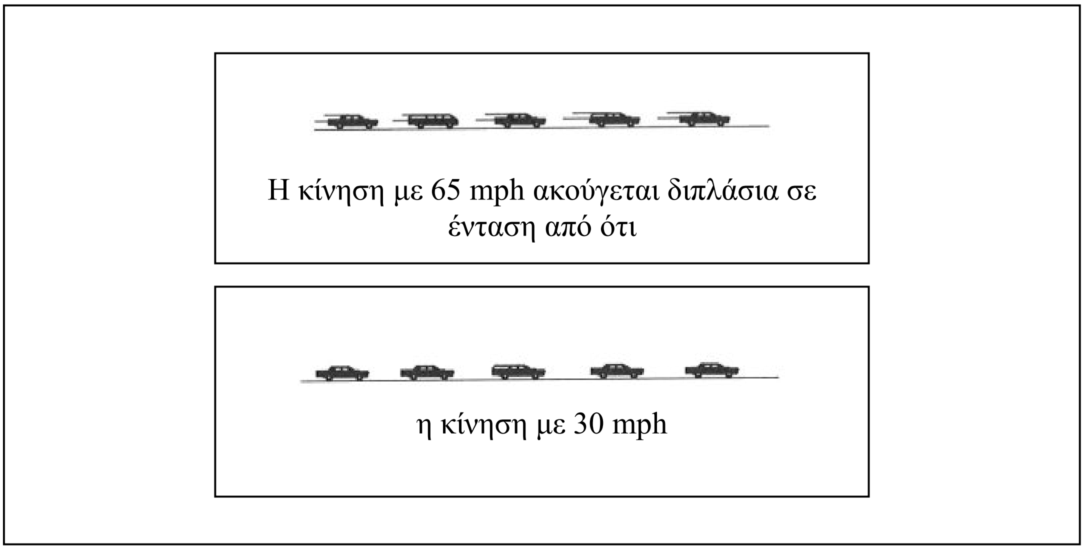
Σχήμα 4.3: Ο διπλασιασμός της απόστασης δρόμου-αποδέκτη έχει αποτέλεσμα την μείωση κατά 3 dB(A) του επιπέδου του θορύβου [18].

4.3.6 Το κυκλοφοριακό ρεύμα

Η παραγωγή θορύβου από ένα συγκεκριμένο κυκλοφοριακό ρεύμα καθορίζεται από διάφορους παράγοντες: Ο τύπος των οχημάτων στο κυκλοφοριακό ρεύμα και η συντήρησή τους, ο αριθμός των οχημάτων που περνούν στην μονάδα του χρόνου (Σχήμα 4.4), η σταθερότητα της ροής (τα οχήματα τείνουν να είναι πιο θορυβώδη σε κυκλοφορία με σταση-επανεκίνηση) και η ταχύτητα της κυκλοφορίας (υψηλότερη σε μεγαλύτερες ταχύτητες) (Σχήμα 4.5) [18].



Σχήμα 4.4: Κυκλοφοριακός φόρτος και επίπεδο θορύβου [21].



Σχήμα 4.5: Ταχύτητα οχημάτων και επίπεδο θορύβου [21].

4.4 Μέτρα μείωσης του κυκλοφοριακού θορύβου.

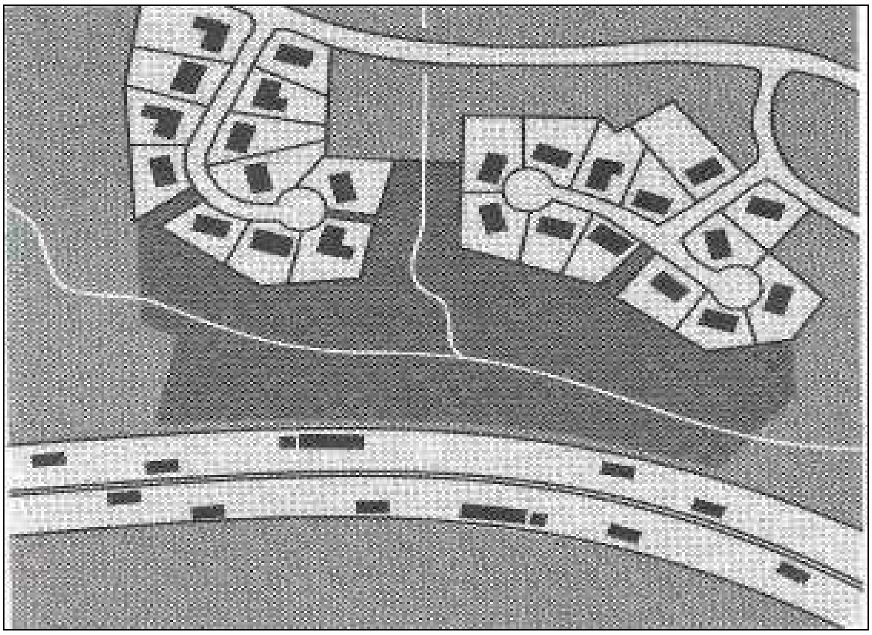
Τα μέτρα αντιμετώπισης του θορύβου από την οδική κυκλοφορία είναι στενά συνδεδεμένα με τα αίτια και τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία του θορύβου. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται όσο γίνεται πιο αναλυτικά.

4.4.1 Μείωση στην πηγή

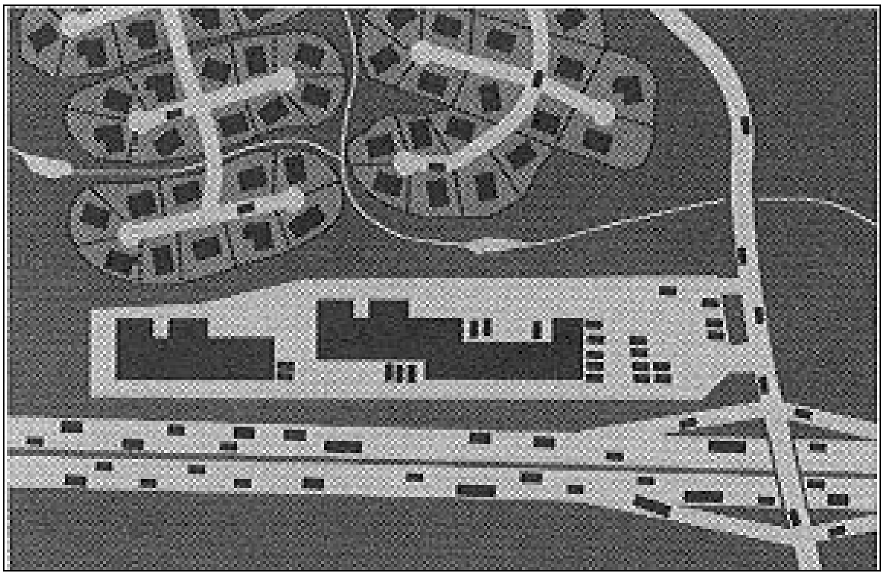
Ο κυκλοφοριακός θόρυβος μπορεί να μειωθεί στην πηγή του: τα οχήματα. Για παράδειγμα, τα οχήματα μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν κουβούκλια για τον κινητήρα, ανεμιστήρες που διακόπτουν όταν δεν χρειάζονται, και καλύτερους σιγαστήρες [21].
Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν στρατηγικές διαχείρισης κυκλοφορίας και να παίξουν έναν σημαντικό ρόλο στην μείωση του θορύβου στην πηγή (π.χ νυκτερινό όριο ταχύτητας, <<ήσυχες περιοχές>>, κτλ) [22].

4.4.2 Μείωση μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και πολεοδομικής διαμόρφωσης

Ένα σημαντικό μέτρο μείωσης του κυκλοφοριακού θορύβου αποτελεί η δημιουργία ζωνών μόνωσης σε καινούργιους ή παλιούς αυτοκινητόδρομους. Οι ζώνες μόνωσης (Buffer zones) είναι μη ανεπτυγμένοι ανοικτοί χώροι με σύνορο έναν αυτοκινητόδρομο. Οι ζώνες μόνωσης δημιουργούνται, όταν ο υπεύθυνος του αυτοκινητοδρόμου αγοράζει γη , ή δικαιώματα εκμετάλλευσης, ώστε να μην υπάρχει η πιθανότητα κατασκευής κατοικιών που θα επηρεάζονταν από υψηλά επίπεδα θορύβου λόγω του αυτοκινητόδρομου (Σχήματα 4.6 & 4.7). Ένα επιπρόσθετο κέρδος είναι η βελτίωση του περιβάλλοντος χώρου. Συχνά όμως λόγω των τεράστιων εκτάσεων γης που πρέπει να αγοραστούν και της γειτνίασης του αυτοκινητοδρόμου σε πολλές περιπτώσεις με κατοικίες, η δημιουργία ζωνών μόνωσης καθίσταται αδύνατη [21].



Σχήμα 4.6: Κενός χώρος μπορεί να αφεθεί ως ζώνη μόνωσης μεταξύ κατοικιών και ενός αυτοκινητοδρόμου [21].



Σχήμα 4.7: Λιγότερο ευαίσθητα σε θόρυβο κτίρια μπορούν να τοποθετηθούν δίπλά σε έναν αυτοκινητόδρομο, με τις κατοικίες να βρίσκονται πιο μακριά [21].

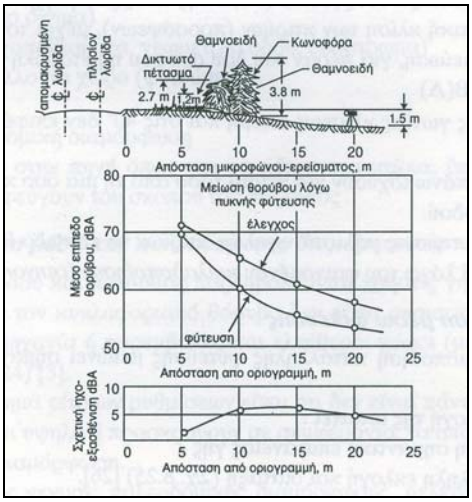
Επίσης, έχει μελετηθεί η περίπτωση της τοποθέτησης των κτιρίων όχι παράλληλα προς τον άξονα της οδού αλλά υπό κλίση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η θεωρητική ανάλυση οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα [3], [23]:

- Για κλίση της πρόσοψης του κτιρίου ως προς τον άξονα της οδού <2,5^o το έδαφος επιδρά ευεργετικά (λόγω απορρόφησης)
- Για σημαντική κλίση των κτιρίων (προσόψεων), μέχρι τον 3^o όροφο επέρχεται μείωση, ενώ πέραν του 3^{ου} ορόφου η μεταβολή είναι μικρότερη του 1dB(A)
- Αύξηση της γωνίας κλίσεως ακόμη και στις 40^o δεν επιφέρει σημαντική βελτίωση

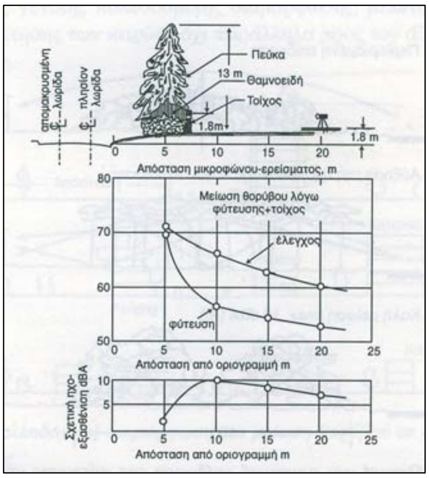
4.4.3 Μείωση μέσω κατάλληλης φύτευσης

Η χρήση κατάλληλης φύτευσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πιο καλαίσθητους τρόπους μείωσης της στάθμης ηχορύπανσης. Η αποτελεσματικότητα της χρήσης των φυτών στον έλεγχο θορύβων εξαρτάται από αυτή καθ' αυτή τη φύση των θορύβων, το είδος των φυτών, τη δομή της φύτευσης και από τις κλιματολογικές συνθήκες . Εκτιμάται ότι κατά μέσο όρο το δάσος μειώνει τους θορύβους κατά 7 dB(A) ανά 30,00 μ. απόστασης. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το είδος βλάστησης, το ύψος των δέντρων και τη δομή του δάσους. Τη μεγαλύτερη μείωση παρουσιάζουν τα κηπευτά δάση (8-12 dB(A)), τα δάση δηλαδή, που περιλαμβάνουν δένδρα διαφορετικών ηλικιών και επομένως διαφορετικού ύψους και τη μικρότερη, ομοιόμορφες συστάδες (8-12 dB(A)). Έρευνες του Γεωπονικού Πανεπιστημίου στον εθνικό κήπο (Papafotiou et al. 2004), απέδειξαν ότι πυκνή βλάστηση από δένδρα και θάμνους μειώνουν κατά 2dB(A) έως 4dB(A) περισσότερο το κυκλοφοριακό θόρυβο σε σχέση με εκτάσεις που καλύπτονται με χλοοτάπητα και χαμηλή βλάστησης. Οι γερμανικοί κανονισμοί προστασίας (Schuizgenen Verkehrslarm, 1988) αναφέρουν ότι για να πραγματοποιηθεί μια αντιληπτή μείωση κυκλοφοριακού θορύβου σε σύγκριση με την ελεύθερη διάδοση του θορύβου, απαιτείται πυκνή βλάστηση συμπαντικού βάθους με αρκετό ύψος και συνεχίζουν πως όταν η διάδοση του ήχου γίνεται μέσα από πυκνή βλάστηση με φυλλωσιά, υπολογίζεται μια πρόσθετη μείωση της τάξης του 1,5 dB(A) κάθε 10 μέτρα βάθους βλάστησης. Η μείωση του θορύβου από τη φύτευση εξετάστηκε από διάφορους ερευνητές όπως ο Heisler et al. (1987), Aylor (1972) [24]. Αείφυλλα είδη είναι περισσότερο αποτελεσματικά για τη μείωση θορύβων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους [25]. Οι γαλλικοί κανονισμοί (Guide de bruit des Transport Terrestres), βασισμένοι στα αποτελέσματα του εθνικού κέντρου δασικών ερευνών της Γαλλίας δέχονται ότι οι ζώνες πρασίνου μπορούν να επιτύχουν σημαντικές μειώσεις του κυκλοφοριακού φόρτου κατά 5-10 dB(A) ανά 10 μέτρα φύτευσης. Ο συνδυασμός δε φυτεύσεων και αντιθορυβικών πετασμάτων διαφόρων τύπων κατασκευής, μπορεί να είναι απολύτως αποτελεσματικός, χωρίς βέβαια η αποτελεσματικότητα αυτή να ξεπερνά το 1,5 dB (A) ανά 10 μ. φύτευσης [25]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών της διεθνούς εμπειρίας, διαπιστώθηκε ότι οι ζώνες πρασίνου μπορούν να ενταχθούν όχι μόνο στο πλαίσιο των προσπαθειών για τη μείωση του θορύβου, αλλά και να δώσουν μια λύση στο πρόβλημα της οπτικής ρύπανσης που προκαλούν τα συνήθη αντιθορυβικά πετάσματα [24].

Στο σχήμα 4.8α,β φαίνεται η επιτυγχανόμενη μείωση του επιπέδου θορύβου, αναλόγως του είδους της φύτευσης και της απόστασης από την οδό [3],[26]



Σχήμα 4.8α: Επίπεδο θορύβου και μείωση αναλόγως του τύπου της φύτευσης [3].



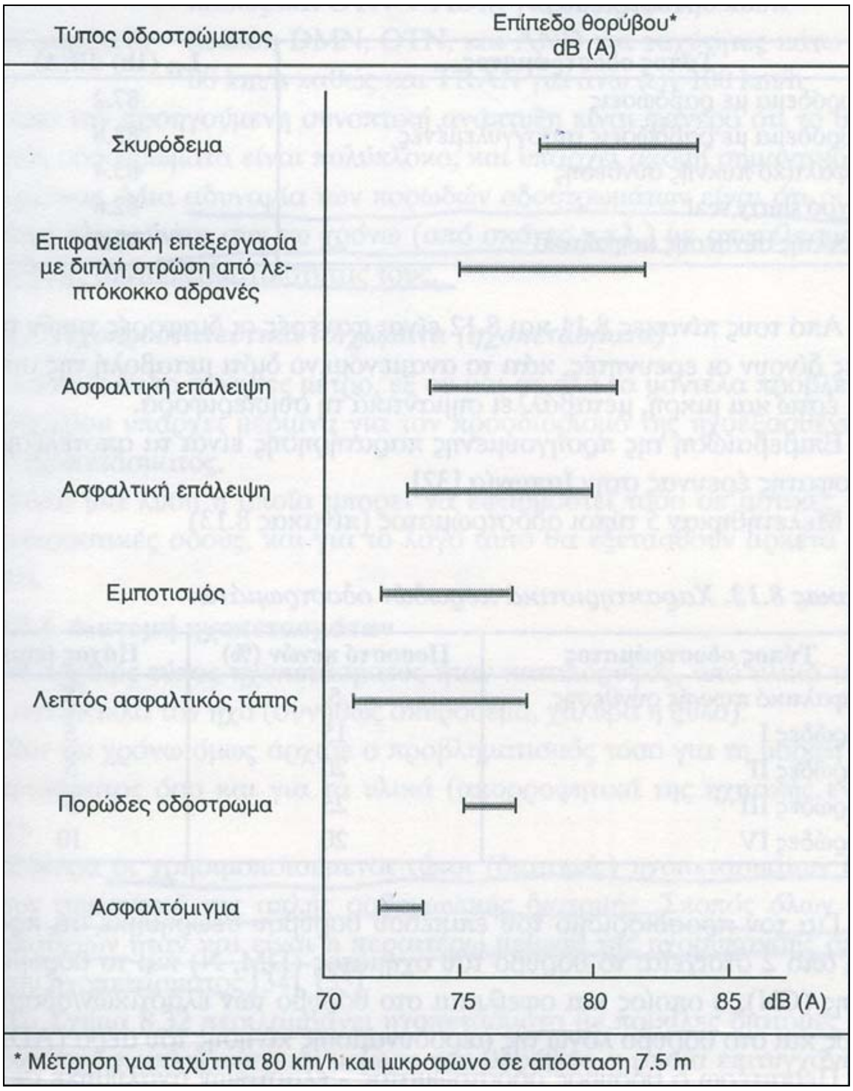
Σχήμα 4.8β: Επίπεδο θορύβου και μείωση αναλόγως του τύπου της φύτευσης [3].

Επίσης και άλλες μελέτες έχουν εξετάσει την ακουστική επίδοση της βλάστησης στην μείωση του θορύβου στην υπό μόνωση περιοχή [26-31],[32]. Αυτές έχουν δείξει ότι η μείωση στο θόρυβο είναι μικρή εκτός εάν η ζώνη βλάστησης είναι πλατιά. Για παράδειγμα ο Huddart [30] ότι σε σύγκριση με τις λιβαδικές εκτάσεις μια πυκνά φυτεμένη ζώνη δέντρων πάχους 30m απαιτούνταν για την μείωση του θορύβου κατά 6 dB(A). Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει ευρεία άποψη ότι ψηλοί θάμνοι και στενές ζώνες δέντρων δημιουργούν μία σημαντική μείωση στον κυκλοφοριακό θόρυβο. Για παράδειγμα, στην μελέτη του Perfater [31], όπου η βλάστηση κατά μήκος ενός υπάρχοντος δρόμου αντικαταστάθηκε από ηχοπέτασμα, οι κάτοικοι πλησίον του δρόμου που απάντησαν στη έρευνα τόνισαν ότι η βλάστηση έδινε καλύτερη μείωση στον θόρυβο [32].

4.4.4 Μείωση μέσω χρήσης αντιθορυβικών οδοστρωμάτων

Ο θόρυβος που προκαλείται από την αλληλεπίδραση των ελαστικών των οχημάτων και της επιφάνειας του δρόμου είναι ένας σημαντικός συνεισφέρων παράγοντας στον συνολικό κυκλοφοριακό θόρυβο. Ένα πυκνό οδόστρωμα κυρίως ανακλά την ηχητική ενέργεια, ενώ ένα πορώδες οδόστρωμα κυρίως την απορροφά [33]. Τα πορώδη οδοστρώματα ολοένα και περισσότερο προσδιορίζονται ως ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του οδικού θορύβου [34]. Η πλειονότητα των εμπορικά διαθέσιμων υλικών πορωδών οδοστρωμάτων, αποτελείται από άσφαλτο η οποία αναμιγνύεται με ανακτημένο ελαστικό ή άλλα πρόσθετα στα οποία το λάστιχο είναι πχ 15% κατά βάρος του συνολικού μείγματος [33]. Ο πίνακας 4.1 δείχνει το επίπεδο θορύβου διαφόρων τύπων οδοστρωμάτων.

Πίνακας 4.1: Επίπεδο θορύβου διαφόρων τύπων οδοστρωμάτων [3].

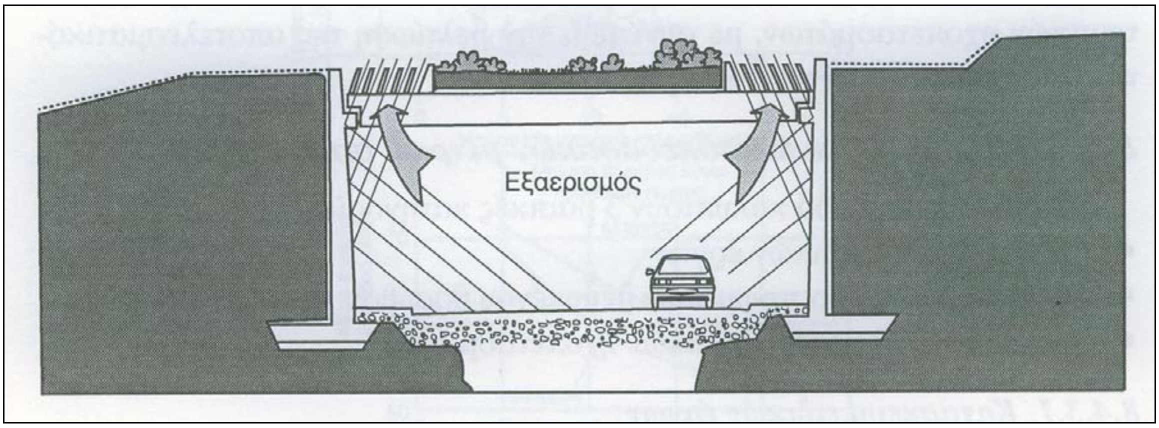


Το επίπεδο θορύβου σε σχέση με την κανονική άσφαλτο μπορεί να μειωθεί ως και 10 dB(A) για οδόστρωμα που χρησιμοποιεί σωματίδια ελαστικού συνδεδεμένα με ουρεθάνη [18]. Σύμφωνα με τους Meiarashi και Ishida [35] σε ένα τέτοιο πορώδες οδόστρωμα η μείωση του θορύβου για τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά ήταν 13 και 6 dB(A) αντίστοιχα.

Προβλήματα που μπορούν να παρουσιάσουν τα πορώδη οδοστρώματα είναι ότι μπορούν να φθαρούν προκαλώντας μόλυνση με σωματίδια ελαστικού λόγω της φθοράς από την τριβή [35]. Η φθορά προκαλεί μείωση της αποτελεσματικότητάς τους και επέρχεται και από απόφραξη των πόρων από κατάλοιπα τριβής ή αποσάθρωσης [34].

4.4.5 Μείωση με χρήση ακουστικών σηράγγων

Πρόκειται για κατασκευές οι οποίες αυξάνουν το κόστος, ορισμένες όμως από αυτές μειώνουν ή εξαφανίζουν την ηχορύπανση(η μείωση ανέρχεται μέχρι και 30 dB(A). Συνήθως η κατασκευή σήραγγας συνδυάζεται με το γενικότερο πολεοδομικό σχέδιο [3]. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η τυπική μορφή μίας ακουστικής σήραγγας.

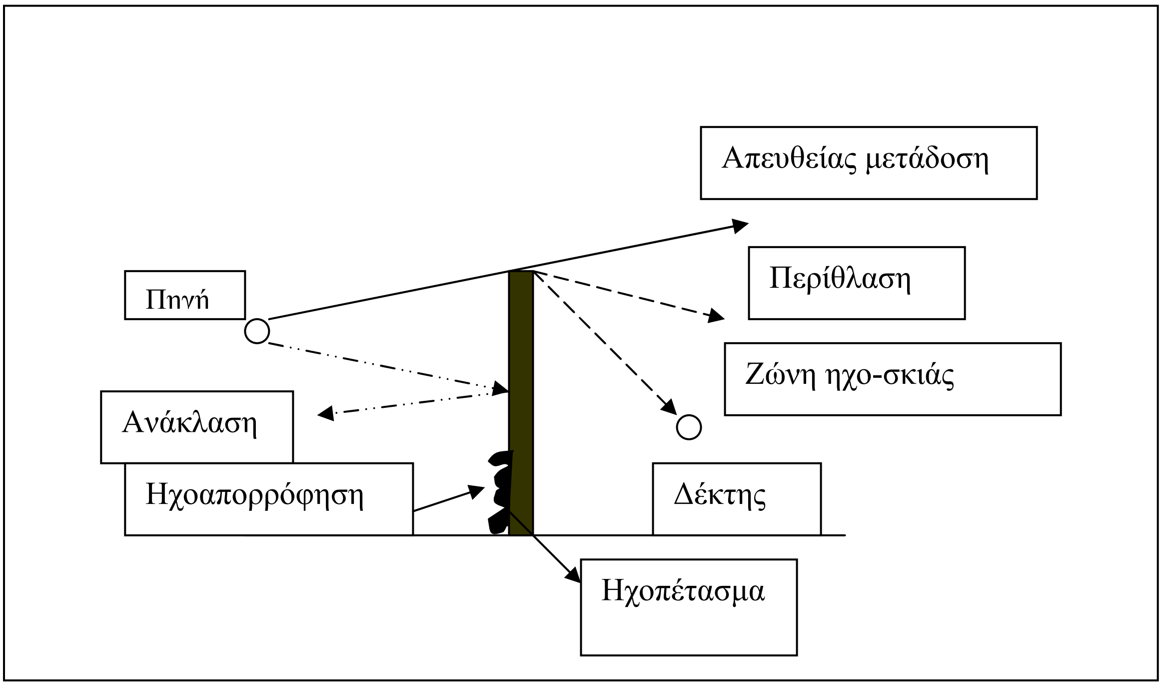


Σχήμα 4.9: Τυπική μορφή ακουστικής σήραγγας [3].

4.4.6 Μείωση με χρήση ηχοπετασμάτων

4.4.6.1 Βασική ακουστική λειτουργία των ηχοπετασμάτων

Η παρεμβολή ενός εμποδίου μεταξύ μιας ηχητικής πηγής όπως η κυκλοφορία μιας οδικής αρτηρίας και ενός δέκτη όπως μιας σειράς κατοικιών, μεταβάλλει την εξάπλωση ενός ηχητικού κύματος. Κατά την απουσία εμποδίων το ηχητικό κύμα από το σημείο πηγής (Π) διαδίδεται κατευθείαν προς το δέκτη (Δ) ακολουθώντας την διαδρομή Π-Δ (Σχήμα 4.10) [36]:



Σχήμα 4.10: Βασική ακουστική λειτουργία ηχοπετάσματος [36].

Στην περίπτωση παρεμβολής του το ηχητικό κύμα διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις:

- ένα μέρος του ηχητικού κύματος <u>ανακλάται</u> από το ηχοπέτασμα. Κατά συνέπεια επιστρέφει προς την πλευρά της πηγής με γωνία ανάκλασης ίση με γωνία πρόσπτωσης (όπως ισχύει και στην οπτική).
- ένα μέρος του ηχητικού κύματος απορροφάται από το ηχοπέτασμα, και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται κατ' αυτόν τον τρόπο εξαρτάται από τη φύση της επιφάνειας του υλικού του ηχοπετάσματος και τις διαστάσεις του (πάχος κ.λ.π.).
- ένα μέρος του ηχητικού κύματος μεταδίδεται δια μέσου του ηχοπετάσματος. Η ενέργεια που μεταδίδεται είναι μεγαλύτερη (και άρα η αξία του ηχοπετάσματος μειώνεται) εφόσον το υλικό από το οποίο αποτελείται δεν έχει ικανή πυκνότητα ή αν η κατασκευή του έχει κενά μέσω των οποίων μπορεί να διαδοθεί ο θόρυβος.
- τέλος ένα μέρος του ηχητικού κύματος <u>περιθλάται</u> από την κορυφή του ηχοπετάσματος και από τα άκρα του.

Η οριστική διαστασιολόγηση (μήκος και ύψος) και η τελική επιλογή των υλικών και της μορφής του ηχοπετάσματος αποτελεί αντικείμενο ειδικής οριστικής μελέτης.

Η ηχοπροστατευτική ικανότητα ενός ηχοπετάσματος που έχει σχέση με την ευκολία επίτευξης και την ωφέλεια δηλαδή την αντίληψη του κοινού ως προς την μείωση του θορύβου, παρουσιάζεται στην συνέχεια. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ηχοπροστατευτικής ικανότητας του ηχοπετάσματος, της ευκολίας επίτευξης και ωφέλειας (αντίληψης του κοινού για την μείωση της έντασης) [39], [36].

Πίνακας 4.3: Σχέση μεταξύ ηχοπροστατευτικής ικανότητας πετάσματος, ευκολίας επίτευξης και ωφέλειας [36].

Ηχοπροστατευτική αξία-στόχος ηχοπετάσματος	**Ευκολία επίτευξης στόχου**	**Μείωση ηχητικής ενέργειας**	**Σχετική μείωση έντασης ήχου(αντίληψη του κοινού)**
5 dB(A)	Απλή	68%	Σχετικά εύκολα αντιληπτή
10 dB(A)	Δυνατή	90%	Μείωση στο 1/2 της αρχικής έντασης
15 dB(A)	Πολύ δύσκολη	97%	Μείωση στο 1/3 της αρχικής έντασης
20 dB(A)	Σχεδόν αδύνατη	99%	Μείωση στο 1/4 της αρχικής έντασης

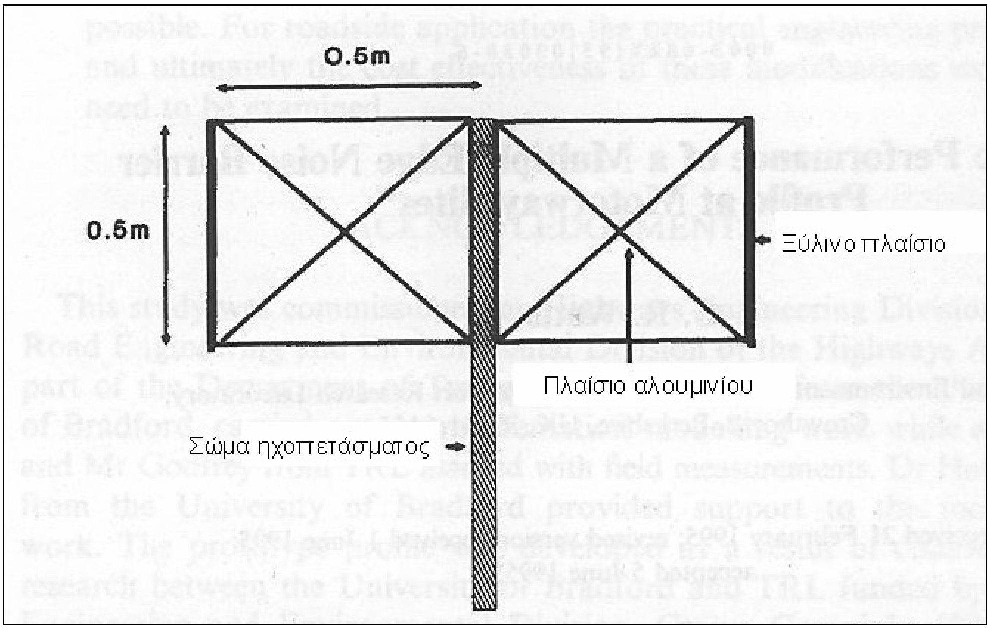
4.4.6.2 Διατομή των ηχοπετασμάτων

Ο αρχικός τύπος ηχοπετασμάτων ήταν κατακόρυφος, όμως με τον χρόνο άρχισε ο προβληματισμός για τη μορφή του [3]. Οι χρησιμοποιούμενοι τύποι σήμερα έχουν την μορφή του σχήματος 4.11 και διαφέρουν από την απλή ορθογωνική διατομή [3],[37].

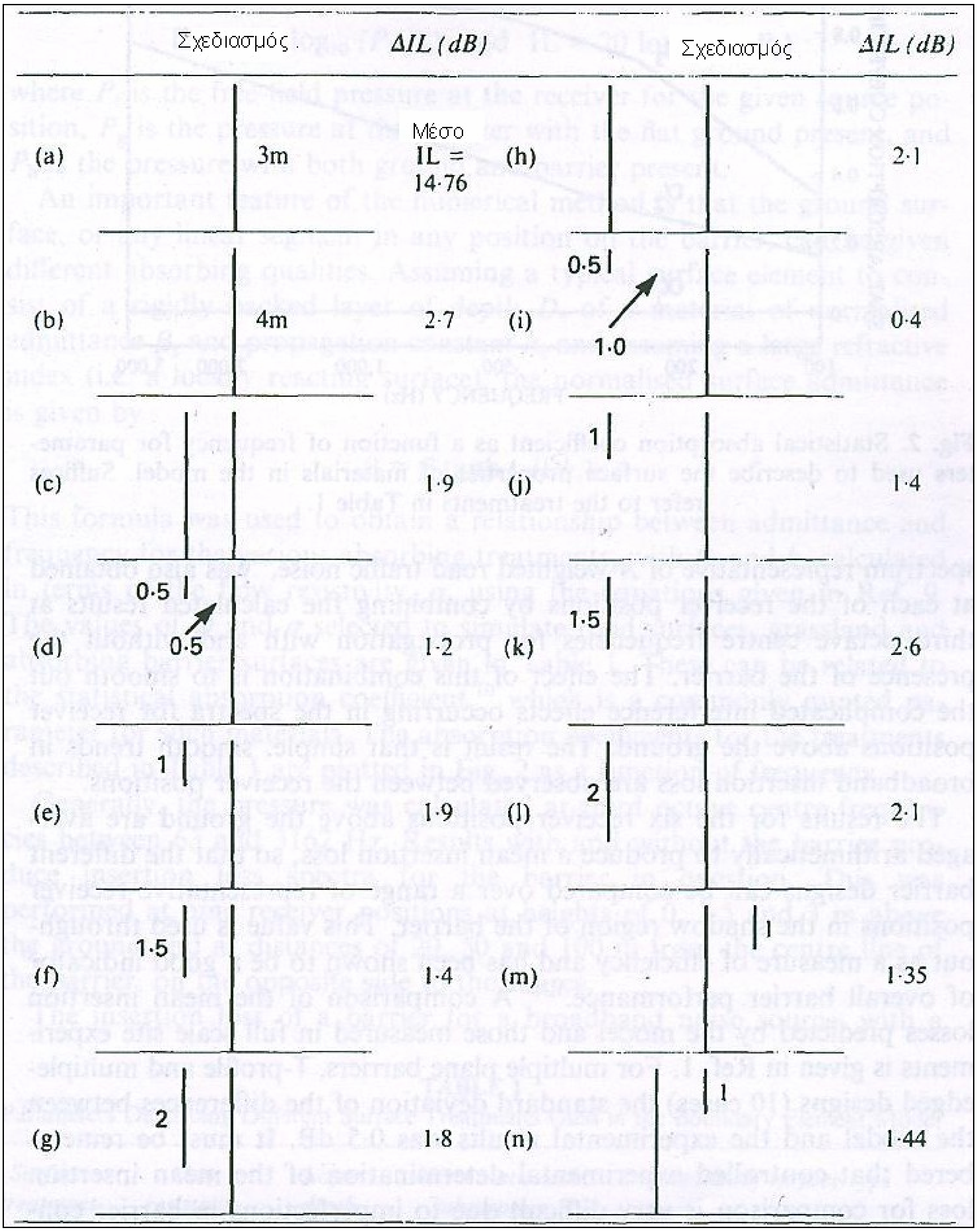
Όλοι οι τύποι ηχοπετασμάτων του σχήματος έχουν ύψος 3m εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Το πάχος του κυρίως πετάσματος είναι 0.2m, αλλά όλες οι άλλες επιφάνειες έχουν πάχος 0.1m.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται ένα νέου τύπου ηχοπέτασμα που μελετήθηκε στη Μ.Βρετανία. Η ακουστική απόδοση απλών ηχοπετασμάτων 2 και 3m ύψους που βρίσκονται δίπλα σε αυτοκινητόδρομο μπορεί να βελτιωθεί αισθητά από αυτό το προφίλ. Κάτω από ευνοϊκές συνθήκες η βελτίωση προβλέφθηκε ότι ήταν πάνω από 3 dB(A) [38].

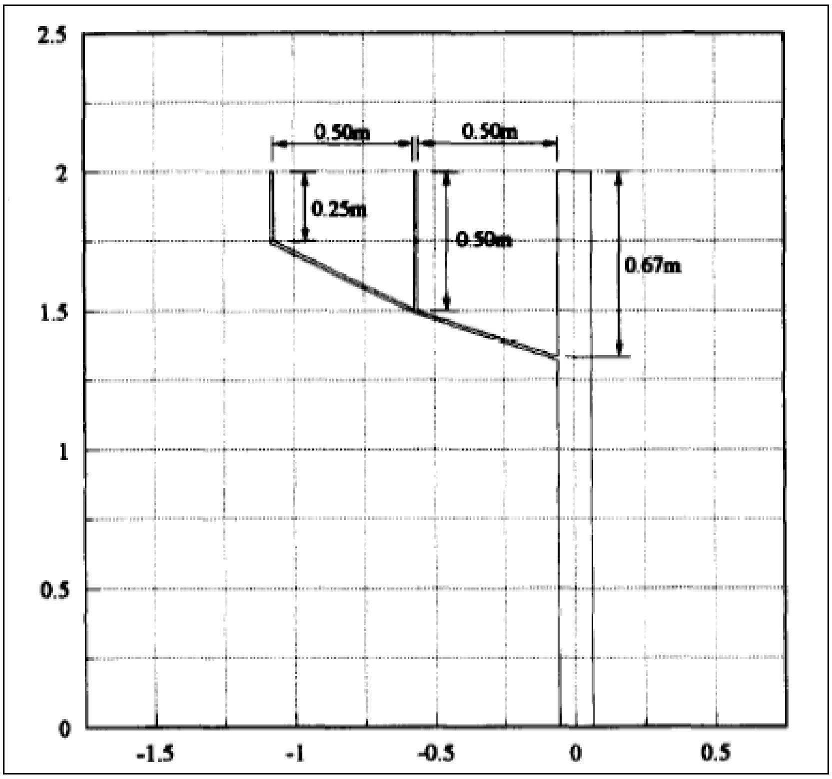
Ο τελικός τύπος του ηχοπετάσματος τροποποιήθηκε στη μορφή του σχήματος 4.13 [3]. Η συμπληρωματική μείωση του θορύβου της τάξης των 0-1,95 dB(A) για το L_{eq} [38].



Σχήμα 4.12: Διατομή νέου τύπου ηχοπετάσματος [38].



Σχήμα 4.11: Διάφοροι τύποι ηχοπετασμάτων και αντίστοιχη ηχοεξασθένιση ΔIL [37].



Σχήμα 4.13: Τελική τροποποιημένη μορφή ηχοπετάσματος σχήματος 4.12 [38].

4.4.6.3 Τύποι ηχοπετασμάτων

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι ηχοπετασμάτων:

Ηχοπετάσματα-αναχώματα: Τα ηχοπετάσματα που κατασκευάζονται από φυσικά υλικά όπως χώμα, πέτρα, κτλ σε μία φυσική μη υποστηριζόμενη κατάσταση ονομάζονται ηχοπετάσματα-αναχώματα. Τα ηχοπετάσματα αυτού του τύπου καταλαμβάνουν συνήθως περισσότερο χώρο από τα ηχοπετάσματα τοίχοι. Στις φωτογραφίες 4.1 και 4.2 φαίνονται παραδείγματα ηχοπετασμάτων-αναχωμάτων.

Φωτογραφία 4.1: Ηχοπέτασμα-ανάχωμα.

Φωτογραφία 4.2: Ηχοπέτασμα-ανάχωμα.

Ηχοπετάσματα τοίχοι: Οι περισσότεροι τύποι ηχοπετασμάτων-τοίχων κατασκευάζονται off-site. Έπειτα από την κατασκευή τους στο εργοστάσιο μεταφέρονται στην τοποθεσία εγκατάστασής τους. Στις φωτογραφίες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα ηχοπετάσματα-τοίχοι [40].

Φωτογραφία 4.3: Ηχοπέτασμα τοίχος.

Φωτογραφία 4.4: Ηχοπέτασμα τοίχος.

Συνδυασμός ηχοπετάσματος-αναχώματος και ηχοπετάσματος τοίχου: Πολλά συστήματα ηχοπετασμάτων αποτελούνται από ένα τμήμα του ύψους του ηχοπετάσματος που αποκτάται με την χρήση ενός λοφίσκου. Το ηχοπέτασμα τοίχος τοποθετείται πάνω στο ηχοπέτασμα-ανάχωμα (Φωτογραφίες 4.5 και 4.6)

Φωτογραφία 4.5: Συνδυασμός ηχοπετασμάτων.

Φωτογραφία 4.6: Συνδυασμός ηχοπετασμάτων.

4.4.6.4 Υλικά κατασκευής ηχοπετασμάτων

Τα συνηθέστερα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα ηχοπετάσματα είναι:

- Τσιμέντο: Σχεδόν 50% των ηχοπετασμάτων που έχουν κατασκευαστεί στην Βόρειο Αμερική αποτελούνται από τσιμέντο. Το τσιμέντο θεωρείται ένα από τα πιο ανθεκτικά υλικά στην κατασκευή ηχοπετασμάτων.

- Τούβλα και τσιμεντόλιθοι: Τα τούβλα συνήθως κατασκευάζονται από μίγμα πηλού και άμμου το οποίο τοποθετείται σε κλίβανο για να αυξηθεί η δομική αντοχή του τούβλου. Οι κατασκευάζονται από τσιμέντο και άλλα υλικά.
- Μέταλλο: Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλά είναι το ατσάλι, το αλουμίνιο και το ανοξείδωτο ατσάλι [40].

Φωτογραφία 4.7: Ηχοπετάσματα από τούβλο, τσιμεντόλιθο και μέταλλο και ξύλο.

Φωτογραφία 4.8: Διάφανα ηχοπετάσματα.

- Ξύλο: Πολλά είδη ξύλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ηχοπετασμάτων όμως κάθε ένα έχει διαφορετική απόδοση. Είναι για πολλούς τα πιο ωφέλιμα από αισθητικής άποψης.
- Διάφανα ηχοπετάσματα: κατασκευάζονται από γυαλί, πλεξιγκλάς κτλ. Τ

Ανάλογα με το υλικό κάθε ηχοπετάσματος κυμαίνεται και η απώλεια μετάδοσής του (Transmission Loss, TL). Το ποσό του προσπίπτοντος ήχου που μεταδίδει ένα ηχοπέτασμα μπορεί να περιγραφεί από την απώλεια μετάδοσής του. Η TL εκφράζεται ως εξής:

$$TL = 10\log_{10}\left[10^{(SPLs/10)} / 10^{(SPLr/10)}\right]$$

όπου SPLs είναι το επίπεδο ηχητικής πίεσης από την πλευρά του ηχοπετάσματος που βρίσκεται η πηγή και SPLr είναι το επίπεδο ηχητικής πίεσης από την πλευρά του ηχοπετάσματος που βρίσκεται ο αποδέκτης. Ως γενικός κανόνας κάθε υλικό που ζυγίζει περισσότερο από 20 kg/m^2 παρουσιάζει απώλεια μετάδοσης τουλάχιστον 20dB(A). Επιθυμητό είναι για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται για κατασκευή ηχοπετασμάτων να έχει TL 25dB(A) ή μεγαλύτερη. Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα συνηθέστερα υλικά και οι αντίστοιχες απώλειες μετάδοσης [40].

Πίνακας 4.4: Απώλεια μετάδοσης ήχου για διάφορα συνήθη υλικά.

Υλικό	**Πάχος(mm)**	**Βάρος (kg/m^2)**	**Απώλεια Μετάδοσης (dB(A)**
Τεμάχιο τσιμέντο 200mm x 200mm x405	200	151	34
Πυκνό τσιμέντο	100	244	40
Ελαφρό τσιμέντο	150	244	39
Ελαφρό τσιμέντο	100	161	36

Ατσάλι. 18ga	1.27	10	25
Ατσάλι 20 ga	0.95	7.3	22
Ατσάλι 22 ga	0.79	6.1	20
Ατσάλι 24 ga	0.64	4.9	18
Αλουμίνιο, φύλλο	1.59	4.4	23
Αλουμίνιο, φύλλο	3.18	8.8	25
Αλουμίνιο, φύλλο	6.35	17.1	27
Ξύλο, Fir	12	8.3	18
Ξύλο, Fir	25	16.1	21
Ξύλο, Fir	50	32.7	24
Plywood	12	8.3	20
Plywood	25	16.1	23
Γυαλί, ασφαλείας	3.18	7.8	22
Πλεξιγκλάς	6	7.3	22

4.4.6.5 Θέση των ηχοπετασμάτων

Παράλληλα προς τον άξονα

Η τοποθέτηση των ηχοπετασμάτων κατά κανόνα γίνεται κατακόρυφα και παράλληλα προς τον άξονα της οδού και από τις δύο πλευρές.
Εντούτοις η τοποθέτηση μονού ηχοπετάσματος, όχι μόνο δεν αποκλείεται αλλά, σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, η ανάκλαση του ήχου από το απέναντι ηχοπέτασμα μπορεί να αυξήσει το επίπεδο θορύβου μέχρι και 5 dB(A).
Ο Hajek έδωσε μία σχέση η οποία υπολογίζει τη διαφορά επιπέδου θορύβου για την περίπτωση ενός ηχοπετάσματος και παράλληλων ηχοπετασμάτων.

$$\Delta L = 10\log_{10}\left[1 + 2d^2 10^{Ed}\sum_{1}^{n}(1-a)^n/(d^2 + (nw)^2\right] x \left[\frac{1}{10^E \sqrt{d^2 + (nw)^2}}\right]$$

όπου

d= ευθεία απόσταση μεταξύ ηχητικής πηγής και θέσης μέτρησης (m)

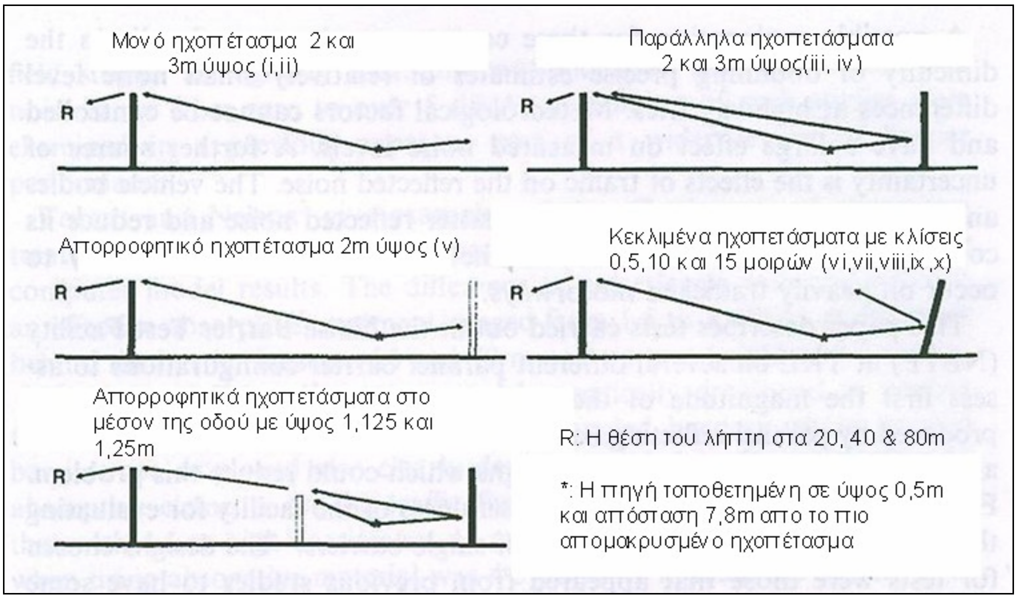
E= συντελεστής ηχοαπορρόφησης ατμόσφαιρας (0.001772 dB/m)

n= αριθμός ανάκλασης (n=0,1,2,…)

α= συντελεστής ηχοαπορροφητικότητας ηχοπετασμάτων (ίσος και για τα δύο ηχοπετάσματα)

w= απόσταση μεταξύ ηχοπετασμάτων [3]

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται η ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων σε σχέση με την θέση των ηχοπετασματων.



Σχήμα 4.14: Σχετική θέση ηχοπετασμάτων και ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων [39].

<u>Επικαλυπτόμενα</u>

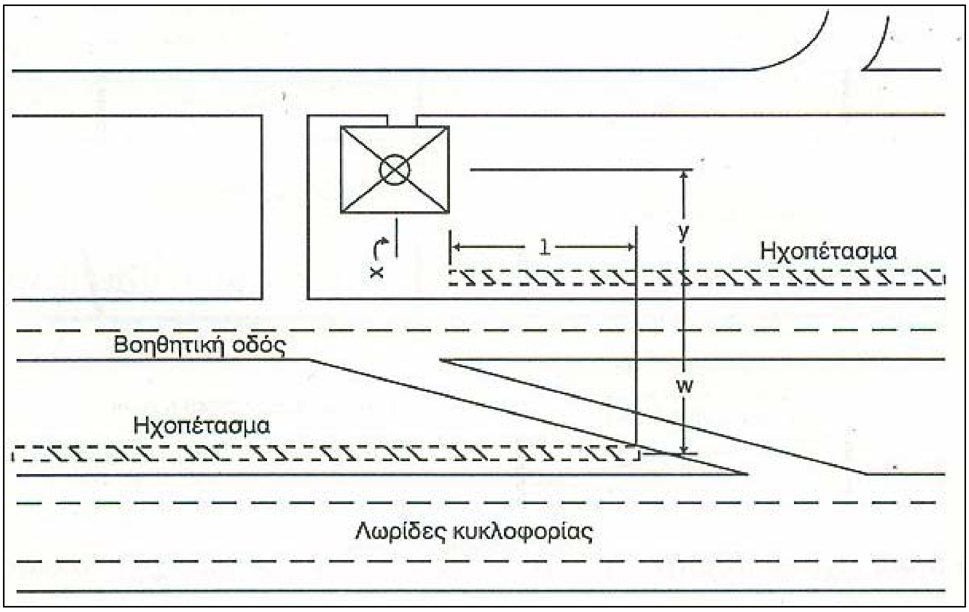
Η περίπτωση αυτή εμφανίζεται όταν υπάρχει οδός εισόδου εξόδου στην κύρια οδό της περιοχής, της οποίας ζητείται η ηχοπροστασία μέσω ηχοπετασμάτων. Σύμφωνα με το σχήμα 4.15 ονομάζεται:

x η οριζόντια απόσταση της θέσης μέτρησης του θορύβου και του εσωτερικού σε σχέση με την οδό ηχοπετάσματος y η κάθετη απόσταση της θέσης μέτρησης του θορύβου από το εσωτερικό ηχοπέτασμα

w πλάτος (απόσταση) μεταξύ ηχοπετασμάτων

l μήκος επικάλυψης ηχοπετασμάτων

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επέκταση του εσωτερικού ηχοπετάσματος στην πλευρά της θέσης μέτρησης μειώνει το επίπεδο θορύβου, σε αντίθεση προς την περιοχή της επικάλυψης όπου λόγω ανακλάσεων παρατηρείται αύξηση [3].



Σχήμα 4.15 Διάταξη επικαλυπτόμενων ηχοπετασμάτων [3].

Κεκλιμένα ηχοπετάσματα

Για αποφυγή αύξησης του θορύβου, σε περίπτωση παράλληλων ηχοπετασμάτων λόγω πολλαπλών ανακλάσεων, τοποθετήθηκαν ηχοπετάσματα όχι κατακόρυφα αλλά με κλίση προς την αντίθετη πλευρά της οδού [3].

Από την έρευνα του Watts [39] στη Μ.Βρετανία προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας4.5)

Πίνακας 4.5: Σχέση επιπέδου θορύβου και κλίσης ηχοπετάσματος.

Κλίση ηχοπετάσματος	Μέσο επίπεδο θορύβου (dB(A))	Μεταβολή επιπέδου θορύβου σε σχέση με κατακόρυφο ηχοπέτασμα 2m ύψους
0º	73.3	2.5
5 º	72.2	1.5
10º	71.0	0.2
15º	70.7	-0.4

4.4.6.6 Κόστος κατασκευής ηχοπετασμάτων

Το κόστος κατασκευής εξαρτάται από τις διαστάσεις, τα υλικά, το είδος θεμελίωσης. Ο πίνακας 4.6 δίνει τιμές κόστους για τις ΗΠΑ το 1988 [3].

Πίνακας 4.6: Κόστος κατασκευής ηχοπετασμάτων στις Η.Π.Α [3].

Ύψος ηχοπετάσματος (ft)	Δαπάνη (ft/$)				
	Berm	Σκυρόδεμα	Τοιχοποιία	Χάλυβας	Ξύλο
1	25.95	56.42	47.46	14.98	1.0
5	42.19	103.10	84.53	72.95	50.24
10	62.49	161.45	130.86	145.41	117.81
20	103.11	278.14	223.52	290.32	252.94
30	143.72	394.83	316.19	434.16	388.07

4.5 Κατασκευές ηχοπετασμάτων στη Ελλάδα

Τα έργα των ηχοπετασμάτων πριν από λίγα χρόνια δεν ήταν ιδιαίτερα γνωστά στην χώρα μας. Το ΥΠΕΧΩΔΕ προχώρησε σε ένα πιλοτικό πρόγραμμα μελέτης και κατασκευής ηχοπετασμάτων -αξιοποιώντας και κονδύλια από το Β' ΚΠΣ- για ιδιαίτερα ευπαθείς στον θόρυβο περιοχές και κτίρια.

Το πρόγραμμα αυτό εκτελέστηκε σε συνεργασία με την τοπική αυτοδιοίκηση για την μεταφορά της απαραίτητης τεχνογνωσίας. Ετσι από το 1996 μελετήθηκαν αντιθορυβικες κατασκευές σε κρίσιμα σημεία για δέκα (10) δήμους της Αθήνας, του Πειραιά και της Θεσσαλονίκης, και κατασκευάστηκαν ηχοπετάσματα συνολικού εμβαδού περίπου 8000 τετραγωνικών μέτρων, σε πάνω από 11 σημεία, σε περιοχές σχολείων και κατοικιών. Το κόστος για τα έργα αυτά ξεπέρασε τα 750 εκ. δρχ.

ΣΤΟ πλαίσιο του Γ ΚΠΣ, τα έργα αντιθορυβικής προστασίας όπως αυτά της μελέτης και κατασκευής ηχοπετασμάτων θεωρούνται πλέον επιλέξιμες δαπάνες από τα περιφερειακά προγράμματα (ΠΕΠ) [36].

Κεφάλαιο 5

Μοντέλα πρόβλεψης κυκλοφοριακού θορύβου

Ο θόρυβος από την οδική κυκλοφορία μπορεί είτε να μετρηθεί, είτε να προβλεφθεί χρησιμοποιώντας ένα κοινό μοντέλο. Είναι πολύπλοκο και ορισμένες φορές χρονοβόρο να πραγματοποιούνται μετρήσεις και δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν οι επιδράσεις ενός έργου στο στάδιο του σχεδιασμού, όπου δεν έχουν λάβει χώρα φυσικές κατασκευές [41]. Τα μοντέλα πρόβλεψης κυκλοφοριακού θορύβου είναι αναγκαία ως βοηθήματα στον σχεδιασμό των αυτοκινητοδρόμων και άλλων οδών και ορισμένες φορές στην αξιολόγηση υπαρχουσών ή μελλοντικών αλλαγών στις συνθήκες κυκλοφοριακού θορύβου. Τα μοντέλα συνήθως χρειάζονται για να προβλέψουν στάθμες ηχητικής πίεσης εξειδικευμένες σε όρους όπως (L_{eq}) L_{10} κτλ οι οποίες καθορίζονται από τις αρμόδιες αρχές [42].

5.1 Τα πρώιμα μοντέλα

Πιθανότατα το πιο παλιό μοντέλο κυκλοφοριακού θορύβου δινόταν το 1952 στο Handbook of Acoustic Noise Control [42], [43]. Προσφερόταν για ταχύτητες 35-45 mph και αποστάσεις μεγαλύτερες από 20 ft. Η εξίσωση του L_{50} ήταν ως εξής:

$$L_{50} = 68 + 8.5\log(V) - 20\log(D)$$

όπου

V= ο κυκλοφοριακός όγκος σε οχήματα ανά ώρα

D= η απόσταση από τη λωρίδα κίνησης, σε ft

Το 1965, οι Nickson [44] και Lamure [45] ξεχωριστά ανέπτυξαν μοντέλα της μορφής:

$$L_{50} = C + 10\log\left(\frac{V}{D}\right)$$

όπου το C είναι σταθερά για τα ξεχωριστά επίπεδα θορύβου και το L_{50} είναι σε dB(A).

Η ταχύτητα των οχημάτων εισήχθη ως σχετικός παράγοντας από τον Johnson et al. [46] ο οποίος πρότεινε:

$$L_{50} = 3.5 + 10\log\left(\frac{V * S^2}{D}\right)$$

όπου:

S= η μέση ταχύτητα των οχημάτων σε μίλια ανά ώρα (mph) και το L_{50} είναι σε dB(A). Αυτό θεωρείτο ότι ανταποκρινόταν σε 20% βαρέα οχήματα, αλλά τα δεδομένα τους συμφωνούσαν μέσα σε 1 dB για βαρέα οχήματα από 0 έως 40%. Περιλαμβάνονταν διορθώσεις για υπερβολική εξασθένιση λόγω του εδάφους και για τις κλίσεις.

Τον επόμενος χρόνο, ο Galloway et al. [47] εισήγαγε μία ακόμα μεταβλητή Τ, το ποσοστό των βαρέων φορτηγών. Η εξίσωση ήταν:

$$L_{50} = 20 + 10\log\left(\frac{VS^2}{D}\right) + 0.4T$$

όπου L_{50} είναι σε dB(A).

Η μετέπειτα πρόοδος εισήγαγε επιπλέον μεταβλητές και αλλαγές από το L_{50} στα L_{10} και L_{eq} [42].

5.2 Το μοντέλο πρόβλεψης θορύβου από αυτοκινητόδρομους της FHWA

Το μοντέλο πρόβλεψης FHWA αναπτύχθηκε στις για το Υπουργείο Μεταφορών και τη διεύθυνση Ομοσπονδιακών Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration) από τους Barry και Reagan, παρ' όλο που χρησιμοποίησαν κάποιο υλικό από προηγούμενες αναφορές NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Το μοντέλο πρόβλεψης εκδόθηκε ως αναφορά No. FHWA-RD-77-108, η οποία περιλάμβανε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα. Αυτό το πρόγραμμα αναπτύχθηκε περαιτέρω, ξεχωριστά κάτω από τον τίτλο STAMINA σε διάφορές διαδοχικές εκδόσεις.
Το μοντέλο υποθέτει σημειακές πηγές που ταξιδεύουν σε σταθερή ταχύτητα. Οι συγγραφείς συνέκριναν προβλεπόμενα Α-σταθμισμένα ηχητικά επίπεδα πίεσης με δεδομένα που είχαν συλλεγεί από ένα πρόγραμμα γνωστό ως Four State Noise Inventory. Η ακρίβεια της μεθόδου βρέθηκε να είναι εξαρτώμενη από την απόσταση του λήπτη από την πηγή, και επίσης από τη σύνθεση των οχημάτων. Στην σύγκριση των επιπέδων εκπομπής θορύβου από την κυκλοφορία στην Φλόριντα σε σχέση με τα εθνικά, τα μέσα σφάλματα βρέθηκαν να είναι -0.05 -0.95 και -1.3 dBA στα 15, 30 και 60 m αντίστοιχα. Οι αντίστοιχές στάνταρ αποκλίσεις (standard deviation) ήταν 1.64 1.82 και 2.39 dB. Ωστόσο η σύγκριση με τα επίπεδα εκπομπής θορύβου στην Φλόριντα έδινε μέσα σφάλματα της τάξης των +0.58 -0.23 και -0.57 dBA με ελάχιστα μικρότερες στάνταρ αποκλίσεις. Οι συγγραφείς δίνουν ορισμένα απώλειας εισαγωγής υπολογισμών για ένα ηχοπέτασμα. Σε μία περίπτωση, η προβλεπόμενη απώλεια ήταν 7.2 dBA όταν η μετρούμενη ήταν 10 dBA. Το πρόγραμμα STAMINA επιτρέπει μία εύκολη προσαρμογή στα επίπεδα αναφοράς εκπομπής [42]. Ο Junf et al. [48] ανέφερε μία προσαρμογή για το Οντάριο με αρκετή επιτυχία, εκτός από το γεγονός ότι περίπου 4% των φορτηγών ήταν υπερβολικά θορυβώδη και προκαλούσαν μία προς τα πάνω αύξηση της τάξης των 0.5 έως 1.0 dBA στο επίπεδο αναφοράς. Οι

συγγραφείς θεώρησαν αυτό το γεγονός συγκρίσιμο με παρατηρήσεις που είχαν γίνει αλλού.

Αυτή η διαδικασία είναι αυστηρώς εφαρμόσιμη σε ευθείς δρόμους και σε οχήματα σταθερής ταχύτητας , αλλά ενσωματώνονται μέθοδοι για χρήση σε τμήματα ώστε να προσομοιωθούν κυρτοί δρόμοι και πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας. Τρεις κύριες παραδοχές γίνονται στο μοντέλο:

1. Τα οχήματα αντιπροσωπεύονται επαρκώς από ακουστικές σημειακές πηγές
2. Τα επίπεδα εκπομπής μέσα στις ομάδες (επιβατικά, μεσαία και βαρέα φορτηγά) είναι κανονικά κατανεμημένα (παρόλο που είναι ασσύμετρα προς την υψηλή πλευρά)
3. Οι απώλειες διάδοσης αντιπροσωπεύονται επαρκώς από τις επιδράσεις της απόστασης [42]

5.2.1 Ο αλγόριθμος του STAMINA

Στην αρχική μορφή FHWA-RD-77-108,τα κανονικοποιημένα μέσα ενεργειακά επίπεδα εκπομπής αναφοράς (REMEL, Reeference energy mean emission levels) χρησιμοποιήθηκαν για τρεις τάξεις οχημάτων, επιβατικά, μεσαία και βαρέα φορτηγά. Εκφράζονται ως ηχητικά επίπεδα πίεσης στα 15m από τις πηγές , ως συναρτήσεις της ταχύτητας του οχήματος. Επιπρόσθετα στα μέσα επίπεδα, η στατιστική κατανομή σε κάθε ταχύτητα για κάθε τάξη ελήφθη υπόψη.

Στο STAMINA τα REMELs επιτρέπονταν σαν είσοδος (input). Το L_{eq} υπολογίζεται για κάθε τάξη οχήματος και για κάθε ώρα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$L_{eq} = \overline{L_0} + 0.115.\sigma^2 + 10\log\frac{N.\pi.D_0}{T.S} + 10.\log\left[\frac{D_0}{D}\right]^{1+a} + 10.\log\left(\frac{\psi_{\alpha(\phi_1,\phi_2)}}{\pi}\right) + \Delta_s$$

όπου:

L_{eq} είναι το ισοδύναμο συνεχές επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL).Για την i τάξη εκφράζεται ως $L_{eq}(h)_i$

L_0 είναι το SPL της τάξης στην απόσταση αναφοράς. Η παύλα υποδεικνύει τη μέση τιμή.

σ είναι η στάνταρ απόκλιση της τάξης

N_i είναι ο αριθμός των οχημάτων της i τάξης που περνούν κατά τη διάρκεια της σχετικής ώρας

D_0 είναι η απόσταση αναφοράς (συνήθως 15m)

D είναι η κάθετη απόσταση από την κεντρική γραμμή της λωρίδας κυκλοφορίας έως τον λήπτη.

α είναι μία παράμετρος της περιοχής μελέτης, 0<α<1

S_i είναι η μέση ταχύτητα της i τάξης

T είναι η διάρκεια, συνήθως 1hr

φ_1 και φ_2 είναι οι γωνίες από τη κάθετο, των ορίων της θέας-άποψης του παρατηρητή ενός τμήματος του δρόμου

Δ_s είναι η επιπλέον απόσβεση-εξασθένηση εξαιτίας ηχοπετασμάτων, κτιρίων, δασών κτλ

5.3 Το μοντέλο FHWA Traffic Noise Model version 1.0 (TNM)

Το μοντέλο FHWA TNM E9, έκδοση 1 παρουσιάστηκε από τον Anderson et al. [42],[49]. Παρόλο που προερχόταν από το πρόγραμμα STAMINA 2.0, έχει πολλές σημαντικές βελτιώσεις. Δέχεται εισαγωγές από προγράμματα CAD και από το STAMINA 2.0. Οι βελτιώσεις στα παλαιότερα μοντέλα περιλαμβάνουν πρόβλεψη για επιτάχυνση, σήματα στοπ, διόδια, σήματα κυκλοφορίας κτλ. Άλλη μία βελτίωση είναι η πρόβλεψη για την εισαγωγή οχημάτων από τον χρήστη χρησιμοποιώντας τα δεδομένα REMEL για αυτά. Η εξασθένιση-απόσβεση υπολογίζεται με τον συνήθη τρόπο, αλλά περιλαμβάνει την ατμοσφαιρική απορρόφηση και την τοπογραφία. Η εξασθένιση κάτω από δρόμους και ηχοπετάσματα μπορεί επίσης να υπολογιστεί.

5.3.1 Ο αλγόριθμος του TNM

Η γενική REMEL εξίσωση είναι συνάρτηση της ταχύτητας και της συχνότητας ως ακολούθως:

$$L_E(s,f) = 10\log_{10}\left[10^{(C+\Delta E_C)/10} + \left(s^{A/10}\right)\left(10^{(B+\Delta E_b)/10}\right)\right] - \left(K1 + K2.s\right) + D1 + D2.s$$
$$+\left(E1+E2.s\right)\log_{10} f + \left(F1+F2.s\right)\left(\log_{10} f\right)^2 + \left(G1+G2.s\right)\left(\log_{10} f\right)^3 + \left(H1+H2.s\right)\left(\log_{10} f\right)^4$$
$$+\left(I1+I2.s\right)\left(\log_{10} f\right)^5 + \left(J1+J2.s\right)\left(\log_{10} f\right)^6$$

όπου:

A είναι η κλίση της καμπύλης παλινδρόμησης του τμήματος τροχού/ οδοστρώματος

$B+\Delta E_b$ είναι το ύψος του τμήματος τροχού/ οδοστρώματος

$C+\Delta E_c$ είναι το ύψος του τμήματος μηχανής/ εξάτμισης

D1 έως J2 είναι σταθερές της $6^{ης}$ τάξεως της πολυωνυμικής καμπύλης προσαρμογής για το 1/3 του φάσματος.

K1 και K2 δίνουν το A-σταθμισμένο επίπεδο L(s) αντί για το L(s,f)

Αυτά τα επίπεδα ηχητικής πίεσης διαμοιράζονται μεταξύ των υπο-πηγών τροχού/ οδοστρώματος και μηχανής/ εξάτμισης σύμφωνα με τη συχνότητα, κατά συνέπεια:

$$SSR(f) = L + [1 - L - M]\left[1 + e^{(N\log f + P)}\right]^Q$$

όπου:

L είναι η αναλογία της υποπηγής στις χαμηλές συχνότητες

1-M είναι η αναλογία στις υψηλές συχνότητες

N,P και Q σταθερές

5.4 Η σύντομη μέθοδος της FHWA

Ο σκοπός της <<σύντομης μεθόδου>> είναι η απόκτηση γρήγορης και χονδρικής (πάντα υπερεκτιμημένης) πρόβλεψης των αναμενόμενων επιπέδων θορύβου. Αυτό είναι αναγκαίο καθώς η πρόβλεψη των αληθινών επιπέδων θορύβου στους αυτοκινητόδρομους είναι ένα μάλλον πολύπλοκο ζήτημα. Σε πολλές περιπτώσεις είναι επιθυμητό πρώτα να αποκτάται μία γενική ιδέα των πιθανών περιοχών με πρόβλημα πριν αποκτηθεί πλήρης οριζόντια και κάθετη γνώση των σχεδιαστικών παραμέτρων του αυτοκινητοδρόμου.

Η πρόβλεψη με την <<σύντομη μέθοδο>> μπορεί να γίνει γρήγορα με τη χρήση δύο νομογραφημάτων και τη γνώση μερικών παραμέτρων για την κυκλοφορία και τον αυτοκινητόδρομο. Από τον σχεδιασμό της η <<σύντομη μέθοδος>> απαιτεί πολλές υποθέσεις και προσεγγίσεις και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως ένα τελικό εργαλείο [1].

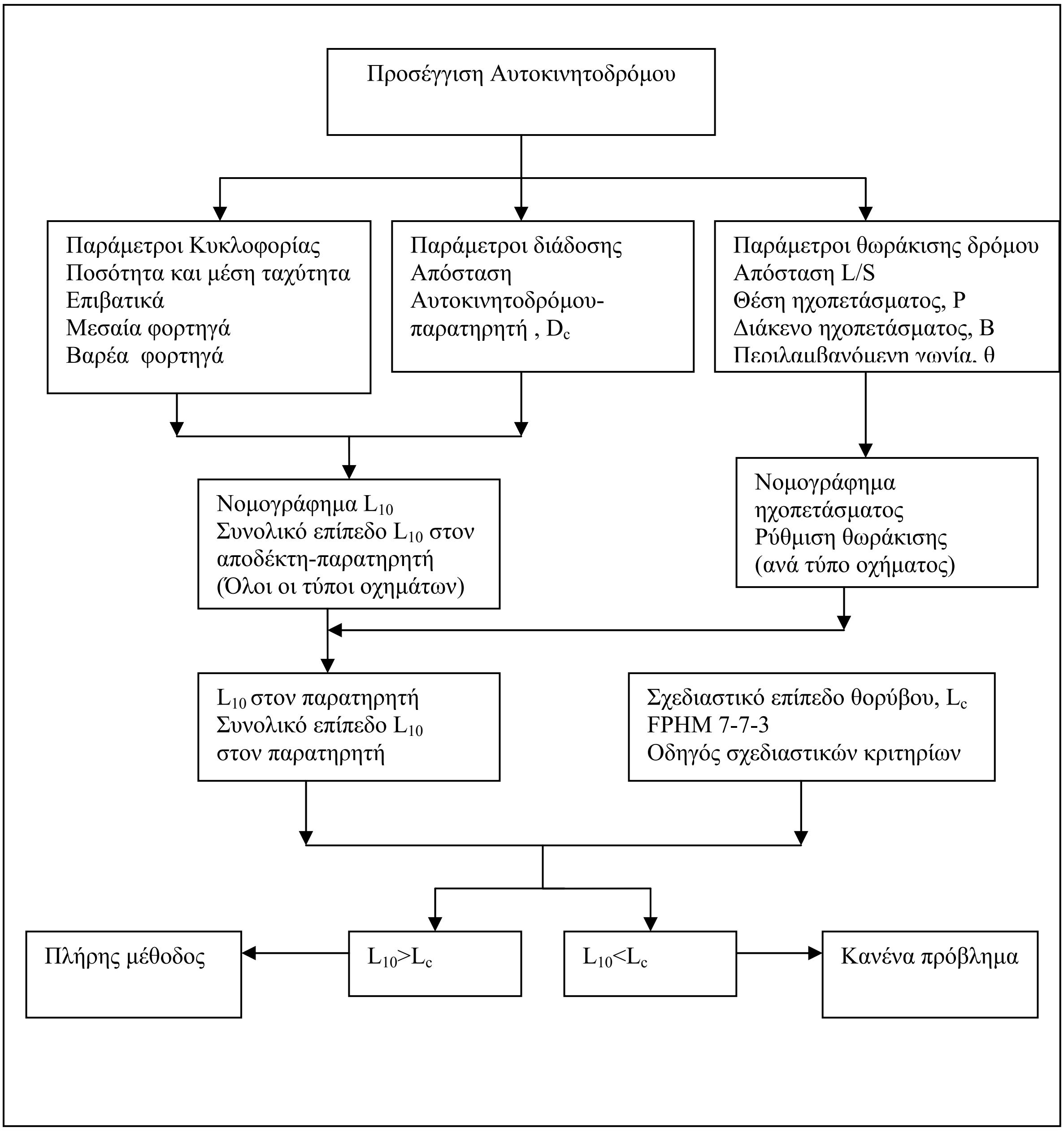
5.4.1 Μεθοδολογία της σύντομης μεθόδου

Το διάγραμμα ροής στο σχήμα 5.1 επιδεικνύει την μεθοδολογία της σύντομης μεθόδου. Η μέθοδος υποθέτει ότι ο αυτοκινητόδρομος μπορεί να προσεγγιστεί από ένα άπειρου μεγέθους στοιχείο με σταθερές τις κυκλοφοριακές παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά του αυτοκινητοδρόμου. Το αρχικό βήμα στην χρήση της σύντομης μεθόδου αποτελείται από τον καθορισμό μίας απείρου μήκους ευθείας γραμμής, προσέγγιση του πραγματικού αυτοκινητοδρόμου. Οι ράμπες εισόδου εξόδου και διασταύρωσης, παραβλέπονται στην ανάλυση της σύντομης μεθόδου.

Από τη ώρα που έχει επιλεγεί ο προσεγγιστικός αυτοκινητόδρομος θα πρέπει να υπολογιστούν ή να εκτιμηθούν οι ακόλουθες παράμετροι: α) οι κυκλοφοριακές παράμετροι, που περιλαμβάνουν την ταχύτητα και την ποσότητα κάθε τάξης οχημάτων β) τα χαρακτηριστικά διάδοσης, που περιγράφουν την τοποθεσία του αποδέκτη σε σχέση με τον αυτοκινητόδρομο και γ) οι παράμετροι θωράκισης του αυτοκινητοδρόμου, εάν υπάρχουν (Μόνο ηχοπετάσματα που βρίσκονται δεξιά του δρόμου μπορούν να ληφθούν υπόψη)

Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται σε δύο διαδικασίες. Πρώτα οι παράμετροι της κυκλοφορίας και της διάδοσης συνδυάζονται στο νομογράφημα του L_{10} για να καθοριστεί, για κάθε τύπο πηγής, το χωρίς ηχοπροστασία επίπεδο L_{10} στον αποδέκτη [1].

Το τελικό αποτέλεσμα έπειτα συγκρίνεται με το επίπεδο των κριτηρίων, L_c, στον αποδέκτη για να καθορίσει μία κατάσταση <<μη ύπαρξης προβλήματος>> ή μία κατάσταση <<πιθανού προβλήματος>> εάν αναγνωριστεί ένα πιθανό πρόβλημα, η τοποθεσία του παρατηρητή θα πρέπει να εκτιμηθεί με χρήση της πλήρους μεθόδου.



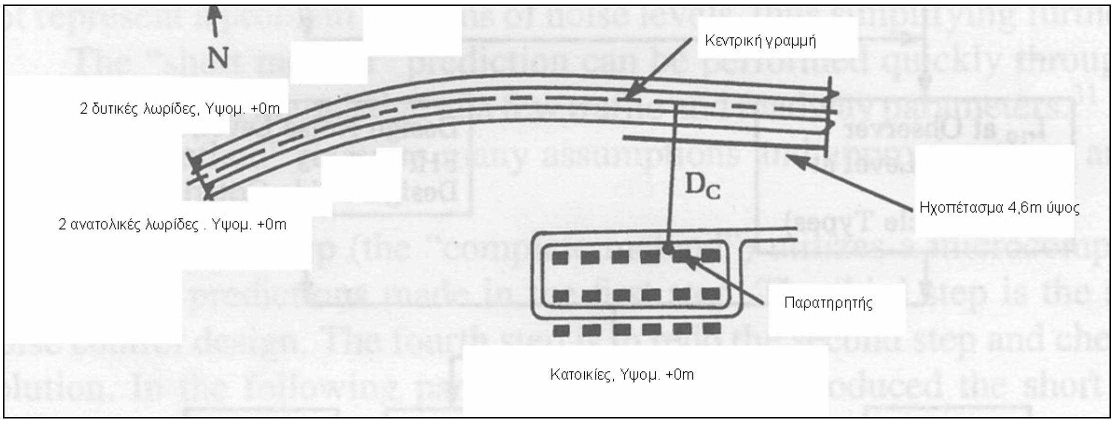
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας για την εφαρμογή της μεθόδου NCHRP 174 για την εκτίμηση του L_{10} από την κυκλοφορία [1].

5.4.2 Διαδικασία της σύντομης μεθόδου

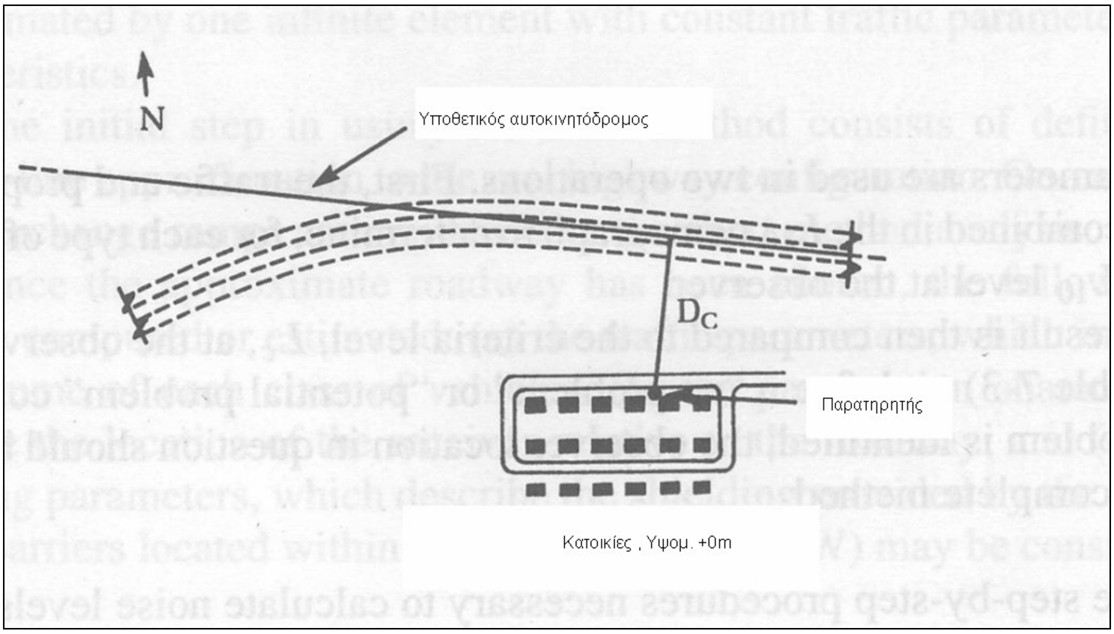
Οι βήμα προς βήμα διαδικασίες που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των επιπέδων θορύβου από τη σύντομη μέθοδο παρουσιάζονται στις επόμενες αριθμημένες παραγράφους. Επιπρόσθετα προς τα νομογραφήματα η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα φύλλο εργασίας ως βοήθημα για τα διαδοχικά βήματα.

Αναγνώριση του παρατηρητή-αποδέκτη: Σε έναν χάρτη βολικής κλίμακας, αναγνωρίζονται όλες οι πιθανές θέσεις παρατήρησης στις οποίες είναι επιθυμητό να γίνει η ανάλυση.

1. Προσέγγιση του αυτοκινητοδρόμου: Προσέγγιση της ευθυγράμμισης του δρόμου με μία ευθεία απείρου μήκους γραμμή. Η διαδικασία έχει ως ακολούθως: Καθορίζεται και μετράται η πλησιέστερη κάθετη απόσταση, D_C, μεταξύ της κεντρικής γραμμής του αυτοκινητόδρομου και του παρατηρητή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2(α). Η απόσταση εισάγεται στη γραμμή 4 στο φύλλο εργασίας (Σχήμα 5.3). Σημειώνεται ότι η απείρου μήκους προσέγγιση του αυτοκινητοδρόμου αυτόματα υποθέτει μία γραμμή κάθετη ως προς την απόσταση από την κεντρική γραμμή, D_C. Δεν υπάρχει ανάγκη να σχεδιαστεί αυτή η γραμμή στον χάρτη κυκλοφορίας για υπολογιστικούς λόγους. Μία επίδειξη αυτής της υπόθεσης παρατίθεται στο σχήμα 5.2(β). Σημειώνεται ότι για κάθε τοποθεσία παρατηρητή μπορεί να προκύψει διαφορετική προσέγγιση του αυτοκινητόδρομου. Σημειώνεται επίσης ότι το φύλλο εργασίας για την πρόβλεψη του θορύβου επιτρέπει υπολογισμούς για έξι διαφορετικές τοποθεσίες παρατήρησης με την εισαγωγή ενός αναγνωριστικού της τοποθεσίας παρατήρησης στην αρχή κάθε στήλης. Παρόμοια το φύλλο εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν έξι διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας για τη ίδια τοποθεσία παρατήρησης [1].



Σχήμα 5.2(α) :Κυκλοφοριακός χάρτης που δείχνει την τοποθεσία του παρατηρητή και την κάθετη απόσταση από την κεντρική γραμμή του δρόμου [1].



Σχήμα 5.2(β): Μοντέλο της υποτιθέμενης ευθυγράμμισης του δρόμου [1].

Project BRISTOL HWY   Date 13 ΑΥΓ 1980   Engineer : I.THOMPSON

			Ex. 9-10a			Ex. 9-10b														
Βήμα			A	T_M	T_H	A	T_M	T_H	A	T_M	T_H	A	T_M	T_H	A	T_M	T_H	A	T_M	T_H
1	Κυκλοφορία	Αριθμός οχημάτων, V(οχήμ/ώρα)	2000	100	100	2000	100	100												
2		Μέση ταχύτητα οχημ, S(Km/h)	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5												
3		Συνδυασμένος αριθμός οχημ. Vc(οχήμ/ώρα)	3000			3000														
4	Prop.	Απόσταση παρατηρητή-δρόμου, Dc (m)	60			60														
5	Προστασία	Απόσταση θέασης, L/S (m)	—			60														
6		Απόσταση ηχοπετάσματος, P(m)	—			15.2														
7		Διακοπή ηχοπετάσματος, B(m)	—			4.6		2.7												
8		Περικλειόμενη γωνία, θ (μοίρες)				170														
9	Πρόβλεψη	Επίπεδο L_{10} χωρίς προστασία, dBA	66	-	68	66	-	68												
10		Ρυθμιση προστασίας, dBA	0		0	13		10												
11		L_{10} στον παρατηρητή (ανα κατηγ. οχημ.)	66	-	68	53	-	58												
12		L_{10} στον παρατηρητή-ολικό	70 dBA			59.25 or 59 dBA														

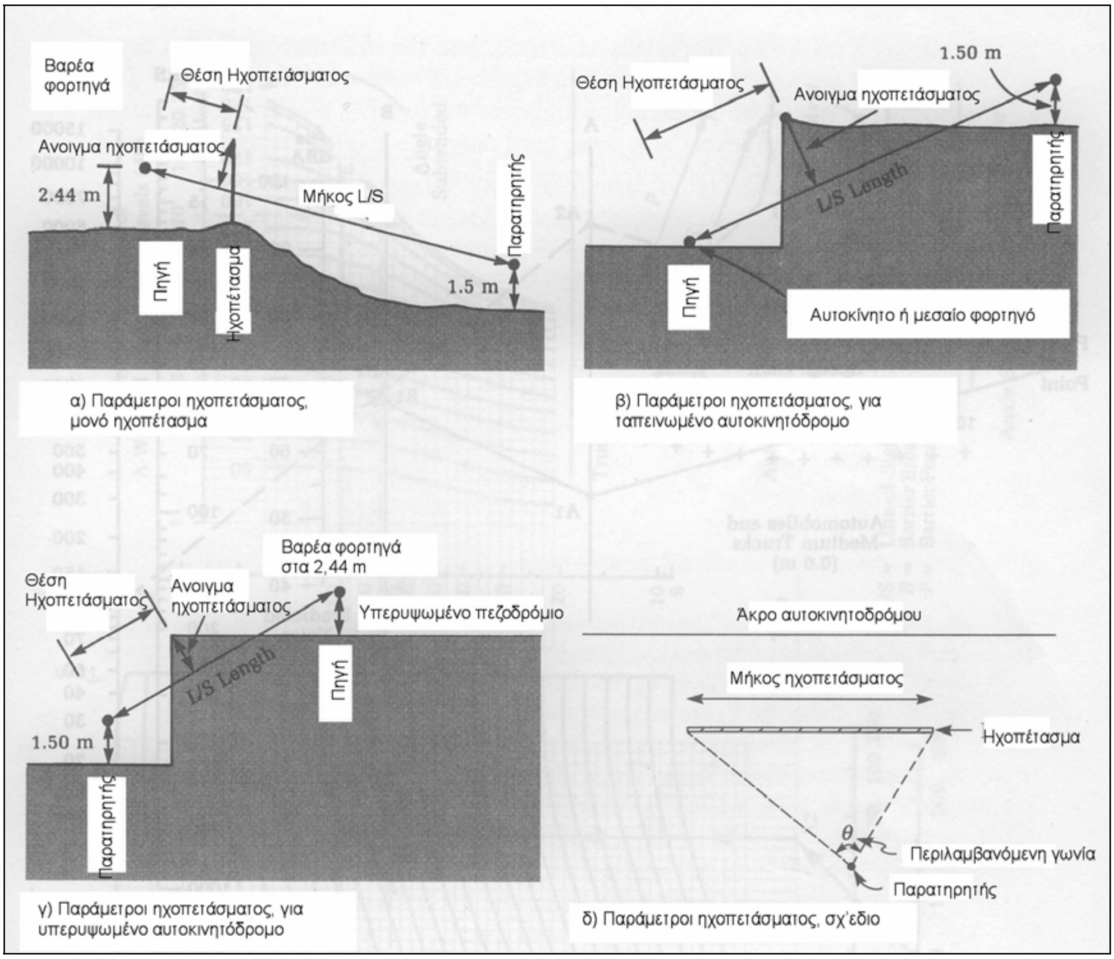
Σχήμα 5.3: Φύλλο εργασίας για την πρόβλεψη του θορύβου [1].

3. Παράμετροι κυκλοφορίας: Καθορίζονται οι συνθήκες λειτουργίας των οχημάτων με τη χρήση των παραμέτρων κυκλοφορίας στο πλησιέστερο προς τον παρατηρητή σημείο του αυτοκινητόδρομου (εάν αυτές οι παράμετροι διαφέρουν κατά μήκος του δρόμου) Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:
   a) Καθορίζεται η ποσότητα των επιβατικών αυτοκινήτων (vph) και η μέση ταχύτητα (km/h) και εισάγονται στις γραμμές 1 και 2 κάτω από τα αυτοκίνητα (automobiles) A.
   b) Καθορίζεται η ποσότητα των μεσαίων φορτηγών (vph) και η μέση ταχύτητα (km/h) και εισάγονται στις γραμμές 1 και 2 κάτω από τα μεσαία φορτηγά (medium trucks) (T_M)
   c) Καθορίζεται η ποσότητα των βαρέων φορτηγών (vph) και η μέση ταχύτητα (km/h) και εισάγονται στις γραμμές 1 και 2 κάτω από τα βαρέα φορτηγά (heavy trucks) T_H.
   d) Εάν οι ταχύτητες των επιβατικών αυτοκινήτων και των μεσαίων φορτηγών είναι ίδιες, πολλαπλασιάζεται η ποσότητα των μεσαίων φορτηγών επί 10 και προστίθενται στην ποσότητα των επιβατικών αυτοκινήτων. Εισάγεται η συνδυασμένη ποσότητα, V_C, στην γραμμή 3 του φύλλου εργασίας. Εάν οι ποσότητες των επιβατικών αυτοκινήτων και των μεσαίων φορτηγών συνδυαστούν, στις επακόλουθες διαδικασίες οι δύο τάξεις οχημάτων θεωρούνται σαν μία πηγή. Εάν η ταχύτητα των μεσαίων φορτηγών διαφέρει από αυτή των επιβατικών αυτοκινήτων τότε οι ποσότητες δεν συνδυάζονται, αλλά η ποσότητα των μεσαίων φορτηγών πολλαπλασιάζεται και πάλι επί 10 για τον καθορισμό της τιμής του L_{10}. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτή η πηγή κυκλοφοριακού θορύβου συμπεριφέρεται παρόμοια με τον θόρυβο από τα επιβατικά αυτοκίνητα, αλλά το συνολικό επίπεδο είναι 10dBA υψηλότερο από τα επιβατικά [1].

4. Παράμετροι θωράκισης-προστασίας του δρόμου: Εάν το σημείο διασταύρωσης του αυτοκινητοδρόμου στο πλησιέστερο σημείο δεν βρίσκεται σε κάποιο επίπεδο (είτε υπερυψωμένο είτε ταπεινωμένο), ή εάν υπάρχει ηχοπέτασμα στα δεξιά του δρόμου, καθορίζονται οι παράμετροι θωράκισης του δρόμου. Εάν η ανύψωση ή η ταπείνωση, ή το ηχοπέτασμα έχουν ύψος μικρότερο από 1.5m (συγκρινόμενα με το περιβάλλον έδαφος), τότε αγνοούνται. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη: Καθορίζονται οι παράμετροι του ηχοπετάσματος και εισάγονται στις γραμμές 5 έως 8 του φύλλου εργασίας. Χρησιμοποιείται το σχήμα 5.4 για τον καθορισμό των παραμέτρων. Οι παράμετροι που πρέπει να μετρηθούν είναι α) η απόσταση θέασης (Line-of-sight), L/S β) άνοιγμα στην θέαση (break in line of sight) γ) η απόσταση της θέσης του ηχοπετάσματος και δ) η περιλαμβανόμενη γωνία θ (μοίρες). Η περιλαμβανόμενη γωνία μετράται από τα άκρα του ηχοπετάσματος σε σχέση με την θέση του παρατηρητή. Για έναν παρατηρητή ισαπέχοντα από τα άκρα του ηχοπετάσματος, γωνία μπορεί να προσδιοριστεί με απλές τριγωνομετρικές αρχές. Οι γραφικές μέθοδοι μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές για άλλες διατάξεις. Σημειώνεται ότι όσο το μήκος του ηχοπετάσματος αυξάνει, η γωνία πλησιάζει τις 180°.
5. Το επίπεδο L_{10} στην θέση του παρατηρητή χωρίς θωράκιση: Καθορίζεται το χωρίς θωράκιση επίπεδο L_{10} στην θέση του παρατηρητή για όλες τις τρεις κυκλοφοριακές πηγές (επιβατικά, μεσαία και βαρέα φορτηγά) χρησιμοποιώντας το νομογράφημα του L_{10} (Σχήμα 5.5). Σημειώνεται ότι εάν οι ταχύτητες των επιβατικών και των μεσαίων φορτηγών είναι ίδιες, αυτές οι δύο πηγές μπορούν να εκτιμηθούν μαζί χρησιμοποιώντας την συνδυασμένη ποσότητα, V_C, και τη μέση ταχύτητα, S_A ή S_M στις γραμμές 3 και 2 του φύλλου εργασίας. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

   a) Τα επιβατικά (και τα μεσαία φορτηγά) : Χρησιμοποιώντας την ποσότητα των οχημάτων, V_A, (αυτή αντιστοιχεί σε V_C, την συνδυασμένη ποσότητα των επιβατικών και μεσαίων φορτηγών, όταν οι ταχύτητες των δύο πληθυσμών είναι ίσες), και την μέση ταχύτητα S_A (ή S_M), εισάγονται στο νομογράφημα του L_{10} και καθορίζεται το χωρίς θωράκιση επίπεδο L_{10} στην θέση του παρατηρητή. Έπειτα εισάγεται στην γραμμή 9 του φύλλου εργασίας.

b) Μεσαία φορτηγά: Χρησιμοποιώντας την ποσότητα των οχημάτων, V_M, πολλαπλασιασμένη επί 10, και μετά την μέση ταχύτητα, S_M, εισάγονται στο νομογράφημα του L_{10} και καθορίζεται το χωρίς θωράκιση επίπεδο L_{10} στην θέση του παρατηρητή. Έπειτα εισάγεται στη σειρά 9 του φύλλου εργασίας. Εάν τα επιβατικά και τα μεσαία φορτηγά είχαν συνδυαστεί στο βήμα α, τότε αυτό το βήμα θα πρέπει να παραληφθεί [1].



α) Παράμετροι ηχοπετάσματος, μονό ηχοπέτασμα

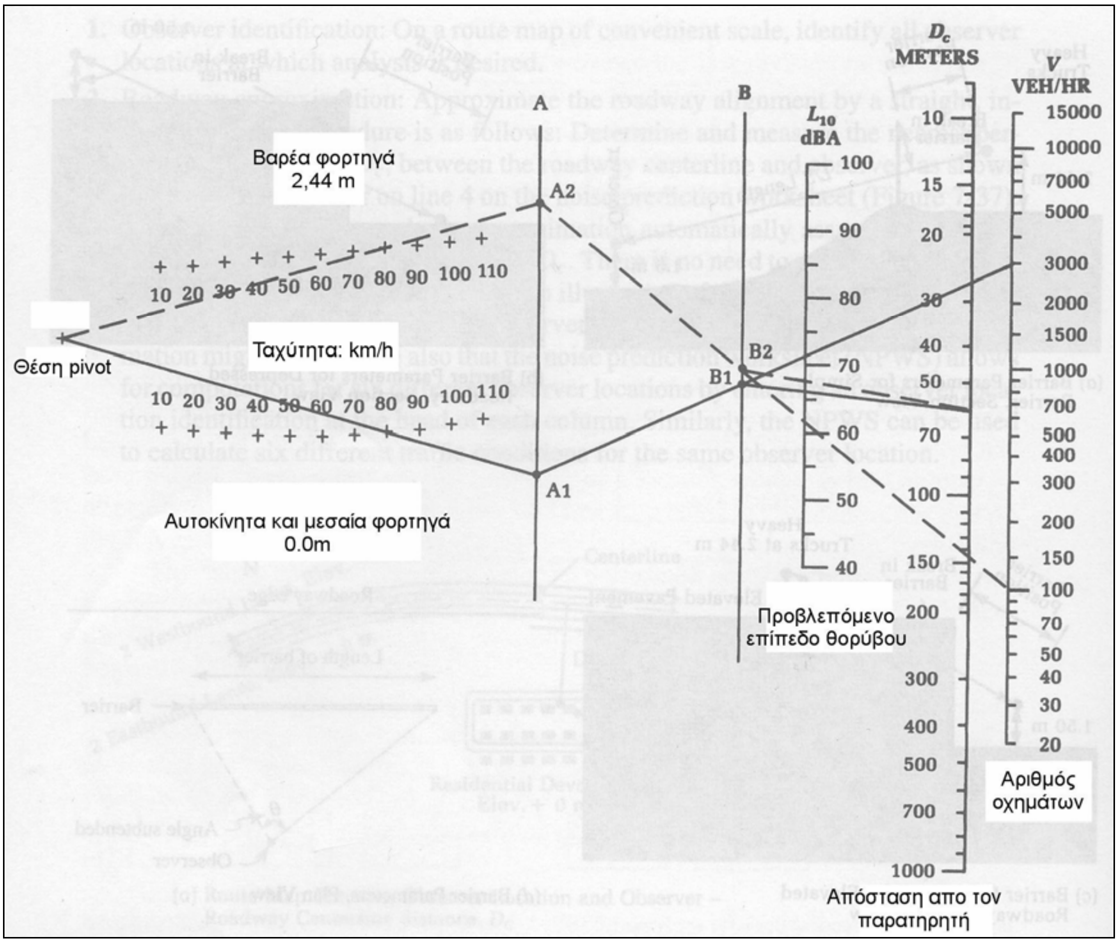
β) Παράμετροι ηχοπετάσματος, για ταπεινωμένο αυτοκινητόδρομο

γ) Παράμετροι ηχοπετάσματος, για υπερυψωμένο αυτοκινητόδρομο

δ) Παράμετροι ηχοπετάσματος, σχ'εδιο

Σχήμα 5.4: Ορισμοί των παραμέτρων ηχοπετασμάτων [1].

c) Βαρέα φορτηγά: Χρησιμοποιώντας την ποσότητα των οχημάτων, V_T, και την μέση ταχύτητα, S_T, εισάγονται στο νομογράφημα του L_{10} και καθορίζεται το χωρίς θωράκιση επίπεδο L_{10} στην θέση του παρατηρητή. Έπειτα εισάγεται στη σειρά 9 του φύλλου εργασίας.



Σχήμα 5.5: Το νομογράφημα L_{10} [1].

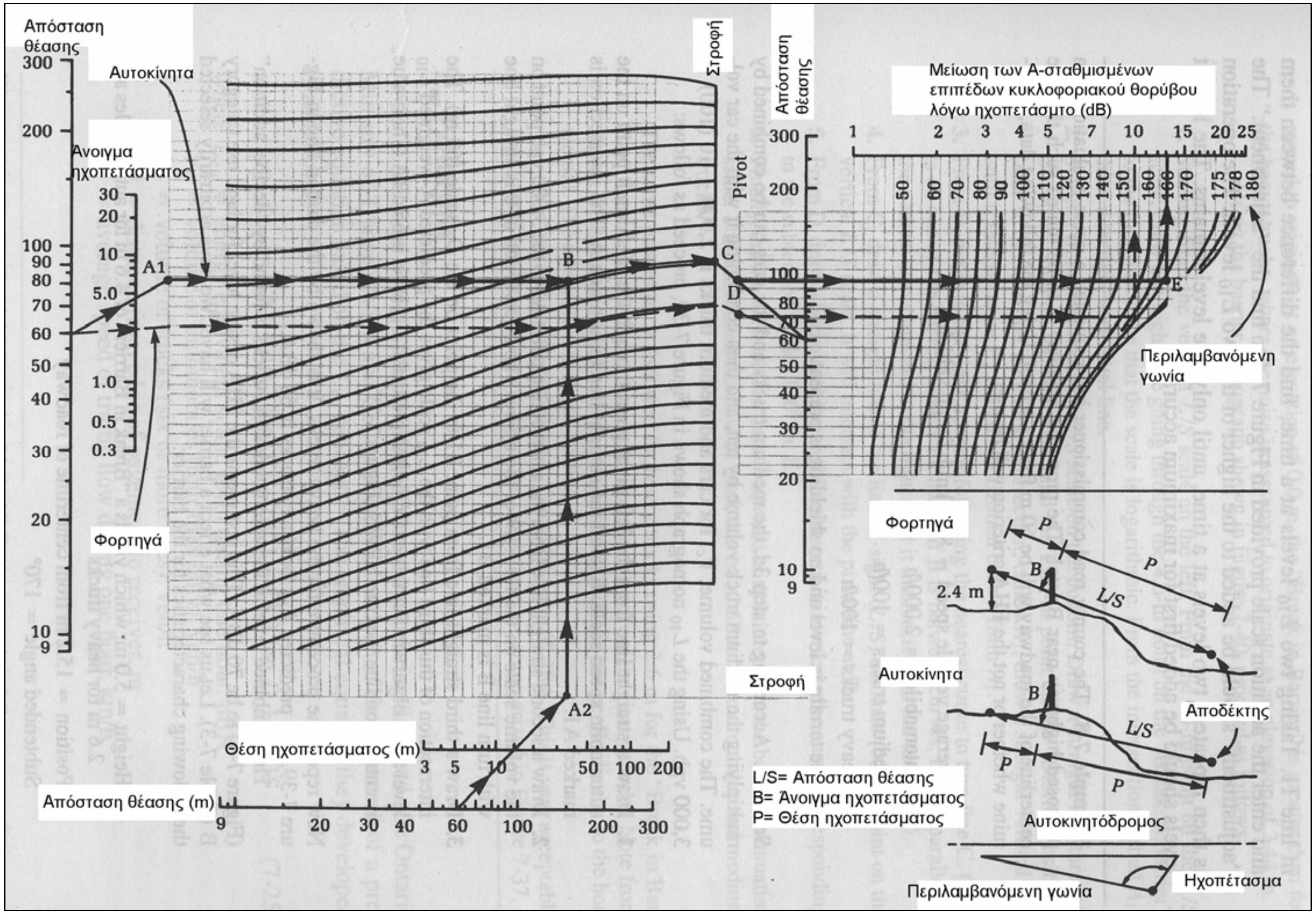
6. Ρύθμιση της θωράκισης-προστασίας: Καθορίζεται η μείωση του θορύβου που μπορεί να φέρει ο αυτοκινητόδρομος από τη γεωμετρία του αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιώντας το νομογράφημα των ηχοπετασμάτων (Σχήμα 5.6) και τις παραμέτρους της οδού που αναγράφονται στο φύλλο εργασίας. Αυτή η διαδικασία πρέπει να πραγματοποιηθεί δύο φορές: μία για το μηδενική ανύψωση της

πηγής (επιβατικά και μεσαία φορτηγά) και μία για ανύψωση 2.44m (βαρέα φορτηγά).

a) Χαμηλές πηγές (0 m): χρησιμοποιώντας την απόσταση θέασης (line of sight), L/S, την απόσταση της θέσης του ηχοπετάσματος, P, το άνοιγμα (break) στην απόσταση L/S, B (για πηγές στο επίπεδο του εδάφους), και την περιλαμβανόμενη γωνία, θ, εισάγονται στο νομογράφημα του ηχοπετάσματος και υπολογίζεται η ρύθμιση της θωράκισης. Έπειτα εισάγεται στη γραμμή 10 του φύλλου εργασίας κάτω από τα επιβατικά και τα μεσαία φορτηγά.

b) Υψηλές πηγές (2.44m): χρησιμοποιώντας την απόσταση θέασης (line of sight), L/S, την απόσταση της θέσης του ηχοπετάσματος, P, το άνοιγμα (break) στην απόσταση L/S, B (για πηγές στα 2.44m) και την περιλαμβανόμενη γωνία, θ, εισάγονται στο νομογράφημα του ηχοπετάσματος και υπολογίζεται η ρύθμιση της θωράκισης. Έπειτα εισάγεται στη γραμμή 10 του φύλλου εργασίας κάτω από τα βαρέα φορτηγά.

7. L_{10} στον παρατηρητή, ανά τύπο οχήματος: Υπολογίζεται το επίπεδο θορύβου L_{10} στον παρατηρητή για κάθε ξεχωριστή πηγή με αφαίρεση της ρύθμισης θωράκισης (γραμμή 10) από το επίπεδο L_{10} στον παρατηρητή χωρίς θωράκιση (γραμμή 9), και εισάγεται το αποτέλεσμα στην γραμμή 11. σημειώνεται ότι η ρύθμιση θωράκισης είναι πάντα αρνητική και μπορεί να αφαιρεθεί αλγεβρικά από τη γραμμή 9.
8. Το συνολικό επίπεδο L_{10} στον παρατηρητή: Καθορίζεται το συνολικό επίπεδο L_{10} στον παρατηρητή και εισάγεται στη γραμμή 12. Αυτό πραγματοποιείται με λογαριθμική πρόσθεση (πρόσθεση ντεσιμπέλ) των συνεισφορών από επιβατικά, μεσαία φορτηγά και βαρέα φορτηγά που υπολογίστηκαν στην γραμμή 11. Παίρνοντας δύο επίπεδα τη φορά, βρίσκεται η διαφορά μεταξύ τους και εισάγεται στην κλίμακα πρόσθεσης στο σχήμα 2.5 για να βρεθεί η <<ρύθμιση>>. Η <<ρύθμιση>>θα πρέπει να προστίθεται στο υψηλότερο από τα δύο



Σχήμα 5.6: Το νομογράφημα για τα ηχοπετάσματα [1].

επίπεδα L_{10}. Η διαδικασία μετά επαναλαμβάνεται, με δύο επίπεδα τη φορά, μέχρις ότου απομείνει μόνο ένα επίπεδο. Τα χαμηλότερα επίπεδα θα πρέπει να προστίθενται πρώτα για να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια.

5.5 Το μοντέλο CRTN

Στην παράγραφο αυτή ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου CRTN καθώς αυτό αναπτύσσεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Η διαδικασία CRTN για την εκτίμηση του κυκλοφοριακού θορύβου αναπτύχθηκε για το Υπουργείο Περιβάλλοντος του Ηνωμένου Βασιλείου από τους Delany, Harland, Hood και Scholes. Χρησιμοποιείται σαν βοήθημα στον σχεδιασμό των δρόμων καθώς και στον καθορισμό δικαιωμάτων σε ηχητική μόνωση ιδιωτικών κατοικιών με δημόσια έξοδα σύμφωνα με τη Βρετανική νομοθετική Πράξη για τα εδάφη. Αυτό το τελευταίο επηρέασε στην επιλογή του δείκτη L_{10} ως του δείκτη του θορύβου.

Το CRTN υποθέτει μία γραμμική πηγή και σταθερή ταχύτητα της κυκλοφοριακής κίνησης, και στην Βρετανία είναι το μοναδικό όργανο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την οδική κυκλοφορία από τις αρχές. Το Calculation of Road Traffic Noise [50],[42]CoRTN αντικαταστάθηκε από το πιο βολικό, Predicting Road Traffic Noise [51],[42] , το οποίο ακολουθούσε το σκεπτικό του Delany et al. [52] για τη διαδικασία. Αυτοί οι συγγραφείς ανέφεραν πως για το διάστημα μεταξύ 50 και 54.9 dBA η μέση διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων και των μετρούμενων επιπέδων ήταν +1.4 dBA. Στον αντίποδα, μεταξύ των 80 και 84.9 dBA, το μέσο σφάλμα ήταν -1.2 dBA. Αυτό σημαίνει ότι το CRTN υποτιμούσε τα υψηλά επίπεδα και υπερεκτιμούσε τα χαμηλά επίπεδα. Ο Samuels et al. [53] (ενημέρωση από Saunders et al [54]) παρατήρησε σημαντικές διαφορές από το μοντέλο με τα Αυστραλιανά οχήματα, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Η μέση επιπλέον εκτίμηση ήταν 0.7 για συνθήκες ελεύθερου πεδίου και 1.7 dBA, μπροστά σε προσόψεις κτιρίων με αντίστοιχες στάνταρ αποκλίσεις 1.8 και 2.5 dBA. Ορισμένοι χρήστες βρέθηκαν να εξαρτώνται από το CRTN για εφαρμογές στις οποίες δεν ήταν αυστηρά έγκυρο, για τις οποίες ο Steele [55] βρήκε ακόμη μεγαλύτερες υπό και υπερεκτιμήσεις ως και +12.5 dBA σε μία περίπτωση [42],

5.5.1 Ο Αλγόριθμος του CRTN

Η διαδικασία ξεκινά με την τιμή L_{10} η οποία καθορίζεται από τον ρυθμό ροής της κίνησης ώστε:

$$L_{10} = 10\log q$$

όπου q ο ρυθμός ροής. Οι υπολογισμοί εξασθένισης για τη απόσταση, ανακλάσεις και ηχοπετάσματα ακολουθούν ως επόμενες διαδικασίες. Η κύρια παραδοχή είναι αυτή της μακριάς ομογενούς γραμμικής πηγής με κυλινδρική ακτινοβολία-εκπομπή, αλλά με δεδομένες τις γωνίες της άποψης. Στην αρχική τιμή του L_{10} προστίθενται διορθώσεις για τη μέση ταχύτητα, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων, την κλίση, την επιφάνεια του δρόμου και ένας σταθερός όρος. Δεν λαμβάνεται υπόψη η επιτάχυνση. Η εξίσωση του CRTN για την ωριαία τιμή του L_{10} στην απόσταση αναφοράς είναι:

$$L_{10} = 10\log q + 33\log(v + 40 + 500/v) + 10\log(1 + 5p/v) + 0.3G - 27.6$$

όπου q είναι ως άνω, v η ταχύτητα, p το ποσοστό των βαρέων οχημάτων και G η κλίση, της οποίας ο συντελεστής γίνεται 0.2 εάν γίνεται η υπόθεση ότι τα οχήματα μειώνουν την ταχύτητα τους προς την ανηφόρα.

Αυτή η εξίσωση παράχθηκε από προσαρμογή καμπυλών των μετρούμενων τιμών L_{10} κάτω από τις διάφορες συνθήκες [42]

5.5.2 Η διάδοση στο CRTN

Το CRTN περιέχει έναν υπολογισμό της εξασθένισης από λεπτά ηχοπετάσματα. Αντί να υπολογίζονται οι εξασθενίσεις, από συχνότητα σε συχνότητα, επιχειρείται μία Α-σταθμισμένη εκτίμηση της εξασθένισης.

5.6 Το μοντέλο RLS 90

Το Richtlinien fur Larmschutz an Straβen (RLS 90) (Κατευθυντήριες Γραμμές για την Προστασία από τον Θόρυβο στους Δρόμους) είναι το ανώνυμο νομικό στάνταρ για την πρόβλεψη του θορύβου στην Γερμανία. Η ισχύουσα έκδοση του 1990 αντικατέστησε την αρχική έκδοση του 1981. Ενσωματώνει δεδομένα σχεδιασμού ροής κυκλοφορίας όπου η πραγματική κυκλοφορία δεν είναι γνωστή. Είναι διαφορετικό από τα υπόλοιπα καθώς περιλαμβάνει και ένα πρόγραμμα για χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων.

5.6.1 Ο αλγόριθμος του RLS 90

Το εκτιμώμενο επίπεδο ηχητικής πίεσης για μία οδό είναι:

$$L_r = L_m + K$$

όπου:

L_m είναι το μέσο Α-σταθμισμένο επίπεδο

K είναι η προσθήκη για την αυξημένη επίδραση των διασταυρώσεων που ελέγχονται από φανάρια και άλλες διασταυρώσεις.

Το μέσο Α-σταθμισμένο επίπεδο δίνεται από την εξίσωση:

$$L_m = 10.\log\left[10^{0.1.L_{m,n}} + 10^{0.1.L_{m,f}}\right]$$

όπου n και f είναι οι κοντινότερες και οι πιο μακρινές λωρίδες αντίστοιχα

5.6.2 Μέθοδος για μακριά ευθεία κυκλοφοριακά ρεύματα

Για κάθε λωρίδα το μέσο επίπεδο υπολογίζεται από:

$$L_m = L_{m,E} + D_{s\perp} + D_{BM} + D_E$$

όπου

$L_{m,E}$ είναι το επίπεδο εκπομπής

$D_{s,\perp}$ είναι η εξασθένιση λόγω της απόστασης και της απορρόφησης απ[ο τον αέρα.

D_{BM} είναι η εξασθένιση λόγω επίδρασης του εδάφους και ατμοσφαιρικών επιδράσεων.

D_B είναι η εξασθένιση λόγω της τοπογραφίας και των διαστάσεων των κτιρίων

Το επίπεδο εκπομπής είναι:

$$L_{m,E} = L_m^{(25)} + D_v + D_{StrO} + D_{Stg} + D_E$$

όπου:

$L_m^{(25)}$ είναι το Α-σταθμισμένο μέσο επίπεδο

D_v είναι η διόρθωση για τα όρια ταχύτητας.

D_{StrO} είναι η διόρθωση για τις επιφάνειες των δρόμων.

D_{Stg} είναι η διόρθωση για τις ανηφόρες και τις κατηφόρες.

D_E είναι η διόρθωση για τα χαρακτηριστικά απορρόφησης των επιφανειών των κτιρίων.

$$L_m^{(25)} = 37.3 + 10.\log\{M.(1 + 0.082p)\}$$

και M είναι η τυποποιημένη ροή κυκλοφορίας σύμφωνα με τον τύπο του δρόμου (Autobahn, επαρχιακός δρόμος κτλ).

Το p είναι το αντίστοιχο ποσοστό των βαρέων οχημάτων (πάνω από 2,8t). Η τιμή του καθενός εξαρτάται από το εάν λαμβάνεται υπόψη η μέρα (6.00-22.000 ή η νύχτα (22.00-6.00).

$$D_v = L_{Pkw} - 37.3 + 10.\log\left\{\frac{100 + \left(10^{0.1D} - 1\right)p}{100 + 8.23p}\right\}$$

$$L_{Pkw} = 27.7 + 10.\log\left\{1 + \left(0.02 v_{Pkw}\right)^3\right\}$$
$$L_{Lkw} = 23.1 + 12.5\log v_{Lkm}$$
$$D = L_{Lkw} - L_{Pkw}$$

v_{Pkw} είναι το όριο ταχύτητας που κυμαίνεται από 30 έως 130 km/h για τα ελαφρά οχήματα,

v_{Lkw} είναι το όριο ταχύτητας που κυμαίνεται από 30 έως 80 km/h για τα βαρέα οχήματα

L_{Pkw}, L_{Lkw} είναι τα αντίστοιχα μέσα επίπεδα, L_m(25)

D_{StrO} η διόρθωση για την επιφάνεια του δρόμου δίνεται σε ένα πίνακα και εξαρτάται από το είδος της επιφάνειας και την ταχύτητα των οχημάτων. Κυμαίνεται από 0 έως 6 dB.

$D_{Stg}=0.6|g|-3$ για $|g|>5\%$

$D_{Stg}=0$ για $|g|\leq5\%$

Το RLS-90 είναι μοναδικό, ανάμεσα στα προγράμματα που αναφέρονται εδώ στο ότι έχει έναν αλγόριθμο για τους χώρους στάθμευσης. Οι υπολογισμοί είναι παρόμοιοι με αυτούς για τους δρόμους. Το επίπεδο εκπομπής θορύβου υπολογίζεται από:

$$L^*_{m,E} = 37 + 10.\log(N, n) + D_p$$

όπου

N είναι ο αριθμός των κινήσεων των οχημάτων ανά ώρα, σε σχέση με τη θέση παρκινγκ.

n είναι ο αριθμός τέτοιων θέσεων παρκινγκ

D_p είναι μία διόρθωση για τον τύπο του παρκαρίσματος [41].

5.6.3 Η διάδοση στο μοντέλο RLS 90

Η εξασθένιση υπολογίζεται με τις συνήθεις μεθόδους ανίχνευσης ακτινών, Τα ηχοπετάσματα, οι υπερυψωμένοι και οι χαμηλωμένοι δρόμοι επεξεργάζονται με τον συνήθη τρόπο για ασυνάρτητες γραμμικές πηγές.

5.7 Το μοντέλο MITHRA

Το μοντέλο MITHRA είναι ένα εμπορικό πακέτο που παράγεται από τη Γαλλική εταιρία, 0,1dB, L’ acoustique numerique. Περιέχει ένα εκτεταμένο πακέτο ανίχνευσης ακτινών, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας και του εδάφους, περίθλαση και ανάκλαση εξαιτίας ανοιγμάτων όπως επίσης και την τοπική τοπογραφία, τα κτίρια και πετάσματα. Η κυκλοφορία θεωρείται ότι σχηματίζει μία γραμμική πηγή. Οι δρόμοι χωρίζονται σε πέντε τάξεις, και λαμβάνονται υπόψη έξι τύποι επιφάνεια του δρόμου. Το Mithra περιέχει υπολογισμό του θορύβου από σιδηρόδρομους.

5.7.1 Ο Αλγόριθμος του MITHRA

Σύμφωνα με το Centre Scientifique et Technique du Batiment (1982) [56], η ακουστική ισχύς ανά μέτρο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$LW = LW_{VL} + 10.\log\left[\frac{flow + flow\%PL(EQ-1)/100}{V_{50}}\right] - 30$$

όπου:

LW_{VL}= η ακουστική ισχύς ενός ελαφρού οχήματος,

flow= ο αριυμός των οχημάτων ανά ώρα ανά λωρίδα,

%PL= το ποσοστό των βαρέων οχημάτων,

EQ= το ισοδύναμο ενός ελαφρού οχήματος προς ένα βαρύ όχημα,

V_{50} = η ταχύτητα του ρεύματος των οχημάτων [42].

Η ακουστική ισχύς ενός ελαφρού οχήματος βρίσκεται από την εξίσωση:

$$LW_{VL} = 46 + 30.\log V_{50} + C$$

όπου το 30 αντικαθιστά το V_{50} όταν το V_{50}<30 km/h, το C εξαρτάται από τον τύπο της κυκλοφορίας,

$$C = \begin{cases} 0 & \text{ρευστή κυκλοφοριακή ροή} \\ 2 & \text{διακοπτόμενη ροή} \\ 3 & \text{επιταχυνόμενη ροή} \end{cases}$$

Το EQ δίνεται σε πίνακα και εξαρτάται από την ταχύτητα και την κλίση.
Σε περιπτώσεις που τα δεδομένα κυκλοφορίας δεν είναι γνωστά, δίνεται ένας πίνακας για τη μέγιστη ακουστική ισχύ σύμφωνα με τον τύπο του δρόμου όπως κατατάχθηκε πιο πάνω. Αντίστοιχες υποθέσεις γίνονται για τα ποσοστά των βαρέων, την ταχύτητα και την ροή των οχημάτων ανά λωρίδα. Σε περιπτώσεις που η ταχύτητα είναι άγνωστη το πρόγραμμα προβλέπει μία ταχύτητα βασισμένη στην ροή (γραμμική σχέση και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων [42].

5.7.2 Η διάδοση στο MITHRA

Η διάδοση καθορίζεται με τη χρήση της αρχής της αμοιβαιότητας (Principle of Reciprocity). Μία πηγή θεωρείται ως ο αποδέκτης. Ο ήχος θεωρείται ότι διαδίδεται σε έναν κώνο. Εάν αυτή η πηγή βρίσκεται σε μία γωνία θ ως προς την κάθετη στην γραμμική πηγή και σε μία απόσταση r τότε ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{r.W}{\cos\theta}$$

Για μία σημειακή πηγή ισχύος dW και κατεύθυνσης Dh, η γεωμετρική απόκλιση δίνει:

$$L_p = 10.\log(dW.Dh) - 10.\log(4.\pi.d^2)$$

Για την οδική κυκλοφορία, το Dh είναι συνήθως ίσο με ένα. Ο υπολογισμός της επίδρασης του εδάφους βασίζεται στον Delany et al [57]. Η περίθλαση και ανάκλαση από κάθετες επιφάνειες χειρίζονται με τον συνήθη τρόπο λαμβάνοντας υπόψη δευτερεύουσες ανακλάσεις.

5.8 Το μοντέλο StL-86 version 1

Το Modele de Calcul de Bruit du Trafic Routier Pour Ordinateur, Iere partie: Manuel d'utilisation du logiciel StL-86 Version 1.0 [58] εκδίδεται από το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Γραφείο για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Είναι σύμφωνο με το Modele de bruit du Trafic Routier dans le Zones Habitees [59], το οποίο γράφτηκε από τους Balzari & ScHudel, μηχανικούς και πολεοδομικούς σχεδιαστές, και τους Grolimund& Petermann, και το οποίο επίσηςεκδίδεται από το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Γραφείο για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Αυτό το μοντέλο είναι ενσωματώνει ένα κυκλοφοριακό μοντέλο όπως και ένα μοντέλο θορύβου [42].

5.8.1 Ο αλγόριθμος του StL-86 version 1

Αυτό το μοντέλο θεωρεί την κυκλοφορία, όχι σαν ξεχωριστά ρεύματα, αλλά ως έναν αυτοκινητόδρομο. Κατά συνέπεια η απόλυτη (net) κλίση απαιτείται να επιτρέπει την ροή και στις δύο κατευθύνσεις [42].

$$I = \frac{i}{2}\left[1 + \frac{N_{mont} - N_{desc}}{N_{mont} + N_{desc}}\right]$$

όπου

I είναι η απόλυτη κλίση επί τοις εκατό,

i είναι η κλίση του δρόμου

N_{mont} είναι η ροή προς την ανηφόρα

N_{desc} είναι η ροή προς την κατηφόρα

Τα επίπεδα εκπομπής για τους τρεις τύπους οχημάτων υπολογίζονται από:

$$L_{E1} = \max\{12.8 + 19.5\log V_1, 45 + 0.8(I-2)\} + 10\log N_1 + A$$

$$L_{E2} = \max\{34 + 13.3\log V_2, 56 + 0.6(I-1.5)\} + 10\log N_2 + A$$

$$L_{Eb} = E_b + 10.\log N_b$$

όπου

L_{E1}, L_{E2}, και L_{Eb} είναι οι εκπομπές από τις τρεις κατηγορίες σε dBA

V είναι οι ταχύτητες

N οι ροές της κυκλοφορίας

E_b είναι οι εκπομπές για τα ξεχωριστά τραμ. Εάν τα τραμ είναι μικρότερα ή ίσα με 10% το E_b μπορεί να ληφθεί σαν 56dBA, αλλιώς θα πρέπει να μετρηθεί

A είναι μία σταθερά ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας του δρόμου

Το συνολικό επίπεδο εκπομπής βρίσκεται έπειτα με λογαριθμική πρόσθεση με περαιτέρω διορθώσεις για την συνολική μηχανοκίνητη κυκλοφοριακή ροή και την σιδηροδρομική κυκλοφοριακή ροή.

5.8.2 Η διάδοση στο μοντέλο StL-86 version 1

Το μοντέλο περιλαμβάνει διορθώσεις για ανακλάσεις από κτίρια κατά μήκος του δρόμου. Περιλαμβάνει αποσβέσεις λόγω κτιρίων και παρόμοιων εμποδίων μεταξύ του δρόμου και του αποδέκτη, τη συνήθη επίδραση της απόστασης και τη γωνία του ανοίγματος του δρόμου προς τον αποδέκτη.

Τα επίπεδα για τα αυτοκίνητα και τα τραμ υπολογίζονται ξεχωριστά ως ακολούθως:

$$L_i = L_{r,ei} + \Delta R_i + \Delta O_i + \Delta D_\iota \Delta \Phi_\iota$$

Αυτά έπειτα προστίθενται λογαριθμικά.

5.9 Η μέθοδος ASJ-1993

Το 1975 η Acoustical Society of Japan εξέδωσε μία μέθοδο για τη πρόβλεψη ενός ψευδο-L_{50} που προέκυπτε από ελεύθερη κυκλοφοριακή ροή. Αναφέρθηκε από τον Koyasu [60] και ενημερώθηκε από τους Takagi et al. [61] και Yamamoto et al. [62] Η ενημερωμένη έκδοση περιέχει μία μέθοδο απευθείας υπολογισμού του L_{eq} και εξαγωγής ενός ψευδο-L_{50} από το αποτέλεσμα. Αυτή ονομάζεται η Α μέθοδος. Το ASJ επίσης περιλαμβάνει μία εμπειρική μέθοδο που καλείται η Β μέθοδος. Αυτή είναι έγκυρη μόνο μακριά από την γραμμική πηγή [42].

5.9.1 Ο αλγόριθμος του ASJ-1993

Τα επίπεδα ηχητικής ισχύος απεικονίζονται για ρεύματα κυκλοφορίας που αποτελούνται από αντίστοιχα δύο και τρεις τάξεις οχημάτων. Αυτά είναι:

$$L_w = 65.1 + 20\log V + 10\log(a_1 + 4.4a_2)$$

όπου α_1 και α_2 είναι οι αναλογίες των ελαφρών και βαρέων οχημάτων, και $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$

$$L_w = 64.7 + 20\log V + 10\log(b_1 + 1.5b_2 + 4.9b_3)$$

όπου b_s αντιστοιχεί σε ελαφρά, μεσαία και βαρέα οχήματα.

Η μέθοδος ASJ παραδέχεται μία ακριβή, Α μέθοδο, και μία εμπειρική, Β μέθοδο. Η Α μέθοδος απιτεί τον υπολογισμό του φάσματος των ζωνών των οκτάβων. Αυτές εξάγονται από τις κεντρικές συχμότητες ζώνης μεταξύ 63 Hz και 4 kHz σύμφωνα με την εξίσωση:

$L_f = -10\log\{1 + (f/2000\} \pm 2.5\log(f/1000)$, ανάλογα αν το V είναι μεγαλύτερο η λιγότερο από 80 km/h.

$$L_{eq} = 10\log\left[\sum_{i=1}^{k} 10^{U_i/10} \Delta t N / T\right]$$

όπου U_i είναι το i υποδιάστημα της διακύμανσης της συνάρτησης διάδοσης U(f), στον αποδέκτη, που προκαλείται από την διέλευση ενός οχήματος. Ν είναι ο όγκος της κυκλοφορίας. Τα=3600s.

$$\Delta t = \Delta d / v$$

Το μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό που προτείνεται από τον Rathe [63]. Τα U(f) προστίθενται για όλα τα οχήματα που θεωρούνται σε διακριτά σημεία, σε μία ευθεία γραμμή, και σε διαστήματα ανα Δd. Το μοντέλο περιορίζεται σε ίσα διαστήματα.

5.9.2 Η διάδοση στο μοντέλο ASJ-1993

Η βασική εξίσωση διάδοσης βασίζεται στον Rayleigh [64], αλλά τροποποιημένη ώστε να ενσωματώνει την Α-στάθμιση.

$$L_A = 10\log\sum 10^{L_{wi}/10} \left|\phi_i^2\right| / 2\pi$$

όπου το L_{wi} είναι Α-σταθμισμένο, και φ είναι το δυναμικό της ταχύτητας.

Το ψευδο-L_{50} μπορεί να βρεθεί από:

$$L_{50} = L_{eq} + ad/1 + b$$

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των οχημάτων και l η απόσταση από το κέντρο του δρόμου προς τον αποδέκτη. Τα a και b είναι σταθερές που εξαρτώνται από το σχετικό υψόμετρο του δρόμου. Εξισώσεις δίνονται για την περίθλαση, ανάκλαση και επίδραση του εδάφους για διάφορες στοιχειώδεις περιπτώσεις εφαρμόσιμες σε ηχοπετάσματα πλησίον αυτοκινητοδρόμων. Δεν υπάρχει πρόβλεψη για κοντά ηχοπετάσματα ούτε για πιο γενική διάδοση.

5.10 Η πρόβλεψη L_{eq} κατά Hajek

Περίπου την ίδια εποχή που περατωνόταν η έκθεση NCHRP 174, Το Υπουργείο Μεταφορών και επικοινωνιών του Οντάριο ολοκλήρωσε μία βελτίωση της εξίσωσης πρόβλεψης βασισμένης στην θεώρηση L_{eq}. Η εμπειρική σχέση που ανέπτυξαν είναι η ακόλουθη [1], [65]:

$$L_{eq} = 42.3 + 10.2\log(V_c + 6V_t) - 13.9\log D + 0.13S$$

όπου:

L_{eq} είναι το ισοδύναμο ηχητικό ενεργειακό επίπεδο κατά τη διάρκεια μίας ώρας, dBA

V_c είναι το πλήθος των οχημάτων (τέσσερις τροχοί μόνο), οχήματα/ώρα

V_t είναι το πλήθος των φορτηγών (έξι ή περισσότεροι τροχοί), οχήματα/ώρα

D είναι η απόσταση από την άκρη του οδοστρώματος προς τον αποδέκτη, m

S είναι η μέση ταχύτητα της κυκλοφοριακής ροής κατά τη διάρκεια μίας ώρας, km/h

Η απλότητα της εξίσωσης είναι ένα προφανές πλεονέκτημα έναντι της μεθόδου NCHRP. Έχει τον περιορισμό ότι δεν μπορεί να υπολογίσει ηχοπετάσματα. Ένα νομογράφημα παρόμοιο με της μεθόδου NCHRP είναι διαθέσιμο για να ληφθούν υπόψη ηχοπετάσματα.

5.11 Η πρόβλεψη L_{dn}

Ως μία απευθείας επέκταση της μεθοδολογίας του L_{eq}, η μέθοδος του Οντάριο επεκτάθηκε ώστε να κάνει δυνατό τον υπολογισμό του L_{dn}. Το τροποποιημένο μοντέλο έχει την ακόλουθη μορφή:

$$L_{dn} = 31.0 + 10.2\log[AADT + (T\%AADT/20)] - 13.9\log D + 0.13S$$

όπου:

L_{dn}= το ισοδύναμο Α-σταθμισμένο ηχητικό επίπεδο κατά τη διάρκεια 24ωρης περιόδου με 10dBA στάθμιση να εφαρμόζεται μεταξύ 22.00-0700h, dBA

AADT= είναι η ετήσια μέση ημερήσια κίνηση, οχήματα/ώρα
%T= μέσο ποσοστό των φορτηγών κατά τη διάρκεια μίας τυπικής ημέρας, %

Η εξίσωση του L_{dn} έχει τα ίδια πλεονεκτήματα και τα ίδια μειονεκτήματα όπως η εξίσωση του L_{eq} [1].

5.12 Το μοντέλο Suksaard

Το μοντέλο **Suksaard et al**. [66] προβλέπει τον θόρυβο από την οδική κυκλοφορία (L_{eq}, dBA) στην Ταϊλάνδη. Το μοντέλο πρόβλεψης του θορύβου αναπτύχθηκε υιοθετώντας τις παρακάτω παραδοχές: τα οχήματα κινούνται σε μία απείρου μήκους ευθεία γραμμή με σταθερή ταχύτητα, τα επίπεδα ισχύος των κινούμενων οχημάτων ενός συγκεκριμένου τύπου είναι ίσα, τα κινούμενα οχήματα θεωρούνται σαν μη κατευθυντικές σημειακές ηχητικές πηγές και ο ήχος που παράγεται από κάθε ξεχωριστή πηγή διαδίδεται ημισφαιρικά. Το ισοδύναμο ηχητικό επίπεδο L_{eq} που παρατηρείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο λήψης δίνεται ως ακολούθως:

$$L_{eq} = PWL - 10\log 2ld - L_d - L_g$$

όπου:

PWL= το A-σταθμισμένο μέσο επίπεδο ενεργειακής ισχύος των οχημάτων (dBA)

l = η απόσταση της λωρίδας κυκλοφορίας από το σημείο λήψης (m)

d= η μέση απόσταση μεταξύ της πρόσοψης των οχημάτων, d=1000xV/Q (m)

V= η μέση ταχύτητα των οχημάτων (km/h)

Q= η κυκλοφορία (οχήματα/h)

L_d= η τιμή διόρθωσης για την απόσβεση λόγω περίθλασης

L_g= η τιμή διόρθωσης για την απόσβεση λόγω της επιφάνειας του εδάφους

Τα οχήματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στην κατηγορία των μεγάλων οχημάτων δηλαδή τα οχήματα με περισσότερους από τέσσερις τροχούς, και στην κατηγορία των μικρών οχημάτων δηλαδή τα οχήματα με τέσσερις ή λιγότερους τροχούς. Το μέσο επίπεδο ισχύος των δύο κατηγοριών οχημάτων αυξάνει σε μέγεθος σε σχέση με τον λογάριθμο της ταχύτητας των οχημάτων και είναι:

Κατηγορία μεγάλων οχημάτων:

$$PWL = 75.1 + 20.4 \log V$$

Κατηγορία μικρών οχημάτων:

$$PWL = 67.8 + 20.4 \log V$$

όπου:

PWL= το επίπεδο ισχύος

V= η ταχύτητα των οχημάτων

Το μέσο επίπεδο θορύβου των μεγάλων οχημάτων είναι περίπου 7.3dBA υψηλότερο από αυτό των μικρών οχημάτων και το μέσο επίπεδο ισχύος για έναν αριθμό οχημάτων μεικτού τύπου δίνεται ως ακολούθως:

$$PWL = 67.8 + 20.4 \log V + 10 \log((1-a) + 5.37a)$$

όπου α ο λόγος του αριθμού των μεγάλων οχημάτων προς τον συνολικό αριθμό των οχημάτων. Η εξίσωση για τον τελικό υπολογισμό του L_{eq} γίνεται:

$$L_{eq} = 67.8 + 20.4 \log V + 10 \log((1-a) + 5.37a) - 10 \log 2ld - L_d - L_g$$

5.13 Το Σκανδιναβικό μοντέλο.

Η σκανδιναβική μέθοδος πρόβλεψης θορύβου είναι το μόνο επίσημο μοντέλο που χρησιμοποιείται στις σκανδιναβικές χώρες. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του εξωτερικού θορύβου σε ανοικτό πεδίο εκφραζόμενο ως $L_{Aeg,24}$, και το μέγιστο επίπεδο θορύβου εκφραζόμενο ως $L_{AFmax,5\%}$ σε οποιοδήποτε ύψος και απόσταση από τον δρόμο (<300m). Ο εσωτερικός θόρυβος μπορεί επίσης να προβλεφθεί. Για πρακτικούς λόγους το μοντέλο περιέχει 22 προϋπολογισμένες τυπικές περιπτώσεις, όπου μπορεί να γίνει μία καλή εκτίμηση του θορύβου με τη χρήση δύο νομογραφημάτων πολύ λίγα δεδομένα εισόδου όπως η κυκλοφορία (ελαφρά και βαρέα), ταχύτητα, απόσταση και ύψος του αποδέκτη (Jonasson et al.,1996). Αυτές οι προϋπολογισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν εάν η πραγματική κατάσταση (γεωμετρία και θέση των ηχοπετασμάτων) αντιστοιχούν στις συνθήκες αυτών των περιπτώσεων.

Σε περισσότερο σύνθετες περιπτώσεις είναι αναγκαίο να γίνουν λεπτομερείς υπολογισμοί χρησιμοποιώντας νομογραφήματα (ή εξισώσεις). Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος πρόβλεψης χωρίζεται σε πέντε βήματα όπου πρέπει να γίνουν υπολογισμοί (Jonasson et al.,1996):

1) Το βασικό επίπεδο θορύβου 10 m από την κεντρική γραμμή του δρόμου.
2) Διόρθωση λόγω της απόστασης.
3) Διόρθωση λόγω του εδάφους και ηχοπετασμάτων
4) Λοιπές διορθώσεις (απότομοι δρόμοι, ανακλάσεις, παχιά ηχοπετάσματα)
5) Υπολογισμός της μείωσης του θορύβου λόγω προσόψεων για να εξαχθεί το εσωτερικό επίπεδο θορύβου [40].

Τα αναγκαία δεδομένα εισόδου χωρίζονται σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες:

- Εκπομπή (πληροφορίες από μέτρηση της κυκλοφορίας, μετρήσεις ταχύτητας και χάρτες δρόμων)
  - Ελαφρά οχήματα (<3.5 ton)
  - Βαρέα οχήματα (>3.5 ton)
  - Πραγματική ταχύτητα
  - Κλίση του δρόμου
  - Ύψος του δρόμου από το έδαφος
  - Τύπος της επιφάνειας του δρόμου (όχι υποχρεωτικό)
- Διασπορά (πληροφορίες που συλλέγονται από τοπική επιθεώρηση ή χάρτες)
  - Τύπος εδάφους
  - Απόσταση από τον αποδέκτη
  - Ηχοπετάσματα
  - Γεωμετρία του εδάφους
  - Ανακλάσεις
- Αποδέκτης (πληροφορίες που συλλέγονται από τοπική επιθεώρηση ή σχέδια κτιρίων και του περιβάλλοντος χώρου τους)
  - Ύψος του αποδέκτη
  - Τοπικά ηχοπετάσματα
  - Προσόψεις κτιρίων

Τα νομογραφήματα και η λεπτομερής περιγραφή των δεδομένων εισόδου και της χρήσης του μοντέλου αναφέρονται από τον Jonasson et al. Μία από κοινού έκδοση του σκανδιναβικού μοντέλου έχει αναπτυχθεί (Σχήμα 5.7) [41].

A straight road in a rural area surrounded by flat terrain with grass		
Input data	The 5 calculation steps	Results
Traffic: -7.000 passenger cars -1.000 trucks **Speed:** -90 km/h passenger cars -80 km/h trucks **Geometry:** Road gradient 30 per thousand Distance to receiver 50 m Receiver height 2 m	1. Emission 2. Distance correction 3. Ground correction 4. Other corrections (road gradient) 5. Facade correction **Predicted noise level**	69.4 dB -7.0 dB -6.0 dB +1.6 dB 0 dB **58 dB**

Σχήμα 5.7: Η λειτουργία του σκανδιναβικού μοντέλου και ένα παράδειγμα πρόβλεψης εξωτερικού θορύβου [41].

5.14 Λοιπά μοντέλα

Το μοντέλο του To et al. [67],[69] χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση για την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού θορύβου:

$$L_{A10,T=1hr} = 10.6\log_{10} Q + 7.1\log_{10} H - 17\log_{10} V + 53$$

όπου:

Q= η ωριαία κυκλοφορία

H= η ωριαία μέτρηση των βαρέων οχημάτων

V= η μέση ταχύτητα των οχημάτων

Το μοντέλο των Lam και Tam [68], [69] εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση πριν την προσθήκη διορθώσεων για την απόσταση, κλίση και επιφάνεια του δρόμου:

$$L_{A10,T=1hr} = 10.5\log_{10} Q + 34.8\log_{10}(V + 40 + 500/V) + 10.5\log_{10}(1 + 5P/V) - 34.4$$

όπου:

P=το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.

Το μοντέλο του Calixto et al. [70] παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με Γερμανικό RLS-90 και περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$L_{eq} = 7.7\log[Q(1 + 0.095 * VP)] + 43$$

όπου:

L_{eq}= το ισοδύναμο επίπεδο θορύβου που εκπέμπεται από την οδική κυκλοφορία στα 25m, σε dBA

Q= η ωριαία ροή οχημάτων

VP= το ποσοστό των βαρέων οχημάτων

Οι εξισώσεις για τα L_{10} και L_{90} είναι αντίστοιχα:

$$L_{10} = 6.2\log[Q(1 + 0.0958VP)$$

$$L_{90} = 10.2\log[Q(1 + 0.050VP)] + 27.1$$

Σύμφωνα με τον Chew [23], το επίπεδο L_{10} δίνεται από τη σχέση

$$L_{10} = 3.9\log Q + 15.13\log\left(V + 40 + \frac{500}{V}\right) + 3.94\log\left(1 + \frac{5P}{V}\right) + 30G_0 + 42.61$$

όπου

Q= κυκλοφοριακός φόρτος (οχήματα/ώρα)

V= ταχύτητα επιβατικών οχημάτων (km/h)

G_0= εφαπτομένη της κλίσης της οδού

P= ποσοστό βαρέων οχημάτων (%)

Κεφάλαιο 6

Αξιολόγηση μέτρων αντιμετώπισης θορύβου σε υπεραστική οδό με χρήση μοντέλου CRTN

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η διερεύνηση και η αντιμετώπιση του προβλήματος του κυκλοφοριακού θορύβου σε οικισμούς που βρίσκονται πλησίον υπεραστικών οδών. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται το μοντέλο πρόβλεψης θορύβου CRTN σε υποθετική προς κατασκευή υπεραστική οδό η οποία βρίσκεται σε απόσταση 25m από οικισμό και εξετάζονται τα διάφορα εναλλακτικά μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος.

6.1 Περιγραφή του μοντέλου CRTN

Η μέθοδος πρόβλεψης του κυκλοφοριακού θορύβου σε ένα συγκεκριμένο σημείο δέκτη αποτελείται από πέντε κύρια βήματα [24]:

- Διαίρεση της οδού σε ένα η περισσότερα τμήματα τέτοια ώστε η μεταβολή του θορύβου σε κάθε ένα τμήμα να είναι μικρή.

- Υπολογισμός του βασικού επιπέδου του θορύβου για κάθε τμήμα σε μία απόσταση αναφοράς 10m από την οριογραμμή της οδού.
- Εκτίμηση για κάθε τμήμα του επιπέδου του θορύβου στο σημείο δέκτη λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της απόστασης της πηγής από τον δέκτη, και την ύπαρξη εμποδίων μεταξύ της πηγής και του δέκτη.
- Διόρθωση του επιπέδου θορύβου στον δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής συμπεριλαμβανομένων των ανακλάσεων από κτίρια και προσόψεις και του μεγέθους του τμήματος της πηγής.
- Συνδυασμός των συνεισφορών από όλα τα τμήματα ώστε να εξαχθεί το αποτέλεσμα του προβλεπόμενου επίπέδου του θορύβου στον δέκτη για το σύνολο της οδού.

6.1.1 Υπολογισμός του βασικού επιπέδου θορύβου για ένα τμήμα της οδού

Το βασικό επίπεδο θορύβου σε μία απόσταση αναφοράς 10m από την οριογραμμή, προσδιορίζεται από τον κυκλοφοριακό φόρτο, την ταχύτητα της κυκλοφορίας, την σύνθεση των οχημάτων, την κλίση και την επιφάνεια του δρόμου [24].
Η επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου Q (οχήματα/18hr) στον υπολογισμό της βασικής στάθμης του θορύβου L_{10}(18hr) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$L_Q = 10\log Q + 29{,}10$$

όπου:
L_Q=το βασικό επίπεδο θορύβου, σύμφωνα με τον κυκλοφοριακό φόρτο σε dB(A)
Q= κυκλοφοριακός φόρτος σε οχήματα/18hr

Η επίδραση του ποσοστού των βαρέων οχημάτων και της ταχύτητας στον υπολογισμό του βασικού επιπέδου θορύβου προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$L_{V,P} = 33\log\left(V + 40 + \frac{500}{V}\right) + 10\log\left(1 + \frac{5P}{V}\right) - 68{,}8dB(A)$$

όπου:

$L_{V,P}$= δίορθωση του επιπέδου θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας και του ποσοστού των βαρέων οχημάτων σε dB(A)

V= η ταχύτητα των οχημάτων (km/h)

P= το ποσοστό των βαρέων οχημάτων

Η επίδραση της κλίσης της οδού προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$L_G = 0{,}30G$$

όπου:

L_G= η διόρθωση του επιπέδου του θορύβου σύμφωνα με την κλίση σε dB(A)

G= η κλίση της οδού επί τοις εκατό (%)

Η επίδραση του είδους της επιφάνειας της οδού στο βασικό επίπεδο θορύβου δίνεται από τη σχέση:

$$L_S = s(4 - 0{,}03p)$$

όπου:

L_S= η διόρθωση του βασικού επιπέδου θορύβου λόγω του είδους της επιφάνειας της οδού

s= μήκος αυλάκωσης μεγαλύτερο από 5mm

Εάν το μήκος αυλάκωσης είναι μικρότερο από 5mm τότε L_S=0 [24].

6.1.2 Διάδοση του θορύβου

Για δέκτες σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με 4m από την οριογραμμή της οδού, η διόρθωση που γίνεται στο βασικό επίπεδο θορύβου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

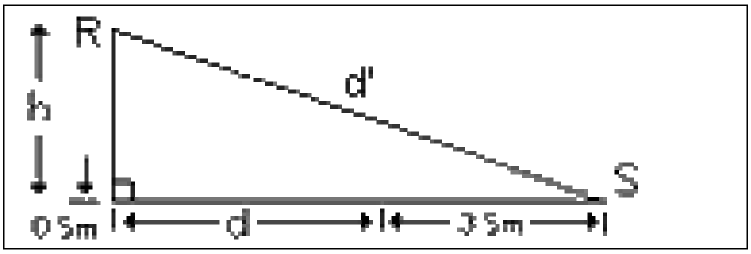
$$L_{Dh} = -10\log\left(\frac{d'}{13{,}5}\right)$$

όπου

L_{Dh}= η διόρθωση στο βασικό επίπεδο θορύβου ανάλογα με την απόσταση του δέκτη από την πηγή

d'= η ελάχιστη κεκλιμένη απόσταση από την πηγή σε m

Η διόρθωση λόγω απόστασης υπολογίζεται κατά μήκος της ελάχιστης κεκλιμένης απόστασης του δέκτη από την πηγή. Αυτή η τιμή καθορίζεται από την ελάχιστη οριζόντια απόσταση d από την οριογραμμή της οδού προς τον δέκτη και το σχετικό ύψος h του δέκτη ως προς την πηγή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1: Υπολογισμός της ελάχιστης κεκλιμένης απόστασης.

Η απόσταση d' δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$d' = \left[h^2 + (d + 3{,}5)^2\right]^{1/2}$$

Στην περίπτωση της ανεμπόδιστης διάδοσης ένα η επιφάνεια του εδάφους μεταξύ της οριογραμμής του δρόμου και του δεκτή είναι μερικώς ή ολικώς απορροφητικής φύσης (γρασίδι, φυτείες, καλλιεργούμενες εκτάσεις) μία επιπρόσθετη διόρθωση για την επιφάνεια του εδάφους που συχνά αποκαλείται ως απορρόφηση του εδάφους, θα πρέπει να υπάρξει. Η διόρθωση είναι προοδευτική με την απόσταση και επηρεάζει ειδικά τους δέκτες που βρίσκονται κοντά στο έδαφος. Η διόρθωση προσδιορίζεται από τους παρακάτω τύπους [24]:

Για $0{,}75 \le H \le \frac{d+5}{6}$ η διόρθωση είναι $L_I = 5{,}2I \log\left(\frac{6H - 1{,}5}{d + 3{,}5}\right) dB(A)$

Για $H \le 0{,}75$ η διόρθωση είναι $L_I = 5{,}2I \log\left(\frac{3}{d + 3{,}5}\right) dB(A)$

Για $H \ge \frac{d+5}{6}$ η διόρθωση είναι 0.

Στα παραπάνω ισχύουν:

H= το μέσο ύψος διάδοσης σε m

d= η ελάχιστη οριζόντια απόσταση

Το I που προσδιορίζει το ποσοστό του απορροφητικού εδάφους δίνεται από τον παρακάτω πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1: Υπολογισμός παραμέτρου I.

% απορροφητικής κάλυψης εδάφους μέσα στο τμήμα υπό μελέτη	Τιμή του I
<10	0
10-39	0,25
40-59	0,50
60-89	0,75
≥90	1,0

Στην περίπτωση της εμποδιζόμενης διάδοσης η επίδραση των εμποδίων, της περιορισμένης γωνίας όψεως του δρόμου, της ανάκλασης των κοντινών επιφανειών, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του θορύβου. Η διόρθωση λόγω περίθλασης δίνεται από της σχέση:

$$L_B = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_n X^n = \sum_{i=0}^{n} A_i X_i$$

X=log(a+b-c)

Όπου:

L_B= διόρθωση θορύβου λόγω ύπαρξης εμποδίου σε dB(A)

A_i= η διαδρομή από περίθλαση (αριθμός) Πίνακας 6.2

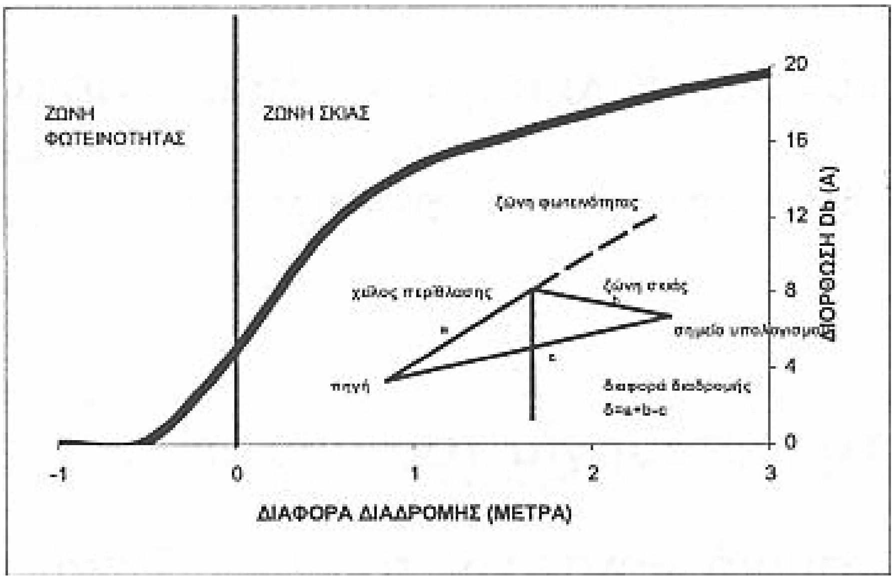
X= η διαφορά διαδρομής της απευθείας διαδρομής, μεταξύ σημείου λήψης και δρόμου σε m [24].

Πίνακας 6.2: Τιμές συντελεστών A_i [24].

Ζώνη σκιάς		*Ζώνη Φωτεινότητας*	
-3<X<1.2	-15.4	*-4<X<0*	0
A_0	-8.26	A_0	+0.109
A_1	-2.787	A_1	-0,185
A_2	-0.831	A_2	+0.479
A_3	-0.198	A_3	+0.3284
A_4	+0.1539	A_4	+0.04385
A_5	+0.12248	A_5	
Ζώνη σκιάς		***Ζώνη Φωτεινότητας***	
A_6	+0.2175	A_6	

Έξω από το πεδίο ισχύος η διόρθωση ορίζεται ως εξής:

Ζώνη σκιάς		*Ζώνη Φωτεινότητας*	
X<-3	A=-5	*X<-4*	A=-5
X>1.2	A δεν προσδιορίζεται	X>0	A=0



Σχήμα 6.2: Διόρθωση του θορύβου λόγω ύπαρξης επιμήκους φράγματος, συναρτήσει της διαφοράς διαδρομής [24].

6.1.3 Διάταξη περιοχής

Η επίδραση της οπτικής γωνίας θ στο επίπεδο του θορύβου δίνεται από τη σχέση:

$$L_a = 10\log\left(\frac{\theta}{180}\right)$$

όπου:

L_a= η διόρθωση του βασικού επιπέδου θορύβου σύμφωνα με τη γωνία μεταξύ της πηγής και του δέκτη σε dB(A)

θ= η γωνία μεταξύ πηγής και δέκτη σε μοίρες (°).

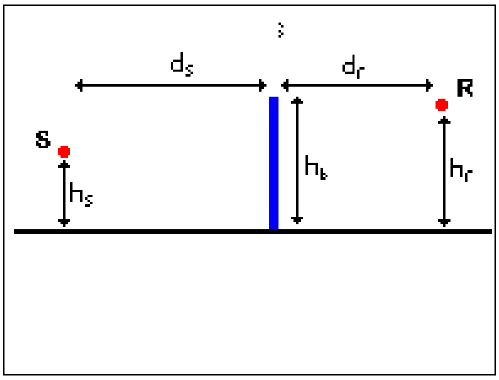
6.2 Υπολογισμός επιπέδου θορύβου σε υποθετική υπό κατασκευή υπεραστική οδό

Ο υπολογισμός του επιπέδου θορύβου πραγματοποιείται για υπεραστική οδό της οποίας τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3. Ο δείκτης του επιπέδου θορύβου που υπολογίζεται είναι ο L_{10}(18hr) σύμφωνα με την Βρετανική μέθοδο πρόβλεψης για αποδέκτη-οικισμό που βρίσκεται στα 28,5m από την οριογραμμή της οδού (d=25m) και ύψος αποδέκτη h=4m (βλέπε σχήμα 6.1). Ο θόρυβος υπολογίζεται στο επίπεδο του πρώτου ορόφου (ύψος αποδέκτη 4m)

Πίνακας 6.3: Υπολογισμός στάθμης θορύβου στον αποδέκτη.

Δεδομένα	Μονάδες	Τιμές
Κυκλοφοριακός φόρτος 18ώρου (06.00-24.00)	οχήματα	15000
Μέση ταχύτητα οχημάτων	km/h	100
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	%	20
Μέση κλίση υπό μελέτη τμήματος	%	1,5
Είδος εδάφους διάδοσης ήχου I	-	0,25
Οπτική γωνία από το σημείο πρόβλεψης	μοίρες	180
Απόσταση αποδέκτη d	m	25
Διαφορά ύψους πηγής-αποδέκτη	m	3,5
Βασικό επίπεδο θορύβου	**dB(A)**	**76,9**
Επίπεδο θορύβου στον αποδέκτη (25m)	**dB(A)**	**73,1**

Όπως είναι φανερό το επίπεδο θορύβου στον αποδέκτη-οικισμό ξεπερνά το ανώτατο επιτρεπτό από την νομοθεσία όριο των 70 dB(A). Για αυτό τον λόγο προτείνεται η κατασκευή ηχοπετάσματος παράλληλου προς την οδό, ύψους 3m και σε απόσταση 2m από την οριογραμμή της (Σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3: Διαστάσεις ηχοπετάσματος παράλληλου προς την οδό.

Στο σχήμα 6.3 ισχύουν τα ακόλουθα:

S= η πηγή με ύψος h_s=0,5m

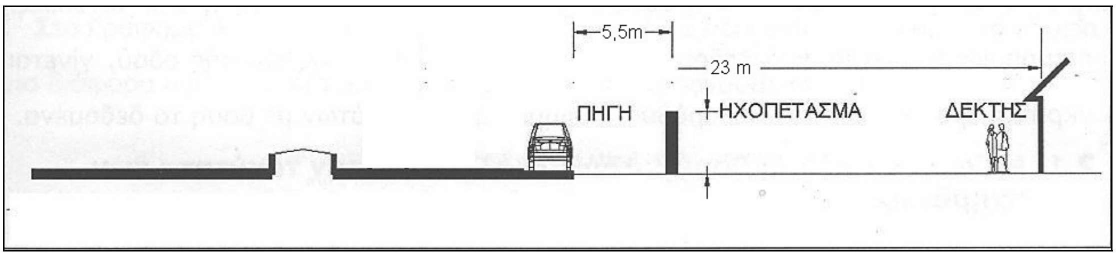
R= αποδέκτης με ύψος h_r=4m (επίπεδο πρώτου ορόφου)

h_b=ύψος ηχοπετάσματος 3m

d_s=5,5m , d_r=23m

Η μείωση του επιπέδου του θορύβου με την τοποθέτηση του ηχοπετάσματος είναι 11,6 dB(A) και το επίπεδο θορύβου στον αποδέκτη ανέρχεται στα 61,5 dB(A) για τον δείκτη L_{10}(18hr).

Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει την τομή της οδού μετά την τοποθέτηση του ηχοπετάσματος.

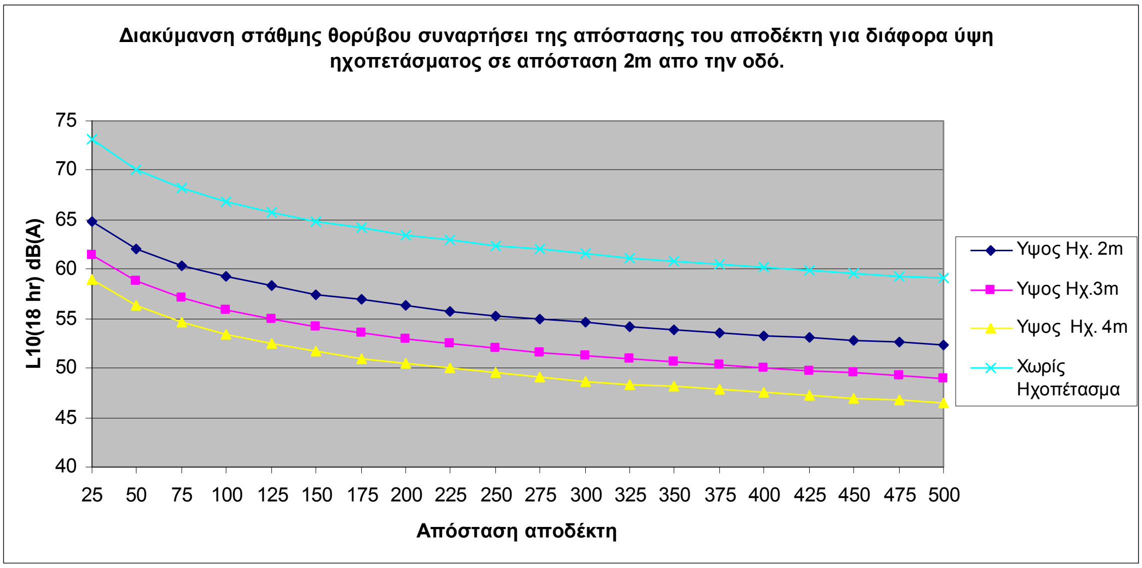


Σχήμα 6.4: Τομή υπεραστικής οδού μετα την τοποθέτηση του ηχοπετάσματος.

6.3 Ανάλυση εναλλακτικών μέτρων μείωσης του επιπέδου του θορύβου.

6.3.1 Μείωση του επιπέδου του θορύβου μεταβάλλοντας το ύψος του ηχοπετάσματος

Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών της στάθμης του θορύβου για διάφορα ύψη ηχοπετάσματος σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή. Η πρόβλεψη του θορύβου έχει πραγματοποιηθεί στο ίδιο σημείο της υπεραστικής οδού όπως στην παράγραφο 6.2, για ταχύτητα οχημάτων 100 km/h και απόσταση ηχοπετάσματος 2m από την οριογραμμή της οδού.



Διάγραμμα 6.1: Διακύμανση της στάθμης του θορύβου συναρτήσει του ύψους του ηχοπετάσματος και της απόστασης από την πηγή.

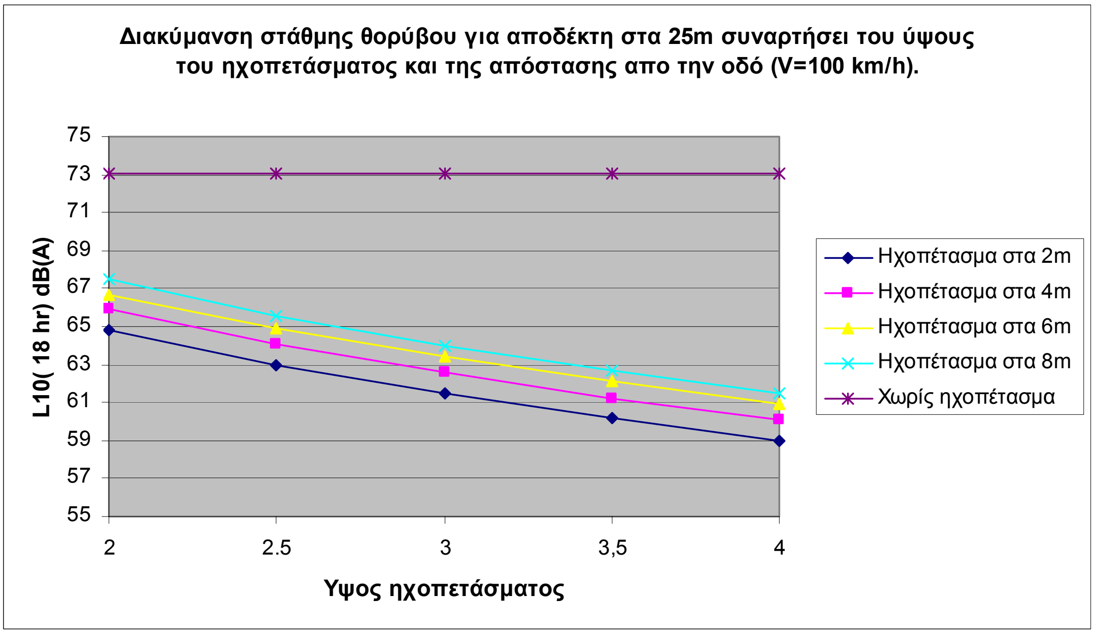
Με βάση το διάγραμμα 6.1 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα

- ✓ Υπάρχει μείωση των επιπέδων του θορύβου κατά 1,45 dB(A) ανά 0,5m ηχοπετάσματος που προστίθεται ή 2,9 dB(A) ανά μέτρο.

- ✓ Καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή, το επίπεδο θορύβου μειώνεται αισθητά έως περίπου τα 150m, ενώ μετά τα 400m η μείωση αυτή σταθεροποιείται.

6.3.2 Μείωση του επιπέδου του θορύβου μεταβάλλοντας τη θέση του ηχοπετάσματος

Στο διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται η διακύμανση της στάθμης του θορύβου για αποδέκτη σε απόσταση 25m από την οριογραμμή της οδού, ύψους 4m και ταχύτητα οχημάτων 100km/h.



Διάγραμμα 6.2: Διακύμανση στάθμης θορύβου συναρτήσει του ύψους του ηχοπετάσματος και της απόστασής του από την οριογραμμή της οδού.

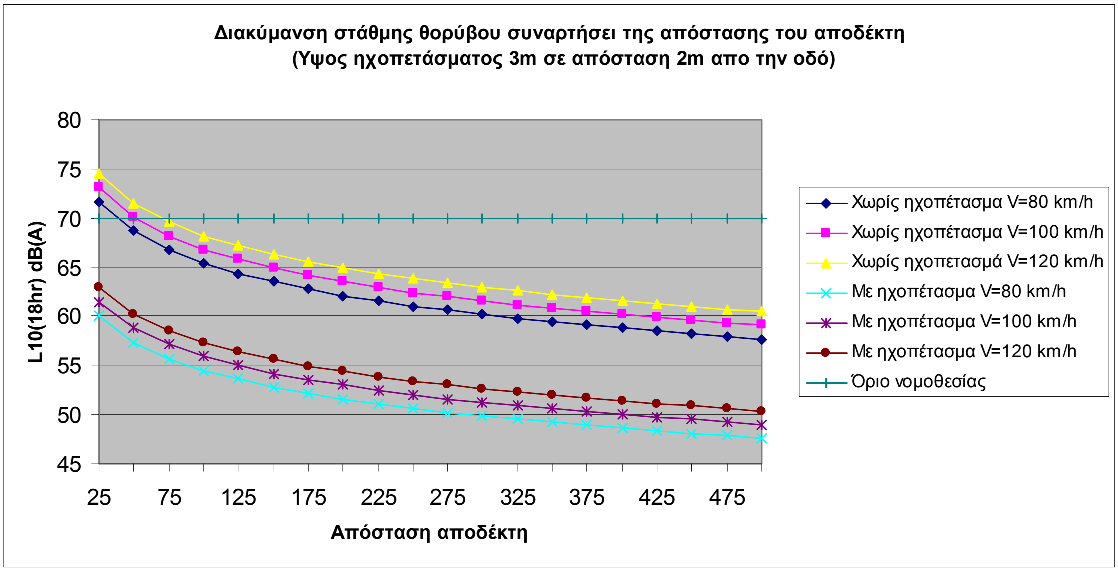
Από τη εξέταση του διαγράμματος 6.2 εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✓ Η απομάκρυνση του ηχοπετάσματος από την οριογραμμή της οδού έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της στάθμης του θορύβου στον αποδέκτη
- ✓ Η αύξηση αυτή προσδιορίζεται στα 0,9 dB(A) ανά 2m απόσταση από την οριογραμμή της οδού

- ✓ Το ηχοπέτασμα θα πρέπει να τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην οδό.

6.3.3 Μείωση του επιπέδου του θορύβου μεταβάλλοντας την ταχύτητα των οχημάτων

Στο διάγραμμα 6.3 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών της στάθμης του θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας των οχημάτων και της απόστασης του αποδέκτη με ή χωρίς τη χρήση ηχοπετάσματος (ύψος 3m σε απόσταση 2m από την οριογραμμή της οδού)



Διάγραμμα 6.3: Διακύμανση των τιμών του επιπέδου του θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας των οχημάτων και της απόστασης του δέκτη από την πηγή.

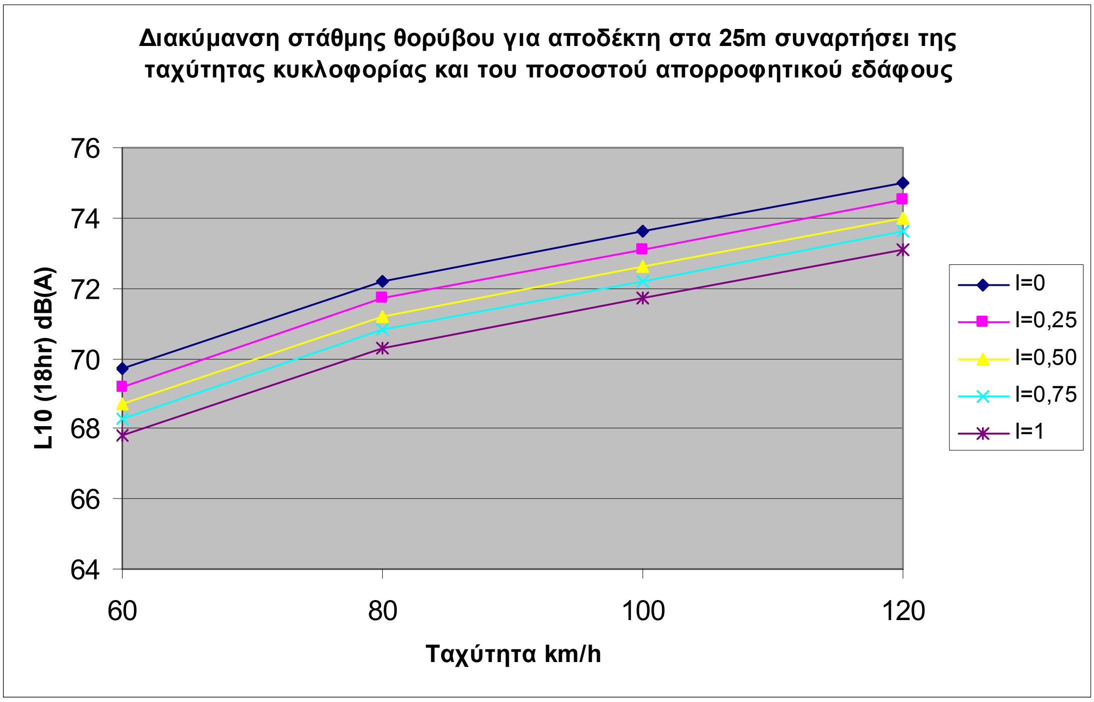
Από το διάγραμμα 6.3 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η μείωση της ταχύτητας κατά 20km/h επιφέρει μείωση του επιπέδου του θορύβου κατά 1,4 dB(A) κατά μέσο όρο και κατά συνέπεια δεν απαιτείται η θέσπιση μειωμένων ορίων ταχύτητας καθώς δεν επιφέρουν ιδιαίτερη αλλαγή στα επίπεδα του θορύβου

- ✓ Καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή, το επίπεδο θορύβου μειώνεται αισθητά έως περίπου τα 150m, ενώ μετά τα 400m η μείωση αυτή σταθεροποιείται.
- ✓ Η τοποθέτηση του ηχοπετάσματος έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του επιπέδου του θορύβου κατά 11,6 dB(A,) γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα των ηχοπετασμάτων σαν μέτρα μείωσης της στάθμης του θορύβου.

6.3.4 Μείωση του επιπέδου του θορύβου μεταβάλλοντας το ποσοστό του απορροφητικού εδάφους (φυτοκάλυψης)

Στο διάγραμμα 6.4 παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών της στάθμης του θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας και του ποσοστού του απορροφητικού εδάφους I.



Διάγραμμα 6.4: Διακύμανση της στάθμης του θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας και του ποσοστού του απορροφητικού εδάφους I.

Από το διάγραμμα 6.4 προκύπτει ότι η αύξηση του ποσοστού φυτοκάλυψης του περιβάλλοντος εδάφους κατά 0,25 επιφέρει μείωση του επιπέδου του θορύβου κατά 0,5 dB(A,) γεγονός που αποδεικνύει ότι η φύτευση δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στο επίπεδο θορύβου ειδικά για αποδέκτες που βρίσκονται σε υψηλό σημείο.

Κεφάλαιο 7

Εκτίμηση ορίου νέου Ευρωπαϊκού δείκτη L_{den}-Εύρεση σχέσεων μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών προσδιορισμού του οδικού θορύβου

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξαγωγή σχέσεων μετατροπής μεταξύ των υπαρχόντων δεικτών θορύβου και αυτών που ορίζει η νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/49. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μετρήσεις οδικού θορύβου που προέκυψαν από τον σύστημα παρακολούθησης οδικού κυκλοφοριακού θορύβου της Αττικής Οδού [71] καθώς και από την μελέτη καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό θόρυβο στις περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας [72]. Πραγματοποιείται στατιστική αξιολόγηση των εξαχθεισών γραμμικών εξισώσεων και σύγκρισή τους με τις υπάρχουσες στην βιβλιογραφία. Οι εξαχθείσες σχέσεις χρησιμεύουν τόσο στον προσδιορισμό των ορίων των νέων Ευρωπαϊκών δεικτών L_{den} και L_{night}, από τα ήδη υπάρχοντα όρια, όσο και στην μετατροπή των αποτελεσμάτων μοντέλων πρόβλεψης κυκλοφοριακού θορύβου που χρησιμοποιούν τους παρόντες δείκτες.

7.1 Ορισμοί επιπέδων, κλιμάκων και δεικτών θορύβου

Ο δείκτης θορύβου $L_{A10,18hr}$ βασίζεται στην κλίμακα του L_{A10} η οποία δίνει ένα μέτρο του επιπέδου του θορύβου που υπερβαίνεται στο 10% μίας δοθείσης χρονικής περιόδου. Καθορίζεται από τον μέσο όρο των τιμών του $L_{A10,1hr}$ για κάθε ώρα μεταξύ των ωρών 06:00 και 24:00 και μπορεί να εκφρασθεί ως [73]:

$$L_{A10,18hr} = \frac{1}{18}\sum_{t=6}^{t=23} L_{A10,t}\, dB(A)$$

Όπου το t δηλώνει τον χρόνο έναρξης της κάθε ξεχωριστής ωριαίας τιμής $L_{A10,1hr}$ για την περίοδο 06:00-24:00.

Ο δείκτης L_{Aeq} εκφράζει το ισοδύναμο επίπεδο θορύβου που αν διατηρηθεί έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση της ίδιας ηχητικής ενέργειας όπως ο πραγματικός ήχος κατά την ίδια χρονική περίοδο. Εκφράζεται μαθηματικά από τη εξίσωση:

$$L_{Aeq,T} = 10 * \log_{10}\left(\frac{1}{T}\right)\int 10^{L(t)/10}\, dt, dB(A)$$

Όπου L(t) είναι το Α-σταθμισμένο επίπεδο ήχου στον χρόνο t και T είναι η διάρκεια της περιόδου έκθεσης (sec). Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει προτείνει δύο δείκτες θορύβου τους L_{den} και L_{night}. Οι δείκτες αυτοί ορίζονται ως ακολούθως:

$$L_{den} = 10 * \log\left(\frac{1}{24}\right)\left(12 * 10^{L_{day}/10} + 4 * 10^{(5+L_{evening})/10} + 8 * 10^{(10+L_{night})/10}\right), dB(A)$$

Όπου:

L_{day}, είναι το Α-σταθμισμένο ισοδύναμο επίπεδο θορύβου κατά την 12ωρη περίοδο ημέρας μεταξύ των ωρών 07:00 και 19:00
$L_{evening}$, είναι το Α-σταθμισμένο ισοδύναμο επίπεδο θορύβου κατά την 4ωρη περίοδο απογεύματος μεταξύ των ωρών 19:00 και 23:00
L_{night}, είναι το Α-σταθμισμένο ισοδύναμο επίπεδο θορύβου κατά την 8ωρη περίοδο απογεύματος μεταξύ των ωρών 23:00 και 07:00

Στα $L_{evening}$ και L_{night} εφαρμόζεται μία στάθμιση 5 και 10 dB αντίστοιχα για να ληφθεί υπόψη η διαφορά στην ενόχληση λόγω της ώρας της μέρας. Το Α-σταθμισμένο ισοδύναμο επίπεδο θορύβου L_{night}, όπως ορίζεται πιο πάνω, χρησιμοποιείται επίσης σαν ξεχωριστός δείκτης θορύβου στην Οδηγία 2002/49 ως ένα μέτρο για την εκτίμηση της διατάραξης του ύπνου αλλά δεν περιλαμβάνει την στάθμιση των 10 dB που εφαρμόζεται στον καθορισμό του δείκτη L_{den} [73].

7.2 Σχέσεις μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων και δεικτών θορύβου

Είναι φανερό από τους πιο πάνω ορισμούς ότι το να βρεθούν συντελεστές μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών δεν είναι απλή υπόθεση. Συγκεκριμένα, οι διαφορετικές χρονικές περίοδοι και, σε ορισμένες περιπτώσεις οι σταθμίσεις που εφαρμόζονται σε αυτές τις χρονικές περιόδους προσθέτουν τόσο αβεβαιότητα όσο και πολυπλοκότητα στην διαδικασία.
Για αυτούς τους λόγους, η σύγκριση μεταξύ των κλιμάκων θορύβου και των δεικτών θορύβου αντιμετωπίζονται ξεχωριστά στις επόμενες παραγράφους [73].

7.2.1 Σύγκριση μεταξύ των κλιμάκων θορύβου L_{A10} και L_{Aeq}

I) Γκαουσιανή κατανομή

Γενικά ο θόρυβος από την οδική κυκλοφορία σε μία ορισμένη τοποθεσία είναι ο συνδυασμός του κάθε ξεχωριστού θορύβου από κάθε όχημα που απαρτίζει το κυκλοφοριακό ρεύμα. Πολλές μελέτες για τον οδικό θόρυβο περιλαμβάνουν δειγματοληψία του χρονικά μεταβαλλόμενου ηχητικού επιπέδου και την ομαδοποίηση των τιμών σε κατηγορίες επιπέδων θορύβου ώστε να δημιουργηθεί μία κατανομή. Έχει βρεθεί ότι η κατανομή των επιπέδων θορύβου πλησιάζει πολύ σε μία γκαουσιανή ή κανονική κατανομή για συνθήκες όπου η κυκλοφορία υπερβαίνει τα 100 οχήματα ανά ώρα και είναι ελεύθερης ροής. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαιτέρως βολικό καθώς σημαίνει ότι η καμπύλη κατανομής μπορεί να προσδιοριστεί από μόνο δύο παραμέτρους, για παράδειγμα, το μέσο επίπεδο L_{50}, και την τυπική απόκλιση, σ, των επιπέδων. Αυτή η λογική μπορεί επίσης να επεκταθεί και σε άλλα στατιστικά μέτρα όπως το L_{A10} και τα μέτρα που περιλαμβάνουν την ενέργεια όπως το L_{Aeq}. Ο Lamure (1975) δημοσίευσε διάφορες σχέσεις αυτής της μορφής που προέκυπταν από την υπόθεση ότι οι κατανομές του κυκλοφοριακού θορύβου υπακούν σε μία γκαουσιανή σχέση. Ιδιαιτέρου ενδιαφέροντος είναι η παρακάτω σχέση

$$L_{A10} - L_{Aeq} = 1{,}28\sigma - 0{,}115\sigma^2, dB$$

Για κυκλοφορία ελεύθερης ροής, το σ είναι συχνά μεταξύ 2-5 (Don and Rees,1985). Με αντικατάσταση αυτών των τιμών στην πιο πάνω εξίσωση προκύπτει μία γνώριμη προσέγγιση [73]:

$$L_{A10} - L_{Aeq} \approx 3$$

II) Μη γκαουσιανή κατανομή

Στην πραγματικότητα η κυκλοφορία μπορεί να μην είναι ελεύθερης ροής και η διάδοση μπορεί να επηρεάζεται από φαινόμενα , παρεμπόδισης, ανάκλασης σε πετάσματα και διάφορες επιδράσεις του εδάφους. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορούμε αναμένουμε διαφορές από μία πραγματικά γκαουσιανή κατανομή. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των οχημάτων, η ταχύτητα και η απόσταση από τον δρόμο μπορεί να είναι σημαντικές. Για αυτές τις περιπτώσεις η απλή μετατροπή που περιγράφεται στη προηγούμενη παράγραφο μπορεί να μην είναι έγκυρη.

Ο Driscoll et al.(1974) παρουσίασε μία από τις πρώτες μελέτες για τη σχέση μεταξύ του L_{A10} και του L_{Aeq}. Μία ανάλυση διαφόρων πραγματικών και θεωρητικών κατανομών των επιπέδων θορύβου αποκάλυψε ότι κατά μέσο όρο ισχύει:

$$L_{A10} = L_{Aeq} + 3{,}6dB$$

Το Noise Advisory Council (1978), οι Reeves και Wixley (1986) και οι Huybregts και Samuels (1998) προσδιόρισαν απλοποιημένους γραμμικούς μετασχηματισμούς που προήλθαν από μετρηθέντα επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου. Αυτοί είναι [73]:

Noise Advisory Council: $L_{A10} = L_{Aeq} + 3{,}6dB$

Reeves: $L_{A10} = L_{Aeq} + 4{,}2dB$

Huybregts και Samules: $L_{A10} = L_{Aeq} + (2{,}5 to 3{,}5)dB$

Ενόσω ένας γραμμικός μετασχηματισμός προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την απλότητα, είναι σαφές ότι σε μία λεπτομερή εξέταση και κάτω από καθορισμένες συνθήκες κυκλοφορίας και τοποθεσίας, ένας απλοποιητικός γραμμικός μετασχηματισμός δεν είναι έγκυρος. Για παράδειγμα, κάτω από συνθήκες χαμηλής κυκλοφορίας το L_{Aeq} μπορεί να ξεπερνά το L_{A10} (Brown, 1989:Burgess, 1978). Άλλες μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι, ειδικά για χαμηλές κυκλοφορίες, η σχέση εξαρτάται τόσο από τον όγκο και την σύνθεση της κυκλοφορίας (Carter et al.,1992) και στον διαχωρισμό των οχημάτων, την απόσταση από τον δρόμο και την κάλυψη του εδάφους (Barry και Reagan, 1978). Ένα θεωρητικό μέγιστο των 19 dB(A) για την διαφορά μεταξύ των L_{A10} και L_{Aeq} έχει προταθεί από τον Lau et al (1989).

7.2.2 Σύγκριση μεταξύ των δεικτών

Ο Brown (1989) εξέτασε τη σχέση μεταξύ του $L_{Aeq,24hr}$ και του $L_{A10,18hr}$ για τις συνθήκες των δρόμων της Αυστραλίας. Η σχέση που προέκυψε από εμπειρικές παρατηρήσεις σε 19 διαφορετικές τοποθεσίες είναι:

$$L_{A10,18hr} = L_{Aeq,24hr} + 3{,}5dB$$

Οι Huybretts και Samuels (1998) επίσης εξέτασαν τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων δεικτών κυκλοφορικού θορύβου χρησιμοποιώντας μετρήσεις που πάρθηκαν σε τοποθεσίες με χαμηλή κυκλοφορία στην Μελβούρνη και την πολιτεία της Βικτώριας στη Αυστραλία. Μία ανάλυση παλινδρόμησης έδειξε ότι:

$$L_{A10,18hr} = L_{Aeq,24hr} + 3{,}2dB$$

Οι Abbot και Nelson (2002) εξέτασαν τις σχέσεις μεταξύ του δείκτη $L_{10,18hr}$ και των νέων Ευρωπαϊκών δεικτών της οδηγίας 2002/49. Η ανάλυση τους για τις συνθήκες των δρόμων της Αγγλίας έδειξε ότι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις [73]:

Για αυτοκινητοδρόμους (motorways):

$$L_{day} = 0{,}98 * L_{A10.18h} + 0{,}09dB$$

$$L_{evening} = 0{,}89 * L_{A10,18h} + 5{,}08dB$$

$$L_{night} = 0{,}87 * L_{A10,18h} + 4{,}24dB$$

$$L_{den} = 0{,}90 * L_{A10,18h} + 9{,}69dB$$

Για μη-αυτοκινητοδρόμους (non motorways):

$$L_{day} = 0{,}95 * L_{A10.18h} + 1{,}44dB$$

$$L_{evening} = 0{,}97 * L_{A10,18h} - 2{,}87dB$$

$$L_{night} = 0{,}90 * L_{A10,18h} - 3{,}77dB$$

$$L_{den} = 0{,}92 * L_{A10,18h} + 4{,}20dB$$

7.3 Περιγραφή δεδομένων και στατιστικής επεξεργασίας αυτών

Τα δεδομένα που χρησιμοποιηθήκαν για την εξαγωγή των σχέσεων μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου προέρχονται από το σύστημα παρακολούθησης οδικού θορύβου της Αττικής Οδού [71] και από την μελέτη καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό θόρυβο στις περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας [72].

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τέσσερις τριμηνιαίες εκθέσεις που καλύπτουν την περίοδο από Οκτώβριο του 2003 έως Σεπτέμβριο 2004. Το σύστημα παρακολούθησης θορύβου αποτελείται τόσο από μόνιμους (Φωτογραφία 7.1) όσο και αυτοκινούμενους σταθμούς μέτρησης (Φωτογραφία 7.2).

Φωτογραφία 7.1: Μόνιμος σταθμός μέτρησης στην Αττική Οδό [71].

Φωτογραφία 7.2: Αυτοκινούμενος σταθμός μέτρησης στην Αττική Οδό [71].

Το σύνολο των δεδομένων που προέκυψαν αποτελείται από 434 μετρήσεις εκ των οποίων οι 65 ήταν μηνιαίες μέσες τιμές ενώ οι υπόλοιπες 369 24ωρες μετρήσεις σε πάνω από 100 διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις.
Συγκριμένα οι 24ωρες ακουστικές μετρήσεις εκτελέστηκαν :

- με τρείς (3) ειδικούς αυτοκινούμενους σταθμούς θορύβου κατάλληλα διαμορφωμένους - ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις της νέας Ευρωπαϊκής οδηγίας θορύβου (με εφαρμογή ύψους μέτρησης 4,0μ.) – εξοπλισμένοι με στατιστικούς αναλυτές θορύβου και διάταξη μικροφώνου παντός καιρού (στον ειδικό ιστό) τύπου CEL 593 και τύπου SOLO, καθώς και

- με αυτόνομους κινητούς σταθμούς θορύβου με στατιστικό αναλυτή και διάταξη μικροφώνου (σε τρίποδα) τύπου SOLO, (επίσης με εφαρμογή ύψους μέτρησης 4,0μ. από το φυσικό έδαφος) [71].

Πριν από κάθε 24ωρη ακουστική μέτρηση γίνεται βαθμονόμηση των οργάνων με ειδικό όργανο βαθμονόμησης (acoustical calibrator) τύπου CEL-284/2 για τα ηχόμετρα τύπου CEL- 593 και ειδικό βαθμονομητή για τα όργανα τύπου SOLO, ώστε να παρακολουθείται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων σε όλη την διάρκεια των καταγραφών του ακουστικού περιβάλλοντος. Κατά την διάρκεια κάθε 24ωρης μέτρησης έγινε καταγραφή των ποσοστομετρικών δεικτών L_1,

L_{10}, L_{50}, L_{95}, L_{99} της ενεργειακά ισοδύναμης μέσης ηχοστάθμης L_{eq} όπως επίσης οι μέγιστες (L_{max}) και ελάχιστες τιμές (L_{min}).

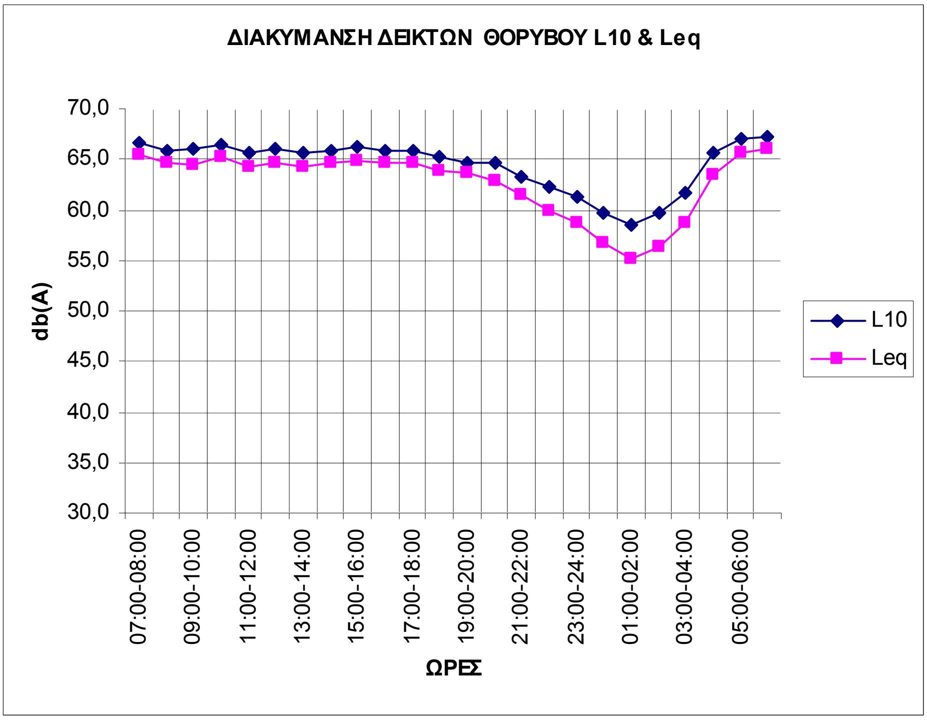
Οι δείκτες που μετρούνταν σε κάθε γεωγραφική θέση είναι οι παρακάτω:

- ✓ L_{10}(18h) βάσει ισχυούσης νομοθεσίας
- ✓ L_{Aeq}(08.00-20.00) βάσει ισχυούσης νομοθεσίας
- ✓ L_{Aeq}(24h)
- ✓ L_{day} (07.00-19.00)
- ✓ $L_{evening}$ (19.00-23.00)
- ✓ L_{night} (23.00-07.00)
- ✓ L_{den} βάσει της νέας Ευρωπαϊκής οδηγίας θορύβου 2002/49

Οι μετρήσεις που προέκυψαν από την Αττική Οδό θεωρούνται ότι προέκυψαν υπό συνθήκες αυτοκινητοδρόμου (motorway) δηλαδή υψηλή και ελεύθερη κυκλοφορία και ταχύτητα.

Από τη μελέτη καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό θόρυβο στις περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας προκύπτουν τα δεδομένα για συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου. Συγκεκριμένα τα δεδομένα αποτελούνται από 75 24ωρες μετρήσεις των ιδίων δεικτών με της Αττικής οδού σε 75 διαφορετικές αντίστοιχες γεωγραφικές θέσεις των προαναφερθέντων Δήμων.
Το διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μίας 24ωρης μέτρησης του οδικού θορύβου και μία τυπική μεταβολή των δεικτών L_{10} και L_{eq} κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου [71].

Για την εύρεση των σχέσεων μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών που μετρήθηκαν χρησιμοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης από την οποία προκύπτει γραμμικό μοντέλο της μορφής y=mx+b. Για τη εκτίμηση της αξιοπιστίας των γραμμικών σχέσεων εκτός του γνωστού συντελεστή R^2



Διάγραμμα 7.1: Τυπική διακύμανση δεικτών L_{10} και L_{eq} κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου.

χρησιμοποιείται επίσης και ο συντελεστής συσχέτισης ρ ο οποίος ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\rho_{x,y} = \frac{\mathrm{cov}(X,Y)}{\sigma_{\chi}\sigma_{y}}$$

όπου x,y είναι οι μέσες τιμές δείγματος και 0≤ρ≤1.

Επιπρόσθετα υπολογίζεται το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης SE (Standard error of the estimate) σύμφωνα με τον τύπο:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_i'\right)}{n-2}}$$

Όπου:

y_i =η παρατηρούμενη τιμή του y

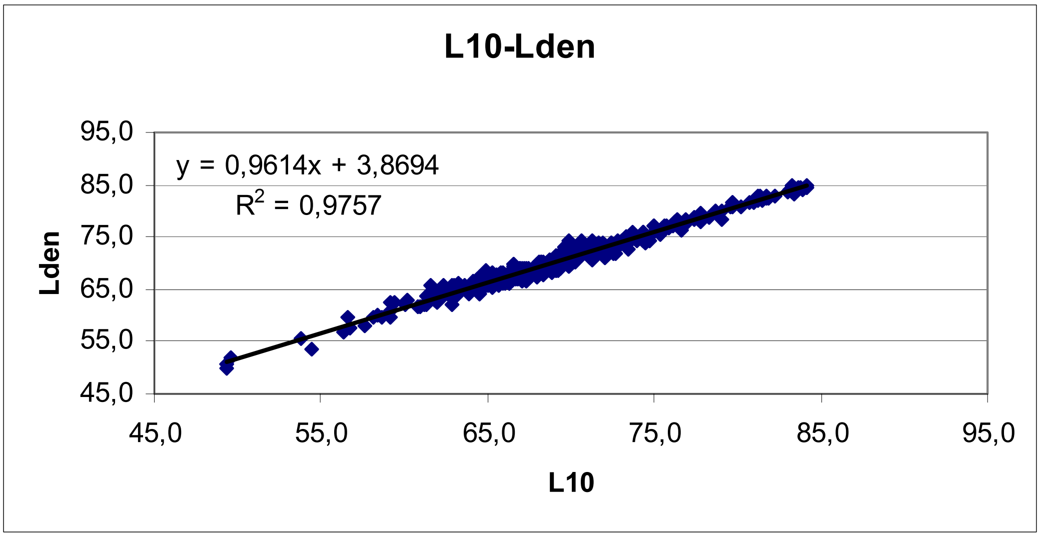
y_i' = η τιμή που εκτιμάται

n= το πλήθος των τιμών

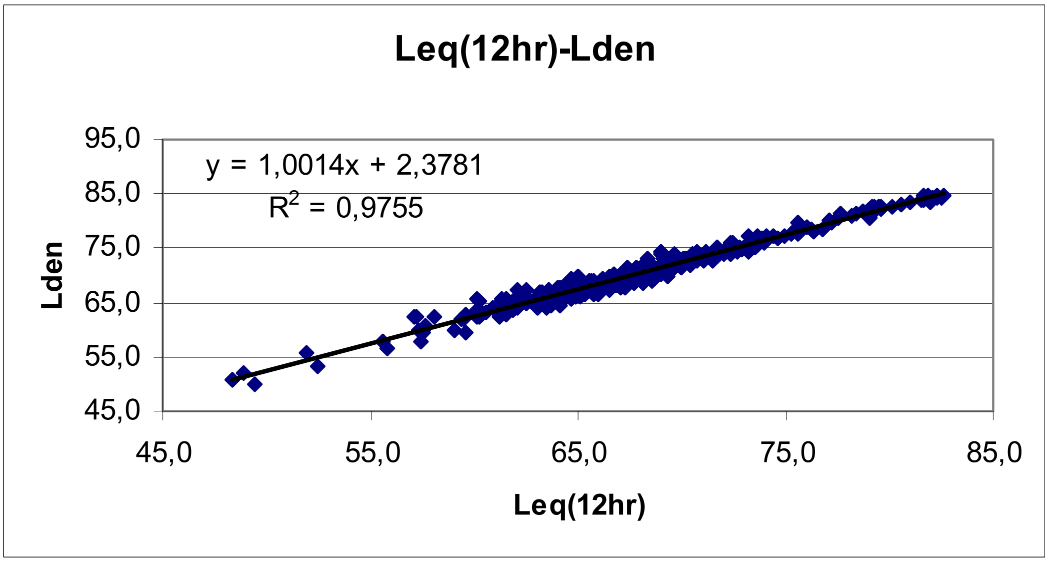
7.4 Εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου για συνθήκες αυτοκινητοδρόμου (motorway)

Για την εξαγωγή των γραμμικών σχέσεων μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρακολούθησης οδικού κυκλοφοριακού θορύβου της Αττικής Οδού.

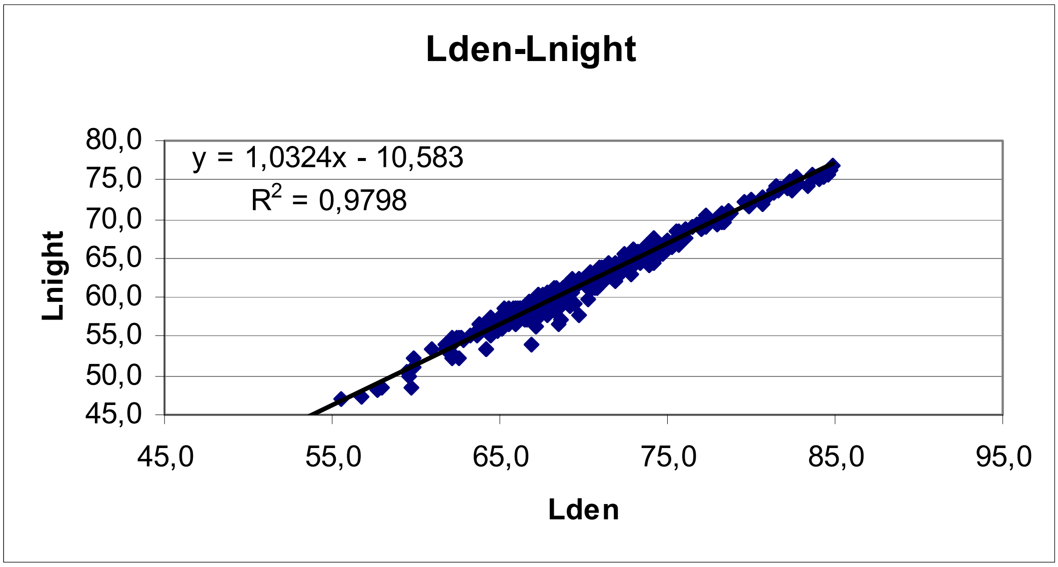
Στα διαγράμματα 7.2-7.4 παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών που αναφέρονται στην ελληνική νομοθεσία ($L_{10,18hr}$, $L_{eq,12hr}$) και των δεικτών της νέας Ευρωπαϊκής οδηγίας 2002/49 (L_{den}, L_{night}).



Διάγραμμα 7.2: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{den}.



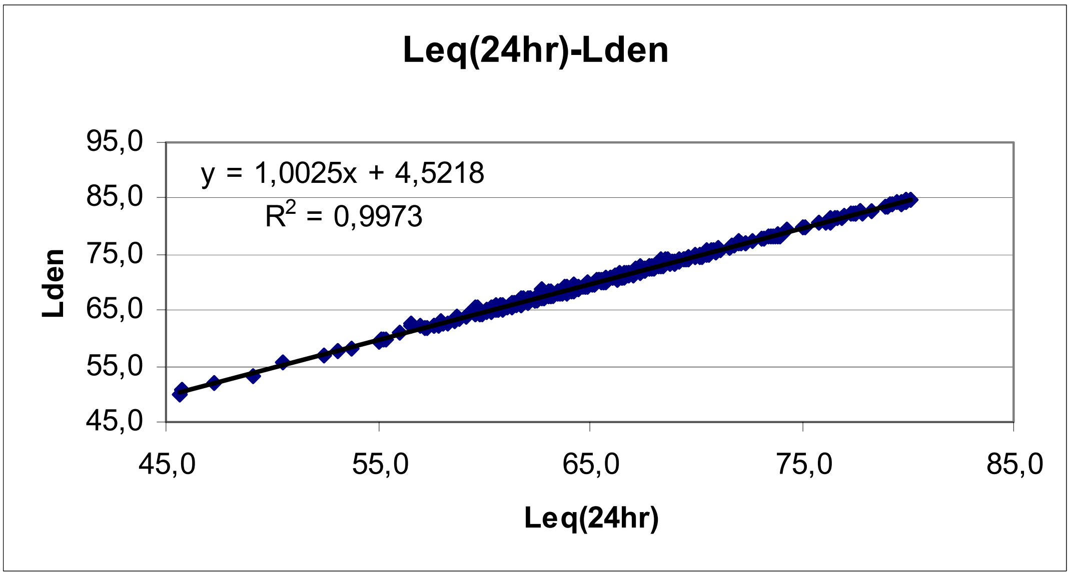
Διάγραμμα 7.3: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{eq,12hr}$ και L_{den}.



Διάγραμμα 7.4: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών L_{night} και L_{den}.

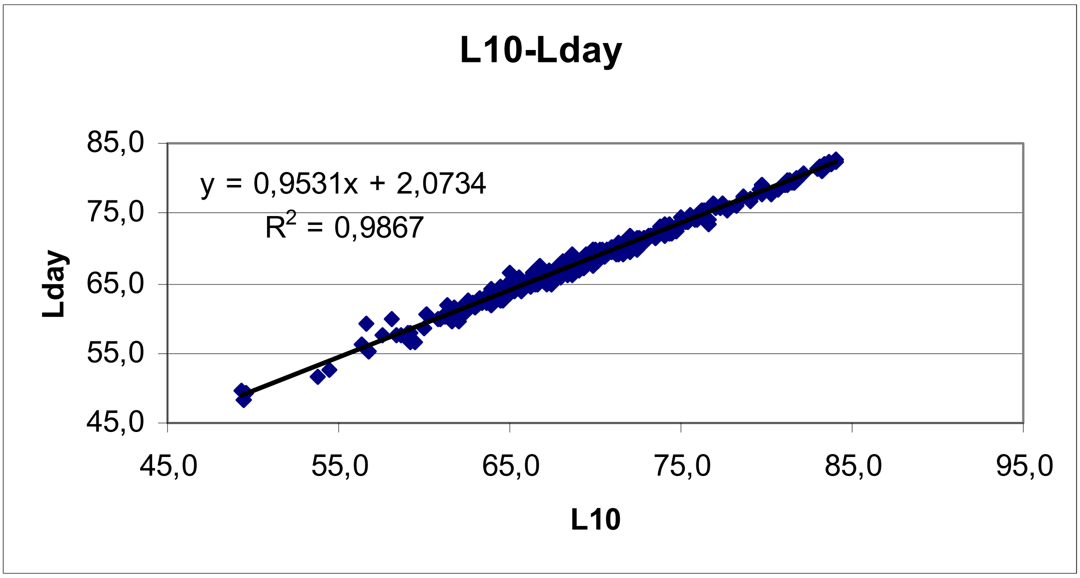
Όπως είναι φανερό και από τα τρία διαγράμματα υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών καθώς ο συντελεστής R^2 παρουσιάζει τιμές πάνω από 0,97 (άνω του 97% των τιμών εξηγούνται από την γραμμική σχέση). Τα τυπικά σφάλματα είναι μικρά και κυμαίνονται μεταξύ 0,85-0,90.

Στο διάγραμμα 7.5 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του δείκτη L_{den} και του δείκτη $L_{eq,24hr}$. Παρατηρείται η πολύ καλή συσχέτιση (R^2=0,9973) κάτι που είναι αναμενόμενο από τον ορισμό του δείκτη L_{den}.

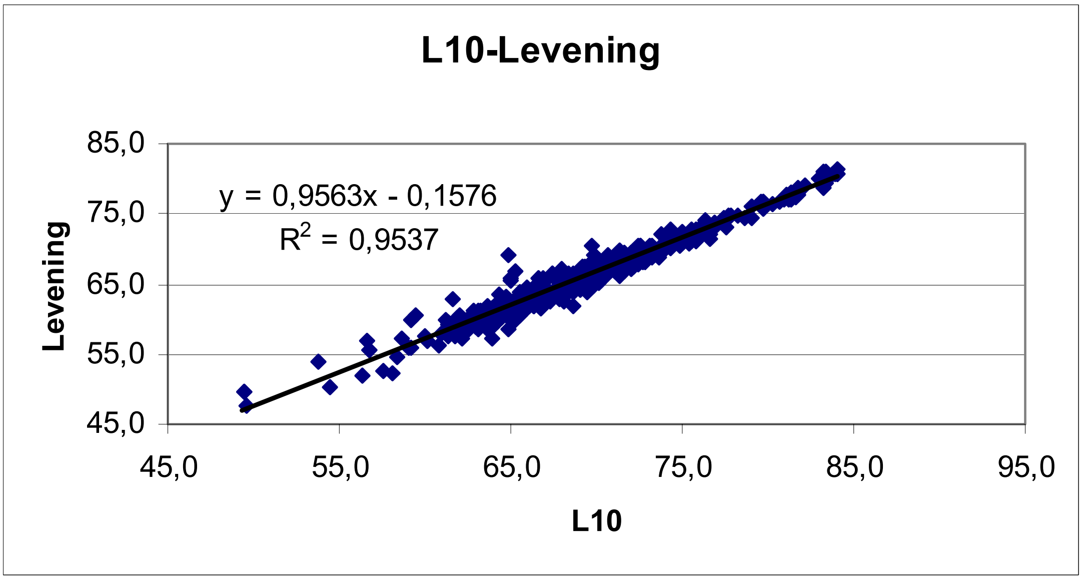


Διάγραμμα 7.5: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{eq,24hr}$ και L_{den}.

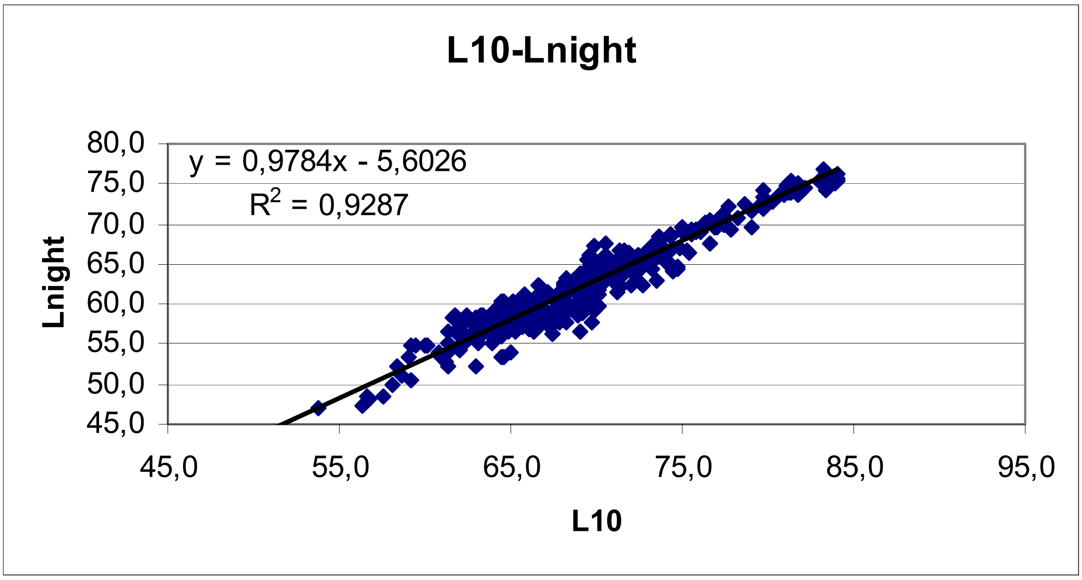
Στα διαγράμματα 7.6-7.8 παρουσιάζονται οι σχέσεις μετατροπής μεταξύ του δείκτη $L_{10,18hr}$ και των δεικτών L_{day}, $L_{evening}$ και L_{night}.



Διάγραμμα 7.6: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{day}.



Διάγραμμα 7.7: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και $L_{evening}$.



Διάγραμμα 7.8: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{night}.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα υπάρχει αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και των δεικτών L_{day}, $L_{evening}$ (R^2=0,9867 και 0,9537 αντίστοιχα. Η χαμηλή τιμή R^2=0,9287 για τη συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{night} δικαιολογείται από το γεγονός ότι το διάστημα του 18ώρου για τον δείκτη L_{10} δεν περιλαμβάνει τις ώρες 23.00-07.00 του δείκτη L_{night}.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή συσχέτισης ρ, του R^2 καθώς και του τυπικού σφάλματος.

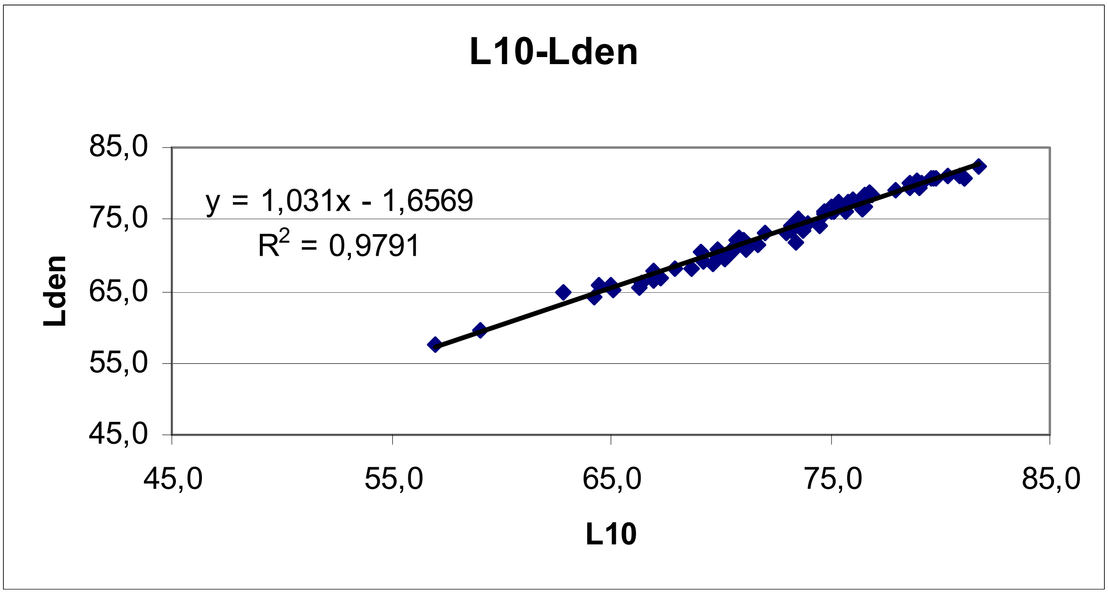
Πίνακας 7.1: Σχέσεις μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου.

	Συντελεστής συσχέτισης ρ	**R^2**	**Τυπικό σφάλμα**
$L_{den}=0,9614L_{10}+3,8694$	**0,9878**	**0,9757**	**0,89**
$L_{den}=1,0025L_{eq,24hr}+4,5218$	0,9986	0,9973	0,30
$L_{night}=1,0324L_{den}-10,583$	**0,9898**	**0,9798**	**0,85**
$L_{den}=1,0014L_{eq,12hr}+2,3781$	0,9877	**0,9755**	**0,90**
$L_{eq,12hr}=0,9545L_{10}+1,8716$	0,9944	0,9888	0,60
$L_{night}=1,0164L_{eq,12hr}-6,943$	0,9611	0,9238	1,65
$L_{eq,24hr}=0,9621L_{10}-0,8652$	0,9923	0,9847	0,71
$L_{day}=0,9531L_{10}+2,0734$	0,9933	0,9867	0,65
$L_{evening}=0,9563L_{10}-0,1576$	0,9766	0,9537	1,24
$L_{night}=0,9784L_{10}-5,6026$	0,9637	0,9287	1,60

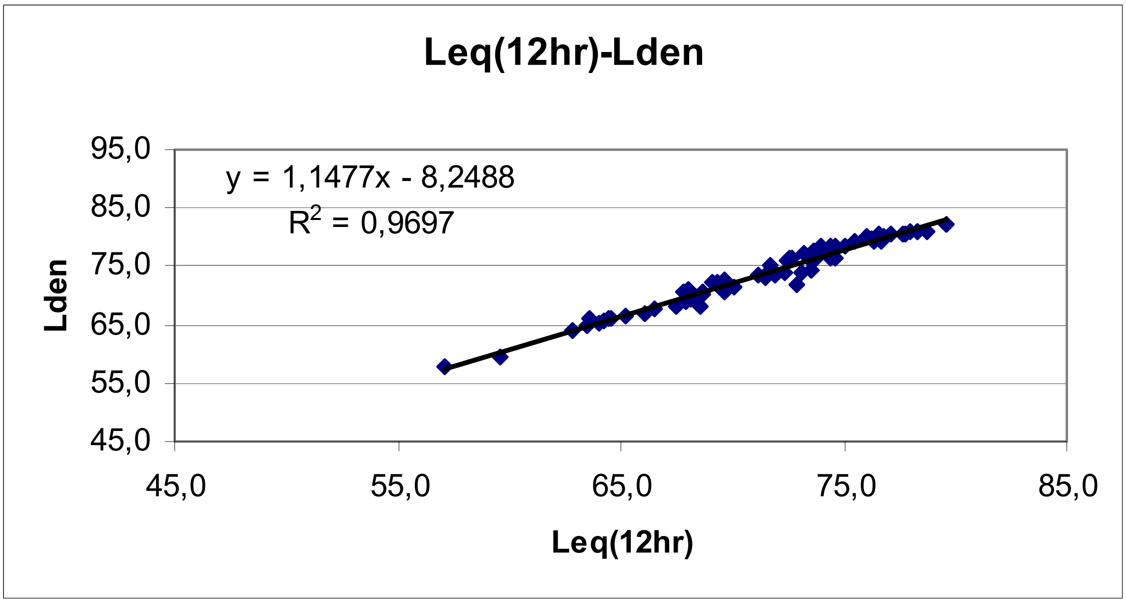
7.5 Εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου για συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου (non-motorway)

Για την εξαγωγή των γραμμικών σχέσεων μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από τη μελέτη καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό θόρυβο στις περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας.

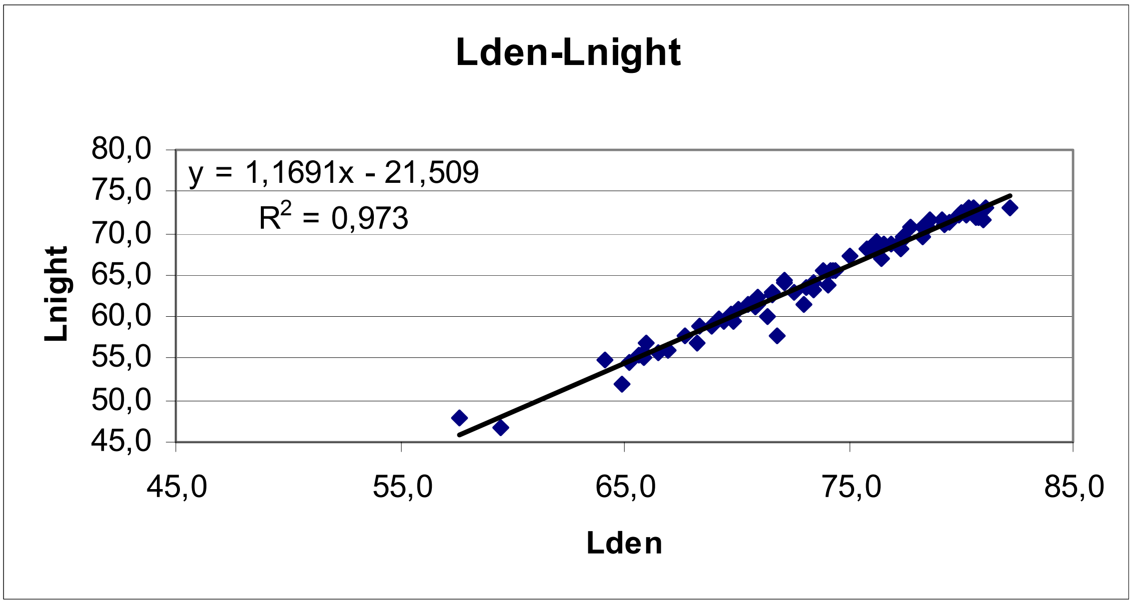
Στα διαγράμματα 7.9-7.11 παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών που αναφέρονται στην ελληνική νομοθεσία ($L_{10,18hr}$, $L_{eq,12hr}$) και των δεικτών της νέας Ευρωπαϊκής οδηγίας 2002/49 (L_{den}, L_{night}) για συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου.



Διάγραμμα 7.9: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{den} (μη-αυτοκινητόδρομος).



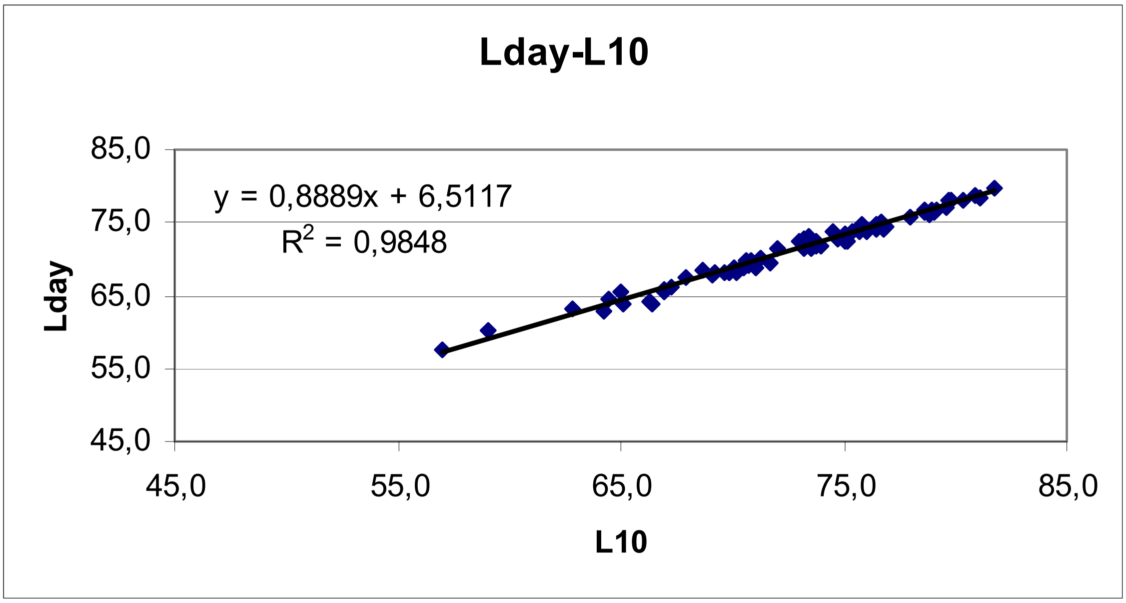
Διάγραμμα 7.10: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{eq,12hr}$ και L_{den} (μη αυτοκινητόδρομος.



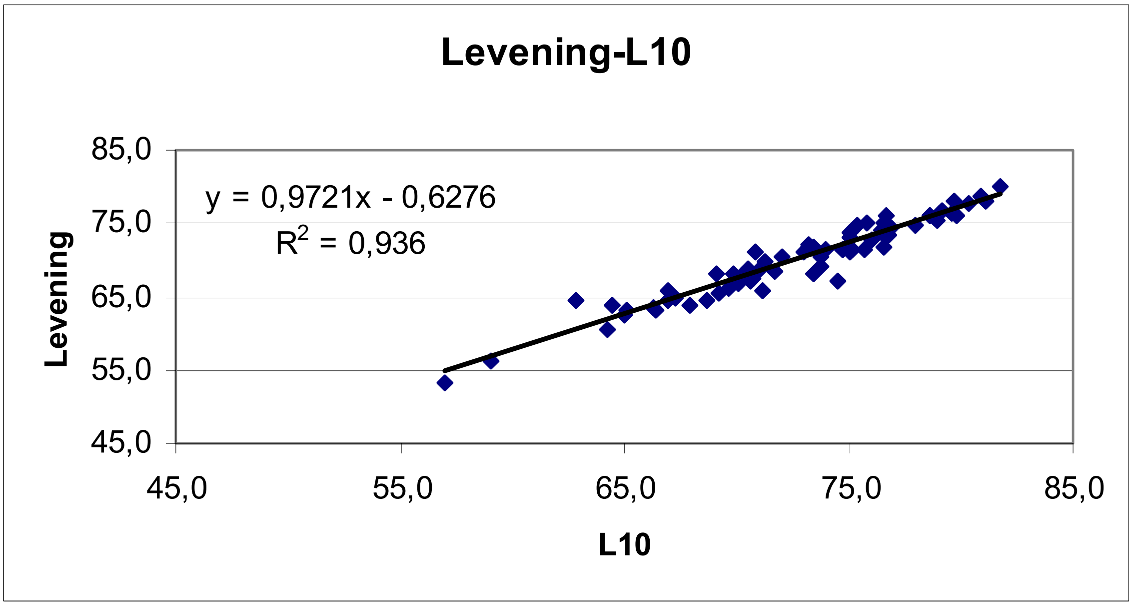
Διάγραμμα 7.11: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών L_{night} και L_{den} (μη αυτοκινητόδρομος.

Από τα διαγράμματα προκύπτει καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών με τον συντελεστή R^2 να είναι και στις τρεις περιπτώσεις μεγαλύτερος ή ίσος του 0,97. τα τυπικά σφάλματα είναι μικρά 0,80-1,00.

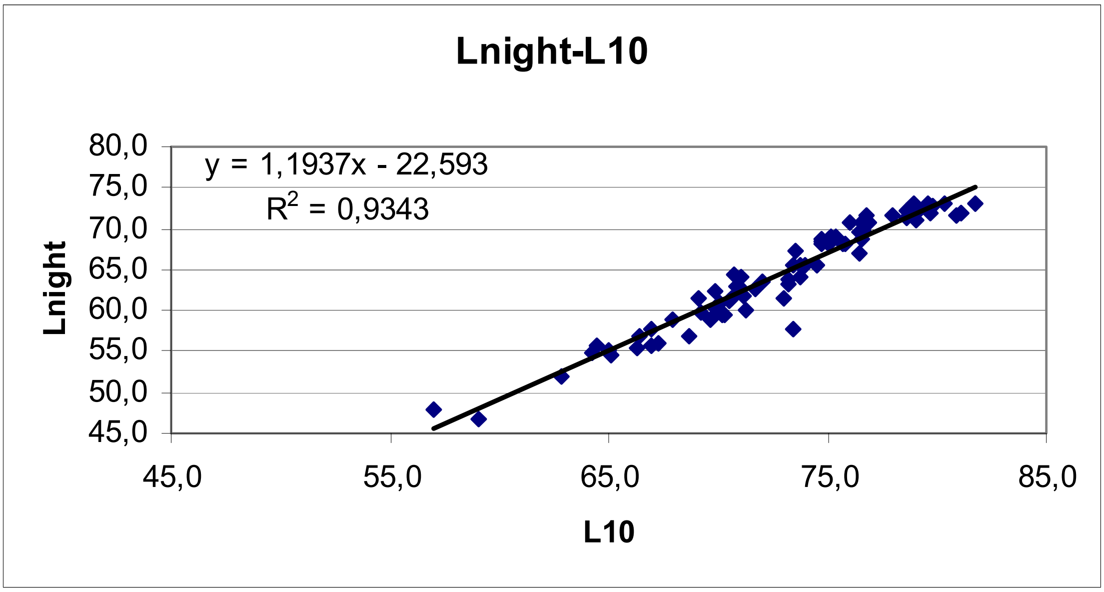
Στα διαγράμματα 7.12-7.14 παρουσιάζονται οι σχέσεις μετατροπής μεταξύ του δείκτη $L_{10,18hr}$ και των δεικτών L_{day}, $L_{evening}$ και L_{night}.



Διάγραμμα 7.12: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{day} (μη αυτοκινητόδρομος.



Διάγραμμα 7.13: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και $L_{evening}$ (μη αυτοκινητόδρομος.



Διάγραμμα 7.14: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{night} (μη αυτοκινητοδρόμους.

Όπως και στις συνθήκες αυτοκινητοδρόμου υπάρχει αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και των δεικτών L_{day} (R^2=0,9848)Η χαμηλή τιμή R^2=0,9343 για τη συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{night} δικαιολογείται από το γεγονός ότι το διάστημα του 18ώρου για τον δείκτη L_{10} δεν περιλαμβάνει τις ώρες 23.00-07.00 του δείκτη L_{night}. Επίσης χαμηλή τιμή παρουσιάζει η τιμή R^2=0,936 για τη συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και $L_{evening}$.Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών για συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή συσχέτισης ρ, του R^2 καθώς και του τυπικού σφάλματος.

Πίνακας 7.2: Σχέσεις μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου (συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου).

	Συντελεστής συσχέτισης ρ	**R^2**	**Τυπικό σφάλμα**
L_{den}=1,031L_{10}-1,6569	**0,9895**	**0,9791**	**0,80**
L_{den}=1,0349$L_{eq,24hr}$+2,337	0,9979	0,9959	0,35
L_{night}=1,1691L_{den}-21,509	**0,9864**	**0,973**	**1,07**
L_{den}=1,1477$L_{eq,12hr}$-8,2488	**0,9847**	**0,9697**	**0,96**
$L_{eq,12hr}$=0,8873L_{10}+6,545	0,9926	0,9852	0,57
L_{night}=1,3145$L_{eq,12hr}$-29,203	0,9516	0,9054	2,01
$L_{eq,24hr}$=0,9978L_{10}-3,9762	0,9932	0,9864	0,62
L_{day}=0,8889L_{10}+6,5117	0,9924	0,9848	0,58
$L_{evening}$=0,9721L_{10}-0,6276	0,9674	0,936	1,34
L_{night}=1,1937L_{10}-22,593	0,9666	0,9343	1,67

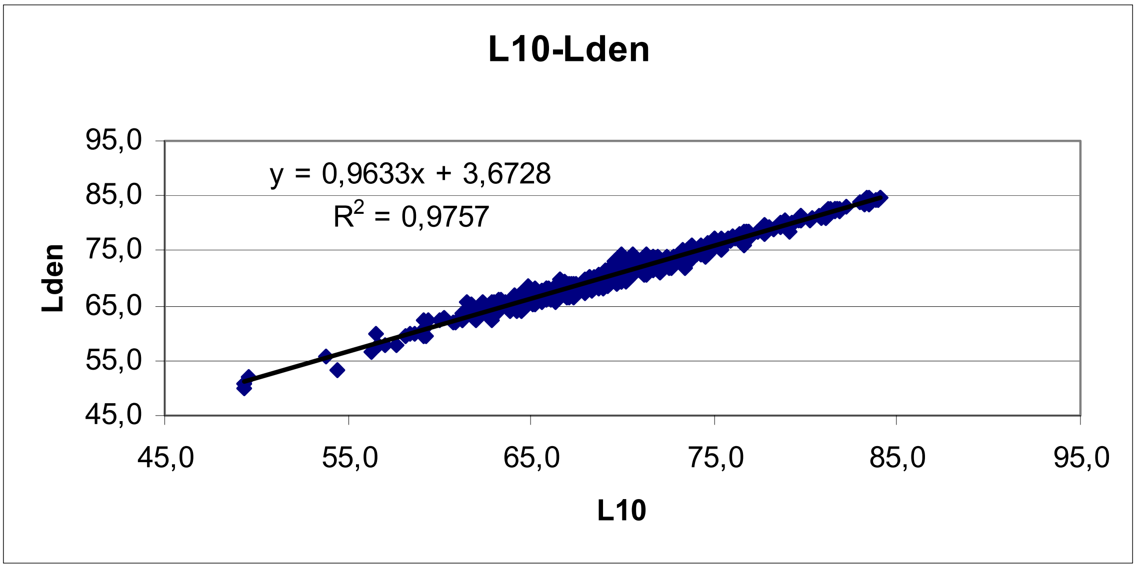
7.6 Εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου από τον συνδυασμό των δεδομένων

Συνδυάζοντας τα δεδομένα που προέρχονται τόσο από το σύστημα παρακολούθησης οδικού θορύβου της Αττικής Οδού όσο και από την μελέτη καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό θόρυβο στις περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας προκύπτουν οι σχέσεις του πίνακα 7.3.

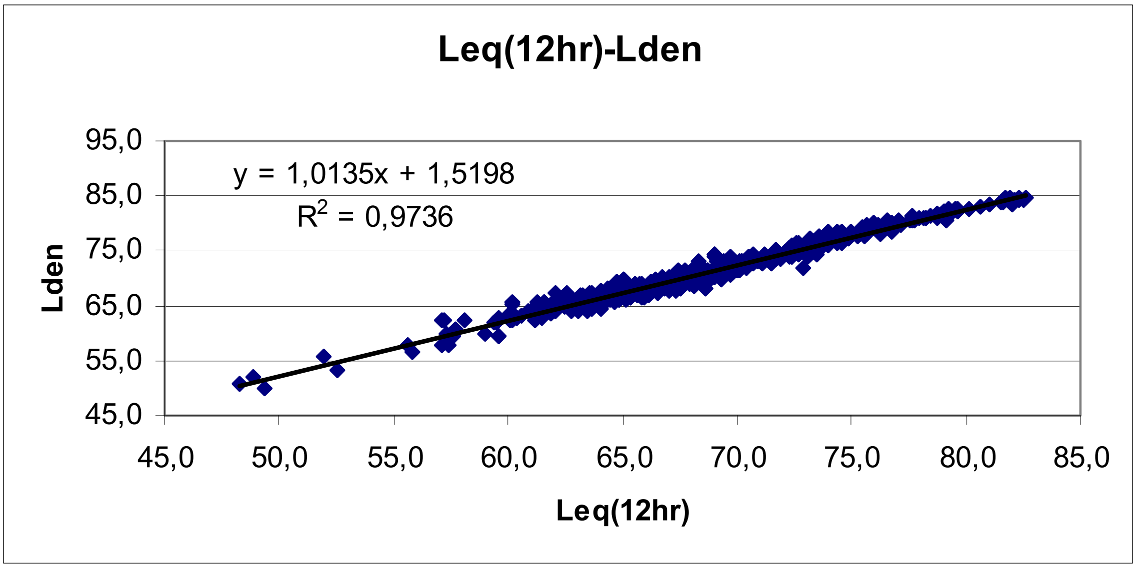
Πίνακας 7.3: Σχέσεις μετατροπής μεταξύ των διαφόρων δεικτών θορύβου (συνδυασμός δεδομένων).

	Συντελεστής συσχέτισης ρ	R^2	Τυπικό σφάλμα
$L_{den}=0,9633L_{10}+3,6728$	**0,9878**	**0,9757**	**0,90**
$L_{den}=1,007L_{eq,24hr}+4,2302$	0,9985	0,9971	0,31
$L_{night}=1,0397L_{den}-11,229$	**0,9871**	**0,9744**	**0,98**
$L_{den}=1,0135L_{eq,12hr}-1,5198$	**0,9867**	**0,9736**	**0,94**
$L_{eq,12hr}=0,9438L_{10}+2,587$	0,9941	0,9883	0,61
$L_{night}=1,0329L_{eq,12hr}-8,2191$	0,9547	0,9114	1,82
$L_{eq,24hr}=0,9594L_{10}-0,7497$	0,9922	0,9844	0,72
$L_{day}=0,9425L_{10}+2,7766$	0,9932	0,9865	0,66
$L_{evening}=0,9673L_{10}-0,8188$	0,9763	0,9531	1,28
$L_{night}=0,9856L_{10}-6,2941$	0,9595	0,9206	1,72

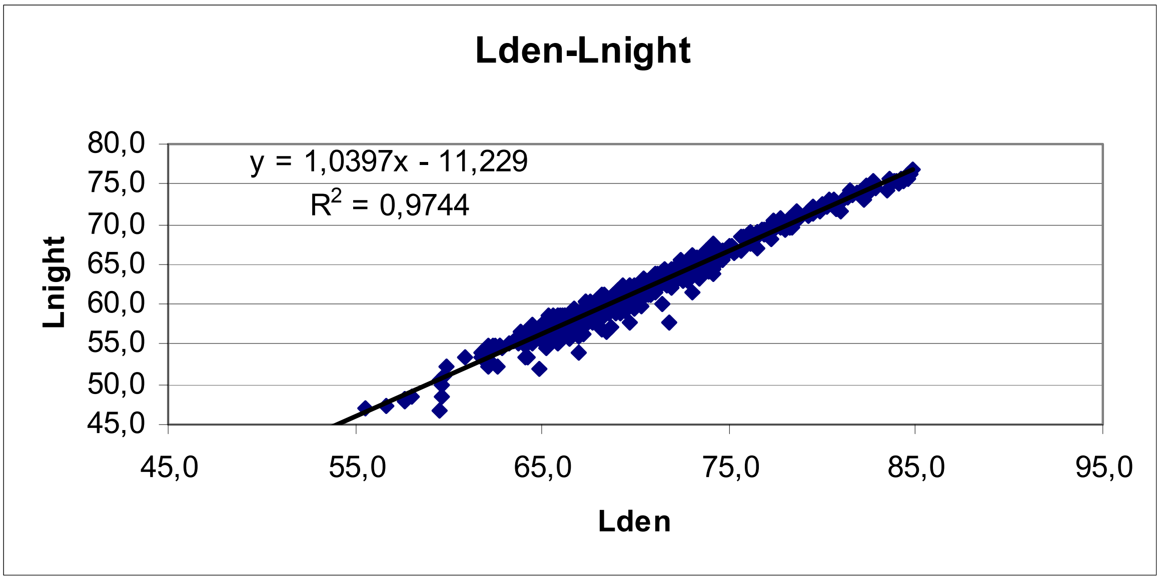
Στα διαγράμματα 7.15-7.17 παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ των δεικτών που αναφέρονται στην ελληνική νομοθεσία ($L_{10,18hr}$, $L_{eq,12hr}$) και των δεικτών της νέας Ευρωπαϊκής οδηγίας 2002/49 (L_{den}, L_{night}) που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δεδομένων και που θα χρησιμοποιηθούν στην επόμενη παράγραφο για την εξαγωγή των ορίων των δεικτών L_{den}, L_{night}.



Διάγραμμα 7.15: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{10,18hr}$ και L_{den} (συνδυασμός δεδομένων).



Διάγραμμα 7.16: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών $L_{eq,12hr}$ και L_{den} (συνδυασμός δεδομένων).



Διάγραμμα 7.17: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών L_{night} και L_{den} (συνδυασμός δεδομένων).

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών καθώς οι τιμές του συντελεστή $R^2 \geq 0{,}97$. Τα τυπικά σφάλματα είναι μικρά και κυμαίνονται από 0,90-0,98. Κατά συνέπεια μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τα όρια των δεικτών L_{den} και L_{night}.

7.7 Επεξεργασία εξαχθεισών σχέσεων μετατροπής-Εκτίμηση ορίου δεικτών L_{den} και L_{night}

Από την επεξεργασία του συνδυασμού των δεδομένων προκύπτει η σχέση μεταξύ του δείκτη $L_{10,18hr}$ και του δείκτη $L_{eq,24hr}$ η οποία είναι:

$$L_{10,18hr} = L_{Aeq,24hr} + 3{,}6dB$$

Η σχέση αυτή συμφωνεί με την υπάρχουσα βιβλιογραφία όπως αυτή αναφέρεται στην παράγραφο 7.2.2.

Η σχέση μεταξύ των κλιμάκων L_{A10} και L_{Aeq} είναι:

$$L_{A10} = L_{Aeq} + 2{,}6$$

Η σχέση αυτή είναι πολύ κοντά σε αυτή της βιβλιογραφίας (παράγραφος 7.2.2)

Για την εξαγωγή των ορίων των δεικτών L_{den} και L_{night} θέτουμε στις σχέσεις που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δεδομένων τα υπάρχοντα όρια από την νομοθεσία, δηλαδή $L_{10,18hr}$=70 dB(A) και $L_{eq,12hr}$=67 dB(A) και έτσι έχουμε:

L_{den}=0,9633*L_{10}+3,6728 $\Rightarrow$ **L_{den}=71,1±0,90dBA** (1)

L_{den}=1,0135*L_{eq}(12hr)+1,5198 $\Rightarrow$ **L_{den}= 69,4±0,94dBA** (2)

L_{night}=1,0397*L_{den}-11,229 $\Rightarrow$ **L_{night}=62,7±0,98dBA** από σχέση (1) και

L_{night}=60,9 ±0,98dBA από σχέση (2)

Λόγω του ότι η συσχέτιση μεταξύ L_{den} και L_{10} είναι καλύτερη προκύπτει ότι για τη διατήρηση της υπάρχουσας κατάστασης τα όρια για τους δείκτες L_{den} και L_{night} θα πρέπει να είναι L_{den}=71 dB(A) και L_{night}=63 dB(A). Για να υπάρξει βελτίωση του ακουστικού περιβάλλοντος τα όρια προτείνεται να είναι **L_{den}=70 dB(A) L_{night}=61 dB(A)** αντίστοιχα.

7.8 Σύνοψη συμπερασμάτων

Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η σχέση μεταξύ του δείκτη $L_{10,18hr}$ και του δείκτη $L_{eq,24hr}$ η είναι $L_{10,18hr} = L_{Aeq,24hr} + 3{,}6dB$ και συμφωνεί με τη βιβλιογραφία
- Η σχέση μεταξύ των κλιμάκων L_{A10} και L_{Aeq} είναι $L_{A10} = L_{Aeq} + 2{,}6$ και πλησιάζει αυτή της βιβλιογραφίας

- Για τη διατήρηση της υπάρχουσας ακουστικής κατάστασης τα όρια για τους δείκτες L_{den} και L_{night} θα πρέπει να είναι L_{den}=71 dB(A) και L_{night}=63 dB(A)
- Για να υπάρξει βελτίωση του ακουστικού περιβάλλοντος τα όρια προτείνεται να είναι **L_{den}=70 dB(A) L_{night}=61 dB(A)** αντίστοιχα
- Για την μετατροπή των τιμών L_{10} στους δείκτες L_{den}, L_{day}, $L_{evening}$ και L_{night} θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις οι οποίες ομοιάζουν αλλά δεν ταυτίζονται απόλυτα με αυτές της βιβλιογραφίας (παράγραφος 7.2.2) πιθανώς λόγω των διαφορετικών συνθηκών οδικής κυκλοφορίας Ηνωμένου Βασιλείου και Ελλάδας.

<u>Για συνθήκες αυτοκινητοδρόμου:</u>

$$L_{day} = 0{,}95 * L_{10,18hr} + 2{,}07 dB$$

$$L_{evening} = 0{,}96 * L_{10,18hr} - 0{,}16 dB$$

$$L_{night} = 0{,}98 * L_{10,18hr} - 5{,}60 dB$$

$$L_{den} = 0{,}96 * L_{10,18hr} + 3{,}90 dB$$

<u>Για συνθήκες μη αυτοκινητοδρόμου:</u>

$$L_{day} = 0{,}89 * L_{10,18hr} + 6{,}51 dB$$

$$L_{evening} = 0{,}97 * L_{10,18hr} - 0{,}63 dB$$

$$L_{night} = 1{,}20 * L_{10,18hr} - 22{,}60 dB$$

$$L_{den} = 1{,}03 * L_{10,18hr} - 1{,}66 dB$$

Βιβλιογραφία

1) Davis M, Cornwell D, (1998), **“Introduction to Environmental Engineering”**, Mc Graw Hill, pp 550-625.
2) Μαρκαντωνάτος Γ, (1984), **“Στοιχεία Υγιεινής Περιβάλλοντος και Υγειονομικής Μηχανικής”**,
3) Τσώχος Γ,(1997), **“Περιβαλλοντική Οδοποιία”**, Universal Studio Press, Θεσαλλονίκη.
4) Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, (2005), Ιστοσελίδα, www.minenv.gr
5) Rettinger M,(1977), **“Acoustic Design and Noise Control”**, vol II, Chemical Publishing Co, New York.
6) Veslind P, Peirce J, Weiner R,(1988), **“Environmental Engineering”**, Second Edition, pp 463-477, Butterworth-Heinemann.
7) Wang L, Pereira N,(1979), **“Handbook of Environmental Engineering: Volume 1 Air and Noise Pollution Control”**, pp 393-468, The HUMANA Press, Clifton, New Jersey.
8) Fletcher H, Munson W.A,(1935), **“Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol 5, pp 82-108.
9) Davis H, (1958), **“Effects of High Intensity Noise on Navy Personnel”**, U.S Armed Forces Medical Journal, vol. 9, pp. 1027-1047.
10) Νόμος 1650/86, **“Για την προστασία του περιβάλλοντος”**.
11) Υπουργική Απόφαση, (1992), 17252/92,**”Καθορισμός δεικτών και ανωτάτων επιτρεπομένων ορίων θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία σε οδικά και συγκοινωνιακά έργα”**
12) Ευρωπαικό Κοινοβουλιο, (2002), Οδηγία 2002/49/ΕΚ,**”Σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου”**
13) Ψύχας Κ, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, (2004),Τμήμα καταπολέμησης θορύβου.
14) ΚΥΑ 28340/2440/92 **“Μέτρα για τον περιορισμό της ηχορύπανσης που προέρχεται από μοτοσυκλέττες σε συμμόρφωση προς τις**

διατάξεις των οδηγιών 78/1015, 87/56 και 89/238/ΕΟΚ", ΦΕΚ 532/Β/92.

15)ΚΥΑ 1011/22/19-Δ, " **Αντικατάσταση των διατάξεων της απόφασης Γ-20/81567/898/1988 που αναφέρονται στην αποδεκτή ηχοστάθμη και στις διατάξεις εξατμίσεως των οχημάτων με κινητήρα"**, ΦΕΚ 523/Β/93

16) **European Union Road Federation**, (2005), Ιστοσελίδα, www.erf.be.

17) **European Environmental Agency**, (2005), Ιστοσελίδα, www.eee.

18)The World Bank, (1994), **"Roads and the Environment : a Handbook"**, Report TWU 13, pp155-164.

19) **"El vehiculo como fuente de ruidos"**, (1992), Rutas.

20) Konno Y, (1992), **"Larmscutz an Japans Autobanhen"** Strasse+Autobahn, H7/1992.

21) **Federal Highway Administartion**, (2005),FHWA, Ιστοσελίδα www.fhwa.dot.gov

22) **European Road Federation** "**Road Traffic Noise : The Road Sector's Perspective"**, Position Paper.

23)Chew C.H, (1995), **"The Influence Of Inclined Buildings On Road Traffic Noise"**, Applied Acoustics, 45.

24) Μαρινάκη Α, Τζώρτζη Ν, (2004), **"Εκτίμηση και Μέτρα Αντιμετώπισης Κυκλοφοριακού Θορύβου σε Υπεραστική Οδό"**, Τεχνικά Χρονικά.

25)Βογιατζής κ, Ψυχας Κ, Καραντούνιας Γ, (1990), **"Διερεύνηση Δυνατοτήτων Μείωσης του Κυκλοφοριακού Θορύβου από Συστήματα Φύτευσης και Ζωνών Πρασίνου"**, Τεχνικά Χρονικά.

26) Cook D.J., **"The role of plant materials in traffic noise control"**, TRR 789.

27) Kragh UJ, (1981), **"Road Traffic Noise Attenuation by Belts of Trees"**, Journal of Sound and Vibration, 74, pp 235-241.

28) Martens MJM, (1980), **"Noise Abatement in Plant Monocultures and Plant Communities"**, Geluid en Groen, Katholieke Univeriteit, Netherlands.

29) Price MA, Attenborough K, Heap N, (1985), **“The Use of Trees for Noise Control”**, Proceedings of Internoise 85, Munich, pp 503-506.

30) Huddart L, (1990), **“The Use of Vegetation for Traffic Noise Screening”**, Transport Research Laboratory Report RR238, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England.

31) Perfater MA, (1979), **“Community Perception of Noise Barriers”**, vol 1, Virginia, USA, Virginia Highway and Transportation Research Council.

32) Watts G, Chinn L, Godfrey N, (1999), **“The Effects of Vegetation on the Perception of Traffic Noise”**, Applied Acoustics, 56, pp 39-56.

33) Golebiewski R, Makarewicz R, Nowak M, Preis A, (2003), **“Traffic Noise Reduction due to Porous Road Surface”**, Applied Acoustics, 64.

34) Morgan P.A, Watts G.R, (2003), **“A Novel Approach to the Acoustic Characterisation of Porous Road Surfaces”**, Applied Acoustics, 64.

35) Meiarashi S, Ishida M, Fujiwara T, Hasebe M, Nkatsuji T, **“Noise Reduction Chracteristics of Porous Elastic Road Surfaces”**, Applied Acoustics, 47.

36) ΥΠΕΧΩΔΕ, (2001), **“Τεχνικές Προδιαγραφές Εκπόνησης Οριστικής Μελέτης Ηχοπετασμάτων για την Προστασία από Οδικό Κυκλοφοριακό Θόρυβο”**, Γεν. Δ/νση Περιβάλλοντος, Δ/νση ΕΑΡΘ, Τμήμα Καταπολέμησης Θορύβου.

37) Crombie D.H, Hothersall D.C, Chandler Wilde S.N, (1995), **“Multiple-Edge Boise Barriers”**. Apllied Acoustics 44.

38) Watts G.R, (1996), **“Acoustic Performance of a Multiple Edge Noise Barrier Profile at Motorway Sites “**, Applied Acoustics, 47.

39) Watts G.R, (1996), **“Acoustic Performance of Parallel Traffic Noise Barriers”**, Applied Acoustics 47.

40) Federal Highway Administration, (2005), **“FHWA Highway Noise Barrier Deign Handbook”**, Office of Natural Environment.

41) Bendtsen H, (1999), **“ The Nordic Prediction Method for Road Traffic Noise”**, The Science of the Total Environment, 235, pp 331-338.

42) Steele C, (2001), **“A critical Review of some Traffic Prediction Models”**, Applied Acoustics, 62.
43) Anon, (1952), **“Handbook of acoustic Noise Control WADC”**, Technical Report 52-204, Wright Air Development Center.
44) Nikson AF, (1965), **“Can Community Reaction to Increased Traffic Noise be Forecast?”**, Fifth International Congress on Acoustics.
45) Lamure C, (1965), **“Niveaux de Bruit au Voisinage des Autoroutes”**, Fifth International Congress on Acoustics.
46) Johson DR, Saunders EG, (1968, **“The Evaluation of Noise from Freely Flowing Traffic”,** Journal of Sound and Vibration.
47) Galloway WJ et al., (1969), **“Urban Highway Noise : Measurement, Simulation and Mixed Reactions”**, NCHRP Report 78.
48) Junf FW, Blaney CT, Kazakov AL, (1996), **“Noise Emission Levels for Vehicles in Ontario”**, Transportation Research Record 105.
49) Anderson GS, Menge CW, Rossano CF, Armstrong RE, Ronning SA, Fleming GG, Lee CSY, (1996), **“FHWA Traffic Noise Model, version 1.0: introduction to its capacities and screen components”**, The Wall Journal, 22.
50) Anon, (1975), **“Calculation of Road Traffic Noise”**, London: United Kingdom Department of the Environment and Welsh Office joint publication, HMSO.
51) Anon, **“Predicting Road Traffic Noise”**, United Kingdom Department of the Environment/HMSO, London.
52) Delany ME, Harland DG, Hood RA, Scholes WE, (1976) **“The Prediction of Noise Levels L_{10} due to Road Traffic”**, Journal of Sound and Vibration 48.
53) Samuels SE, Saunders RE, (1982) **“The Australian Performance of the UK DoE Traffic Noise Prediction Method”**, Australian Road Research Board Conference.
54) Saunders RE, Samuels SE, (1983), **“An Evaluation of the UK DoE Traffic Noise Prediction Method”**, Australian Road Research Board Conference.
55) Steele CM, (1985), **“Report to the New South Wales Department of Public Works”**, C.M Steele &Associates.

56) Anon, (1982), REEF, vol ii, acoustique, Centre Scientifique et Technique du Batiment, Paris.

57) Delany ME, Bazley EN, **“Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials”**, Applied Acoustics, 4.

58) EMPA, (1987), **“Modele de Calcul de Bruit du Trafic Routier pour Ordinateur, Iere partie: Manuel d’utilisation du logiciel STL-86 Berne version 1.0”**, L’Office federal de la protection de l’environment.

59) Balzari, Schudel, Grolimund, Petermann, (1988), **“ Modele de Bruit du Traffic Routier dans le Zones Habitees”**, L’Office federal de la protection de l’environment.

60) Koyasu M, (1978), **“Method of Prediction and Control of Road Traffic Noise in Japan”**, Inter-noise 78, San Francisco.

61) Tachinaba H, Sasaki M, (1994), **“ASJ Prediction Methods of Road Traffic Noise”**, Inter-noise 94, Yokohama.

62) Takagi K, Yamamoto K, (1994), **“Calculation Methods for Road Traffic Noise Propagation Proposed by ASJ”**, Inter-noise, Yokohama.

63) Rathe EJ, (1969), **“Note on two Common Problems of Sound Propagation”**, journal of Sound and Vibration, 10.

64) Raleygh B, (1945),**”The Theory of Sound”**, Dover Publications, New York.

65) Hajek JJ, (1977), **“L_{eq} Traffic Noise Prediction Method”**, Transportation Research Board, National Academy of Sciences.

66) Suksaard T. et al., (1999), **“ Road Traffic Prediction Model in Thailand”**, Applied Acoustics 58.

67) To WM, Ip CW, Lam CK, Yau TH, (2002), **“A Multiple Regression Model for Urban Traffic Noise in Hong Kong”**, Journal of Acoustical Sociesty of America 112.

68) Lam Hk, Tam, ML, (1998), **“Reliability Analysis of Traffic Noise Estimates in Hong Kong”**, Transpn Res D.

69) Tang S.K, Tong K.K, (2004), **“Estimating Traffic Noise for Inclined Roads with Freely Flowing Traffic”**, Applied Acoustics 65.

70) Calixto A, Diniz F, Zannin P, (2002), **“The Statistical Modelling of Road Traffic Noise in an Urban Setting”**, Elsevier Science Ltd.

71) Αττικές Διαδρομές Α.Ε, (2004), **"Πρόγραμμα Παρακολούθησης Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου Ποιότητας Ατμόσφαιρας& Μετεωρολογικών δεδομένων από την Λειτουργία της Αττικής Οδού"**, Εκθέσεις 10-13.

72) Σύνδεσμος δήμων Περιοχής Πειραιά & Δυτικής Αττικής, (2004), **"Ανάπτυξη Σχεδίου Δράσης Αντιμετώπισης Περιβαλλοντικού Θορύβου στις Περιοχές Περάματος, Κερατσινίου, Νίκαιας, Κορυδαλλού και Δραπετσώνας"**, Καταγραφή υφιστάμενης κατάστασης, Μετρήσεις θορύβου.

73) Abbott P.G, Nelson P.M, (2002), **"Converting the UK Traffic Noise Index $L_{A10,18h}$ to EU Noise Indices for Noise Mapping"**,TRL, DEFRA, UK.