

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ : ΥΔΡΑΙΟΣ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ : 96095**



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. Α. ΜΠΑΛΛΗΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2005

Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται θέματα που αφορούν στο θόρυβο που προέρχεται από το σιδηρόδρομο. Συγκεκριμένα, η εργασία περιλαμβάνει:

1. Παρουσίαση των μηχανισμών παραγωγής και εκπομπής θορύβου από το σιδηρόδρομο.
2. Παρουσίαση των μεθόδων πρόβλεψης θορύβου που χρησιμοποιούνται σε χώρες της Ε.Ε. (Nord2000, SRM-II, CRN-1995 κ.τ.λ.)
3. Τεχνικές μείωσης του θορύβου όπως αυτές προκύπτουν από ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα τα τελευταία χρόνια.
4. Εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 σε τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε. για επιβατικούς συρμούς (μετρήσεις, προσαρμογή προτύπου, έλεγχος εγκυρότητας, πρόβλεψη). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η στάθμη θορύβου από το σιδηρόδρομο στην υπό εξέταση περιοχή βρίσκεται στο επίπεδο των 53,1dB(A) την ημέρα και 44,4dB(A) τη νύχτα που είναι χαμηλότερα από τα αυστηρότερα θεσμοθετημένα όρια για το σιδηρόδρομο στην Ευρώπη. Με εφαρμογή της μεθόδου πρόβλεψης προέκυψε ότι μια αύξηση του φόρτου της κυκλοφορίας κατά 70% θα έχει ως αποτέλεσμα την υπέρβαση των αντίστοιχων ορίων τη νύχτα.

Abstract

In the present post-graduate thesis are examined the subjects that concern the noise that emanates from the Railway. More specifically, it includes:

1. Presentation of mechanisms of noise generation and emission by the railway.
2. Noise prediction methods that are used in countries of E.U (Nord2000, SRM-II, CRN-1995 etc.)
3. Noise mitigation techniques, as they result from inquiring E.U. programs during the last years.
4. Adjustment of CRN-1995 method, with noise measurement in part of O.S.E (Railway Organisation of Greece) rail network in the region of Dekelia.
5. Application of CRN-1995 method in part of O.S.E. for passenger trains (Railway Organisation of Greece) railway network (noise measurement, calibration, validation, prediction). The results showed that noise level from the railway in the study area was 52dB(A) which are significantly lower than enacted limits for the railway in Germany. The application of the prediction method shows that for an increase of railway volume by 70% has as a result the noise levels to exceed these limits for the night.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή
 - 1.1. Το πρόβλημα του θορύβου στην Ε.Ε. και ο ρόλος του σιδηροδρόμου
 - 1.2. Δράσεις της Ε.Ε για την αντιμετώπιση του θορύβου.
 - 1.3. Μέτρηση θορύβου με χρήση εναρμονισμένων δεικτών
 - 1.4. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας
2. Ο μηχανισμός παραγωγής θορύβου από το σιδηρόδρομο
 - 2.1. Θόρυβος κατά την κύλιση επί της σιδηροτροχιάς
 - 2.1.1. Τραχύτητα
 - 2.1.2. Η επιρροή του σημείου επαφής
 - 2.2. Ο θόρυβος κατά την κύλιση σε καμπύλα τμήματα ή γέφυρες
 - 2.3. Θόρυβος λόγω διάδοσης κραδασμών στη γραμμή και στο τροχαίο υλικό
 - 2.3.1. Γραμμή
 - 2.3.2. Τροχαίο υλικό
 - 2.4. Θόρυβος κατά την πέδη
 - 2.5. Θόρυβος έλξης
 - 2.6. Αεροδυναμικός θόρυβος
 - 2.7. Μαθηματικά μοντέλα
 - 2.7.1. Προγράμματα εκτίμησης θορύβου κατά την κύλιση
 - 2.7.2. Προγράμματα εκτίμησης αεροδυναμικού θορύβου
3. Μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου στο σιδηρόδρομο
 - 3.1. Το γενικό μοντέλο των μεθόδων πρόβλεψης σιδηροδρομικού θορύβου
 - 3.1.1. Στάθμη θορύβου της πηγής
 - 3.1.2. Διορθωτικοί συντελεστές διάδοσης
 - 3.2. Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων πρόβλεψης
 - 3.3. Η προτεινόμενη ευρωπαϊκή μέθοδος υπολογισμού
 - 3.4. Η Σκανδιναβική μέθοδος
 - 3.4.1. Το μοντέλο της πηγής
 - 3.4.2. Το μοντέλο διάδοσης
 - 3.5. Η Ολλανδική μέθοδος μέτρησης σιδηροδρομικού θορύβου
 - 3.6. Η βρετανική μέθοδος υπολογισμού CRN-1995 (Calculation of Railway Noise)
 - 3.6.1. βασικά βήματα υπολογισμού
 - 3.6.2. Μεθοδολογία μετρήσεων στα πλαίσια της βρετανικής μεθόδου
4. Εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 για το θόρυβο σε τμήμα δικτύου του Ο.Σ.Ε.
 - 4.1. Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός
 - 4.2. Υπολογιζόμενοι δείκτες
 - 4.3. Διερχόμενο τροχαίο υλικό
 - 4.4. Επιλογή θέσης προσαρμογής της μεθόδου CRN-1995
 - 4.5. Μεθοδολογία μέτρησης στάθμης ηχητικής έκθεσης αναφοράς

- 4.6. Επεξεργασία μετρήσεων
- 4.7. Υπολογισμός των δεικτών L_{day} και L_{night} με τη μέθοδο CRN-1995 στη θέση Λυκότρυπα
 - 4.7.1. Βήμα 1^ο
 - 4.7.2. Βήμα 2^ο
 - 4.7.3. Βήμα 3^ο
 - 4.7.4. Βήμα 4^ο
 - 4.7.5. Βήμα 5^ο
 - 4.7.6. Βήμα 6^ο
- 4.8. Μετρήσεις στη θέση Λυκότρυπα
 - 4.8.1. Υπολογισμός στάθμης θορύβου με τη μέθοδο CRN
 - 4.8.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα
- 4.9. Πρόβλεψη θορύβου για μελλοντική σιδηροδρομική κυκλοφορία
- 4.10. Παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995
- 5. Τρόποι αντιμετώπισης του θορύβου από το σιδηρόδρομο
 - 5.1. Η αντιμετώπιση του θορύβου με ηχοπετάσματα
 - 5.2. Η αντιμετώπιση του θορύβου στην πηγή
 - 5.2.1. Μείωση του θορύβου κατά την κύλιση επί της σιδηροτροχιάς
 - 5.2.1.1. Μείωση του παραγόμενου θορύβου από τον τροχό
 - 5.2.1.2. Μείωση του παραγόμενου θορύβου από τη γραμμή
 - 5.2.2. Μείωση του θορύβου έλξης
 - 5.2.3. Μείωση του αεροδυναμικού θορύβου
 - 5.3. Μείωση των εκπομπών θορύβου
 - 5.3.1. Τροχός
 - 5.3.2. Σιδηροτροχιά
 - 5.4. Αποτίμηση των προσφερόμενων λύσεων
- 6. Συμπεράσματα
- 7. Παράρτημα
- 8. Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη στο σύγχρονο κόσμο έχει οδηγήσει σε μια βελτίωση της ποιότητας ζωής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα θέματα, που μέχρι πριν από λίγες δεκαετίες δεν απασχολούσαν τους περισσότερους στην καθημερινότητά τους, να έχουν πλέον αναδειχθεί σε σημαντικά προβλήματα. Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι αυτό του θορύβου. Ο σύγχρονος τρόπος ζωής, η συγκέντρωση του πληθυσμού στις αστικές περιοχές συνέβαλε καθοριστικά στην αύξηση του θορύβου, σε βαθμό που να επηρεάζει σημαντική μερίδα του πληθυσμού.

Προεξέχουσα θέση στις πηγές θορύβου κατέχει ο θόρυβος από την κυκλοφορία λόγω των αυξημένων απαιτήσεων μεταφοράς. Ένα από τα μέσα κυκλοφορίας είναι και ο σιδηρόδρομος. Τα στρατηγικά πλεονεκτήματα του σιδηροδρόμου σε σχέση με τα άλλα μέσα μεταφοράς, τον αναδεικνύουν σε σημαντική παράμετρο στον τομέα των μεταφορών και της οικονομίας γενικότερα. Αν και έρευνες έχουν δείξει ότι το κοινό έχει μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο που προκαλείται από το μέσο αυτό⁽¹⁾, συχνά είναι απαραίτητη η καταγραφή του προβλήματος και εφόσον υπάρχει υπέρβαση των θεσμοθετημένων ορίων, η λήψη μέτρων για την αντιμετώπισή του.

Για τη μέτρησή του υπάρχουν διάφοροι δείκτες ο καθένας από τους οποίους, αναδεικνύει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του θορύβου. Οι τιμές αυτών των δεικτών είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με ηχομετρήσεις με τη βοήθεια κατάλληλου οργάνου. Στις περιπτώσεις που η διενέργεια ηχομετρήσεων δεν είναι εφικτή χρησιμοποιούνται μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου. Άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση του θορύβου είναι μαθηματικά μοντέλα που στόχο έχουν την αποτίμηση της όχλησης που προκαλεί το φαινόμενο αυτό στον άνθρωπο.

Στις περιοχές που οι στάθμες θορύβου υπερβαίνουν τα θεσμοθετημένα όρια, οι ειδικοί του θορύβου εισηγούνται μέτρα στην Κεντρική Διοίκηση. Η αντιμετώπιση του προβλήματος περιλαμβάνει δέσμες μέτρων, κάθε μια από αυτές έχει συγκεκριμένο κόστος και αποτέλεσμα. Στόχος κάθε σχετικής μελέτης είναι η εξεύρεση κατά το δυνατό αποδοτικών τεχνικών μείωσης του θορύβου, διευρύνοντας έτσι τα περιθώρια δράσης των κέντρων λήψεως αποφάσεων. Η αποτελεσματικότητα μιας τεχνικής μείωσης είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με λήψη πειραματικών μετρήσεων και με τη χρήση μοντέλων θορύβου. Φαίνεται, ωστόσο, ότι τεχνικές που σχετίζονται με τη μείωση το θορύβου στην πηγή είναι πιο αποτελεσματικές⁽²⁾. Η ανάπτυξη τέτοιων τεχνικών προϋποθέτει την κατανόηση των μηχανισμών παραγωγής θορύβου στην πηγή.

Η Ε.Ε. απασχολείται έντονα τα τελευταία χρόνια με το θέμα του περιβαλλοντικού θορύβου και έχει εκδώσει σχετική οδηγία, στην οποία περιλαμβάνεται και ειδική παράγραφος για τον σιδηρόδρομο ανάμεσα στα άλλα μέσα μεταφοράς. Παράλληλα χρηματοδοτεί ερευνητικά προγράμματα που θα συνεισφέρουν στη γνώση των μηχανισμών θορύβων αλλά και στη τεχνογνωσία των ευρωπαϊκών χωρών στην κατασκευή σιδηροδρόμων αντιθορυβικής τεχνολογίας.

1.1. Το πρόβλημα του θορύβου στην Ε.Ε. και ο ρόλος του σιδηροδρόμου

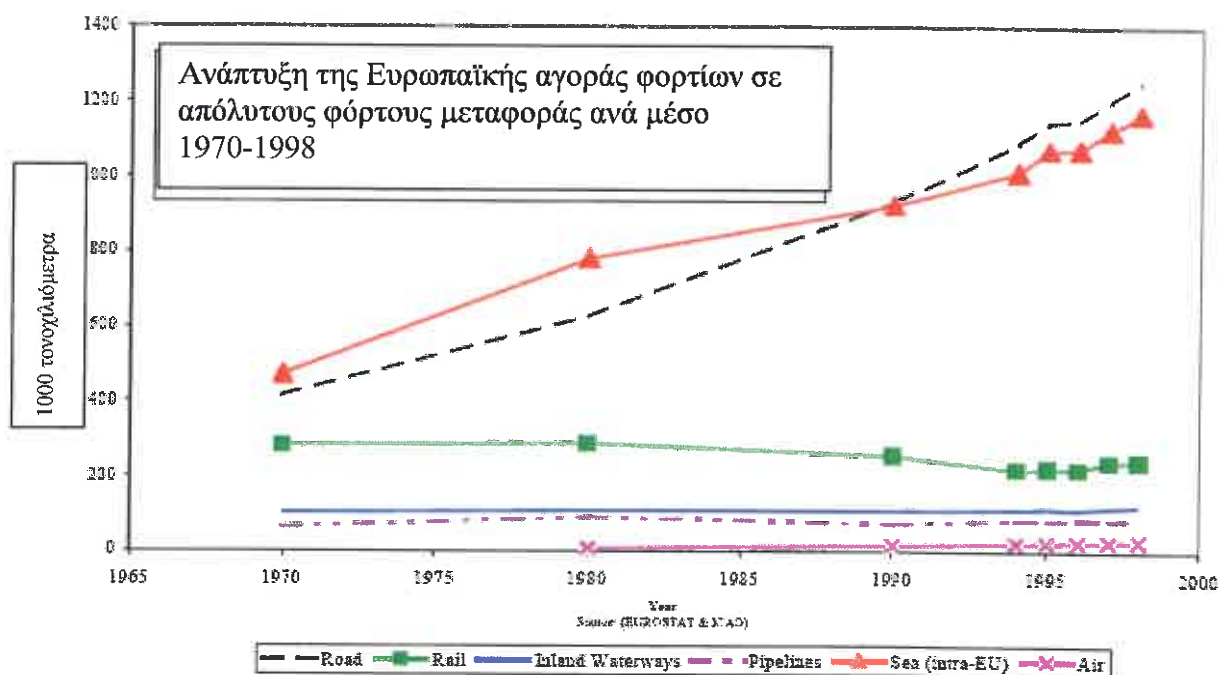
Το πρόβλημα του θορύβου από τα μεταφορικά μέσα διαχέεται με τον τρόπο που εξαπλώνονται και τα δίκτυα μεταφορών. Σήμερα, παρ' όλες τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί υπολογίζεται πως 20% του πληθυσμού της Ε.Ε., δηλαδή περίπου 80 εκατομμύρια άνθρωποι εκτίθενται σε στάθμες θορύβου που οι επιστήμονες και ιατρικοί φορείς θεωρούν απαράδεκτες (>65 dB(A)) ενώ περίπου 170 εκατομμύρια ζουν σε επονομαζόμενες γκρίζες περιοχές, όπου οι στάθμες θορύβου είναι τέτοιες ($55 - 65$ dB(A)) που προκαλούν σημαντική ενόχληση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το κοινό έχει ήδη εκφράσει παράπονα για τα υψηλά επίπεδα θορύβου που έχουν φτάσει στα ευρωπαϊκά όργανα. Το ευρωβαρόμετρο κατέδειξε ότι ο θόρυβος είναι η πέμπτη κατά σειρά πιο σημαντική αιτία παραπόνων, μια θέση η οποία προκύπτει από την ραγδαία και συνεχή επιδείνωση του προβλήματος τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Το 90% των πολιτών που εκτίθενται σε απαράδεκτα υψηλές στάθμες θορύβου το οφείλουν στην οδική κυκλοφορία, ενώ για τους σιδηροδρόμους το αντίστοιχο ποσοστό είναι 1,7%. Σε τέσσερις χώρες που τα ερωτήματα που τέθηκαν στους πολίτες είναι παρόμοια, οι απαντήσεις κατέδειξαν πως ένα ποσοστό μεταξύ 20 και 25% θεωρεί ότι η οδική κυκλοφορία είναι η κύρια πηγή θορύβου, ενώ ένα ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4% θεωρεί τους σιδηροδρόμους ως κύρια πηγή θορύβου. Το γεγονός ότι αυτά τα ποσοστά δεν βρίσκονται κοντά, ενισχύει την άποψη ότι το πρόβλημα του θορύβου, είναι σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικό και εξαρτάται από την αντίληψη κάθε δέκτη ⁽³⁾. Επίσης είναι προφανές ότι μεγάλος αριθμός ανθρώπων, είτε δεν γνωρίζει πως εκτίθεται σε υψηλές στάθμες θορύβου, είτε δεν μπορεί να προσδιορίσει επαρκώς της πηγές του. Γενικά, ωστόσο, υπάρχει η πεποίθηση ότι η όχληση που προκαλείται από τους σιδηροδρόμους είναι μικρότερη και έχει μεγαλύτερη αποδοχή από το κοινό τουλάχιστον μέχρι σήμερα.

Αυτό θα μπορούσε να αλλάξει αν στα επόμενα χρόνια οι σιδηροδρομικές μεταφορές αυξήσουν το μερίδιό τους. Στην Ευρώπη ο όγκος των μεταφορών αυξάνεται συνεχώς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα τελευταία 30 χρόνια υπάρχει αύξηση των εμπορευματικών μεταφορών στην Ευρώπη κατά 121%. Ωστόσο, οι σιδηρόδρομοι φαίνεται ότι δεν ακολούθησαν αυτήν την έκρηξη καθώς το μερίδιό τους στις μεταφορές από 21% το 1970 έπεσε στο 8% το 1999⁽⁴⁾. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ζήτησης μεταφορών απορροφήθηκε από τις οδικές μεταφορές (εικόνα 1.1). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, για πολιτικούς λόγους που σχετίζονται με την εξάρτησή της από την ενέργεια και σύμφωνα με την Λευκή Βίβλο για την Ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών για το έτος 2010 ⁽⁵⁾, επιθυμεί την μετατόπιση των οδικών μεταφορών αγαθών και προσωπικού στη μεταφορά τους με εμπορευματικούς συρμούς και συρμούς υψηλής ταχύτητας αντίστοιχα. Ποιο συγκεκριμένα, στόχος για τα επόμενα 20 χρόνια είναι ο διπλασιασμός των χιλιομετρικών επιβατών και ο τριπλασιασμός των τονοχιλιόμετρων που θα λαμβάνουν χώρα με τους σιδηροδρόμους.

Η επιλογή της Ε.Ε. που σχετίζεται με την προώθηση των σιδηροδρομικών μεταφορών αναδεικνύει και την ισχυρή εμπλοκή τους στο αναπτυσσόμενο πρόβλημα της χρονικής και χωρικής εξάπλωσης του θορύβου. Είναι πολύ πιθανό πως τα επόμενα χρόνια η συμβολή των σιδηροδρόμων στην ηχητική ρύπανση του περιβάλλοντος θα είναι πολύ πιο ισχυρή από αυτή που έχει σήμερα.

Η μετατόπιση των μεταφορών προς της σιδηροδρομικές μεταφορές θα έχει ως συνέπεια την αύξηση των κυκλοφορικών φόρτων στις υπάρχουσες γραμμές καθώς και διάχυση των κυκλοφοριακών αυτών φόρτων σε περισσότερες ώρες του 24ωρου.



Εικόνα 1.1

Συγκριτική παρουσίαση της εξέλιξης του όγκου εμπορικών μεταφορών στην Ε.Ε. κατά την περίοδο 1970-1998 ανά μέσο μεταφοράς. Ο μεταφορές που έγιναν με το σιδηρόδρομο σημειώνονται με την πράσινη γραμμή. Με μαύρη διακεκομμένη σημειώνονται οι οδικές μεταφορές, με μπλε οι μεταφορές μέσω υδάτινων οδών, με μοβ οι μεταφορές με δίκτυα αγωγών, με κόκκινο οι θαλάσσιες μεταφορές και ροζ οι εναέριες μεταφορές.(πηγή 4)

Δεν είναι μάλιστα απίθανο να οδηγήσει στην κατασκευή νέων γραμμών, γεγονός που θα οδηγήσει με τη σειρά του στην εξάπλωση του σιδηροδρόμου εκτός από χρονικά και χωρικά. Αν και τα οφέλη από την εκτεταμένη χρήση των σιδηροδρόμων θα είναι σημαντικά σε πολλούς τομείς, ωστόσο δεν θα πρέπει να παραβλέψει κανείς τις δυσμενείς επιπτώσεις από μια τέτοια αλλαγή. Ο σιδηρόδρομος αν και γενικότερα θεωρείται ένα μέσο ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον, έχει την αχίλλειο πτέρνα του και αυτή είναι ο θόρυβος που παράγει ενοχλώντας τον πληθυσμό που βρίσκεται κοντά στη γραμμή. Η κύρια αιτία που εξηγεί τη μικρή του συμβολή στην παραγωγή θορύβου μέχρι σήμερα θα πρέπει να θεωρηθεί η μικρή του συμμετοχή στις μεταφορές.

Η συνήθης πρακτική θέλει τους εμπορικούς και επιβατικούς συρμούς να μοιράζονται το ίδιο σιδηροδρομικό δίκτυο. Την ημέρα το δίκτυο διατίθεται για κινήσεις επιβατών ενώ τα εμπορευματικά αγαθά κινούνται κατά κανόνα νυχτερινές ώρες όπου η ζήτηση του μεταφερόμενου κοινού είναι μικρή. Συνεπώς η αύξηση της συμμετοχής του σιδηρόδρομου στη μεταφορά αγαθών θα έχει σημαντική επίπτωση τις νυχτερινές ώρες, τις ώρες δηλαδή που οι περίοικοι αναπαύονται. Όσον αφορά τις επιβατικές σιδηροδρομικές γραμμές, ο σκοπός είναι να υποκαταστήσουν τις αεροπορικές μεταφορές τουλάχιστον για αποστάσεις κάτω των 1000 χιλιομέτρων. Ήδη υπάρχουν προβλέψεις κατά τις οποίες η ταχύτητα των σιδηροδρόμων του διευρωπαϊκού σιδηροδρομικού δικτύου θα φτάσει τα 350 km/h. Ο θόρυβος είναι φαινόμενο αυξανόμενο με την ταχύτητα.

Καταστάσεις σαν αυτές είναι πιθανό να θέσουν υπό αίρεση τέτοιες στρατηγικές, ακόμα και αν τα οφέλη τους είναι σημαντικά, επειδή οι επιπτώσεις για το κοινωνικό σύνολο μπορεί να αποδειχθούν σημαντικές. Μπροστά σε αυτό το ενδεχόμενο θα πρέπει ήδη από τώρα που το πρόβλημα δεν είναι σημαντικό παρά μόνο σε τοπικό επίπεδο να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Η αδράνεια στις μέρες μας, θα επέφερε στο μέλλον, με την γιγάντωση των συγκοινωνιών, την διόγκωση του κόστους αντιμετώπισής του. Ήδη, σε ετήσια βάση στην Ε.Ε. αυτό έχει υπολογιστεί στα 10 με 40 εκατομμύρια ευρώ. Στο κόστος αυτό αν και συνυπολογίζεται η απαξίωση της στέγης και των χρήσεων γης γενικότερα, καθώς και τα έξοδα περίθαλψης, ωστόσο, δεν περιλαμβάνει συνολικά το κόστος των επιπτώσεων.

Οι κύρια πηγή παραγωγής θορύβου στην Ευρώπη όσον αφορά τον σιδηρόδρομο έχει βρεθεί ότι είναι οι σιδηροδρομικές μεταφορές φορτίου. Ακολουθούν οι σιδηροδρομικές γραμμές υψηλής ταχύτητας και οι ενδοαστικές σιδηροδρομικές διασυνδέσεις. Τα μέτρα που πρόκειται να ληφθούν δεν θα πρέπει να θίγουν την ανταγωνιστικότητα των μέσων αυτών, αλλά αντίθετα θα πρέπει να παράλληλα να βελτιώνουν την θέση τους στην αγορά μεταφορών. Συνεπώς μέρος της λύσης που πρόκειται να προωθηθεί δεν μπορεί να είναι οι περιορισμοί στην λειτουργία των μέσων αυτών. Άλλωστε, προϋπόθεση για τη μείωση του θορύβου είναι η ισότιμη μεταχείριση των μέσων μεταφοράς. Τέλος δεν θα πρέπει να παραβλεφθεί ότι η μείωση των συνολικών επιπέδων θορύβου της Ε.Ε. με τη χάραξη πολιτικής προώθησης των σιδηροδρομικών μεταφορών κρίνεται πιο πρόσφορη, καθώς σε σχέση τουλάχιστον με τις οδικές μεταφορές είναι ένα σύστημα περισσότερο ελεγχόμενο.

Ζητούμενο είναι ο καθορισμός ασφαλών ορίων και η προσαρμογή του σιδηρόδρομου σε αυτά τα όρια. Φαίνεται ότι ένα αποδεκτό όριο είναι τα 55dB(A)⁽⁶⁾. Η έκθεση του ανθρώπου σε αυτά τα επίπεδα πιθανότατα εξασφαλίζουν τη μη όχληση κατά τη διάρκεια της ημέρας στις δραστηριότητές του και την ηρεμία στον ύπνο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αντίθετα έχουν παρατηρηθεί σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία σε στάθμες θορύβου μεγαλύτερες των 65 dB(A) κατά τη διάρκεια της ημέρας και

των 55 dB(A) κατά τη διάρκεια της νύχτας. Κατά μία έννοια σύμφωνα με τα παραπάνω, 170 εκατομμύρια άνθρωποι είναι εν δυνάμει ασθενείς. Έτσι σε μια κοινότητα που υποστηρίζει ότι φροντίζει την υγεία των πολιτών της όσο και τους οικονομικούς δείκτες θα πρέπει να βρεθούν λύσεις εξισορρόπησης αυτών των αντίρροπων στόχων.

1.2. Δράσεις της Ε.Ε για την αντιμετώπιση του θορύβου.

Μέχρι τώρα δεν υπήρχαν θεσμοθετημένες οριακές τιμές εκπομπής από τα σιδηροδρομικά οχήματα, όπως υπήρχαν για τα αυτοκίνητα, τα αεροπλάνα και για τα υπόλοιπα μέσα ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '70. Αν και υπήρχε πρόταση για να γίνει κάτι τέτοιο το 1983, το σχέδιο δεν προχώρησε. Παρατηρείται λοιπόν μια υστέρηση σε αυτόν τον τομέα των μεταφορών. Ο λόγος για αυτό ήταν ότι η εφαρμογή κανονισμών που θα σχετίζονταν με αυτές τις τιμές θα έρχονταν σε αντίθεση με διμερείς και διεθνείς συμβάσεις που υπήρχαν μεταξύ μελών της Ε.Ε. και άλλων ευρωπαϊκών χωρών μη μελών της Ε.Ε..

Το 1996 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε Πράσινη Βίβλο αναφερόμενη στη μελλοντική πολιτική θορύβου με την οποία αναπτύχθηκε το πλαίσιο για την ανάπτυξη πολιτικής θορύβου στην Ε.Ε.. Το 1998, σε ομιλία του στην Κοπενχάγη, ο αρμόδιος επίτροπος για θέματα περιβάλλοντος Ritt Bjerregaard ανήγγειλε δέσμη μέτρων για την αντιμετώπιση του θορύβου. Πιο συγκεκριμένα :

1. Ο Οργανισμός Πολιτικής Θορύβου της Ε.Ε. θα συστήσει δικτύο/ομάδα (εικόνα 1.1) ειδικών περί του θορύβου, με αποστολή να βοηθήσει την Επιτροπή στη χάραξη πολιτικής θορύβου. Οι εργασίες αυτού του δικτύου επιμερίστηκαν σε έξι ομάδες εργασίας που η κάθε μία έχει διαφορετικό αντικείμενο. Σε αυτές συμμετέχουν αντιπρόσωποι από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Μεταξύ άλλων το δίκτυο συνέβαλε στην έκδοση της οδηγίας 2002/49/ΕΚ για τον περιβαλλοντικό θόρυβο ενώ από τα πορίσματα της 1^{ης} ομάδας εργασίας προέκυψε η υιοθέτηση των δεικτών L_{den} και L_{night} για την μέτρηση του θορύβου πανευρωπαϊκά. Η 2^η ομάδα εργασίας έδωσε οδηγίες για τη σχέση δόσης – αποτελέσματος όσον αφορά το θόρυβο για την αποτίμηση των εκτιθέμενων ατόμων σε υψηλές στάθμες θορύβου που οφείλεται στις μεταφορές. Η 6^η ομάδα καθόρισε τις στρατηγικές και τις προτεραιότητες για την αντιμετώπιση του σιδηροδρομικού θορύβου οι οποίες παρουσιάστηκαν στους ενδιαφερόμενους εμπλεκόμενους φορείς σε εργαστήριο που οργάνωσε η Επιτροπή στις 29 Οκτωβρίου του 2003 στις Βρυξέλλες.
2. Την έκδοση Οδηγίας σχετικής με τον περιβαλλοντικό θόρυβο με στόχο οι αρμόδιες τοπικές αρχές των κρατών μελών να συντάξουν στρατηγικούς χάρτες θορύβου με τη χρήση εναρμονισμένων δεικτών, για την ενημέρωση του κοινού για την έκθεσή του στο θόρυβο και για τα αποτελέσματα αυτής της έκθεσης και για την εκπόνηση σχεδίων δράσης σε θέματα που αφορούν το θόρυβο. Η οδηγία αυτή ήταν η 2002/49/ΕΚ⁽⁸⁾ που υιοθετήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, αλλά και από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο στις 25 Ιουνίου 2002. Ο κύριος στόχος της οδηγίας είναι αντιμετώπιση του προβλήματος σε μια κοινή βάση για όλες τις χώρες της Ε.Ε.. Οι δράσεις που προωθούνται από την οδηγία είναι η παρακολούθηση του προβλήματος, η παροχή πληροφοριών και συμβουλών στο κοινό και η διευθέτηση των τοπικών προβλημάτων θορύβου σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές στη χάραξη μιας μακροπρόθεσμης πολιτικής θορύβου.

3. Την έκδοση οδηγίας σχετικής με μηχανήματα που δραστηριοποιούνται σε υπαίθριο χώρο.
4. Την ανάπτυξη της υπάρχουσας νομοθεσίας που σχετίζεται με τις πηγές θορύβου, μεταξύ αυτών και ο σιδηρόδρομος, και την εξασφάλιση οικονομικής υποστήριξης σε σχετικά ερευνητικά προγράμματα και εργασίες. Όσον αφορά τον σιδηροδρομικό θόρυβο η υπάρχουσα νομοθεσία συνίσταται στην οδηγία 96/48/EC που αναφέρεται στην διαλειτουργικότητα των διευρωπαϊκών σιδηροδρομικών συστημάτων υψηλής ταχύτητας. Οι τεχνικές προδιαγραφές για τη διαλειτουργικότητα όσον αφορά το τροχαίο υλικό των συστημάτων υψηλής ταχύτητας αναφέρονται στην απόφαση της Επιτροπής 2002/735/EC ενώ οι αντίστοιχες για την υποδομή στην απόφαση της Επιτροπής 2002/732/EC. Η οδηγία 2001/16/EC αναφέρεται στη διαλειτουργικότητα των συμβατικών διευρωπαϊκών σιδηροδρομικών συστημάτων.

Για το σιδηρόδρομο έλαβαν και λαμβάνουν χώρα προγράμματα που χρηματοδοτούνται από την Επιτροπή με δύο κύριους στόχους :

- Τον έλεγχο της καταλληλότητας του σχεδίου προτύπου pr EN ISO 3095:2001, που αναφέρεται στις μετρήσεις του θορύβου που παράγεται από σιδηροδρομικά οχήματα για τον καθορισμό ορίων εκπομπής.
- Τη δημιουργία μιας ευρωπαϊκής μεθόδου πρόβλεψης θορύβου
- Τον καθορισμό των προτεραιοτήτων και των στρατηγικών για τη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου

Για το σιδηρόδρομο εκδίδονται τεχνικές προδιαγραφές για τα σιδηροδρομικά συστήματα, που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων οριακές τιμές εκπομπής. Οι τιμές αυτές ελέγχονται θα πρέπει να ελέγχονται σε αυστηρά καθορισμένες συνθήκες και με τυποποιημένο τρόπο. Όπως φαίνεται μέχρι τώρα το σχέδιο προτύπου prEN ISO3095:2001, έχει ικανοποιητική εφαρμογή στον καθορισμό αυτών των τιμών. Στο κοντινό μέλλον σκοπός της Ε.Ε. είναι η δημιουργία στρατηγικών χαρτών θορύβου σε όλο τον ευρωπαϊκό χώρο, με τη χρήση του δείκτη L_{den} . Οι χάρτες αυτοί είναι δυνατόν να γίνουν με τη βοήθεια μεθόδων πρόβλεψης θορύβου. Για το σκοπό αυτό η Ε.Ε. προωθεί κοινές μεθόδους πρόβλεψης θορύβου για χρήση από τα κράτη μέλη της. Παράλληλα, για τη μείωση του θορύβου από το σιδηρόδρομο καταβάλλονται προσπάθειες που έχουν να κάνουν με την εύρεση της βέλτιστης σχέσης κόστους - ωφέλειας από τις προσφερόμενες λύσεις για τις υπάρχουσες αλλά και τις μελλοντικές γραμμές. Τα μέτρα που φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματικά και προωθούνται είναι αυτά που σκοπεύουν σε μείωση στην πηγή του.

Με αυτούς τους στόχους, τα τελευταία πέντε χρόνια η έρευνα έχει εντατικοποιηθεί με τις δραστηριότητες επιστημονικών προγραμμάτων υπό την αιγίδα της Ε.Ε..

- Silent Freight & Silent Track

Επικεντρώνονται στην εύρεση μεθόδων μείωσης του παραγόμενου θορύβου στην πηγές των οχήματα και της γραμμή αντίστοιχα

- METARAIL

Ερευνά κατά βάση τη μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθηθεί για την διεξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων.

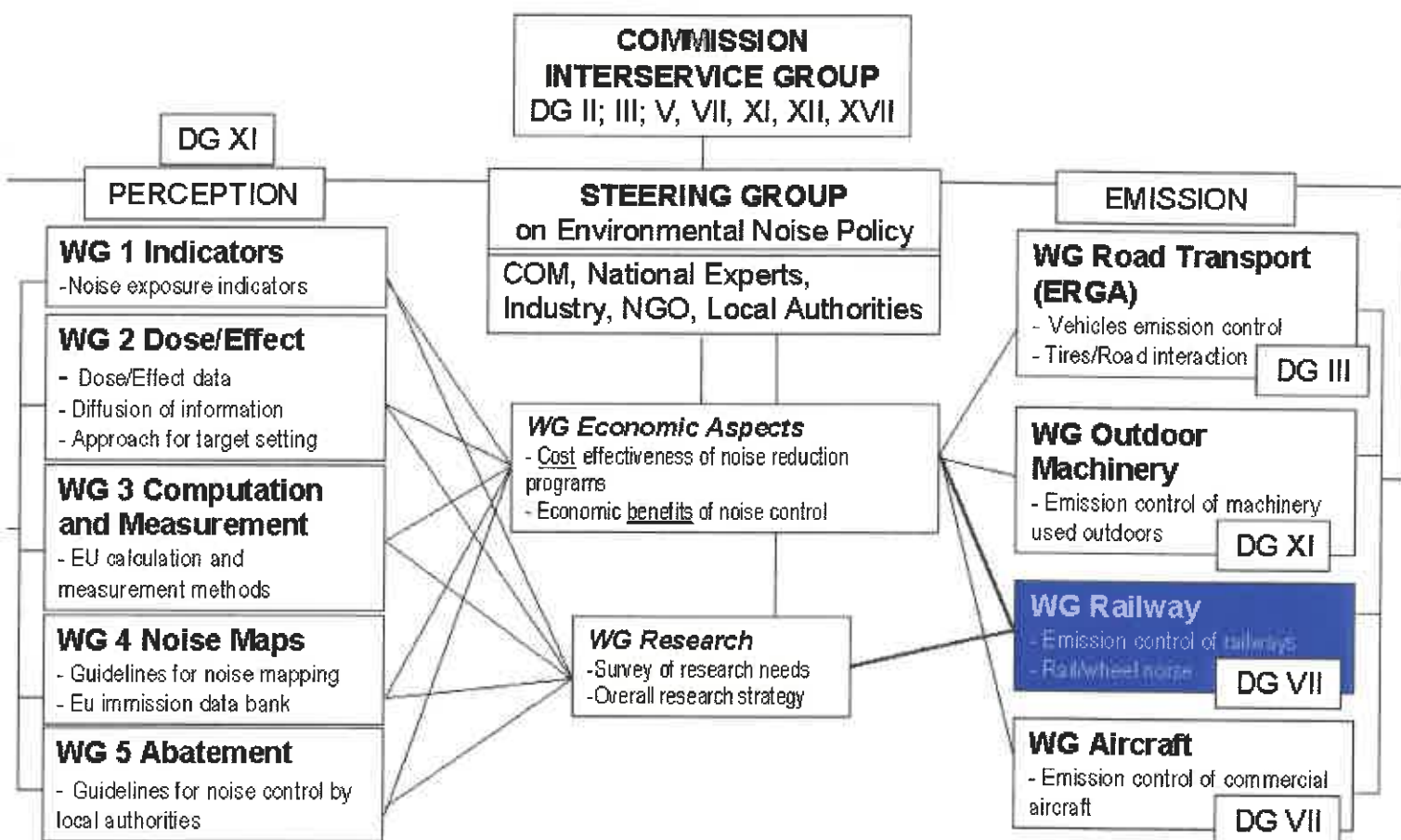
- STAIRRS

Αντικείμενο του προγράμματος είναι η εύρεση μιας μεθόδου εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού ενεργειών για τη μείωση του θορύβου. Παράλληλα, αναζητά τρόπους για την αποτίμηση της συνεισφοράς της γραμμής και του συρμού κατά την παραγωγή του.

- Harmonoise

Επιδίωξη του προγράμματος αυτού είναι η δημιουργία μιας κοινής μεθόδου πρόβλεψης του παραγόμενου θορύβου για όλες τις ευρωπαϊκές χώρες.

EU Noise Policy Organisation



Εικόνα 1.2

Οργανόγραμμα του δικτύου-ομάδας ειδικών του θορύβου που συμβάλουν στη χάραξη πολιτικής για το θόρυβο από την Ε.Ε. (πηγή 7)

1.3. Μέτρηση θορύβου με χρήση εναρμονισμένων δεικτών.

Μέχρι σήμερα στις χώρες μέλη της Ε.Ε. για τη μέτρηση του θορύβου χρησιμοποιούνται διαφορετικοί δείκτες. Κάποιες χώρες χρησιμοποιούν για να ορίσουν οριακές τιμές το δείκτη L_{max} , ενώ άλλες χρησιμοποιούν ενεργειακά ισοδύναμες ηχοστάθμες L_{eq} , για συγκεκριμένα τμήματα της ημέρας. Ακόμα και για τις τελευταίες βέβαια δεν υπάρχει συμφωνία για τις ώρες στις οποίες χωρίζεται η ημέρα. Η οδηγία 2002/49/ΕΚ προτείνει στις χώρες της Ε.Ε. τη χρήση ενός κοινού δείκτη, του L_{den} . Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκε ο εν λόγω δείκτης είναι:

- Η συσχέτιση των δεικτών με τις επιπτώσεις του θορύβου.
- Η ευκολία εφαρμογής. Η ευκολία με την οποία γίνεται ο υπολογισμός από τα διαθέσιμα δεδομένα αλλά και οι μετρήσεις με το διαθέσιμο εξοπλισμό.
- Η σαφήνεια. Να είναι αντιληπτή η φυσική σημασία του.
- Η συμβατότητα με τους δείκτες που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα.

Πρόκειται για έναν σύνθετο δείκτη που αποτελείται από τους δείκτες L_{day} , $L_{evening}$ και L_{night} οι οποίοι συμμετέχουν με διαφορετική βαρύτητα στον υπολογισμό του L_{den} . Η επιλογή των περιόδων των δεικτών L_{day} , $L_{evening}$ και L_{night} γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο τυποποίησης ISO 1996-2:1987. Η μέρα χωρίζεται σε τρεις περιόδους, ημέρα 12 ωρών (7.00-19.00), απόγευμα 4 ωρών (19.00-23.00) και βράδυ 8 ωρών (23.00-7.00). Δίνεται ακόμα η δυνατότητα να αυξηθεί ή να μειωθεί η βραδινή περίοδος κατά 1-2 ώρες σε σχέση με την ημερήσια περίοδο, στην περίπτωση που αυτό υπαγορεύει ο τρόπος ζωής και οι συνήθειες των πολιτών κάποιου κράτους μέλους. Για κάθε τέτοιο χρονικό διάστημα προσδιορίζεται αντίστοιχα τα L_{day} , $L_{evening}$ και L_{night} . Οι δείκτες αυτοί μετρούν $L_{eq}(A)$ όπου ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι το αντίστοιχο χρονικό διάστημα με στάθμιση σύμφωνα με την καμπύλη A. Ο δείκτης L_{den} προσδιορίζεται σύμφωνα με τον τύπο :

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

Η λογική που η ημέρα χωρίζεται σε αυτές τις περιόδους είναι ότι η ενόχληση που προκαλεί ο θόρυβος σχετίζεται με τη δραστηριότητα των ανθρώπων όταν συμβαίνει το γεγονός. Ο βαθμός της όχλησης που προκαλεί αυξάνει όσο η ημέρα προχωρά και κορυφώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ο καθορισμός της νυχτερινής περιόδου σχετίζεται με την ώρα που οι άνθρωποι πηγαίνουν να κοιμηθούν και με την ώρα που σηκώνονται από το κρεβάτι. Η περίοδος της ημέρας περιλαμβάνει τις ώρες εργασίας που περιλαμβάνουν και το χρόνο που απαιτείται για μετακίνηση από και προς την εργασία. Κατά την απογευματινή περίοδο υπάρχει ο χρόνος που απαιτείται για χαλάρωση και ανάπαυση κάθε εργάσιμης ημέρας. Ενδεχόμενα στο χρόνο αυτό περιλαμβάνεται και ο μεσημεριανός ύπνος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο δείκτη L_{den} δεν υπάρχει μέριμνα για τη μέρα της εβδομάδας (καθημερινή-Σαββατοκύριακο), ούτε για την εποχή του χρόνου (χειμερινή-καλοκαιρινή περίοδος).

Η διάκριση περιόδων της ημέρας επιτρέπει την χρήση συντελεστών βαρύτητας, οι οποίοι επιχειρούν να κάνουν αριθμητική αποτίμηση της προηγούμενης παρατήρησης. Στην παραπάνω σχέση για την βραδινή περίοδο ο αντίστοιχος συντελεστής είναι ο αριθμός 10 που προστίθεται στο δείκτη L_{night} . Ο αριθμός αυτός συσχετίζεται με τη μείωση των επιπέδων θορύβου κατά 10 dB(A) κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για την απογευματινή περίοδο ο αντίστοιχος συντελεστής είναι ο αριθμός 5.

1.4. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται προσπάθεια εκτίμησης του προβλήματος του θορύβου από τα τρένα σε ένα τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε.

- i. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου γίνεται παρουσίαση των μηχανισμών που τον προκαλούν και των παραμέτρων που αφορούν την εκπομπή του.
- ii. Παρουσιάζονται μέθοδοι πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται σε χώρες της Ε.Ε. και εξετάζονται οι δυνατότητές τους.
- iii. Απ' τις μεθόδους αυτές, εφαρμόστηκε η μέθοδος CRN-1995 του υπουργείου μεταφορών της Μ. Βρετανίας, σε τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε. για τους επιβατικούς συρμούς και προσδιορίστηκε ο δείκτης L_{den} στην περιοχή μελέτης. Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει:
 - a. Προσαρμογή της μεθόδου σε ένα τμήμα γραμμής με τη λήψη ηχομετρήσεων.
 - b. Εφαρμογή της μεθόδου στην περιοχή μελέτης
 - c. Λήψη ηχομετρήσεων με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου
 - d. Πρόβλεψη θορύβου για αύξηση του φόρτου επιβατικών οχημάτων 70%
- iv. Τέλος θα προταθούν τρόποι μείωσης του παραγόμενου θορύβου όπως αυτές προκύπτουν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

2. Ο μηχανισμός παραγωγής θορύβου από το σιδηρόδρομο.

Ο θόρυβος παράγεται από τις ταλαντώσεις των δομικών στοιχείων του συρμού και της γραμμής κατά την κίνησή του σε ευθυγραμμία, καμπύλη ή ακόμα όταν λειτουργεί σε στάση. Ο θόρυβος που παράγει κάθε πηγή, καθώς και το φάσμα συχνοτήτων της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής, απ' το είδος του συρμού και τα χαρακτηριστικά κίνησής του. Οι μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου, που θα εξεταστούν, υπολογίζουν το θόρυβο από το σύνολο των πηγών θορύβου κατά τη διέλευση των συρμών. Ωστόσο, λαμβάνουν υπ' όψη τους μηχανισμούς αυτούς για να προτείνουν αντίστοιχες διορθώσεις όταν τα χαρακτηριστικά του συρμού ή της γραμμής αποκλίνουν από αυτά που κάθε μέθοδος χρησιμοποιεί ως βάση αναφοράς. Η καλή γνώση του μηχανισμού παραγωγής θορύβου είναι δυνατόν να προσδιορίσει καλύτερα το μέγεθος αυτών των διορθώσεων. Επιπλέον μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της πρόβλεψης, εφ' όσον κάποιες από τις παραμέτρους των μηχανισμών παραγωγής μπορούν να αποτελέσουν δεδομένα σε μια μελλοντική μέθοδο πρόβλεψης.

Σε γενικές γραμμές είναι αποδεκτό ότι ο θόρυβος από ένα κινούμενο σιδηροδρομικό όχημα οφείλεται :

- στην αλληλεπίδραση τροχού – σιδηροτροχιάς
- στους κραδασμούς που προκαλεί στην υποδομή
- στην έλξη και στα βοηθητικά συστήματα του συρμού
- στον αεροδυναμικό θόρυβο, που οφείλεται στην τυρβώδη ροή του αέρα γύρω από τα κινούμενα οχήματα

Όπως είναι αναμενόμενο ο θόρυβος που γίνεται αντιληπτός σε ένα συρμό προκύπτει από τη συνεισφορά όλων των παραπάνω πηγών. Αυτό που διαφέρει είναι ο βαθμός συνεισφοράς της κάθε πηγής σε κάθε συνθήκη λειτουργίας. Ο εντοπισμός της πηγής με τη μεγαλύτερη συνεισφορά μπορεί να γίνει βάση της ταχύτητας κίνησης του συρμού (Εικόνα 2.1).

- Ως περίπου τα 50 km/h, ο σιδηροδρομικός θόρυβος προέρχεται κυρίως από το θόρυβο έλξης. Αυτός συνίσταται στο θόρυβο της μηχανής και στο θόρυβο από τα υπόλοιπα βοηθητικά συστήματα του συρμού (auxiliary noise). Η συσχέτιση του θορύβου έλξης με την ταχύτητα είναι μικρή. Η συνεισφορά του θορύβου έλξης είναι μεγαλύτερη όταν ο συρμός βρίσκεται σε φάση επιτάχυνσης.
- Από τα 50 km/h ως τα 200 km/h οι εκπομπές θορύβου οφείλονται κατά βάση στο θόρυβο κυλίσεως. Ο θόρυβος κυλίσεως αυξάνεται με την ταχύτητα κατά μια ποσότητα της τάξεως του $20-30\log V$. Είναι προφανές ότι στις συνήθεις ταχύτητες είναι η κύρια πηγή θορύβου.
- Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 200km/h ο θόρυβος οφείλεται κατά βάση στους αεροδυναμικούς θορύβους, οι οποίοι συσχετίζονται με την ταχύτητα κατά τη σχέση $50-70\log V$. Η συσχέτιση αυτή εξαρτάται από το σχήμα του μετώπου του συρμού και τη γενικότερη αεροδυναμική του. Ειδικά όσον

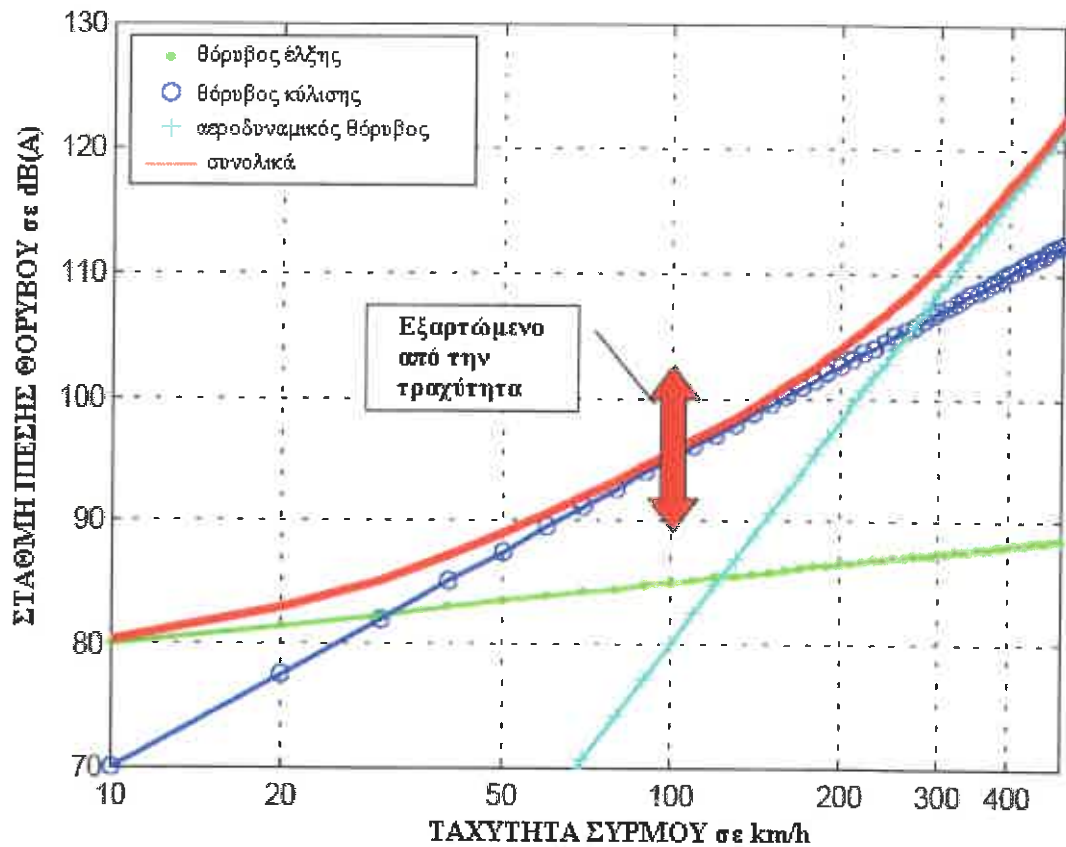
αφορά του συρμού που έχουν ηλεκτροκίνηση σημαντική είναι η επιρροή του παντογράφου.

Αυτές είναι γενικές κατευθύνσεις όσον αφορά τον σιδηροδρομικό θόρυβο, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αποκλίσεις από αυτά. Στις μεταβατικές ταχύτητες ο παραγόμενος θόρυβος μπορεί να μην προέρχεται από εκεί που θα ανέμενε κανείς σύμφωνα με τα παραπάνω, αλλά εξαρτάται από άλλες παραμέτρους. Έτσι, σε γραμμές που βρίσκονται σε πολύ κακή κατάσταση, ο θόρυβος από την κύλιση ήδη από ταχύτητες περί των 30km/h μπορεί να υπερκεράσει αυτόν της έλξης ή είναι δυνατόν να υπερκεράσει τους αεροδυναμικούς σε ταχύτητες μέχρι τα 250-300km/h. Ανά πάση στιγμή, δε, ο θόρυβος της έλξης μπορεί να έχει κυρίαρχη επιρροή αν ο συρμός επιταχύνει για να αλλάξει σημαντικά την ταχύτητά του.

Κάθε μία από αυτές της πηγές βρίσκεται σε διαφορετικό ύψος και εξαρτάται από τη θέση της. Για παράδειγμα, ο θόρυβος της έλξης μπορεί να προέρχεται από τις γρίλιες της μηχανής ή τις εξατμίσεις, ο θόρυβος κύλισης μπορεί να προέρχεται από τη σιδηροτροχιά ή από τον άξονα, ενώ οι αεροδυναμικοί θόρυβοι από την οροφή του βαγονιού, τον παντογράφο και τα κενά μεταξύ των βαγονιών. Ο προσδιορισμός των πηγών γίνεται με τη χρήση τεχνικών που χρησιμοποιούν συστοιχίες μικροφώνων (Εικόνα 2.2). Η διάταξη των συστοιχιών είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Παράλληλα η ανάλυση του θορύβου τους επιτρέπει έτσι να γίνει ταυτοποίηση των ηχητικών πηγών καθώς αυτές εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις διατάξεις αυτές μπορούν να βελτιωθούν με προηγμένες μεθόδους και να προσδιοριστούν ακόμα η ισχύς της πηγής, το φάσμα εκπομπής της και η κατευθυντικότητα της⁽²⁾ (Εικόνα 2.3).

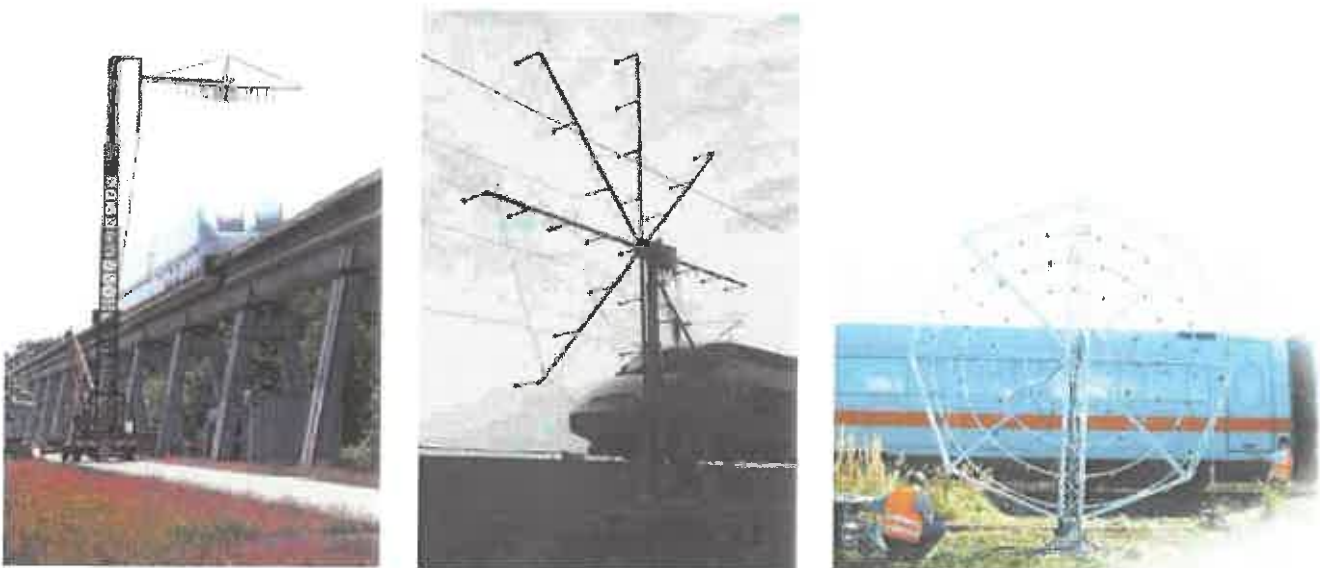
Οι μέθοδοι πρόβλεψης λαμβάνουν υπ' όψη την επιρροή της ταχύτητας, προτείνοντας σχέσεις που συνδέουν την ταχύτητα με το θόρυβο που προέρχεται από το σύνολο των πηγών. Οι σχέσεις αυτές είναι εμπειρικές.

Η ΣΤΑΘΜΗ ΠΙΕΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΡΜΟΥ



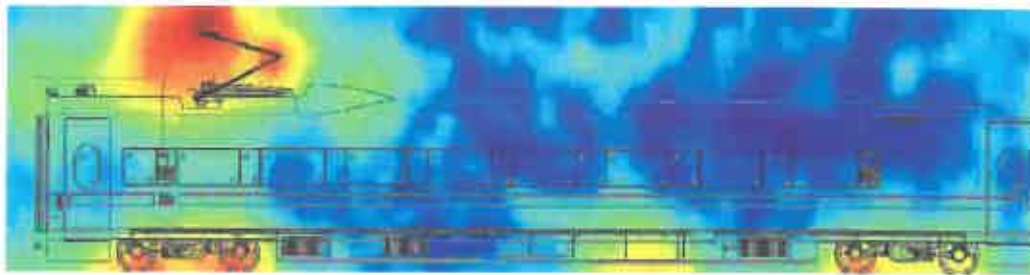
Εικόνα 2.1

Γράφημα συσχέτισης των πηγών θορύβου από το σιδηρόδρομο με την ταχύτητά του. Το γράφημα μπορεί να μετατοπιστεί προς τα πάνω όταν αυξάνεται η τραχύτητα των τροχών και της σιδηροτροχιάς επί της οποίας κινείται ο συρμός. (πηγή 9)



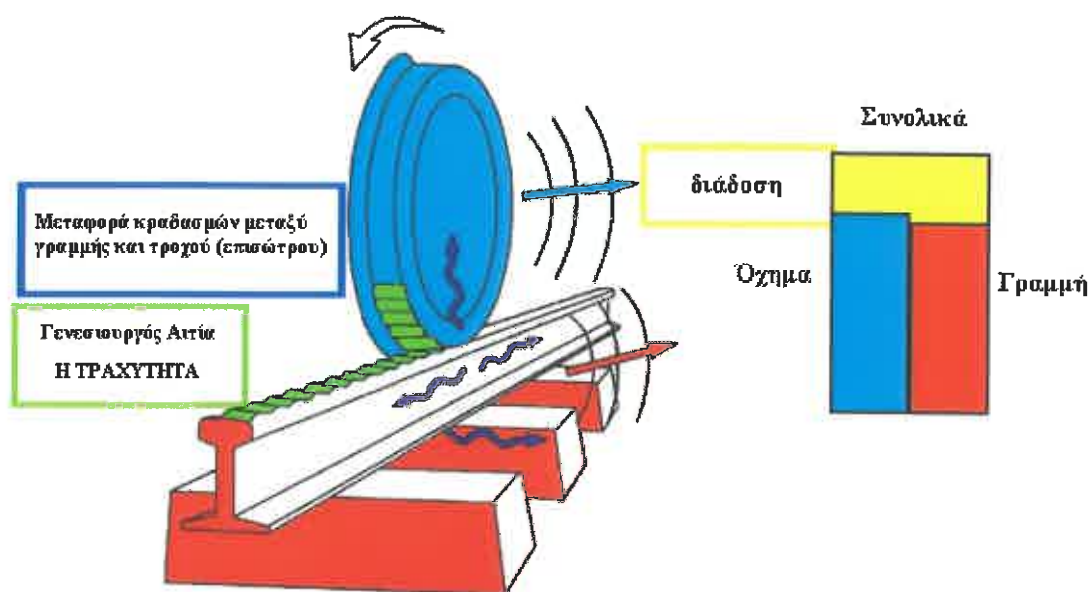
Εικόνα 2.2

Συστοιχίες μικροφώνων. (πηγή 2)



Εικόνα 2.3

Αποτελέσματα μέτρησης με συστοιχία μικροφώνων σπειροειδούς μορφής των γερμανικών σιδηροδρόμων σε συρμό ICE3 που κινείται με 325km/h.(Πηγή 12)



Εικόνα 2.4

Παραγωγή, εξάπλωση και εκπομπή του θορύβου κατά την κύλιση. Ο παραγόμενος θόρυβος προέρχεται από τη γραμμή και τον τροχό.(πηγή 9)

2.1. Θόρυβος κατά την κύλιση επί της σιδηροτροχιάς

Ο θόρυβος κατά την κύλιση οφείλεται στις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις των μηχανικών μερών του τρένου και της γραμμής. Η διέγερση που εμφανίζεται κατά τη διέλευση ενός συρμού προέρχεται από ατέλειες των επιφανειών κύλισης της σιδηροτροχιάς και του τροχού, οι οποίες προκαλούνται λόγω της φθοράς που επιφέρει η επαφή τροχού και σιδηροτροχιάς. Η τραχύτητα αυτή προκαλεί κραδασμούς που θέτουν σε ταλάντωση τα μεταλλικά μέρη του συρμού και τα στοιχεία της γραμμής δηλαδή του τροχού, της σιδηροτροχιάς αλλά και των στρωτήρων (Εικόνα 2.4). Κατά κανόνα οι ατέλειες αυτές στο σημείο επαφής προκαλούν κατακόρυφη σχετική μετατόπιση του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά. Το μέγεθος της μετατόπισης εξαρτάται και από την ελαστικότητα των υλικών στην επιφάνεια επαφής. Οι ατέλειες αυτές περιγράφονται με το γενικό όρο τραχύτητα και χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματός τους λ και από το πλάτος τους Z μεταβαλλόμενο αρμονικά ($Z(x) = Z_0 \sin 2\pi x/\lambda$)⁽¹⁰⁾.

Ο μηχανισμός με τον οποίο η τραχύτητα του τροχού και της σιδηροτροχιάς παράγει ταλαντώσεις στα μηχανικά μέρη του τρένου και της γραμμής περιγράφεται με διάφορα μοντέλα όπως αυτά που εμπεριέχονται στο πρόγραμμα TWINS. Κατά κανόνα τα μοντέλα αυτά είναι γραμμικά. Αυτό σημαίνει πως η τραχύτητα ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θορύβου με αντίστοιχη συχνότητα, βάση της ταχύτητας του συρμού. Έτσι, εάν λ είναι το μήκος κύματος της τραχύτητας που προκαλεί τη διέγερση και με μέγιστο πλάτος Z_0 , ο παραγόμενος θόρυβος θα έχει, σύμφωνα με τα παραπάνω, συχνότητα $f = V/\lambda$ και πλάτος ταλάντωσης ανάλογο του Z_0 , όπου V είναι η τραχύτητα του συρμού σε m/s. Κατά συνέπεια, καθώς το μήκος κύματος λ της τραχύτητας κυμαίνεται μεταξύ 3-450mm και οι συρμοί έχουν ταχύτητα 50-160 km/h, οι συνήθεις μετρούμενες συχνότητες είναι στη ζώνη των 100-5000 Hz. Ακόμα, η αύξηση του πλάτους της τραχύτητας με αμετάβλητο το μήκος κύματος θα οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση του θορύβου σε αυτή τη συχνότητα. Τα συνήθη πλάτη κυμαίνονται μεταξύ 0,5-50μm. Τα ίδια φυσικά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα για ταχύτητες λειτουργίας από 20 ως 350 km/h. Κατά συνέπεια, περιγράφουν όλες τις κατηγορίες τροχαίου υλικού με σιδηρούς τροχούς, από ελαφρά τροχαία συστήματα ως τρένα υψηλής ταχύτητας⁽¹¹⁾.

Σε ταχύτητες από 50-120km/h ο θόρυβος που προέρχεται από τη γραμμή και πιο ειδικά η σιδηροτροχιά και οι στρωτήρες είναι μια σημαντική συνιστώσα. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες είναι πιο σημαντική η συνεισφορά των τροχών. Τα στοιχεία του συστήματος τροχού-γραμμής έχουν διαφορετική συνεισφορά στο φάσμα συχνοτήτων. Ο τροχός παράγει θόρυβο σε συχνότητες περίπου 2000Hz-4000Hz ενώ ήδη από τα 1600Hz η συνεισφορά του είναι σημαντική. Η σιδηροτροχιά παράγει κυρίως θόρυβο σε συχνότητες περί των 1000Hz ενώ οι στρωτήρες σε συχνότητες περί των 400Hz⁽¹²⁾.

Η γραμμικότητα που περιγράφηκε, ωστόσο, δεν ισχύει πάντοτε. Αν και συμβαίνουν τα ίδια φυσικά φαινόμενα, σε έντονα αλλοιωμένες επιφάνειες η σχέση δεν είναι πια γραμμική. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό τότε είναι η μείωση ή απώλεια επαφής που παρατηρείται καθώς και το εγκάρσιο σύρσιμο του τροχού πάνω στη σιδηροτροχιά. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η κύλιση τροχών με επίπεδες επιφάνειες, στους αρμούς μεταξύ των σιδηροτροχιών ή σε έντονα αυλακωμένες σιδηροτροχιές. Στις περιπτώσεις αυτές η διέγερση δεν οφείλεται αποκλειστικά στην σχετική μετατόπιση αλλά και στην κρούση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Σε αρκετά μεγάλα πλάτη τραχύτητας η επαφή μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς εξαφανίζεται και λόγω της κρούσης τα παραγόμενα επίπεδα θορύβου είναι σημαντικά αυξημένα. Παρ' όλα αυτά

και ο θόρυβος που παράγεται από την κρούση αντιμετωπίζεται σε γενικές γραμμές με τον ίδιο τρόπο.

Παρακάτω εξετάζονται μερικές παράμετροι που συσχετίζονται με το θόρυβο κυλίσεως.

2.1.1. Τραχύτητα

Η τραχύτητα τροχού και σιδηροτροχιάς στα σημεία επαφής τους κατά την κύλιση αποτελούν μια κύρια παράμετρο επιρροής για το θόρυβο κύλισης. Για το λόγο αυτό η ανεύρεση τεχνικών μείωσης της τραχύτητας αποτελεί υψηλή προτεραιότητα στις προσπάθειες που γίνονται πανευρωπαϊκά για τη μείωση του θορύβου.

Η τραχύτητα του τροχού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του συστήματος πεδήσεως που χρησιμοποιείται από τους συρμούς. Σε μεγάλο βαθμό η τραχύτητα των τροχών οφείλεται στο σύστημα πέδησης. Πιο συγκεκριμένα, αν αποτελείται από σιαγόνες πέδης από χυτοσίδηρο, αυτές επενεργούν στην επιφάνεια κύλισης των τροχών δημιουργώντας την εν λόγω τραχύτητα. Η προσπάθεια που καταβάλει η Ε.Ε. είναι η σταδιακή αντικατάσταση αυτών των συστημάτων από συστήματα με σιαγόνες με συνθετικά υλικά ή με δισκόφρενα, τα οποία παράγουν σε μικρότερο βαθμό τραχύτητα σε σχέση με το προαναφερθέν σύστημα. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η μείωση της τραχύτητας του τροχού με εντατική συντήρηση του τροχού.

Η διέλευση ενός τροχού με ελαττώματα (επιπεδότητες, αυλακώσεις) φθείρει τη γραμμή και αυξάνει την τραχύτητά της. Η τραχύτητα αυτή αντιμετωπίζεται κατά την προγραμματισμένη συντήρησης της γραμμής. Η τόννιση της γραμμής μειώνει το θόρυβο κατά την κύλιση κυρίως στις χαμηλές συχνότητες.

Μερικές μέθοδοι πρόβλεψης λαμβάνουν υπ' όψη την τραχύτητα της γραμμής, χαρακτηρίζοντας την σύμφωνα με κάποιες οριακές τιμές και προτείνοντας αντίστοιχες διορθώσεις για κάθε χαρακτηρισμό. Επιπλέον, προτείνουν μια τιμή ως διόρθωση της στάθμης θορύβου όταν η γραμμή δεν είναι συνεχώς συγκολλημένη αλλά με αρμούς.

2.1.2. Η επιρροή του σημείου επαφής

Η επιφάνεια του τροχού είναι η παράπλευρη επιφάνεια ενός κόλουρου κώνου, ενώ της σιδηροτροχιάς είναι πιο σύνθετη και προκύπτει από διάφορες καμπύλες επιφάνειες. Η επαφή τους δεν είναι σε σημείο λόγω της παραμόρφωσής τους, αλλά ελλειπτική επιφάνεια με μήκος που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10mm. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξαρτώνται από το φορτίο του τροχού αλλά και τη μορφή του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Η επαφή αυτή έχει σημαντική επιρροή στην παραγωγή θορύβου κύλισης. Όταν τα μήκη κύματος της τραχύτητας είναι μικρά σε σχέση με το μήκος της επαφής, το φαινόμενο είναι μειωμένο καθώς ο τροχός “αντιλαμβάνεται” μέρος μόνο της τραχύτητας. Αυτό μπορεί να καθοριστεί με στατιστική ανάλυση των διαστάσεων της επιφάνειας επαφής. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα που αναλύουν την επιρροή της επιφάνειας επαφής είναι τα μοντέλα Remington filter και D.P.R.S.(Distributed Point Reacting Spring)⁽¹³⁾.

2.2. Θόρυβος κατά την κύλιση σε καμπύλα τμήματα γραμμής ή γέφυρες.

Ο συριγμός που ακούγεται κατά τη διέλευση του συρμού από καμπύλα τμήματα της γραμμής αλλά και οι μηχανισμοί που τον προκαλούν έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο μόνο σε ορισμένα τμήματα της γραμμής και τα αίτια που το προκαλούν είναι ακόμα προς διερεύνηση. Ενδεχόμενα αυτός να είναι και ο λόγος που ο θόρυβος αυτός δεν υπολογίζεται στις αντίστοιχες μεθόδους πρόβλεψης. Κατά τη διέλευση του συρμού από τα καμπύλα τμήματα η φορά κύλισης δεν ταυτίζεται με την τροχιά της γραμμής. Το χαρακτηριστικό στρίγκλισμα που ακούγεται, εκπέμπεται από τους τροχούς και οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς διέγερσης:

- Το πλευρικό σύρσιμο του τροχού στην κορυφή της σιδηροτροχιάς
- Το κατά μήκος γλίστρημα του εσωτερικού στην καμπύλη τροχού σε σχέση με τον εξωτερικό λόγω του συμπαγούς άξονα που ενώνει του τροχούς
- Το τρίψιμο του νυχιού του τροχού στη σιδηροτροχιά

Από τους τρεις αυτούς μηχανισμούς πιο σημαντικός είναι ο πρώτος. Φαίνεται ότι το διαμήκες γλίστρημα του συρμού αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά με τη χρήση τροχών με ανεξάρτητη ανάρτηση και το τρίψιμο του νυχιού με κατάλληλες συσκευές που λιπαίνουν την εν λόγω περιοχή. Η ίδια λύση δεν έχει την ίδια αποτελεσματικότητα και για τον πρώτο μηχανισμό. Πρόσφατα έρευνες έδειξαν ότι μια κίνηση προς τη σωστή κατεύθυνση είναι η αναζήτηση της λύσης με επανασχεδιασμό του προφίλ του τροχού⁽¹⁴⁾.

Επίσης, σημαντική είναι η αύξηση του θορύβου που παράγεται κατά τη διέλευση του συρμού από γέφυρες. Η αύξηση του θορύβου οφείλεται στα φαινόμενα συντονισμού κατά τη διάδοση των ταλαντώσεων από το συρμό στα δομικά χαρακτηριστικά της γέφυρας. Η αύξηση του θορύβου αφορά κυρίως τις χαμηλότερες συχνότητες του φάσματος. Η αύξηση εξαρτάται από τον τύπο της γέφυρας και της γραμμής. Μεγαλύτερη είναι σε μεταλλικές γέφυρες και μπορεί να φτάσει τα 15dB(A). Η μέριμνα που μπορεί να ληφθεί για να μειωθεί αυτό το φαινόμενο είναι η χρήση υλικών στην επιδομή της γραμμής που να απομονώνουν την διάδοση των ταλαντώσεων όπως π.χ. έρμα. Επίσης, μπορεί να αντιμετωπιστεί με το σχεδιασμό της γέφυρας με τρόπο που η ιδιοσυχνότητά της να μακριά από τις συχνότητες των ταλαντώσεων που προκαλεί ο συρμός για να μειωθούν τα φαινόμενα συντονισμού. Στις περισσότερες μεθόδους υπολογισμού προτείνεται διόρθωση της στάθμης θορύβου, βάση του τύπου της γέφυρας⁽¹²⁾.

2.3. Θόρυβος λόγω διάδοσης κραδασμών στη γραμμή και στο τροχαίο υλικό

Τα υλικά της γραμμής και του τροχαίου υλικού εξαναγκάζονται σε ταλαντώσεις υπό τη μορφή κραδασμών οι οποίοι κατά τη διάδοσή τους στα υλικά εξασθενούν. Η μείωση αυτή, σχετίζεται με τους ρυθμούς εξασθένησης τόσο κατά την εγκάρσια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, επηρεάζοντας την δυνατότητα εκπομπής θορύβου από τη γραμμή και το συρμό.

2.3.1. Γραμμή

Οι ρυθμοί εξασθένησης έχουν επίπτωση στο ενεργό μήκος εκπομπής της γραμμής. Ποικίλουν με τη συχνότητα ταλάντωσης και εξαρτώνται από την ακαμψία των σιδηροδρομικών επιθεμάτων και τους παράγοντες απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης των υπόλοιπων υλικών της γραμμής. Η ρυθμοί αυτοί είναι μεγαλύτεροι στις χαμηλότερες συχνότητες. Αν και υπάρχουν μοντέλα που μπορούν να υπολογίσουν τους ρυθμούς αυτούς, συνήθως αυτό γίνεται με μετρήσεις καθώς είναι πιο ακριβείς.

Ο θόρυβος που παράγει η γραμμή εξαρτάται και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων της γραμμής. Πιο συγκεκριμένα από το πλάτος του πέλματος, το τρόπο πρόσδεσης της γραμμής, το βάρος της πλάκας έδρασης, την κατακόρυφη και την εγκάρσια αδράνεια της σιδηροτροχιάς, τη μάζα της. Ρόλο παίζει ακόμα ο τύπος του στρωτήρα και σχετίζεται με τη μάζα του και την επιφάνειά του. Μικρότεροι και βαρύτεροι στρωτήρες μειώνουν το θόρυβο από τη γραμμή. Οι νεώτερες μέθοδοι πρόβλεψης κατηγοριοποιούν την γραμμή βάση κάνοντας ποιοτικό χαρακτηρισμό των στοιχείων της γραμμής και δίνουν τιμή διόρθωσης για κάθε κατηγορία.

2.3.2. Τροχαίο υλικό

Κατά την κίνηση του συρμού κάποια δομικά του στοιχεία ταλαντώνονται με άμεση συνέπεια την παραγωγή θορύβου. Η διέγερση αυτή σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα αλλά και με το ποια στοιχεία του συρμού συμμετέχουν στην παραγωγή θορύβου. Οι τροχοί είναι τα στοιχεία του συρμού που παράγουν τον περισσότερο θόρυβο καθώς είναι αυτοί που έρχονται σε επαφή με τη σιδηροτροχιά. Συνεπώς μια πολύ σημαντική παράμετρος για τις εκπομπές θορύβου είναι ο αριθμός των τροχών του συρμού. Αντίθετα, η συνεισφορά των υπόλοιπων μερών του σιδηροδρομικού οχήματος είναι αμελητέα.

Όσον αφορά τους τροχούς, ο θόρυβος που εκπέμπουν εξαρτάται από τα γεωμετρικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δομικών του στοιχείων. Ο τροχός ταλαντώνεται κατά τη διεύθυνση του άξονα, αλλά και ακτινικά. Ένας τροχός μεγαλύτερης διαμέτρου έχει αφενός μικρότερη ακαμψία, αφετέρου μεγαλύτερη επιφάνεια εκπομπής. Ο θόρυβος προκαλείται συνήθως κυρίως από την ταλάντωση κατά τη διεύθυνση του άξονα κατά ποσοστό κοντά στο 75%. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του τροχού καθορίζουν τις κύριες συχνότητες του εκπεμπόμενου

θορύβου. Τα χαρακτηριστικά του τροχού δεν λαμβάνονται υπ' όψη στις μεθόδους θορύβου που εξετάστηκαν.

2.4. Θόρυβος κατά την πέδη

Η εκπεμπόμενη στάθμη θορύβου εξαρτάται από το σύστημα πέδησης που χρησιμοποιείται. Τα συστήματα με σιαγώνες πέδης που επενεργούν πάνω στην επιφάνεια κυλίσεως είναι γενικά ποιο θορυβώδη από τα συστήματα με δισκόφρενα. Μερικές μέθοδοι πρόβλεψης κάνουν ξεχωριστό υπολογισμό για συρμούς που πεδίζουν.

2.5. Θόρυβος έλξης

Με την έννοια θόρυβο έλξης περιγράφεται κάθε θόρυβος από τη μηχανή είτε αυτή κινείται με diesel είτε με ηλεκτρική ενέργεια καθώς και από άλλα συστήματα του συρμού όπως φανοί ψύξεως, μετασχηματιστές, γεννήτριες, θυρίστορες, υπερσυμπιεστές και κιβώτια ταχυτήτων. Θόρυβο παράγουν ακόμα, όταν υπάρχουν, οι εισαγωγές αέρα και οι εξοδοί καυσαερίων.

Ο θόρυβος της έλξης δεν εξαρτάται από την ταχύτητα αλλά από τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής. Είναι η σημαντικότερη συνιστώσα όταν ο συρμός βρίσκεται σε ακινησία, όταν βρίσκεται σε φάση επιτάχυνσης ή όταν κινείται σε ανωφέρεια. Ο λόγος που δεν σχετίζεται με την ταχύτητα είναι ότι εξαρτάται από ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και των φανών ψύξεως που σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας διατηρούνται χαμηλά και δεν έχουν άμεση εξάρτηση από την ταχύτητα. Όταν μία μηχανή λειτουργεί σε στάση η πηγή του θορύβου είναι τα βοηθητικά συστήματα της μηχανής.

Ο θόρυβος έλξεως εξαρτάται από:

- Από την ισχύ της μηχανής
- Την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής
- Τον τύπο της μηχανής (με παλινδρομικούς ή περιστροφικούς υπερσυμπιεστές)
- Εφ' όσον υπάρχει τη μηχανική ισχύ του κιβωτίου μετάδοσης
- Τις στροφές ανά λεπτό που λειτουργεί η γεννήτρια
- Τον τύπο και την ταχύτητα περιστροφής των φανών ψύξεως
- Το σχεδιασμό των εισαγωγών ψύξεως
- Την αποδοτικότητα του σιλανσιέ της εξόδου καυσαερίων

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η θέση της πηγής του θορύβου κατά την έλξη ποικίλει και εξαρτάται το ποσοστό συμμετοχής των παραπάνω στην παραγωγή θορύβου. Ο θόρυβος της είναι εφικτό να υπολογιστεί. Στις μεθόδους υπολογισμού σιδηροδρομικού θορύβου συνήθως οι συρμοί χωρίζονται σε κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές λαμβάνουν υπ' όψη το θόρυβο έλξης των συρμών κατά τον υπολογισμό της ηχητικής στάθμης που χρησιμοποιείται σαν βάση για κάθε κατηγορία⁽¹²⁾.

2.6. Αεροδυναμικός θόρυβος

Ο θόρυβος που προκαλείται από την τυρβώδη ροή του αέρα γύρω από το σώμα του συρμού χαρακτηρίζεται ως αεροδυναμικός θόρυβος. Η έρευνα σε αυτό το πεδίο εξελίσσεται τα τελευταία 10 χρόνια κυρίως μέσω του προγράμματος που διεξήγαν από κοινού Γερμανία και Γαλλία με το όνομα Deufaco. Ο αέρας στην περίπτωση αυτή εκτός από μέσο διάδοσης του θορύβου είναι και αυτός που ταλαντώνεται παράγοντας θόρυβο. Αυτό δημιουργεί κάποια επιπλέον δυσκολία στην παρακολούθηση του φαινομένου και κατά συνέπεια ο καθορισμός των πηγών στην περίπτωση αυτή απαιτεί επιπλέον προσοχή.

Δύο φαινόμενα που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι:

- ❑ Το φαινόμενο Doppler το οποίο λαμβάνει χώρα σε κινούμενες ηχητικές πηγές, είναι πιο έντονο στις υψηλές ταχύτητες και επηρεάζει τη συχνότητα και το πλάτος του εκπεμπόμενου ηχητικού κύματος.
- ❑ Το οριακό στρώμα τυρβώδους ροής που βρίσκεται γύρω από το συρμό καθώς και η επίδραση του εδάφους κάτω από το συρμό. Τα στοιχεία αυτά επενεργούν στον τρόπο εκπομπής του θορύβου και κατά συνέπεια επηρεάζουν την κατευθυντικότητα της πηγής.

Οι έρευνες έχουν καταδείξει δύο σημεία από τα οποία προέρχεται κυρίως ο αεροδυναμικός θόρυβος. Την περιοχή του φορείου και τον παντογράφο με τα υπόλοιπα εξαρτήματα που τον αποτελούν. Λιγότερο σημαντικές πηγές είναι τα κενά μεταξύ των βαγονιών, η κεραία στην οροφή, η περιοχή της πόρτας, το ρύγχος του κινητήριου οχήματος και οι γρίλιες εξαερισμού⁽²⁾. Οι μέθοδοι πρόβλεψης κατηγοριοποιούν τα σιδηροδρομικά οχήματα κάνοντας ποιοτική εκτίμηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών τους.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος σε αυτήν την περίπτωση συσχετίζεται με την μείωση του αεροδυναμικού συντελεστή και έτσι συχνά χρησιμοποιούνται τα ίδια μέσα για την αποτίμησή του.

2.7. Μαθηματικά μοντέλα

Οι μηχανισμοί παραγωγής θορύβου περιγράφονται με μαθηματικά μοντέλα. Πολλά από αυτά περιλαμβάνονται ως θεωρητική βάση σε προγράμματα λογισμικού που μπορούν να εκτιμήσουν την ηχητική συμπεριφορά επί μέρους τμημάτων της γραμμής και του τροχαίου υλικού. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από αυτά.

2.7.1. Προγράμματα εκτίμησης θορύβου κατά την κύλιση

Τη δεκαετία του '90 επιτροπή του οργανισμού ERRI με την επωνυμία C163, μελέτησε τους μηχανισμούς παραγωγής θορύβου και ανέλαβε το έργο της ανάπτυξης ενός εργαλείου πρόβλεψης του θορύβου από τους μηχανισμούς αυτούς. Το εργαλείο αυτό σήμερα είναι ευρέως γνωστό ως TWINS (Track Wheel Interaction Noise Software). Οι πρώτες προσπάθειες πάνω σε αυτό το λογισμικό δημοσιεύτηκαν από τον Remington το 1987. Οι δυνατότητές του, δε, τεκμηριώθηκαν από σειρά άρθρων από τους Thompson και Jones το 2000. Οι εργασίες των ερευνητικών προγραμμάτων Silent Track και Silent Freight, που διεξήχθησαν πρόσφατα, συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη του εν λόγω λογισμικού με νέους αλγορίθμους ενώ παράλληλα έγινε και έλεγχος της εγκυρότητάς του. Σήμερα είναι διαθέσιμη η 3^η έκδοση του TWINS και διατίθεται από τον οργανισμό ERRI.

Παράλληλα, και ενώ το TWINS δεν ήταν ακόμα διαθέσιμο, ο γερμανικός οργανισμός σιδηροδρόμων DB, ανέπτυξε σε συνεργασία με την εταιρία Müller-BBM, αριθμητικά εργαλεία για να υποστηρίξει τα υπάρχοντα σχέδια περιορισμού του θορύβου. Τα μοντέλα αυτά στηρίζονται στα μοντέλα του Remington και έχουν λάβει υπ' όψη τις εργασίες της επιτροπής C163. Το σύνολο των μοντέλων αυτών ονομάστηκαν RIM. Μέχρι τώρα τα μοντέλα έχουν εξελιχθεί ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη δονήσεων στο έδαφος. Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι επιτρέπει την εισαγωγή πολλών παραμέτρων στον υπολογισμό και έτσι μπορεί να διερευνηθεί η ακουστική συμπεριφορά για πολλά διαφορετικά προφίλ της γραμμής και του τροχού.

Τα παραπάνω μοντέλα υπολογίζουν το θόρυβο κύλισης από τον τροχό και τη σιδηροτροχιά αφού εισαχθούν σε αυτά κατάλληλα δεδομένα (Εικόνα 2.5). Το μεγάλο πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι επιτρέπουν με την προσομοίωση τον διαχωρισμό της συνεισφοράς της κάθε πηγής θορύβου. Ποιο συγκεκριμένα εισάγονται δεδομένα για τον τροχό και τη σιδηροτροχιά και για την τραχύτητα όπως έχουν προκύψει από κατάλληλες μετρήσεις, υπολογίζεται το φάσμα της τραχύτητας και η επιρροή του σημείου επαφής και εκτιμάται η στάθμη ηχητικής πίεσης.

Η τραχύτητα των επιφανειών επαφής τροχού και σιδηροτροχιάς συνιστούν το αίτιο διέγερσης. Η σιδηροτροχιά περιγράφεται σαν γραμμικό στοιχείο με συνεχή θεμελίωση, ικανό να εκτελεί μη συσχετιζόμενες ταλαντώσεις κατά την κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση. Τα ελαστικά στοιχεία της επιδομής λαμβάνονται υπ' όψη υπολογίζοντας την ακαμψία τους, η οποία περιλαμβάνει και την έννοια της απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης. Ο τροχός είναι η μόνη ουσιαστική πηγή θορύβου στο όχημα και η εκτίμηση της συνεισφοράς του γίνεται με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Για τα δύο μοντέλα του θορύβου κυλίσεως έχει γίνει έλεγχος της εγκυρότητάς τους. Το TWINS έχει ελεγχθεί για εμπορευματικούς και επιβατικούς συρμούς σε διαφορετικούς τύπους γραμμής με έρμα και για ταχύτητες από 60-350km/h. Το RIM έχει ελεγχθεί για γραμμές με έρμα και επιβατικούς συρμούς. Ακόμα έχει ελεγχθεί η ηχητική επίδοση σε εγκιβωτισμένες σιδηροτροχιές. Στην Εικόνα 2.6 συγκρίνεται η

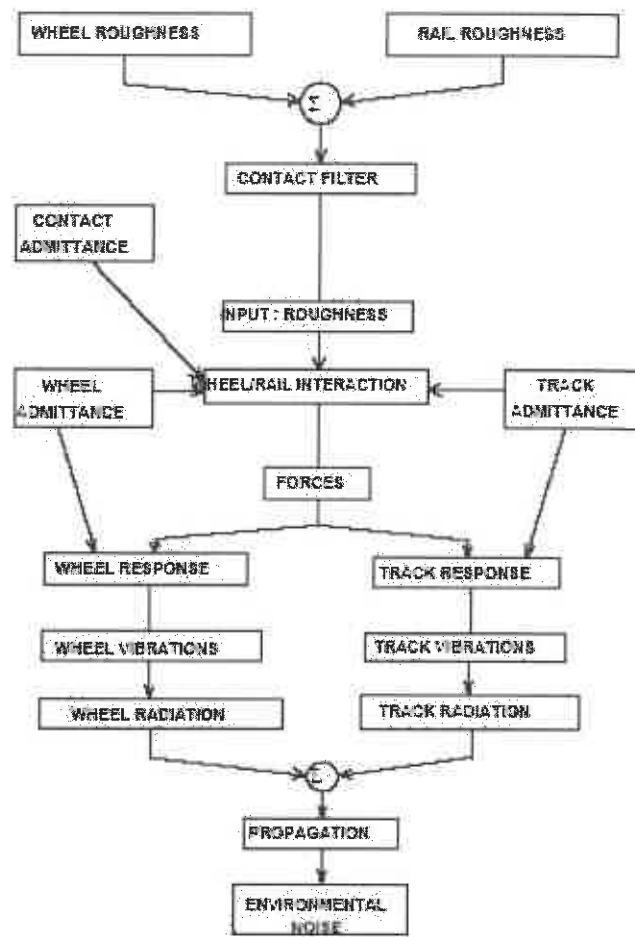
στάθμη ηχητικής πίεσης σε απόσταση 25m όπως προκύπτει από την προσομοίωση με τα μοντέλα TWINS και RIM, καθώς και με μετρήσεις συρμού κινούμενου με 160km/h. Αυτό που προκύπτει από τη σύγκριση είναι ότι με εξαίρεση τις χαμηλές συχνότητες (<350Hz) η προσομοίωση με τα δύο μοντέλα υπερεκτιμά την στάθμη ηχητικής πίεσης κατά 2-3dB(A) κατά μέσο όρο. Η μέγιστες αποκλίσεις προκύπτουν για τις συχνότητες κοντά στα 1500Hz όπου η απόκλιση φτάνει τα 5-6dB(A). Σε συχνότητες μικρότερες των 350Hz η προσομοίωση δίνει χαμηλότερες τιμές κατά 3-4dB(A). Σε κάθε περίπτωση φαίνεται ότι το TWINS έχει καλύτερες επιδόσεις από το RIM.

2.7.2. Προγράμματα εκτίμησης αεροδυναμικού θορύβου

Το μοντέλο CAA (Computational AeroAcoustics) είναι ένα εργαλείο για να γίνει η ερμηνεία των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός οχήματος για να εκτιμήσει τον παραγόμενο θόρυβο και μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη εξελίχθηκε στα πλαίσια της έρευνας υπό την ονομασία ATREBAT με συνεργασία της SNCF και της ALSTOM. Η προσέγγιση αυτή συνίσταται στην ανάλυση των εξισώσεων Navier-Stokes που επιτρέπει τον προσδιορισμό της αεροδυναμικής αλλά και ακουστικής συμπεριφοράς του συρμού μαζί. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η μέθοδος LES (Large Eddy Simulation) και εξελίχθηκε στα πλαίσια έρευνας SAMBA από την SNCF. Υπολογίζει μόνο τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του συρμού και συνίσταται στο διαχωρισμό της τυρβώδους ροής σε διαφορετικά επίπεδα. Τα ανώτερα επίπεδα της τυρβώδους ροής που εκλύουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και κατά συνέπεια παράγουν περισσότερο θόρυβο αναλύονται διεξοδικά ενώ για τα υπόλοιπα επίπεδα που δεν περιλαμβάνονται σε αυτούς τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται κατάλληλα μοντέλα για να υπολογιστεί η συνεισφορά των μικρότερων δινών. Τα ακουστικά χαρακτηριστικά του συρμού υπολογίζονται από τα αποτελέσματα της μεθόδου LES με τη χρήση των γραμμικοποιημένων εξισώσεων του Euler. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων αυτών με μετρήσεις στο πεδίο έδειξε μια κάποια συσχέτιση, όμως στον χώρο αυτό υπάρχει πολύς χώρος για περαιτέρω έρευνα.

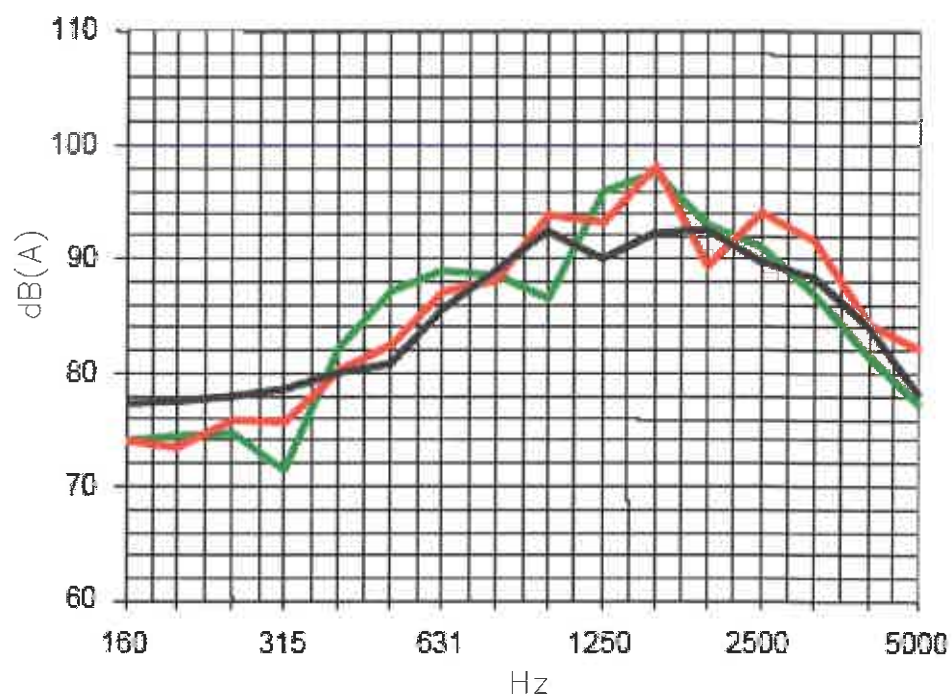
Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή που χρησιμοποιεί ο γερμανικός οργανισμός σιδηροδρόμων (DB-AG), με ημιεμπειρικές μεθόδους για τον υπολογισμό του παραγόμενου θορύβου από τον παντογράφο. Στην περίπτωση αυτή το σώμα αναλύεται σε απλά κυλινδρικά σχήματα που έχουν γνωστή συμπεριφορά σε διαφορετικές συνθήκες ροής. Κατάλληλο λογισμικό ενημερώνεται από μια τράπεζα δεδομένων που περιέχει τιμές των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών όπως έχουν προκύψει σε πειράματα για τα σχήματα αυτά. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η εκπεμπόμενη ηχητική στάθμη κάθε τέτοιου σχήματος καθώς και η κύρια συχνότητα εκπομπής. Επιπλέον λαμβάνεται υπ' όψη η ένταση της τυρβώδους ροής, ο τρόπος που κλείνει το πίσω μέρος της κατασκευής (ανοιχτό, στρογγυλεμένο κτλ.) καθώς και η τραχύτητα της επιφανείας της.

Τέλος ο παραγόμενος αεροδυναμικός θόρυβος μπορεί να προσδιοριστεί και με κατάλληλες μετρήσεις πάνω στον κινούμενο συρμό (COP technique). Η τεχνική αυτή κάνει την παραδοχή ότι οι ηχητικές πηγές δεν συσχετίζονται. Για τις πιο σημαντικές πηγές με επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτει ένα φάσμα που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του μοντέλου. Στόχος των μοντέλων αυτών είναι να δίνουν φάσματα σε τριτοκτάβες που να είναι παρόμοια με αυτά που προκύπτουν από πειράματα⁽²⁾.



Εικόνα 2.5

Οργανόγραμμα λειτουργίας των προγραμμάτων TWINS και RIM.(Πηγή 12)



Εικόνα 2.6

Σύγκριση φασμάτων τριτοκτάβας θορύβου όπως προκύπτουν από μέτρηση και όπως εκτιμώνται από τα προγράμματα TWINS και RIM. Οι μετρήσεις έγιναν σε συρμό κινούμενο με 160km/h σε γραμμή με έρμα και διμερείς στρωτήρες. Με κόκκινο σημειώνεται η καμπύλη όπως προέκυψε από το TWINS, η πράσινη από το RIM και η μαύρη από τη μέτρηση. (Πηγή 12)

3. Μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου στο σιδηρόδρομο

Τα προηγούμενα προγράμματα περιλαμβάνουν μοντέλα για την πηγή και βρίσκουν εφαρμογή στη διερεύνηση των πηγών στο σύστημα συρμός – γραμμή. Για την πρόβλεψη του θορύβου σε μια περιοχή χρησιμοποιούνται μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου που έχουν αναπτύξει ορισμένες χώρες. Οι μέθοδοι ακολουθούν κάποιες αρχές:

- a. κατατάσσουν την πηγή σε κατηγορία της τράπεζας δεδομένων τους,
- b. χρησιμοποιούν ένα μοντέλο για της πηγή και
- c. ένα μοντέλο διάδοσης του θορύβου από τη θέση της πηγής στη θέση του δέκτη.

Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν σαφώς απλοποιημένα μοντέλα για τις πηγές σε σχέση με τα προγράμματα που αναφέρθηκαν (TWINS, RIM, κτλ) και μοντέλα διάδοσης για υπολογισμό της επιρροής διαφόρων παραμέτρων κατά τη διάδοση του θορύβου. Κατά κανόνα τα επίπεδα θορύβου σε μια περιοχή μετρώνται έμμεσα με τις μεθόδους αυτές, καθώς οι θέσεις μέτρησης είναι τόσες που δεν επιτρέπουν τις επί τόπου μετρήσεις παρά μόνο δειγματοληπτικά. Κατά τη χρήση μιας τέτοιας μεθόδου, χρησιμοποιούνται τράπεζες δεδομένων τιμών για τις ηχητικές στάθμες αναφοράς για τους συρμούς και τον καθορισμό βασικών σχέσεων.

Οι μέθοδοι αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη σχεδίαση χαρτών θορύβου. Αν και υπάρχουν πολλά κοινά σημεία σε αυτές τις μεθόδους, τελικά κατά κανόνα κάθε μέθοδος έχει τη δικιά της προσέγγιση πράγμα που οφείλεται αφ' ενός στη γνώση που υπήρχε όταν φτιάχτηκε και αφετέρου στις ιδιαιτερότητες κάθε χώρας. Δυστυχώς, δεν υπάρχει μια κοινή τράπεζα δεδομένων για όλη την Ευρώπη και τα δεδομένα που υπάρχουν σε αυτές τις τράπεζες που χρησιμοποιεί κάθε μέθοδος, δεν έχουν ληφθεί με τρόπο που να εξασφαλίζει τα αποτελέσματα να είναι μεταφέρσιμα και συγκρίσιμα.

3.1. Το γενικό μοντέλο των μεθόδων πρόβλεψης σιδηροδρομικού θορύβου

Σε όλες τις μεθόδους γίνεται η διάκριση μιας ηχητικής πηγής, ενός δέκτη και ενός μηχανισμού διάδοσης του θορύβου στον αέρα. Η ηχητική στάθμη στο δέκτη είναι αυτή που προκύπτει από την πηγή μετά την μειωτική επίδραση διάφορων συντελεστών διάδοσης.

$$L_p = L_w + \sum \Delta_{\text{συντελεστές διάδοσης}}$$

όπου L_p , η στάθμη θορύβου στη θέση της πηγής,

L_w , η στάθμη θορύβου στη θέση της πηγής

$\sum \Delta_{\text{συντελεστές διάδοσης}}$, το σύνολο των συντελεστών που οδηγούν σε εξασθένηση ή διόρθωση κατά τη διάδοση.

Άρα οι υπολογισμοί σε μια μέθοδο πρόβλεψης, γίνονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο υπολογίζεται η ηχητική στάθμη στη θέση της πηγής (L_w) ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών της γραμμής, του συρμού και των συνθηκών λειτουργίας του. Στο δεύτερο βήμα υπολογίζονται οι διορθωτικοί συντελεστές βάση των συνθηκών της διάδοσης.

3.1.1. Στάθμη θορύβου της πηγής

Η στάθμη θορύβου στη θέση της πηγής υπολογίζεται με διαδοχικές διορθώσεις επί των σταθμών θορύβου των οχημάτων που συνθέτουν την κυκλοφορία. Το υπό εξέταση τμήμα χωρίζεται στις περισσότερες μεθόδους σε τομείς. Τα κριτήρια διαίρεσης διαφέρουν από μέθοδο, κοινή συνισταμένη ωστόσο είναι η προσπάθεια για τομείς με κοινά χαρακτηριστικά διάδοσης, γραμμής και διερχόμενης κυκλοφορίας. Η συνεισφορά ενός τομέα υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω μεθοδολογία.

$$L_w = L'_{w,\text{συρμών}} + C_{DI}$$

$$L'_{w,\text{συρμών}} = L_{w,\text{μονάδας συρμού}} + \text{διόρθωση} + f(Q)$$

$$L_{w,\text{μονάδας συρμού}} + \text{διορθώσεις γραμμής} = L_{w,\text{μονάδας συρμού}} + C_{\text{επιδομής}} + C_{\text{κατασκευών}} + C_{\text{διάφορα}}$$

$$L_{w,\text{μονάδας συρμού}} = E_{\text{αναφ.}} + C_{\text{ταχύτητας}}$$

$E_{\text{αναφ.}}$

Η ηχητική στάθμη αναφοράς του σιδηροδρομικού οχήματος. Τα σιδηροδρομικά οχήματα που εξετάζονται πρέπει να ενταχθούν σε κάποια κατηγορία της βάσεως δεδομένων της μεθόδου. Κάθε κατηγορία έχει μια ηχητική στάθμη αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί στη

στάθμη θορύβου που εκπέμπει το όχημα για μια ορισμένη ταχύτητα αναφοράς, σε συγκεκριμένη απόσταση, κινούμενο με σταθερή ταχύτητα σε γραμμή με καθορισμένα χαρακτηριστικά κατασκευής και χάραξης.

$C_{ταχ\acute{\upsilon}τητα}$:

Διόρθωση για την ταχύτητα που κινούνται τα σιδηροδρομικά οχήματα.

$C_{επιδομ\acute{\eta}ς}$, $C_{κατασκευ\acute{\alpha}ν}$, $C_{διάφορα}$:

Διορθώσεις που οφείλονται σε στοιχεία της γραμμής. Τέτοια είναι ο τύπος της γραμμής, καμπύλα τμήματα, καθώς και κατασκευές όπως γέφυρες, σήραγγες, διασταυρώσεις ή αλλαγές. Μερικά μοντέλα περιλαμβάνουν και διορθώσεις για τις περιπτώσεις που οι εξεταζόμενοι συρμοί πεδίζουν ή επιταχύνουν.

Q :

Ο κυκλοφοριακός φόρτος των εξεταζόμενων οχημάτων που διέρχονται από το συγκεκριμένο τμήμα γραμμής.

$C_{δι}$:

Διόρθωση λόγω της κατευθυντικότητας της πηγής. Ο θόρυβος που προέρχεται από ένα σιδηροδρομικό όχημα αποκλίνει πολύ από αυτόν που παράγεται από μια σημειακή, γραμμική ή επίπεδη πηγή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μοντέλα εκπομπής της πηγής που προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τον τρόπο εκπομπής. Κατά κανόνα ορίζεται από στοιχεία του τομέα όπως το μήκος του ή η θέση του σε σχέση με τη θέση του δέκτη.

3.1.2. Διορθωτικοί συντελεστές διάδοσης

Η συνεισφορά κάθε τομέα σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και τη θέση του σε σχέση με το δέκτη. Βάση αυτών υπολογίζεται η διαδρομή της τροχιάς διάδοσης του θορύβου, βάση της οποίας υπολογίζονται οι διάφοροι διορθωτικοί συντελεστές.

Τέτοιοι συντελεστές διάδοσης που μπορεί να υπεισέρχονται στα μοντέλα διάδοσης είναι:

- $\Delta_{γεω}$. η εξασθένιση ως αποτέλεσμα της γεωμετρικής διασποράς
- $\Delta_{αερ}$. η εξασθένιση ως αποτέλεσμα της απορρόφησης από τον αέρα
- $\Delta_{εδαφ}$. η εξασθένιση λόγω της απορρόφησης από το έδαφος
- $\Delta_{ηχοπετ}$. η επιρροή ηχοπετάσματος
- $\Delta_{ανακλ}$. η συνεισφορά των ανακλάσεων στη στάθμη θορύβου
- $\Delta_{καιρ}$. η διόρθωση λόγω καιρικών συνθηκών

3.2. Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων πρόβλεψης θορύβου.

Μερικές από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους πρόβλεψης θορύβου από το σιδηρόδρομο είναι οι παρακάτω:

- Αυστρία – Önorm S5011/ÖAL28
- Δανία – Beregning af støj fra jernbaner
- Γαλλία – Guide du bruit
- Γαλλία – Mitra-Fer
- Γερμανία – Schall 03
- Ολλανδία – SRMII
- Νορβηγία / Σουηδία – Nordic2000
- Ελβετία – Semibel
- Ηνωμένο Βασίλειο – Ashdown
- Ηνωμένο Βασίλειο – Department of Transport

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις παραμέτρους που μπορούν να εισαχθούν σε αυτές τις μεθόδους. Αφορούν διορθώσεις που σχετίζονται με την πηγή και με τη διάδοση.

	Διόρθωση λόγω ταχύτητας;	Διόρθωση λόγω τύπου γραμμής	Διόρθωση λόγω διέλευσης από γέφυρα	Κατευθυντικότητα (οριζ. επίπεδο)	Κατευθυντικότητα (κατακ. επίπεδο)		Διόρθωση λόγω γεωμετρικής διασποράς	Διόρθωση λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης	Διόρθωση λόγω επιρροής του ανέμου	Διόρθωση λόγω εμπόδων	Διόρθωση λόγω ανακλάσεων	Διόρθωση λόγω καιρικών συνθηκών
Αυστρία-Önorm	•		•	•	•	διορθώσεις διάδοσης	$10\log(4\pi r^2)$	•	•	•	υπολογισμός	
Δανία-Beregning..	•	•					$10\log(d/10)$		•	•	•	
Γαλλία-Guide du bruit	•		•		•		$K\log(d/25)$		•	•		
Γαλλία-Mitra	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		$10\log(4\pi r^2)$	•	•	•	υπολογισμός	
Γερμανία-Schall 03	•		•	•	•		$10\log(2\pi r^2)$	•	•	•	υπολογισμός	
Ολλανδία-SRM II	•	•	•	•	•		$10\log d$	•	•	•	υπολογισμός	•
Νορβηγία / Σουηδία-Nordic	•	•	•	•	• (2000)		$10\log(4\pi r^2)$	•	•	•	υπολογισμός	•
Ελβετία-Semibel	•	•	•	•	•		$10\log r$	•	•	•		
Ηνωμένο Βασίλειο-Ashdown	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		$10\log(d/25)$	•	•	•	+1,5dB(A)	
Ηνωμένο Βασίλειο-D.O.T.	•	•	•	•	•		$10\log(d/25)$	•	•	•	υπολογισμός	

Πίνακας 3.1 Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων πρόβλεψης θορύβου από το σιδηρόδρομο (πηγή15)

Σύγκριση των μεθόδων αυτών που έγινε από μηχανικούς της εταιρίας DGMR για λογαριασμό των αρμόδιων οργάνων της Ε.Ε., έδειξε ότι οι μέθοδοι πρόβλεψης που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα στην Ευρώπη, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές τόσο ως προς τα δεδομένα που απαιτούν για τον υπολογισμό, αλλά και ως προς τα αποτελέσματά τους⁽¹⁵⁾.

Μία σημαντική διαφορά των μεθόδων πρόβλεψης σχετικά με την πηγή είναι ως προς τις παραδοχές της θέσης της. Όσον αφορά το οριζόντιο επίπεδο υπάρχει μια σχετική συμφωνία ότι είναι στο μέσο μεταξύ των σιδηροτροχιών αν και κάποια μοντέλα την τοποθετούν στην κοντινότερη στην πηγή σιδηροτροχιά. Για το ύψος της πηγής, ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο. Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν ο θόρυβος του σιδηροδρόμου παράγεται από διαφορετικές πηγές. Κάποιες μέθοδοι τοποθετούν την πηγή του εκπεμπόμενου θορύβου σε ένα σημείο, σε ύψος που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος των πηγών. Οι υπόλοιπες διακρίνουν περισσότερες από μία πηγές, επιμερίζοντας την ηχητική στάθμη που εκπέμπεται σε αυτές. Κάθε τέτοια πηγή έχει διαφορετικό ύψος. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους θεωρούν ως θέση παραγωγής θορύβου κύλισης την επαφή τροχού σιδηροτροχιάς και έτσι η πηγή τοποθετείται στο ύψος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Άλλες θεωρούν ότι η πηγή βρίσκεται στο ύψος του άξονα και έτσι αυτή τοποθετείται 0,5m από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς ή λίγο ψηλότερα 0,8m απ' την κεφαλή. Όσον αφορά τον αεροδυναμικό θόρυβο ή το θόρυβο έλξης η θέση της πηγής τοποθετείται ψηλότερα, στα 4m. Η κατανομή της ηχητικής ισχύος σε αυτή την περίπτωση γίνεται βάση των συνθηκών λειτουργίας των συρμών.

Μια, ακόμα, διαφορά μεταξύ των μεθόδων πρόβλεψης θορύβου είναι ο τρόπος υπολογισμού της ηχητικής στάθμης αναφοράς της πηγής. Μερικές μέθοδοι υπολογίζουν την στάθμη θορύβου σε ευρύ φάσμα, ενώ άλλες υπολογίζουν την ηχητική ισχύ της πηγής ανά οκτάβες ή τριτοκτάβες συχνοτήτων. Η ανάλυση σε τριτοκτάβες συχνοτήτων είναι στοιχείο των πιο εξελιγμένων μεθόδων πρόβλεψης.

Οι ηχητικές στάθμες αναφοράς της πηγής προκύπτουν από μετρήσεις διερχόμενων συρμών που γίνονται με συγκεκριμένη μεθοδολογία σε αυστηρά καθορισμένες συνθήκες. Οι μετρήσεις όμως κάθε μεθόδου σε κάθε χώρα αφενός δεν έγιναν κατά κανόνα ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, αφετέρου η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να δίνει σημαντική διασπορά αποτελεσμάτων. Κάθε τράπεζα ηχητικών δεδομένων που προκύπτει από τις μετρήσεις αυτές, περιέχει στοιχεία για το τροχαίο υλικό που χρησιμοποιείται στη χώρα της μεθόδου. Αν και κάποιες φορές το τροχαίο υλικό που χρησιμοποιείται σε μια χώρα χρησιμοποιείται και σε κάποια άλλη, αυτό δεν είναι κανόνας. Μερικές μέθοδοι αντιμετωπίζουν το πρόβλημα ενός συρμού που δεν ανήκει στην τράπεζα δεδομένων τους, επιτρέποντας την εισαγωγή νέας κατηγορίας. Αυτό περιλαμβάνει τη διενέργεια μετρήσεων με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Όταν οι μετρήσεις αυτές γίνονται υπό ιδιαιτέρως διαφορετικές συνθήκες, η αξιοπιστία της μεθόδου δοκιμάζεται και τα σφάλματα είναι πολύ πιθανά.

Τέλος η διάδοση του θορύβου εξαρτάται από συνθήκες περιβάλλοντος όπως η ύπαρξη ηχοπετασμάτων ή η παρουσία απορροφητικού εδάφους. Ο βαθμός, όμως, και ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η συνεισφορά αυτών των παραμέτρων διαφέρει από μέθοδο σε μέθοδο.

3.3. Η προτεινόμενη ευρωπαϊκή μέθοδος υπολογισμού θορύβου

Τα τελευταία χρόνια στην Ε.Ε. γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη μιας κοινής μεθοδολογίας πρόβλεψης θορύβου. Η νέα αυτή μέθοδος είναι το ζητούμενο του προγράμματος Harmonoise. Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα πρέπει να έχει ως βασικά χαρακτηριστικά

- a. την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων
- b. τη δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων

Με το τελευταίο εννοούμε ότι μπορούμε να κάνουμε έγκυρες προβλέψεις για όλες τις θέσεις ενός σιδηροδρομικού δικτύου. Αν και η μέθοδος αυτή δεν έχει ολοκληρωθεί έχουν σκιαγραφηθεί κάποια χαρακτηριστικά της.

1. Πηγή

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί κατά τις μετρήσεις των στοιχείων της τράπεζας δεδομένων θα είναι βάση του σχεδίου προτύπου prEN ISO 3095. Το εν λόγω πρότυπο είναι εξέλιξη του προτύπου ISO 3095:1976 και αναφέρεται στη μέτρηση του θορύβου εκπομπής από σιδηροδρομικά οχήματα. Έρευνα της εταιρείας TNO, που είχε σαν στόχο τον έλεγχο της εφαρμογής του εν λόγω προτύπου, έδειξε ότι δίνει αποτελέσματα με μικρή σχετικά διασπορά ($\pm 3\text{dB(A)}$) για μετρήσεις διελεύσεων με σταθερή ταχύτητα από τα 25m, $\pm 2\text{dB(A)}$, για μετρήσεις διελεύσεων με σταθερή ταχύτητα από τα 7,5m). Η ίδια έρευνα πρότεινε ως τρόπο μείωσης αυτής της διασποράς, την αυστηρότερη περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών της γραμμής και ιδιαίτερα των σιδηροδρομικών υποθεμάτων, καθώς και των χαρακτηριστικών του εδάφους ανάμεσα σε πηγή και δέκτη.

Η ηχητική ισχύς της πηγής θα αναλύεται σε ζώνες τριτοκτάβας. Θα την επιμερίζει, δε, σε διαφορετικά ύψη. Όπως έχει αναφερθεί η συνεισφορά κάθε ηχητικής πηγής (κύλιση, έλξη, αέρας) αλλάζει σε διαφορετικές ταχύτητες. Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο τρένο η κατανομή της ηχητικής ισχύος είναι διαφορετική σε διαφορετικές ταχύτητες. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί ηχητική στάθμη αναφοράς για κάθε ταχύτητα ενός συρμού, ενώ κάτι τέτοιο θα έχει σημαντική επίπτωση στους χρόνους υπολογισμού. Πιθανόν αυτό είναι ένα θέμα προς μελλοντική διερεύνηση.

2. Διάδοση

Συνήθως τα μοντέλα διάδοσης των μεθόδων υπολογισμού χρησιμοποιούν εμπειρικές σχέσεις, όπως αυτές του προτύπου τυποποίησης ISO 9613-2. Το μοντέλο διάδοσης της νέας μεθόδου θα ακολουθεί τη λογική των πιο εξελιγμένων όπως αυτό της σκανδιναβικής μεθόδου τα οποία είναι ντετερμινιστικά. Η νέα ευρωπαϊκή μέθοδος βασίζεται εν πολλοίς στο μοντέλο διάδοσης της σκανδιναβικής και ολλανδικής μεθόδου.

3.4. Η Σκανδιναβική μέθοδος

Η πρώτη προσπάθεια για τη σύνταξη μιας τέτοιας μεθόδου έγινε το 1984 από τους Ringheim και Nielsen με το όνομα Nord84. Το 1996 εκδόθηκε μια βελτιωμένη έκδοση που αντικατέστησε την προηγούμενη, η Nord1996. Υπολογίζει σε οκτάβες, ισοδύναμες και μέγιστες στάθμες θορύβου, σταθμισμένες κατά την καμπύλη A, συνυπολογίζοντας και μετεωρολογικά δεδομένα, για μια ορισμένη χρονική περίοδο. Η μέθοδος χρησιμοποιεί διαφορετικά μοντέλα για την πηγή και τη διάδοση.

Η τελευταία έκδοση της Σκανδιναβικής μεθόδου είναι η Nord2000⁽¹⁶⁾. Πιο αναλυτικά η μέθοδος παρουσιάζεται παρακάτω.

3.4.1. Το μοντέλο της πηγής

Κάθε όχημα αντιπροσωπεύεται από τουλάχιστον τρεις σημειακές πηγές σε διαφορετικά ύψη. Η θέση αυτών των πηγών είναι στην πλευρά του πιο κοντινού στο δέκτη τροχό και οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν ξεχωριστά για κάθε διάδρομο γραμμής. Η διέλευση ενός οχήματος προσομοιάζεται ως συμβολή σημειακών πηγών που βρίσκονται στη διεύθυνση της κίνησης. Το μοντέλο της πηγής εμπεριέχει την κατακόρυφη και οριζόντια κατευθυντικότητα των πηγών. Επιπλέον, δίδεται η δυνατότητα να αντιμετωπιστούν περιπτώσεις εκπομπών θορύβου από τα ανοίγματα σηράγγων. Εμπεριέχει, τέλος, τις στάθμες θορύβου διαφορετικών συρμών σε τριτοκτάβες. Η γραμμή χωρίζεται σε τομείς με τρόπο που να προκύπτουν τμήματα γραμμής κατά το δυνατό μικρά σε μήκος με κοινά χαρακτηριστικά.

Οι συρμοί χωρίζονται σε κατηγορίες και υποκατηγορίες.

Από τη Σουηδία:

Κύρια κατηγορία	Υποκατηγορία	Όνομα Κατηγορίας
1		Συρμοί υψηλών ταχυτήτων (180 km/h)
	1a	X2000
	1b	συρμός Arlanda
	1c	συρμός Öresund (Σουηδία & Δανία)
2		Συρμοί κανονικών ταχυτήτων Inter-City
	2a	με μηχανή RC
	2b	
3		Τοπικοί και περιφερειακοί συρμοί
	3a	X10, X12 (ηλεκτροκίνηση)
	3b	Y1 (diesel)
	3c	Y2 (diesel)
4		Εμπορευματικοί συρμοί
	4a	Κανονικοί, με μηχανή RC (ηλεκτροκίνηση)
	4b	Κανονικοί, με μηχανή T44 (ηλεκτροκίνηση & diesel)
	4c	Συρμοί μεταφοράς σιδηρ/λευματος (Σουηδία & Νορβηγία)
5		Άλλοι

Από τη Νορβηγία:

Κύρια κατηγορία	Υποκατηγορία	Όνομα Κατηγορίας
1		Συρμοί υψηλών ταχυτήτων (180 km/h)
	1a	Συρμός Gardermoen, τύπος BM 71 (120-200km/h)
	1b	Τύπος BM 73, επιβατικός συρμός Signatur express, ηλεκτροκίνηση (30-200km/h)
2		Συρμοί κανονικών ταχυτήτων Inter-City
	2a	Τύπος BM70 (100-120km/h)
	2b	Επιβατικός συρμός, κινούμενος από ηλεκτροκίνητη μηχανή (E18) [περιορισμένη χρήση] (30-200km/h)
	2c	Κοινός επιβατικός συρμός, κινούμενος από ηλεκτροκίνητη μηχανή (60-120km/h)
	2d	Επιβατικός συρμός, κινούμενος από μηχανή diesel (Di8)
3		Τοπικοί συρμοί
	3a	Τύπος BM 69 (40-140km/h)
	3b	Τύπος BM 92
	3c	Τύπος BM 72 (30-200km/h)
	3d	Τύπος BM 93, συρμός Agenda, diesel (30-200km/h)
4		Εμπορευματικοί συρμοί, κινούμενοι από μηχανές
	4a	Κανονικών αγαθών (ηλεκτροκίνηση) (E16)
	4b	Ταχείας διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων (ηλεκτροκίνηση) (E18) (30-200km/h)
	4c	Αγαθών (diesel) (Di8) (30-200km/h)
5		Άλλοι

Από τη Δανία:

Κύρια κατηγορία	Υποκατηγορία	Όνομα Κατηγορίας
1		Επιβατικά σύνολα συρμών
	1a	Συρμοί κινούμενοι με diesel (IC3)
	1b	Συρμοί με ηλεκτροκίνηση (IR4)
	1c	Ηλεκτρικά σύνολα (ET), Øresund
	1d	Ηλεκτρικά σύνολα X2000
2		Συρμοί κινούμενοι από μηχανές
	2a	Επιβατικοί συρμοί με μηχανές diesel MZ ή ME (MZ/P, ME/P)
	2b	Συρμοί διακίνησης αγαθών με μηχανές diesel MZ ή ME (MZ/G, ME/G)
	2c	Επιβατικοί συρμοί με ηλεκτροκινούμενες μηχανές EA (EA/P)
	2d	Συρμοί διακίνησης αγαθών με ηλεκτροκινούμενες μηχανές EA (EA/G)
	2e	Συρμοί διακίνησης αγαθών με ηλεκτροκίνηση (EG)
3		Περιφερειακοί συρμοί
4		Τοπικοί συρμοί
	4a	Συρμοί τύπου S 2 ^{ης} και 3 ^{ης} γενιάς
	4b	Συρμοί τύπου S 4 ^{ης} γενιάς
	4c	Σύνολα συρμών κινούμενων με diesel
	4d	Συρμοί Y, IC2, RegioSprinter, Desiro
5		Άλλοι

Για κάθε έναν από αυτούς έχουν γίνει μετρήσεις πεδίου σε διερχόμενους συρμούς, κινούμενους με σταθερή και κανονική ταχύτητα, σε αποστάσεις από 10-25m και ύψη 2-3,5m. Η στάθμη ηχητικής ισχύος αντιστοιχεί σε απόσταση 10m και ύψος 2m. Οι μετρήσεις ανάγονται σε αυτές τις αποστάσεις με τη χρήση του προτύπου ISO 9613-2. Η στάθμη ηχητικής ισχύος εκφράζεται με μια τιμή σε dB(A) για όλο το

συρμό, το φάσμα συχνοτήτων της και τη στάθμη κάθε πηγής στο συρμό αυτό. Η ανάλυση στις επιμέρους πηγές γίνεται από τις μετρήσεις πεδίου με τη χρήση μοντέλων. Οι στάθμες θορύβου έχουν προκύψει από αυτές τις Nord 1996, που πλέον όμως είναι εκφρασμένες σε τριτοκτάβες και διορθωμένες ώστε να φιλτράρεται η επιρροή του εδάφους.

Η στάθμη ηχητικής έκθεσης καθενός από τους παραπάνω συρμούς, δίνεται ανά μέτρο συρμού από τους πίνακες της Nord1996, ενώ αν κινείται με ταχύτητα v προκύπτει από την παρακάτω σχέση.

$$L_{w,1m} = a \log \left(\frac{v}{100} \right) + b$$

Για έναν συρμό συνολικού μήκους l η στάθμη ηχητικής ισχύος που προκύπτει είναι

$$L_w = L_{w,1m} + 10 \log (l)$$

Στους πίνακες ωστόσο της Nord2000 έχει γίνει η μετατροπή αυτή. Οι συντελεστές a και b δίδονται σε πίνακες για φάσμα συχνοτήτων από 25Hz ως 10kHz.

Οι πηγές που μπορούν να διακριθούν στο μοντέλο της πηγής είναι:

	Απόσταση από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς (σε m)	Κατά μήκος θέση
Πηγή 1 Τροχός/σιδηροτροχιά	0,01	Η ίδια συνεισφορά κατά μήκος του συρμού
Πηγή 2 Τροχός/σιδηροτροχιά	0,35*[διάμετρος τροχού]	Η ίδια συνεισφορά κατά μήκος του συρμού
Πηγή 3 Τροχός/σιδηροτροχιά	0,70*[διάμετρος τροχού]	Η ίδια συνεισφορά κατά μήκος του συρμού
Πηγή 4 Μηχανή	Απόσταση της μηχανής από την κεφαλή	Το κέντρο των ανοιγμάτων της μηχανής
Πηγή 5 Εξαίμιση	Απόσταση της εξαίμισης από την κεφαλή	Σημείο εξόδου εξαίμισης
Πηγή 6 Αεροδυναμικός θόρυβος	Καθορίζεται κατά περίπτωση	Καθορίζεται κατά περίπτωση

Ωστόσο η θέση των πηγών για τους παραπάνω συρμούς σε πολλές περιπτώσεις καθορίζονται ξεχωριστά οπότε και δίδονται από πίνακες. Αυτό που δεν δίνεται είναι η συνεισφορά κάθε μίας από αυτές τις πηγές στην ηχητική στάθμη αναφοράς του συρμού. Η κατανομή της ηχητικής ισχύος του συρμού κατανέμεται στις πηγές που τον συνιστούν με τη χρήση θεωρητικών μοντέλων.

Η γραμμή διακρίνεται σε 4 κύριες κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες.

Κύρια Κατηγορία	Υποκατηγορία	Όνομα Κατηγορίας
1		Μοντέρνου τύπου (έρμα, στρωτήρες από σκυρόδεμα, συγκολλημένους συνδέσμους με σιδηροτροχιά UIC60 και μαλακά υποθέματα)
	1a	Καλά συντηρημένη γραμμή (τραχύτητα < X)
	1b	Μέτρια συντηρημένη γραμμή (X ≤ τραχύτητα ≤ Y)
	1c	Χειρότερα από μέτρια συντηρημένη (τραχύτητα > Y)
2		Ημιμοντέρνου τύπου (έρμα, στρωτήρες από σκυρόδεμα, συγκολλημένους συνδέσμους με σιδηροτροχιά UIC=, μαλακά

		υποθέματα)
	2a	Καλά συντηρημένη γραμμή (τραχύτητα < X)
	2b	Μέτρια συντηρημένη γραμμή ($X \leq \text{τραχύτητα} \leq Y$)
	2c	Χειρότερα από μέτρια συντηρημένη (τραχύτητα > Y)
3		Παλαιού τύπου (έρμα, ξύλινοι στρωτήρες, μη συγκολλημένοι σύνδεσμοι με σιδηροτροχιά UIC=, μαλακά υποθέματα)
	3a	Καλά συντηρημένη γραμμή (τραχύτητα < X)
	3b	Μέτρια συντηρημένη γραμμή ($X \leq \text{τραχύτητα} \leq Y$)
	3c	Χειρότερα από μέτρια συντηρημένη (τραχύτητα > Y)
4		Γραμμή σε γέφυρα από χάλυβα
	4a	Καλά συντηρημένη γραμμή (τραχύτητα < X)
	4b	Μέτρια συντηρημένη γραμμή ($X \leq \text{τραχύτητα} \leq Y$)
	4c	Χειρότερα από μέτρια συντηρημένη (τραχύτητα > Y)

Στις τιμές της στάθμης ηχητικής έκθεσης γίνονται και οι αντίστοιχες διορθώσεις για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της γραμμής.

Χαρακτηριστικό γραμμής	Απόσταση επενέργειας	Διόρθωση
Σιδηροτροχιά με αρμούς	Σε όλο το μήκος	+3
Διασταυρώσεις και αλλαγές	10m από αλλαγή ή διασταύρωση	+6
Γέφυρα χωρίς έρμα	Μήκος γέφυρας	+6
Γέφυρα με έρμα	Μήκος γέφυρας	+3

Επιπλέον, διακρίνονται 4 διαφορετικές κατηγορίες συνθηκών οδήγησης. Περιλαμβάνονται, διέλευση με σταθερή ταχύτητα, σταθερή επιτάχυνση και επιβράδυνση, καθώς και κίνηση σε καμπύλη.

Η γραμμή θα πρέπει να χωριστεί σε τομείς βάση κριτηρίων. Οι τομείς πρέπει να είναι ικανοποιητικοί σε αριθμό για να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια, αλλά και όχι τόσο πολλοί ώστε να επιτυγχάνονται ικανοποιητικοί χρόνοι υπολογισμού. Τα πρώτα βασικά κριτήρια για τη διαίρεση της γραμμής είναι:

- για τη γραμμή
 - οι αλλαγές της οριζοντιογραφικής χάραξης (οριζοντιογραφικές καμπύλες) – προσομοιάζεται με διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα
 - η αλλαγή της κατά μήκος κλίσης της γραμμής
 - η αλλαγή της πυκνότητα ροής της κυκλοφορίας
 - η μεταβολή της ποιότητας της γραμμής
 - η αλλαγή της ταχύτητας διέλευσης

Κατόπιν οι τομείς που θα προκύψουν χωρίζονται εκ νέου σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

- για τον περιβάλλοντα χώρο
 - το προφίλ του
 - τα φυσικά και τεχνικά εμπόδια ή ανακλαστικές επιφάνειες

Κάθε τομέας που θα προκύψει από τα παραπάνω ελέγχεται και αν χρειαστεί διαιρείται και πάλι. Αρχικά ελέγχεται αν είναι μικρότερο από το μήκος $\Delta x_{\min}$ (= 5-10m, οι μικρότερες τιμές αν υπάρχει κοντά δρόμος). Αν είναι μικρότερο δεν γίνεται νέα διαίρεση διαφορετικά είναι πιθανόν να χρειαστεί.

Ορίζονται κάποια νέα μεγέθη. Αν $|P_1R|$, $|P_2R|$, τα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν την πηγή με την αρχή και το πέρας αντίστοιχα, τότε ορίζεται β η

περιεχόμενη σε αυτά γωνία και $RD = |P_1R|/|P_2R|$ η σχετική απόσταση. Αν $RD < RD_{\min}$ ($= 0,75$) ο τομέας χωρίζεται και πάλι ως εξής:

- αν $\beta > \beta_{\max} / 2$ ο τομέας διαιρείται κατά τη διχοτόμο
- αν $\beta < \beta_{\max} / 2$ ο τομέας διαιρείται στο μέσο του μήκους του τομέα

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι όλοι οι τομείς να πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια. Η θέση της πηγής στον τομέα σχετίζεται με τη γωνία β . Αν $\beta < \beta_{\max}$ αυτή βρίσκεται στο σημείο τομής με τη διχοτόμο, διαφορετικά βρίσκεται στο μέσο του τομέα. Οι τιμές $\Delta x_{\min}$, $RD_{\min}$ και $\beta_{\max}$ προσδιορίζονται πρακτικά. Κάποιες ενδεικτικές τιμές για τα δύο πρώτα είναι αυτές που δίδονται στις παρενθέσεις ενώ για τη $\beta_{\max}$ μια τιμή είναι οι 10° ($0,175\text{rad}$).

3.4.2. Το μοντέλο διάδοσης

Αν σε μια θέση i της γραμμής βρίσκεται μια πηγή που συνίσταται από j σε αριθμό στοιχειώδεις πηγές, κάθε μια από αυτές θα έχει στάθμη ηχητικής έκθεσης $L_{w,ref,j}$. Η μέθοδος υπολογίζει τη συνεισφορά κάθε μιας από αυτές τις πηγές στη θέση της πηγής και κατόπιν γίνεται η άθροισή τους. Κατά συνέπεια κάθε στοιχειώδης τέτοια πηγή θα προκαλεί στη θέση του δέκτη θόρυβο ηχητικής στάθμης $L_{p,ij}$, σύμφωνα με τη σχέση

$$L_{p,ij} = L_{w,ij} + \Delta L_{ij}$$

Όπου:

$$L_{w,ij} = L_{w,ref,j} + \Delta L(\varphi_j) + \Delta L(\psi_j) \quad , \Delta L(\varphi_j), \Delta L(\psi_j) \text{ οι συντελεστές της κατευθυντικότητας για το κατακόρυφο και το οριζόντιο επίπεδο}$$

$$\Delta L_{ij} = -10\log(4\pi r_{ij}^2) \quad , r_{ij} \text{ η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη. Οι τιμές του } \Delta L_{ij} \text{ μπορούν να υπολογιστούν για διαφορετικές συνθήκες}$$

Το μοντέλο διάδοσης υπολογίζει τη στάθμη ηχητικής πίεσης στη θέση της πηγής για κάθε ζώνη συχνοτήτων κατά τη βασική σχέση:

$$L_R = L_w + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r$$

όπου

L_w	η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων
ΔL_d	η διαφορά που προκύπτει από την απόσταση πηγής δέκτη
ΔL_a	η διαφορά που προκύπτει λόγω της απορρόφησης του αέρα
ΔL_t	η επιρροή του ανάγλυφου (έδαφος και εμπόδια)
ΔL_s	η επιρροή των ζωνών διάθλασης
ΔL_r	η επιρροή των διαστάσεων και των χαρακτηριστικών επιφάνειας ενός εμποδίου κατά τον υπολογισμό της συνεισφοράς των ανακλάσεων από το εμπόδιο αυτό

Το μοντέλο διάδοσης της Σκανδιναβικής μεθόδου Nord2000 δεν στηρίζεται σε εμπειρικές σχέσεις, αλλά κάνει εκτεταμένη χρήση θεωρητικών αλγορίθμων.

Πολλές από τις μεταβλητές που είναι στα δεδομένα του μοντέλου διάδοσης παρουσιάζουν δυσκολίες στον υπολογισμό τους σε συνήθεις εφαρμογές. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, η τιμή της τυπικής απόκλισης του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας του ανέμου και οι παράμετροι της τυρβώδους ροής. Είναι πολύ πιθανό αυτές οι μεταβλητές να εισάγονται πάντα με κάποια κατάλληλη τιμή. Άλλες πάλι τιμές εισάγονται έμμεσα μέσω κάποιας γενικής περιγραφής (π.χ. ημέρα και συννεφιά ή νύχτα και ξαστεριά).

Οι παράμετροι της διάδοσης υπολογίζονται κατά την οριζόντια προβολή της ευθείας που ενώνει την πηγή με το δέκτη. Στην περίπτωση που υπάρχει διάθλαση του θορύβου γύρω από την άκρη μιας κατακόρυφης επιφάνειας με πεπερασμένο μήκος ή από κάποιο εμπόδιο η γραμμή αυτή σπάει.

Δεδομένα:

- Μετεωρολογικές συνθήκες
 - άνεμος
 - Συνιστώσα της ταχύτητας ανέμου κατά τη διεύθυνση της διάδοσης, φορά, καθώς και το ύψος που μετράται η ταχύτητα αυτή (u)
 - Τυπική απόκλιση της συνιστώσας της ταχύτητας ανέμου κατά τη διεύθυνση της διάδοσης ($s_u = 0,15u$ για επίπεδο έδαφος, $= 0,30u$ για ανώμαλο έδαφος)
 - Μήκος αεροδυναμικής τραχύτητας του εδάφους. Εξαρτάται από το τι υπάρχει στην επιφάνεια στην περιοχή (δέντρα, κτίρια) και διαμορφώνει το κατακόρυφο προφίλ του ανέμου (τυπικές τιμές 0,02-0,05)
 - θερμοκρασία
 - Μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος
 - Τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας καθ' ύψος
 - Θερμοκρασία στο έδαφος
 - Σχετική υγρασία
 - Παράμετροι τυρβώδους ροής λόγω ανέμου και θερμοκρασίας αντίστοιχα (C_w^2, C_t^2)

Τυπικές τιμές για μερικές από τις παραπάνω παραμέτρους παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετρος	Τυπική τιμή
Μήκος τραχύτητας	0,05
Θερμοκρασία στο έδαφος	15°C
Ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας	0°C/m
Τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας	0°C/m
Ύψος μέτρησης ταχύτητας ανέμου	10m
Ταχύτητα ανέμου στα 10 m κατά τη διεύθυνση της γραμμής πηγής – δέκτης.	3 m/s

- Ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης - Ομοιόμορφη διάδοση - Μη ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης	0 m/s -3 m/s
Τυπική απόκλιση της ταχύτητας ανέμου - Ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης - Ομοιόμορφη διάδοση - Μη ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης	0,5 m/s 0 m/s 0,5 m/s

- Χαρακτηριστικά ανάγλυφου

- ο Το ανάγλυφο χωρίζεται σε ευθύγραμμα τμήματα οριζόμενα από τις συντεταγμένες αρχής και πέρατος. Κάθε τέτοιο τμήμα χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω:

- Ειδική αντίσταση - ακουστική εμπέδηση. Προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα ή μπορεί να εισαχθεί απ' ευθείας η τιμή της.

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗ ΡΟΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ σ (kNsm ⁻⁴)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΑΦΟΥΣ
A	12,5	Πολύ μαλακό (χιόνι ή κάλυψη από φυτά όπως βρύα)
B	31,5	Μαλακή δασική επιφάνεια (χαμηλή έντονη βλάστηση όπως βρύα και ρείκια)
C	80	Μη συμπιεσμένο, χαλαρό έδαφος (χορταριασμένο χώμα, γρασίδι, σκόρπιο χώμα)
D	200	Κανονικό μη συμπιεσμένο έδαφος (δασική επιφάνεια, βοσκότοπος)
E	500	Συμπιεσμένη επιφάνεια και χαλίκι (συμπιεσμένο γρασίδι, χώρος αναψυχής)
F	2000	Πυκνά συμπιεσμένο έδαφος (δρόμος με σκύρα, θέση παρκαρίσματος)
G	20000	Σκληρή επιφάνεια (πυκνή άσφαλτος, τσιμέντο, νερό)

- Τραχύτητα (πόσο ομαλό είναι). Μπαίνει στον υπολογισμό με το χαρακτηρισμό καθόλου, μικρή, μέτρια ή μεγάλη.

- Σημειακή πηγή

- ο Κατευθυντικότητα της πηγής (είδος της πηγής)
- ο Στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής
- ο Ανάλυση σε τριτοκτάβες
- ο Ορίζεται το ύψος της πηγής σε σχέση με το γύρω έδαφος

- Θέση του δέκτη

- ο Ορίζεται το ύψος του δέκτη σε σχέση το γύρω έδαφος

- Ζώνες διάθλασης (δομημένες ζώνες – δάση)

- ο Θέση και μήκος της ζώνης
- ο Ύψος της ζώνης
- ο Μέση πυκνότητα της ζώνης και ειδική επιφάνεια πρόσπτωσης [scattering cross section] όπως περιγράφονται από το δείκτη nQ .

Για περιοχές κατοικίας καθορίζεται:

- από το ποσοστό επιφάνειας που έχει δομηθεί στη συνολική ζώνη διάθλασης
- τη συνολική παράπλευρη επιφάνεια (τοίχοι και στέγες) του μέσου κτιρίου
- το ύψος του ψηλότερου κτιρίου
- το μέσο εμβαδόν των κτιρίων της περιοχής

Για περιοχές όπου υπάρχουν δάση καθορίζεται:

- από την πυκνότητα των δέντρων
- από τη μέση διάμετρο των κορμών

- ο Μέσος συντελεστής απορρόφησης των αντικειμένων που προκαλούν τη διάθλαση

Η τιμές αυτές πρόκειται να βρίσκονται από ρητές περιγραφές της περιοχής, κάτι που ακόμα δεν έχει ολοκληρωθεί.

- Επιρροή ανακλάσεων

Προκύπτει σε περιπτώσεις που έχουμε υποβιβασμό της στάθμης κύλισης της γραμμής (όρυγμα) ή όταν υπάρχουν ηχοπετάσματα εκατέρωθεν της γραμμής. Οι ανακλάσεις σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολλαπλές, ωστόσο για τους υπολογισμούς δεν απαιτούνται παραπάνω από δύο. Απαιτείται ο καθορισμός:

- ο του συντελεστή ενεργειακής απορρόφησης α της επιφάνειας
- ο των συντεταγμένων του προς εξέταση τομέα
- ο των συντεταγμένων της θέσης του δέκτη
- ο των συντεταγμένων των κατακόρυφων επιφανειών

Αποτελέσματα:

- Στάθμη ηχητικής ισχύος στη θέση του δέκτη για χρονικές περιόδους από 30' αλλά και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα με τη χρήση μέσων τιμών μετεωρολογικών δεδομένων για κάθε συνδυασμό συρμών.
- Το αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε μέτρηση ελεύθερου πεδίου
 - ο Εκφράζονται σε

- L_{eq} . Για τον υπολογισμό της στάθμης L_{eq} για χρονική περίοδο T σε ένα τμήμα γραμμής, κατά την οποία διέρχονται από αυτό το τμήμα N_{vc} συρμοί από μια κατηγορία συρμών, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$L_{eq,T,vc} = L_{E,v} - 10 \log(T) + 10 \log(N_{vc})$$

όπου $L_{E,v}$ η ισοδύναμη ηχητική στάθμη στη θέση της πηγής από μια διέλευση συρμού αυτής της κατηγορίας.

Για τις N_{cat} σε αριθμό κατηγορίες γίνεται άθροιση των συνεισφορών τους για αυτό το τμήμα της γραμμής κατά τη σχέση:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\sum_{vc=1}^{N_{cat}} 10^{\frac{L_{eq,T,vc}}{10}} \right]$$

Τέλος αθροίζονται οι συνεισφορές όλων των τμημάτων N_{seg} της γραμμής κατά τον ίδιο τρόπο:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\sum_{n=1}^{N_{seg}} 10^{\frac{L_{eq,T}}{10}} \right]$$

- L_{den} . Για τον υπολογισμό του δείκτη L_{den} υπολογίζεται η στάθμη L_{eq} για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους της ημέρας.
- L_{yav} . Πρόκειται για τη μέση τιμή L_{eq} έτους. Επειδή στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκος γίνονται οι απλοποιήσεις που προαναφέρθηκαν όσων αφορά τις καιρικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να προσδιοριστεί το ποσοστό του χρόνου που οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, μη ευνοϊκές ή ουδέτερες για τη διάδοση του θορύβου.

$$L_{yav} = 10 \log \left[0.01 \left(p_f 10^{\frac{L_f}{10}} + p_h 10^{\frac{L_h}{10}} + (100 - p_f - p_h) 10^{\frac{L_u}{10}} \right) \right]$$

όπου

p_f, p_h το ποσοστό του χρόνου που οι συνθήκες είναι ευνοϊκές ή ουδέτερες για τη διάδοση του θορύβου

L_f, L_h, L_u , οι στάθμες θορύβου που αντιστοιχούν σε ευνοϊκές, ουδέτερες και μη ευνοϊκές συνθήκες αντίστοιχα

1. L_{Fmax} . Πρόκειται για τη μέγιστη στάθμη θορύβου που καταγράφεται κατά τη διέλευση του πιο θορυβώδους συρμού. Υπολογίζεται από τις διάφορες πηγές που συμβάλουν στην παραγωγή θορύβου από το συρμό. Προς το παρόν τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν τη στάθμη θορύβου ανά μέτρο συρμού και όχι στάθμες θορύβου σε θέσεις κατά μήκος του συρμού. Ωστόσο, αν ο συρμός έχει μεγάλο μήκος, για μικρές αποστάσεις από τη γραμμή, δεν συνεισφέρουν παρά κάποια μέρη του στην παραγωγή της στάθμης L_{Fmax} . Για το λόγο αυτό

η ηχητική ισχύς ολόκληρου του συρμού θα πρέπει να κατανεμηθεί κατά το μήκος του συρμού. Η μέθοδος προτείνει μια διαδικασία για να γίνει αυτό:

1. Υπολογισμός του ενεργού μήκους l_p

$$l_p = \min(1, 15d)$$

όπου l το μήκος του πιο θορυβώδους συρμού και d η απόσταση του συρμού από το δέκτη.

2. Υπολογισμός της στάθμης ηχητικής έκθεσης του συρμού για το ενεργό μήκος.

$$L_w = L_{w,1m} + 10\log(l_p)$$

3. Καταμερισμός της ηχητικής ισχύος κατά μήκος του συρμού
Αυτό που προτείνει η μέθοδος είναι η διάκριση 7 ισοδύναμων πηγών κατά μήκος, η κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από άλλες που καταμερίζουν την ισχύ καθ' ύψος. Οι 7 αυτές πηγές βρίσκονται στο μέσο του συρμού και σε αποστάσεις $\pm l_p/2$, $\pm l_p/4$, $\pm l_p/8$ από το κέντρο.

4. Για κάθε μία από αυτές γίνεται ξεχωριστός υπολογισμός και βρίσκεται η μεγαλύτερη που θα έχει στάθμη L_{max} .

$$L_{max} = \max(L_{max}(i)) =$$

$$\max \left[10 \log \sum_{j=1}^n 10^{\frac{(L_{w,ij} + \Delta L(\phi) + \Delta L(\psi) + \Delta L(ij))}{10}} \right]$$

5. Η στάθμη αυτή αντιστοιχεί στο μέση χρονικά μέγιστη τιμή που εμφανίζεται σε μια διέλευση. Για να βρεθεί η κορυφή L_{Fmax} χρησιμοποιείται η παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$L_{Fmax} = L_{max} + 3 - 2\log(d/10)$$

- όλες οι στάθμες αυτές είναι σταθμισμένες σύμφωνα με την καμπύλη A
- η ακρίβεια που έχει μετρηθεί σε αποστάσεις μέχρι 200m είναι $\pm 2dB(A)$.

3.5. Η Ολλανδική μέθοδος μέτρησης σιδηροδρομικού θορύβου

Η ολλανδική μέθοδος πρόβλεψης σιδηροδρομικού θορύβου χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν τα επίπεδα θορύβου στο σιδηροδρομικό δίκτυο εκφρασμένα είτε σε L_{eq} σε dB (SRM I) , είτε με χρήση της σταθμιστικής καμπύλης A για συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων για τον υπολογισμό του L_{eq} (SRM II) σε dB(A)⁽¹⁷⁾.

Για το (SRM II) ο κύρια σχέση υπολογισμού του L_{eq} είναι :

$$L_{A_{eq,i}} = 10 \log \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N 10^{\frac{\Delta L_{eq,i,j,n}}{10}}$$

όπου :

- i = εκφράζει τον αριθμό της οκτάβας (από 1 ως 8 αντιπροσωπεύει ένα εύρος μεταξύ 63Hz ως 8 KHz)
- j = ο αριθμός των τομέων που έχει χωριστεί η συνολική γωνία οράσεως
- n = ο αριθμός των σημειακών πηγών ανά τομέα (π.χ. διαφορετικά ύψη πηγών ή πηγές σε διαφορετικές γραμμές)

και

$$\Delta L_{eq,i,j,n} = L_{E,i} + \Delta L_{G,i} - \Delta L_{T,i} - \Delta L_{B,i} - \Delta L_{R,i} - 58,6$$

όπου :

- $L_{E,i}$ = δείκτης εκπομπών ανά ύψος πηγής και οκτάβας
- $\Delta L_{G,i}$ = όρος που εκφράζει τη γεωμετρία της διάδοσης
- $\Delta L_{T,i}$ = εκφράζει την εξασθένηση της διάδοσης του ήχου σε επίπεδο έδαφος
- $\Delta L_{B,i}$ = εξασθένηση λόγω ηχοπετάσματος αν αυτή η λύση είναι δυνατό να εφαρμοστεί
- $\Delta L_{R,i}$ = εξασθένηση λόγω ανάκλασης αν αυτό είναι δυνατό να εμφανιστεί

Ο δείκτης εκπομπών $L_{E,i}$ είναι ένα μέτρο της ηχητικής ισχύος της πηγής ενός δεδομένου τμήματος γραμμής που εξαρτάται από τον αριθμό των διερχόμενων τρένων ανά ώρα , την κατηγορία και την ταχύτητά τους ,τον τύπο της γραμμής και απ' το αν πεδίζει ο συρμός στο συγκεκριμένο τμήμα και μετριέται σε ηχητική ισχύ ανά χιλιόμετρο . Ο δείκτης αυτός προκύπτει από όλους τους συρμούς της κάθε κατηγορίας που διέρχονται με την ταχύτητα που τους αντιστοιχεί .

Είναι , δε ,

$$L_{E,i} = 10 \log \left(\sum_{c=1}^{N_c} 10^{\frac{E_{c,i}}{10}} + \sum_{c=1}^{N_c} 10^{\frac{E_{br,c,i}}{10}} \right)$$

όπου:

N_c = ο αριθμός των κατηγοριών των συρμών

$E_{c,i}$ = ο όρος που εκφράζει τις εκπομπές της κάθε κατηγορίας στην λειτουργική της ταχύτητα

$E_{br,c,i}$ = το ίδιο αλλά σε συνθήκες πεδήσεως

Ισχύει ότι:

$$E_{c,i} = a_{c,i} + b_{c,i} \log V_c + 10 \log Q_c + C_{bb,c,i}$$

όπου:

$a_{c,i}$ και $b_{c,i}$ = συντελεστές εκπομπής ανά κατηγορία

V_c = η μέση ταχύτητα συρμού της κατηγορίας

Q_c = η μέση πυκνότητα κάθε κατηγορίας σε οχήματα(wagons) ανά ώρα

$C_{bb,c}$ = όρος διόρθωσης για τον τύπο γραμμής και ανά κατηγορία

Η ίδια σχέση ισχύει και για συρμούς που πεδήσουν αλλά με διαφορετικούς συντελεστές εκπομπής. Οι συντελεστές $a_{c,i}$ και $b_{c,i}$ καθώς και ο όρος διόρθωσης $C_{bb,c}$ υπάρχουν σε πινακοποιημένη μορφή που έχει προκύψει από εκτεταμένο αριθμό μετρήσεων πεδίου.

3.6. Η βρετανική μέθοδος υπολογισμού CRN-1995 (Calculation of Railway Noise, Department of Transport)

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολύ πιο απλή από τις παραπάνω γεγονός που πιθανόν σχετίζεται και με την ηλικία της. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία κατά την εφαρμογή. Παρακάτω αναφέρονται τα βασικά βήματα υπολογισμού της μεθόδου καθώς και η μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθηθεί στις περιπτώσεις που οι μέθοδος προτείνει τη διενέργεια μετρήσεων⁽¹⁸⁾.

3.6.1. Βασικά βήματα υπολογισμού

Βήμα 1^ο

Χωρισμός του δικτύου σε τομείς, έτσι ώστε η αυξομείωση της στάθμης του θορύβου εντός του τομέα να μην υπερβαίνει τα 2dB(A).

Μερικές καταστάσεις οι οποίες μπορούν να εγείρουν την ανάγκη χωρισμού της γραμμής σε τομείς είναι:

- ❖ Κατά μήκος του τμήματος του δικτύου που ο σιδηρόδρομος κινείται εντός ορύγματος
- ❖ Στις περιοχές του δικτύου όπου υπάρχουν παράγοντες που εμποδίζουν την διάδοση του θορύβου ή όπου ο βαθμός παρεμπόδισης από αυτούς αλλάζει σημαντικά κατά το εξεταζόμενο μήκος της διαδρομής
- ❖ Η διέλευση του σιδηροδρόμου από διάβαση ή άλλη κατασκευή που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον εκπεμπόμενο θόρυβο απ' τους διερχόμενους συρμούς
- ❖ Σε σημεία αλλαγής ταχύτητας των διερχόμενων συρμών
- ❖ Σε κόμβους που παρατηρείται σημαντική μεταβολή των ροών ανάμεσα σε τομείς που βρίσκονται εκατέρωθεν του κόμβου
- ❖ Σε διασταυρώσεις και στα άκρα της γραμμής
- * Σε σταθμούς, ειδικά όταν τα κτίρια του σταθμού προσφέρουν σε κάποιο βαθμό προστασία από το θόρυβο απ' τους συρμούς ή ακόμα και αν εμφανίζονται φαινόμενα ανακλάσεων του θορύβου

Βήμα 2^ο

Υπολογίζεται η στάθμη αναφοράς SEL_{ref} για δεδομένη ταχύτητα, σε απόσταση 25m από την κοντινότερη σιδηροτροχιά του τομέα της γραμμής, λαμβάνοντας υπ' όψη το μήκος του συρμού και τον τύπο στήριξης της σιδηροτροχιάς.

Sound Exposure Level (Στάθμη Ηχητικής Έκθεσης)

Πρόκειται για την ηχητική στάθμη που προκύπτει κατά τη διέλευση του σιδηροδρομικού υλικού σε απόσταση 25m απ' την κοντινότερη σιδηροτροχιά και σε ύψος 1,2-3,5m από το έδαφος. Η μέτρηση γίνεται υπό αυστηρά καθοριζόμενες συνθήκες.

Αρχικά υπολογίζει τη στάθμη ηχητικής έκθεσης για διαφορετικούς τύπους σιδηροδρομικών οχημάτων (SEL_v). Για κάθε μεμονωμένο σιδηροδρομικό όχημα, επιβατικό ή εμπορικό προκύπτουν διαφορετικές τιμές SEL_v . Μη αυτοκινούμενα σιδηροδρομικά οχήματα, ηλεκτρικές μηχανές και μηχανές diesel που δε λειτουργούν σε πλήρη ισχύ αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο. Για μηχανές diesel που λειτουργούν σε πλήρη ισχύ αντιμετωπίζονται διαφορετικά.

Ο συρμός χωρίζεται σε μικρότερους ιδεατούς συρμούς που αποτελούνται από όμοια οχήματα. Η μηχανή πάντοτε λογίζεται ως ξεχωριστός συρμός. Για καθέναν από τους παραπάνω γίνεται διόρθωση για τον αριθμό των οχημάτων που συνιστούν τον συρμό.

Τέλος αξιολογούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της επιδομής με τις αντίστοιχες διορθώσεις σύμφωνα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς, (συνεχώς συγκολλημένη σιδηροτροχιά ή με αρμούς), το που στηρίζεται (επί έρματος ή επί πλακών από σκυρόδεμα) ή την υπερύψωση της πηγής (γέφυρες από σκυρόδεμα ή από χάλυβα)

Βήμα 3^ο

Γίνονται διορθώσεις του SEL_{ref} για την απόσταση του σημείου λήψεως απ' τη γραμμή, την απορρόφηση του αέρα και του εδάφους, την επίδραση των ηχοπετασμάτων και άλλων κατασκευών, καθώς και τη γωνία οράσεως (angle of view) του σημείου λήψεως.

Η ηχητικές στάθμες διορθώνονται ως προς την ευθεία απόσταση της πηγής από το δέκτη. Για μηχανές diesel που λειτουργούν σε πλήρη ισχύ, η ηχητική πηγή βρίσκεται σε ύψος 4m από την κεφαλή της κοντινότερης στο δέκτη σιδηροτροχιάς. Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η πηγή τοποθετείται κατά τη μέθοδο στο ύψος της κεφαλής της κοντινότερης σιδηροτροχιάς.

Για αυτήν την απόσταση υπολογίζεται και η επιρροή της απορρόφησης του αέρα. Η διόρθωση αυτή δεν ισχύει για τις μηχανές diesel που λειτουργούν εν πλήρη ισχύ.

Καθώς η πηγή του σιδηροδρομικού θορύβου δεν είναι ούτε γραμμική, ούτε σημειακή, η στάθμη ηχητικής έκθεσης (SEL) στο σημείο λήψεως εξαρτάται και από την κατευθυντικότητα της, απ' τον τρόπο δηλαδή που διαδίδεται στο χώρο. Έτσι, η στάθμη θορύβου για κάθε τύπο συρμού στη θέση του δέκτη υπολογίζεται ως συνάρτηση της γωνίας οράσεως που κείται έναντι του τομέα (θ) και από τη γωνία προσανατολισμού του τομέα σε σχέση με την τροχιά της γραμμής, α . Η

κατευθυντικότητα της πηγής είναι διαφορετική στις μηχανές diesel που λειτουργούν εν πλήρη ισχύ και γι' αυτό η σχέση που συνδέει τις γωνίες α , θ με την διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας διαφέρει από αυτή των υπολοίπων οχημάτων.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στη συνέχεια σχετίζεται με τις συνθήκες διάδοσης. Η διάδοση μπορεί να είναι ελεύθερη, μερικώς εμποδιζόμενη ή εμποδιζόμενη. Ο χωρισμός της γραμμής σε τομείς θα πρέπει, ωστόσο, να γίνεται κατά το δυνατό με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες εμποδιζόμενης ή ελεύθερης διάδοσης.

□ Για ελεύθερη διάδοση

Υπολογίζεται η διόρθωση που οφείλεται στην απορροφητική επιφάνεια του εδάφους. Για τον υπολογισμό απαιτείται ο καθορισμός της επιφάνειας που συμβάλλει στην απορρόφηση, το μέσο ύψος της γραμμής σε σχέση με το περίξ έδαφος (H), την απόσταση της γραμμικής πηγής από το σημείο λήψης (d), και το ποσοστό του απορροφητικού εδάφους επί της συνολικής επιφάνειας του τομέα που είναι απορροφητικό (I). Διόρθωση της τάξης του $-1,5 \text{ dB(A)}$ επιβάλλεται και όταν υπάρχει έρμα στην επιδομή των γειτονικών γραμμών, εφόσον παρεμβάλλονται μεταξύ της γραμμής που εξετάζεται και της πηγής.

□ Για εμποδιζόμενη διάδοση

Θα πρέπει να καθοριστούν τα αποτελέσματα της παρεμπόδισης της διάδοσης από ενδιάμεσα εμπόδια όπως πετάσματα, τοίχοι και κτίρια, επιχώματα και ορύγματα. Η μείωση της ηχητικής στάθμης προκύπτει ως συνάρτηση της μεταβολής του μήκους διαδρομής του ηχητικού κύματος. Εάν κάποιο από τα εμπόδια έχει ανακλαστικές επιφάνειες γίνεται νέα διόρθωση, βάση της απόστασης του εμποδίου από την πηγή.

Η μέθοδος καθορίζει τον τρόπο για να εφαρμοστούν τα παραπάνω σε ηχοπετάσματα, παράλληλα ή υπό γωνία προς τη γραμμή, κτίρια ή ακόμα και σειρές κτιρίων, σε επιχώματα και σε ορύγματα. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται για την περίπτωση που εκατέρωθεν της γραμμής υπάρχουν ηχοπετάσματα ή κτίρια.

Βήμα 4^ο

Γίνεται διόρθωση του SEL_{ref} για να ληφθούν υπ' όψη τα αποτελέσματα των φαινομένων ανακλάσεως στο σημείο λήψεως.

Σύμφωνα με τους βρετανικούς κανονισμούς για το θόρυβο από το σιδηρόδρομο, η στάθμη θορύβου υπολογίζεται 1m μπροστά από την πρόσοψη κτιρίου. Η επιρροή των ανακλάσεων του κτιρίου συνεισφέρει $+2,5 \text{ dB(A)}$ σε σχέση με αυτές που καταγράφονται σε ελεύθερο πεδίο.

Επιπλέον, διόρθωση απαιτείται αν πίσω απ' την πηγή και παράλληλα σε αυτήν υπάρχουν κατασκευές με ανακλαστικές επιφάνειες με ύψος μεγαλύτερο του 1.5m από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Στην περίπτωση αυτή, η ηχητική στάθμη στο δέκτη προσανξάνεται κατά μια τιμή που σχετίζεται με τη γωνία θ' (το άθροισμα των γωνιών που κείνται έναντι των κατασκευών αυτών) και θ (η γωνία οράσεως).

Βήμα 5^ο

Υπολογίζεται η στάθμη SEL κάνοντας τις διορθώσεις των βημάτων 3 και 4 στη στάθμη SEL_{ref} . Απ' τη στάθμη SEL που προκύπτει υπολογίζεται η στάθμη L_{Aeq} για την απαιτούμενη χρονική περίοδο και αριθμό συρμών.

Οι στάθμες ηχητικής έκθεσης SEL μετατρέπονται σε L_{Aeq} για συγκεκριμένες περιόδους της ημέρας, βάση της κυκλοφορίας των αντίστοιχων συρμών στις αντίστοιχες περιόδους. Η μέθοδος έχει σχέσεις που υπολογίζει τη στάθμη L_{Aeq} για τις περιόδους 00.00 ως 06.00 το πρωί και 06.00 ως 24.00.

Βήμα 6^ο

Συνδυάζοντας τις στάθμες θορύβου L_{Aeq} από όλους τους τομείς και για όλους τους συρμούς στο σημείο που βρίσκεται ο δέκτης, υπολογίζεται το L_{Aeq} για μέρα και νύχτα.

Οι στάθμες που αφορούν την ημέρα και τη νύχτα πρέπει να αθροίζονται ξεχωριστά. Υπενθυμίζεται ότι η άθροιση σταθμών θορύβου γίνεται κατά τη γενική σχέση

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{Aeq_i}}{10} \right)} \right)$$

3.6.2. Μεθοδολογία μετρήσεων στα πλαίσια της βρετανικής μεθόδου

Η μέθοδος προβλέπει τη διενέργεια επί τόπου μετρήσεων είτε όταν το μοντέλο πρόβλεψης δεν επαρκεί για να κάνει προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών, είτε δεν υπάρχουν στοιχεία στη μέθοδο, για ένα τουλάχιστον εκ των σιδηροδρομικού οχήματος ή γραμμής. Γενικά, η μετρήσεις πρέπει να αποφεύγονται. Γι' αυτό και σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να εξαντλούνται οι δυνατότητες προσομοίωσης της υφιστάμενης κατάστασης στα πλαίσια των μοντέλων της μεθόδου. Οι μετρήσεις θα πρέπει όταν είναι δυνατόν να διεξάγονται κατά τη χρονική περίοδο 06.00-24.00 και 00.00-06.00. Επιπλέον θα πρέπει να εξασφαλιστεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του μέσου σταθερής τροχιάς ότι ο θόρυβος από άλλες εξωτερικές πηγές δεν θα έχει σημαντική συνεισφορά στη διαμόρφωση της συνολικής στάθμης.

Πότε γίνονται μετρήσεις

1. όταν οι κυκλοφοριακές συνθήκες του σιδηροδρόμου βρίσκονται εκτός των ορίων ισχύος των πινάκων της μεθόδου
2. όταν οι κυκλοφοριακές συνθήκες του σιδηροδρόμου ή το είδος της τοποθεσίας είναι περίπλοκες ή ασυνήθιστες ώστε να γίνει χρήση των τυπικών σιδηροδρομικών δεδομένων της μεθόδου
3. όταν το σύστημα μετακινήσεων σταθερής τροχιάς που εξετάζεται δεν είναι σιδηρόδρομος που κινείται σε συνήθεις σιδηροτροχιές
4. ή όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν νέοι τύποι σιδηροδρομικών οχημάτων για τα οποία θα πρέπει να υπολογιστεί η ηχητική στάθμη αναφοράς τους ή οι υπάρχοντες συρμοί θα κινηθούν σε γραμμές που δεν περιλαμβάνονται από τη CRN

Συνθήκες μετρήσεων

Η μέθοδος δίνει πρόβλεψη με την παραδοχή ότι επικρατούν στο περιβάλλον, στη γραμμή

1. συνθήκες γραμμής

Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με το έρμα της γραμμής όχι παγωμένο και κατά προτίμηση στεγνό. Οι σιδηροτροχιές πρέπει να είναι στεγνές.

2. άνεμος

- (i) η διεύθυνση του ανέμου πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να δίνει συνιστώσα κατά τη διεύθυνση σιδηροτροχιά-σημείο λήψεως, που να υπερβαίνει την παράλληλη προς τη γραμμή συνιστώσα
- (ii) η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 1.5m κοντά στο σημείο

λήψεως χωρίς να επηρεάζεται από την πρόσοψη δεν υπερβαίνει τα 2m/sec κατά τη φορά από τη γραμμή προς το σημείο λήψης

- (iii) η ταχύτητα του ανέμου στο μικρόφωνο προς όλες τις διευθύνσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5m/sec

Σε κάθε περίπτωση συνίσταται να λαμβάνονται μέτρα προστασίας του μικροφώνου από τον άνεμο και οι μετρήσεις να λαμβάνουν χώρα μόνο όταν οι ακραίες τιμές του θορύβου από τον άνεμο στο μικρόφωνο είναι 10dB(A) χαμηλότερες από τις μετρημένες ή αντιληπτές τιμές L_{Amax} .

3. θέση μικροφώνου

Το σημείο μέτρησης πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να βρίσκεται σε απόσταση 1m από την πιο εκτεθειμένη πρόσοψη του κτιρίου. Το μικρόφωνο θα πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος χαρακτηριστικό για το ύψος των παραθύρων (συνήθως 4m για τα παράθυρα του 1^{ου} ορόφου)

4. δειγματοληψία

Για τον καθορισμό των μεγεθών $L_{Aeq,18h}$ και $L_{Aeq,6h}$ μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνουν μετρήσεις θορύβου για το προσδιορισμό της SEL κάθε διέλευσης συρμού σε όλη τη χρονική περίοδο που υπάρχει ενδιαφέρον εκτός αν η σύνθεση των διερχόμενων συρμών, καθώς και η ταχύτητα με την οποία διέρχεται κάθε συρμός παραμένουν αρκούντως σταθερές στη σχετική χρονική περίοδο. Σε αυτή την περίπτωση, είναι αποδεκτό να γίνουν οι μετρήσεις για αντιπροσωπευτικό δείγμα διελεύσεων για κάθε τύπο συρμού σε κάθε γραμμή και όχι για το σύνολό τους, για να καθοριστεί έτσι μια αριθμητική μέση τιμή της SEL για κάθε περίπτωση. Κατά τη μέτρηση της στάθμης ηχητικής έκθεσης (SEL) είναι απαραίτητο να καταγραφούν ο τύπος του συρμού, η κατεύθυνση και η ταχύτητά του. Οι συρμοί, ιδίου τύπου διαφορετικών ταχυτήτων ανάγονται στην ίδια ταχύτητα. Με τις προϋποθέσεις αυτές, οι αποκλίσεις της τάξης $\pm 2.5\text{dB(A)}$ για τη στάθμη ηχητικής έκθεσης θεωρούνται φυσιολογικές και τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά για σιδηροδρομικά οχήματα που κινούνται σε δεδομένη γραμμή.

Από τη μέση τιμή SEL που θα προκύψει μπορεί να υπολογιστούν οι στάθμες θορύβου $L_{Aeq,18h}$ και $L_{Aeq,6h}$ από τις γνωστές σχέσεις

$$L_{Aeq,6h} = SEL - 43.4 + 10\log_{10}Q_{night}$$

$$L_{Aeq,18h} = SEL - 48.1 + 10\log_{10}Q_{day}$$

για κάθε συνδυασμό γραμμής-σιδηροδρομικού οχήματος. Απ' τις τιμές αυτές υπολογίζεται η συνολική ηχητική στάθμη για το σύνολο του σιδηροδρομικού δικτύου.

Εισαγωγή νέου τύπου συρμού ή γραμμής στη μέθοδο

Η μέθοδος περιλαμβάνει στη βάση δεδομένων της έναν αριθμό σιδηροδρομικών οχημάτων, επιβατικών και εμπορευματικών. Σε περιπτώσεις που πρέπει να μελετηθεί όχημα που δεν ανήκει στη βάση δεδομένων τότε αν ο νέος τύπος έχει ομοιότητες με κάποια από τις υπάρχουσες κατηγορίες θα πρέπει να γίνει μόνο η κατάλληλη αντιστοίχιση. Τα σφάλματα που θα προκύψουν από αυτή την προσέγγιση δεν είναι σημαντικά όταν η συνεισφορά του νέου τύπου σιδηροδρομικού οχήματος στη συνολική στάθμη θορύβου είναι μικρή. Τα ίδια ισχύουν όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί γραμμή νέου τύπου.

Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, απαιτείται η διενέργεια μετρήσεων για τον προσδιορισμό της ηχητικής έκθεσης αναφοράς. Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνουν αυτές είναι καθορισμένος, όσον αφορά τη θέση του σημείου μέτρησης (απόσταση και ύψος μικροφώνου), την αρχή και το πέρας των μετρήσεων, το θόρυβο από άλλες πηγές, το είδος και την κατάσταση της γραμμής, τα χαρακτηριστικά κίνησης του συρμού, καθώς και τα στοιχεία της περιοχής μεταξύ του οχήματος και της θέσης μέτρησης. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να παρουσιάζονται σε κατάλληλο φύλλο.

4. Εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 για το θόρυβο σε τμήμα του δικτύου του Ο.Σ.Ε..

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα τμήμα της διπλωματικής εργασίας αφορά σε μετρήσεις και προβλέψεις σε ένα τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε. και στη συνέχεια θα υπολογιστεί η συνεισφορά του σιδηροδρόμου στην παραγωγή θορύβου, με τη μέθοδο CRN-1995. Το τμήμα αυτό βρίσκεται στην περιοχή του Μενιδίου, στην περιοχή Λυκότρυπα η οποία βρίσκεται στα σύνορα με το δήμο Αγ.Αναργύρων όπως φαίνεται στο απόσπασμα χάρτη της Εικόνας 4.1, σε χαρακτηριστική για την περιοχή θέση. Έγινε προσαρμογή της μεθόδου σε κατάλληλο τμήμα γραμμής και πρόβλεψη του δείκτη L_{den} στη θέση Λυκότρυπα. Στην ίδια θέση έγιναν μετρήσεις του θορύβου από διελεύσεις συρμών. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προβλέπει η μέθοδος.

4.1. Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CEL-440A.1 ιδιοκτησίας του Ε.Μ.Π.. Οι δυνατότητες του συγκεκριμένου ηχομέτρου, αν και σχετικά περιορισμένες, κρίθηκαν για την εν λόγω εφαρμογή ικανοποιητικές.

Το όργανο καταγράφει θόρυβο δίνοντας τιμές σε ένα αριθμό δεικτών για το διάστημα καταγραφής. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες L_{eq} , L_{AE} , L_{mx} . Το όργανο δεν μπορεί να παρουσιάσει το φάσμα του θορύβου που καταγράφεται κατά τη διάρκεια μιας καταγραφής. Συνεπώς δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε τη στάθμη ηχητικής πίεσης ενός θορύβου ανά ζώνη συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, το ηχόμετρο μπορεί να κάνει στάθμιση των αποτελεσμάτων βάση του φάσματος συχνοτήτων, καθώς η αδυναμία που παρουσίασης του οφείλεται στο λογισμικό που είναι εγκατεστημένο σε αυτή την έκδοση. Τέλος το ηχόμετρο επιτρέπει τη χρονική στάθμιση της καταγραφής με ρύθμιση του κύκλου μέτρησης στη θέση Slow, Fast, Impulse. Στις θέσεις αυτές ο κύκλος μέτρησης είναι 1, 0.125 και 0.035sec αντίστοιχα. Για τη μέτρηση του σιδηροδρομικού θορύβου έγινε χρήση της σταθμιστικής καμπύλης A και ο κύκλος μέτρησης είναι στη θέση Fast (0.125sec).

4.2. Υπολογιζόμενοι δείκτες

Η εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης του θορύβου γίνεται με το δείκτη L_{den} . Ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί με μετρήσεις του L_{Aeq} κατά τα διαστήματα 07.00-19.00, 19.00-23.00 και 23.00-07.00. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει μέτρηση για αντιπροσωπευτικό χρονικό διάστημα για κάθε μια από αυτές τις χρονικές περιόδους.

Σκοπός των μετρήσεων είναι ο έλεγχος της δυνατότητας εφαρμογής της βρετανικής μεθόδου CRN στο δίκτυο του Ο.Σ.Ε. και η αποτίμηση της συνεισφοράς των διαφόρων τύπων συρμών που κυκλοφορούν στο δίκτυο στην παραγωγή θορύβου. Οι μετρήσεις έγιναν τον Ιούνιο του 2005. Κατά την καταγραφή θορύβου από τους διερχόμενους συρμούς ελήφθησαν υπ' όψη οι μετεωρολογικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία και άνεμος, καθώς και το ηχητικό περιβάλλον στο χώρο της μέτρησης λόγω άλλων πηγών θορύβου.

4.3. Διερχόμενο τροχαίο υλικό

Από τη γραμμή διέρχονται συρμοί που εκτελούν δρομολόγια του Ο.Σ.Ε. από και προς Θεσσαλονίκη, Χαλκίδα, Βόλο, Στυλίδα, Καλαμπάκα, Ορμένιο και Δικαία. Επιπλέον, απ' το τμήμα αυτό περνούν και οι συρμοί του προαστιακού σιδηροδρόμου που ενώνουν το κέντρο των Αθηνών με το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος. Οι εφαρμογή αυτή θα γίνει μόνο για τους επιβατικούς συρμούς. Οι εμπορικοί συρμοί έχουν μικρή συμμετοχή στη συνολική κυκλοφορία. Για τα επιβατικά δρομολόγια αυτών των διαδρομών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συνθέσεις συρμών:

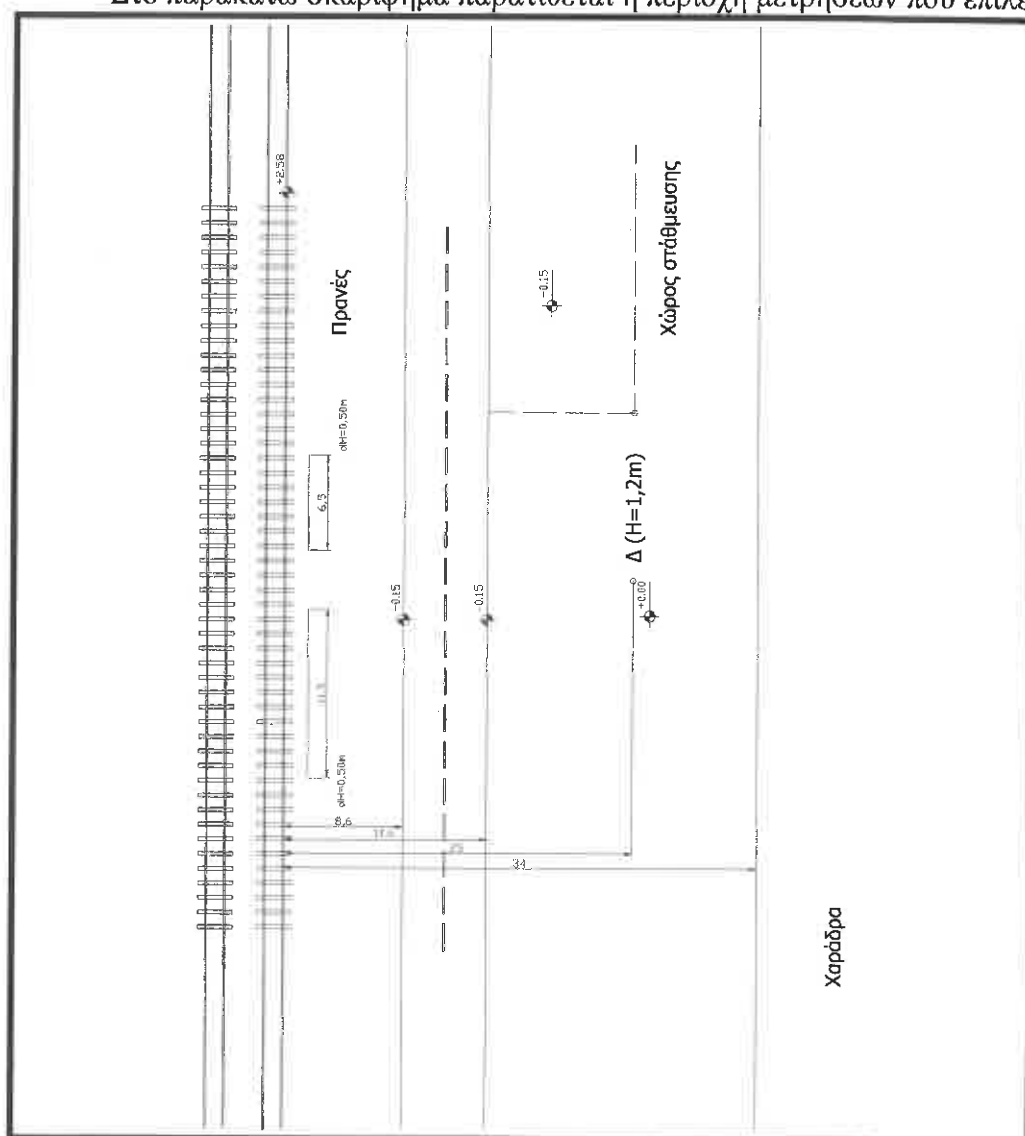
- Ντηζελάμαξες Intercity πεντάδυμες (D.M.U.), κλάσης 520 κατασκευής A.E.G. (DE-IC2000N) μήκους 128,2m μονές ή διπλές ($2 \times 128,2 = 256,4m$)
- Ντηζελάμαξες Intercity τετράδυμες (D.M.U.), κλάσης 520 κατασκευής A.E.G. (DE-IC2000N) μήκους 101,8m ή διπλές ($2 \times 101,8 = 203,6m$)
- Συρμοί κινούμενοι από μηχανές diesel κλάσης 220 DE2000 κατασκευής Adtranz/Bombardier. Το μήκος της μηχανής diesel είναι 19,4m
- Οι συρμοί αποτελούνται από τρία ως οχτώ βαγόνια, ανάλογα με τον προορισμό. Κάθε βαγόνι έχει μήκος 24,5m.
- Ντηζελάμαξες τύπου Desiro (D.M.U.), GTW-2/6, κατασκευής Bombardier διπλές ή μονές. Το μήκος της είναι $102,5ft = 31,24$ ή $102,5ft \times 2 = 31,24m \times 2 = 62,48m$.

Η προσπάθεια που καταβλήθηκε αρχικά ήταν η εφαρμογή της μεθόδου CRN για αυτούς τους συρμούς σε ένα τμήμα γραμμής. Οι υπολογισμοί της μεθόδου γίνονται σε δύο μέρη, αυτό που αναφέρεται στην πηγή και αυτό που αναφέρεται στη διάδοση. Εμπόδιο για την εφαρμογή της μεθόδου ήταν η εύρεση της στάθμης ηχητικής έκθεσης αναφοράς των εξεταζόμενων σιδηροδρομικών οχημάτων. Η μέθοδος CRN περιλαμβάνει κάποιους τύπους που χρησιμοποιούνται στους βρετανικούς σιδηροδρόμους. Έγινε προσπάθεια να γίνει αντιστοίχιση του τροχαίου υλικού που υπάρχει στην Ελλάδα με αυτό της Μ. Βρετανίας. Για το λόγο αυτό βρέθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ελληνικού και του βρετανικού τροχαίου υλικού. Για το ελληνικό τροχαίο υλικό αυτά είναι:

Τροχαίο Υλικό	Τύπος Άξονα	Ισχύς (kW)	Δύναμη Έλξης (kN)	Μέγιστη Ταχύτητα (km/h)
Adtranz /Bombardier DE2000 class A.471	Bo'Bo'	2000	260	200
AEG DE-IC2000N class 601	DMU-4	1990	150	160
AEG DE-IC2000N class 651	DMU-5	1990	150	160
Hellenic Shipyards GTW2/6	DMU-2	400	55	115

Πίνακας 4.1 (πηγή 19)

Ωστόσο οι διαφορές των τεχνικών χαρακτηριστικών των βρετανικών οχημάτων ήταν σημαντικές από αυτά των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο η προσαρμογή της μεθόδου με μέτρηση της ηχητικής στάθμης αναφοράς του ελληνικού τροχαίου υλικού με ηχομετρήσεις σε κατάλληλη θέση του δικτύου.



Η θέση που επιλέχθηκε βρίσκεται στην περιοχή της Δεκέλειας. Κοντά στη θέση βρίσκεται το αεροδρόμιο της Τανάγρας καθώς και μετεωρολογικός σταθμός της Ε.Μ.Υ. Η γραμμή στη θέση μέτρησης είναι ελαφρά ανωφέρεια στην κατεύθυνση προς Θεσσαλονίκη ενώ σε απόσταση περίπου 1,5km βρίσκεται ο σιδηροδρομικός σταθμός της Δεκέλειας.

4.5. Μεθοδολογία μέτρησης στάθμης ηχητικής έκθεσης αναφοράς

Για την προσαρμογή της μεθόδου έγιναν οι εξής παραδοχές:

1. Από τη θέση περνούν οι ίδιοι συρμοί που περνούν και από τη θέση εφαρμογής
2. Έγινε οπτικός έλεγχος της γραμμής και έγινε η παραδοχή ότι βρίσκεται στην ίδια κατάσταση με αυτήν της θέσης εφαρμογής.
3. Οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν ελήφθησαν υπ' όψη με εξαίρεση τον άνεμο.
4. Η επιρροή εμποδίων όπως χαμηλοί θάμνοι στις μετρήσεις κρίθηκε αμελητέα

Από το κοντινό αεροδρόμιο της Τανάγρας γίνονται τακτικές πτήσεις μικρών ελικοφόρων αεροσκαφών. Οι πτήσεις αυτές περιορίζονται τις απογευματινές ώρες. Παράλληλα, κοντά στη θέση των μετρήσεων διέρχεται οδός με μικρή μεν, αλλά σημαντική, δε, κυκλοφορία σταθερή σε γενικές γραμμές όλη τη διάρκεια της ημέρας. Για την εύρεση του κάτω ορίου έγιναν μετρήσεις του δείκτη $L_{eq}(A)$ στην περιοχή χωρίς να καταγράφονται οι διελύσεις των συρμών. Έγιναν μετρήσεις τόσο σε πρωινές (09.00-14.00), όσο και σε απογευματινές ώρες (16.00-21.00). Η διάρκεια των μετρήσεων, δε, ήταν μία ώρα, διάστημα που θεωρήθηκε επαρκές για να καλύψει αντιπροσωπευτικές περιόδους. Παράλληλα με τη μέτρηση του θορύβου γινόταν και καταγραφή της διερχόμενης κυκλοφορίας. Οι μετρήσεις έγιναν σε ημέρες από Δευτέρα ως Παρασκευή ώστε να αντιπροσωπεύουν μια μέση ημέρα. Τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από αυτές τις μετρήσεις ήταν:

- Το πρωί ο θόρυβος υποβάθρου είχε μια μέση τιμή 57,5 dB(A) ενώ για το απόγευμα 53,1 dB(A). Οι διακυμάνσεις γύρω από αυτή την τιμή ήταν μικρές, της τάξης του 0,5 dB(A).
- Η διαφορά μεταξύ των πρωινών και απογευματινών τιμών οφείλεται κυρίως στη λειτουργία του αεροδρομίου και κατά δεύτερο λόγο στη μείωση της διερχόμενης κυκλοφορίας οχημάτων.

Δοκιμαστικές καταγραφές διελύσεων συρμών έδειξε ότι η μέγιστη στάθμη θορύβου δεν υπερβαίνει τα 100dB(A). Το ηχόμετρο μπορεί να καταγράψει ηχητικά συμβάντα σε ένα εύρος 70dB(A) (π.χ. 20-90dB(A), 30-100dB(A),...κ.τ.λ.). Το κάτω όριο θα πρέπει να αντιστοιχεί ο θόρυβος υποβάθρου ενώ το άνω να υπερβαίνει τη μέγιστη στάθμη της καταγραφόμενης διέλευσης. Η ρύθμιση έγινε για το διάστημα 60-130dB(A) ώστε να μην καταγράφεται ο θόρυβος υποβάθρου και να καταγράφεται όλος ο θόρυβος κατά τη διέλευση του συρμού.

Για τις μετρήσεις έγινε προσπάθεια να ακολουθηθεί η μεθοδολογία που προτείνει η CRN-1995.

Θέση μικροφώνου

Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 25m από την κοντινότερη σιδηροτροχιά όπως απαιτείται.

Το ύψος του μικροφώνου θα πρέπει να είναι από 1,2m πάνω από το έδαφος ως 3,5m από το ύψος της κοντινότερης σιδηροτροχιάς. Στην περίπτωση που εξετάζεται ήταν 1,2m από το έδαφος. Τοποθετήθηκε, δε, κατακόρυφα ώστε το διάφραγμα του μικροφώνου του ηχομέτρου να βρίσκεται σε οριζόντια θέση.

Είδος και κατάσταση γραμμής

Η γραμμή θα έπρεπε να έχει κατά μήκος κλίση και να είναι ευθεία. Αυτή είναι μια συνθήκη που δεν πληρούνταν στη συγκεκριμένη θέση. Ακόμα θα έπρεπε να είναι συνεχής συγκολλημένη σιδηροτροχιά σε στρωτήρες από σκυρόδεμα, τοποθετημένοι σε έρμα και να είναι σε «καλή κατάσταση». Αυτό σημαίνει ότι η συνεισφορά της κακής κατάστασης της γραμμής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2dB(A).

Χαρακτηριστικά της περιοχής μέτρησης

Η περιοχή μέτρησης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζονται οι συνθήκες ελεύθερης διάδοσης του θορύβου κατά τη διαδρομή μεταξύ της ηχητικής πηγής και του μικροφώνου. Οι συνθήκες αυτές εξασφαλίζονται όταν δεν υπάρχουν σε ακτίνα 50m από τη θέση μέτρησης μεγάλα αντικείμενα με ανακλαστικές ιδιότητες όπως ηχοπετάσματα, λόφοι, βράχοι, γέφυρες ή κτίρια. Η περιοχή αυτή ακόμα, δεν πρέπει να περιλαμβάνει μεγάλες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες όπως υψηλό γρασίδι, έρμα ή άλλες γραμμές.

Κοντά στο μικρόφωνο δεν πρέπει να υπάρχουν εμπόδια που μπορεί να διαταράξουν το ηχητικό πεδίο. Κατά συνέπεια δεν πρέπει να υπάρχει άτομο μεταξύ του μικροφώνου και της ηχητικής πηγής και ο παρατηρητής να στέκεται σε σημείο που να μην επηρεάζει της μετρήσεις. Η περιοχή σε μεγάλο βαθμό ικανοποιούσε τις συνθήκες ελεύθερης διάδοσης αν και το άτομο που έκανε την καταγραφή ήταν κοντά στο ηχόμετρο για να το κρατά καθώς δεν χρησιμοποιήθηκε τρίποδας.

Καιρικές συνθήκες

Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου δεν υπερβαίνει τα 5m/s και δεν βρέχει ή χιονίζει. Η γραμμή πρέπει να είναι στεγνή ενώ το έρμα και το έδαφος που έρχεται σε επαφή να μην είναι παγωμένα.

Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γινόντουσαν όταν δεν έβρεχε και όταν ο άνεμος δεν ήταν ιδιαίτερα αντιληπτός και μόνο όταν στο site της Ε.Μ.Υ. για την Τανάγρα η ταχύτητα του ανέμου ήταν μικρότερη από 4knots (~2m/sec).

Μετρούμενες ποσότητες

Οι μετρήσεις γίνονται για ανεξάρτητες διελεύσεις συρμών, που διέρχονται από την πιο κοντινή στο μικρόφωνο γραμμή. Ο συρμός θα έπρεπε να κινείται με σταθερή ταχύτητα στην περιοχή μέτρησης χωρίς να επιταχύνει ή να πεδίζει. Αυτό πιθανόν δεν συμβαίνει σε κάποιες διελεύσεις λόγω της ύπαρξης του κοντινού σταθμού της Δεκέλειας που υποχρεώνει κάποιους από τους διερχόμενους συρμούς σε στάση. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η ταχύτητα αυτή του συρμού και η στάθμη έκθεσης απλού συμβάντος (SEL).

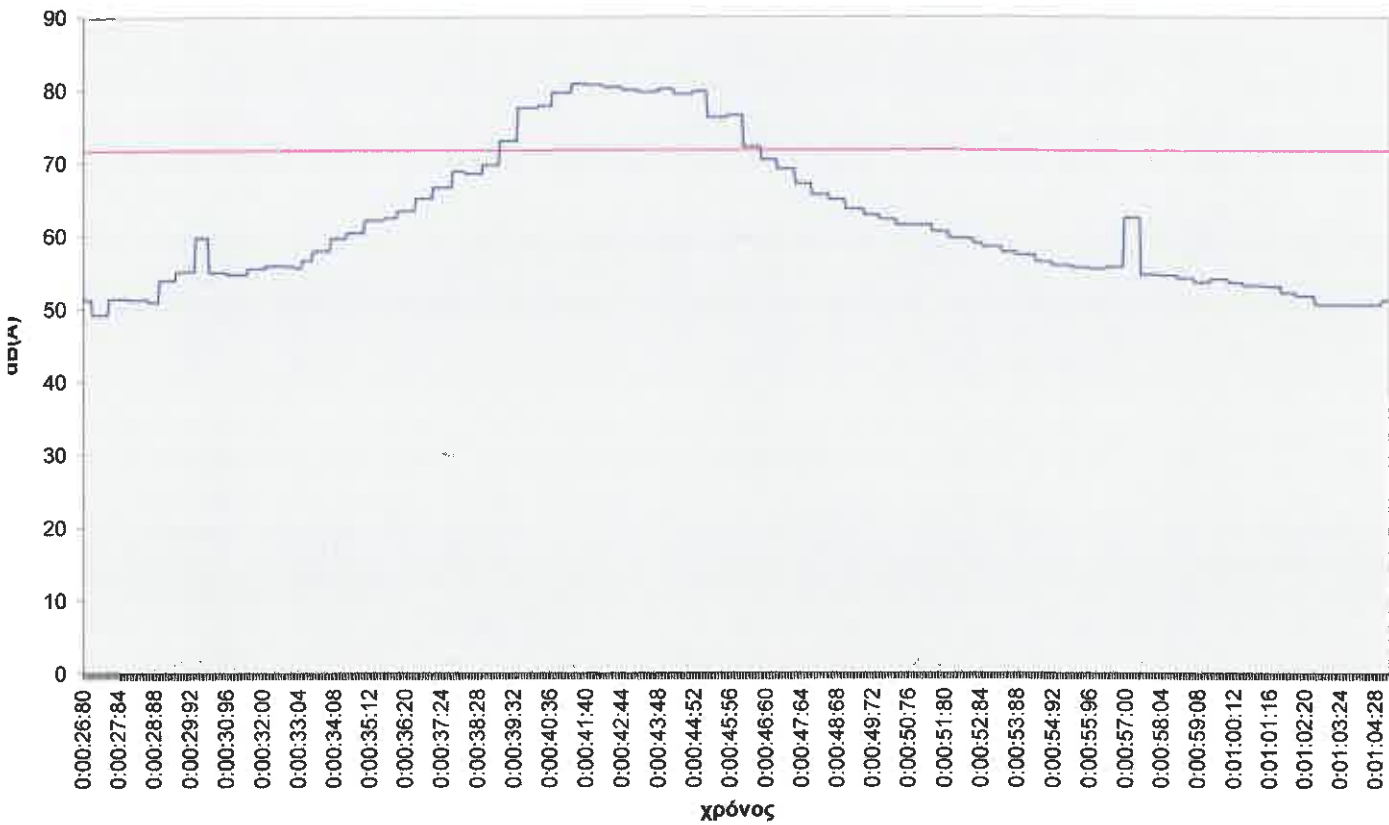
Θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι κατά τη μέτρηση περικλείεται όλο το γεγονός της διέλευσης του συρμού. Το ελάχιστο χρονικό διάστημα καταγραφής είναι αυτό που η στάθμη ηχητικής πίεσης του συρμού, που πλησιάζει το σημείο μέτρησης, είναι το πολύ 10dB(A) μικρότερη της μέγιστης τιμής. Επειδή το όργανο δεν έχει τη δυνατότητα αυτόματης καταγραφής αυτού του διαστήματος, η καταγραφή γινόταν για το διάστημα που ο συρμός ήταν αντιληπτός από την ακοή, όπως εναλλακτικά προτείνει και η μέθοδος CRN. Θεωρήθηκε σκόπιμο να βρεθεί η απόκλιση της τιμής μιας τέτοιας μέτρησης σε σχέση με την τιμή της στάθμης έκθεσης απλού συμβάντος που αντιστοιχεί στο διάστημα που η στάθμη ηχητικής πίεσης είναι μικρότερη της μέγιστης κατά 10dB(A). Για το λόγο αυτό έγινε βιντεοσκόπηση διέλευσης συρμού, με παράλληλη βιντεοσκόπηση των στιγμιαίων ενδείξεων της στάθμης ηχητικής πίεσης στο ηχόμετρο. Το βίντεο παίχθηκε καρέ καρέ και καταγράφηκαν σε φύλλο excell η στάθμη ηχητικής πίεσης για κάθε ένα απ' αυτά (Πίνακας 4.2). Ο χρόνος μεταξύ δύο καρέ ήταν 0.04sec. Ακόμα, στην οθόνη του ηχομέτρου υπάρχουν ενδείξεις καταγραφής και παύσης μιας μέτρησης, συνεπώς στο βίντεο μπορούν να καθοριστούν οι χρονικές στιγμές αφετηρίας και τερματισμού της μέτρησης. Υπολογίστηκαν η στάθμη έκθεσης απλού συμβάντος για το χρόνο καταγραφής και για το χρονικό διάστημα που οι στάθμες ηχητικής πίεσης ήταν μικρότερες κατά 10dB(A) της μέγιστης τιμής. Από τους υπολογισμούς προέκυψαν 87,7 και 87,6 dB(A) αντίστοιχα. Το ηχόμετρο, για την ίδια διέλευση, κατέγραψε στάθμη SEL, 88,1dB(A). Η απόκλιση αυτή θεωρήθηκε μικρή και έτσι οι διελεύσεις καταγράφονταν για το χρόνο που ο συρμός γινόταν αντιληπτός στο σημείο μέτρησης.

Για να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από τον θόρυβο υποβάθρου αυτός πρέπει να είναι κατά 10dB(A) τουλάχιστον χαμηλότερος της μέγιστης τιμής που προκύπτει κατά τη διέλευση του συρμού. Αν και πηγές όπως οχήματα ή διερχόμενα αεροπλάνα δεν ξεπερνούσαν 80dB(A), οι μετρήσεις γινόντουσαν μόνο όταν παράλληλα δεν υπήρχε συνεισφορά άλλων ηχητικών πηγών. Μια άλλη συνήθης πηγή ήταν η κόρνα του τρένου κατά τη διέλευση του συρμού από το σημείο, όπου και σε αυτές τις περιπτώσεις η καταγραφή δεν λαμβανόταν υπ' όψη.

Οι μετρήσεις της ταχύτητας θα πρέπει να γίνονται με ακρίβεια $\pm 5\%$. Ο υπολογισμός της ταχύτητας γινόταν με μέτρηση του χρόνου της μαγνητοσκοπημένης διέλευσης συρμού γνωστού μήκους από ένα σταθερό σημείο που μπορούσε να γίνει με ακρίβεια 0.04sec. Για συρμό μήκους 200m που κινείται με ταχύτητα 75km/h η απόκλιση είναι $\pm 3,5\text{km/h}$, δηλαδή $< 5\%$.

Η μέθοδος προτείνει όταν υπάρχει νέα κατηγορία οχημάτων μετρήσεις της SEL για διάφορες ταχύτητες λειτουργίας, από την ελάχιστη ως τη μέγιστη, για τη χάραξη διαγράμματος $SEL_{ref}-V$. Αυτό, ωστόσο δεν θα ήταν εφικτό με μέτρηση σε ένα σημείο καθώς στο σημείο της γραμμής οι ταχύτητες διέλευσης των συρμών δεν είχαν σημαντικές διαφορές. Η μέθοδος CRN-1995 δίνει δύο βασικές σχέσεις που συνδέουν την ταχύτητα V με τη στάθμη SEL του τροχαίου υλικού που περιλαμβάνει η μέθοδος. Η υπόθεση που έγινε είναι ότι οι διερχόμενοι συρμοί του Ο.Σ.Ε. ακολουθούν τις ίδιες βασικές σχέσεις.

Διέλευση συρμού (Adtranz+3 βαγόνια σε καλή κατάσταση) (75km/h)



Πίνακας 4.2

4.6. Επεξεργασία μετρήσεων

4.6.1. Υπολογισμός ηχητικής στάθμης αναφοράς διερχόμενου τροχαίου υλικού.

Έγιναν μετρήσεις για κάποιες συνθέσεις διερχόμενων συρμών με στόχο τον προσδιορισμό της ηχητικής στάθμης αναφοράς των σιδηροδρομικών οχημάτων και μηχανών που τους αποτελούν. Ο λόγος που υπολογίζεται η ηχητική στάθμη αναφοράς μεμονωμένων μηχανών και ελκυσόμενων οχημάτων και όχι συρμών, είναι ότι έτσι επιτρέπει τον υπολογισμό της ηχητικής στάθμης αναφοράς συρμών με διαφορετική σύνθεση. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να συμβεί με τις ντηζελάμαξες (DMU). Στις περιπτώσεις αυτές υπολογίζεται η ηχητική στάθμη αναφοράς για ολόκληρη την αμαξοστοιχία.

Αρχικά υπολογίστηκαν οι ηχητικές στάθμες αναφοράς ολόκληρων συρμών και η ταχύτητά τους. Κρίθηκε σκόπιμο τα βαγόνια να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που φαινόταν καινούρια και που πιθανόν να ήταν σε καλύτερη κατάσταση και σε αυτά που ήταν παλαιότερα.

Η τιμή της ηχητικής στάθμης κάθε συρμού προκύπτει ως άθροισμα του θορύβου των οχημάτων και της μηχανής που το αποτελούν. Συνεπώς, το πρόβλημα του προσδιορισμού της ηχητικής στάθμης αναφοράς κάθε στοιχείου ενός συρμού ανάγεται σε ένα πρόβλημα επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων. Αρκεί οι συρμοί που εξετάζονται να κινούνται με την ίδια ταχύτητα. Ποιο συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν οι στάθμες θορύβου για τις παρακάτω συνθέσεις. Οι μετρήσεις για τους συρμούς αξιολογήθηκαν ως ικανοποιητικές όσον αφορά τις συνθήκες υπό τις οποίες ελήφθησαν.

Σύνθεση συρμού	Ταχύτητα	SEL
Adtranz+3βαγόνια (καιν.)	75	88,4
Adtranz+8βαγόνια (παλ.)	75	94,1
Adtranz+1βαγόνι (παλ.)+5βαγόνια (καιν.)	75	90,5

Εάν $L_{Adtranz}$ η στάθμη θορύβου της μηχανής, $L_{bag.(κ)}$ η στάθμη θορύβου των βαγονιών που βρίσκονται σε καλή κατάσταση και $L_{bag.(π)}$ αυτή των βαγονιών που δεν βρίσκονται σε καλή κατάσταση τότε θα ισχύουν τα παρακάτω:

$$88,4 = 10 \log \left(10^{L_{Adtranz}/10} + 3 \cdot 10^{L_{bag.(κ)}/10} \right)$$

$$94,1 = 10 \log \left(10^{L_{Adtranz}/10} + 8 \cdot 10^{L_{bag.(π)}/10} \right)$$

$$90,5 = 10 \log \left(10^{L_{Adtranz}/10} + 10^{L_{bag.(π)}/10} + 5 \cdot 10^{L_{bag.(κ)}/10} \right)$$

Πρόκειται για ένα σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους η λύση του οποίου δίνει:

$$L_{Adtranz} = 86,6 \text{ dB(A)}$$

$$L_{bag.(κ)} = 79,1 \text{ dB(A)}$$

$$L_{bag.(π)} = 84,2 \text{ dB(A)} \quad \text{για ταχύτητα } 75 \text{ km/h}$$

Για τις αμαξοστοιχίες Intercity και Desiro επειδή είναι τύπου DMU (Diesel Multiple Units) η αντίστοιχη μέτρηση γίνεται για το σύνολο του συρμού. Έτσι, για την τετράδυμη και την πεντάδυμη προέκυψε:

$$\begin{aligned} L_{IC\text{τετράδυμη}} &= 91.6 \text{ dB(A)} (110\text{km/h}) \\ L_{IC\text{πεντάδυμη}} &= 90.5 \text{ dB(A)} (95\text{km/h}) \\ L_{\text{Desiro}} &= 78.3 \text{ dB(A)} (40\text{km/h}) \end{aligned}$$

Η βρετανική μέθοδος CRN-1995 υπολογίζει την ηχητική στάθμη αναφοράς για όχημα που κινείται με σταθερή ταχύτητα σύμφωνα με τη σχέση

$$SEL = 31.2 + 20 \log_{10} V \text{ σε dB(A)} \quad (4.1)$$

και για $V = 75\text{km/h}$ $SEL = 68,7 \text{ dB(A)}$. Συνεπώς οι διορθώσεις του τροχαίου υλικού θα είναι:

$$\begin{aligned} \text{Adtranz} &= +17,9 \text{ dB(A)} \\ \text{βαγ(κ)} &= +10,4 \text{ dB(A)} \\ \text{βαγ(π)} &= +15,5 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

Στον παραπάνω υπολογισμό έγινε η υπόθεση ότι η μηχανή της Adtranz κινείται με σταθερή ταχύτητα και εν πάση περιπτώσει δεν λειτουργεί σε πλήρη ισχύ. Για μηχανές diesel που λειτουργούν σε πλήρη ισχύ η παραπάνω σχέση αντικαθίσταται με την παρακάτω:

$$SEL = 112.6 - 10 \log_{10} V \quad (4.2)$$

και για 75km/h προκύπτει $SEL = 93,8\text{dB(A)}$. Η τιμή αυτή είναι αισθητά παραπάνω από την τιμή που βρέθηκε για τη μηχανή Adtranz ($-7,2 \text{ dB(A)}$). Καμία μηχανή diesel που χρησιμοποιείται στους βρετανικούς σιδηροδρόμους δεν έχει χαμηλότερη ηχητική στάθμη αναφοράς από αυτό το νούμερο. Συνεπώς, πιθανότατα η υπόθεση που κάναμε ήταν σωστή.

Για ταχύτητα 95km/h , 110km/h και 40km/h από τη σχέση (4.1) προκύπτει $SEL = 70.8 \text{ dB(A)}$, 72.0dB(A) και 63.2dB(A) αντίστοιχα. Συνεπώς οι διορθώσεις για τις αμαξοστοιχίες IC θα είναι:

$$\begin{aligned} IC \text{ τετράδυμη} &= +19,6 \text{ dB(A)} \\ IC \text{ πεντάδυμη} &= +19,7 \text{ dB(A)} \\ \text{Desiro} &= +15,1 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα όρια που προτείνει η Ε.Ε. είναι:

$$\begin{aligned} \text{Μηχανές diesel:} & L_{pAeq,T} = 85\text{dB(A)} \\ \text{DMU's:} & L_{pAeq,T} = 82\text{dB(A)} \\ \text{Επιβατικά οχήματα:} & L_{pAeq,T} = 80\text{dB(A)} \end{aligned}$$

όπου

$$L_{pAeq,T} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (p_A(t) / p_0)^2 dt$$

Τα παραπάνω όρια ισχύουν για οχήματα που κινούνται με 80km/h σε απόσταση 7,5m από το μέσο της γραμμής.

4.6.2. Έλεγχος εγκυρότητας της μεθόδου CRN για τη μέτρηση στη στάθμη Δεκέλεια - Συμπεράσματα

Στην ίδια θέση έγιναν και άλλες μετρήσεις συρμών που είχαν στην σύνθεσή τους αυτά τα οχήματα. Κάποια από αυτά είχαν και διαφορετική ταχύτητα. Για κάθε περίπτωση έγινε σύγκριση της τιμής που υπολογίζεται με τις παραπάνω διορθώσεις με αυτή που καταγράφει το ηχόμετρο.

- 1) Συρμός που κινείται με 75km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από μηχανή diesel της Adtranz + 3 βαγόνια σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1) για ταχύτητα 75km/h, $SEL = 68,7 \text{ dB(A)}$. Άρα για αυτή την ταχύτητα

$$L_{Adtranz} = 68,7 + 17,9 = 86,6 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\beta a \gamma (\kappa)} = 68,7 + 10,4 = 79,1 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{Adtranz}}{10}} + 3 \cdot 10^{\frac{L_{\beta a \gamma (\kappa)}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{συρμού}} = 88,4 \text{ dB(A)}$$

Η αντίστοιχη τιμή που κατέγραψε το όργανο ήταν 88,6dB(A). [+0,2 dB(A)]

- 2) Συρμός που κινείται με 50km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από μηχανή diesel της Adtranz + 3 βαγόνια σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1) για ταχύτητα 50km/h, $SEL = 65,2 \text{ dB(A)}$. Άρα για αυτή την ταχύτητα

$$L_{Adtranz} = 65,2 + 17,9 = 83,1 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\beta a \gamma (\kappa)} = 65,2 + 10,4 = 75,6 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{Adtranz}}{10}} + 3 \cdot 10^{\frac{L_{\beta a \gamma (\kappa)}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{συρμού}} = 85,0 \text{ dB(A)}$$

Η αντίστοιχη τιμή που κατέγραψε το όργανο ήταν 86,3dB(A). [+1,3 dB(A)]

- 3) Συρμός που κινείται με 55km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από μηχανή diesel της Adtranz + 4 βαγόνια σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1) για ταχύτητα 50km/h, $SEL = 66,0 \text{ dB(A)}$. Άρα για αυτή την ταχύτητα

$$L_{Adtranz} = 66,0 + 17,9 = 83,9 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\beta a \gamma (\kappa)} = 66,0 + 10,4 = 76,4 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{\text{Adtranz}}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{\text{βαγ (κ)}}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{συρμού}} = 86,2 \text{ dB(A)}$$

Η αντίστοιχη τιμή που κατέγραψε το όργανο ήταν 87,2dB(A). [+1,0 dB(A)]

- 4) Συρμός που κινείται με 85km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από μηχανή diesel της Adtranz + 5βαγόνια σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1) για ταχύτητα 85km/h, SEL= 69,8 dB(A). Άρα για αυτή την ταχύτητα

$$L_{\text{Adtranz}} = 69,8 + 17,9 = 87,7 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{βαγ(κ)}} = 69,8 + 10,4 = 80,2 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{\text{Adtranz}}}{10}} + 5 * 10^{\frac{L_{\text{βαγ (κ)}}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{συρμού}} = 90,5 \text{ dB(A)}$$

Η αντίστοιχη τιμή που κατέγραψε το όργανο ήταν 92,0dB(A). [+1,5 dB(A)]

- 5) Αμαξοστοιχία IC πεντάδυμη, διπλή κινούμενη με 95km/h επί της ίδιας γραμμής.

Για ταχύτητα 95km/h

$$L_{\text{ICπεντάδυμη}} = 90,5 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{ICπεντάδυμη} \times 2} = 10 \log \left(2 * 10^{\frac{L_{\text{ICπεντάδυμη}}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{ICπεντάδυμη} \times 2} = 93,5 \text{ dB(A)}$$

Η αντίστοιχη τιμή που κατέγραψε το όργανο ήταν 93,8dB(A). [+0,3 dB(A)]

- 6) Συρμός που κινείται με 50km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από 2 μηχανές diesel της Adtranz + 4βαγόνια σε καλή κατάσταση.

Από πριν έχουμε για ταχύτητα 50km/h

$$L_{\text{Adtranz}} = 65,2 + 17,9 = 83,1 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{βαγ(κ)}} = 65,2 + 10,4 = 75,6 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(2 * 10^{\frac{L_{\text{Adtranz}}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{\text{βαγ (κ)}}}{10}} \right)$$

$$L_{\text{συρμού}} = 87,4 \text{ dB(A)}$$

Το ηχόμετρο κατέγραψε στάθμη 90,9 dB(A). [+3.5 dB(A)]

- 7) Συρμός που κινείται με 75km/h επί της ίδιας γραμμής, αποτελούμενος από μηχανή diesel της Adtranz, 2 βαγόνια σε καλή κατάσταση και 6 βαγόνια σε χειρότερη κατάσταση.

Ξέρουμε ήδη ότι για αυτή την ταχύτητα

$$L_{Adtranz} = 86,6 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{βαγ(κ)}} = 79,1 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{βαγ(π)}} = 84,2 \text{ dB(A)}$$

$$L_{\text{συρμού}} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{Adtranz}}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{L_{\text{βαγ(κ)}}}{10}} + 6 \cdot 10^{\frac{L_{\text{βαγ(π)}}}{10}} \right)$$

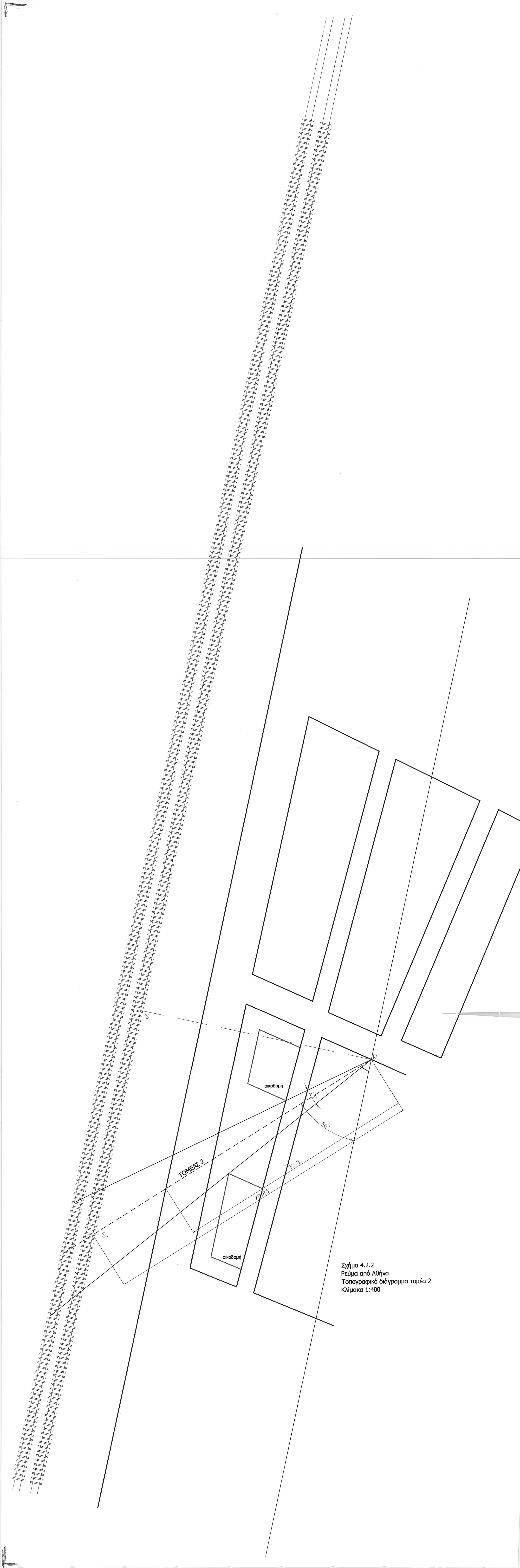
$$L_{\text{συρμού}} = 93,4 \text{ dB(A)}$$

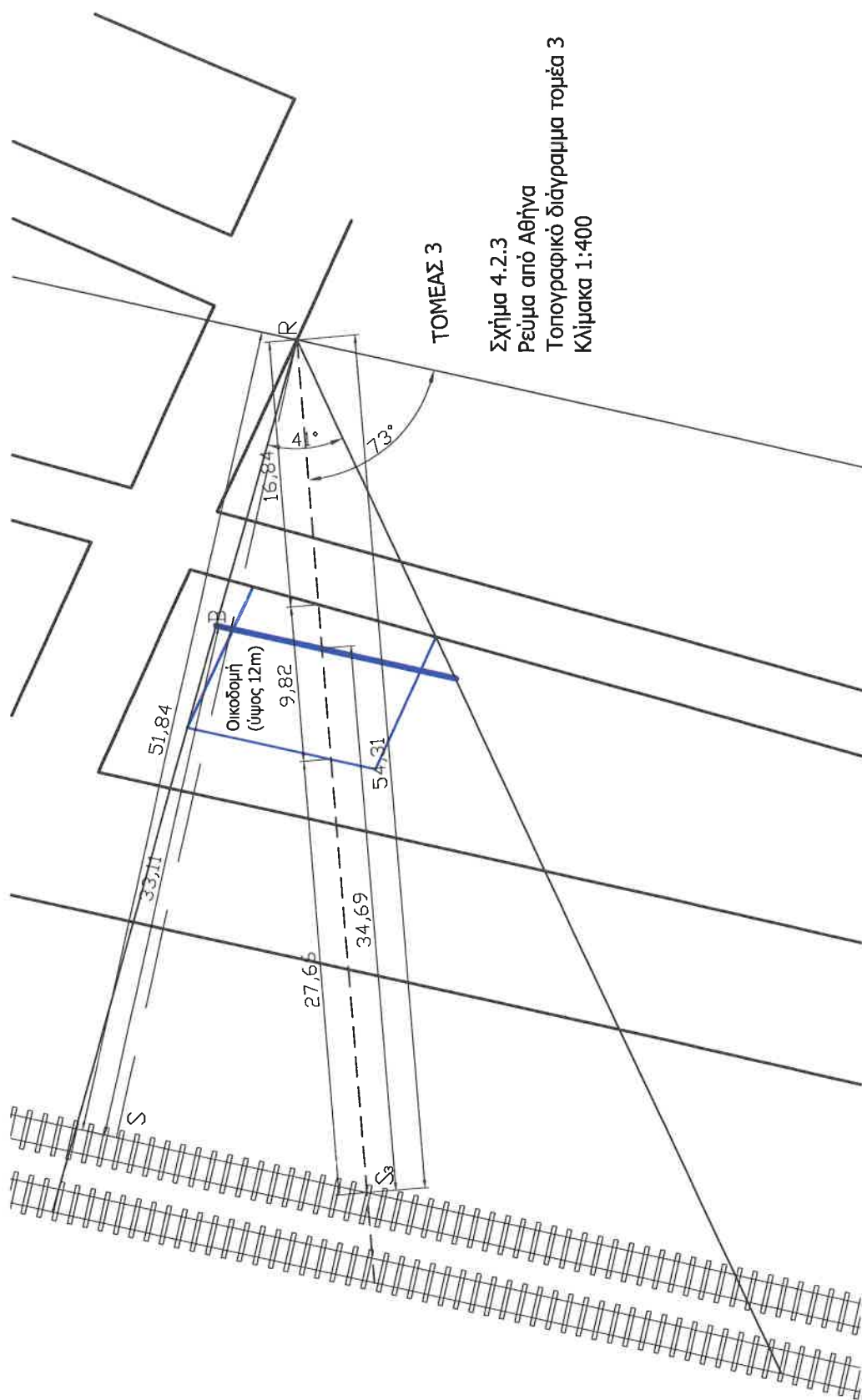
Το ηχόμετρο κατέγραψε στάθμη 90,9 dB(A). [-2,5dB(A)]

Απ' αυτές τις διελεύσεις μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

- Συρμοί που έχουν την ίδια σύνθεση και κινούνται με την ίδια ταχύτητα παρουσιάζουν αποκλίσεις αλλά είναι μικρές (+0,3dB(A)). Αυτές μπορεί να οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες όπως άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία, άλλες πηγές θορύβου, διάστημα δειγματοληψίας SEL.
- Όταν μεγαλώνει ο συρμός, τόσο μεγαλώνουν και οι αποκλίσεις. Μια πιθανή αιτία είναι ότι όσο μεγαλώνει ο συρμός, έχουμε αύξηση των προσθετών του αθροίσματος που δίνει τη στάθμη έκθεσης του συρμού. Καθώς κάθε προσθετός εμπεριέχει κάποιο σφάλμα οδηγεί σε αύξηση του σφάλματος για το συρμό.
- Μια πιθανή πηγή σφαλμάτων είναι πιθανό να προέρχεται από τη σχέση (4.1) της μεθόδου CRN-1995. Αυτό είναι φανερό στη μέτρηση 2. Το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 1,3dB(A) για διαφορά ταχύτητας 25km/h.
- Κατά τη μέτρηση 5, είναι πιθανόν η μία από τη δύο μηχανές να μην συμμετέχει στην έλξη των οχημάτων, αλλά επιφορτίζει σημαντικά την άλλη μηχανή. Είναι, πιθανό λοιπόν η μία μηχανή να λειτουργεί σε πλήρη ισχύ ενώ η άλλη όχι. Αυτό δικαιολογεί σε κάποιο βαθμό την μεγάλη απόκλιση της μετρούμενης στάθμης από την προβλεπόμενη. (+ 3,5dB(A))
- Η εκτίμηση της κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα διερχόμενα βαγόνια έγινε βάση της εικόνας που παρουσίαζαν. Αν και τα καινούρια βαγόνια είναι πολύ πιθανό να βρίσκονται σε καλή κατάσταση, καθώς έχουν παραληφθεί σχετικά πρόσφατα, για τα παλαιότερα η κατάσταση στην οποία βρίσκονταν είναι πιθανό σε κάποιες περιπτώσεις να ήταν καλύτερη από την εικόνα που παρουσίαζαν, λόγω συντήρησης. Αυτή είναι μια πιθανή αιτία για την απόκλιση των -2,5dB(A) της καταγεγραμμένης στάθμης από αυτή της πρόβλεψης της μέτρησης 6.

- Η πρόβλεψη κατά κανόνα είναι χαμηλότερη στάθμη από αυτή που μετράται





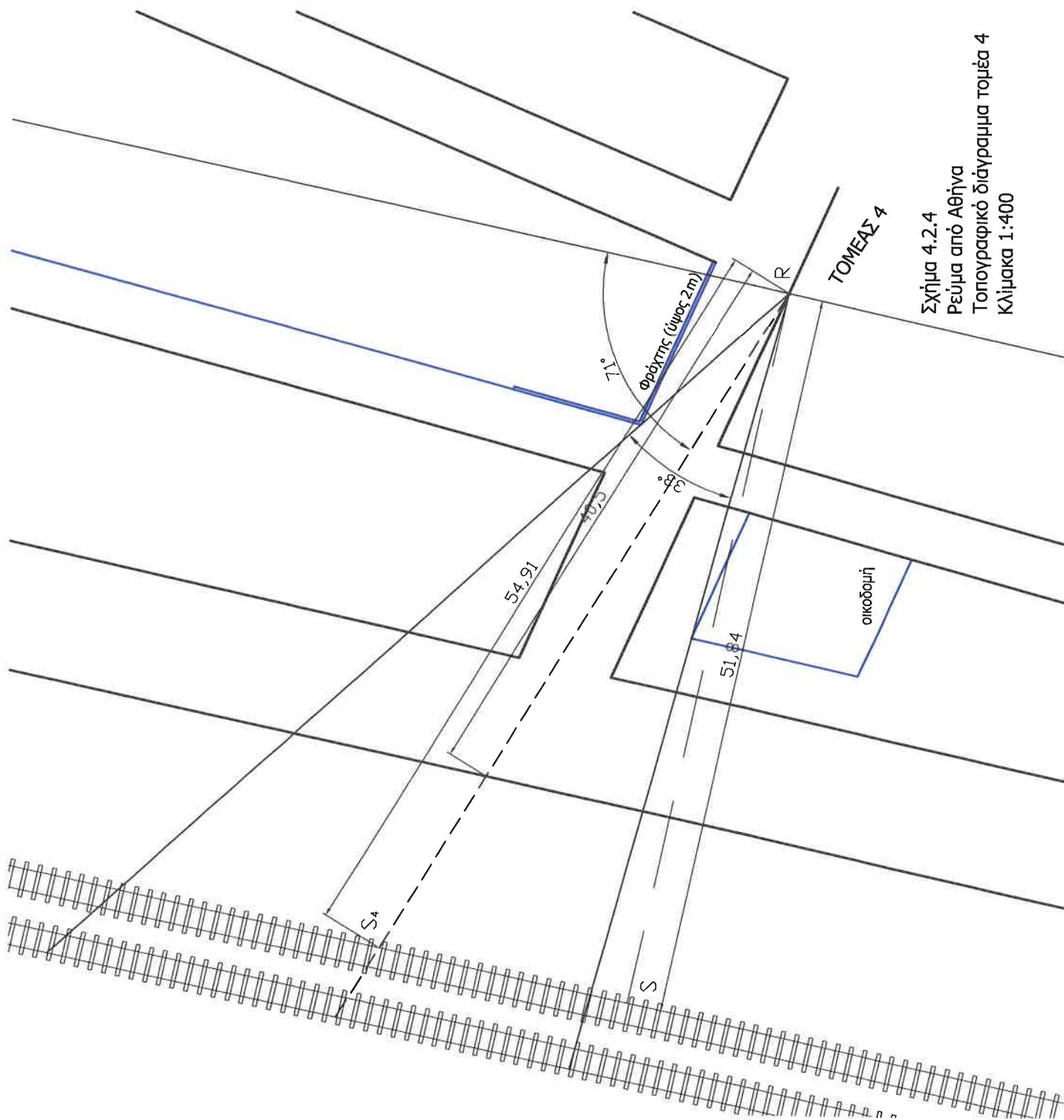
ΤΟΜΕΑΣ 3

Σχήμα 4.2.3

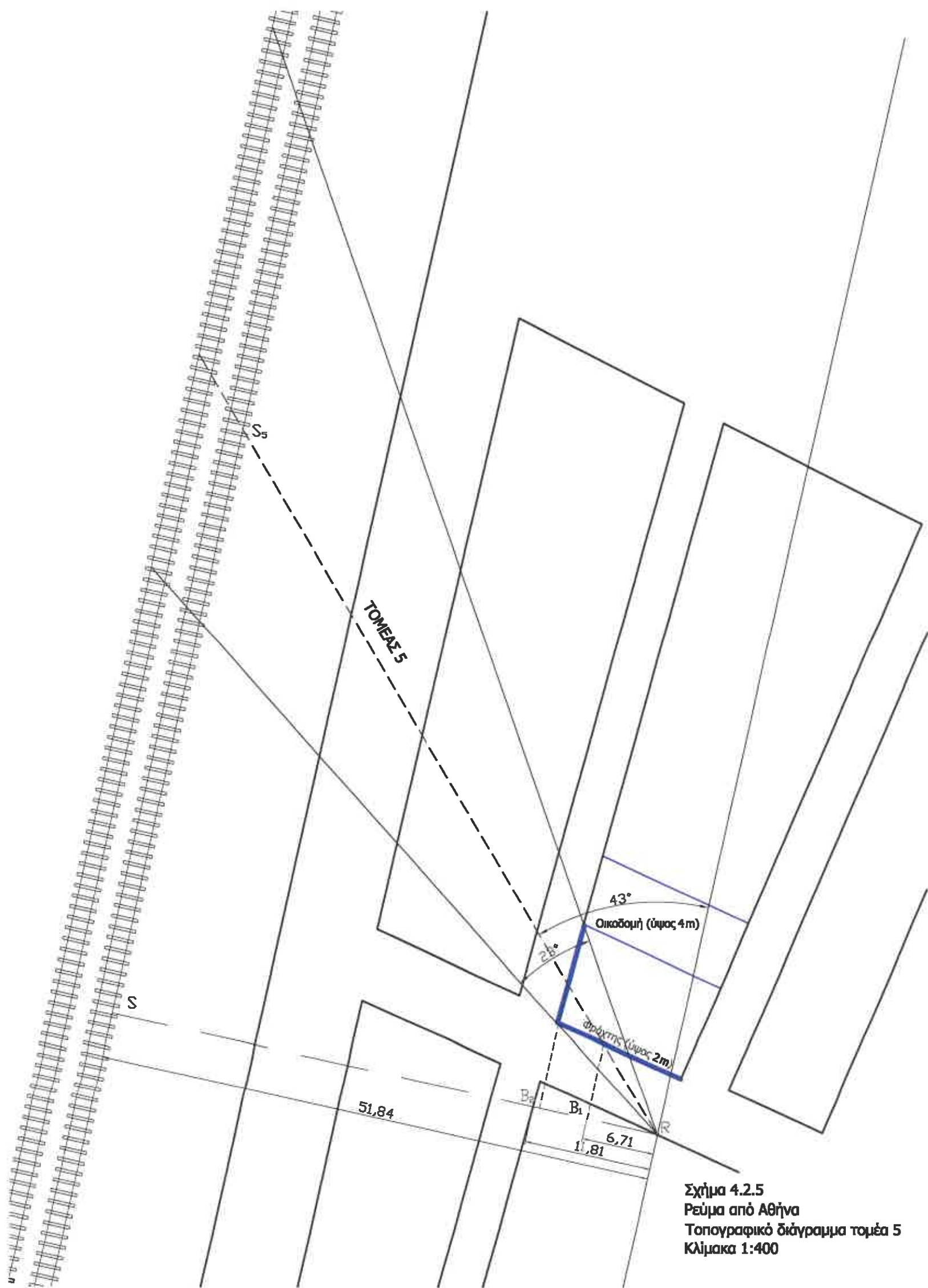
Ρεύμα από Αθήνα

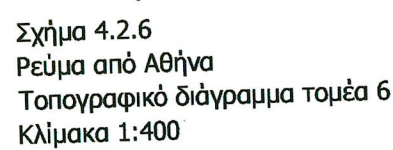
Τοπογραφικό διάγραμμα τομέα 3

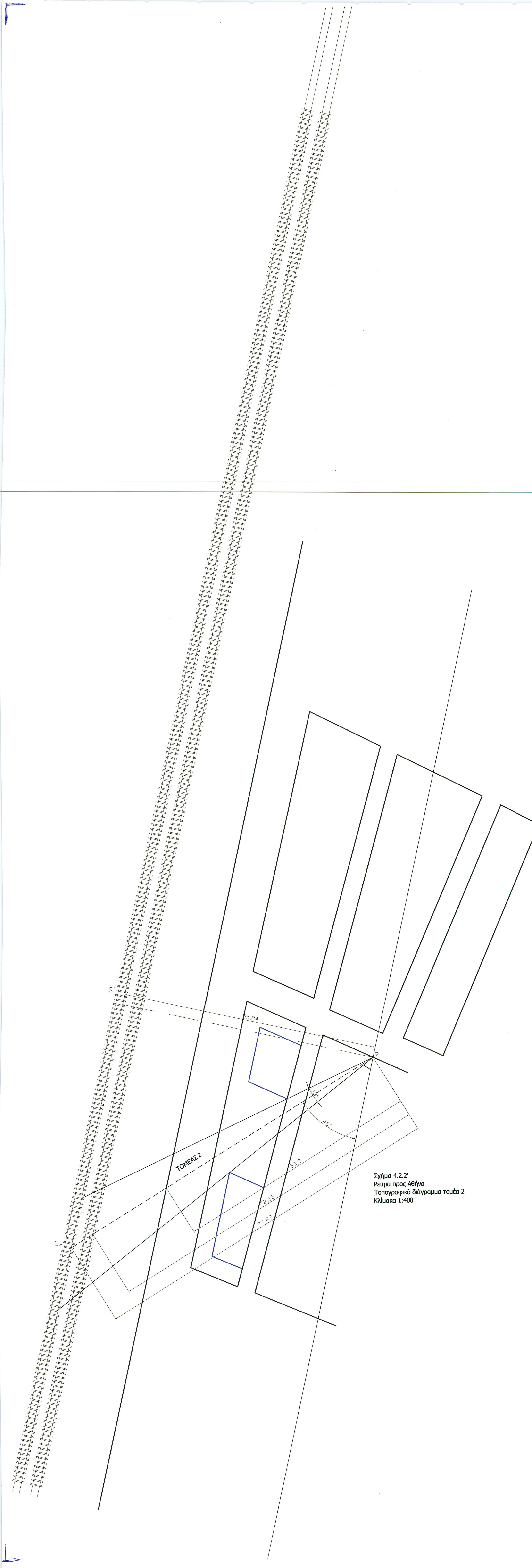
Κλίμακα 1:400

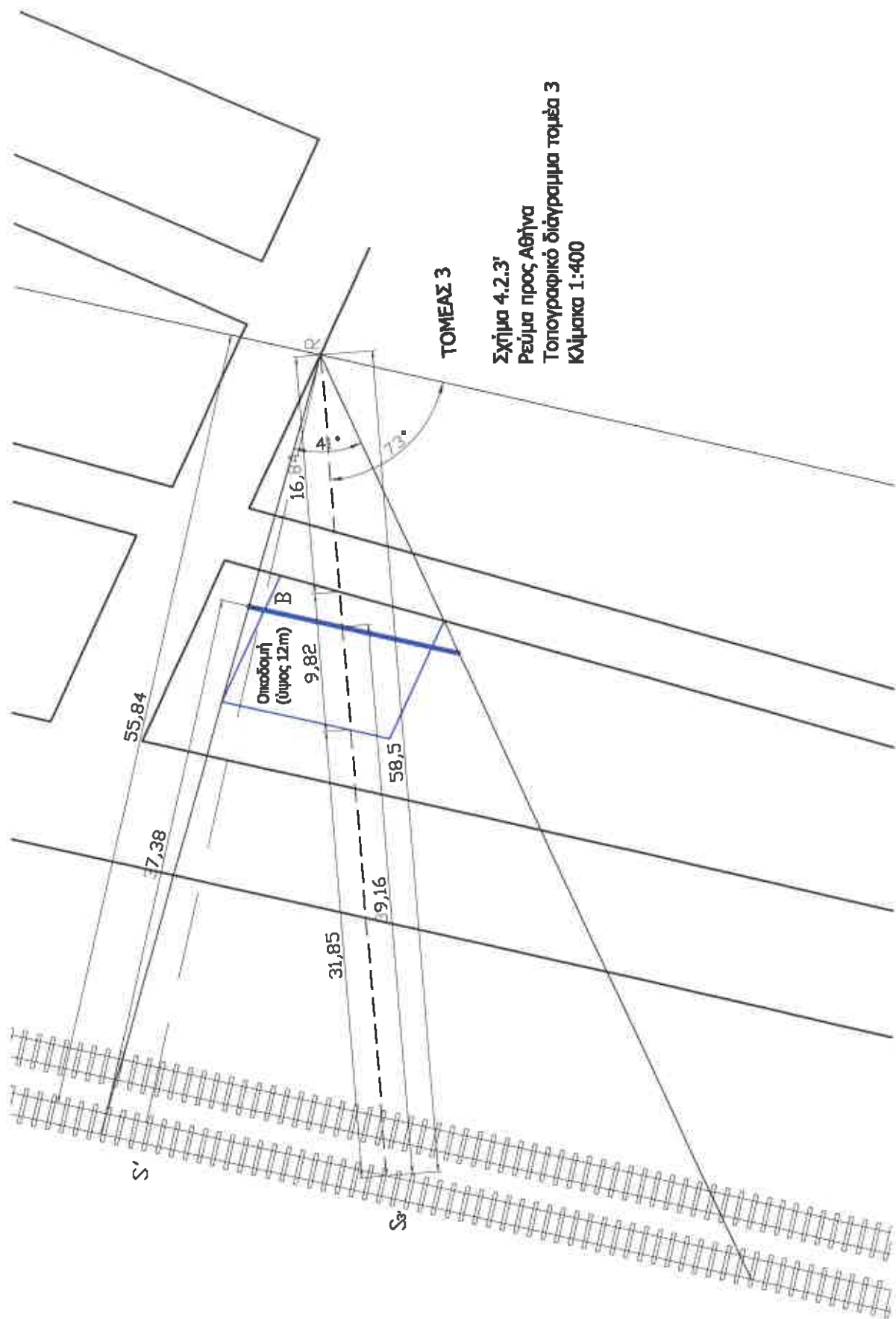


Σχήμα 4.2.4
Ρεύμα από Αθήνα
Τοπογραφικό διάγραμμα τομέα 4
Κλίμακα 1:400



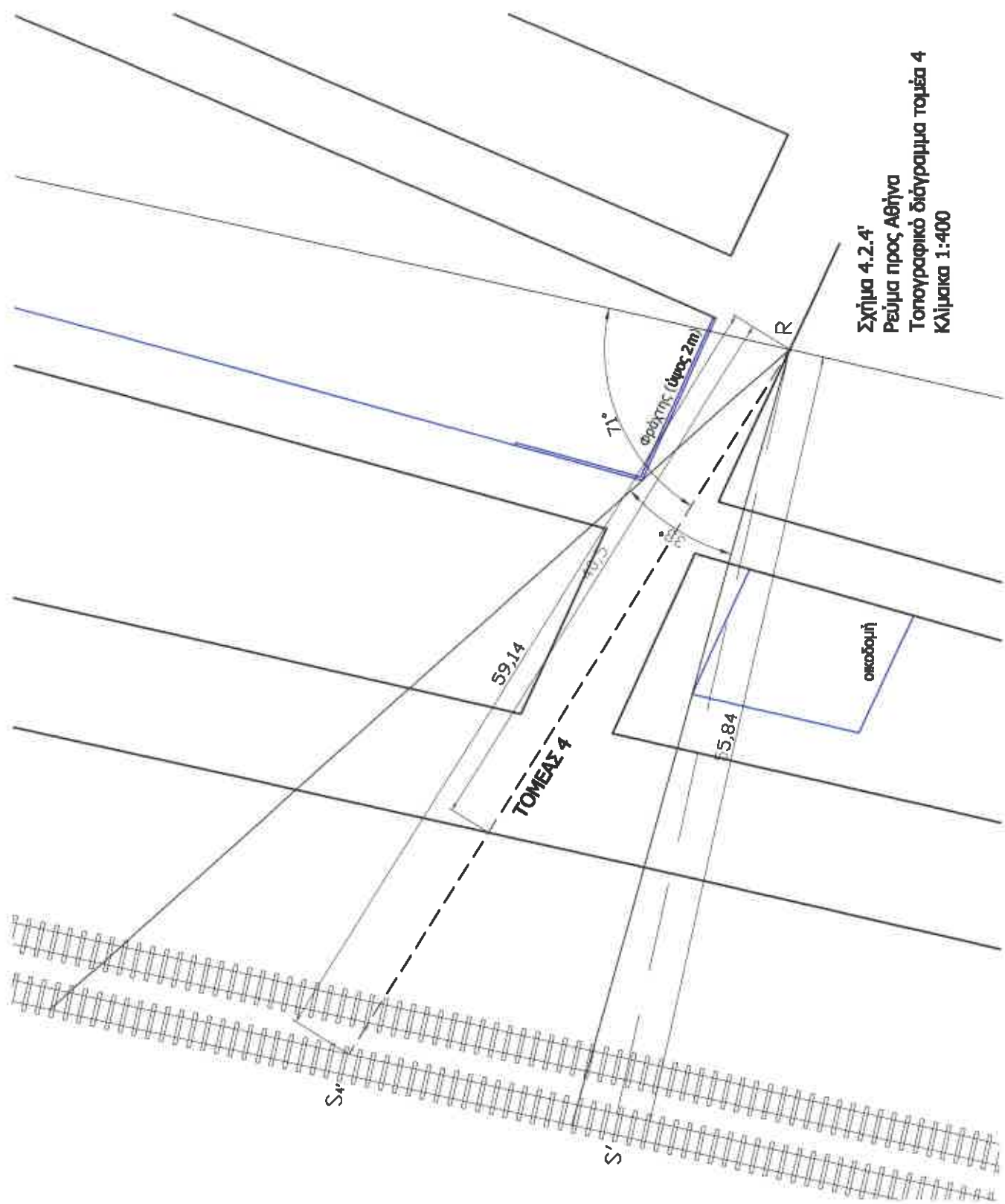




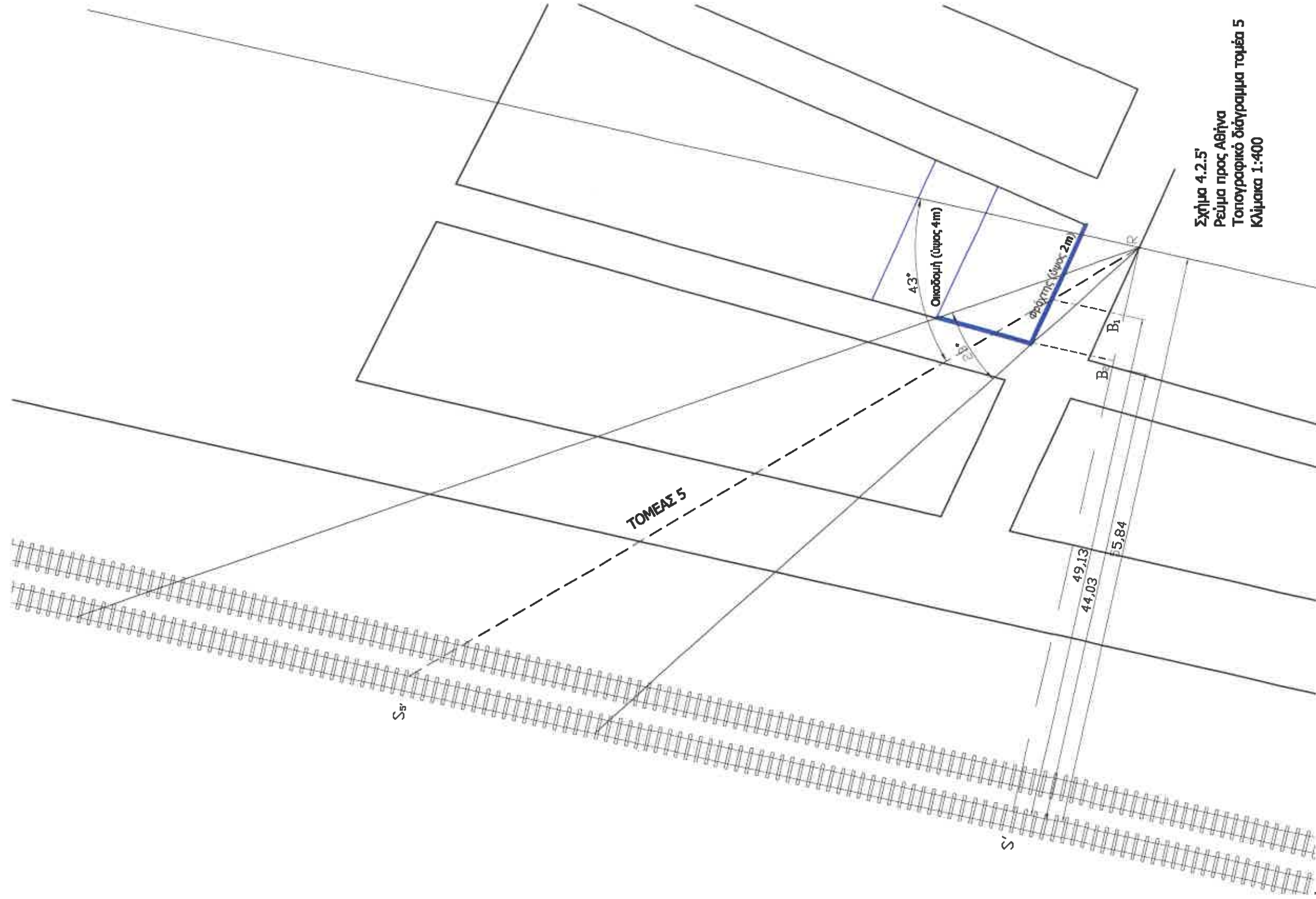


ΤΟΜΕΑΣ 3

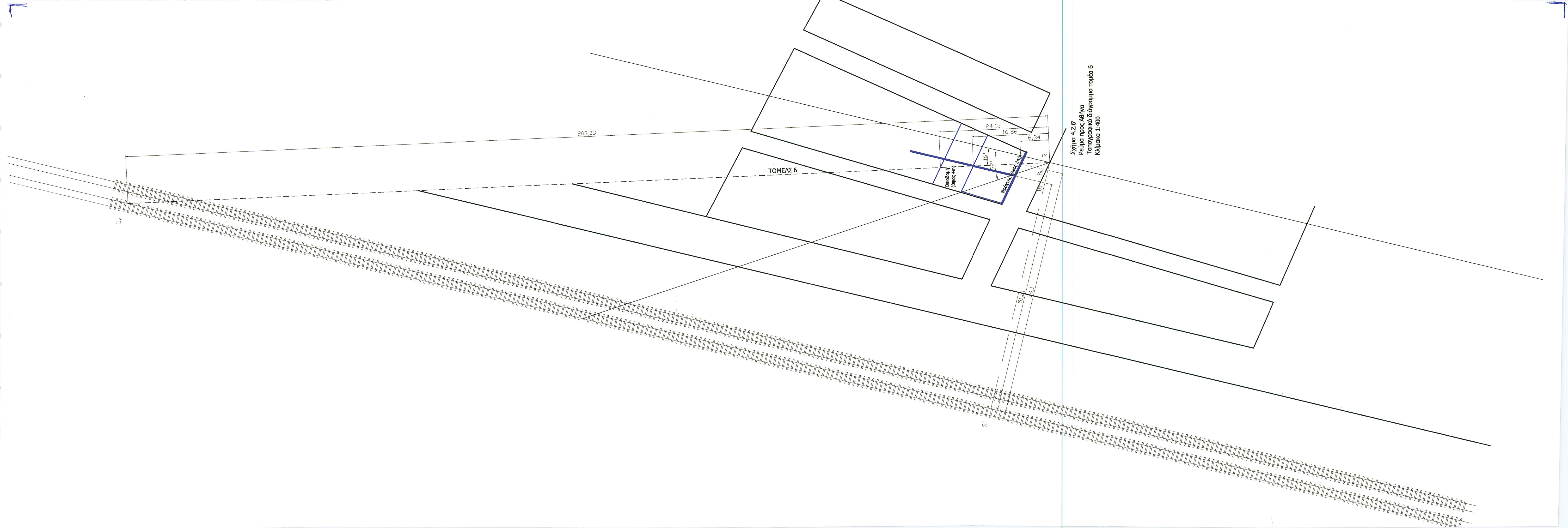
Σχήμα 4.2.3'
Ρεζιμα προς Αθήνα
Τοπογραφικό διάγραμμα τομέα 3
Κλίμακα 1:400

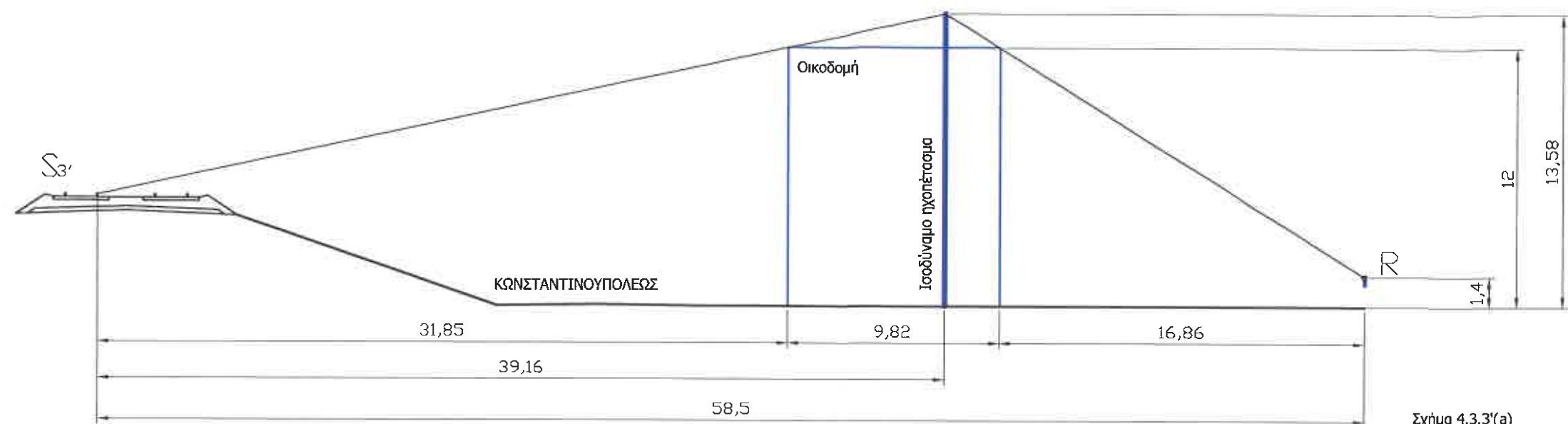


Σχήμα 4.2.4'
Ρεύμα προς Αθήνα
Τοπογραφικό διάγραμμα τομέα 4
Κλίμακα 1:400

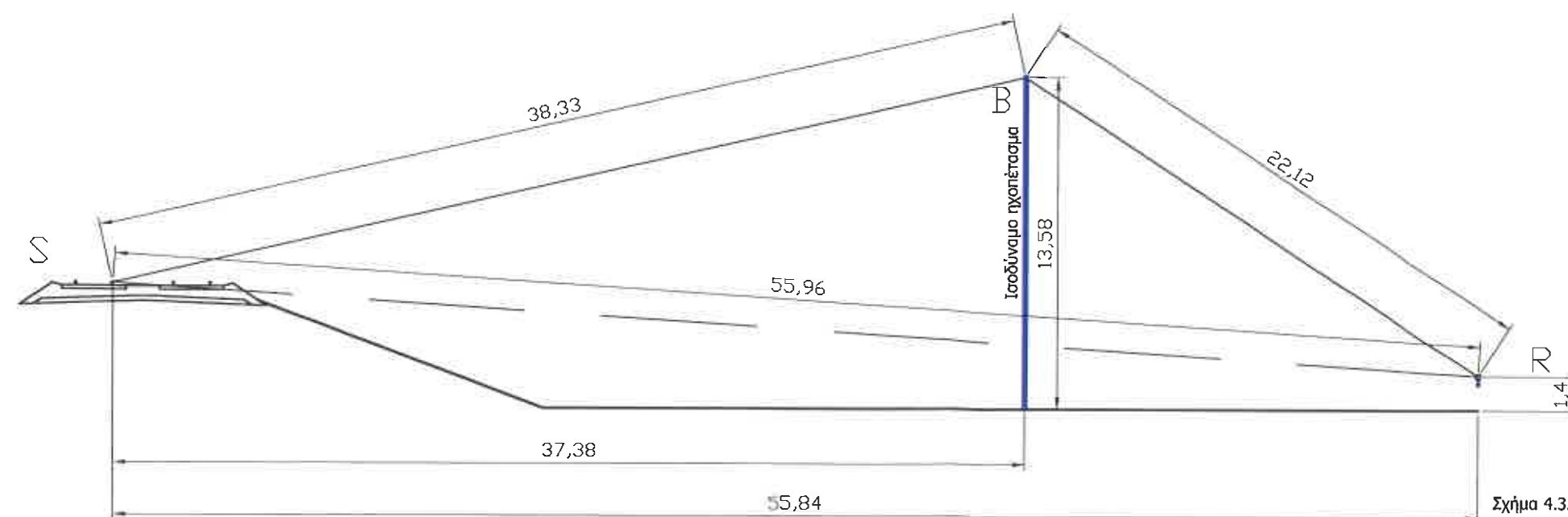


Σχήμα 4.2.5'
Ρεύμα προς Αθήνα
Τοπογραφικό διάγραμμα τομέα 5
Κλίμακα 1:400

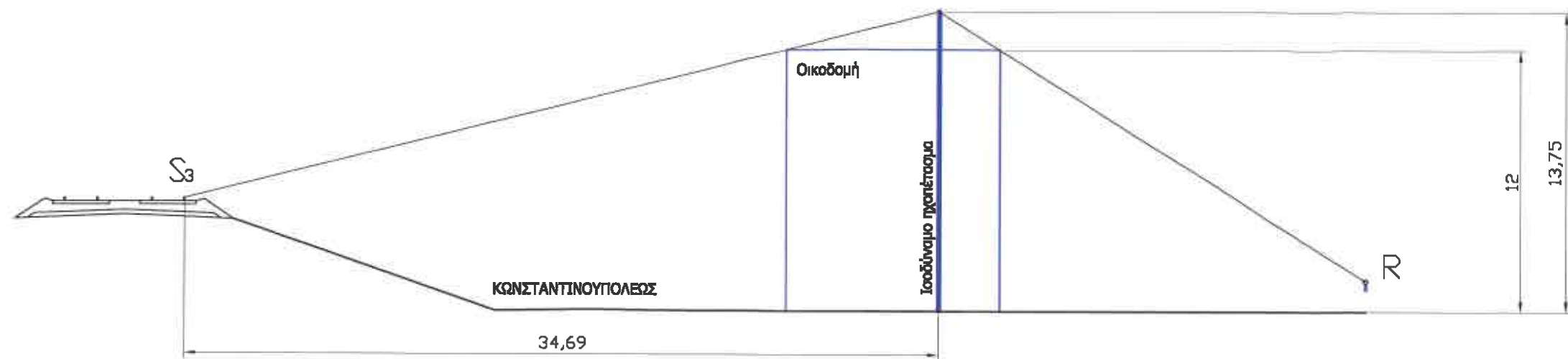




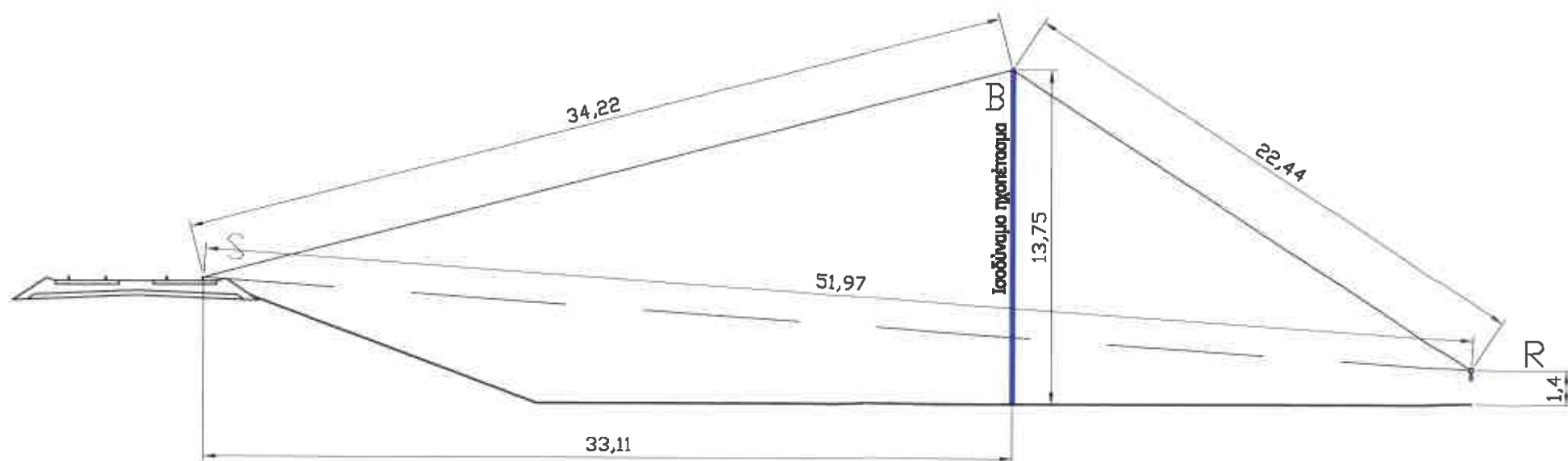
Σχήμα 4.3.3'(a)
Μηκοτομή κατά μήκος της διχοτόμου του τομέα 3
Κλίμακα 1:250



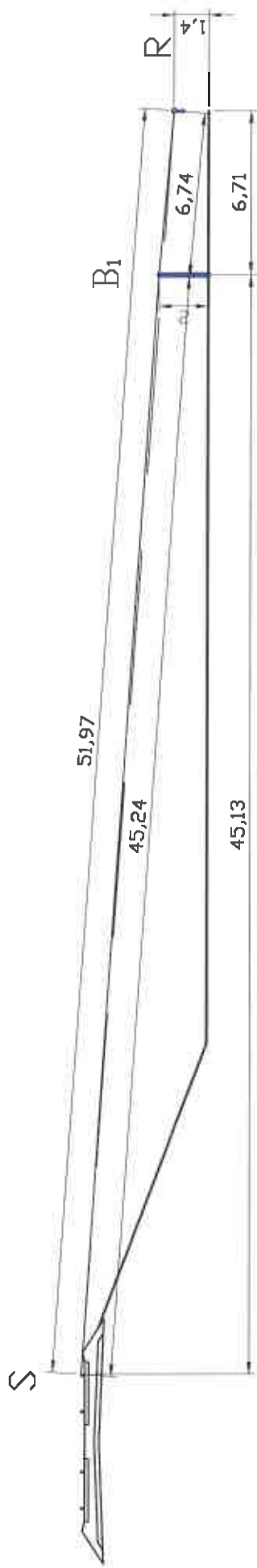
Σχήμα 4.3.3'(b)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 3)
Κλίμακα 1:250



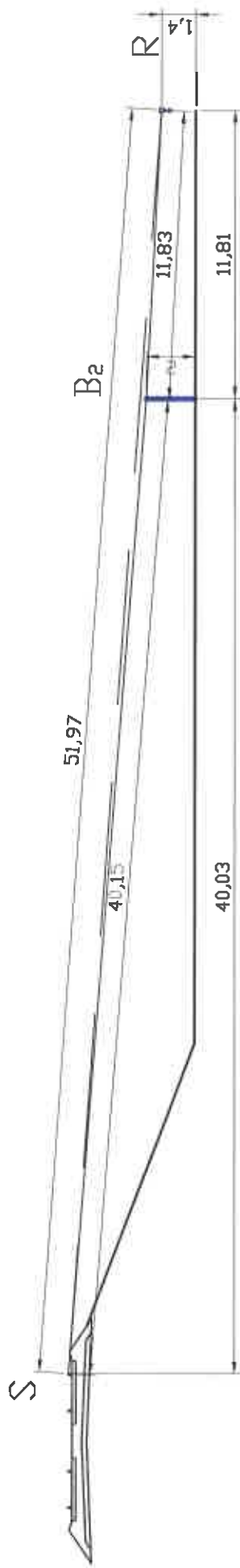
Σχήμα 4.3.3(α)
Μηκτομή κατά μήκος της διχτόμου του τομέα 3
Κλίμακα 1:250



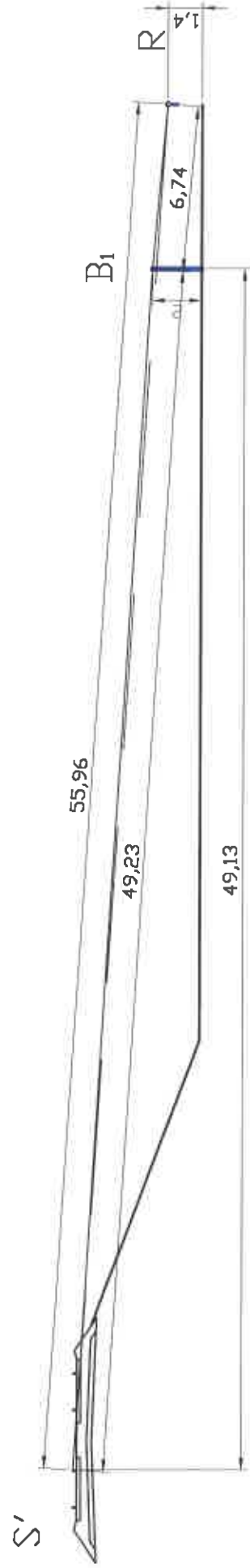
Σχήμα 4.3.3(β)
Μηκτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 3)
Κλίμακα 1:250



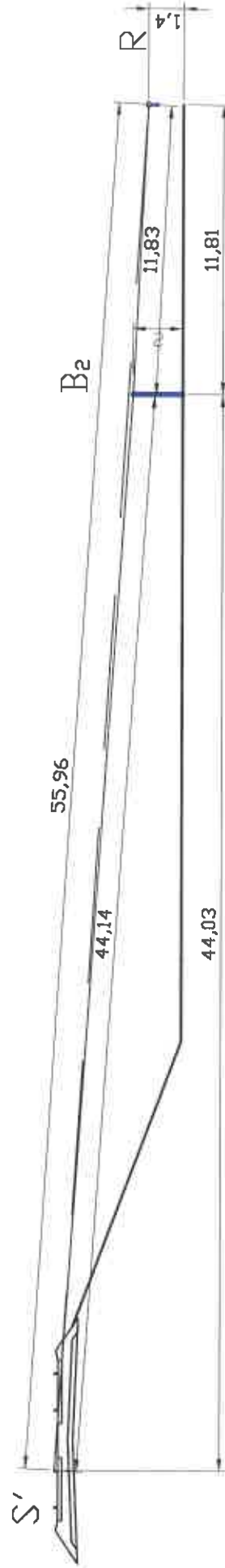
Σχήμα 4.3.5(α)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 5)
Κλίμακα 1:250



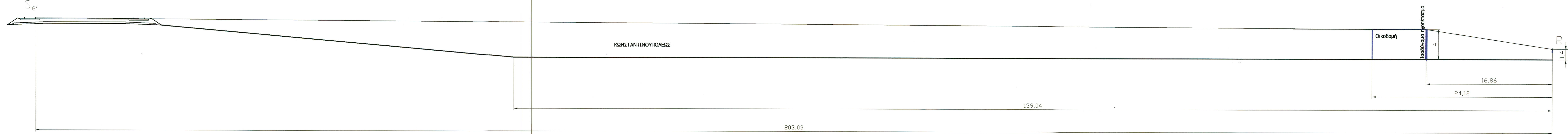
Σχήμα 4.3.5(β)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 5)
Κλίμακα 1:250



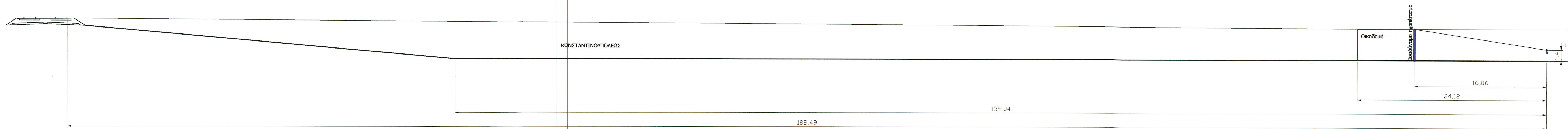
Σχήμα 4.3.5'(α)
Μηκτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 5)
Κλίμακα 1:250



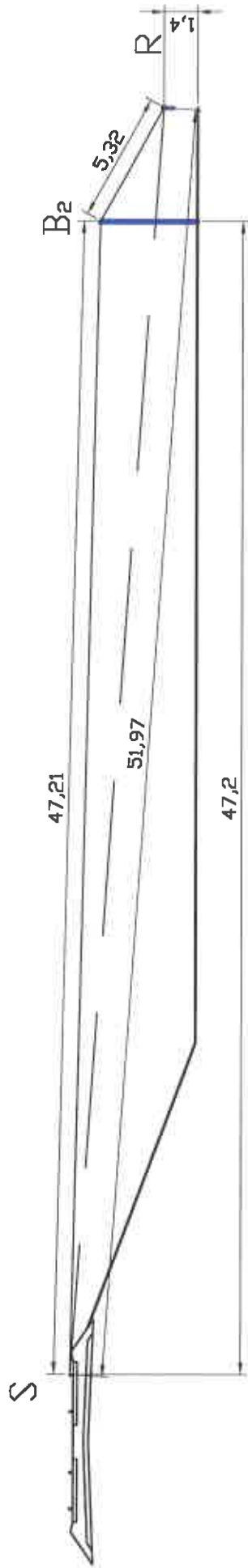
Σχήμα 4.3.5'(β)
Μηκτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 5)
Κλίμακα 1:250



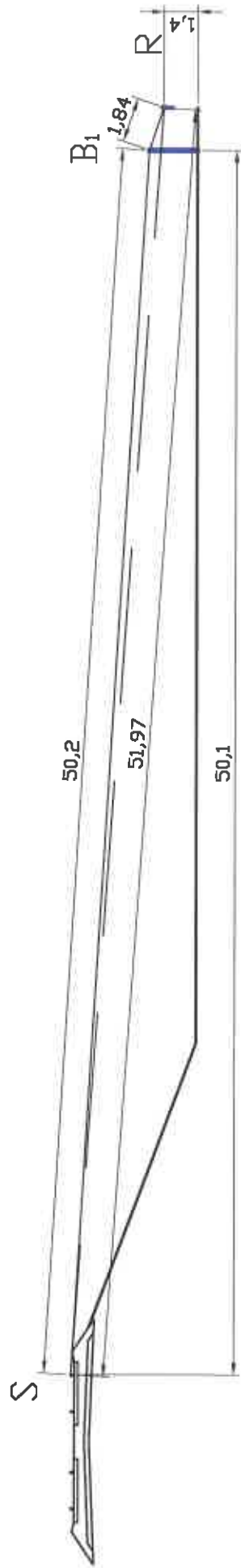
Σχήμα 4.3.6(α)
Μηκοτομή κατά μήκος της διχοτόμου του τομέα 6
Κλίμακα 1:250



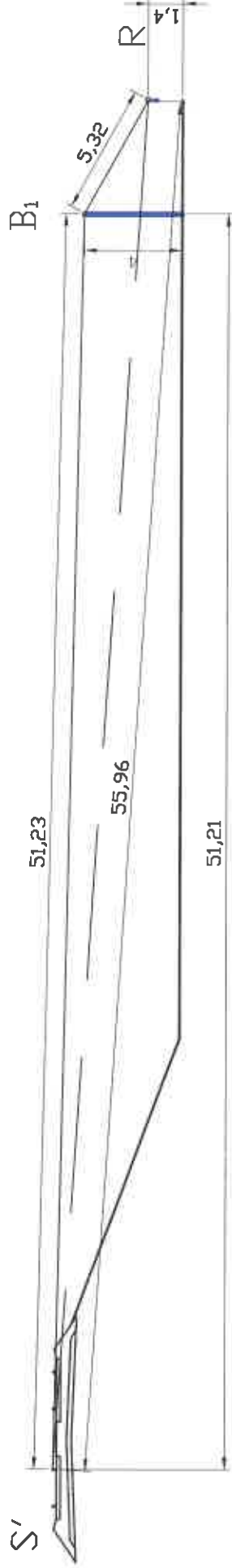
Σχήμα 4.3.6(α)
Μηκοτομή κατά μήκος της διχοτόμου του τομέα 6
Κλίμακα 1:250



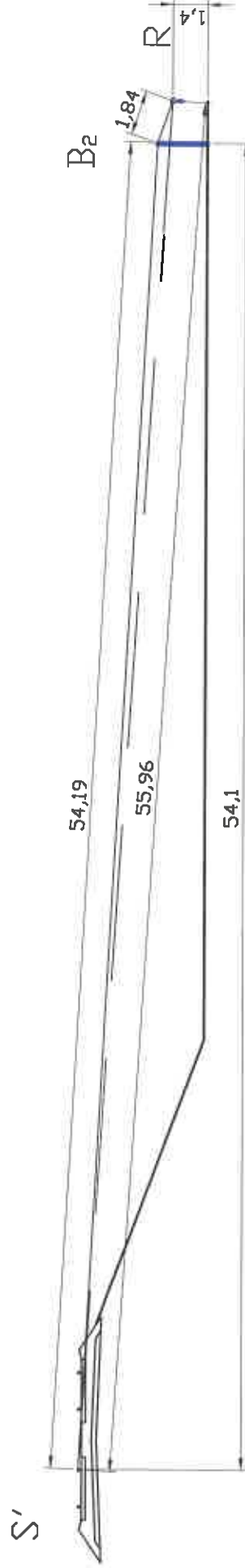
Σχήμα 4.3.6(b)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 6)
Κλίμακα 1:250



Σχήμα 4.3.6(c)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 6)
Κλίμακα 1:250



Σχήμα 4.3.6'(b)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης SR
(τομέας 6)
Κλίμακα 1:250



Σχήμα 4.3.6'(c)
Μηκοτομή κατά μήκος της διεύθυνσης
(τομέας 6)
Κλίμακα 1:250

4.7. Υπολογισμός των δεικτών L_{day} και L_{night} με τη μέθοδο CRN-1995 στη θέση Λυκότρυπα

Η μέθοδος CRN-1995 εφαρμόστηκε στη θέση Λυκότρυπα (Χ.Θ. 18+000), η οποία βρίσκεται στα βόρεια σύνορα του δήμου Αγ.Αναργύρων με το δήμο Μενιδίου. Η γραμμή περνά από περιοχή στην οποία η κύρια χρήση γης είναι η κατοικία. Η στάθμη της γραμμής είναι υπερυψωμένη σε σχέση με του δρόμου κατά 5,1m και οι κατοικίες είναι κατά κανόνα διώροφες με *pilotis*. Η γραμμή είναι διπλή. Έκτος από τα δρομολόγια του Ο.Σ.Ε. η γραμμή χρησιμοποιείται και από τον προαστιακό σιδηρόδρομο. Για την αποτύπωση της περιοχής έγιναν μετρήσεις με κορδέλα και αλφαδολάστιχο, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση του οδικού χάρτη του σχήματος 1. Η ακρίβεια της αποτύπωσης αν και μικρή, θα πρέπει να θεωρηθεί επαρκής, καθώς οι αναμενόμενες αποκλίσεις της τάξης του 1,5m, δεν δίνουν ιδιαίτερες διαφορές στα αποτελέσματα της μεθόδου. Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 2.

4.7.1. Βήμα 1^ο

Το τμήμα γραμμής χωρίζεται σε τομείς, έτσι ώστε η μεταβολή της στάθμης του θορύβου εντός του τομέα να μην υπερβαίνει τα 2dB(A).

Η γραμμή θα χωριστεί σε τομείς βάση των συνθηκών διάδοσης του θορύβου. Στην περιοχή υπάρχουν κτίσματα ανάμεσα στα οποία υπάρχουν ανοίγματα. Αν και η CRN-1995 διαθέτει προσεγγιστική μέθοδο για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναλυτικός υπολογισμός της περιοχής. Τα κτίσματα λειτουργούν ως εμπόδια στη διάδοση του θορύβου. Τα κενά ανάμεσα στα κτίρια έχουν φύτευση ή κατασκευές που μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργούν σαν απορροφητικές επιφάνειες.

Η θέση R για την οποία θα υπολογιστεί η στάθμη θορύβου σημειώνεται στο διάγραμμα 1. Από το έδαφος απέχει 1,4m και δεν έχει ανακλαστικές επιφάνειες σε κοντινή απόσταση. Η γραμμή χωρίστηκε σε 6 τομείς. Ο 1^{ος} τομέας ουσιαστικά δεν συνεισφέρει στο θόρυβο που φτάνει στη θέση R, λόγω των ψηλών κτιρίων που βρίσκονται μεταξύ της θέσης Δ και της γραμμής και λόγω της μικρής γωνίας α ($\approx 20^\circ$). Όλοι οι τομείς σημειώνονται στο σχήμα 4.2.

4.7.2. Βήμα 2^ο

Υπολογίζεται η στάθμη ηχητικής έκθεσης απλού συμβάντος αναφοράς (SEL_{ref}) για δεδομένη ταχύτητα, σε απόσταση 25m από την κοντινότερη σιδηροτροχιά της γραμμής, λαμβάνοντας υπ' όψη το μήκος του συρμού και τον τύπο στήριξης της σιδηροτροχιάς.

Κάθε τύπος οχήματος για την συγκεκριμένη εφαρμογή θα θεωρηθεί ως αυτόνομος συρμός. Ο αριθμός κάθε τύπου διερχόμενων συρμών σε μια χρονική περίοδο είναι ο φόρτος του συγκεκριμένου τύπου κατά την περίοδο αυτή.

Οι ταχύτητες διέλευσης για λόγους ευκολίας έγινε η παραδοχή ότι είναι 80km/h για τους απλούς συρμούς και 90km/h για τις ταχείες. Οι ταχύτητες αυτές είναι προσεγγίσεις βάση των πινάκων δρομολογίων και είναι ενδεικτικές. Οι ενδεχόμενες αποκλίσεις πιθανόν να αντιστοιχούν σε μικρότερες ταχύτητες καθώς οι συρμοί διασχίζουν κατοικημένη περιοχή. Η πρόβλεψη σε αυτή την περίπτωση θα υπερεκτιμά ελαφρά το θόρυβο από τους σιδηρόδρομους. Η γραμμή στη θέση Λυκότρυπα έχει ασήμαντη κατά μήκος κλίση και είναι ευθύγραμμη. Ο κοντινότερος σταθμός είναι ο Πύργος Βασιλίσσης και απέχει περίπου 2km από τη θέση μέτρησης. Έγινε έτσι η παραδοχή ότι οι μηχανές των διερχόμενων συρμών δεν λειτουργούν εν πλήρη ισχύ.

$$SEL=31.2+20\log_{10}V \text{ σε dB(A)} \quad (4.1)$$

Οι τιμές που προκύπτουν από παραπάνω διορθώνονται σύμφωνα με τον πίνακα A_{1.1} (σελ.69) για τους διαφορετικούς τύπους οχημάτων. Για την περίπτωση που εξετάζεται οι διορθώσεις για τα οχήματα θα είναι αυτές που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Για καθέναν από τους παραπάνω συρμό γίνεται διόρθωση για τον αριθμό των οχημάτων

$$\Delta\text{ιόρθωση}=10\log_{10}(N) \quad (4.2)$$

N: ο αριθμός των οχημάτων

Στην περίπτωση μας κάθε όχημα θεωρείται και συρμός οπότε $N=1$, και η αντίστοιχη διόρθωση είναι 0.

Συνεπώς

Adtranz	Ταχύτητα (km/h)	80
	Διόρθωση (dB(A))	17,9
	SEL _{ref}	87,2

Βαγόνια (κ)	Ταχύτητα (km/h)	80
	Διόρθωση (dB(A))	10,4
	SEL _{ref}	79,7

Βαγόνια (π)	Ταχύτητα (km/h)	80
	Διόρθωση (dB(A))	15,5
	SEL _{ref}	84,8

IC πετράδωμα	Ταχύτητα (km/h)	90
	Διόρθωση (dB(A))	19,6
	SEL _{ref}	89,9

IC πεντάδωμα	Ταχύτητα (km/h)	90
	Διόρθωση (dB(A))	19,7
	SEL _{ref}	90

Destro	Ταχύτητα (km/h)	80
	Διόρθωση (dB(A))	15,1
	SEL _{ref}	84,4

Υπάρχουν οι διορθώσεις που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της επιδομής ή την υπερύψωση της πηγής (γέφυρες κ.α.). Δεν απαιτείται κάποια τέτοια διόρθωση για τους τομείς της εφαρμογής.

4.7.3. Βήμα 3°

Γίνονται διορθώσεις του SEL_{ref} για την απόσταση του σημείου λήψεως απ' τη γραμμή, την απορρόφηση του αέρα και του εδάφους, την επίδραση ηχοπετασμάτων ή άλλων κατασκευών, καθώς και διορθώσεις για την κατευθυντικότητα της πηγής.

Ρεύμα: από Αθήνα

Η διόρθωση που σχετίζεται με την απόσταση της πηγής από το σημείο λήψης είναι

$$\text{Διόρθωση} = -10 \log_{10}(d'/25) \quad (4.4)$$

d' $d' = (h^2 + d^2)^{1/2}$, καθώς η πηγή θορύβου βρίσκεται στο ύψος της σιδηροτροχιάς
 d : η προβολή της κάθετης απόστασης του σημείου λήψης από την πλησιέστερη σιδηροτροχιά
 h : η υψομετρική διαφορά πηγής – σημείου λήψεως

Για τους τομείς 2,3,4,5,6 η απόσταση αυτή είναι κοινή. Από το σχήμα 2 προκύπτει

Προβολή κάθετης απόστασης σημείου λήψεως από τη γραμμή (d)	51,84
Υψομετρική διαφορά πηγής - σημείου λήψεως (h)	-3,7
Ευθεία απόσταση (d') (σε m)	51,97

Διόρθωση λόγω απόστασης (dB(A))	-3,2
---------------------------------	------

Η διόρθωση για την απορρόφηση του αέρα προκύπτει ως εξής

$$\text{Διόρθωση} = 0.2 - 0.008d' \text{ σε dB(A)} \quad (4.5)$$

Διόρθωση λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης (dB(A))	-0,2
---	------

□ Ελεύθερη διάδοση (Τομείς 2,4)

Το ποσοστό εδάφους που είναι απορροφητικό προσδιορίστηκε κατ' εκτίμηση. Στο χώρο μεταξύ της γραμμής και τη θέση του δέκτη για τους τομείς 2 και 4 υπήρχαν περιοχές με φυτοκάλυψη ή κατασκευές όπως χαμηλοί φράχτες. Για το λόγο αυτό οι τομείς θεωρήθηκαν ότι περιέχουν κατά 100% απορροφητικό έδαφος. Ο γενικότερος τύπος περιγράφεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} & \text{για } 10 \leq d \leq 25 \text{ m, } 0 \text{ dB (A)} \\ \text{Διόρθωση} = & \begin{aligned} & \text{αν } 1 < H < 6 \text{ m, } -0,6 I (6 - H) \log (d / 25) \text{ dB (A)} \\ & \text{για } d > 25 \text{ m, αν } H \leq 1 \text{ m, } -3 I \log (d / 25) \text{ dB (A)} \\ & \text{αν } H \geq 6 \text{ m, } 0 \text{ dB (A)} \end{aligned} \end{aligned} \quad (4.6)$$

όπου

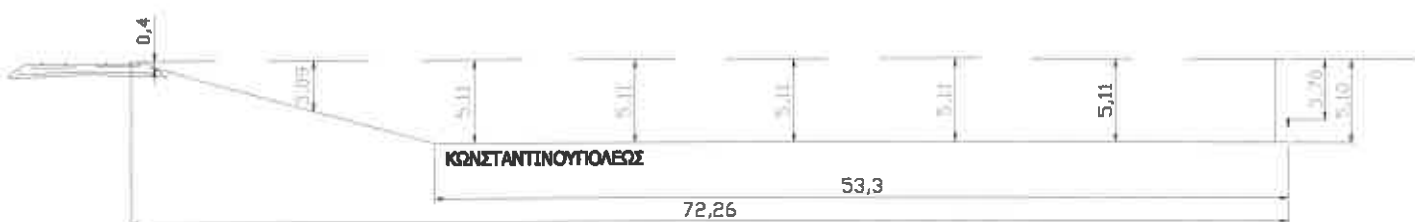
H: το μέσο ύψος διάδοσης

$$H = h_s + \frac{h}{2} \quad \text{για διάδοση από γραμμή στο ίδιο επίπεδο με το έδαφος}$$

$$H = \frac{h_s + h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n+1} + \frac{h}{2} \quad \text{για διάδοση από υπερυψωμένη γραμμή}$$

h_s : η κατακόρυφη απόσταση της κεφαλής της σιδηροτροχιάς από το πέριξ έδαφος
 h_i : η κατακόρυφη απόσταση του εδάφους από τη σιδηροτροχιά στη θέση i μεταξύ πηγής και δέκτη

Σύμφωνα με το σχήμα 4.2.2, για τον τομέα 2 κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου έχουμε την παρακάτω διατομή (σχήμα 4.3.2).

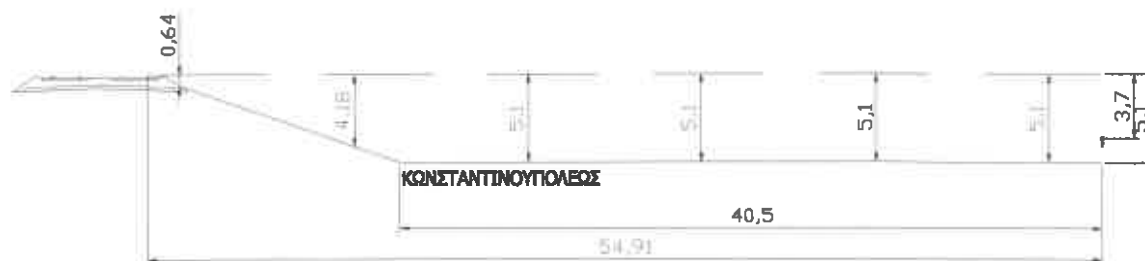


Σχήμα 4.3.2

Σύμφωνα με τα παραπάνω

$$H = (0,4+3,1+5,1+5,1+5,1+5,1+5,1+5,1)/8+(-3,7)/2 = 2,4m$$

Σύμφωνα με το σχήμα 4.2.4, για τον τομέα 4 κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου έχουμε την παρακάτω διατομή (σχήμα 4.3.4)



Σχήμα 4.3.4

$$H = (0,64+4,18+5,1+5,1+5,1+5,1+5,1)/7+(-3,7/2) = 2,48m$$

Συνεπώς για τον τομέα 2 από τη σχέση (4.6)

Διόρθωση λόγω επιρροής του εδάφους	-0,7
------------------------------------	------

όπως και για τον τομέα 4 από την ίδια σχέση

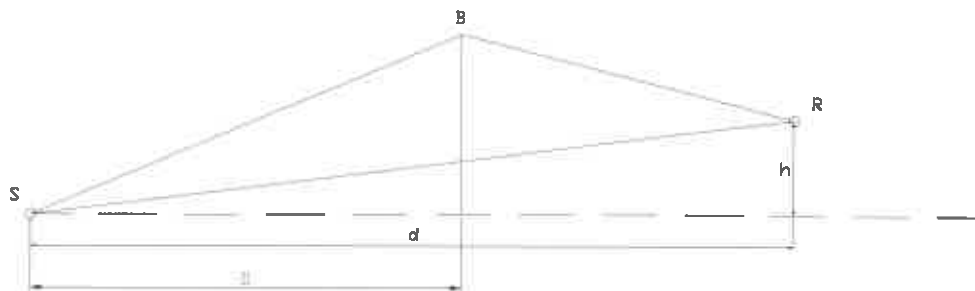
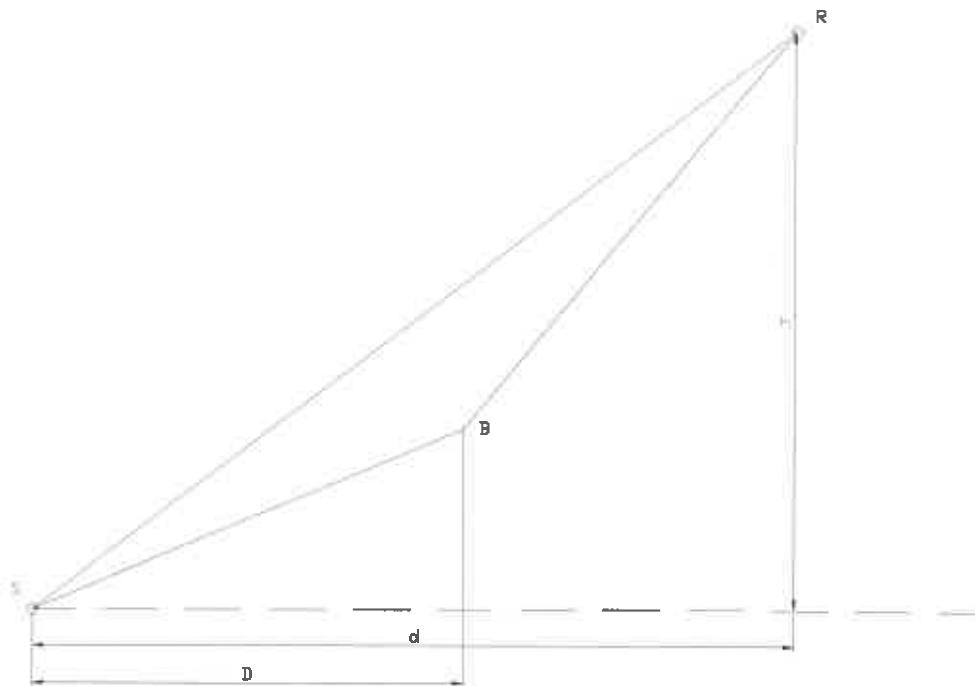
Διόρθωση λόγω επιρροής του εδάφους	-0,7
------------------------------------	------

Ανάμεσα στην πηγή και το σημείο λήψης δεν υπάρχει άλλη γραμμή, άρα και διόρθωση για το έρμα.

□ Παρεμποδιζόμενη διάδοση (τομείς 3,5,6)

Οι τομείς αυτοί έχουν κατασκευές που λειτουργούν ως ηχοπετάσματα. Η διόρθωση που επιφέρουν αυτές οι κατασκευές υπολογίζεται ως συνάρτηση της διαφοράς του μήκους διαδρομής κατά την κάθετη στη γραμμή διεύθυνση.

$$(\delta) = SB + BR - SR \quad (4.7)$$



Η διόρθωση για την φωτισμένη ζώνη είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.8)

$$\delta > 0.4\text{m} = 0$$

Για $0 < \delta < 0.4\text{m} = 0.88 + 2.14 \log_{10}(10^{-3} + \delta)$ σε dB(A)

Ενώ για τη σκιαώδη ζώνη είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.9)

$$\delta > 2.5\text{m} = -21 \text{ dB(A)}$$

Για $0 < \delta < 2.5\text{m} = -7.75 \log_{10}(5.2 + 203\delta)$ σε dB(A)

Τομέας 3

Στον τομέα υπάρχει κτίριο διώροφο το οποίο βρίσκεται μεταξύ της γραμμής και του σημείου λήψης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.3(b). Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το ισοδύναμο ηχοπέτασμα. Το ύψος του κτιρίου εκτιμήθηκε 12m. Σύμφωνα με τα παραπάνω από τη σχέση (4.7) και τη βοήθεια του σχήματος 3.3(b) προκύπτει

Απόκλιση διαδρομής (m)	4,68
------------------------	------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-21,0
--	-------

Τομέας 5

Στον τομέα υπάρχει φράχτης ύψους 2m από τσιμεντόλιθους. Το σχήμα του είναι τέτοιο που ισοδυναμεί με δύο ηχοπετάσματα. Στο σχήμα 2.5 και στις διατομές των σχήματος 3.5(a) και 3.5(b) φαίνεται η θέση των ηχοπετασμάτων αυτών. Από τη σχέση (4.7) προκύπτει για το 1^ο ηχοπέτασμα.

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,001
------------------------	-------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-5,7
--	------

Ενώ για το 2^ο από τη σχέση (4.7)

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,003
------------------------	-------

Και βάση της σχέσης (4.8)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-4,2
--	------

Όταν υπάρχουν περισσότερα ηχοπετάσματα κατά τη διαδρομή της διάδοσης, η CRN κρατά τη μεγαλύτερη μείωση που προκύπτει από τα ηχοπετάσματα. Συνεπώς η μείωση λόγω ηχοπετασμάτων στον τομέα 5 είναι -5,7dB(A).

Τομέας 6

Ο τομέας 6 έχει μια μονοκατοικία, ύψους περίπου 4m, μεταξύ πηγής και δέκτη. Όπως και με τον τομέα 3 υπολογίζεται το ισοδύναμο ηχοπέτασμα στο σχήμα 3.6(a). Εκτός από το κτίριο αυτό, υπάρχει και ο φράχτης των 2m του τομέα 5 ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 3.6.(b).

Για το κτίριο από τη σχέση (4.7) προέκυψε

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,560
------------------------	-------

και από τη σχέση (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-16,1
--	-------

Για το φράχτη από τη σχέση (4.7)

Απόκλιση διαδρομής	0,064
--------------------	-------

και από τη σχέση (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος	-9,8
--------------------------------------	------

Η μεγαλύτερη διόρθωση είναι αυτή του κτιρίου, οπότε η διόρθωση για τον τομέα 6 λόγω ηχοπετάσματος είναι -16,1dB(A).

Εάν το πέτασμα έχει ανακλαστικές επιφάνειες απαιτείται νέα διόρθωση

$$\begin{array}{ll} D > 20\text{m} & \text{η διόρθωση} = 0 \quad \text{dB(A)} \\ \text{Για } 1\text{m} < D < 20\text{m} & = 5 - 0.25D \text{ σε dB(A)} \\ D < 1\text{m} & = 4.8 \quad \text{dB(A)} \end{array}$$

Όπου

D: η κάθετη στη γραμμή απόσταση του ηχοπετάσματος από την πηγή

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις $D > 20\text{m}$ και δεν απαιτείται διόρθωση.

Ρεύμα: προς Αθήνα

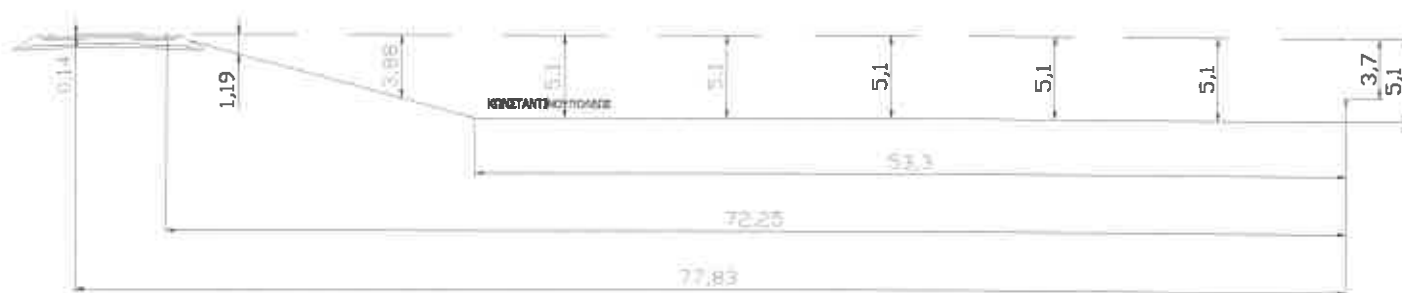
Προβολή κάθετης απόστασης σημείου λήψεως από τη γραμμή (d)	55,84
Υψομετρική διαφορά πηγής – σημείου λήψεως (h)	-3,7
Ευθεία απόσταση (d') (σε m)	55,96

Διόρθωση λόγω απόστασης (dB(A))	-3,5
---------------------------------	------

Διόρθωση λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης	-0,3
---	------

- **Ανεμπόδιστη διάδοση (τομείς 2,4)**

Όπως και στο ρεύμα από Αθήνα για τον τομέα 2 αλλά για τη γραμμή προς Αθήνα.



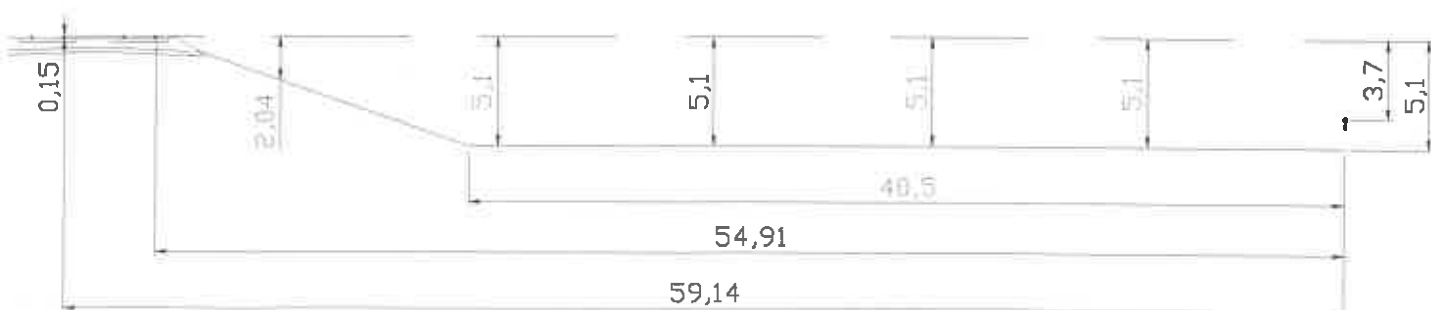
Σχήμα 4.3.2'

Συνεπώς για τον τομέα 2 από τη σχέση (4.6)

Διόρθωση λόγω επιρροής του εδάφους	-0,8
------------------------------------	------

Διόρθωση λόγω επιρροής έρματος	-1,5
--------------------------------	------

Όπως και στο ρεύμα από Αθήνα για τον τομέα 4 αλλά για τη γραμμή προς Αθήνα.



όπου

- α: η γωνία προσανατολισμού του τομέα
θ: η γωνία οράσεως του τομέα

Σχήμα 4.3.4'

$$H = (0,15+2,04+5,1+5,1+5,1+5,1+5,1)/9+(-3,7/2) = 2,11m$$

Συνεπώς για τον τομέα 4 από τη σχέση (4.6)

Διόρθωση λόγω επιρροής του εδάφους	-0,8
------------------------------------	------

Ανάμεσα στην πηγή και το σημείο λήψης υπάρχει άλλη γραμμή, άρα και διόρθωση για το έρμα.

Διόρθωση λόγω επιρροής έρματος	-1,5
--------------------------------	------

- Παρεμποδιζόμενη διάδοση (τομείς 3,5,6)

Όμοια με το ρεύμα από Αθήνα αλλά για τη γραμμή προς Αθήνα.

Τομέας 3

Από τα σχήματα 4.2.3', 4.3.3'(a), 4.3.3'(b)

Απόκλιση διαδρομής (m)	4,48
------------------------	------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-21,0
--	-------

Τομέας 5

Από τα σχήματα 4.2.5', 4.3.5'(a), 4.3.5'(b)

Για το ηχοπέτασμα B₁

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,002
------------------------	-------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-5,8
--	------

Για το ηχοπέτασμα B₂

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,002
------------------------	-------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-4,6
--	------

Διόρθωση για τον τομέα 5, -5,8dB(A).

Τομέας 6

Από τα σχήματα 4.2.6', 4.3.6'(a), 4.3.6'(b)

Για το ηχοπέτασμα B₁

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,569
------------------------	-------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-16,1
--	-------

και από τα σχήματα 4.2.6' και 4.3.6' τις

Για το ηχοπέτασμα B₂

Απόκλιση διαδρομής (m)	0,067
------------------------	-------

και βάση της σχέσης (4.9)

Διόρθωση λόγω επιρροής ηχοπετάσματος (dB(A))	-9,9
--	------

Διόρθωση για τον τομέα 6, -16,1dB(A)

Και για τα δύο ρεύματα η κατευθυντικότητα της πηγής δίνει διόρθωση βάση της γωνίας οράσεως θ και της γωνίας προσανατολισμού α . Η σχέση που δίνει τη διόρθωση αυτή, για όλα τα οχήματα εκτός από τις μηχανές diesel που λειτουργούν εν πλήρη ισχύ είναι

$$\text{Διόρθωση} = 10 \log[\pi \theta / 180 - \cos 2\alpha \sin \theta] - 5 \quad (4.10)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (4.10) για τις γωνίες α και θ , όπως αυτές προκύπτουν από τα σχήματα 4.2.2-4.2.6

Τομέας 2

$$\alpha = 46^\circ$$

$$\theta = 13^\circ$$

Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας (dB(A))	-11,3
---	-------

Τομέας 3

$$\alpha = 73^\circ$$

$$\theta = 41^\circ$$

Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας (dB(A))	-4,0
---	------

Τομέας 4

$$\alpha = 71^\circ$$

$$\theta = 33^\circ$$

Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας (dB(A))	-5,0
---	------

Τομέας 5

$$\alpha = 43^\circ$$

$$\theta = 23^\circ$$

Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας (dB(A))	-9,3
---	------

Τομέας 6

$$\alpha = 16^\circ$$

$$\theta = 32^\circ$$

Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας (dB(A))	-14,6
---	-------

4.7.4. Βήμα 4^ο

Γίνεται διόρθωση του SEL_{ref} για να ληφθούν υπ' όψη τα αποτελέσματα των φαινομένων ανακλάσεως στο σημείο λήψεως.

Υπολογίζεται η επιρροή των ανακλάσεων που μπορούν να υπάρξουν είτε από κατασκευές που βρίσκονται κοντά στη θέση μέτρησης ή πίσω από την πηγή. Στην περίπτωση που εξετάζεται δεν υπάρχουν τέτοιες κατασκευές.

4.7.5. Βήμα 5^ο

Υπολογίζεται η στάθμη έκθεσης απλού συμβάντος SEL των εξεταζόμενων συρμών στη θέση μέτρησης κάνοντας τις διορθώσεις των βημάτων 3 και 4 στη στάθμη SEL_{ref} για κάθε τομέα. Απ' τη στάθμη SEL που προκύπτει υπολογίζεται η στάθμη L_{Aeq} για την απαιτούμενη χρονική βάση του αριθμού των συρμών που πέρασαν την περίοδο αυτή.

$$\begin{aligned} SEL = & SEL_{ref} + [\text{Διόρθωση λόγω απόστασης}] \\ & + [\text{Διόρθωση λόγω ατμόσφαιρας}] \\ & + [\text{Διόρθωση λόγω εδάφους}] \\ & + [\text{Διόρθωση λόγω εμποδίων}] \\ & + [\text{Διόρθωση λόγω κατευθυντικότητας}] \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$L_{Aeq,18h} = SEL - 48.1 + 10 \log_{10} Q_{day} \quad (4.12)$$

$$L_{Aeq,6h} = SEL - 43.3 + 10 \log_{10} Q_{night} \quad (4.13)$$

Ο αριθμός των διερχόμενων οχημάτων κάθε κατηγορίας είναι μάλλον ενδεικτικός. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σημειώθηκαν κάποιες από τις συνθέσεις των συρμών που εξυπηρετούν τα προγραμματισμένα δρομολόγια. Βάση των σημειώσεων αυτών και της λίστας δρομολογίων υπολογίστηκε ο ημερήσιος φόρτος κάθε διαφορετικού τύπου διερχόμενου οχήματος. Αν και οι συνθέσεις που χρησιμοποιεί ο Ο.Σ.Ε. δεν είναι οι ίδιες πάντοτε, δεν αλλάζουν σημαντικά. Για κάποια δρομολόγια που δεν ήταν γνωστή η σύνθεση του συρμού που το εξυπηρετεί, έγινε η υπόθεση ότι είναι η ίδια με εκείνες των συρμών που είχαν ίδιο προορισμό.

Ρεύμα: από Αθήνα

Τομέας	απόσταση	ατμόσφαιρα	έδαφος	εμπόδια	κατευθυντικότητα	συνολική διόρθωση
2	-3,2	-0,2	-0,7		-11,3	-15,4
3	-3,2	-0,2		-21	-4,0	-28,4
4	-3,2	-0,2	-0,7		-5,0	-9,1
5	-3,2	-0,2		-5,7	-9,3	-18,4
6	-3,2	-0,2		-16,1	-14,6	-34,1

Adtranz	$Q_{18h} =$	23
	$Q_{6h} =$	3

Βαγόνια (π)	$Q_{18h} =$	10
	$Q_{6h} =$	8

Βαγόνια (κ)	$Q_{18h} =$	79
	$Q_{6h} =$	2

IC τετράδυμη	$Q_{18h} =$	4
	$Q_{6h} =$	όχι

IC πεντάδ.	$Q_{18h} =$	4
	$Q_{6h} =$	όχι

Desiro	$Q_{18h} =$	73
	$Q_{6h} =$	5

Χρησιμοποιώντας τους φόρτους αυτούς και με τις σχέσεις (4.11), (4.12), (4.13) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για κάθε τομέα.

τομέας 2	Adtranz	$L_{Aeq,18h}$	=	37,3	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h}$	=	31,3
		$L_{Aeq,6h}$	=	28,5		$L_{Aeq,6h}$	=	30,3
		SEL	=	71,8		SEL	=	69,4
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h}$	=	35,2	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h}$	=	32,4
		$L_{Aeq,6h}$	=	19,2		$L_{Aeq,6h}$	=	
		SEL	=	64,3		SEL	=	74,5
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h}$	=	32,5	Desiro	$L_{Aeq,18h}$	=	39,5
		$L_{Aeq,6h}$	=			$L_{Aeq,6h}$	=	27,9
		SEL	=	74,6		SEL	=	69

τομέας 3	Adtranz	$L_{Aeq,18h}$	= 24,3	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h}$	= 18,3
		$L_{Aeq,6h}$	= 15,5		$L_{Aeq,6h}$	= 17,3
		SEL	= 58,8		SEL	= 56,4
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h}$	= 22,2	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h}$	= 19,4
		$L_{Aeq,6h}$	= 6,2		$L_{Aeq,6h}$	=
		SEL	= 51,3		SEL	= 61,5
IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h}$	= 19,5	Desiro	$L_{Aeq,18h}$	= 26,5	
	$L_{Aeq,6h}$	=		$L_{Aeq,6h}$	= 14,9	
	SEL	= 61,6		SEL	= 56	

τομέας 4	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 43,6$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 37,6$
		$L_{Aeq,6h} = 34,8$		$L_{Aeq,6h} = 36,6$
		SEL = 78,1		SEL = 75,7
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 41,5$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 38,7$
		$L_{Aeq,6h} = 25,5$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 70,6		SEL = 80,8
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 38,8$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 45,8$
		$L_{Aeq,6h} =$		$L_{Aeq,6h} = 34,2$
		SEL = 80,9		SEL = 75,3

τομέας 5	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 34,3$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 28,3$
		$L_{Aeq,6h} = 25,5$		$L_{Aeq,6h} = 27,3$
		SEL = 68,8		SEL = 66,4
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 32,2$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 29,4$
		$L_{Aeq,6h} = 16,2$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 61,3		SEL = 71,5
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 29,5$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 36,5$
		$L_{Aeq,6h} =$		$L_{Aeq,6h} = 24,9$
		SEL = 71,6		SEL = 66

τομέας 6	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 18,6$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 12,6$
		$L_{Aeq,6h} = 9,8$		$L_{Aeq,6h} = 11,6$
		SEL = 53,1		SEL = 50,7
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 16,5$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 13,7$
		$L_{Aeq,6h} = 0,5$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 45,6		SEL = 55,8
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 13,8$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 20,8$
		$L_{Aeq,6h} =$		$L_{Aeq,6h} = 9,2$
		SEL = 55,9		SEL = 50,3

Ρεύμα: προς Αθήνα

Τομέας	Απόσταση	Ατμόσφαιρα	Κατευθυντικότητα	έδαφος	έρμα	εμπόδια	συνολική διόρθωση
2	-3,5	-0,3	-11,3	-0,8	-1,5		-17,4
3	-3,5	-0,3	-4,0		-1,5	-21	-30,3
4	-3,5	-0,3	-5,0	-0,8	-1,5		-11,1
5	-3,5	-0,3	-9,3		-1,5	-5,8	-20,4
6	-3,5	-0,3	-14,6		-1,5	-16,1	-36

Adtranz	$Q_{18h} = 24$	Βαγόνια (π)	$Q_{18h} = 1$
	$Q_{6h} = 2$		$Q_{6h} = 8$
Βαγόνια (κ)	$Q_{18h} = 79$	IC τετράδυμη	$Q_{18h} = 4$
	$Q_{6h} = 6$		$Q_{6h} = 6$
IC πεντάδ.	$Q_{18h} = 2$	Desiro	$Q_{18h} = 71$
	$Q_{6h} = 2$		$Q_{6h} = 7$

Χρησιμοποιώντας τους φόρτους αυτούς και με τις σχέσεις (4.11), (4.12), (4.13) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για κάθε τομέα.

τομέας 2	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 35,5$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 19,3$
		$L_{Aeq,6h} = 24,7$		$L_{Aeq,6h} = 28,3$
		SEL = 69,8		SEL = 67,4
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 33,2$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 30,4$
		$L_{Aeq,6h} = 22,0$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 62,3		SEL = 72,5
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 27,5$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 37,4$
		$L_{Aeq,6h} = 27,5$		$L_{Aeq,6h} = 27,4$
		SEL = 72,6		SEL = 67

τομέας 3	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 22,6$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 6,4$
		$L_{Aeq,6h} = 11,8$		$L_{Aeq,6h} = 15,4$
		SEL = 56,9		SEL = 54,5
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 20,3$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 17,5$
		$L_{Aeq,6h} = 9,1$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 49,4		SEL = 59,6
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 14,6$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 24,5$
		$L_{Aeq,6h} = 14,6$		$L_{Aeq,6h} = 14,5$
		SEL = 59,7		SEL = 54,1

τομέας 4	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 41,8$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 25,6$
		$L_{Aeq,6h} = 31,0$		$L_{Aeq,6h} = 34,6$
		SEL = 76,1		SEL = 73,7
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 39,5$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 36,7$
		$L_{Aeq,6h} = 28,3$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 68,6		SEL = 78,8
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 33,8$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 43,7$
		$L_{Aeq,6h} = 33,8$		$L_{Aeq,6h} = 33,7$
		SEL = 78,9		SEL = 73,3

τομέας 5	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 32,5$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 16,3$
		$L_{Aeq,6h} = 21,7$		$L_{Aeq,6h} = 25,3$
		SEL = 66,8		SEL = 64,4
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 30,2$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 27,4$
		$L_{Aeq,6h} = 19,0$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 59,3		SEL = 69,5
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 24,5$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 34,4$
		$L_{Aeq,6h} = 24,5$		$L_{Aeq,6h} = 24,4$
		SEL = 69,6		SEL = 64

τομέας 6	Adtranz	$L_{Aeq,18h} = 16,9$	Βαγόνια (π)	$L_{Aeq,18h} = 0,7$
		$L_{Aeq,6h} = 6,1$		$L_{Aeq,6h} = 9,7$
		SEL = 51,2		SEL = 48,8
	Βαγόνια (κ)	$L_{Aeq,18h} = 14,6$	IC τετράδυμη	$L_{Aeq,18h} = 11,8$
		$L_{Aeq,6h} = 3,4$		$L_{Aeq,6h} =$
		SEL = 43,7		SEL = 53,9
	IC πεντάδ.	$L_{Aeq,18h} = 8,9$	Desiro	$L_{Aeq,18h} = 18,8$
		$L_{Aeq,6h} = 8,9$		$L_{Aeq,6h} = 8,8$
		SEL = 54		SEL = 48,4

4.7.6. Βήμα 6°

Αθροίζοντας τις στάθμες θορύβου L_{Aeq} από όλους τους τομείς και για τις δύο κατευθύνσεις, υπολογίζεται το L_{Aeq} για μέρα και νύχτα.

Η άθροιση για τις δύο χρονικές περιόδους θα γίνει κατά τις σχέσεις

$$L_{Aeq,18h} = 10 + \log \left(\left(\sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=2}^6 10^{\frac{L_{Aeq,18h\ i,j}}{10}} \right) \right)_{[από\ Αθήνα]} + \left(\sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=2}^6 10^{\frac{L_{Aeq,18h\ i,j}}{10}} \right) \right)_{[προς\ Αθήνα]} \right)$$

και

$$L_{Aeq,6h} = 10 + \log \left(\left(\sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=2}^6 10^{\frac{L_{Aeq,6h\ i,j}}{10}} \right) \right)_{[από\ Αθήνα]} + \left(\sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=2}^6 10^{\frac{L_{Aeq,6h\ i,j}}{10}} \right) \right)_{[προς\ Αθήνα]} \right)$$

όπου

- i: οι τομείς που έχει χωριστεί το εξεταζόμενο τμήμα γραμμής
j: οι τύποι συρμών που διέρχονται από το εξεταζόμενο τμήμα γραμμής

Η τιμές που προέκυψαν είναι

$$L_{Aeq,18h} = 53,1 \text{ dB(A)} = L_{day}$$

$$L_{Aeq,6h} = 44,4 \text{ dB(A)} = L_{night}$$

Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις οριακές τιμές που έχει θεσμοθετήσει η Γερμανία για περιοχές κατοικίας (59 και 49dB(A) αντίστοιχα) αν και

διαφοροποιημένοι⁽¹⁾. Οι τιμές αυτές είναι οι χαμηλότερες που υπάρχουν μέχρι σήμερα στην Ε.Ε..

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές προέρχονται μόνο από την κυκλοφορία των σιδηροδρόμων και δεν συνυπολογίζουν το θόρυβο υποβάθρου.

4.8. Μετρήσεις στη θέση Λυκότρυπα

Στην ίδια θέση για την οποία υπολογίστηκε η στάθμη θορύβου από τους διερχόμενους συρμούς, έγιναν μετρήσεις για να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου CRN. Οι μετρήσεις αφορούν μεμονωμένες διελεύσεις συρμών, καθώς η περιοχή είναι κατοικημένη και υπάρχουν και άλλες σημαντικές πηγές θορύβου. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η στάθμη ηχητικής έκθεσης απλού συμβάντος (SEL). Οι μετρήσεις αυτές παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες. Οι στάθμες θορύβου των διελεύσεων αυτών θα συγκριθούν με αυτές που προβλέπει η μέθοδος CRN-1995.

Προς Αθήνα	Σύνθεση	Μήκος συρμού (m)	Χρόνος διέλευσης (sec)	Ταχύτητα (km/h)	SEL
	Desiro x2	62,48	3,2	70	79,3
	Ad+8βαγ(π)	215,4	7,6	102	90
	Ad+4βαγ(κ)	117,4	4,08	104	86,4
	IC τετραδύο x2	203,6	8	92	86,9
	IC πεντάδυο	128,2	4,8	96	86,5

Από Αθήνα	Σύνθεση	Μήκος συρμού (m)	Χρόνος διέλευσης (sec)	Ταχύτητα (km/h)	SEL
	IC τετραδύο x2	203,6	8,64	85	85,6
	Ad+3βαγ(κ)	92,9	3,96	84	83,5
	Ad+8βαγ(π)	215,4	12,32	63	87,4
	IC πεντάδυο	128,2	5,04	92	85,0
	Desiro x2	62,48	2,96	76	77,7

4.8.1. Υπολογισμός στάθμης θορύβου με τη μέθοδο CRN

Θα υπολογιστούν οι ηχητικές στάθμες αναφοράς για αυτές τις συνθέσεις στις αντίστοιχες ταχύτητες με τη μέθοδο CRN και τη σχέση (4.1). Αρχικά υπολογίζονται οι ηχητικές στάθμες αναφοράς μεμονωμένων οχημάτων.

Adtranz	Ταχύτητα (km/h)	84	63	102	104
	Διόρθωση (dB(A))	17,9			
	SEL _{ref}	87,6	85,1	89,3	89,4

Βαγόνια (κ)	Ταχύτητα (km/h)	84	104
	Διόρθωση (dB(A))	10,4	
	SEL _{ref}	80,1	81,8

Βαγόνια (π)	Ταχύτητα (km/h)	63	102
	Διόρθωση (dB(A))	15,5	
	SEL _{ref}	82,7	86,9

IC τετραδύμιο	Ταχύτητα (km/h)	85	92
	Διόρθωση (dB(A))	19,6	
	SEL _{ref}	89,4	90,1

IC πεντάδυμιο	Ταχύτητα (km/h)	96	92
	Διόρθωση (dB(A))	19,7	
	SEL _{ref}	90,5	90,2

Desiro	Ταχύτητα (km/h)	70	76
	Διόρθωση (dB(A))	15,1	
	SEL _{ref}	83,2	83,9

Υπολογίζονται οι ηχητικές στάθμες αναφοράς των συρμών που μετρήθηκαν.

Προς Αθήνα	Σύνθεση	Ταχύτητα (km/h)	SEL _{ref}
	Desiro x2	70	86,2
	Ad+8βαγ(π)	102	96,8
	Ad+4βαγ(κ)	104	91,8
	IC τετραδύμιο x2	92	93,1
	IC πεντάδυμιο	96	90,5

Από Αθήνα	Σύνθεση	Ταχύτητα (km/h)	SEL _{ref}
	IC τετραδύμιο x2	85	92,4
	Ad+3βαγ(κ)	84	89,4
	Ad+8βαγ(π)	63	92,6
	IC πεντάδυμιο	92	90,2
	Desiro x2	76	86,9

Γίνονται οι διορθώσεις λόγω των διαφόρων παραμέτρων επιρροής της διάδοσης και υπολογίζεται η στάθμη ηχητικής έκθεσης απλού συμβάντος SEL για καθ' έναν από τους παραπάνω συρμούς.

Προς Αθήνα

Τομέας	Απόσταση	Ατμόσφαιρα	Κατευθυντικότητα	Έδαφος	Έρμα	Εμπόδια	συνολική διόρθωση
2	-3,5	-0,3	-11,3	-0,8	-1,5		-17,4
3	-3,5	-0,3	-4,0		-1,5	-21	-30,3
4	-3,5	-0,3	-5,0	-0,8	-1,5		-11,1
5	-3,5	-0,3	-9,3		-1,5	-5,8	-20,4
6	-3,5	-0,3	-14,6		-1,5	-16,1	-36

Προς Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	τομέας 2
	Desiro x2	86,2	68,8	-17,4	
	Ad+8βαγ(π)	96,8	79,4		
	Ad+4βαγ(κ)	91,8	74,4		
	IC τετραδύμιο x2	93,1	75,7		
	IC πεντάδυμιο	90,5	73,1		

Προς Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	τομέας 3
	Desiro x2	86,2	55,9	-30,3	
	Ad+8βαγ(π)	96,8	66,5		
	Ad+4βαγ(κ)	91,8	61,5		
	IC τετραδύμιο x2	93,1	62,8		
	IC πεντάδυμιο	90,5	60,2		

Προς Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	Τομέας 4
	Desiro x2	86,2	75,1	-11,1	
	Ad+8βαγ(π)	96,8	85,7		
	Ad+4βαγ(κ)	91,8	80,7		
	IC _{τετραδυμο} x2	93,1	82,0		
	IC _{πεντάδυμο}	90,5	79,4		

Προς Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	τομέας 5
	Desiro x2	86,2	65,8	-20,4	
	Ad+8βαγ(π)	96,8	76,4		
	Ad+4βαγ(κ)	91,8	71,4		
	IC _{τετραδυμο} x2	93,1	72,7		
	IC _{πεντάδυμο}	90,5	70,1		

Προς Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	τομέας 6
	Desiro x2	86,2	50,2	-36,0	
	Ad+8βαγ(π)	96,8	60,8		
	Ad+4βαγ(κ)	91,8	55,8		
	IC _{τετραδυμο} x2	93,1	57,1		
	IC _{πεντάδυμο}	90,5	54,5		

Αθροίζεται για κάθε σύνθεση συρμού η συνεισφορά κάθε τομέα

Προς Αθήνα	Σύνθεση	Τομέας 2	Τομέας 3	Τομέας 4	Τομέας 5	Τομέας 6	Σύνολο
	Desiro x2	68,8	55,9	75,1	65,8	50,2	76,5
	Ad+8βαγ(π)	79,4	66,5	85,7	76,4	60,8	87,1
	Ad+4βαγ(κ)	74,4	61,5	80,7	71,4	55,8	82,1
	IC _{τετραδυμο} x2	75,7	62,8	82	72,7	57,1	83,4
	IC _{πεντάδυμο}	73,1	60,2	79,4	70,1	54,5	80,8

Από Αθήνα

Τομέας	απόσταση	ατμόσφαιρα	έδαφος	εμπόδια	κατευθυντικότητα	συνολική διόρθωση
2	-3,2	-0,2	-0,7		-11,3	-15,4
3	-3,2	-0,2		-21	-4,0	-28,4
4	-3,2	-0,2	-0,7		-5,0	-9,1
5	-3,2	-0,2		-5,7	-9,3	-18,4
6	-3,2	-0,2		-16,1	-14,6	-34,1

Από Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	Τομέας 2
	IC τετραδυμο x2	92,4	77,0	-15,4	
	Ad+3βαγ(κ)	89,4	74,0		
	Ad+8βαγ(π)	92,6	77,2		
	IC πεντάδυμο	90,2	74,8		
	Desiro x2	86,9	71,5		

Από Αθήνα	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	τομέας 3
	IC _{τετραδυμο} x2	92,4	64,0	-28,4	
	Ad+3βαγ(κ)	89,4	61,0		
	Ad+8βαγ(π)	92,6	64,2		
	IC _{πεντάδυμο}	90,2	61,8		
	Desiro x2	86,9	58,5		

	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	
Από Αθήνα	IC _{τετραδύμο} x2	92,4	83,3	-9,1	τομέας 4
	Ad+3βαγ(κ)	89,4	80,3		
	Ad+8βαγ(π)	92,6	83,5		
	IC _{πεντάδύμο}	90,2	81,1		
	Desiro x2	86,9	77,8		

	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	
Από Αθήνα	IC _{τετραδύμο} x2	92,4	74,0	-18,4	τομέας 5
	Ad+3βαγ(κ)	89,4	71,0		
	Ad+8βαγ(π)	92,6	74,2		
	IC _{πεντάδύμο}	90,2	71,8		
	Desiro x2	86,9	68,5		

	Σύνθεση	SEL _{ref}	SEL	Διόρθωση	
Από Αθήνα	IC _{τετραδύμο} x2	92,4	58,3	-34,1	τομέας 4
	Ad+3βαγ(κ)	89,4	55,3		
	Ad+8βαγ(π)	92,6	58,5		
	IC _{πεντάδύμο}	90,2	56,1		
	Desiro x2	86,9	52,8		

Ομοίως

	Σύνθεση	Τομέας 2	Τομέας 3	Τομέας 4	Τομέας 5	Τομέας 6	Σύνολο
Από Αθήνα	IC _{τετραδύμο} x2	77	64	83,3	74	58,3	84,7
	Ad+3βαγ(κ)	74	61	80,3	71	55,3	81,7
	Ad+8βαγ(π)	77,2	64,2	83,5	74,2	58,5	84,9
	IC _{πεντάδύμο}	74,8	61,8	81,1	71,8	56,1	82,5
	Desiro x2	71,5	58,5	77,8	68,5	52,8	79,2

4.8.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Σύνθεση	Ταχύτητα (km/h)	Πρόβλεψη	Μέτρηση	Διαφορά	Από Αθήνα
IC _{τετραδύμο} x2	85	84,7	85,6	0,9	
Ad+3βαγ(κ)	84	81,7	83,5	1,8	
Ad+8βαγ(π)	63	84,9	87,4	2,5	
IC _{πεντάδυμο}	92	82,5	85,0	2,5	
Desiro x2	76	79,2	77,7	-1,5	

Σύνθεση	Ταχύτητα (km/h)	Πρόβλεψη	Μέτρηση	Διαφορά	Προς Αθήνα
Desiro x2	70	76,5	79,3	2,8	
Ad+8βαγ(π)	102	87,1	90,0	2,9	
Ad+4βαγ(κ)	104	82,1	86,4	4,3	
IC _{τετραδύμο} x2	92	83,4	86,9	3,5	
IC _{πεντάδυμο}	96	80,8	84,8	4,0	

1. Η μέθοδος φαίνεται να υποεκτιμά κατά κανόνα τον παραγόμενο θόρυβο. Η παρατήρηση αυτή είχε γίνει και στον έλεγχο εγκυρότητας της μεθόδου στην περιοχή της Δεκέλειας. Οι αποκλίσεις πιθανόν να μεταφέρονται από σφάλματα που έγιναν κατά την προσαρμογή της μεθόδου στη Δεκέλεια.
2. Το ρεύμα προς Αθήνα έχει σημαντικά μεγαλύτερα σφάλματα. Σε σημαντικό βαθμό αυτό μπορεί να οφείλεται στην επιρροή του έρματος. Η διόρθωση του 1,5 dB(A) που δίνει η μέθοδος πιθανότατα είναι υπερβολική.
3. Η στάθμη ηχητικής έκθεσης αναφοράς της αμαξοστοιχίας Desiro φαίνεται να είναι προβληματική. Η αμαξοστοιχία που μετρήθηκε στη θέση Λυκότρυπα έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή της θέσης στη Δεκέλεια (70km/h έναντι 40km/h). Η αναγωγή στην ταχύτητα λειτουργίας έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4.1) η οποία ωστόσο έχει διαπιστωθεί ήδη από το κεφάλαιο 4.6.2. ότι είναι προβληματική.
4. Η διαφορά της μέτρησης από αυτή της πρόβλεψης είναι κατά μέσο όρο 2,7dB(A). Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγάλη αν ληφθεί υπ' όψη ότι αύξηση της στάθμης κατά 3dB(A) αντιστοιχεί σε διπλασιασμό του θορύβου.

4.9. Πρόβλεψη θορύβου για μελλοντική σιδηροδρομική κυκλοφορία

Η Ε.Ε. έχει θέσει στόχο την αύξηση της χρήσης του σιδηροδρόμου για μεταφορές επιβατών. Θα γίνει πρόβλεψη για μια πιθανή αύξηση του σιδηροδρομικού φόρτου που θα συνδέεται με αυτό τον στόχο. Οι παραδοχές που έγιναν είναι ότι η αύξηση του φόρτου ήταν η ίδια για όλους τους συρμούς που εξετάστηκαν και ότι οι επιβάτες θα εξυπηρετούνται από τους ίδιους τύπους συρμών.

Ρεύμα: προς Αθήνα

Αύξηση του φόρτου κατά 70%

Προς Αθήνα

Σήμερα Πρόβλεψη (+70%)			
Adtranz	$Q_{18h} =$	24	41
	$Q_{8h} =$	2	3
Βαγόνια (κ)	$Q_{18h} =$	79	134
	$Q_{8h} =$	6	10
IC πεντάδ.	$Q_{18h} =$	2	3
	$Q_{8h} =$	2	3
Βαγόνια (π)	$Q_{18h} =$	1	2
	$Q_{8h} =$	8	14
IC τετράδυμη	$Q_{18h} =$	4	7
	$Q_{8h} =$	0	0
Desiro	$Q_{18h} =$	71	121
	$Q_{8h} =$	7	12

Από Αθήνα

Σήμερα Πρόβλεψη (+70%)			
Adtranz	$Q_{18h} =$	23	39
	$Q_{8h} =$	3	5

	$Q_{18h} =$	79	134
Βαγόνια (κ)	$Q_{8h} =$	2	3

	$Q_{18h} =$	4	7
IC πεντάδ.	$Q_{8h} =$	0	0

	$Q_{18h} =$	10	17
Βαγόνια (π)	$Q_{8h} =$	8	14

	$Q_{18h} =$	4	7
IC τετράδυμη	$Q_{8h} =$	0	0

	$Q_{18h} =$	73	124
Desiro	$Q_{8h} =$	5	9

Με τους φόρτους αυτούς γίνεται εφαρμογή της μεθόδου κατά τα βήματα 5, 6 και 7 και οι τιμές που προκύπτουν για αυτήν την αύξηση του φόρτου είναι

$$L_{Aeq,18h} = 54,3dB(A) = L_{day}$$

$$L_{Aeq,6h} = 50,6 dB(A) = L_{night}$$

Ακόμα και μια τέτοια αύξηση φόρτου σύμφωνα με τη μέθοδο πρόβλεψης θα προκαλέσει την υπέρβαση του θεσμοθετημένου ορίου για το θόρυβο από το σιδηρόδρομο στη Γερμανία μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας (49dB(A)).

4.10. Παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 στην Ελλάδα

Κατά την εφαρμογή έγιναν παραδοχές και απλοποιήσεις που μείωσαν την ακρίβεια της πρόβλεψης που σχετίζονταν με τον τρόπο μέτρησης και τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου. Παρακάτω παρατίθενται σκέψεις που θα βελτίωναν την ακρίβεια της εφαρμογής

1. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αποστάσεις του σημείου ακρόασης από την πηγή παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της στάθμης του θορύβου. Για το λόγο αυτό, η χρήση τρίποδα και γεωδαιτικών οργάνων είναι ενδεδειγμένη.
2. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν θα πρέπει να υπάρχουν άλλες σημαντικές πηγές θορύβου. Στην περίπτωση που διαπιστώνεται κάτι τέτοιο οι σχετικές μετρήσεις δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη.
3. Η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών γίνονται σημαντικές για μεγάλες αποστάσεις της πηγής από το σημείο ακρόασης⁽²⁰⁾. Εξαίρεση αποτελεί ο άνεμος. Η χρήση ανεμομέτρου κατά τις μετρήσεις είναι ενδεδειγμένη για την καταγραφή θορύβου μόνο όταν η ένταση του ανέμου είναι μικρότερη από μια καθορισμένη οριακή τιμή.
4. Η μέτρηση είναι περισσότερο ακριβής όταν το έδαφος ανάμεσα στην πηγή και τη θέση ακρόασης είναι επίπεδο και μη απορροφητικό.
5. Το κατάλληλο ηχόμετρο για τη μέτρηση του σιδηροδρομικού θορύβου θα πρέπει να διαθέτει λογισμικό που να κάνει αυτόματα υπολογισμό της στάθμης ηχητικής έκθεσης για το διάστημα που ο θόρυβος της διέλευσης είναι κατά 10dB(A) χαμηλότερος της μέγιστης τιμής.
6. Η χρήση συστοιχίας μικροφώνων θα επέτρεπε τον εντοπισμό της θέσης της πηγής, το οποίο αποτελεί δεδομένο εισόδου που όταν δεν υπάρχουν σχετικά στοιχεία λαμβάνεται στο επίπεδο της σιδηροτροχιάς.
7. Για την εκτέλεση μετρήσεων που αφορούν στον προσδιορισμό της στάθμης θορύβου που προέρχεται από το σιδηρόδρομο απαιτείται ο έλεγχος της τραχύτητας με κατάλληλο εξοπλισμό. Η μέθοδος δεν συνυπολογίζει την παράμετρο αυτή. Απαιτείται ο προσδιορισμός διόρθωσης βάση της τιμής της τραχύτητας. Σε αυτόν το τομέα η μέθοδος είναι ελλιπής.
8. Η μέθοδος απαιτεί την εκτίμηση του ποσοστού του εδάφους που είναι απορροφητικό. Δίδεται μόνο ότι το γρασίδι έχει απορρόφηση 100% σε αντίθεση με άλλες μεθόδους (Nord2000) που δίνουν τιμές απορρόφησης για αναλυτικές περιγραφές εδαφών. Υπάρχει συνεπώς ασάφεια στην εκτίμηση του ποσοστού απορρόφησης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.
9. Μια σημαντική αδυναμία για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η απουσία μιας σχέσης $SEL_{ref} - V$ για τους ελληνικούς συρμούς. Η εύρεση μιας τέτοιας σχέσης προϋποθέτει τρεις τουλάχιστον διελεύσεις του ίδιου συρμού από το σημείο

4.10. Παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 στην Ελλάδα

Κατά την εφαρμογή έγιναν παραδοχές και απλοποιήσεις που μείωσαν την ακρίβεια της πρόβλεψης που σχετίζονταν με τον τρόπο μέτρησης και τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου. Παρακάτω παρατίθενται σκέψεις που θα βελτίωναν την ακρίβεια της εφαρμογής

1. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αποστάσεις του σημείου ακρόασης από την πηγή παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της στάθμης του θορύβου. Για το λόγο αυτό, η χρήση τρίποδα και γεωδαιτικών οργάνων είναι ενδεδειγμένη.
2. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν θα πρέπει να υπάρχουν άλλες σημαντικές πηγές θορύβου. Στην περίπτωση που διαπιστώνεται κάτι τέτοιο οι σχετικές μετρήσεις δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη.
3. Η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών γίνονται σημαντικές για μεγάλες αποστάσεις της πηγής από το σημείο ακρόασης⁽²⁰⁾. Εξαίρεση αποτελεί ο άνεμος. Η χρήση ανεμομέτρου κατά τις μετρήσεις είναι ενδεδειγμένη για την καταγραφή θορύβου μόνο όταν η ένταση του ανέμου είναι μικρότερη από μια καθορισμένη οριακή τιμή.
4. Η μέτρηση είναι περισσότερο ακριβής όταν το έδαφος ανάμεσα στην πηγή και τη θέση ακρόασης είναι επίπεδο και μη απορροφητικό.
5. Το κατάλληλο ηχόμετρο για τη μέτρηση του σιδηροδρομικού θορύβου θα πρέπει να διαθέτει λογισμικό που να κάνει αυτόματα υπολογισμό της στάθμης ηχητικής έκθεσης για το διάστημα που ο θόρυβος της διέλευσης είναι κατά δέκα dB(A) χαμηλότερος της μέγιστης τιμής.
6. Η χρήση συστοιχίας μικροφώνων θα επέτρεπε τον εντοπισμό της θέσης της πηγής, το οποίο αποτελεί δεδομένο εισόδου που όταν δεν υπάρχουν σχετικά στοιχεία λαμβάνεται στο επίπεδο της σιδηροτροχιάς.
7. Για την εκτέλεση μετρήσεων που αφορούν στον προσδιορισμό της στάθμης θορύβου που προέρχεται από το σιδηρόδρομο απαιτείται ο έλεγχος της τραχύτητας με κατάλληλο εξοπλισμό. Η μέθοδος δεν συνυπολογίζει την παράμετρο αυτή. Απαιτείται ο προσδιορισμός διόρθωσης βάση της τιμής της τραχύτητας. Σε αυτόν το τομέα η μέθοδος είναι ελλιπής.
8. Η μέθοδος απαιτεί την εκτίμηση του ποσοστού του εδάφους που είναι απορροφητικό. Δίδεται μόνο ότι το γρασίδι έχει απορρόφηση 100% σε αντίθεση με άλλες μεθόδους (Nord2000) που δίνει τιμές απορρόφησης για αναλυτικές περιγραφές εδαφών. Υπάρχει συνεπώς ασάφεια στην εκτίμηση του ποσοστού απορρόφησης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.
9. Μια σημαντική αδυναμία για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η απουσία μιας σχέσης $SEL_{ref} - V$ για τους ελληνικούς συρμούς. Η εύρεση μιας τέτοιας σχέσης προϋποθέτει τρεις τουλάχιστον διελεύσεις του ίδιου συρμού από το σημείο

μέτρησης με διαφορετικές ταχύτητες μέχρι και τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μόνο με τη συνεργασία του Ο.Σ.Ε. προγραμματίζοντας διελεύσεις ειδικά για αυτό το σκοπό.

5. Τρόποι αντιμετώπισης του θορύβου από το σιδηρόδρομο.

Κάθε πολιτική αντιμετώπισης ενός προβλήματος πρέπει να ξεκινά θέτοντας συγκεκριμένους στόχους. Η μείωση της στάθμης θορύβου που έχει θέσει σαν στόχο η Ευρώπη κατά τη διέλευση του συρμού είναι της τάξης των 10-15 dB(A) με εστίαση στις πιο επιβαρημένες με θόρυβο περιοχές. Μια τέτοια μείωση θα επέφερε σημαντική βελτίωση για την πλειοψηφία του πληθυσμού που προσβάλλονται από τη λειτουργία των σιδηροδρόμων. Ο τρόπος που θα επιτευχθεί μια τέτοια μείωση σχετίζεται με το κόστος της λύσης. Οι συνήθεις πρακτικές έχουν πολύ υψηλό κόστος, γεγονός που η ενδεχόμενη εφαρμογή τέτοιων λύσεων θα είχε αρνητικές επιπτώσεις στην ανταγωνιστικότητα του σιδηροδρόμου ως μέσο μεταφοράς. Αυτό το πρόβλημα αποτέλεσε σημείο μελέτης του προγράμματος STAIRRS.

5.1. Η αντιμετώπιση του σιδηροδρομικού θορύβου με ηχοπετάσματα

Συνήθης λύση σε περιοχές που πρέπει να προστατευθούν από το επιβαρημένο ηχητικά περιβάλλον είναι η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων μεταξύ της πηγής και του δέκτη. Η χρήση ηχοπετασμάτων αποτελεί μέτρο αντιμετώπισης του θορύβου που εφαρμόζεται στη διαδρομή της διάδοσής του. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που έχει αυτή η λύση είναι η ευκολία της εφαρμογής της. Η αποτελεσματικότητά της είναι ικανοποιητική καθώς μπορεί να επιτύχει μείωση που φτάνει τα 10dB. Αυτό, όμως, εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του ηχοπετάσματος (ύψος, μήκος, σχήμα, υλικό κατασκευής).

Ωστόσο, η χρήση ηχοπετασμάτων συνοδεύεται και από τεχνικές δυσκολίες. Το αυξημένο ύψος της πηγής συμπαρασύρει και το ύψος του ηχοπετάσματος και αυτό σε υψηλότερο κόστος. Αυτό σημαίνει ότι ένα ηχοπέτασμα δεδομένου ύψους μπορεί να είναι αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση του θορύβου κύλισης που εκπέμπεται από το ύψος της σιδηροτροχιάς, η απόδοσή του όμως μειώνεται σημαντικά για το θόρυβο έλξης ή τον αεροδυναμικό θόρυβο που η θέση της πηγής μπορεί να φτάσει και τα 4m. Επιπλέον η αποτελεσματικότητά τους αυξάνεται όταν τοποθετούνται κοντά στην πηγή. Όμως αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό ειδικά στην περίπτωση που η γραμμή έχει περισσότερες από δύο διαδρομές. Στη μείωση της αποδοτικότητάς του συμβάλουν επίσης οι ανακλάσεις του θορύβου σε περιοχές που υπάρχει ανοικοδόμηση εκατέρωθεν όπου είναι έντονες. Τέλος δεν θα πρέπει να παραγνωρίζουμε ότι συνεισφέρουν σημαντικά στην οπτική υποβάθμιση του χώρου.

Η γενικευμένη χρήση ηχοπετασμάτων δεν προωθείται τρόπος αντιμετώπισης του σιδηροδρομικού θορύβου και ο λόγος είναι κατά βάση οικονομικός. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγει και η έρευνα STAIRRS. Η έρευνα αυτή μεταξύ άλλων έθεσε σαν ζήτημα την καλύτερη από άποψη κόστους αποτελέσματος δέσμης μέτρων για την αντιμετώπιση του θορύβου από τον σιδηρόδρομο. Αυτό που κατέδειξε σε σχέση με τα ηχοπετάσματα είναι ότι σε συνδυασμό με άλλα μέσα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και με μειωμένο κόστος. Ωστόσο το ύψος αυτών των ηχοπετασμάτων δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 2m ύψος. Συνεπώς σαν λύση δεν απορρίπτεται, αλλά η χρήση τους πρέπει να περιοριστεί σε τοπικό επίπεδο και όχι κατά το μήκος της γραμμής.

Υπάρχουν εφαρμογές ηχοπετασμάτων που συνδυάζουν την τοποθέτηση ποδιάς (50mm πάνω από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς) δίπλα στη γραμμή αλλά και πάνω στο φορείο. Η πιο αποτελεσματική εκδοχή της εφαρμογής αυτής είναι όταν υπάρχει αλληλοκάλυψη των δύο αυτών κατασκευών. Ωστόσο οι απαιτήσεις λειτουργικότητας των συρμών υποχρεώνουν να υπάρχει ένα κενό μεταξύ του ηχοπετάσματος και της κεφαλής της σιδηροτροχιάς πλάτους 168mm. Στα σχέδια Silent Track και Silent Freight ελέγχθηκε η εφαρμογή αυτή και για το κενό αυτό η μείωση προβλέφθηκε να είναι 5 dB(A), ενώ έγιναν και μετρήσεις που έδειξαν ακόμα μικρότερο όφελος της τάξης των 3 dB(A).

5.2. Η αντιμετώπιση του θορύβου στην πηγή

Τα τελευταία 10 χρόνια πολλά από τα ερωτήματα που τέθηκαν σχετικά με το θόρυβο από το σιδηρόδρομο έχουν απαντηθεί με τη βοήθεια θεωρητικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί και ελεγχθεί για την εγκυρότητά τους. Πολλά άλλα ζητούν ακόμα απαντήσεις. Παρ' όλα αυτά, τα μέτρα μείωσης του παραγόμενου θορύβου θα πρέπει να ακολουθήσουν τη γνώση που υπάρχει μέχρι σήμερα ενώ θα πρέπει να αφήνουν περιθώρια για την εκμετάλλευση της γνώσης που θα προκύψει από την έρευνα τα επόμενα χρόνια.

Η επιζητούμενη μείωση στην πηγή μπορεί να επιτευχθεί σε δύο βασικά βήματα. Πρώτα πρέπει να προσδιοριστούν οι πηγές θορύβου σε κάθε φάση λειτουργίας του σιδηροδρόμου. Ο προσδιορισμός αφορά τόσο την ποσοτικοποίηση του θορύβου που εκπέμπει κάθε πηγή όσο και τη συνεισφορά κάθε πηγής στο συνολικό ηχητικό αποτέλεσμα. Σε δεύτερη φάση θα πρέπει να προσδιοριστούν τα μέτρα εκείνα που θα αποδειχθούν αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων που προκύπτουν από κάθε πηγή. Η αποτελεσματικότητα αυτή συνίσταται στο επιφερόμενο αποτέλεσμα, στο κόστος εφαρμογής της λύσης αλλά πάνω απ' όλα στην εφικτότητα της λύσης.

5.2.1. Μείωση του θορύβου κατά την κύλιση επί της σιδηροτροχιάς

Η πιο κρίσιμη παράμετρος για τον υπολογισμό της στάθμης θορύβου είναι η τραχύτητα που αναπτύσσεται στον τροχό και στη σιδηροτροχιά. Η τραχύτητα της γραμμής παρακολουθείται με κατάλληλες μεθόδους ώστε να μπορεί να καθοριστεί ο χρόνος και το σημείο που χρειάζεται συντήρηση.

- ♦ Άμεσες μέθοδοι. Συστήματα μέτρησης που αποτελούνται από καταγραφείς μετατοπίσεων κάνουν σάρωση μετρώντας την τραχύτητα πάνω σε γραμμή ή τροχό.
- ♦ Έμμεσες μέθοδοι. Οι μετρήσεις γίνονται πάνω στον κινούμενο συρμό με τη χρήση επιταχυνσιόμετρων που τοποθετούνται στον άξονα του συρμού ή με τη χρήση μικροφώνων πάνω στα φορεία. Άλλες φορές μετρούνται οι κραδασμοί της γραμμής κατά τις διελεύσεις.

5.2.1.1. Μείωση του παραγόμενου θορύβου από τον τροχό

Είναι η πηγή θορύβου με τη μεγαλύτερη συνεισφορά για ταχύτητες πάνω από 120km/h. Η βασική αρχή που διέπει τα μέτρα αντιμετώπισης του θορύβου που οφείλεται στους τροχούς είναι η μείωση της τραχύτητας του τροχού. Αυτό επιτυγχάνεται ως μέρος της προγραμματισμένης συντήρησης, η οποία ωστόσο θα πρέπει να γίνεται σε διαστήματα και με τρόπο που θα εξασφαλίζουν την διατήρηση της επιφάνειας του τροχού σε καλή κατάσταση για ικανό χρονικό διάστημα. Ένας τραχύς τροχός σε σχέση με ένα λείο προκαλεί αυξημένα επίπεδα θορύβου της τάξης των 2 – 10 dB, με συνήθεις τιμές τα 3-6dB(A) σε μια απλή διέλευση⁽¹⁰⁾. Η τραχύτητα του τροχού προκαλείται από το σύστημα πέδησης του συρμού και συνεπικουρείται από την τραχύτητα της γραμμής, γεγονός που αναδεικνύει το σύστημα αυτό σε κρίσιμο παράγοντα για την διατήρηση της λείας επιφάνειας του τροχού.

Κύρια αιτία για την τραχύτητα του τροχού είναι οι σιαγώνες πέδης από χυτοσίδηρο με τις οποίες είναι εφοδιασμένα παλιότερα σιδηροδρομικά οχήματα και κυρίως οχήματα μεταφοράς φορτίου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι κατά τη διάρκεια της πέδησης οι σιαγώνες επενεργούν στην επιφάνεια κύλισης επιφέροντάς παραμορφώσεις (επιπεδότητες). Σύμφωνα με τα πορίσματα της αρμόδιας ομάδας εργασίας της Ε.Ε. για θέματα θορύβου από το σιδηρόδρομο, η βαθμιαία αντικατάσταση των οχημάτων αυτών θα μπορούσε να ήταν ένα αποτελεσματικό μέτρο για την αντιμετώπιση του παραγόμενου θορύβου. Ωστόσο, ο ρυθμός με τον οποίο είναι δυνατό να γίνει η αντικατάσταση αυτή δεν είναι επαρκής, γεγονός που επιβάλλει, παράλληλα με τη συστηματική αντικατάσταση των οχημάτων αυτών, την ανάπτυξη εφικτών τεχνικών μετατροπής.

Τα νέα οχήματα θα είναι εφοδιασμένα με δισκόφρενα ή με σιαγώνες πέδης από συνθετικά υλικά. Τα συστήματα αυτά είτε δεν επιβαρύνουν, είτε επιβαρύνουν σε μικρότερο βαθμό την επιφάνεια κύλισης μειώνοντας έτσι το ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσεται η τραχύτητα. Η λύση που προωθείται κυρίως στα προγράμματα μετατροπής είναι η αντικατάσταση των σιαγώνων πέδης από χυτοσίδηρο, με σιαγώνες από σύνθετα υλικά. Τα υλικά αυτά είναι διαθέσιμα τα τελευταία χρόνια και οι λύσεις που προτείνουν μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση του θορύβου κύλισης μέχρι και 10 dB. Αρχικά τα οχήματα με σιαγώνες από συνθετικά υλικά ("K-blocks") παρουσίαζαν διαφορετικά χαρακτηριστικά πέδησης σε σχέση με αυτά που διαθέτουν σιαγώνες από χυτοσίδηρο, αλλά τα προβλήματα αυτά ξεπεράστηκαν. Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει με τις νέες αυτές σιαγώνες πέδης είναι ο μικρότερος κύκλος ζωής τους που αυξάνει το κόστος της χρήσης τους, όχι όμως σημαντικά. ⁽¹⁾ Παρ' όλα αυτά η μείωση των 10 dB(A) σε υψηλούς φόρτους τέτοιων οχημάτων, πιθανόν να μην επαρκεί για να ρίξει τις στάθμες θορύβου σε επιτρεπόμενες τιμές ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σίγουρα όμως είναι σημαντική συνισταμένη της λύσης του προβλήματος του θορύβου, κυρίως για τις βραδινές ώρες.

5.2.1.2. Μείωση του παραγόμενου θορύβου από τη γραμμή

Η γραμμή είναι η πηγή με τη μεγαλύτερη συνεισφορά όταν η ταχύτητα του συρμού είναι μεταξύ 80 και 120 km/h. Ο κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά της γραμμής είναι, όπως και για τον τροχό, η τραχύτητα της σιδηροτροχιάς. Αυτή προκαλείται κατά τη διέλευση του τροχού από τις ατέλειες και τις επιπεδότητες του. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη συντήρηση της γραμμής, κατά την οποία αποκαθιστούνται οι φθορές που οφείλονται στη λειτουργία της. Η συντήρηση αυτή επιβάλλεται, βέβαια και για άλλους λόγους εκτός του θορύβου. Η επιλογή, ωστόσο, κατάλληλων διαστημάτων στα οποία θα γίνεται η συντήρηση και η βελτίωση της τεχνικής που εκτελείται η συντήρηση αυτή, ώστε να υπάρχει μείωση του παραγόμενου θορύβου θα συνέβαλλε σημαντικά στη μείωση του θορύβου κατά την κύλιση.

Η συνήθης αντιμετώπιση συνίσταται σε λείανση της σιδηροτροχιάς. Αυτό γίνεται με τη χρήση ειδικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται ήδη από τα τμήματα που είναι υπεύθυνα για τη συντήρηση της γραμμής. Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με ειδική τόννιση (acoustical grinding). Η τόννιση αυτή πραγματοποιείται σε μικρότερες ταχύτητες και τα οχήματα διαθέτουν πέτρα τόννισης καλύτερης ποιότητας και είναι πιο δαπανηρή τεχνική από την κανονική τόννιση. Οι οργανισμοί σιδηροδρόμων εκτελούν αυτές τις εργασίες σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα που ποικίλουν από 0,5-15 χρόνια. Πιο συχνή τόννιση έχει σαν συνέπεια

την απομάκρυνση μικρότερης ποσότητας υλικού από τη σιδηροτροχιά αλλά και αύξηση των λειτουργικών εξόδων συντήρησης. Στοιχεία από το γερμανικό δίκτυο σιδηροδρόμων έδειξαν ότι μια γραμμή που έχει υποστεί ειδική τόνιση, έχει συμπεριφορά μιας μέσης λείας γραμμής μετά από 8 χρόνια. Ο ρυθμός, δε, που αυξάνεται ο θόρυβος από τους επιβατικούς συρμούς κάθε έτος είναι 0,9dB(A)/έτος, ενώ για τους εμπορικούς πολύ μικρότερος.

Τα στοιχεία από τους γερμανικούς σιδηροδρόμους έδειξαν ότι η μείωση του θορύβου απλής διέλευσης είναι πολύ μικρότερη στους εμπορικούς συρμούς απ' ότι στους επιβατικούς, 2,1dB(A) έναντι 5,6 και 7,2dB(A) για τους συρμούς IC και ICE/2 αντίστοιχα για συρμούς που κινούνται με 100km/h. Κατά μέσο όρο μια λεία γραμμή σε σχέση με μία που δεν έχει υποστεί τόνιση παράγει λιγότερο θόρυβο κατά περίπου 3-6dB(A). Αυτό βέβαια εξαρτάται και από την κατάσταση του διερχόμενου τροχού. Ένας λείος τροχός που κινείται επί λείας σιδηροτροχιάς μπορεί να παράγει λιγότερο θόρυβο σε ακραίες περιπτώσεις μέχρι και κατά 20dB(A). Στον αντίποδα ένας τροχός με μεγάλη τραχύτητα μειώνει την απόδοση της τόνισης όπως επιβεβαιώνουν και οι μετρήσεις στους γερμανικούς σιδηροδρόμους.

Ο θόρυβος που παράγεται κατά τη διέλευση του τροχού από τους αρμούς μπορεί να περιοριστεί αν μειωθούν οι αρμοί σε μια γραμμή. Μια συνεχώς συγκολλημένη σιδηροτροχιά μπορεί να παράγει 4-7dB(A) λιγότερο θόρυβο, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τα 8dB(A). Η επιρροή των αρμών σχετίζεται με την ταχύτητα διέλευσης. Η αύξηση της στάθμης όταν ο τροχός ανεβαίνει στη επόμενη σιδηροτροχιά είναι της τάξης $20\log V$. Η αύξηση αυτή είναι μικρότερη όταν ο τροχός κατεβαίνει από τη μία σιδηροτροχιά στην επόμενη.⁽¹⁹⁾

5.2.2. Μείωση του θορύβου έλξης

Αποφασιστικός παράγοντας για την παραγωγή θορύβου από τη μηχανή είναι το είδος της μηχανής. Γενικά οι μηχανές diesel παράγουν περισσότερο θόρυβο σε σχέση με αυτούς που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό είναι λογικό καθώς οι μηχανές diesel διαφέρουν κατά βάση από τις μηχανές που χρησιμοποιούν ρεύμα στο ότι φέρουν την ηλεκτρική γεννήτρια που παράγει το ηλεκτρικό μέσα στο σώμα της μηχανής.

Κατά βάση τα μέτρα μείωσης του θορύβου από τις μηχανές diesel αφορούν το σχεδιασμό τους. Η μετασκευή των μηχανών με στόχο τη μείωση του παραγόμενου θορύβου, αν και δεν είναι απίθανο, δεν συνίσταται ως ενδεικνυόμενο μέτρο. Συνίσταται η κατάλληλη διαμόρφωση των εξατμίσεων και των οπών εισαγωγής, η μόνωση από τους κραδασμούς της μηχανής και η τοποθέτηση της μηχανής σε τέτοια θέση που να εξασφαλίζει την απομόνωσή της από το περιβάλλον. Τέλος θα πρέπει τα υποσυστήματα της, να παράγουν τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο.

Όσον αφορά τους κινητήρες που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα η κύρια πηγή θορύβου της μηχανής είναι το σύστημα ψύξεως. Η δυνατότητες μετασκευής που παρέχονται σε αυτή την περίπτωση είναι η εξάλειψη ή ο περιορισμός των εμποδίων που βρίσκονται στη διαδρομή των σωλήνων εισαγωγής και εξαγωγής, ο σχεδιασμός των φανών ψύξεως με τρόπο που να μειώνει τις εκπομπές θορύβου και αύξηση της αποδοτικότητάς τους με την καλύτερη δυνατή επιλογή του σημείου λειτουργίας του. Τέλος, σε χαμηλές ταχύτητες σημαντική συνεισφορά στην παραγωγή θορύβου μπορεί να έχει το σύστημα ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζεται ικανοποιητική αναλογία επαφής κατά τη διάρκεια της σύμπλεξης.

5.2.3. Μείωση του αεροδυναμικού θορύβου

Ο αεροδυναμικός θόρυβος είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατ' εξοχήν με μέτρα που σχετίζονται με την πηγή. Ο λόγος είναι το ύψος της πηγής, που μειώνει δραστικά την αποδοτικότητα των ηχοπετασμάτων. Όπως είναι λογικό τα μέτρα αφορούν κυρίως τους συρμούς υψηλών ταχυτήτων όπου το φαινόμενο είναι έντονο. Η εξέλιξη στους συρμούς αυτούς οδηγεί σε συρμούς με μειωμένες αεροδυναμικές αντιστάσεις και ενεργειακή κατανάλωση που θα έχουν συνεπώς λιγότερες ηχητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ωστόσο σαν βασικές αρχές για τα οχήματα που κυκλοφορούν ήδη, για να βελτιωθεί η επίδοσή τους σε αυτό τον τομέα είναι:

- Η σχεδίαση με αεροδυναμικό τρόπο του παντογράφου και της γύρω από αυτόν περιοχής. Η μείωση που μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση αυτή μπορεί να φτάσει τα 10dB(A).
- Η τοποθέτηση αεροδυναμικών ποδιών στα φορεία. Μπορούμε, έτσι, να επιτύχουμε μείωση ως και 5dB(A) αν και τα καλύμματα αυτά αυξάνουν το λειτουργικό κόστος.
- Αποφεύγοντας τα εξέχοντα μέρη ή τις κοιλότητες κατά μήκος του συρμού
- Αεροδυναμικός σχεδιασμός του ρύγχους του συρμού

5.3. Μείωση των εκπομπών θορύβου

5.3.1. Τροχός

Εκτός από τον έλεγχο της τραχύτητας, μια εναλλακτική πρόταση είναι η επιλογή τροχών με σχεδιασμό κατάλληλο για τη μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου. Τέτοια πλεονεκτήματα εμφανίζουν οχήματα με

- ❖ μικρότερους και λιγότερους τροχούς, οι οποίοι έχουν αυξημένη απόσβεση και κατάλληλη γεωμετρία. Χρησιμοποιώντας μικρότερους τροχούς υπάρχει μικρότερος αριθμός σημείων συντονισμού στο εύρος συχνοτήτων κατά τη διέγερση που οφείλεται στην τραχύτητα.
- ❖ Ο συμμετρικός σχεδιασμός της τομής του τροχού, ελαχιστοποιεί την αξονική μετατόπιση του σώτρου που οφείλεται στις ακτινικές δυνάμεις που επιδρούν στον τροχό.
- ❖ Το αυξημένο πάχος του επισώτρου θα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ταλάντωσής του και συνάμα αύξηση της ιδιοσυχνότητας του τροχού.

Τα οφέλη από τέτοιες αλλαγές εκτιμώνται μεταξύ 1-6dB(A). Τα σχέδια Silent Track και Silent Freight πρότειναν τη μείωση της διάστασης του τροχού από τα 920mm στα 860mm, με βελτιστοποιημένη διατομή η οποία προβλέφθηκε να επιφέρει μείωση 5dB(A) στη συνεισφορά του τροχού. Επιπλέον εξετάστηκε η χρήση διάτρητων τροχών για τη μείωση του θορύβου στις χαμηλές συχνότητες. Ένα τέτοιο σχέδιο προβλέφθηκε να επιτυγχάνει μια μείωση της τάξης 6-9dB(A) στο θόρυβο του τροχού σε συχνότητες κάτω των 1000Hz, αν και οι υψηλότερες στάθμες θορύβου που προέρχονται από τον τροχό έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από 1000Hz.

Όμως όπως και με το σύστημα πέδησης η αντικατάσταση των υπαρχόντων οχημάτων με οχήματα με τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά δεν είναι εφικτό να συντελεστεί με ικανοποιητικούς ρυθμούς. Εναλλακτικό μέτρο είναι η τοποθέτηση αποσβεστών (dampers) στους τροχούς, αν και η αποτελεσματικότητά τους φαίνεται να είναι περιορισμένη. Αν χρησιμοποιηθούν σε βελτιστοποιημένους τροχούς η μείωση είναι ως και 7dB(A), ενώ σε κοινούς τροχούς ως 4dB(A).

Τα σχέδια Silent Track και Silent Freight εξέτασαν τη χρήση διάτρητου τροχού εφοδιασμένο με δακτύλιο απόσβεσης ο οποίος φιλτράρει τον θόρυβο με υψηλές συχνότητες όπως ο διάτρητος τροχός επιτυγχάνει το ίδιο με τις χαμηλές συχνότητες. Το αποτέλεσμα ήταν η μείωση του παραγόμενου από τον τροχό θορύβου κατά 4,5 dB(A).

Μια άλλη λύση είναι η τοποθέτηση μεταλλικού δίσκου εν είδη πετάσματος στον τροχό. Ο δίσκος αποτελείται από τρεις στρώσεις, ατσάλι – ελαστομερές – ατσάλι. Μια τέτοια εφαρμογή δίνει μείωση που κυμαίνεται μεταξύ 3 ως 6 dB(A). Η ίδια λύση σε συνδυασμό με τη χρήση βελτιστοποιημένων τροχών μπορεί να επιτύχει μείωση που μπορεί να φτάσει τα 8dB(A).

Παρ' όλα αυτά δεν έχει εξακριβωθεί με σαφήνεια η αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων, καθώς η κατάλληλη μέτρηση του επιφερόμενου αποτελέσματος, αξιώνει το διαχωρισμό της συνεισφοράς της γραμμής και του τροχού στην παραγωγή του θορύβου κύλισης. Σε γενικές γραμμές πάντως σημαντικά οφέλη υπάρχουν κυρίως με αλλαγή των χαρακτηριστικών του τροχού. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν εύκολα εφικτό λόγω της εμπλοκής που εμφανίζεται με τον τρόπο ψύξης του συστήματος πέδησης.

5.3.2. Σιδηροτροχιά

Ο επανασχεδιασμός της σιδηροτροχιάς μπορεί να επιφέρει περαιτέρω μείωση του παραγόμενου θορύβου ιδιαίτερα στις χαμηλές και τις μεσαίες ταχύτητες. Αυτός συνίσταται στη μείωση του εύρους του πέλματος της σιδηροτροχιάς, καθώς το σημείο πρόσδεσης είναι σημαντικό σημείο εκπομπής. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να υπάρξει ένα σύστημα στήριξης της γραμμής κάτω από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς που θα εξασφαλίζει την πλευρική σταθερότητα. Ωστόσο είναι μέτρα που δεν μπορούν να έχουν σημαντικά οφέλη από μόνα τους και περιορίζονται στα 3 dB(A).

Το μήκος της γραμμής που ταλαντώνεται, μπορεί να μειωθεί με τη βοήθεια απορροφητήρων κραδασμών (absorbers) που τοποθετούνται στη γραμμή. Στα σχέδια Silent Track και Silent Freight οι απορροφητήρες αυτοί ρυθμίστηκαν σε δύο συχνότητες, στα 630Hz και 1350Hz, προσαρμόστηκαν σε γραμμές με σιδηροτροχιές με βελτιστοποιημένη διατομή και ο συνδυασμός αυτός προβλέφτηκε ότι μπορεί να επιτύχει μείωση του παραγόμενου θορύβου κατά 7.5 dB(A). Επιπλέον ελέγχθηκε η επίπτωση που θα υπήρχε στο θόρυβο από τη γραμμή η χρήση πιο άκαμπτων ελαστικών υποθεμάτων (800MN/m αντί 300MN/m) και τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση κατά 2 dB(A). Έρευνα, δε, που έγινε στους γερμανικούς σιδηροδρόμους έδειξε ότι η χρήση μονομερών στρωτήρων με μόνωση για τους κραδασμούς έχει οφέλη της τάξης των 3 dB(A).⁽¹²⁾

5.4. Αποτίμηση των προσφερόμενων λύσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αντιμετώπιση του προβλήματος του θορύβου από τα τρένα κατά κανόνα δεν συνίσταται στην υιοθέτηση μιας λύσης αλλά σε ένα συνδυασμό λύσεων. Το ζητούμενο σε αυτήν την περίπτωση είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των λύσεων που μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη με την σύμπραξη και συνεργασία της έρευνας αλλά και της βιομηχανίας που υπάρχει σε αυτόν τον τομέα των μεταφορών. Η τελική λύση και η μέθοδος με την οποία θα παίρνονται η στρατηγικές αποφάσεις μείωσης του θορύβου θα πρέπει να βρίσκουν κατά το δυνατό σύμφωνα όλα τα εμπλεκόμενα μέρη αυτής της διαδικασίας. Αυτά είναι οι σιδηροδρομικές εταιρίες, οι εταιρίες σιδηροδρομικής υποδομής, οι κάτοχοι τροχαίου υλικού, η βιομηχανία παραγωγής προϊόντων που σχετίζονται με το σιδηρόδρομο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή με τα αρμόδια όργανά της και ανεξάρτητοι μελετητές.

Η βέλτιστη λύση θα είναι προϊόν ανάλυσης. Η αποτίμηση μιας λύσης περιλαμβάνει δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά το κόστος της λύσης. Το δεύτερο μέρος αφορά την αποτελεσματικότητα του μέτρου στη βάση της μείωσης που προκαλεί στις στάθμες θορύβου ή άλλες φορές το όφελος που αποκομίζει κανείς από την εφαρμογή του μέτρου σε οικονομική βάση. Στην πρώτη περίπτωση η ανάλυση είναι κόστους – αποτελέσματος, ενώ στη δεύτερη κόστους – ωφέλειας.

Γενικά ο προσδιορισμός του κόστους είναι εύκολος, διότι οι τιμές των υλικών είναι εν πολλοίς δεδομένες και το χρονικό διάστημα εφαρμογής του μέτρου σχετικά μικρό και εύκολα προσδιοριζόμενο. Ο θόρυβος επί της ουσίας είναι ένας ατμοσφαιρικός ρύπος και το πρόβλημα που προκαλεί είναι περιβαλλοντικής φύσεως. Όπως και σε κάθε τέτοιου είδους πρόβλημα η αποτίμηση των ωφελειών που προκύπτουν από την αντιμετώπιση του προβλήματος σε χρηματικές μονάδες είναι δυσχερής. Μια παράμετρος δυσκολίας είναι ο χρόνος που τα οφέλη αυτά λαμβάνουν χώρα. Αφορούν μελλοντικές καταστάσεις που επιβάλει τη χρήση παραμέτρων όπως κυκλοφοριακές ροές και επιτόκια κατ' εκτίμηση. Επιπλέον, τα οφέλη αφορούν την ποιότητα ζωής των κατοίκων που βρίσκονται κοντά στη ρυπογόνο ηχητική πηγή. Συνεπώς, στη ανάλυση υπεισέρχεται υποκειμενικά στοιχείο.

Η αποτίμηση σε χρηματικές μονάδες των ωφελειών μπορεί να γίνει με έρευνες ερωτηματολογίων σε κατάλληλο δείγμα. Η ερώτηση στην οποία πρέπει να δοθεί απάντηση είναι τα χρήματα που θα ήταν διατεθειμένοι να ξοδέψουν, οι άνθρωποι που θίγονται από το πρόβλημα, προκειμένου να έχουν τα αποτελέσματα της εξεταζόμενης δέσμης μέτρων. Εναλλακτικά, η αποτίμηση αυτή μπορεί να γίνει έμμεσα. Ένας συνήθης τρόπος είναι ερευνώντας την πιθανή επίπτωση στις τιμές ακινήτων στην περιοχή λόγω της μείωσης του θορύβου από τα εξεταζόμενα μέτρα. Σε μια τέτοια ανάλυση, πιθανόν θα έπρεπε να συνυπολογίζονται τα έξοδα που προέρχονται από την επιβάρυνση της υγείας των ανθρώπων που βρίσκονται κοντά στις γραμμές. Η σχέση όμως του θορύβου με τις επιπτώσεις στην υγεία δεν είναι ακόμα σαφείς. Ακόμα δεν έχει βρεθεί μια σχέση δόσεως αποτελέσματος και δεν έχει καθοριστεί κατώφλι ασφαλείας.

Τα κύρια βήματα μιας τέτοιας ανάλυσης είναι :

- Επιλογή του σχεδίου δράσεως
- Εντοπισμός όλων των επιπτώσεων
- Εντοπισμός των οικονομικών επιπτώσεων
- Μετατροπή των επιπτώσεων αυτών σε φυσικές ποσότητες
- Αποτίμηση των ποσοτήτων σε χρηματικές μονάδες

- Υπολογισμός με βάση τα ετήσια επιτόκια
- Σύγκριση του συνολικού κόστους του σχεδίου με τα οφέλη
- Ανάλυση ευαισθησίας

Φαινομενικά μια ανάλυση κόστους – αποτελέσματος παρακάμπτει το προηγούμενο πρόβλημα. Ωστόσο για να έχει νόημα μια τέτοια ανάλυση πρέπει να αξιολογείται βάση των ανθρωπίνων αναγκών. Μια λύση που εξασφαλίζει μεγάλη μείωση σύμφωνα με αυτήν την ανάλυση μπορεί να έχει υψηλή προτεραιότητα. Όμως η τελική τιμή της στάθμης αυτής μπορεί να μην σχετίζεται με τις ανάγκες του πληθυσμού που βρίσκεται κοντά στη ρυπογόνο ηχητική πηγή. Η ίδια τιμή της μείωσης δεν μπορεί να είναι το ίδιο σημαντική σε μια θορυβώδη πυκνοκατοικημένη περιοχή και σε μια ερημική περιοχή στην εξοχή. Άρα μια τέτοια προσέγγιση αν και είναι ένα χρήσιμο εργαλείο, δεν επαρκεί.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν θέματα που αφορούν το θόρυβο που προέρχεται από το σιδηρόδρομο. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- Σε επίπεδο Ε.Ε. υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για θέματα θορύβου από το σιδηρόδρομο καθώς στο μέλλον το πρόβλημα αναμένεται να είναι σημαντικό.
- Οι μηχανισμοί παραγωγής θορύβου είναι σύνθετοι. Ο θόρυβος που παράγεται προέρχεται από διαφορετικές πηγές (τροχός, σιδηροτροχιά, μηχανή, αέρας γύρω από κινούμενα οχήματα). Το ποσοστό συμμετοχής τους στα επίπεδα θορύβου σχετίζεται με την ταχύτητα κίνησης του συρμού.
- Υπάρχουν πολλές μέθοδοι πρόβλεψης θορύβου που χρησιμοποιούνται σε χώρες της Ε.Ε. (Nord2000, CRM II, CRN-1995 κ.τ.λ.) και παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σχετικά με τις παραδοχές που απαιτούν. Οι μέθοδοι όσον αφορά τα μοντέλα πηγής που χρησιμοποιούν διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Επίσης, τα μοντέλα διάδοσής τους έχουν συχνά διαφορετικές παραμέτρους που λαμβάνουν υπ' όψη κατά τον υπολογισμό. Κατά συνέπεια υπάρχει ανάγκη μιας κοινά αποδεκτής μεθόδου για την Ε.Ε. ως εργαλείο για την παρακολούθηση και την αντιμετώπιση του θορύβου.
- Εκ των παραπάνω μεθόδων έγινε εφαρμογή της μεθόδου CRN-1995 σε τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε. Διαπιστώθηκαν οι αδυναμίες της μεθόδου (η εκτίμηση του ποσοστού απορρόφησης από το έδαφος με τρόπο ασαφή, η μη συνεκτίμηση της τραχύτητας της γραμμής) και έγινε πρόβλεψη της στάθμης θορύβου σε τμήμα γραμμής του Ο.Σ.Ε.

Τα σχετικά αποτελέσματα έδειξαν ότι με την υπάρχουσα κυκλοφορία η στάθμη θορύβου για την ημέρα είναι 53,1dB(A) την ημέρας και 44,4dB(A) τη νύχτα. Οι τιμές αυτές είναι κάτω από τα όρια θορύβου Γερμανίας για το σιδηρόδρομο στη Γερμανία σε περιοχές σαν αυτή που εξετάστηκε. Σε μια ενδεχόμενη αύξηση των κυκλοφοριακών φόρτων όμως κατά 70% η μέθοδος έδωσε στάθμη θορύβου που υπερβαίνει τη νύχτα την αντίστοιχη οριακή τιμή.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

7.1. Στοιχεία Ακουστικής

Ο ήχος παράγεται από ταλαντώσεις του αέρα, ο οποίος που γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί ως αυξομειώσεις της πίεσης με συχνότητα που είναι αντιληπτή από το αισθητήριο της ακοής. Χαρακτηριστικά, λοιπόν, του ήχου είναι η συχνότητα, η πίεση αλλά και η ένταση. Ως ένταση ορίζεται η ισχύς που μεταφέρεται από το ηχητικό κύμα ανά μονάδα επιφανείας του μετώπου κύματος.

$$I = \frac{W}{F} \text{ [Watt / m}^2\text{]}$$

Οι άνθρωποι μπορούν και αντιλαμβάνονται ήχους με συχνότητα μεταξύ 20Hz και 20kHz. Η πίεση που αναπτύσσεται κατά τη μετακίνηση των ηχητικών κυμάτων στον αέρα ποικίλει μεταξύ 20 mN/m² και 100 N/m². Καθώς το εύρος των πιέσεων αυτών είναι πολύ μεγάλο για την βαθμολόγηση του ήχου, χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα. Η ηχητικής στάθμη μιας πηγής αποτιμάται σε decibel (dB) και ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$L = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \\ L = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \\ 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_2^2} \right) \text{ ή } 20 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

όπου L : η ηχητική στάθμη
W₁, I₁, P₁ : η μετρούμενη ισχύς, ένταση, πίεση
W₂, I₂, P₂ : η ισχύς, ένταση και πίεση αναφοράς,

συνήθως $W_2 = 10^{-12}$ Watt
 $I_2 = 10^{-12}$ Watt / m²
 $P_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ N / m² (κατώφλι ακοής)

Εναλλακτικά οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφούν και με εκθετική μορφή, όπως $I_1 = I_2 \cdot 10^{L/10}$. Η γενική μορφή της σχέσης $R = k \log S$, ωστόσο, εκφράζει τον ψυχοφυσικό νόμο των Веber- Fechner κατά τον οποίο η ένταση ενός υποκειμενικού συναισθήματος είναι ανάλογη προς το λογάριθμο της έντασης του ερεθίσματος. Η λογαριθμική κλίμακα, λοιπόν, είναι σε θέση να αποδώσει καλύτερη συσχέτιση με το ανθρώπινο αισθητήριο της ακοής.

Για το ανθρώπινο αυτί μια μείωση της τάξης των 10 decibel θα έχει σαν συνέπεια την μείωση του αντιληπτού ήχου στο μισό. Σύμφωνα με τον ορισμό ένας ήχος μπορεί να είναι εντάσεως από 0 ως 134 dB. Η έκθεση σε ήχο εντάσεως 100dB προκαλεί αίσθημα πόνου ενώ στα 150 dB προκαλεί ακαριαία κώφωση. Η στάθμη έντασης του προσλαμβανόμενου ήχου προκύπτει από την άθροιση των ήχων του περιβάλλοντος, η οποία όμως, επειδή η κλίμακα δεν είναι γραμμική αλλά

λογαριθμική, δεν είναι αλγεβρική και προκύπτει από την άθροιση των εντάσεων. Προκύπτει κατά τη σχέση⁽ⁱ⁾ :

$$L = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}$$

όπου L = η συνισταμένη των n σταθμών έντασης ήχου [dB]
 L_i = η στάθμη έντασης ήχου της πηγής i [dB]
 n = ο αριθμός των πηγών, των σταθμών έντασης ήχου

Για να γίνει πιο αντιληπτή η σχέση μεταξύ μείωσης της στάθμης ήχου και αποτελέσματος παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας.

Αλλαγή της στάθμης ήχου κατά	Σχετική ένταση ήχου	Μείωση της ενέργειας θορύβου
0 dB(A)	Αναφορά	0
-3 dB(A)	Ελάχιστη αντιληπτή αλλαγή	50%
-5 dB(A)	Εύκολα αντιληπτή αλλαγή	67%
-10 dB(A)	Μείωση στο μισό	90%
-20 dB(A)	Μείωση στο 1/4	99%
-30 dB(A)	Μείωση στο 1/8	99,9%

7.1.1. Θόρυβος

Θόρυβος θεωρείται κάθε ενοχλητικός ή ανεπιθύμητος ήχος. Χαρακτηριστικό του γνώρισμα είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η πίεσή του καθώς αυτό συντελείται με τρόπο μη αρμονικό αλλά και μη περιοδικό⁽ⁱⁱ⁾. Στην πραγματικότητα, ο θόρυβος μπορεί να αναλυθεί σε πολλούς απλούς ήχους, διαφορετικών εντάσεων και συχνοτήτων.

Ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ατμοσφαιρικός ρύπος. Η ιδιαιτερότητά του είναι ότι ο βαθμός αντίληψης και όχλησης κατά την έκθεση σε αυτόν δεν είναι ο ίδιος για όλα τα άτομα που τον αντιλαμβάνονται. Ο τρόπος που επηρεάζει τον άνθρωπο περιλαμβάνει και έναν υποκειμενικό παράγοντα που καθιστά δύσκολη τη σύνταξη σχέσεως αιτίου - αποτελέσματος. Επιπτώσεις στην υγεία πάντως που έχουν αναφερθεί είναι :

- Προβλήματα ακοής
- Επιπτώσεις στην υγεία που συνδέονται με το στρες όπως υπέρταση, καρδιαγγειακές παθήσεις και μειωμένο βάρος των νεογνών
- Ισχαιμικά επεισόδια
- Παρενόχληση κατά τον ύπνο
- Μειωμένη απόδοση στην εργασία

Παρ' όλα αυτά δεν έχει προσδιοριστεί ένα κοινώς αποδεκτό κατώφλι ασφαλείας.

Η απόκριση του ανθρώπου στην ίδια στάθμη θορύβου είναι διαφορετική για διαφορετικές συχνότητες. Η ανθρώπινη ακοή είναι περισσότερο ευαίσθητη σε ήχους υψηλής συχνότητας. Έτσι για να ληφθεί υπ' όψη αυτό το χαρακτηριστικό της ανθρώπινης ακοής, η μετρούμενη στάθμη θορύβου (L) τροποποιείται σύμφωνα με κάποια σταθμιστική καμπύλη. Η πιο συνηθισμένη τέτοια καμπύλη είναι η καμπύλη A. Ο θόρυβος αποτελείται από ήχους διαφορετικών συχνοτήτων και πίεσης που σχηματίζουν ένα φάσμα. Το φάσμα είναι ένα ιστόγραμμα που αποδίδει μια τιμή πίεσης σε κάθε συχνότητα του θορύβου. Συνήθως οι συχνότητες ομαδοποιούνται σε ζώνες. Κάθε ζώνη ορίζεται από ακραίες τιμές συχνοτήτων f_1 και f_2 . Όταν $f_2 = 2f_1$ τότε μιλάμε για οκτάβες, όταν $f_2 = 2^{1/2}f_1$ για ζώνες μισής οκτάβας και όταν $f_2 = 2^{1/3}f_1$ για τριτοκτάβες. Η σταθμιστικές καμπύλες δίνουν διόρθωση για κάθε συχνότητα του θορύβου. Οι διορθώσεις γίνονται για τη μέση τιμή κάθε ζώνης του φάσματος. Τα όργανα μέτρησης θορύβου είναι σχεδόν πάντα εφοδιασμένα με ηλεκτρονικό σύστημα φίλτρων (π.χ. σταθμιστικό κύκλωμα A), με το οποίο η διόρθωση γίνεται αυτομάτως καθώς ηλεκτρικά φίλτρα προσδιορίζουν την κατανομή του θορύβου στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

Το φαινόμενο του θορύβου είναι εξελισσόμενο στο χρόνο. Για την περιγραφή του χρησιμοποιούνται στάθμες θορύβου που αντιστοιχούν σε μια εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Κυριότεροι δείκτες είναι:

- L_n , η τιμή αυτή υπερβαίνεται για το n% του χρόνου καταγραφής. Χαρακτηριστικές είναι οι παρακάτω τιμές του n.
 - L_{99} , η τιμή αυτή υπερβαίνεται για το 99% του χρόνου καταγραφής. Αντιστοιχεί στο θόρυβο υποβάθρου.
 - L_1 , η τιμή αυτή υπερβαίνεται για το 1% του χρόνου καταγραφής που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που καταγράφεται στον αντίστοιχο χρόνο.
- L_{eq} , ισοδύναμο σταθερό επίπεδο θορύβου για ορισμένο χρονικό διάστημα

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L}{10}} dt \right]$$

όπου T = η χρονική διάρκεια κατά την οποία λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις
 L = η συνάρτηση στάθμης θορύβου ως προς το χρόνο t
 T = ο χρόνος για τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις

Όταν ο προσδιορισμός της συνάρτησης δεν είναι εφικτός λαμβάνονται Δt τέτοια, για τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι η στάθμη θορύβου είναι σταθερή. Σε αυτή την περίπτωση:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} t_i \right]$$

όπου L_i η στάθμη θορύβου που παραμένει σταθερή για το μικρό χρόνο t_i , ο οποίος είναι μέρος του χρόνου μέτρησης T .

- Μέσο επίπεδο θορύβου L_m

$$L_m = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} t_i \right]$$

όπου $t_2 - t_1$: το χρονικό διάστημα για το οποίο ζητείται το μέσο επίπεδο θορύβου L_m

L_i : η στάθμη θορύβου κατά τη χρονική στιγμή t_i ($t_1 < t_i < t_2$)

t_i : το χρονικό διάστημα για το οποίο καταγράφεται στάθμη θορύβου L_i

Ο χρόνος για τον οποίο πραγματοποιείται μια μέτρηση έχει να κάνει με το σκοπό της. Κάποιοι άλλοι δείκτες δεν περιγράφουν το ηχητικό περιβάλλον για μια χρονική περίοδο αλλά το αποτέλεσμα ενός μεμονωμένου ηχητικού συμβάντος. Τέτοιος είναι ο δείκτης SEL ή L_{AE} (Sound Exposure Level). Στην περίπτωση αυτή, η τιμή SEL αντιστοιχεί στην ηχητική στάθμη της πηγής που καταγράφεται κατά τη διάρκεια του συμβάντος, ανηγμένη στο χρόνο ενός δευτερολέπτου. Κατά συνέπεια συνδέεται με την τιμή L_{eq} σύμφωνα με τη σχέση:

$$L_{AE} = L_{eq} + 10 \cdot \log_{10} (t_2 - t_1)$$

όπου L_{eq} η ισοδύναμη ηχητική στάθμη του συμβάντος που συνέβη μεταξύ των χρονικών στιγμών t_1 και t_2 .

Ο θόρυβος παράγεται από μια πηγή που μπορεί να είναι σχεδόν οποιαδήποτε δραστηριότητα ανθρώπινη ή μη. Διαδίδεται μέσω του αέρα κυρίως αλλά και μέσω των στερεών και βαίνει μειούμενος με την απόσταση σε κάποιο δέκτη. Δύο βασικά μοντέλα που περιγράφουν αυτή τη μείωση είναι αυτό της σημειακής και της γραμμικής πηγής. Η μείωση την οποία υφίσταται ο θόρυβος κατά την διάδοσή του στον αέρα είναι σε αυτές τις περιπτώσεις:

$$\text{σημειακή πηγή} \quad I_1 = \frac{W}{4 \pi r_1^2}$$

δηλαδή η ένταση του θορύβου είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, ενώ για

$$\text{γραμμική πηγή} \quad I_1 = \frac{W}{2 \pi r_1 s}$$

δηλαδή η ένταση του θορύβου είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που μια πηγή μπορεί να θεωρηθεί σημειακή, η εξασθένιση του θορύβου γίνεται ταχύτερα. Κατά κανόνα βέβαια οι ηχητικές πηγές αποκλίνουν από αυτά τα απλουστευμένα μοντέλα.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι έχει πολύ μεγάλη σημασία η θέση του παρατηρητή και ειδικότερα του μικροφώνου με το οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Για να είναι δύο αποτελέσματα συγκρίσιμα πρέπει πηγή και δέκτης να βρίσκονται στην ίδια απόσταση και τα επικρατούν οι ίδιες συνθήκες διάδοσης. Τα

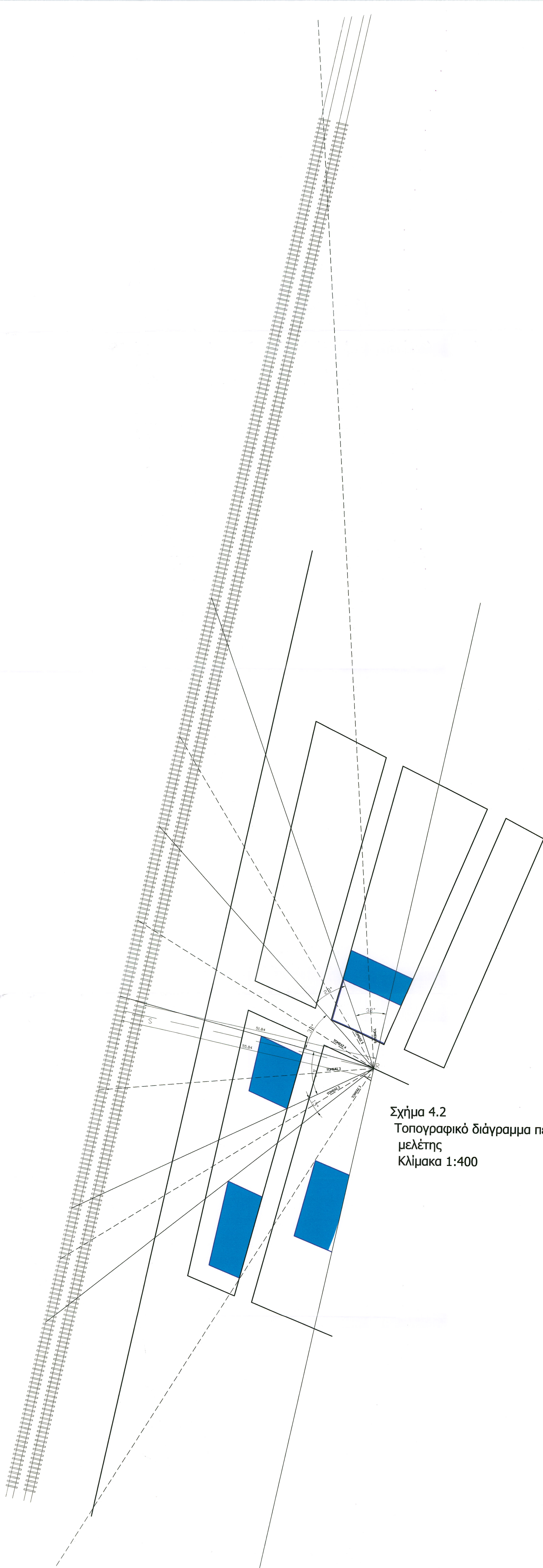
στοιχεία αυτά ορίζονται από πρότυπα μέτρησης ή παραρτήματα μεθόδων πρόβλεψης θορύβου.

8. Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Directorate – General for Energy and Transport,
Βρυξέλλες Φεβρουάριος 2002,
Oedegaard & Danneskiold – Samsøe A/S,
A study of European Priorities and Strategies for Railway Abatement
2. Journal of Sound and Vibration (2003) 267, 447-468
Μάιος 2003,
Identification, modeling and reduction potential of railway, noise sources a
critical survey
3. Ευρωπαϊκή Επιτροπή,
Βρυξέλλες Νοέμβριος 1996,
Green Paper “Future Noise Policy”
4. Commission of the European Communities,
Βρυξέλλες 2002,
Ευρωπαϊκή Επιτροπή,
Communication from the Commission to the Council and the European
Parliament – Towards an integrated European railway area
5. Office for official publications of the European Communities,
Λουξεμβούργο 2001,
Ευρωπαϊκή Επιτροπή,
White Paper – European transport policy for 2010: time to decide
6. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Directorate – General for Energy and Transport,
Βρυξέλλες Ιούλιος 2002,
M. Vaio, G. Pâque,
Highlights of the workshop on the “State of the Art in noise valuation”
7. Office for official publications of the European Communities,
Λουξεμβούργο 2000,
Ευρωπαϊκή Επιτροπή,
The noise policy of E.U. Year 2. Towards improving the urban development
and contributing to global sustainability
8. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων,
Ιούνιος 2002,
Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο,
Οδηγία 2002/49/EK
9. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Directorate – General for Energy and Transport,
Ολλανδία 2001,
M.G. Dittrich,
The Applicability of prEN ISO 3095 for European Legislation on Railway
Noise

10. Journal of Sound and Vibration (2000) 231(3), 865-876,
Γαλλία Σεπτέμβριος 1999,
N. Vincent,
Rolling noise control at Source: State of Art
11. Journal of Sound and Vibration (2000) 231(3), 519-536,
Southampton Αγγλία 2000,
D.J. Thompson, C.J.C. Jones,
A review of the modeling of wheel/rail noise generation
12. SNCF, Research and Technology Department
Γαλλία Αύγουστος 2002,
A. Van Beek, M. Beuving, M. Dittrich, M. Beier, X. Zhang, H. Johansson,
F.Letourneaux, C. Talotte, M. Ringheim,
Harmonoise – Work Package 1.2 Rail Sources Task 1.2.1. State of Art
13. Journal of Sound and Vibration (1996) 193(1), 83-102,
Η.Π.Α. Νοέμβριος 1995,
P. Remington, J. Webb,
Estimation of wheel/rail interaction forces in the contact area due to roughness
14. Journal of Sound and Vibration (2003) 267, 497-507,
Ολλανδία Μάιος 2003,
F.G. De Beer, M.H.A. Janssens, P.P. Kooijman,
Squeal noise of rail-bound vehicles influenced by lateral contact position
15. Journal of Sound and Vibration (2000) 231(3), 975-987,
Ολλανδία 2000,
H.J.A. Leeuwen,
Railway noise prediction models: A Comparison
16. DELTA Danish Electronics Light & Acoustics, Nordic Environmental Noise,
Δανία Ιούνιος 2002,
Joergen Kragh, Birger Plovsing, Svein A. Storeheier, Gunnar Tataldsen, Hans
G. Jonasson
Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000
Summary Report
General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related
Predicton Methods
17. Ministerie van Volkshuivering, Ruimtelijke Ordening en
Milieubeheer, Publikatiereeks Verstoring nr.14/1997,
Ολλανδία 1997,
Reken- en Meetvoorschriften Railverkeerlawaa '96
18. HMSO
Λονδίνο Ιούλιος 1994
The Department of Transport
Calculation of Railway Noise 1995

19. European Communities, 2003, Working Group Railway Noise of the European Commission, Position Paper on the European strategies and priorities for railway noise abatement
20. <http://www.railfaneurope.net>
21. Pergamon, Transportation Research Part D 8 (2003) 113-128,
Ιταλία 2003,
C. Pronello,
The measurement of train noise: a case study in northern Italy
22. Silent Track and Silent Freight projects
http://www.erri.nl/portfolio/software/twins/downloads/stf_project.pdf
http://www.erri.nl/portfolio/software/twins/downloads/stf_result.pdf
23. Κείμενο 19403, Συνοπτική περίληψη του εγγράφου με τις θέσεις για τις ευρωπαϊκές στρατηγικές και προτεραιότητες που θα οδηγήσουν στη μείωση του θορύβου από τους σιδηροδρόμους,
Ομάδα εργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τον θόρυβο που προκαλείται από τους σιδηροδρόμους
24. Transport Policy 10 (2003) 131–140, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM,
H.A. Nijland, E.E.M.M. Van Kempen, G.P. Van Wee, J. Jabben,
Costs and benefits of noise abatement measures



Σχήμα 4.2
Τοπογραφικό διάγραμμα περιοχής
μελέτης
Κλίμακα 1:400