

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΣΤΟΓΙΑΝΝΟΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Περίληψη

Τίτλος: Τεχνικές Μείωσης Σιδηροδρομικού Θορύβου

Φοιτήτρια: Αικατερίνη Στογιάννου

Επιβλέπων: Αθανάσιος Μπαλλής, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη του σιδηροδρομικού θορύβου και στοχεύει στον προσδιορισμό εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου, τη μεταξύ τους σύγκριση και την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής των ηχοαπορροφητικών πλακών που εφαρμόστηκαν στο δίκτυο του ΗΣΑΠ (μέσω μετρήσεων πεδίου).

Αρχικά, γίνεται παρουσίαση και περιγραφή των εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου που διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή, β) τεχνικές που αφορούν το τροχαίο υλικό και γ) αντιθορυβικά πετάσματα. Στη συνέχεια, παρατίθεται η βιβλιογραφία που αφορά εργασίες σε μετρήσεις και αξιολογήσεις συγκεκριμένων τεχνικών μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου καθώς επίσης και εργασίες σχετικές με την αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών. Βάσει της βιβλιογραφίας συντάχθηκε ένας συγκριτικός πίνακας αξιολόγησης των παραπάνω τεχνικών μείωσης θορύβου ως προς τα χαρακτηριστικά και τα κριτήρια επιλογής τους από τους σιδηροδρομικούς οργανισμούς.

Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις για την αποτελεσματικότητα της πρόσφατης τοποθέτησης ηχοαπορροφητικών πλακών στο μεγαλύτερο τμήμα της γραμμής του ΗΣΑΠ. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων έδειξαν τις σημαντικές δυσκολίες που ενέχει η μέτρηση του σιδηροδρομικού θορύβου καθώς εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τις μετρήσεις σε επίπεδο που δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα του ηχοαπορροφητικού υλικού.

Λέξεις Κλειδιά: σιδηροδρομικός θόρυβος, τεχνικές, μείωση, ηχοαπορροφητικές πλάκες, ΗΣΑΠ

Abstract

Title: Techniques to Reduce Railway Noise

Student: Aikaterini Stogiannou

Supervisor: Athanasios Ballis, Associate Professor NTUA

This paper is a study in railway noise and its purpose is to determine and compare the alternatives techniques for reducing the noise from the railway and, also, an assessment of the effectiveness of sound absorbing panels in the ISAP's network (through field measurements).

Firstly, we present a description of alternative techniques to reduce rail noise which are divided into three categories: a) techniques applied to the superstructure, b) techniques applied to the rolling stock and c) noise barriers. Then, it is given the literature of papers on previous measurements and evaluations of specific techniques to reduce rail noise as well as papers on the evaluation of alternative techniques. Based on the literature, it is composed a comparative table on the evaluation of the above techniques referring to the characteristics and selection criteria by the railway authorities.

Furthermore, measurements were made on the effectiveness of the recent placement of sound absorbing panels in the largest section of ISAP's network. The processing results of the measurements showed significant difficulties inherent in the measurement of rail noise as external factors affecting the measurements at a level they cannot draw firm conclusions about the effectiveness of sound absorbing material.

Keywords: railway noise, techniques, reduce, sound absorbing panels, ISAP

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μπαλλή, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση, τη συνεχή βοήθεια και την υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Την κ. Σωτηροπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για τις υποδείξεις της και τη συνεργασία της και τον κ. Λυμπέρη, Επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθειά του και, τέλος, τον κ. Πουλάκο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την πρόσβαση σε αρχειακό υλικό.

Τους κύριους Τσιάκα και Κωνσταντόπουλο, της ΣΤΑ.ΣΥ, καθώς και το προσωπικό του ΜΕΤΡΟ, για το ενδιαφέρον, τη συνεργασία τους και την διευκόλυνση των πειραμάτων και των μετρήσεων καθώς και τη διάθεση υλικού για τη συγγραφή της εργασίας.

Τον κύριο Αργουδέλη, της Alpha Acoustiki, για τις συμβουλές και τις υποδείξεις του.

Την Εύη Χατζηλιάδη, συνάδελφο Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. και Μεταπτυχιακή φοιτήτρια Ε.Μ.Π., για τη συνεργασία της, τη συμπαράσταση και τη βοήθεια σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τους φίλους μου, στην Ελλάδα και στο εξωτερικό, για την ανοχή και την αντοχή τους στη γκρίνια μου.

Και κυρίως τους γονείς μου και τα αδέρφια μου, για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου έδιναν και συνεχίζουν να μου δίνουν καθημερινά.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	5
1.1.	Το πρόβλημα του σιδηροδρομικού θορύβου	5
1.2.	Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής εργασίας	7
1.3.	Διάρθρωση της εργασίας	7
2.	Τεχνικές μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου	8
2.1.	Τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή	9
2.1.1.	Ελαστικά υποθέματα	9
2.1.2.	Ειδικά ελαστικά περιβλήματα στρωτήρων	10
2.1.3.	Λείανση σιδηροτροχιάς	11
2.1.4.	Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών	13
2.1.5.	Ηχοαπορροφητικές πλάκες	14
2.1.6.	Βελτιωτικά τριβής επαλειφόμενα επί σιδηροτροχιάς	16
2.1.7.	Πλωτή πλάκα	19
2.2	Τεχνικές που εφαρμόζονται στο σιδηροδρομικό όχημα	20
2.2.1	Τόρνευση τροχού	20
2.2.2	Μεταλλοελαστικοί τροχοί	22
2.2.3	Αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών	24
2.2.4	Βελτιωτικά τριβής επαλειφόμενα στον τροχό	25
2.2.5	Συστήματα πέδησης μειωμένου θορύβου	27
2.2.6	Μείωση αεροδυναμικού θορύβου	28
2.3	Ηχοπετάσματα	29
3	Βιβλιογραφική επισκόπηση	33
3.1	Τεχνικές με επεμβάσεις στην επιδομή	33
3.2	Τεχνικές με επεμβάσεις στο σιδηροδρομικό όχημα	42
3.3	Τοποθέτηση ηχοπετασμάτων παραπλεύρως της σιδηροδρομικής γραμμής	48
4	Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου	51
5	Αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης του θορύβου στο Μετρό Αθηνών και στον Η.Σ.Α.Π.	55
5.1	Το δίκτυο του Μετρό Αθηνών και οι εφαρμοζόμενες τεχνικές θορύβου	56
5.2	Το δίκτυο του ΗΣΑΠ	59
5.2.1	Εφαρμογή ηχοαπορροφητικών πλακών σε τμήμα του δικτύου ΗΣΑΠ	59
5.2.2	Μετρήσεις θορύβου στη γραμμή Ν. Ιωνία – Ν. Ηράκλειο	59
5.2.2.1	Μετρήσεις ηχοαπορροφητικής ικανότητας ηχοαπορροφητικών πλακών στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π.	60
5.2.2.2	Μεθοδολογία μέτρησης θορύβου	63
5.2.2.3	Όργανα μέτρησης	65
5.2.2.4	Θέση μέτρησης	66
5.2.2.5	Επεξεργασία και αποτελέσματα μετρήσεων	68
5.2.2.6	Ορθή μεθοδολογία μέτρησης σιδηροδρομικού θορύβου	79
6	Συμπεράσματα	80
7	Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα	82
	Βιβλιογραφία	
	Παράρτημα	

1

Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα του σιδηροδρομικού θορύβου

Ο σιδηρόδρομος, ιδίως τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του, αποτέλεσε το κύριο μέσο μαζικής μεταφοράς ατόμων και εμπορευμάτων. Ιδιαίτερα σημαντικός ήταν ο ρόλος του κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Με τη λήξη του, η χρήση του σιδηροδρόμου παραγκωνίστηκε λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας σε θέματα οδικών και αεροπορικών μεταφορών. Από τη δεκαετία του '60 ο σιδηρόδρομος ανασυντάχθηκε κυρίως με την εισαγωγή συρμών υψηλών ταχυτήτων [1]. Παρόλα αυτά το μερίδιο του σιδηροδρόμου στις μεταφορές ελαττώθηκε. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό του το 1990 στις εμπορικές μεταφορές ανερχόταν στο 11 % και μέσα σε 8 χρόνια έπεσε στο 8 %. Το εμπορευματικό έργο του σιδηροδρόμου παρέμεινε σταθερό, όμως το ποσοστό μειώθηκε λόγω της σημαντικής αύξησης του μεταφορικού έργου που εξυπηρετείται από τις οδικές και θαλάσσιες μεταφορές. Στις επιβατικές μεταφορές οι οδικές μεταφορές καταλαμβάνουν το 79 % της συνολικής ζήτησης με το σιδηρόδρομο μόλις στο 5% [2].

Για την αντιστροφή της καθοδική αυτής πορείας η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) έχει αναλάβει σημαντικές πρωτοβουλίες. Η Λευκή Βίβλος για την Ευρωπαϊκή πολιτική των μεταφορών για το 2010, στοχεύει στη μετατόπιση των οδικών μεταφορών αγαθών και ατόμων προς τους εμπορικούς και επιβατικούς

συρμούς υψηλών ταχυτήτων αντίστοιχα. Ειδικότερα, στόχος για τα επόμενα 20 χρόνια είναι ο διπλασιασμός των επιβατοχιλιομέτρων και τριπλασιασμός των τονοχιλιομέτρων που θα λαμβάνουν χώρα μέσω του σιδηροδρόμου [2].

Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς την αύξηση του ποσοστού χρήσης του σιδηρόδρομου έχει ως αποτέλεσμα την παράλληλη αύξηση των επιπέδων του περιβαλλοντικού θορύβου των παρακείμενων στη σιδηροδρομική γραμμή περιοχών. Σύμφωνα με εκθέσεις για τα κράτη μέλη, οι οποίες συντάχθηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (Ε.Ο.Π.) το 2010, ο σιδηροδρομικός θόρυβος πλήττει περίπου 12 εκατομμύρια κατοίκους της Ε.Ε. κατά τη διάρκεια της ημέρας, με έκθεση στον θόρυβο σε επίπεδα άνω των 55 dB(A) και περίπου 9 εκατομμύρια κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου η έκθεση στον θόρυβο υπερβαίνει τα 50 dB(A). Εκτιμάται ότι οι πραγματικοί αριθμοί είναι υψηλότεροι καθώς η ευρωπαϊκή πρωτοβουλία χαρτογράφησης του θορύβου, που ανέλαβε ο ΕΟΠ, επικεντρώνεται σε αστικές περιοχές με πληθυσμό άνω των 250.000 κατοίκων καθώς και σε κύριες σιδηροδρομικές γραμμές διέλευσης άνω των 60.000 αμαξοστοιχιών ετησίως. Το πρόβλημα του σιδηροδρομικού θορύβου επηρεάζει κυρίως την κεντρική Ευρώπη, όπου ζει η πλειονότητα των πολιτών που πλήττονται και όπου ο όγκος των σιδηροδρομικών εμπορευματικών μεταφορών είναι υψηλότερος [3].

Ο υψηλός θόρυβος προκαλεί σημαντική ενόχληση και επηρεάζει αρνητικά την ικανότητα προς εργασία και την υγεία των ανθρώπων που εκτίθενται σε υψηλές στάθμες θορύβου. Η συζήτηση σχετικά με τον σιδηροδρομικό θόρυβο έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες καθώς οι σιδηροδρομικές μεταφορές αυξάνονται και διαδραματίζουν σημαντικότερο ρόλο στην επίτευξη πιο φιλικών προς το περιβάλλον μεταφορών [3]. Για την εφαρμογή των στόχων βιωσιμότητας που διατυπώθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [4] καθώς και στη δέσμη μέτρων για πιο οικολογικές μεταφορές, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις λειτουργίες των σιδηροδρόμων (θόρυβος, εκπομπές άνθρακα, κατανάλωση ενέργειας, κ.λπ.) θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ώστε να υποστηριχθεί η στροφή προς τον σιδηρόδρομο με σκοπό τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορών συνολικά [3].

1.2 Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τη μελέτη του σιδηροδρομικού θορύβου με δειγματικό χώρο το δίκτυο του Η.Σ.Α.Π. Στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση των εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του θορύβου, η σύγκρισή τους μέσω κατάλληλα επιλεγμένων κριτηρίων αξιολόγησης καθώς και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής μείωσης που πρόσφατα τοποθετήθηκε σε μέρος του δικτύου του ΗΣΑΠ (ηχοαπορροφητικές πλάκες) μέσω μετρήσεων πεδίου.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει, πέραν του παρόντος κεφαλαίου της Εισαγωγής, 6 επιπλέον κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική παρουσίαση και περιγραφή των κυριότερων εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου. Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνικών μέσω κατάλληλων κριτηρίων. Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει μία συνοπτική παρουσίαση των δικτύων του Μετρό Αθηνών και του ΗΣΑΠ και γίνεται αναφορά στις τεχνικές μείωσης που εφαρμόζονται. Επίσης, περιγράφεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου που έγιναν για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής μείωσης που πρόσφατα τοποθέτησε ο ΗΣΑΠ. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων βρίσκονται στο Κεφάλαιο 6. Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα. Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία και το Παράρτημα με τις μετρήσεις και την επεξεργασία των στοιχείων των μετρήσεων στο τμήμα της γραμμής του ΗΣΑΠ.

Τεχνικές μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου

8

2.1 Τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή

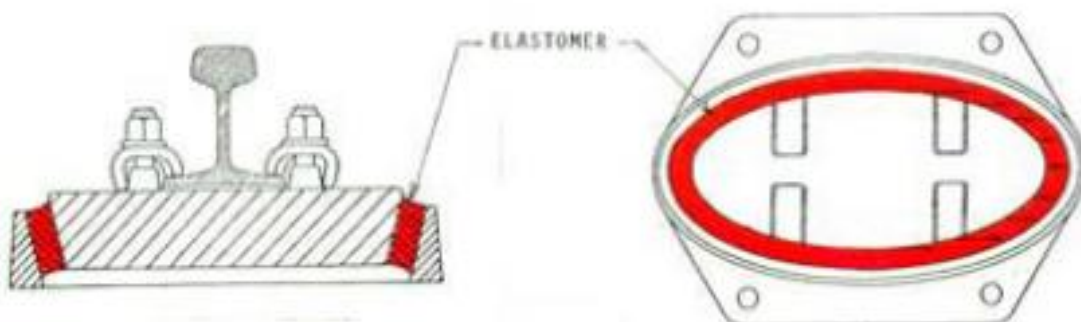
Οι τεχνικές που παρουσιάζονται εφαρμόζονται στη σιδηροτροχιά και γενικότερα στην επιδομή για τη μείωση του θορύβου στην πηγή. Οι παρακάτω τεχνικές εφαρμόζονται στον κορμό, το πέλμα ή κάτω από το πέλμα της σιδηροτροχιάς και στην υποδομή.

2.1.1 Ελαστικά υποθέματα

Τα ελαστικά υποθέματα τοποθετούνται εκ κατασκευής μεταξύ σιδηροτροχιάς – στρωτήρα ή μεταξύ πλάκας έδρασης και στρωτήρα (Εικόνα 2.2) ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ελαστικότητα της σιδηροδρομικής γραμμής [5]. Λόγω της ελαστικότητάς τους, απορροφούν τις ταλαντώσεις των τροχών και της σιδηροτροχιάς που μεταφέρονται στους στρωτήρες και στο έρμα και μειώνουν τον παραγόμενο θόρυβο [1]. Ειδική περίπτωση αποτελεί το ελλειπτικής μορφής ελαστικό υπόθεμα, το λεγόμενο και «αυγό της Κολωνίας» (Σχήμα 2.1) το οποίο τοποθετείται πλευρικά της πλάκας έδρασης και παρέχει ελαστική στήριξη στη σιδηροτροχιά [6].



Εικόνα 2.2: Ελαστικό υπόθεμα [5]



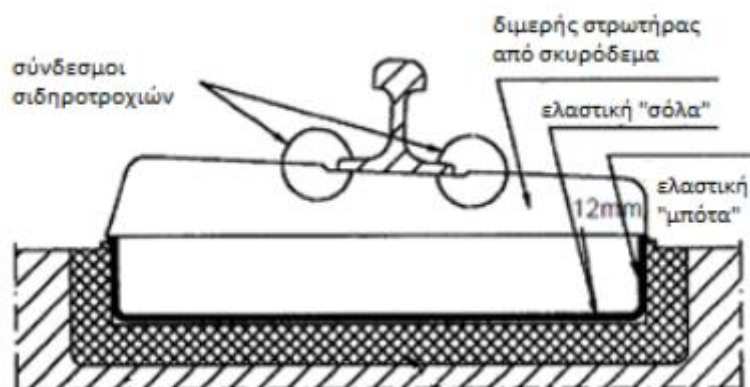
Σχήμα 2.1: Το «αυγό της Κολωνίας» [6]

2.1.2 Ελαστικά περιβλήματα στρωτήρων

Μία τεχνική η οποία εφαρμόζεται στη σταθερή επιδομή κατά τη φάση κατασκευής είναι τα ελαστικά περιβλήματα στρωτήρων (ελαστική «μπότα») (Εικόνα 2.3). Πρόκειται για μια ελαστική βάση κάτω από τους στρωτήρες η οποία συμβάλλει στη συνολική ελαστικότητα της γραμμής και ταυτόχρονα δρα θετικά έναντι θορύβου και δονήσεων. Ο στρωτήρας και το ελαστικό υπόθεμα που χρησιμοποιείται τοποθετούνται εντός της ελαστικής «μπότας» και όλο το σύστημα σκυροδετείται μέχρι το ύψος της «μπότας» (Σχήμα 2.2) [7].



Εικόνα 2.3: Ελαστικό περίβλημα στρωτήρων (ελαστική «μπότα») [7]



Σχήμα 2.2: Σκαρίφημα τοποθέτησης ελαστικού περιβλήματος στρωτήρων [7]

2.1.2 Λείανση σιδηροτροχιάς

Από την καθημερινή καταπόνηση της επιφάνειας κύλισης των σιδηροτροχιών δημιουργούνται ανεπιτεδότητες στην άνω στάθμη κεφαλής σιδηροτροχιάς. Συνέπεια τούτου είναι η θορυβώδης κύλιση των συρμών καθώς και η αύξηση της φθοράς των τροχών και της σιδηροτροχιάς. Κατά τη διαδικασία της λείανσης οι κεφαλές των σιδηροτροχιών ελέγχονται οπτικά χρησιμοποιώντας κατάλληλα όργανα (Εικόνα 2.4) ή φορεία με κατάλληλο εξοπλισμό (Εικόνα 2.5) μετρώντας το μήκος κύματος και το βάθος των κυματώσεων [8].



Εικόνα 2.4: Όργανο μέτρησης κυματώσεων σιδηροτροχιάς [9]



Εικόνα 2.5: Φορείο με κατάλληλο εξοπλισμό για τη μέτρηση των κυματώσεων της σιδηροτροχιάς [9]

Στη συνέχεια, αν διαπιστωθεί ότι το βάθος των κυματώσεων είναι μεγαλύτερο από 0,2 mm, διέρχονται από την προβληματική περιοχή οχήματα με τον κατάλληλο εξοπλισμό (Εικόνα 2.6) που λειαίνουν τη σιδηροτροχιά επαναφέροντάς το προφίλ της κεφαλής στην αρχική του μορφή.



Εικόνα 2.6: Όχημα λείανσης σιδηροτροχιών [10]

2.1.3 Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών

Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών είναι συσκευές οι οποίες μειώνουν το θόρυβο που προέρχεται από τις σιδηροτροχιές. Η βασική αρχή λειτουργίας των αποσβεστήρων ταλαντώσεων είναι η απορρόφηση των ταλαντώσεων των σιδηροτροχιών που δημιουργούνται κατά την κύλιση του συρμού. Οι δονήσεις αυτές οφείλονται στη φθορά της κεφαλής της σιδηροτροχιάς κατά την επαφή με τον τροχό [11].

Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων αποτελούνται από στοιχεία τα οποία τοποθετούνται στον κορμό (Εικόνα 2.7) και στο πέλμα της σιδηροτροχιάς με ειδικές λαβίδες ή κόλλα. Εφαρμόζεται σε κάθε τύπο διατομής σιδηροτροχιάς και συνεπώς είναι κατάλληλο για κάθε τύπο επιδομής (σκυρογραμμή ή σταθερή επιδομή) [12].

Η αποτελεσματικότητα των αποσβεστήρων σιδηροτροχιών δεν μπορεί να εκφραστεί με μία συγκεκριμένη τιμή. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της γραμμής πριν την τοποθέτηση των αποσβεστήρων καθώς και από την ταχύτητα κίνησης των συρμών. Σε ταχύτητες μεταξύ 40-80 km/h, στις οποίες ο θόρυβος από τις σιδηροτροχιές είναι σημαντικός, οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων επιτυγχάνουν σημαντική μείωση. Ακόμη και σε συρμούς υψηλών ταχυτήτων στους οποίους ο αεροδυναμικός θόρυβος είναι καθοριστικός, υπάρχει μείωση κατά 1 dBA. Αντίθετα, σε περιπτώσεις χαμηλών ταχυτήτων (κάτω από 40 km/h) που ο θόρυβος της μηχανής έλξης είναι μεγαλύτερος από τις άλλες πηγές, οι αποσβεστήρες αποδεικνύονται αναποτελεσματικοί [11].

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών δεν επηρεάζουν την κύλιση των φορέων επί των σιδηροτροχιών και δεν εμποδίζουν την πέδηση των συρμών [11].



Εικόνα 2.7: Αποσβεστήρας σιδηροτροχιάς επί κορμού [13]

2.1.4 Ηχοαπορροφητικές πλάκες

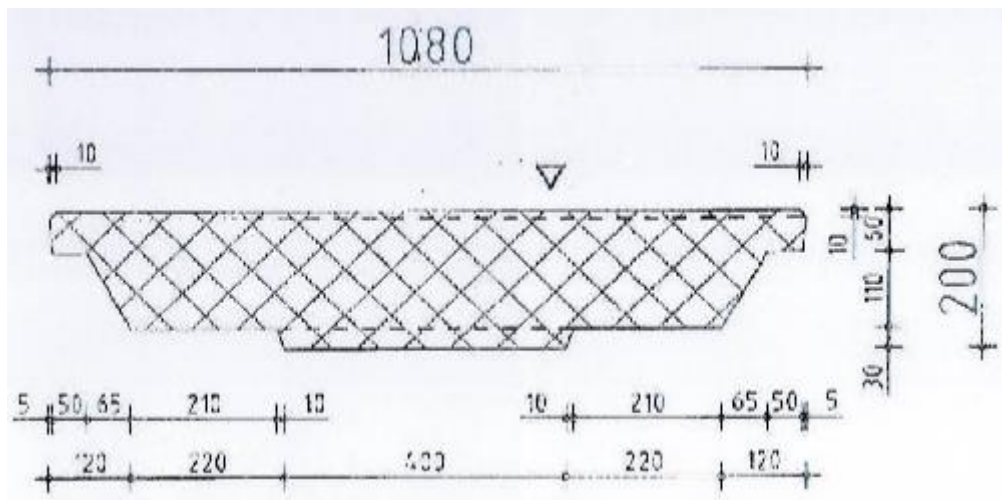
Στη τεχνική αυτή πλάκες (πάνελ) που συνήθως είναι κατασκευασμένες από ένα μείγμα τσιμέντου με ίνες ξύλου τοποθετούνται επί της γραμμής μεταξύ των σιδηροτροχιών καθώς και σε μικρή απόσταση από τις εξωτερικές πλευρές των σιδηροτροχιών (Εικόνες 2.8, 2.9, Σχήματα 2.3, 2.4). Στόχος των ηχοαπορροφητικών πλακών είναι η απορρόφηση μέρους του προσπίπτοντος ήχου, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από το συντελεστή ηχοαπορρόφησης του μείγματος. Οι ηχοαπορροφητικές πλάκες εφαρμόζονται σε γραμμές με σταθερή επιδομή και συνήθως βιδώνονται ή συγκρατούνται με ειδική κόλλα επί της πλάκας έδρασης [14].



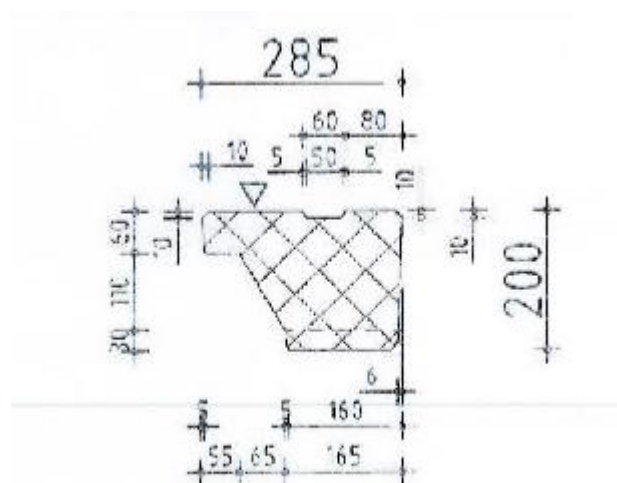
Εικόνα 2.9: Φωτογραφία τμήματος του δικτύου του Η.Σ.Α.Π. στη Χ.Θ. 18+300. Διακρίνονται οι ηχοαπορροφητικές πλάκες στις γραμμές ανόδου και καθόδου



Εικόνα 2.10: Ηχοαπορροφητικές πλάκες στο δίκτυο του Η.Σ.Α.Π. στη Χ.Θ. 18+300. Διακρίνονται τα κεντρικά και πλευρικά πάνελ.



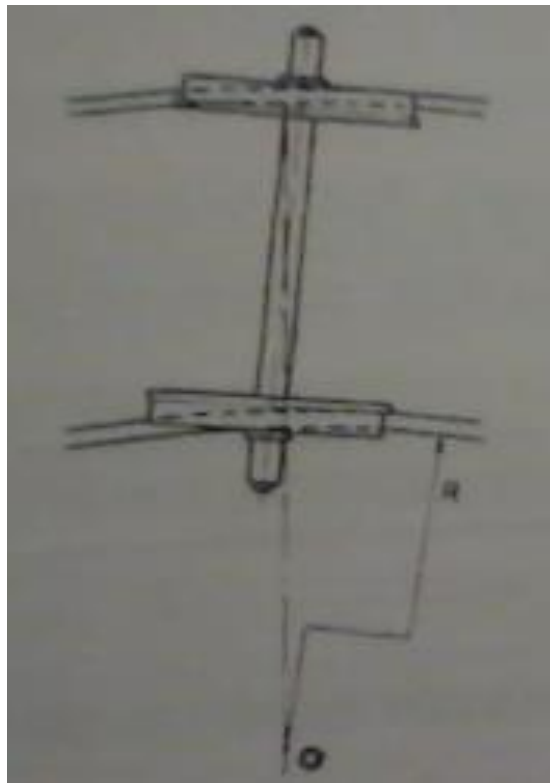
Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα κεντρικής πλάκας [15]



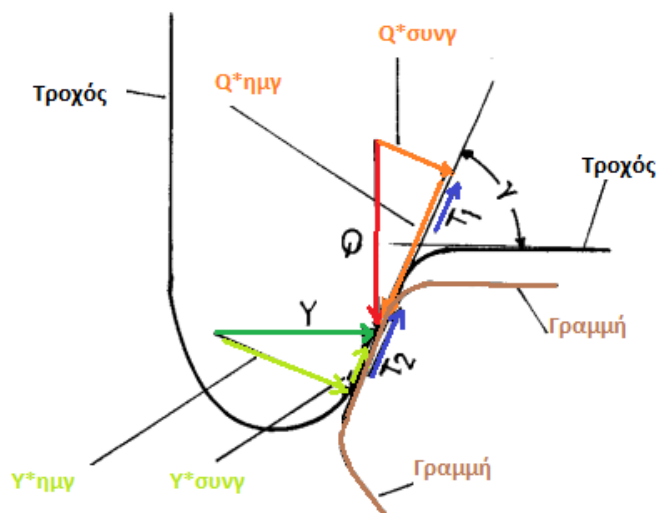
Σχήμα 2.4: Σκαρίφημα πλευρικής πλάκας [15]

2.1.5 Βελτιωτικά τριβής επαλειφόμενα στη σιδηροτροχιά

Κατά την κίνηση του συρμού και ειδικότερα κατά την είσοδό του σε καμπύλες, δρουν μεταξύ του όνυχας του εξωτερικά προσπίπτοντος τροχού και της εσωτερικής παρειάς της σιδηροτροχιάς μεγάλες δυνάμεις καθοδήγησης οι οποίες τον εξαναγκάζουν προς καμπύλη πορεία. Στη φάση αυτή ο όνυχας τρίβεται στην παρειά της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και παράγεται θόρυβος. Αντίθετα, ο εσωτερικός τροχός ωθείται από τον τροχοφόρο άξονα και από τη στροφή του φορείου να κινηθεί κάθετα στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς υπερβαίνοντας τη δύναμη της τριβής πρόσφυσης επ' αυτής (Εικόνες 2.11, 2.12). Αυτό επιτυγχάνεται μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα, όπου ο τροχός τανύεται ως προς τη σιδηροτροχιά και εκτονώνεται απότομα όταν η δύναμη επαναφοράς υπερβεί την τριβή πρόσφυσης για να τανηθεί εκ νέου και άμεσα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «stick-slip» ή «ψευδοολίσθηση» και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερου θορύβου από τον εσωτερικό τροχό σε σχέση με τον εξωτερικό [16], [17].



Εικόνα 2.11: Θέση άξονα στην καμπύλη γραμμή [1]



Υπόμνημα

Q : Φορτίο (κάθετο) ανά τροχό

Y : Οριζόντια δύναμη καθοδήγησης/επαναφοράς (παράλληλη στον τροχοφόρο άξονα)

μ : Συντελεστής τριβής

T : Τριβή

γ : Κλίση όνυχας ως προς το οριζόντιο φορτίο

Εικόνα 2.12: Σκαρίφημα δυνάμεων στο σημείο επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς [18]

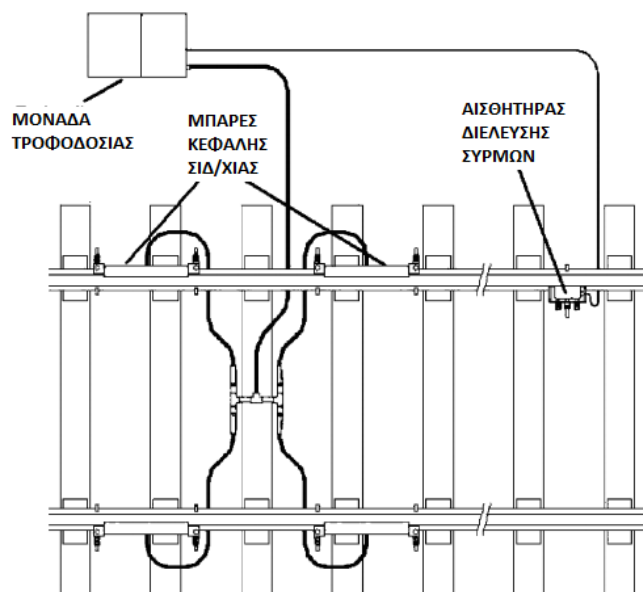
Τα βελτιωτικά τριβής έχουν τοποθετούνται για να ρυθμίζουν το συντελεστή τριβής και να τον σταθεροποιούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών μεταξύ 0,06 και 0,35 και σε ειδικές περιπτώσεις 0,6¹. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς που συντελεί ώστε να μειώνεται ο παραγόμενος θόρυβος καθώς και η φθορά του τροχού και της σιδηροτροχιάς [19].

Τα βελτιωτικά τριβής τοποθετούνται στην ευθεία πριν την καμπύλη και σε συγκεκριμένο μήκος μέσα σ' αυτή. Στο εμπόριο, διατίθενται σε υγρή και στερεή μορφή. Στην περίπτωση των υγρών βελτιωτικών, η τοποθέτηση γίνεται στην κορυφή της σιδηροτροχιάς (Εικόνα 2.13). Η εφαρμογή των υγρών βελτιωτικών γίνεται με δια χειρός επάλειψη ή με έκχυση με μηχανικά μέσα. Κατά τη δια χειρός επάλειψη της σιδηροτροχιάς, το υλικό διαστρώνεται με ειδικά πινέλα ή οχήματα που φέρουν ρολά πινέλα για συγκεκριμένο πάχος και σε συγκεκριμένη απόσταση ανεξάρτητα της ταχύτητας και του βάρους του οχήματος. Όσον αφορά τη διάστρωση με μηχανικά μέσα συνήθως χρησιμοποιείται μία ειδική συσκευή δίπλα από τη γραμμή (Σχήμα 2.5). Η συσκευή αυτή έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει μέσω αισθητήρων τον αριθμό των τροχών οι οποίοι περνούν από το συγκεκριμένο σημείο (Σχήμα 2.5). Επιπλέον, μέσω ειδικά διαμορφωμένων μπάρων συσκευών έκχυσης (Εικόνα 2.14), το υλικό διανέμεται στη σιδηροτροχιά σε ορισμένη ποσότητα και σε ορισμένη απόσταση με ειδικές βαλβίδες οι οποίες συγκρατούνται με σφικκτήρες στη βάση της σιδηροτροχιάς. Ο αριθμός των διελεύσεων και η ποσότητα καθορίζεται από τις αρμόδιες σιδηροδρομικές. [19]

¹Η ανώτατη τιμή του συντελεστή τριβής που επιτυγχάνουν τα βελτιωτικά τριβής, είναι απαραίτητη για την κίνηση των συρμών σε ανωφέρειες και κυρίως των μηχανών έλξης.



Εικόνα 2.13: Βελτιωτικό τριβής υγρής κατάστασης [20]



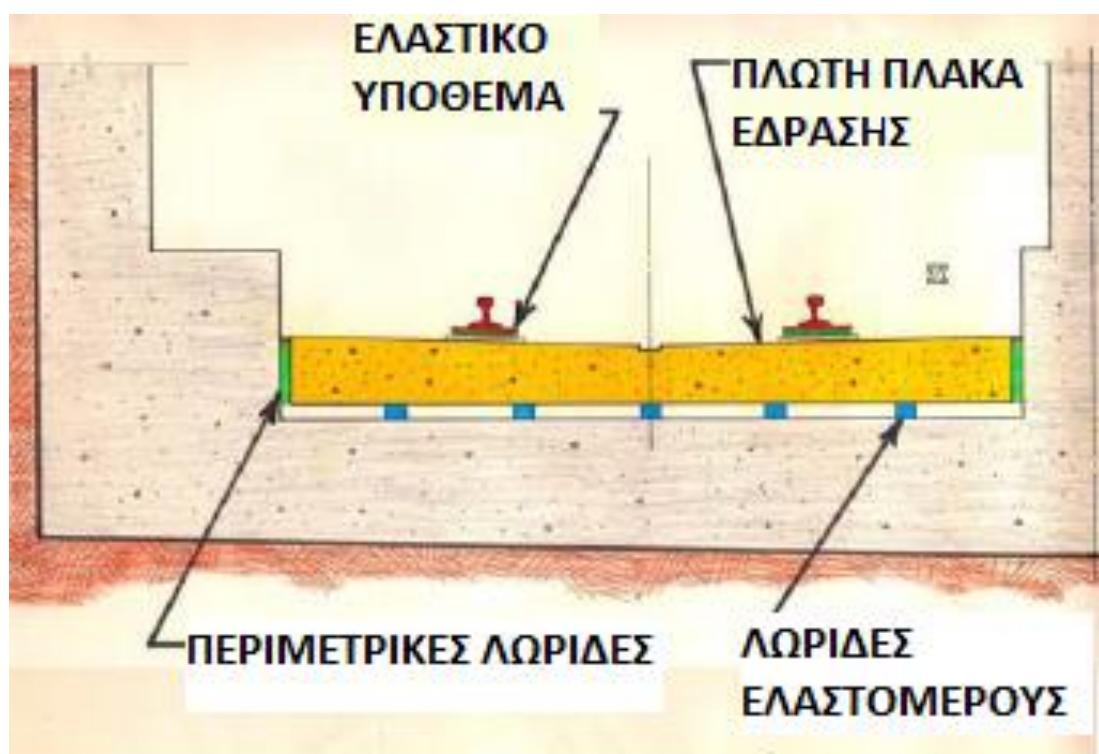
Σχήμα 2.5: Σκαρίφημα τοποθέτησης υγρών βελτιωτικών τριβής [19]



Εικόνα 2.14: Συσκευές έκχυσης [20]

2.1.6 Πλωτή πλάκα

Η τεχνική της πλωτής πλάκας αποτελείται από προκατασκευασμένες πλάκες σκυροδέματος περιορισμένου μήκους ή από μία συνεχόμενη πλάκα πάνω στην οποία εδράζονται οι στρωτήρες επί ελαστικών υποθεμάτων (Σχήμα 2.6). Πλευρικά και κάτω από την πλάκα σκυροδέματος τοποθετούνται λωρίδες ελαστομερούς υλικού με σκοπό την απορρόφηση των κραδασμών. Η τεχνική αυτή έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλή αντοχή. Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι στην περίπτωση των προκατασκευασμένων πλακών περιορισμένου μήκους οι λωρίδες του ελαστομερούς είναι δυνατό να αντικατασταθούν με νέες υπερυψώνοντας την πλάκα [7].



Σχήμα 2.6: Σκαρίφημα διατομής πλωτής πλάκας σκυροδέματος [6]

2.2 Τεχνικές που εφαρμόζονται στο σιδηροδρομικό όχημα

Οι τεχνικές που παρουσιάζονται παρακάτω εφαρμόζονται είτε στον τροχό είτε επί του σιδηροδρομικού φορείου. Η περιοχή επιρροής τους είναι διευρυμένη και ορίζεται από τη διαδρομή που ακολουθεί ο συρμός.

2.2.1 Τόρνευση τροχού

Οι σιδηροδρομικοί οργανισμοί αναθέτουν σε ειδικές Διευθύνσεις/Τμήματα αρμοδιότητες για τη διενέργεια προληπτικών μετρήσεων της διατομής των τροχών. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται ανά ένα συγκεκριμένο αριθμό διανυθέντων χιλιομέτρων, συνήθως ανά 20.000-25.000 χιλιόμετρα, εκτός εάν υπάρξει λόγος για να γίνει και ενδιάμεση μέτρηση (πχ. ύστερα από υπόδειξη του οδηγού).

Για την τόρνευση των τροχών χρησιμοποιείται η συσκευή του τόρνου η οποία έχει σχεδιαστεί για να επισκευάζει τους τροχούς των αξόνων που εδράζονται στο τροχαίο υλικό και το δισκόφρενο χωρίς να χρειάζεται να μετακινηθούν οι τροχοφόροι άξονες. Είναι, επίσης, σε θέση να κατεργαστεί τους τροχοφόρους άξονες, είτε αυτοί είναι συναρμολογημένοι στο φορείο, είτε μεμονωμένοι. Η ειδική του διάταξη (Εικόνα 2.15), δηλαδή ο εξοπλισμός τοποθετημένος σε ένα κοίλωμα κάτω από το επίπεδο του πατώματος του συνεργείου επισκευής, επιτρέπει στον τόρνο να κατεργαστεί τους άξονες χωρίς να είναι αναγκαία η αποσυναρμολόγηση οποιουδήποτε τμήματος των οχημάτων.

Ο τόρνος, εξοπλισμένος με ένα σύγχρονο ψηφιακό έλεγχο, καθιστά δυνατή την αυτόματη εκτέλεση όλων των κύκλων εργασίας. Επομένως, εκτελεί εργασίες ανύψωσης και κεντραρίσματος των τροχοφόρων αξόνων, μέτρησης της διαμέτρου του πέλματος και της φθαρμένης διατομής, επεξεργάζεται τα δεδομένα και βελτιστοποιεί την ποσότητα που πρέπει να αφαιρεθεί (Εικόνα 2.16) [21]. Με τον τρόπο αυτό αναδιαμορφώνεται το προφίλ του τροχού και με την αφαίρεση υλικού μειώνονται και τυχόν ανεπιτεδότητες στις οποίες οφείλεται ο θόρυβος κύλισης.



Εικόνα 2.15: Φωτογραφία τήνου στο αμαξοστάσιο της Α.Μ.Ε.Λ. στα Σεπόλια [21]



Εικόνα 2.16: Τροχός κατά τη διαδικασία της τήννωσης [21]

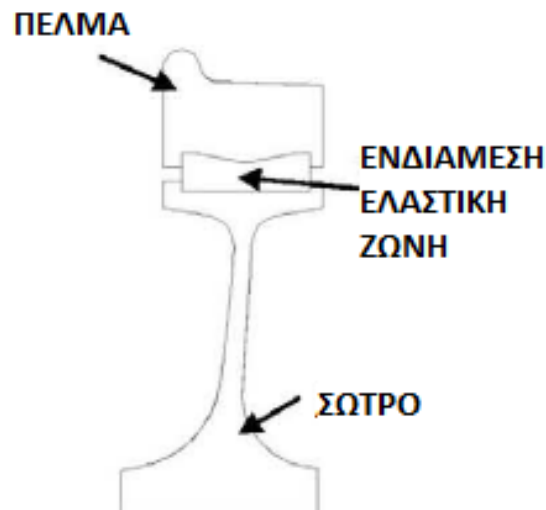
2.2.2 Μεταλλοελαστικοί τροχοί

Οι μεταλλοελαστικοί τροχοί είναι ένας τύπος τροχών των οποίων η χρήση δεν είναι τόσο διαδεδομένη στις μέρες μας. Κύριο χαρακτηριστικό των μεταλλοελαστικών τροχών είναι η ενδιάμεση ελαστική ζώνη μεταξύ του μεταλλικού πέλματος και του μεταλλικού σώτρου (Σχήμα 2.7, Εικόνα 2.17). Η ελαστική αυτή ζώνη, η οποία συνήθως έχει τη μορφή δακτυλίου σχήματος V (Σχήμα 2.8), λειτουργεί σαν ένα πρόσθετο σύστημα ανάρτησης που δρα βοηθητικά στην ελάττωση του θορύβου κύλισης και των ταλαντώσεων που μεταφέρονται από τις σιδηροτροχιές και το όχημα.

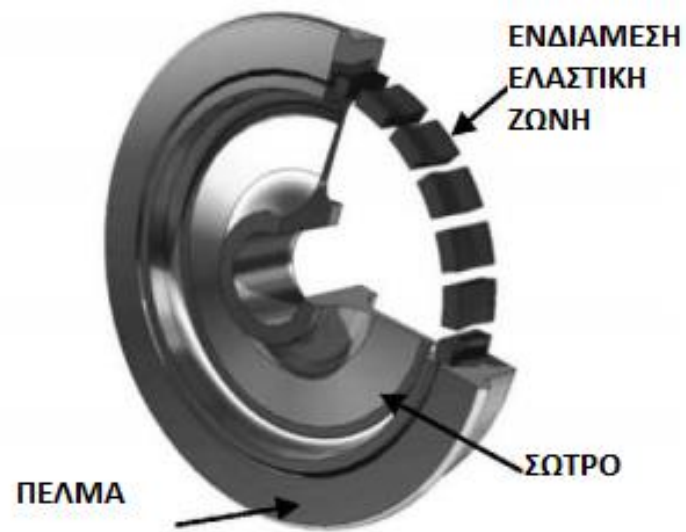
Πολλά θετικά προκύπτουν από τη χρήση των μεταλλοελαστικών τροχών. Η ελαστική ζώνη συμπεριφέρεται σαν αποσβεστήρας θορύβου πιο ικανοποιητικά απ' ότι το μέταλλο και, διαχωρίζοντας το πέλμα από το σώτρο, ελαττώνονται οι δονήσεις ολόκληρου του τροχού.

Τέλος, ένας από τους κυριότερους λόγους που οι μεταλλοελαστικοί τροχοί δεν χρησιμοποιούνται ευρέως πλέον είναι η σύνδεσή τους με ένα δυστύχημα στη Γερμανία με 101 νεκρούς και 100 τραυματίες το καλοκαίρι του 1998.

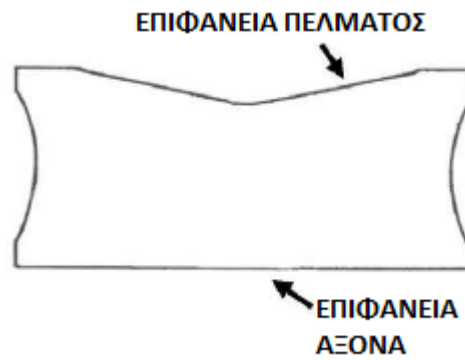
Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη, οι ερευνητές μελετούν και κατασκευάζουν νέους τύπους μεταλλοελαστικών τροχών ώστε να μειώσουν και να εξαλείψουν τα αρνητικά στοιχεία που συνδέονται με τη χρήση τους [22].



Σχήμα 2.7: Τομή μεταλλοελαστικού τροχού[22]



Εικόνα 2.17: Τρισδιάστατη τομή μεταλλοελαστικού τροχού[22]



Σχήμα 2.8: Λεπτομέρεια ενδιάμεσης ζώνης μεταλλοελαστικού τροχού [22]

2.2.3 Αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών

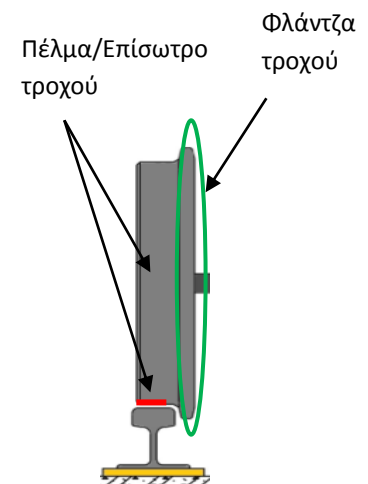
Οι αποσβεστήρες τροχών έχουν παρόμοια λειτουργία με τους αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών. Βασικός τους στόχος είναι η απορρόφηση των ταλαντώσεων του τροχού και του φορείου κατά την κύλιση του συρμού. Αποτελούνται από δύο μεταλλικούς δίσκους ανάμεσα στους οποίους εισάγεται ελαστομερές υλικό το οποίο απορροφά τις ταλαντώσεις και τοποθετούνται σε ειδικές εσοχές στο σώτρο του τροχού (Εικόνα 2.18) [23].



Εικόνα 2.18: Αποσβεστήρας ταλαντώσεων τροχών [23]

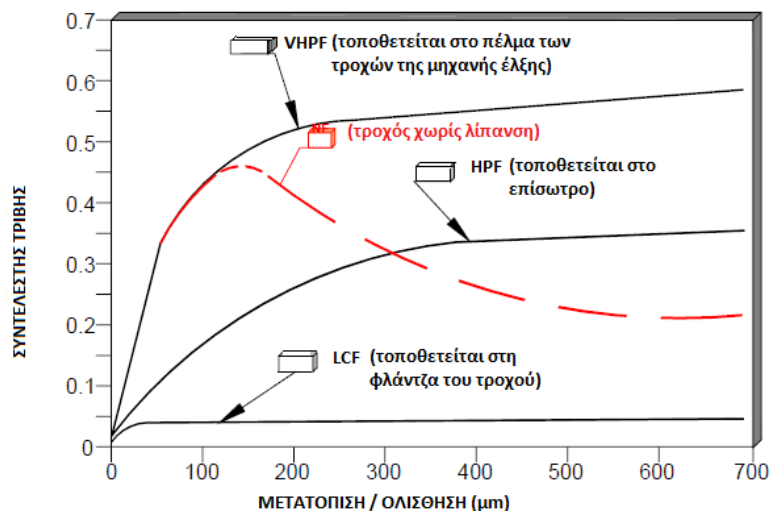
2.2.4 Βελτιωτικά τριβής επαλειφόμενα στον τροχό

Τα βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται στο σιδηροδρομικό τροχό έχουν την ίδια λειτουργία με τα βελτιωτικά τριβής που τοποθετούνται στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Τοποθετούνται σε ειδικές συσκευές (Εικόνα 2.19) επί του σιδηροδρομικού οχήματος που φέρνουν σε επαφή (και συνεπώς επαλείφουν) το βελτιωτικό τριβής με το επίσωτρο και τη φλάντζα του τροχού ενώ ο συρμός κινείται στην καθημερινή του διαδρομή [24].



Εικόνα 2.19: Βελτιωτικό τριβής στερεής κατάστασης

Υπάρχουν τρεις τύποι βελτιωτικών τριβής: α) το LCF (Low Coefficient of Friction), β) το HPF (High Positive Friction), και γ) το VHPF (Very High Positive Friction) τα οποία χρησιμοποιούνται αναλόγως των απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικοί τύποι βελτιωτικών τριβής στους τροχούς σε σχέση με τους μέταλλο με μέταλλο τροχούς (διακεκομμένη γραμμή) [24].



Διάγραμμα 2.1: Σχέση συντελεστή τριβής-ολίσθησης (μm) για διάφορους τύπους βελτιωτικών τριβής [24]

Όλοι οι τύποι των βελτιωτικών τριβής μεταφέρονται από τον τροχό στην κατάλληλη περιοχή της σιδηροτροχιάς [24].

Το LCF (Low Coefficient of Friction) είναι ένα στερεό λιπαντικό σε μορφή ράβδου (stick) το οποίο διατηρεί το συντελεστή τριβής κάτω από 0,1. Τοποθετείται στη φλάντζα του τροχού (Εικόνα 2.19) και, λόγω της στερεής φύσης του παραμένει στην εσωτερική πλευρά της σιδηροτροχιάς και δεν ρέει στο πέλμα του τροχού ή στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς, σε αντίθεση με άλλα ρευστά πετρελαιοειδή προϊόντα.

Το HPF (High Positive Friction) είναι ένα βελτιωτικό τριβής το οποίο διατηρεί το συντελεστή τριβής μεταξύ των τιμών 0,17 και 0,35, αναλόγως τις συνθήκες, κι εφαρμόζεται στο πέλμα των τροχών.

Το VHPF (Very High Positive Friction) διαμορφώνει το συντελεστή τριβής πάνω από την τιμή 0,6 κάτι το οποίο αυξάνει την έλξη. Τοποθετείται στο πέλμα των τροχών της μηχανής έλξης.

2.2.5 Σύστημα πέδησης μειωμένου θορύβου

Το πλέον διαδεδομένο σύστημα πέδησης που χρησιμοποιείται από τους σιδηροδρομικούς οργανισμούς είναι τα φρένα από χυτοσίδηρο. Ο μηχανισμός πέδησης στηρίζεται στη δημιουργία τριβής κατά την επαφή των πέδινων με τους τροχούς που επιβραδύνει και τελικά σταματά το συρμό· προκαλεί όμως τη φθορά των τροχών [11]. Σήμερα τα φρένα από χυτοσίδηρο τείνουν (για τους επιβατικούς συρμούς) να αντικατασταθούν από δισκόφρενα, φρένα τύπου K και φρένα τύπου LL.

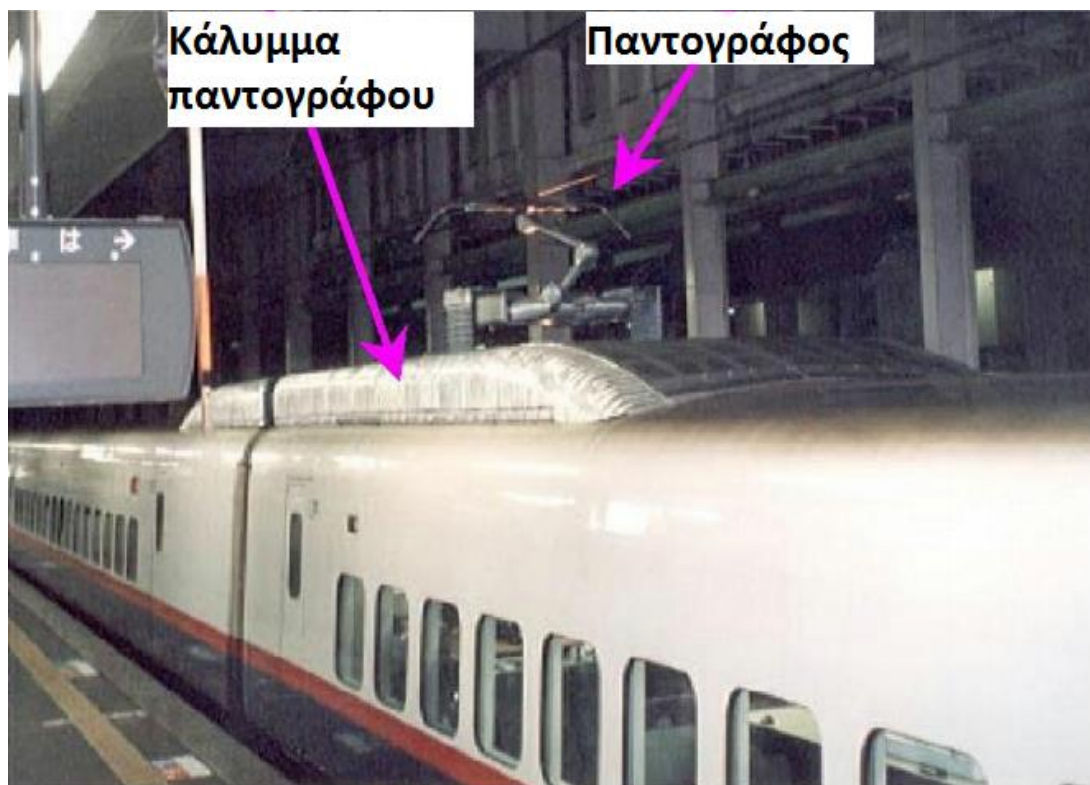
Τα δισκόφρενα χρησιμοποιούνται σε συρμούς που κινούνται με υψηλές ταχύτητες αντικαθιστώντας τα πέδιλα από χυτοσίδηρο, που στις ίδιες ταχύτητες δεν έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την πέδηση. Τα δισκόφρενα έχουν τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Κατά την επαφή του δισκοφρένου με τον τροχό αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες της τάξης των 500 °C. Τα τελευταίας τεχνολογίας δισκόφρενα κατασκευάζονται από ατσάλι, με προσθήκες ρινισμάτων διαφόρων υλικών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η αντοχή τους, να μειώνεται το βάρος των φορέων και, ταυτόχρονα, να ελαττώνεται ο παραγόμενος θόρυβος [25].

Τα φρένα τύπου K αποτελούνται από οργανική σύνθετη ύλη και έχουν 2,5 φορές μεγαλύτερο συντελεστή τριβής από τα φρένα με χυτοσίδηρο. Η τοποθέτησή τους σε υφιστάμενα φορεία είναι πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα καθώς απαιτείται η αντικατάσταση κυλίνδρων και εμβόλων του μηχανισμού πέδησης. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η εφαρμογή τους σε νέους συρμούς [25].

Τα φρένα τύπου LL είναι απολύτως συμβατά με τους περισσότερους τύπους φρένων από χυτοσίδηρο. Αυτός είναι και ο λόγος που είναι δυνατό να αντικαταστήσουν το συμβατικό σύστημα πέδησης με μικρό κόστος και σε λίγο χρόνο. Επιπλέον, μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε νέους συρμούς όσο και σε υφιστάμενους. Κατασκευάζονται είτε από οργανικό σύνθετο υλικό είτε από πυροσυσσωματωμένα μέταλλα και παρέχουν την ίδια μείωση θορύβου με τα φρένα τύπου K. Έχουν λάβει προσωρινή πιστοποίηση από τη Διεθνή Ένωση Σιδηροδρόμων (UIC) για χρήση σε διεθνές επίπεδο τρεις τύποι LL, σε αντίθεση με τα τύπου K που έχουν λάβει την διεθνή πιστοποίηση χρήσης από το 2008 [11].

2.2.6 Μείωση αεροδυναμικού θορύβου

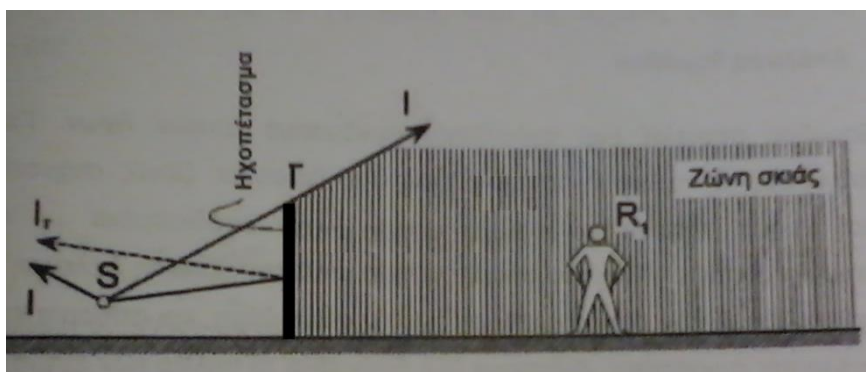
Στα σύγχρονα τρένα υψηλών ταχυτήτων κάνει αισθητή την εμφάνισή του ένα διαφορετικό είδος θορύβου, ο αεροδυναμικός θόρυβος. Ο θόρυβος αυτός κυριαρχεί στις πολύ υψηλές ταχύτητες ($V > 270$ km/h), είναι σημαντικός για υψηλές ταχύτητες (200 km/h $< V < 250$ km/h), ενώ θεωρείται αμελητέος στις συμβατικές ταχύτητες ($V < 160$ km/h). Οφείλεται στην αύξηση των αεροδυναμικών αντιστάσεων του συρμού και εξαρτάται σημαντικά από την μετωπική επιφάνεια προσβολής του συρμού, την πλευρική επιφάνεια του συρμού και το μήκος του. Σημαντικό ρόλο στη γένεση του θορύβου αυτού παίζουν οι παντογράφοι που χρησιμοποιούνται για την παροχή στο συρμό, από το ηλεκτρικό δίκτυο, της ενέργειας κίνησης [26]. Μία τεχνική μείωσης του αεροδυναμικού θορύβου αποτελεί η μείωση του αριθμού των παντογράφων καθώς και η τοποθέτηση καλύμματος από ειδικό διάτρητο μεταλλικό υλικό (Εικόνα 2.20). Στόχος είναι η μείωση της τυρβώδους ροής του αέρα που δημιουργείται λόγω των υψηλών ταχυτήτων στις βάσεις των παντογράφων με ταυτόχρονη μείωση του θορύβου. Ωστόσο, πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η συγκεκριμένη τεχνική καθώς υπάρχουν επιφυλάξεις ως προς την αποτελεσματικότητα αφού θεωρείται ότι τα ίδια τα καλύμματα δημιουργούν επιπλέον θόρυβο [27, 28].



Εικόνα 2.20: Κάλυμμα παντογράφου [28]

2.3 Ηχοπετάσματα

Τα ηχοπετάσματα ή αντιθορυβικά πετάσματα στο σιδηρόδρομο είναι τεχνικά έργα τα οποία τοποθετούνται παράπλευρα και συνήθως παράλληλα προς τη σιδηροδρομική γραμμή με σκοπό τη μείωση του επιπέδου του εκπεμπόμενου σιδηροδρομικού θορύβου. Κατατάσσονται στα παθητικά μέτρα ηχοπροστασίας, τα οποία προστατεύουν το εσωτερικό των κτιρίων και γενικότερα τις κατοικημένες περιοχές από το σιδηροδρομικό θόρυβο (λόγω της ηχητικής σκιάς που δημιουργούν τα ηχοπετάσματα (Εικόνα 2.21)) μέσω απορρόφησης, μετάδοσης και ανάκλασης του ήχου [5].



Εικόνα 2.21: Ηχοπέτασμα και ζώνη ηχητικής σκιάς [29]

Διακρίνονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε:

- Ηχοπετάσματα από οπλισμένο σκυρόδεμα (Εικόνα 2.22),
- Ηχοπετάσματα από τοιχοποιία (Εικόνα 2.23),
- Ηχοπετάσματα από αλουμίνιο,
- Ηχοπετάσματα από πλαστικό,
- Ξύλινα ηχοπετάσματα (Εικόνα 2.24),
- Διαφανή ηχοπετάσματα (γυαλί, ακρυλικό, Plexiglas κ.α.) (Εικόνα 2.25),
- Ηχοπετάσματα από σκυρόδεμα με φύτευση (green walls): Πρόκειται για προκατασκευασμένα πλαίσια στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται «κιβώτια» τα οποία γεμίζονται με χώμα και φυτεύονται (Εικόνα 2.26).



Εικόνα 2.22: Ηχοπετάσματα οπλισμένου σκυροδέματος [13]



Εικόνα 2.23: Ηχοπετάσματα από τοιχοποιία [13]



Εικόνα 2.24: Ξύλινα ηχοπετάσματα [13]



Εικόνα 2.25: Διαφανή ηχοπετάσματα [13]



Εικόνα 2.26: Ηχοπετάσματα από οπλισμένο σκυρόδεμα με φύτευση (green walls) [13]

Η επιλογή του υλικού κατασκευής των ηχοπετασμάτων είναι συνάρτηση τεχνοοικονομικών, περιβαλλοντικών παραγόντων και αισθητικής. Ιδιαίτερη βαρύτητα στην τελική επιλογή δίδεται στον οικονομικό χρόνο ζωής τους, στη συντήρησή τους και στη λειτουργικότητα της σιδηροδρομικής οδού κατά μήκος της οποίας τοποθετούνται. Για τη βελτίωση της απόδοσης των ηχοπετασμάτων αμφιπλεύρως και για ύψος μεγαλύτερο ή ίσο με 2 m πρέπει να εξασφαλίζεται ικανή ηχοαπορροφητικότητα [5]. Η ηχοαπορροφητικότητα μετράται από το δείκτη ηχοαπορροφητικότητας α_s . Πρόκειται για ένα δείκτη ο οποίος δείχνει το βαθμό απορρόφησης του προσπίπτοντος ήχου. Παίρνει τιμές από 0 για πλήρως ανακλαστικό, έως 1 για πλήρως ηχοαπορροφητικό υλικό. Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης προσδιορίζεται για συγκεκριμένη συχνότητα ή ομάδα συχνοτήτων. Για να είναι αποτελεσματικό ένα ηχοαπορροφητικό υλικό θα πρέπει να έχει υψηλό συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας (τουλάχιστον 0,6) στις συχνότητες ήχων που εμφανίζονται περισσότερο, να είναι ανθεκτικό στις περιβαλλοντικές συνθήκες και να μην μειώνεται η απορροφητικότητά του με το χρόνο [30].

Όσον αφορά τη θέση τοποθέτησης και το ύψος των ηχοπετασμάτων, κατά κανόνα ισχύει ότι η εγκάρσια απόσταση από τον άξονα της γραμμής πρέπει να είναι κανονικά τουλάχιστον ίση με 4,50 m στα ευθύγραμμα τμήματα και 4,80 m στα καμπύλα (για λόγους ασφάλειας του προσωπικού κατά τη διάρκεια της συντήρησης). Το μέγιστο ύψος των ηχοπετασμάτων από την επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών είναι κατά κανόνα 2 m, έτσι ώστε να διατηρείται η αισθητική του τοπίου, η ελκυστικότητα των γειτονικών κατοικήσιμων περιοχών και η ορατότητα για τον επιβάτη. Όταν δεν επαρκεί το ύψος των 2 m για ικανοποιητική ηχοπροστασία από το σιδηροδρομικό θόρυβο, τοποθετούνται ειδικά ηχοπροστατευτικά παράθυρα στα επηρεαζόμενα κτίρια, μέτρο το οποίο αυξάνει κατά πολύ το κόστος. Μόνο όταν συντρέχουν σοβαροί λόγοι επιλέγεται η τοποθέτηση υψηλότερων ηχοπετασμάτων [5].

3

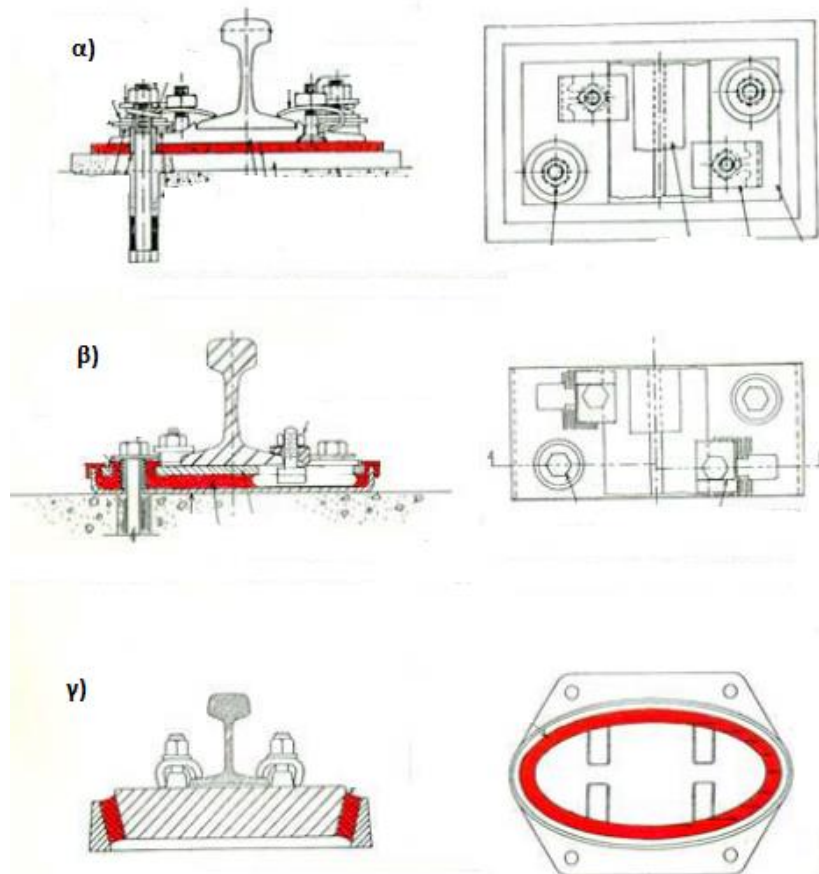
Βιβλιογραφική επισκόπηση

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την εξάπλωση του σιδηροδρόμου, η ενόχληση λόγω του σιδηροδρομικού θορύβου εντάθηκε κυρίως στις αστικές περιοχές. Το πρόβλημα αυτό απασχόλησε πολύ τους ερευνητές και έγιναν πολλές προσπάθειες για τον προσδιορισμό τεχνικών μείωσής του. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες από τις εργασίες που έχουν δημοσιευτεί ως προς τις τεχνικές που αφορούν σε επεμβάσεις στην επιδομή, στον τροχό και στο σιδηροδρομικό όχημα και, τέλος, εργασίες σχετικές με την τοποθέτηση ηχοπετασμάτων παραπλεύρως της σιδηροδρομικής γραμμής.

3.1 Τεχνικές με επεμβάσεις στην επιδομή

Η αποτελεσματικότητα των ελαστικών υποθεμάτων (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.1) εξετάστηκε από τον Wang και άλλους ερευνητές [31] οι οποίοι διεξήγαγαν ακουστικές μετρήσεις σε μια μεταλλική γέφυρα που διέθετε πλευρικά πετάσματα εκ κατασκευής και διέρχονταν εμπορικοί και επιβατικοί συρμοί. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πριν την εφαρμογή των ελαστικών υποθεμάτων έδειξαν ότι το επίπεδο θορύβου ήταν 90 dBA με κυρίαρχες συχνότητες μεταξύ 200 Hz και 1 kHz. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν με την τοποθέτηση των ελαστικών υποθεμάτων ένα χρόνο αργότερα και διαπιστώθηκε μείωση του παραγόμενου θορύβου κατά 6 dBA. Οι ερευνητές καταλήγουν ότι η εφαρμογή ελαστικών αποτελεί μία αποτελεσματική μέθοδο χαμηλού κόστους.

Ο Wilson [6] περιγράφει έρευνες για την αποτελεσματικότητα των ελαστικών υποθεμάτων οι οποίες έγιναν από τις σιδηροδρομικές αρχές του Σαν Φρανσίσκο. Οι έρευνες αυτές επικεντρώνονταν πάνω σε τρία διαφορετικά είδη ελαστικών υποθεμάτων. Τα τρία είδη που μετρήθηκαν ήταν α) η τοποθέτηση ελαστικού υποθέματος κάτω από την πλάκα έδρασης της σιδηροτροχιάς το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο Τορόντο και από το Μετρό του Παρισιού, β) σύνθετη πλάκα έδρασης που αποτελείται από δύο παράλληλες επίπεδες μεταλλικές πλάκες μεταξύ των οποίων υπάρχει ελαστομερές υλικό και γ) ελαστομερές ελλειπτικής μορφής τοποθετημένο έτσι ώστε να καταπονείται κυρίως σε διάτμηση παρά σε θλίψη, γνωστό και ως Αυγό της Κολωνίας (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Τρεις βασικοί τύποι ελαστικών υποθεμάτων μη συνδεδεμένο, συνδεδεμένο και το «αυγό της Κολωνίας» [6]

Οι ακουστικές μετρήσεις αφορούσαν σε διελεύσεις συρμών σε κοιλαδογέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι ελαστικά υποθέματα με συντελεστή ελαστικότητας μεταξύ των τιμών 17 και 22 kN/mm αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή ως προς τη μείωση του θορύβου που εκπέμπουν οι κοιλαδογέφυρες ή οι υπόγειοι σιδηρόδρομοι. Ακολουθώντας το παράδειγμα του Σαν Φρανσίσκο οι αρχές της Ατλάντας χρησιμοποίησαν πιο μαλακά ελαστικά υποθέματα τα οποία σε συνδυασμό με ηχοπετασμάτα μείωσαν το θόρυβο κατά 8-9 dBA.

Στην ίδια εργασία, ο Wilson [6] αναφέρεται στην αποτελεσματικότητα του «αυγού της Κολωνίας». Το ελλειπτικό του σχήμα έχει ως αποτέλεσμα να καταπονείται το ελαστομερές σε διάτμηση για κάθετα φορτία και σε θλίψη για οριζόντια. Τονίζεται, επίσης, το γεγονός ότι υπάρχει ένα πρακτικό όριο στη

μείωση του εδαφομεταφερόμενου θορύβου και των δονήσεων από την εφαρμογή ελαστικών υποθεμάτων. Προκύπτει, δηλαδή, ότι η τοποθέτηση ελαστικών υποθεμάτων με μικρό συντελεστή ελαστικότητας έχει το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά τα επίπεδα του παραγόμενου θορύβου, με μία αντίστοιχη γραμμή με σκύρα. Χάρης τα χαρακτηριστικά του «αυγού της Κολωνίας» ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος και δονήσεις μπορούν να μειωθούν κατά 6 με 8 dBA για συχνότητες μεγαλύτερες των 40 Hz η οποία μείωση σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι ικανοποιητική, ιδίως κατά την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων κοντά σε μη ευαίσθητες περιοχές. Μεγαλύτερη ηχομείωση της τάξης των 6-8 dBA επιτυγχάνεται από την τεχνική της σταθερής επιδομής τύπου STEDEF (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.2). Ο συγκεκριμένος τύπος επιδομής περιλαμβάνεται σε μελέτες του Μετρώ του Παρισιού και έχει χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα σημεία, όπου ήταν απαραίτητο, ιδιαίτερα πριν γίνει ευρέως γνωστή η αποτελεσματικότητα του «αυγού της Κολωνίας».

Άλλη τεχνική η οποία περιγράφηκε από τους Poisson και Margiocchi [31] ήταν η εφαρμογή αποσβεστήρων ταλαντώσεων στον κορμό της σιδηροτροχιάς (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.3). Για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας των αποσβεστήρων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη Γαλλία, σε μία από τις πιο τυπικές και θορυβώδεις μεταλλικές γέφυρες 20 km από το Παρίσι. Τα ηχόμετρα τοποθετήθηκαν 22 m από το κέντρο των σιδηροτροχιών στο ίδιο επίπεδο με την κεφαλή των σιδηροτροχιών για διελεύσεις διαφόρων τύπων συρμών με ταχύτητες μεταξύ 50 και 80 km/h. Ταυτόχρονα, έγιναν μετρήσεις σε παρόμοια γραμμή με σκύρα μερικές εκατοντάδες μέτρα μακριά από τη γέφυρα για τους ίδιους συρμούς. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πριν την εφαρμογή των αποσβεστήρων έδειξαν ότι τα επίπεδα θορύβου της γέφυρας είναι κατά πολύ αυξημένα σε σχέση με της συμβατικής σκυρογραμμής που φτάνουν τα 10 με 14 dBA. Μεγάλες διαφορές παρουσιάστηκαν στις χαμηλές συχνότητες μεταξύ 40 και 400 Hz. Με την εφαρμογή των αποσβεστήρων ταλαντώσεων σιδηροτροχιάς ο θόρυβος στη γέφυρα μειώθηκε κατά 3 με 4 dBA σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Επιπλέον, μετρήθηκε και ένα άλλο παρόμοιο, ελαφρύ και πορώδες υλικό το οποίο εφαρμόζεται και αυτό στον κορμό της σιδηροτροχιάς, μειώνει κατά 1 με 2 dBA το θόρυβο και προσφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την τοποθέτηση χαμηλών ηχοπετασμάτων σε μικρή απόσταση από τις σιδηροτροχιές.

Μελετήθηκε, επίσης, από τους Eadie και Santoro [33] η αποτελεσματικότητα των βελτιωτικών τριβής στην κορυφή της σιδηροτροχιάς (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.5). Για την εργασία τους πραγματοποίησαν ακουστικές μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές χώρες. Τα σημεία που μετρήθηκαν αφορούσαν γραμμές METPO και TPAM με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το υλικό που μετρήθηκε ήταν το KELTRACK, υγρής μορφής με βάση το νερό το οποίο παρέχει στη σιδηροτροχιά συντελεστή τριβής ίσο με $0,35 \pm 0,05$ μετά την εξάτμιση του νερού. Το υλικό αυτό τοποθετήθηκε δια χειρός στις τέσσερις από τις πέντε χώρες ενώ στην πέμπτη με κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό. Η μισή ποσότητα του υλικού τοποθετήθηκε στην ευθυγραμμία πριν την καμπύλη και η υπόλοιπη στο αρχικό μέρος της καμπύλης ούτως ώστε να μεταφερθεί, μέσω των τροχών, και στην υπόλοιπη καμπύλη. Διαφορές παρατηρήθηκαν ως προς την ποσότητα μεταξύ της μηχανικής και της δια χειρός επάλειψης. Διαπιστώθηκε, δηλαδή, ότι όσο αυξανόταν η απόσταση από τη συσκευή έκχυσης τόσο μειωνόταν η ποσότητα του υλικού, ενώ στην περίπτωση της δια χειρός επάλειψης η ποσότητα διατηρούνταν σταθερή σε όλο το μήκος. Το ηχόμετρο τοποθετήθηκε σε συγκεκριμένη απόσταση και σε συγκεκριμένο ύψος από τη γραμμή και είχε προγραμματιστεί ώστε να καταγράφει μεμονωμένες διελεύσεις συρμών όσο χρόνο βρίσκονταν εντός της καμπύλης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν μέση μείωση του θορύβου κατά 12 dBA, ιδιαίτερα σε συχνότητες μεταξύ 1000 και 5000 Hz, ενώ η μικρότερη μείωση παρουσιάστηκε στην περιοχή όπου οι σιδηροτροχιές

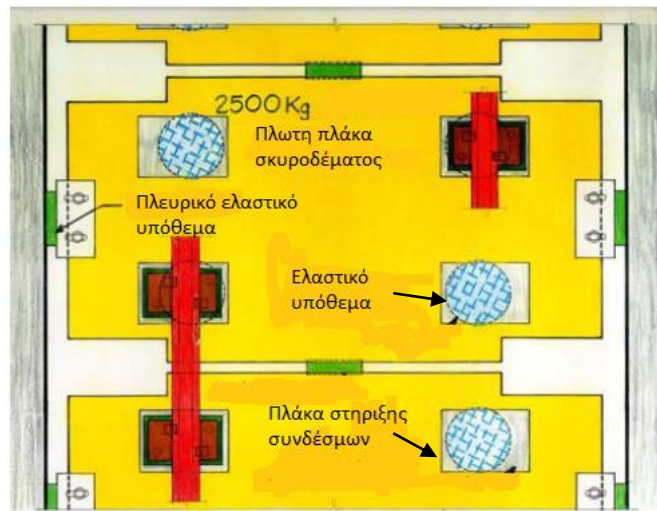
εμφάνιζαν τη μεγαλύτερη φθορά. Ταυτόχρονα, μετρήθηκε και η συμβολή του KELTRACK στη μείωση της φθοράς της σιδηροτροχιάς. Τα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση ήταν ικανοποιητικά. Για τους παραπάνω λόγους, οι ερευνητές καταλήγουν ότι το KELTRACK και γενικά τα βελτιωτικά τριβής κεφαλής σιδηροτροχιάς είναι κατάλληλα για τη μείωση του θορύβου στις καμπύλες και την ελάττωση της φθοράς των σιδηροτροχιών.

Ο Wilson [6], αναφέρει την τοποθέτηση πλωτής πλάκας (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.6) ως μέτρο μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου. Πιο αναλυτικά, αναφέρει πως υπήρξαν επιφυλάξεις ως προς την αποδοτικότητα των ελαστικών υποθεμάτων για τη μείωση του εδαφομεταφερόμενου θορύβου και των ταλαντώσεων. Αυτές οι επιφυλάξεις οδήγησαν πολλές σιδηροδρομικές αρχές στη μελέτη και ανάπτυξη ενός ειδικού τύπου σταθερής επιδομής, την πλωτή πλάκα έδρασης. Η σιδηροδρομική αρχή της Ουάσινγκτον διαπίστωσε ότι υπήρχαν τμήματα του δικτύου στα οποία ήταν απαραίτητη η εφαρμογή επιπλέον μέτρων ηχομείωσης του θορύβου και γι' αυτό επιλέχθηκε η λύση της πλωτής πλάκας. Κρίσιμο σημείο κατά τη διάρκεια των μελετών για την κατασκευή της ήταν η επιλογή του κατάλληλου ελαστικού. Το ελαστικό που θα τοποθετούνταν έπρεπε να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- (α) μέγιστη παραμόρφωση της σιδηροτροχιάς τα 3 mm,
- (β) μέγιστο πάχος της πλάκας και των ελαστικών υποθεμάτων τα 30 cm και
- (γ) η ιδιοσυχνότητα του ελαστικού να είναι τόσο χαμηλή ώστε και να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μείωση του εδαφομεταφερόμενου θορύβου και να αποφεύγεται η πιθανότητα δημιουργίας συντονισμού με το φορείο.

Τα παραπάνω κριτήρια οδήγησαν στην επιλογή του καουτσούκ ως το πλέον κατάλληλο ελαστικό για την πλωτή πλάκα. Το καουτσούκ είναι γνωστό για τη μεγάλη διάρκεια ζωής του με πολλά παραδείγματα όπως η κατασκευή πλωτής πλάκας σε κοιλαδογέφυρα στη Μελβούρνη της Αυστραλίας η οποία χρησιμοποιείται από το 1891 και δεν έχει αντικατασταθεί από τότε. Μετά την επιλογή του ελαστικού, καθορίστηκε και ο τρόπος κατασκευής της πλάκας. Μετά την κατασκευή διαπιστώθηκε ότι ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος και οι δονήσεις μειώθηκαν, όμως, λόγω του σχήματος των πλακών, αυξήθηκε ο αεροδυναμικός θόρυβος που όμως δεν ήταν ιδιαίτερα αισθητός μέσα στα οχήματα. Επιπλέον, κατά τις εργασίες συντήρησης της γραμμής ο θόρυβος που δημιουργούνταν ήταν πολύ δυνατός, αισθητός μέσα στα οχήματα καθώς και σε παρακείμενες πλατφόρμες. Αυτό οφειλόταν, όπως ανακαλύφθηκε, σε κακοτεχνίες. Σε ορισμένα τμήματα, οι εργολάβοι τοποθέτησαν ελαστικά από πολυουρεθάνιο αντί για καουτσούκ. Στη συνέχεια, αποδείχθηκε ότι το πολυουρεθάνιο είναι ένα υγροσκοπικό υλικό το οποίο χάνει την αντοχή του σε περιπτώσεις έκθεσης στο νερό. Τα σημεία αυτά εντοπίστηκαν και αντικαταστάθηκαν, μία διαδικασία δύσκολη και δαπανηρή λόγω της υφιστάμενης κατασκευής της πλάκας.

Το 1974, οι αρχές του Τορόντο κατασκεύασαν νέες γραμμές εντός αστικών περιοχών οι οποίες ήταν εφοδιασμένες με ελαστικά υποθέματα μόνο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών παραπόνων από τους κατοίκους. Γι' αυτό το λόγο, οι αρχές υποχρεώθηκαν να αναπτύξουν ένα νέο τύπο πλωτής πλάκας από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα ο οποίος παρείχε μεγάλη ευκολία στην πρόσβαση και αντικατάσταση των ελαστικών υποθεμάτων. Αυτός ο τύπος ονομάστηκε μη συνεχόμενη πλωτή πλάκα έδρασης (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Σκαρίφημα μη συνεχόμενης πλωτής πλάκας έδρασης από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα για μήκος 1500 mm [2]

Η τοποθέτηση ελαστικών υποθεμάτων πλευρικά της πλάκας σκυροδέματος (side pads) προσέφερε προστασία από τα πλευρικά φορτία. Με αυτή την κατασκευή ελαττώθηκε ο αεροδυναμικός θόρυβος από την πλάκα ενώ ταυτόχρονα τα ελαστικά υποθέματα μείωσαν τις δονήσεις που μεταφέρονταν από τις σιδηροτροχιές στην πλωτή πλάκα. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι για 28 χρόνια λειτουργίας τη γραμμής δεν χρειάστηκε συντήρηση ή αποκατάσταση κάποιου στοιχείου. Αυτός είναι ένα λόγος που πολλά άλλα σιδηροδρομικά συστήματα στον κόσμο όπως στην Ατλάντα, στο Χονγκ Κονγκ και αλλού έχουν εφαρμόσει την τεχνική της πλωτής πλάκας.

Ο Kurzweil [34], στην εργασία του αναφέρει τεχνικές μείωσης οι οποίες έχουν μελετηθεί από άλλους ερευνητές. Ως προς τις τεχνικές που εφαρμόζονται στη σιδηροτροχιά και στην επιδομή γενικότερα, αναφέρει τη λείανση της επιφάνειας κύλισης των σιδηροτροχιών. Ο ακριβής προσδιορισμός της ηχομείωσης που εξασφαλίζεται με τη λείανση δεν είναι ακριβής αφού εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας κύλισης των σιδηροτροχιών πριν και μετά τη λείανση. Παράλληλα με τη μείωση του θορύβου, περιορίζονται και οι δονήσεις εδάφους κατά 2-10 dB. Απαραίτητη είναι η λείανση ύστερα από συγκολλήσεις σιδηροτροχιών, το ακουστικό αποτέλεσμα των οποίων είναι 2-10 dBA μικρότερο από την προηγούμενη κατάσταση.

Ο Kurzweil αναφέρει επίσης ότι, η Electro-Thermite GmbH of Essen, μία γερμανική εταιρία, ισχυρίζεται πως ανακάλυψε ένα νέο τρόπο διαμόρφωσης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς με την εισαγωγή ειδικών χαλύβδινων λωρίδων οι οποίες συμβάλλουν στην επέκταση του χρόνου ζωής των σιδηροτροχιών. Η μείωση του θορύβου ήταν ένα μη αναμενόμενο πλεονέκτημα το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά.

Στην ίδια εργασία μελετήθηκε ο θόρυβος από τους αμφιδέτες και ο ερευνητής καταλήγει ότι η λείανση και η σωστή ευθυγράμμιση των σιδηροτροχιών οι οποίες συνδέονται με σφιχτά βιδωμένους αμφιδέτες δεν έχει καμία διαφορά στο θόρυβο που δημιουργείται από την κύλιση των συρμών επί συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών.

Άλλη μία τεχνική η οποία αρχικά χρησιμοποιούνταν για τη μείωση της φθοράς, τόσο του τροχού όσο και της σιδηροτροχιάς, είναι η λίπανση της κεφαλής της σιδηροτροχιάς ή/και της φλάντζας του τροχού (βλέπε Κεφάλαια 2.2.4). Τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν αμφιλεγόμενα· στις

περιπτώσεις λίπανσης της κεφαλής όμως, υπήρξε συμφωνία ως προς τη μείωση ή την εξάλειψη του θορύβου ενώ στις περισσότερες δοκιμές μειώθηκε ταυτόχρονα και η διάρκεια του θορύβου. Παρά ταύτα, η χρήση λιπαντικών προκαλεί αρκετά προβλήματα ως προς την κύλιση, τη συντήρηση και το κόστος λειτουργίας και σύμφωνα με τον ερευνητή χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση.

Εξετάστηκε, επίσης, η χρήση ελαστικών συνδέσμων που δεν έδειξε καμία διαφορά ενώ, αντίθετα, παρουσιάστηκε αύξηση περίπου 3 dBA στο θόρυβο. Ο ερευνητής θεωρεί ότι η χρήση ελαστικών συνδέσμων είναι καταλληλότερη για εφαρμογή σε υπόγειες γραμμές ή σε γέφυρες.

Ο Eadie και άλλοι ερευνητές σε επόμενη έρευνά τους [35] που αφορούσε επίσης την αποτελεσματικότητα υγρών βελτιωτικών τριβής ως προς τη μείωση του θορύβου στις καμπύλες, εξέτασαν τρεις διαφορετικούς τύπους σιδηροδρομικών συστημάτων: α) Τραμ, β) Μετρό και γ) εμπορικές αμαξοστοιχίες. Κάθε ένα από τα συστήματα που μετρήθηκαν είχε διαφορετικά χαρακτηριστικά σχετικά με: i) την τοποθεσία, ii) τη διάμετρο της καμπύλης, iii) την ταχύτητα κίνησης των συρμών, iv) τον αριθμό των μετρούμενων διελεύσεων και των αξόνων κάθε οχήματος, v) το είδος της σιδηροτροχιάς και του συστήματος πέδησης. Διαφορετικός ήταν ο τρόπος επάλειψης του βελτιωτικού τριβής ενώ έγινε ταυτόχρονη επάλειψη λιπαντικού στην εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς. Για κάθε μέτρηση που πραγματοποιήθηκε, το ηχόμετρο τοποθετήθηκε στο κέντρο της καμπύλης, σε συγκεκριμένη απόσταση και ύψος από το κέντρο της γραμμής ενώ είχε προγραμματισθεί ώστε να μετράει κάθε διέλευση ξεχωριστά χωρίς την αποτύπωση του θορύβου περιβάλλοντος. Η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν ίδια με τη διάρκεια παραμονής των τρένων εντός της εκάστοτε καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα, για το Τραμ ήταν 15 s, για το Μετρό 30 s και για τις εμπορικές αμαξοστοιχίες 2 min. Για κάθε εξεταζόμενο σύστημα μετρήθηκαν πέντε ή παραπάνω διελεύσεις τρένων ενώ στη μελέτη παρουσιάζεται ο μέσος όρος των διελεύσεων. Το βελτιωτικό τριβής που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν το προϊόν KELTRACK το οποίο μετά την εξάτμιση του νερού που περιέχει, μειώνει το συντελεστή τριβής της σιδηροτροχιάς από 0,5-0,6 σε $0,35 \pm 0,05$. Σε κάθε περιοχή, το KELTRACK διαστρώθηκε και στις δύο σιδηροτροχιές δια χειρός ή με κατάλληλες συσκευές έκχυσης, κατά μήκος όλης της καμπύλης καθώς και για συγκεκριμένη απόσταση πριν από αυτή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν, αρχικά, ότι τα επίπεδα θορύβου που αφορούσαν το Τραμ ήταν χαμηλότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα του Μετρό και των εμπορικών αμαξοστοιχιών. Αντίθετα, στο Μετρό η αντίστοιχη μείωση ήταν μικρότερη σε σχέση με αυτή του Τραμ αλλά αφορούσε ένα ευρύτερο φάσμα άνω των 30 Hz. Όσον αφορά τους εμπορικούς συρμούς, τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων έδειξαν εμφανή μείωση σε υψηλές συχνότητες. Οι ερευνητές παρατήρησαν, επίσης, ότι τα συστήματα που παρουσίασαν τα υψηλότερα επίπεδα θορύβου είχαν την τάση να παρουσιάζουν μεγαλύτερες ηχομειώσεις μετά από κάποια συγκεκριμένη συχνότητα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα βελτιωτικά τριβής μειώνουν το θόρυβο σε όλα τα σιδηροδρομικά συστήματα που εξετάστηκαν. Στην περίπτωση των εμπορικών συρμών όμως είναι πιθανό να κριθεί απαραίτητη η ταυτόχρονη επάλειψη των παρειών των σιδηροτροχιών με λιπαντικό κυρίως σε καμπύλες με μικρή διάμετρο.

Ο Eadie και άλλοι ερευνητές [19] στο πείραμά τους εξέτασαν την αποτελεσματικότητα του προϊόντος KELTRACK της εταιρείας LB FOSTER. Μέσω εργαστηριακών πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι το συγκεκριμένο βελτιωτικό τριβής σταθεροποιεί το συντελεστή τριβής της σιδηροτροχιάς σε μία συγκεκριμένη τιμή περίπου 0,35. Επιπλέον, δεν επηρεάζει την πέδηση και την έλξη των συρμών. Για την επικύρωση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, διεξήχθησαν δύο επιτόπου μετρήσεις στις

Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ιαπωνία στο δίκτυο του Τραμ. Και στις δύο θέσεις μέτρησης επιλέχθηκαν καμπύλες με μικρή διάμετρο, 25 και 160 μέτρα αντίστοιχα. Στην περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών οι σιδηροτροχιές ήταν εγκιβωτισμένες σε πλάκα σκυροδέματος και με τραχεία επιφάνεια. Οι μετρήσεις έγιναν πριν και μετά την εφαρμογή του KELTRACK και, πιο συγκεκριμένα, με δια χειρός και μηχανική επάλειψη. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά. Διαπιστώθηκε μείωση 14,3 dBA με τη δια χειρός επάλειψη και 12,8 dBA με τη μηχανική. Αξιοσημείωτο ήταν και το γεγονός του μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος χωρίς θόρυβο στις συχνότητες στις οποίες εμφανίστηκε η μέγιστη στάθμη. Στην περίπτωση του Τραμ της Ιαπωνίας χρησιμοποιείται και τρίτη σιδηροτροχιά στην περιοχή μέτρησης γι' αυτό το λόγο έγινε επάλειψη στην τρίτη σιδηροτροχιά μόνο και στη συνέχεια στις δύο άλλες. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση κατά 3,5 dBA και 5,1 dBA αντίστοιχα.

Οι Van Doninck και Schillemans [36] προσπαθώντας να εφαρμόσουν το βέλτιστο συνδυασμό για τη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου στην περιοχή των Βρυξελλών, ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο ο οποίος επιλέγει το καταλληλότερο μέσο μείωσης σύμφωνα με τα κριτήρια εισόδου. Οι τεχνικές μείωσης περιελάμβαναν τόσο εφαρμογές στην πηγή όσο και στη διεύθυνση διάδοσης του θορύβου. Ως προς τη μείωση στην πηγή αναφέρουν ότι η κατασκευή της σιδηροδρομικής γραμμής σε όρυγμα είναι δυνατό μειώσει το θόρυβο κατά 10 dBA σε μικρές αποστάσεις σε σχέση με την κατασκευή της αντίστοιχης γραμμής σε επίχωμα.

Στην εργασία των Talotte et al. [27] έγινε προσπάθεια ώστε να συγκεντρωθούν, μέσω άλλων εργασιών, οι τεχνικές μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου με επεμβάσεις στην επιδομή. Τα αποτελέσματα των μελετών διαπίστωσαν μειώσεις κατά 4-5 dB αυξάνοντας την ελαστικότητα της πλάκας έδρασης, ενώ, αντικαθιστώντας είτε τη σκυρογραμμή, είτε τη σταθερή επιδομή με μία ειδικού τύπου σταθερή επιδομή επενδυμένη με ηχοαπορροφητικό υλικό, το ακουστικό αποτέλεσμα ήταν μειωμένο κατά 9 και 12 dBA αντίστοιχα. Επιπλέον, περιορίζοντας το ύψος των σιδηροτροχιών η ηχητική στάθμη μειώθηκε κατά 4 dB ενώ, στην περίπτωση της τοποθέτησης αποσβεστήρων ταλαντώσεων στις σιδηροτροχιές η επιπλέον μείωση ανέρχεται στα 6 dBA.

Ο Xiaolan [37] στην εργασία του παρουσιάζοντας τις τεχνικές ηχομείωσης που εφαρμόζονται στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Κίνα αναφέρει πως επεμβάσεις στις σιδηροτροχιές όπως η τοποθέτηση συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών με ελαστικούς συνδέσμους καθώς και η χρήση έρματος μείωσαν το θόρυβο κατά 3 dBA.

Ο Υδραίος [38], στη διπλωματική του εργασία, συνέλλεξε από άλλες εργασίες και παρουσίασε ορισμένες τεχνικές μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου. Ο θόρυβος που παράγεται από τη γραμμή παρουσιάζεται σε ταχύτητες κύλισης μεταξύ 80 και 120 km/h. Κυριότερο αίτιο της εμφάνισης του θορύβου είναι το μέγεθος της τραχύτητας της κεφαλής της σιδηροτροχιάς η οποία είναι δυνατό να επανέλθει σε φυσιολογικές τιμές μέσω απλής ή ειδικής λείανσης της σιδηροτροχιάς. Στοιχεία από τους γερμανικούς σιδηροδρόμους έδειξαν ότι η μείωση του θορύβου μίας απλής διέλευσης είναι πολύ μικρότερη στους εμπορικούς συρμούς από ότι στους επιβατικούς με 2,1 dBA έναντι 5,6 και 7,2 dBA για τους συρμούς IC και ICE/2 αντίστοιχα για συρμούς που κινούνται με 100 km/h. Έρευνες έδειξαν ότι κατά μέσο όρο μια λεία γραμμή σε σχέση με μία άλλη που δεν έχει λειανθεί τόννευση παράγει λιγότερο θόρυβο κατά περίπου 3-6 dBA. Αυτό, βέβαια, εξαρτάται από την κατάσταση των διερχόμενων τροχών. Ένας τόννευμένος τροχός που κινείται κατά μήκος μίας λείας σιδηροτροχιάς είναι δυνατό να παράγει λιγότερο θόρυβο που, σε ακραίες

περιπτώσεις, μπορεί να φτάσει τα 20 dBA. Επιπλέον μειώσεις που φτάνουν τα 4-7 dBA μπορούν να παρουσιαστούν είτε όταν μειωθούν οι αρμοί σε μία γραμμή, είτε όταν αντικατασταθεί με συνεχώς συγκολλημένες σιδηροτροχιές.

Επιπλέον, ο κατάλληλος επανασχεδιασμός της διατομής των σιδηροτροχιών και κυρίως ο περιορισμός του εύρους του πέλματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου κατά 3 dBA καθώς το σημείο πρόσδεσης αποτελεί σημαντικό σημείο εκπομπής θορύβου. Η τοποθέτηση αποσβεστήρων ταλαντώσεων σε βελτιστοποιημένου σχήματος σιδηροτροχιές παρουσίασαν μείωση του παραγόμενου θορύβου από τη γραμμή που έφτανε τα 7,5 dBA. Επιπροσθέτως, ελέγχθηκε η επίπτωση που θα υπήρχε στο θόρυβο από τη γραμμή η χρήση πιο άκαμπτων ελαστικών υποθεμάτων με ακαμψία 800 MN/m αντί 300 MN/m και τα οφέλη ήταν της τάξης των 2 dBA. Επίσης αναφέρεται ότι στρωτήρες με μικρότερη επιφάνεια, μεγαλύτερη μάζα και κατάλληλη μόνωση από τους κραδασμούς μπορούν να μειώσουν το θόρυβο από τη γραμμή κατά 3 dBA.

Ο Αργυρόπουλος [39], σε μελέτη που του ανατέθηκε από τους Ηλεκτρικούς Σιδηροδρόμους Αθηνών-Πειραιώς, αξιολόγησε την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του θορύβου. Οι τεχνικές που αξιολογήθηκαν αφορούσαν τρόπους μείωσης του θορύβου στην πηγή και στη διεύθυνση διάδοσης.

Η πρώτη κατηγορία περιελάμβανε αποσβεστήρες ταλαντώσεων που τοποθετούνταν στον κορμό της σιδηροτροχιάς (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.3) της εταιρίας Vossloh και της εταιρίας Tiflex. Ηχομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για το υλικό της Vossloh, με και χωρίς σταθερή ταχύτητα για μικρό μήκος σε μία πιλοτική εφαρμογή στο δίκτυο του ΗΣΑΠ. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση μέχρι 6,7 dBA που αντιστοιχεί σε περίπου 3,5 φορές λιγότερες διελεύσεις συρμών ή σε ισάριθμους συρμούς που διέρχονται με περίπου δύο φορές χαμηλότερη ταχύτητα. Στις δοκιμές στις οποίες η ταχύτητα κίνησης ήταν σταθερή, η μείωση ήταν 3,4 dBA και μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιάς της εταιρίας Vossloh επιτυγχάνει μείωση των επιπέδων θορύβου στον αποδέκτη περί τα 3-4 dBA. όσον αφορά στη συγκριτική αξιολόγηση του υλικού της Tiflex, ο ερευνητής αναφέρει ότι μειώνει το θόρυβο κατά 2,4 dBA σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη δημοσιευμένη μελέτη. Παρόλ' αυτά, λαμβάνοντας υπόψη ότι η τεχνική επιδρά κατευθείαν στην πηγή του θορύβου, ο Αργυρόπουλος θεωρεί ότι τα αποτελέσματα των συγκριτικών μετρήσεων για το υλικό αυτό δεν έχουν μεγάλη εξάρτηση από την τοπογραφία της περιοχής και τις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά της διάρκεια των ηχομετρήσεων που έγιναν από τον κατασκευαστή. Έτσι, η ηχομείωση που παρατηρείται από τη χρήση του υλικού της Tiflex μπορεί να λάβει γενικό χαρακτήρα και να χρησιμοποιηθεί τελικά, με μερικές επιφυλάξεις, για την αξιολόγηση της τεχνικής αυτής.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές που επιδρούν στη διάδοση του θορύβου και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης: α) σε αυτές που τοποθετούνται πάνω σε σταθερή επιδομή και β) σε αυτές που τοποθετούνται μεταξύ της πηγής και του δέκτη. Στην πρώτη υποκατηγορία εξετάστηκαν τρία υλικά, τύπου πάνελ (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.4), των οποίων η στάθμη ηχομείωσης δίνονται από τους κατασκευαστές και είναι περίπου κοινή και φτάνει τα 3 dBA. Τέλος, εξετάστηκαν δύο είδη ηχοπετασμάτων, τα ανακλαστικά και τα ηχοαπορροφητικά, ίδιου ύψους τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικές αποδόσεις ανάλογα με το ύψος.

Για την τελική αξιολόγηση των παραπάνω τεχνικών ως προς την αποτελεσματικότητά τους στους αποδέκτες των γειτονικών χρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας της γραμμής σε μία συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου στην οποία έγιναν οι παραπάνω ηχομετρήσεις. Δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο (M1) περιελάμβανε τη χρήση των αποσβεστήρων και των πάνελ με μέση μείωση τα 3 dBA, το δεύτερο (M2) τα ηχοαπορροφητικά ηχοπετάσματα και το τρίτο (M3) τα ανακλαστικά. Στην περίπτωση των ηχοπετασμάτων δεν μπορεί να θεωρηθεί μία μέση στάθμη ηχομείωσης αφού εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το ύψος. Το μοντέλο περιλαμβάνει χρήση ισοθρομβικών επιφανειών σε τομή για υποθετικό ύψος 20 m με 6 ορόφους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το σενάριο M1 επιφέρει την ίδια μέση μείωση για όλα τα ύψη. Τα σενάρια M2 και M3, κυρίως το M2, κρίθηκαν αποδοτικότερα για χαμηλότερα ύψη, μέχρι τον 3° όροφο, ενώ στον 5° και 6° όροφο δεν υπήρξε καμία διαφορά στη στάθμη θορύβου μετά την τοποθέτηση των ηχοπετασμάτων. Τα τρία μοντέλα, εκτός της κύριας δράσης τους στη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου, επιδρούν δευτερογενώς σε άλλες παραμέτρους του περιβάλλοντος ή και σε άλλους χρήστες οι οποίοι πρέπει να περιληφθούν στη διαδικασία αξιολόγησης. Αυτές οι παράμετροι είναι η ποιότητα του ακουστικού περιβάλλοντος των χρηστών των τρένων η οποία επιδεινώνεται με την εφαρμογή του σεναρίου M3, η αύξηση του θορύβου της οδικής κυκλοφορίας για τα σενάρια M2 και M3. Επιπλέον, η αισθητική του τοπίου επιβαρύνεται με τη χρήση ηχοπετασμάτων ιδιαίτερα στην περίπτωση αστικών περιοχών με στενούς δρόμους κάτι το οποίο μπορεί να επιλυθεί με την τοποθέτηση διάφανων ηχοπετασμάτων. Κατά τη φάση κατασκευής των τεχνικών επιβαρύνεται το περιβάλλον μέσω της τοπικής αύξησης της σκόνης, του θορύβου, της ρύπανσης των υδάτων και η επιδείνωση της οδικής κυκλοφορίας, ενώ, ελαφρές επιπτώσεις στο περιβάλλον μπορεί να επιφέρει η συντήρηση των τριών σεναρίων. Ποσοτικοποιώντας τους παραπάνω παράγοντες, με πιο βαρύνων αυτόν της αποτελεσματικότητας, υψηλότερη βαθμολογία λαμβάνει το σενάριο M1, ύστερα το M2 και τελευταίο το M3. Από τα προηγούμενα, ο μελετητής θεωρεί ως πιο ενδεδειγμένη και ισορροπημένη λύση, για το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου, τη λύση M1, την εφαρμογή αποσβεστήρων ταλαντώσεων στη σιδηροτροχιά ή την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πάνελ επί της επιδομής ενώ είναι δυνατή η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων σε επιμέρους τμήματα της γραμμής.

Ο Βογιατζής και άλλοι ερευνητές [40], στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος QUIET TRACK (Project No 604891: Quiet tracks for sustainable railway infrastructures) που έχει σαν στόχο την ανάπτυξη και τον επιτυχή συνδυασμό τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου, διεξήγαγαν ακουστικές μετρήσεις πλησίον της γραμμής του ΗΣΑΠ. Οι μετρήσεις αφορούσαν την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της τοποθέτησης ηχοαπορροφητικών πλακών στη θέση μέτρησης. Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, τοποθετήθηκαν δύο ηχόμετρα σε αποστάσεις 7,5 και 25 m από το μέσον των σιδηροτροχιών και σε ύψος 1,2 και 4 m αντίστοιχα, όπως ορίζει το ISO 3095:2005. Έγινε καταγραφή των διελεύσεων 10-15 τρένων, πριν και μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που κατέγραψε το πρώτο ηχόμετρο έδειξαν μείωση 2,3-3,5 dBA ενώ το δεύτερο 3,3-4,3 dBA στη θέση μέτρησης. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι το QUIET TRACK δεν έχει ολοκληρωθεί καθώς αναμένεται η μέτρηση και η σύγκριση της εφαρμογής αποσβεστήρων ταλαντώσεων σιδηροτροχιών κατακόρυφων ηχοπετασμάτων μικρού ύψους στη γραμμή του ΗΣΑΠ.

3.2 Τεχνικές με επεμβάσεις στο σιδηροδρομικό όχημα

Ο Barsikow και άλλοι ερευνητές [41], στην εργασία τους για την αποτελεσματικότητα των αποσβεστήρων ταλαντώσεων τροχών (βλέπε Κεφάλαιο 2.2.3) καθώς και της τórνευσης των τροχών (βλέπε Κεφάλαιο 2.2.1), χρειάστηκε να προσδιορίσουν τη θέση των ηχητικών πηγών για συρμούς υψηλών ταχυτήτων. Γι' αυτό το λόγο τοποθέτησαν 15 μικρόφωνα κάθετα ως προς το έδαφος και σε καθ' ύψος απόσταση 8 εκατοστών. Ορισμένοι από τους τροχούς που μετρήθηκαν είχαν τórνευτεί και είχαν τοποθετηθεί σ' αυτούς αποσβεστήρες ταλαντώσεων, ενώ άλλοι είχαν τórνευτεί μόνο, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος που προκαλείται λόγω της αλληλεπίδρασης τροχού-σιδηροτροχιάς. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για ταχύτητες διέλευσης μεταξύ 120 km/h και 250 km/h έδειξαν ότι η κύρια ηχητική πηγή εντοπίστηκε στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς. Επίσης, ο θόρυβος μειώθηκε κατά 3 dBA στην περίπτωση των τórνευμένων τροχών, ενώ ο συνδυασμός τórνευσης και εφαρμογής του αποσβεστήρα ταλαντώσεων μείωσε το θόρυβο κατά 8 dBA. Σε επίπεδο φασματικής ανάλυσης, οι τórνευμένοι τροχοί παρουσίασαν μείωση της στάθμης θορύβου σε όλες τις συχνότητες, ενώ οι τροχοί με την εφαρμογή αποσβεστήρα ταλαντώσεων έδειξαν μείωση σε συχνότητες άνω των 1,2 kHz. Πιο συγκεκριμένα, για συχνότητες μεταξύ 2 και 4 kHz η μείωση ήταν της τάξης των 10-15 dBA.

Οι Muller και Oertli [42] περιγράφοντας το πρόγραμμα της Διεθνούς Ένωσης Σιδηροδρόμων (UIC), που έχει ως στόχο τη μείωση του θορύβου στις καμπύλες, αναφέρουν αρχικά ότι ο θόρυβος στις καμπύλες είναι υψηλής συχνότητας και διαφέρει από το θόρυβο κύλισης κατά 10-30 dB. Σκοπός αυτού του προγράμματος ήταν η σύνταξη ενός καταλόγου με τρόπους αντιμετώπισης, ενός μοντέλου το οποίο θα συνδέεται με το πρόγραμμα πρόβλεψης σιδηροδρομικού θορύβου TWINS καθώς και η κατάρτιση εξειδικευμένων δοκιμών για την αποτελεσματικότητα των μέτρων. Οι τρόποι αυτοί έχουν σχέση με τεχνικές στους τροχούς, τις σιδηροτροχιές, λιπαντικά και βελτιωτικά τριβής, ασύμμετρο προφίλ σιδηροτροχιάς και κατευθυνόμενους άξονες. Ορισμένες από τις τεχνικές αυτές δεν εφαρμόζονται από τα σιδηροδρομικά δίκτυα λόγω οικονομικών, περιβαλλοντικών και θεμάτων ασφάλειας. Οι τεχνικές που τελικά δοκιμάστηκαν είχαν σχέση καθαρά με οικονομικά κριτήρια. Επίσης, οι ερευνητές αναφέρουν ότι, για τη σύγκριση των τεχνικών αυτών ήταν απαραίτητο να τηρηθούν οι ίδιες συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όπως ο αριθμός και η θέση των μικροφώνων και οι καιρικές συνθήκες. Μετρήσεις που έγιναν σε καμπύλα τμήματα στην Ελβετία, στη Γαλλία και την Αγγλία έδειξαν ότι η τριβή της φλάντζας του τροχού αποτελούσε το κυριότερο παράγοντα θορύβου. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε πρώτα η εξέταση της αποτελεσματικότητας των βελτιωτικών τριβής και, πιο συγκεκριμένα, λιπαντικών που εφαρμόζονται στη φλάντζα του τροχού. Το υλικό αυτό έχει μικρότερο κόστος και είναι πιο ασφαλές σε σχέση με τα βελτιωτικά τριβής της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν ήταν διαθέσιμα στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αφού το πρόγραμμα θα ολοκληρωνόταν ένα χρόνο μετά τη συγγραφή της εργασίας.

Σε άλλη κατεύθυνση κινήθηκαν ο de Vos και άλλοι ερευνητές [43] οι οποίοι εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της αντικατάστασης του συστήματος πέδησης των συρμών (βλέπε Κεφάλαιο 2.2.5). Αναλυτικότερα, στην εργασία τους παρουσιάζουν τη μελέτη της Διεθνούς Ένωσης Σιδηροδρόμων (UIC) με τίτλο «Σχέδιο δράσης της UIC για τη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου από εμπορικούς συρμούς». Απώτερος σκοπός, τόσο της UIC όσο και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι η αύξηση του μεριδίου των εμπορικών μεταφορών από 8 % που ήταν το 1998 σε 15 % το 2020. Η αύξηση αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του περιβαλλοντικού θορύβου γι' αυτό είναι

απαραίτητη η εφαρμογή μέτρων μείωσης του. Όπως αναφέρεται, πολλές άλλες μελέτες καταδεικνύουν τα οικονομικά οφέλη από την αντικατάσταση των ηχοπετασμάτων ως συνηθέστερη τεχνική σε σχέση με άλλες οι οποίες μειώνουν το θόρυβο στην πηγή και όχι στη διεύθυνση διάδοσης. Σημαντική ελάττωση του θορύβου κύλισης από τους εμπορικούς συρμούς επιτυγχάνεται με την αλλαγή του συστήματος πέδησης από χυτοσίδηρο των οχημάτων. Υπάρχουν τρεις τύποι συστημάτων πέδησης τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα φρένα από χυτοσίδηρο:

- α) τα δισκόφρενα,
- β) τα φρένα τύπου LL, και,
- γ) τα φρένα τύπου K.

Τα δισκόφρενα δεν είναι κατάλληλα για τοποθέτηση σε υπάρχοντα βαγόνια αλλά ενδέχεται να είναι η βέλτιστη λύση για την κατασκευή νέων συρμών υπό ορισμένες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, συρμοί υψηλών ταχυτήτων με μεγάλες ετήσιες διανυθείσες αποστάσεις περί τα 100.000 km και μεγάλα φορτία είναι προτιμότερο να εξοπλίζονται με δισκόφρενα. Από συνεντεύξεις κατά τη διάρκεια υλοποίησης της μελέτης, έγινε εμφανής η απροθυμία των κατασκευαστών για τη χρήση δισκοφρένων.

Τα φρένα τύπου LL κατασκευάζονται από συνθετικά υλικά με μικρό συντελεστή τριβής τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά φρένα από χυτοσίδηρο χωρίς καμία επιπλέον αλλαγή στο σύστημα πέδησης των οχημάτων. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι η χρήση των LL-blocks όπως και των K-blocks μειώνουν τη φθορά του τροχού και ελαττώνουν το θόρυβο κατά 10 dBA σε σχέση με τα φρένα από χυτοσίδηρο. Παρόλο που ο συγκεκριμένος τύπος προτείνεται από πολλούς κατασκευαστές, τα LL-blocks έχουν πάρει προσωρινή έγκριση για χρήση σε διεθνές επίπεδο. Αυτός είναι και ο λόγος που τα LL-blocks δεν προτείνονται ως λύση από τους ερευνητές.

Τα φρένα τύπου K είναι και αυτά φρένα από συνθετικά υλικά με πολύ μεγαλύτερο συντελεστή τριβής από τα συμβατικά φρένα. Είναι, επίσης, δυνατό να τοποθετηθούν και σε υφιστάμενα οχήματα με σημαντικές αλλαγές στο σύστημα πέδησης και, σε ορισμένες περιπτώσεις, με αντικατάσταση ολόκληρου του τροχού και μειώνουν κατά 10 dBA το θόρυβο. Πρόκειται για ένα χρονοβόρο και πολύ ακριβό μέτρο, της τάξης των 4.500 μέχρι 13.000 ευρώ με την ανώτερη τιμή να περιλαμβάνει και την αντικατάσταση του τροχού με καινούριο, που όμως στο μέλλον θα θεωρείται δεδομένη η τοποθέτησή τους και γι' αυτό το λόγο θεωρείται ως η βέλτιστη λύση από τους ερευνητές.

Τέλος, οι ερευνητές προβλέπουν ότι όλα τα καινούρια βαγόνια θα είναι εξοπλισμένα με φρένα τύπου K ενώ στα ήδη υπάρχοντα θα έχουν αντικατασταθεί με τύπου LL αφού λάβουν την οριστική έγκριση. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί η εκτεταμένη τοποθέτηση των ηχοπετασμάτων και θα εξοικονομηθούν πολλά χρήματα στο κρατικό ταμείο.

Ο Kurzweil στην ίδια εργασία [34] κάνει μια επιπλέον διάκριση μεταξύ των τεχνικών μείωσης: α) τεχνικές με εφαρμογή αποκλειστικά επί του τροχού και β) τεχνικές με εφαρμογή επί του σιδηροδρομικού όχηματος.

Στην πρώτη κατηγορία, σημαντική θέση κατέχουν οι ελαστικοί τροχοί. Οι ελαστικοί τροχοί μειώνουν τον παραγόμενο θόρυβο κατά 2 dBA και κατά 4 – 10 dBV τις δονήσεις του εδάφους, ενώ συμβάλλουν στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής των τροχών κατά 50%. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί, χωρίς όμως να υπάρχει επίσημη μελέτη, ότι με την εφαρμογή ελαστικών τροχών

απαιτείται λιγότερη συντήρηση της σιδηροτροχιάς, των οχημάτων και των τροχών, μειώνεται ο χρόνος αντικατάστασης όλων των παραπάνω μερών ενώ προσφέρει στους επιβάτες το αίσθημα της άνεσης.

Μία άλλη τεχνική είναι οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών οι οποίοι περιλαμβάνουν τους:

- α) αποσβεστήρες με μορφή κυκλικού δίσκου,
- β) τους συντονισμένους αποσβεστήρες και
- γ) τους αποσβεστήρες ταλαντώσεων.

Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών είναι δυνατό να μειώσουν το θόρυβο μέχρι και 6 dBA. Στην περίπτωση της τοποθέτησης του κυκλικού δίσκου στη φλάντζα του τροχού υπήρξαν επιφυλάξεις ως προς την αποτελεσματικότητα της τεχνικής λόγω συγκέντρωσης τάσεων οι οποίες θα οδηγούσαν σε αστοχία των τροχών. Παρόλα αυτά, μέχρι στιγμής δεν έχει παρατηρηθεί παρόμοιο φαινόμενο στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Άλλο ένα πρόβλημα το οποίο ξεπεράστηκε στη συνέχεια ήταν η συγκόλληση του κυκλικού δίσκου στον τροχό λόγω σκουριάς ή σκόνης από τη φθορά των φρένων. Εργαστηριακές έρευνες έδειξαν ότι ο ψεκασμός με αντισκωριακό σπρέι ή η επάλειψη με ειδικό υλικό δεν έχει καμία επίδραση στην μείωση του θορύβου. Όσον αφορά τους συντονισμένους αποσβεστήρες, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μείωση στο θόρυβο κύλισης σε σχέση με τους υπόλοιπους ενώ διατηρούνται ανέπαφοι μέχρι τους 200 °C. Αντίθετα, για την τελευταία κατηγορία αποσβεστήρων υπάρχουν επιφυλάξεις ως προς την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ κύριο μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα στρώματα καλύπτουν μεγάλο μέρος της επιφάνειας του τροχού, γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολη την οπτική επισκόπησή τους.

Εξετάστηκαν, επίσης, οι περιπτώσεις ειδικής διαμόρφωσης του επισώτρου του τροχού και πιο συγκεκριμένα τα λεπτού τύπου και αυτά που είναι κατασκευασμένα από νιτινόλη, κράμα νικελίου και τιτανίου. Και τα δύο έχουν τη δυνατότητα να παραμορφώνονται εύκολα ελαχιστοποιώντας τις ταλαντώσεις και μειώνοντας τον παραγόμενο θόρυβο. Τα λεπτού τύπου αποτελούνται από χαλύβδινα στεφάνια πάχους μέχρι 2,03 cm κάτω από τα οποία τοποθετείται ειδικό υλικό για την απόσβεση των ταλαντώσεων και κατ' επέκταση του θορύβου. Αρχικά η μείωση του θορύβου εκτιμήθηκε στα 7 dBA, σε δοκιμές μοντέλων που έγιναν διαπιστώθηκε μείωση από 3 μέχρι 8 dBA. Προβλήματα εξαιτίας της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών κατά την πέδηση δεν παρουσιάστηκαν, όμως, λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς αναμένεται συγκέντρωση υψηλών τάσεων στο πέλμα του τροχού το οποίο πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω. Οι τροχοί από νιτινόλη μείωσαν το θόρυβο κατά 2 με 5 dBA. Συγκριτικά τεστ που έγιναν μεταξύ χαλύβδινων και τροχών από νιτινόλη για διάφορες καταστάσεις της επιφάνειας της σιδηροτροχιάς έδειξαν την υπεροχή των τροχών από νιτινόλη.

Στη μελέτη αναφέρεται ως τεχνική η τόννευση των τροχών. Η μείωση του θορύβου που επιτυγχάνεται κατά την τόννευση των τροχών εξαρτάται απόλυτα από την προηγούμενη κατάσταση των τροχών και των σιδηροτροχιών και δεν μπορεί να προσδιοριστεί εξ' αρχής. Παρόλα αυτά μειώνονται οι δονήσεις εδάφους κατά 10 dB ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος και το κόστος συντήρησης και αποκατάστασης των οχημάτων και των σιδηροτροχιών. Αντίθετα, η συχνή τόννευση των τροχών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής τους και την αύξηση του κόστους. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η θέσπιση και η εφαρμογή προδιαγραφών ως προς την περιοδικότητα της συντήρησης και τη μέθοδο τόννευσης των τροχών.

Η δεύτερη κατηγορία τεχνικών αφορά επεμβάσεις στα σιδηροδρομικά οχήματα. Ένα από τα κυριότερα μέτρα αποτελούν οι ηχοαπορροφητικές ποδιές. Μετρήσεις έδειξαν μειώσεις 0-3 dBA για ποδιές κατασκευασμένες από ανακλαστικό υλικό. Αντίθετα, ποδιές κατασκευασμένες από ηχοαπορροφητικά υλικά μείωσαν το θόρυβο μέχρι και 10 dBA, ενώ στις περιπτώσεις που συνδυάστηκαν με την τοποθέτηση ηχοπετασμάτων πλευρικά της γραμμής παρουσίασαν επιπλέον μείωση του θορύβου κατά 5-10 dBA σε σχέση με την αποκλειστική χρήση ηχοπετασμάτων. Η χρήση των ηχοαπορροφητικών ποδιών εμφανίζει ορισμένα προβλήματα σχετικά με την οπτική επισκόπηση και συντήρηση των τροχών και του κάτω μέρους των βαγονιών. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα συγκέντρωσης λιπαντικών ή γράσων τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε αναφλέξεις ενώ σε περίπτωση κακοτεχνίας είναι δυνατό να εμφανιστούν προβλήματα υπερθέρμανσης.

Άλλη μία τεχνική η οποία έχει ερευνηθεί, για γραμμές χωρίς έρμα όπως σε γέφυρες ή υπόγειες σήραγγες, είναι η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού στο κάτω μέρος των οχημάτων που μειώνει το θόρυβο κατά 5 dBA. Ενδέχεται επίσης να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών ποδιών στα οχήματα για επιπλέον μείωση του θορύβου εντός των βαγονιών.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην κατάλληλη διαμόρφωση του συστήματος πέδησης. Πολλοί σιδηροδρομικοί οργανισμοί προχωρούν σε αντικατάσταση των φρένων από χυτοσίδηρο με δισκόφρενα ή φρένα με σιαγόνες από συνθετικά υλικά τα οποία μειώνουν κατά 5-7 dBA και 10 dBA αντίστοιχα ενώ συμβάλλουν στην ελάττωση της φθοράς των τροχών.

Άλλος ένας παράγοντας που συνδέεται άμεσα με την παραγωγή του ήχου είναι η ταχύτητα κίνησης των συρμών. Έρευνες έδειξαν ότι μειώνοντας την ταχύτητα στο μισό, ο θόρυβος μειώνεται κατά 6-12 dBA. Ο περιορισμός της ταχύτητας κίνησης έρχεται σε αντίθεση με τους στόχους και της επιδιώξεις των σιδηροδρομικών οργανισμών αν και θα μπορούσε να είναι αποτελεσματικός κατά περιπτώσεις.

Στην ίδια εργασία οι Van Doninck και Schillemans [36] για τη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου στην περιοχή των Βρυξελλών, αναφέρουν ως τεχνικές την κατασκευή νέων συρμών εξοπλισμένων με δισκόφρενα ή την τοποθέτηση συστήματος πέδησης τύπου K που μειώνουν το θόρυβο κατά 8 dBA. Επίσης, προτείνεται από τους ερευνητές η κατασκευή τροχών μικρότερης διαμέτρου καθώς και η θωράκισή τους με ηχοαπορροφητικές ποδιές οι οποίες παρουσιάζουν ηχομείωση κατά 1 dBA, ενώ απαραίτητη κρίνεται η συστηματική συντήρηση του πέλματος των τροχών. Επιπλέον, προτείνεται η εφαρμογή αποσβεστήρων ταλαντώσεων στους τροχούς με ηχομείωση 4 dBA, ελαστικών τροχών με 2 dBA ενώ η τοποθέτηση φρένων τύπου K σε τροχούς μικρότερης διαμέτρου τροχό μειώνει το θόρυβο κατά 9 dBA.

Στην εργασία των Talotte et al. [27] γίνεται αναφορά σε μελέτες με αντικείμενο το σχεδιασμό νέου τύπου τροχών οι οποίες προέβλεπαν μείωση κατά 4 dB, όμως στην πράξη διαπιστώθηκε μείωση κατά 1 dB ενώ, επιπλέον, ήταν αδύνατη η εφαρμογή σε οχήματα με φρένα από χυτοσίδηρο. Άλλα προγράμματα, τα οποία έλαβαν υπόψη την εφαρμογή των νέων τροχών και σε οχήματα με φρένα από χυτοσίδηρο, κατασκεύασαν ένα νέο είδος τροχού ο οποίος θα μείωνε το θόρυβο κατά 3 dB αλλά οι μετρήσεις πεδίου διέψευσαν τις προβλέψεις των ερευνητών. Σε μία άλλη έρευνα στη Γαλλία, αντικαταστήθηκαν οι τροχοί ενός TVG με νέους, μικρότερης διαμέτρου, κατάλληλους για συρμούς με δισκόφρενα και διαπιστώθηκε ηχομείωση κατά 4-5 dB για συχνότητες μικρότερες των 1,6 kHz οι οποίες ήταν κυρίαρχες στο φάσμα. Τροχοί με πολύ μικρότερη διάμετρο, παρουσίασαν μείωση κατά 18 dB σε σχέση με τους συμβατικούς τροχούς.

Μία άλλη τεχνική μείωσης που εξετάστηκε είναι οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών οι οποίοι μειώνουν κατά 3-5 dB τον παραγόμενο ήχο. Στη Γερμανία χρησιμοποιείται επιτυχώς ένα σύστημα ηχοαπορρόφησης στους τροχούς το οποίο όμως δεν είχε τα ίδια αποτελέσματα σε εφαρμογές από άλλες χώρες.

Η αντικατάσταση τους συστήματος πέδησης των επιβατικών συρμών με δισκόφρενα αντί φρένων από χυτοσίδηρο μείωσε το θόρυβο κατά 10 dB. Η εφαρμογή δισκόφρενων σε εμπορικούς συρμούς στην Ευρώπη, όμως, θεωρείται δύσκολη και αντιοικονομική.

Οι ερευνητές, εξετάζοντας το πρόβλημα του αεροδυναμικού θορύβου που δημιουργείται λόγω του παντογράφου των συρμών πρότειναν την τοποθέτηση καλύμματος (βλέπε Κεφάλαιο 2.2.6) η οποία, τελικά, ήταν αναποτελεσματική αφού, με τη σειρά της, δημιουργούσε θόρυβο. Στη συνέχεια, έγιναν προσπάθειες μετατροπής του σχήματος του παντογράφου, οι οποίες προβλέπεται να μειώσουν το θόρυβο κατά 10 dBA. Επιπλέον, μεταβάλλοντας το σχήμα των βαγονιών, κυρίως της πρόσοψης, διαπίστωσαν ότι ο ήχος μειώνεται από 3 μέχρι 10 dB σε όλο το μήκος του φάσματος, δίνοντας συνολική ηχομείωση 7,9 dBA για μετρήσεις εντός σήραγγας.

Ο Frid [44] στο πείραμά του για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των ηχοπετασμάτων και των ηχοαπορροφητικών ποδιών δημιούργησε ένα μοντέλο μικρής κλίμακας το οποίο προσομοίωνε την κίνηση μίας μηχανής έλξης. Έγινε προσπάθεια καταγραφής του ήχου κατευθείαν από τις πηγές (σιδηροτροχιά, τροχοί) αλλά και σε συγκεκριμένη απόσταση από τη μηχανή. Οι δοκιμές έγιναν για διαφορετικές ταχύτητες κίνησης, 100 km/h και 120 km/h. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις εφαρμογής τριών τύπων ηχοπετασμάτων χαμηλού ύψους και διαφορετικής μορφής και οι εφαρμογές τριών διαφορετικών τύπων ηχοαπορροφητικών ποδιών καθώς και ο αντίστοιχος συνδυασμός ηχοπετασμάτων και ηχοαπορροφητικών ποδιών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι οι ηχοαπορροφητικές ποδιές είναι ελαφρώς πιο αποτελεσματικές σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τα ηχοπετάσματα. Επιπλέον, οι δοκιμές των ηχοπετασμάτων και του συνδυασμού των δύο μεθόδων έδειξαν ότι αυτά ήταν πιο αποδοτικά για συχνότητες μικρότερες των 2 kHz όπου κυρίαρχη πηγή θορύβου είναι οι σιδηροτροχιές ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες κυρίαρχη πηγή είναι οι τροχοί γι' αυτό οι ηχοαπορροφητικές ποδιές είναι πιο αποτελεσματικές. Πιο συγκεκριμένα, οι ηχοαπορροφητικές ποδιές, με αποκλειστική εφαρμογή, μειώνουν το θόρυβο κατά 3 dBA ενώ αν η χρήση τους συνδυαστεί με επιπλέον τοποθέτηση ηχοπετασμάτων η μείωση φτάνει τα 10 dBA. Ο ερευνητής καταλήγει ότι υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω έρευνα στην περίπτωση των ηχοαπορροφητικών ποδιών ώστε να είναι πιο αποδοτικές.

Ο Xiaolan [37] στην ίδια εργασία αναφέρει ότι κυριότερη πηγή θορύβου αποτελεί η σειρήνα της μηχανής έλξης καθώς έρευνες έδειξαν ότι 70 % της ηχητικής ενέργειας, σε ορισμένες περιοχές πλησίον σιδηροδρομικών σταθμών, προέρχεται από αυτήν. Γι' αυτό το λόγο, οι κινέζικες αρχές έθεσαν νέα μέτρα και περιορισμούς ως προς τη χρήση της σειρήνας σε αστικές περιοχές. Τα μέτρα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου κατά 3-5 dB σε αποστάσεις 30 m από το μέσο της απόστασης των σιδηροτροχιών σε μεγάλα αστικά κέντρα ενώ προβλέπεται η εφαρμογή τους σε εθνικό επίπεδο. Παράλληλα, γίνονται προσπάθειες για την σύνθεση ενός νέου ήχου για τη σειρήνα της μηχανής έλξης, ο οποίος θα είναι αρμονικός αλλά ταυτόχρονα δυνατός και μέσα στα πλαίσια των κανονισμών. Αλλαγές στον τρόπο εγκατάστασης των μεγαφώνων εντός των σιδηροδρομικών σταθμών μείωσαν το θόρυβο κατά 1-3 dB.

Εκτός από τα παραπάνω, ηχοαπορροφητικές ποδιές, νέα συστήματα πέδησης, μειώσεις στον αριθμό των παντογράφων, σχεδιασμός νέου τύπου μηχανής έλξης και νέα χαμηλού θορύβου οχήματα είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά 4-10 dB. Στην περίπτωση που οι προαναφερθείσες τεχνικές δεν είναι επαρκείς ή δεν είναι οικονομικά συμφέρουσες τότε προτείνεται από τον ερευνητή η χρήση άλλων τεχνικών ηχομείωσης όπως η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών παραθύρων ή η αναδιάταξη των γειτονικών κτιρίων.

Ως προς τις τεχνικές που εφαρμόζονται στους τροχούς, ο Υδραίος στην ίδια εργασία [38], αναφέρει την τόννευση ως μέρος των προγραμμάτων συντήρησης των τροχών. Η τόννευση των τροχών επιτυγχάνει μείωση του θορύβου κατά 2-10 dB, με συνήθεις τιμές τα 3-6 dBA για απλή διέλευση. Οχήματα με μικρότερους και λιγότερους τροχούς δημιουργούν λιγότερα σημεία συντονισμού στο εύρος συχνοτήτων κατά τη διέγερση που οφείλεται στη φθορά των τροχών. Στην ίδια λογική κινείται η τοποθέτηση τροχών με μεγαλύτερο πάχος επισώτρου το οποίο μειώνει τις ταλαντώσεις και ταυτόχρονα αυξάνει την ιδιοσυχνότητα του τροχού. Η εφαρμογή των παραπάνω είναι δυνατό να μειώσει το θόρυβο κατά 1-6 dBA. Εξετάστηκε ακόμα η μείωση της διαμέτρου του τροχού από 920 mm σε 860 mm η οποία μειώνει το θόρυβο κατά 5 dBA ενώ η εισαγωγή διάτρητων τροχών παρουσίασε μείωση της τάξης των 6-9 dBA για συχνότητες κάτω από 1 kHz. Η τοποθέτηση ελαστικών σε βελτιστοποιημένους τροχούς μειώνει το θόρυβο μέχρι και 7 dBA ενώ σε κοινούς τροχούς μέχρι 4 dBA. Επίσης, η χρήση διάτρητου τροχού στον οποίο έχει τοποθετηθεί αποσβεστήρας ταλαντώσεων εκτιμάται ότι παρουσιάζει ηχομείωση της τάξης των 4,5 dBA.

Μια άλλη λύση που εξετάστηκε ήταν η τοποθέτηση μεταλλικού δίσκου εν είδη πετάσματος στο τροχό. Ο δίσκος αποτελούνταν από τρεις στρώσεις: ατσάλι-ελαστομερές-ατσάλι. Μια τέτοια εφαρμογή εκτιμήθηκε ότι μπορεί να δώσει μείωση μεταξύ 3 και 6 dBA. Το ίδιο μέτρο σε συνδυασμό με τη χρήση βελτιστοποιημένων τροχών μπορεί να επιτύχει μείωση που φτάνει τα 8 dBA.

Σημαντική επιρροή στη στάθμη θορύβου που δημιουργείται από τη μηχανή έλξης είναι το είδος της μηχανής. Γενικά, οι μηχανές diesel παράγουν περισσότερο θόρυβο σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια. Κατά βάση οι τεχνικές μείωσης του θορύβου από τις μηχανές diesel έχουν σχέση με το σχεδιασμό τους. Η μετασκευή των μηχανών με στόχο τη μείωση του θορύβου δεν συνίσταται ως τεχνική. Παρόλα αυτά, 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 εξασφαλίζεται η απομόνωσή της από το περιβάλλον συμβάλλουν στη δημιουργία λιγότερου θορύβου. Όσον αφορά τους κινητήρες που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα, σημαντική πηγή θορύβου αποτελεί το σύστημα ψύξης. Οι 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 τέτοιο ώστε να μειώνεται ο θόρυβος και να αυξάνεται η αποδοτικότητά τους. Σε χαμηλές ταχύτητες σημαντική είναι η επιρροή του συστήματος ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζεται ικανοποιητική αναλογία επαφής κατά τη διάρκεια της σύμπλεξης.

Στην περίπτωση συρμών υψηλών ταχυτήτων, σημαντική πηγή αποτελεί ο αεροδυναμικός θόρυβος. Το μεγάλο ύψος της πηγής είναι ο λόγος για τον οποίο μειώνεται δραστικά την αποδοτικότητα των ηχοπετασμάτων. Νέοι συρμοί με μειωμένες αεροδυναμικές αντιστάσεις και ενεργειακή κατανάλωση έχουν ως συνέπεια τον περιορισμό των ηχητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Ωστόσο, σαν βασική αρχή για τα οχήματα που κυκλοφορούν ήδη ούτως ώστε να βελτιωθεί η

επίδοσή τους στον τομέα αυτό είναι η αεροδυναμική σχεδίαση του παντογράφου. Το μέτρο αυτό είναι δυνατό να μειώσει το θόρυβο κατά 10 dBA. Επιπλέον, η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών ποδιών στα φορεία μειώνει το θόρυβο μέχρι 5 dBA αν και ανεβάζει κατά πολύ το κόστος και, τέλος, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του ρύγχους και η αποφυγή των προεξοχών ή των κοιλοτήτων κρίνονται ως αποτελεσματικά μέτρα μείωσης του θορύβου.

3.3 Τοποθέτηση ηχοπετασμάτων παραπλεύρως της σιδηροδρομικής γραμμής

Ο Βογιατζής και η Πατσή στην μελέτη τους [45], η οποία ουσιαστικά περιλαμβάνει την πλήρη ακουστική θεώρηση τμήματος του υπό λειτουργία δικτύου του Η.Σ.Α.Π. από τη Χ.Θ. 2+300 μέχρι και τη Χ.Θ. 2+400 με κατεύθυνση προς Πειραιά, για συνθήκες «με» και «χωρίς» αντιθορυβική προστασία, επιδίωξαν τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας εφαρμογής αντιθορυβικού πετάσματος (βλέπε Κεφάλαιο 3.3). Διερεύνησαν πλήρως τη βέλτιστη θέση εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της οριστικοποίησης αρχής και τέλους τοποθέτησης, του αναγκαίου ύψους και της ελάχιστης πυκνότητας, καθώς και την ανάλυση εναλλακτικών τύπων πετασμάτων με σκοπό την καλύτερη ηχομειωτική αποτελεσματικότητα για το μέγιστο εφαρμοσμένο ύψος των υφιστάμενων κατοικιών. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μία πλήρης 24ωρη ακουστική μέτρηση καθώς και επιμέρους ακουστικές μετρήσεις διελεύσεων συρμών και από τις δύο κατευθύνσεις. Επιπλέον, με χρήση κατάλληλου λογισμικού ήταν δυνατός ο καθορισμός της ηχητικής στάθμης καθ' ύψος των γειτονικών κτιρίων και η διαφοροποίηση των διαστάσεων και της θέσης του βέλτιστου ηχοπετάσματος. Παράλληλα, έγινε σύγκριση των επιτόπιων μετρήσεων με τις θεωρητικές τιμές του λογισμικού για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του. Εκτός της ηχοπροστασίας δόθηκε έμφαση στην απλότητα, την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα των υλικών ενώ η αισθητική θεώρηση κρίνεται ως μία πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στα πλαίσια της επιλογής των πλέον κατάλληλων τύπων αντιθορυβικών πετασμάτων, διερευνήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι. Η διαφορά μεταξύ αυτών αφορά στο υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους όχι όμως στο ύψος, τις γενικές διαστάσεις και στη θέση τοποθέτησης. Οι τρεις κατηγορίες ηχοπετασμάτων είναι: τα διαφανή, τα μεταλλικά με ή χωρίς διάτρηση και ηχοαπορρόφηση και τα πετάσματα που είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συντάχθηκε κατάλογος με τις απαραίτητες προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το επιλεγόμενο ηχοπέτασμα. Μέσω αυτού, το βέλτιστο ηχοπέτασμα είναι μικτής μορφής με το κατώτερο συμπαγές τμήμα από αδιαφανές υλικό με διάτρητη εσωτερική επιφάνεια και εσωτερική επένδυση από ηχοαπορροφητικό υλικό συνολικού ύψους 2 m. Όσον αφορά το ανώτερο τμήμα, αποτελείται από διαφανές ηχοανακλαστικό υλικό. Η διάταξη αυτή, σύμφωνα με τους μελετητές, είναι δυνατό να επιφέρει μείωση της στάθμης θορύβου από 5,5 έως 8,1 dBA στον 1^ο όροφο και εξασφαλίζεται η αισθητική ένταξη του αντιθορυβικού πετάσματος στο άμεσο αστικό περιβάλλον. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το επιλεγόμενο ηχοπέτασμα δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική ηχομείωση στον 6^ο όροφο δεδομένου ότι τα ανώτερα επίπεδα των κατοικιών ευρίσκονται εκτός ηχητικής σκιάς του πετάσματος ανεξαρτήτως ύψους εφαρμογής. Επιπλέον, οι ερευνητές αναφέρουν ότι απαραίτητη είναι διενέργεια νέων 24ωρων μετρήσεων θορύβου και δονήσεων σε διαφορετικά σημεία του δικτύου όπως προβλέπεται στη σχετική ΜΠΕ.

Στην ίδια εργασία ο Kurzweil [34] αναφέρει και τη χρήση ηχοπετασμάτων ως τεχνική μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου. Ο ερευνητής τονίζει το γεγονός ότι πολλές μελέτες και επί τόπου παρατηρήσεις έχουν γίνει ως προς την αποτελεσματικότητα, την κατασκευή και τη σωστή τοποθέτησή τους. Αυτές έδειξαν ότι τα ηχοπετάσματα οδήγησαν σε μείωση κατά 5-15 dBA ενώ τα απορροφητικά ηχοπετάσματα είναι κατά 3-4 dBA αποτελεσματικότερα από τα ανακλαστικά. Φυσικά, υπάρχουν και μειονεκτήματα ως προς την εφαρμογή τους όπως η δυσκολία προσέγγισης της γραμμής, ο συχνός καθαρισμός και η δυσκολία αφαίρεσης χιονιού καθώς και αύξηση των επιπέδων θορύβου στο εσωτερικό των οχημάτων στις περιπτώσεις ανακλαστικών ηχοπετασμάτων. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο συνδυασμός της τοποθέτησης ηχοπετασμάτων με παράλληλη τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών ποδιών επί του σιδηροδρομικού φορείου παρουσιάζει μείωση κατά 5-10 dBA.

Οι Van Doninck και Schillemans στην ίδια επίσης εργασία [36], μελετώντας την αποδοτικότητα διαφόρων τύπων ηχοπετασμάτων διαπίστωσαν ότι είναι πιο αποτελεσματικά για γραμμές κατασκευασμένες σε επίχωμα ενώ η μείωση του θορύβου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ύψος καταγραφής. Σύμφωνα με αυτούς, τα ηχοπετάσματα είναι πιο αποτελεσματικά όταν:

- α) στο εσωτερικό τοποθετείται ηχοαπορροφητικό υλικό,
- β) τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από τις σιδηροτροχιές και
- γ) βρίσκονται σε κάθετη θέση σε σχέση με το έδαφος.

Σε περίπτωση που στα ηχοπετάσματα δεν τοποθετηθεί στο εσωτερικό ηχοαπορροφητικό, προτείνεται η τοποθέτησή τους υπό γωνία. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη σύγκριση «πράσινων» και συμβατικών ηχοπετασμάτων. Η διαφορά των «πράσινων» ηχοπετασμάτων είναι ότι σ' αυτά αναπτύσσονται φυτά που συμβάλλουν περισσότερο στη ηχοαπορροφητική ικανότητα των πετασμάτων. Επίσης, σε συγκριτικό πίνακα που ανέπτυξαν, είναι εμφανές το γεγονός ότι τα «πράσινα» είναι πιο αποδοτικά, πιο οικονομικά και έχουν την ίδια, αν όχι μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις, διάρκεια ζωής με τα συμβατικά ηχοπετάσματα.

Οι Talotte et al. στην ίδια εργασία [27] αναφέρουν ότι ακουστικές μετρήσεις στην Αγγλία με αντικείμενο την τοποθέτηση χαμηλών ηχοπετασμάτων στο επίπεδο των σιδηροτροχιών σε συνδυασμό με την εφαρμογή ηχοαπορροφητικών ποδιών στα σιδηροδρομικά οχήματα έδειξαν μειώσεις κατά 8-10 dB. Αντίθετα, άλλα προγράμματα εφαρμόζοντας το ίδιο πείραμα με τον περιορισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των ηχοαπορροφητικών ποδιών και των ηχοπετασμάτων διαπίστωσαν μείωση κατά 3 dBA.

Ο Frid [44], όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνέκρινε την τεχνική των ηχοπετασμάτων με τις ηχοαπορροφητικές ποδιές. Το αποτέλεσμα της έρευνάς του έδειξε ότι η αποκλειστική τοποθέτηση ηχοπετασμάτων είχε ελάχιστη διαφορά από τις ηχοαπορροφητικές ποδιές όσον αφορά συρμούς υψηλών ταχυτήτων ενώ ο συνδυασμός των δύο τεχνικών μείωσε το θόρυβο κατά 10 dBA.

Ο Xiaoan στην ίδια εργασία [37], αναφέρει ότι η ευρεία τοποθέτηση ηχοπετασμάτων με ηχοαπορροφητικά υλικά στο εσωτερικό, ελάττωσαν το θόρυβο κατά 3-10 dB ενώ προβλέπει την χρήση τους εκτεταμένη στο μέλλον. Παρόμοιο μέτρο με τα ηχοπετάσματα, αλλά συγχρόνως και οικολογικό, αποτελούν οι δασικές ζώνες ηχοαπορρόφησης οι οποίες για πλάτος 10-15 m επιτυγχάνουν μείωση κατά 1-2 dB και θα χρησιμοποιηθούν σε μεγάλη κλίμακα στο μέλλον.

Ο Υδραίος [38], στην ίδια εργασία, αναφέρει ότι τα ηχοπετάσματα επιτυγχάνουν μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου που φτάνει τα 10 dBA αλλά εξαρτάται απόλυτα από τα τεχνικά

χαρακτηριστικά του εκάστοτε ηχοπετάσματος. Ιδιαίτερο γνώρισμα των ηχοπετασμάτων αποτελεί η ευκολία στην τοποθέτηση. Παράλληλα, όμως, η ανάγκη αυξημένου ύψους της κατασκευής για την επίτευξη της μέγιστης ηχομείωσης, το αυξημένο κόστος και η αισθητική υποβάθμιση του τοπίου τα καθιστούν μη επιλέξιμα για γενικευμένη χρήση. Αντίθετα, ο συνδυασμός ηχοπετασμάτων και άλλων μέσων ηχομείωσης οδηγεί σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην παρούσα μελέτη αναφέρεται η ταυτόχρονη χρήση ηχοαπορροφητικών ποδιών στα φορεία η οποία ενώ προέβλεπε μείωση κατά 5 dBA στην πραγματικότητα μείωσε το θόρυβο κατά 3 dBA.

Με την τοποθέτηση ηχοπετασμάτων παραπλεύρως της σιδηροδρομικής γραμμής ασχολήθηκε και ο Αργυρόπουλος [39]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, ο ερευνητής συνέκρινε την αποτελεσματικότητα δύο ειδών ηχοπετασμάτων, τα ηχοαπορροφητικά και τα ανακλαστικά, με το συνδυασμό αποσβεστήρων ταλαντώσεων σιδηροτροχιάς και ηχοαπορροφητικών πλακών. Ύστερα από ανάλυση, μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας της γραμμής, τα ηχοπετάσματα κρίθηκαν μη αποδοτικά, παρόλο που η ηχομείωση που επιτύγχαναν ήταν της τάξης των 3 dBA. επιπλέον, αποτελεσματικότερα αποδείχθηκαν τα ηχοαπορροφητικά σε σχέση με τα ανακλαστικά ηχοπετάσματα για λόγους οι οποίοι έχουν ήδη περιγραφεί παραπάνω.

4

Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται να γίνει η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 2 και 3. Η σύγκριση αφορά τόσο τεχνικές της ίδιας υποομάδας (στην επιδομή, στο όχημα, ηχοπετάσματα) όσο και τη σύγκριση των υποομάδων μεταξύ τους.

Η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνικών γίνεται μέσω ενός πίνακα αξιολόγησης. Στον πίνακα διακρίνονται 3 κατηγορίες τεχνικών: τεχνικές που εφαρμόζονται στη σιδηροτροχιά και γενικά στην επιδομή, τεχνικές που εφαρμόζονται στο όχημα και στα ηχοπετάσματα.

Αρχικά, γίνεται μία συνοπτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των εναλλακτικών τεχνικών που αναλύονται στον πίνακα ενώ περισσότερες σχετικές λεπτομέρειες βρίσκονται στο Κεφάλαιο 2. Για κάθε τεχνική παρουσιάστηκαν μία σειρά από χαρακτηριστικά και κριτήρια τα οποία είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη από τους σιδηροδρομικούς οργανισμούς κατά την επιλογή της τοποθέτησης οποιαδήποτε τεχνικής.

Τα χαρακτηριστικά των τεχνικών που περιγράφονται στον πίνακα αναφέρονται στη θέση και στην περίοδο τοποθέτησης η οποία διακρίνεται σε δύο φάσεις: α) στη φάση κατασκευής και β) στη φάση λειτουργίας της γραμμής ή του οχήματος. Επίσης, το σημείο τοποθέτησης της αντίστοιχης τεχνικής

επιηρεάζει την περιοχή επιρροής ως προς την ηχομείωση που επιτυγχάνει η τεχνική και καθορίζει απόλυτα τη θέση αντιμετώπισης του θορύβου (στην πηγή ή στη διεύθυνση διάδοσης).

Πρωταρχικό κριτήριο επιλογής της κάθε τεχνικής είναι η μείωση της στάθμης θορύβου (αποτελεσματικότητα). Οι ηχομειώσεις που αναφέρονται στον Πίνακα 4.1 έχουν συγκεντρωθεί από το Κεφάλαιο 3 καθώς και από διαφημιστικά φυλλάδια προϊόντων. Σημαντικό κριτήριο επιλογής αποτελεί η διάρκεια ζωής της κάθε τεχνικής καθώς και οι απαιτήσεις συντήρησης. Ο Πίνακας περιλαμβάνει και περιπτώσεις τεχνικών που δρουν συμπληρωματικά στη μείωση της φθοράς της επιφάνειας κύλισης του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να τοποθετηθούν οι αντίστοιχες τεχνικές καθώς και η καταλληλότητα και αποδοτικότητα τους αναφορικά με συρμούς υψηλών ταχυτήτων. Δεν θα μπορούσε να παραλειφθεί από τον πίνακα το αισθητικό αποτέλεσμα κάθε τεχνικής και η επιρροή που έχει τόσο στους επιβάτες των συρμών όσο και στους περίοικους (οπτική όχληση).

Ο Πίνακας 4.1 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης. Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία αξιολόγησης του Πίνακα 4.1, παρατηρείται ότι η μέγιστη ηχομείωση επιτυγχάνεται μέσω των τεχνικών τόνευσης του τροχού και λείανσης της κεφαλής των σιδηροτροχιών, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση των αντίστοιχων μερών και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η σωστή συντήρηση της γραμμής και του τροχαίου υλικού, όμως, είναι δυνατό να παρατείνει το χρόνο ζωής των τροχών και των σιδηροτροχιών και συμβάλλει στη μείωση του κόστους αντικατάστασης αυτών.

Αξιολόγηση αποτελέσματα της τάξης των 12-14 dBA επιτυγχάνονται με την επάλειψη βελτιωτικών τριβής στον τροχό ή στη σιδηροτροχιά. Πρόκειται για μία τεχνική η οποία μειώνει το θόρυβο στην πηγή του, ενώ ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης (σιδηροτροχιά, τροχός) μειώνει τη στάθμη είτε στην περιοχή επάλειψης (επάλειψη σιδηροτροχιάς) είτε κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης του συρμού (επάλειψη τροχού). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο πληρότητας των συσκευών έκχυσης των βελτιωτικών τριβής γιατί, σε διαφορετική περίπτωση, αίρεται η αποτελεσματικότητα της τεχνικής.

Σαφή βελτίωση του ακουστικού περιβάλλοντος έδειξε η αντικατάσταση του συστήματος πέδησης. Οι τρεις τύποι συστημάτων πέδησης μειώνουν το θόρυβο τουλάχιστον κατά 5 dBA όπως φαίνεται στον πίνακα. Περιορισμός ως προς τη χρήση τους αποτελεί το γεγονός ότι τα φρένα τύπου K-block καθώς και τα δισκόφρενα εφαρμόζονται μόνο σε νέους συρμούς στη φάση κατασκευής τους ενώ τα τύπου LL-block δεν έχουν λάβει ακόμα έγκριση από τη Διεθνή Ένωση Σιδηροδρόμων (UIC). Στο σημείο αυτό πρέπει να το τονιστεί ότι η ηχομείωση που επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του συστήματος πέδησης σημειώνεται κατά περιπτώσεις και, πιο συγκεκριμένα, κατά την πέδηση του συρμού.

Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου είναι η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων παραπλεύρως της γραμμής. Η χρήση ηχοπετασμάτων στο σιδηρόδρομο παρόλο που είναι πολύ αποτελεσματική, της τάξης των 10 dBA, δεν προτείνεται για μεγάλο μήκος τοποθέτησης αφού:

- α) μειώνει το θόρυβο τοπικά και για συγκεκριμένο ύψος,
- β) είναι οικονομικά ασύμφορη, και,
- γ) επιβαρύνει το αισθητικό τοπίο των επιβατών και των περίοικων.

Παρόλ' αυτά, ο συνδυασμός ηχοπετασμάτων με άλλες τεχνικές κρίνεται αρκετά αποτελεσματικός και ενδεχομένως λιγότερο αντισυμβατικός.

Στον Πίνακα 4.1 αναφέρεται επίσης και η τεχνική των μεταλλοελαστικών τροχών. Πρόκειται για μία τεχνική η εφαρμογή της οποίας ήταν διαδεδομένη στο παρελθόν αλλά περιορίστηκε λόγω της σύνδεσής της με ένα πολύνεκρο δυστύχημα στη Γερμανία. Λόγω αυτού του γεγονότος, η τοποθέτηση ελαστικών τροχών στα σιδηροδρομικά φορεία δεν προτείνεται και πρέπει να γίνεται με επιφυλάξεις.

Το ελαστικό υπόθεμα και η πλωτή πλάκα αποτελούν τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την επίτευξη της επιθυμητής ελαστικότητας της επιδομής και όχι για τη μείωση του θορύβου. Η διαδικασία τοποθέτησης ελαστικού υποθέματος στη γραμμή έχει μικρή διάρκεια και προτείνεται σε κάθε περίπτωση. Αντίθετα, η τοποθέτηση πλωτής πλάκας αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία και συνίσταται κατά την κατασκευή νέων σιδηροδρομικών γραμμών.

Σε περιπτώσεις συρμών υψηλών ταχυτήτων, κυρίαρχος θόρυβος είναι ο αεροδυναμικός. Από τον Πίνακα 4.1 φαίνεται ότι η κατασκευή νέων βαγονιών με ιδιαίτερη έμφαση στον αεροδυναμικό σχεδιασμό της πρόσοψης και η τοποθέτηση καλυμμάτων στους παντογράφους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές.

Τέλος, παρατίθεται ο Πίνακας 4.1 ενώ στο Παράρτημα Π1 υπάρχει λεπτομερέστερος πίνακας αξιολόγησης των εναλλακτικών τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στον Πίνακα 4.1, καθώς και στον αντίστοιχο πίνακα στο Παράρτημα Π1, εμφανίζονται και ορισμένες πολύ υψηλές τιμές ηχοαπορρόφησης (π.χ. max 30 dBA) που προέρχονται από διαφημιστικά φυλλάδια εταιριών και δεν επιβεβαιώνονται από τις εργασίες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Τεχνικές μείωσης	Περιγραφή	Αποτελεσματικότητα		Πηγή
Τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή				
Ελαστικά υποθέματα	Ελαστικά που τοποθετούνται στην κάτω επιφάνεια του πέλματος της σιδηροτροχιάς	6 dBA , 2 dBA		[31, 38]
		8-9 dBA (με ηχοπετάσματα)		[6]
		6-8 dBA (αυγό Κολωνίας)		
Λείανση σιδηροτροχιάς	Λείανση της κεφαλής και της εσωτερικής παρειάς της σιδηροτροχιάς με ειδικές συσκευές	2-10 dBA (μετά από συγκόλληση σιδ/χιών)		[34]
		2.1 dBA (επιβατικοί συρμοί)		
		5.6-7.2 dBA (εμπορικοί συρμοί)		
		3-6 dBA		
		max 20 dBA (με τοννεμένο τροχό)		
Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών	Υλικά που τοποθετούνται στον κορμό της σιδηροτροχιάς με στόχο την απορρόφηση των δονήσεων	min 6 dBA (διαφημιστικά φυλ. Tiflex, Vossloh)		
		3.4 dBA με ελεγχόμενη ταχύτητα		[39]
		6.7 dBA χωρίς ελεγχόμενη ταχύτητα		
Ηχοαπορροφητικές πλάκες	Πλάκες ανάμεσα και πλευρικά των σιδ/χιών με μέγιστο ύψος την ΑΚΣ	6 dBA , 7.5 dBA, 3-4 dBA		[27, 38, 32]
		3 dBA , 2.3-4.3 dBA		[39, 40]
		min 4,5 dBA (διαφημιστικό φυλλάδιο ΑΣΠΡΟΚΑΤ)		
Βελτιωτικά τριβής στη σιδ/χιά	Ρύθμιση του συντελεστή τριβής τροχού-σιδ/χιας με ειδική λίπανση σιδηροτροχιάς	max 20 dBA (διαφημιστικό φυλλάδιο Tor-Xtrend,Loram)		
		max 30 dBA (διαφημιστικό φυλλάδιο KELTRACK-LB Foster)		
		14.2 dBA , 12 dBA		[19, 35]
Νέος τύπος διατομής σιδηροτροχιάς	Σχεδιασμός νέου τύπου διατομής σιδηροτροχιάς	4 dBA (διαφορετικό ύψος)		[27]
		3 dBA		[38]
Τεχνικές που εφαρμόζονται στο σιδηροδρομικό όχημα				
Τόρνευση τροχού	Επαναφορά της διατομής του τροχού που έχει φθαρεί στην πρότυπη	3 dBA		[41]
		3-6 dBA		[38]
Νέος τύπος διατομής τροχού	Νέος σχεδιασμός τροχού σε σχέση με τη διάμετρο και τη διαμόρφωση του επισώτρου	1 dBA , 5 dBA		[36, 38]
		4 dBA (προβλέψεις)		[27]
		1 dBA (μετρήσεις)		
Μεταλλοελαστικοί τροχοί	Εισαγωγή ελαστικού στρώματος μεταξύ του σώτρου και επισώτρου	min 5 dBA (διαφημιστικό φυλλάδιο Bonatrans)		
		2 dBA, 4 dBA		[36, 38]
Αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών	Εισαγωγή κυκλικού δίσκου σώτρο για απορρόφηση ταλαντώσεων	max 30 dBA (διαφημιστικό φυλλάδιο Bonatrans)		
		3-5, 4 dBA		[27, 38]
Αντικατάσταση συστήματος πέδησης	Αντικατάσταση των συμβατικών φρένων από χυτοσίδηρο με φρένα:	• τύπου K-blocks	9 dBA (τροχοί μικρότερης διαμέτρου)	[36]
			10 dBA	[34, 39, 43]
		• τύπου LL-blocks	10 dBA	[43]
		• δισκόφρενα	5-7, 10 dBA	[34, 27]
Ηχοαπορροφητικές ποδιές	Πλευρικά ηχοπετάσματα επί του οχήματος, στο ύψος των τροχών και εκτείνονται όσο το δυνατόν χαμηλότερα	0-3 dBA		[34]
		5-10 dBA (με ηχοπετάσματα)		[34]
		8-10 dBA (με χαμηλά ηχ/ματα)		[27]
		4-10 dBA, 5 dBA		[37, 38]
Κάλυμμα παντογράφου		10 dBA, 4-10 dBA		[27, 38, 37]
Επανασχεδιασμός βαγονιού	Επανασχεδιασμός βαγονιού με αεροδυναμικό σχεδιασμό πρόσοψης	3-10 dBA		[27]
		4-10 dBA		[37]
Αντικατάσταση μηχανής έλξης	Αντικατάσταση ηλεκ/της μηχανής με diesel	4-10 dBA		[37]
Ηχοπετάσματα				
Ηχοπετάσματα		5-15 dBA, 3-10 dBA		[34, 37]
		5.5-8.1 dBA, max 10 dBA		[45, 38]
Πράσινα ηχοπετάσματα	Δασικές ζώνες κατά μήκος της γραμμής	1-2 dBA		[37]

5

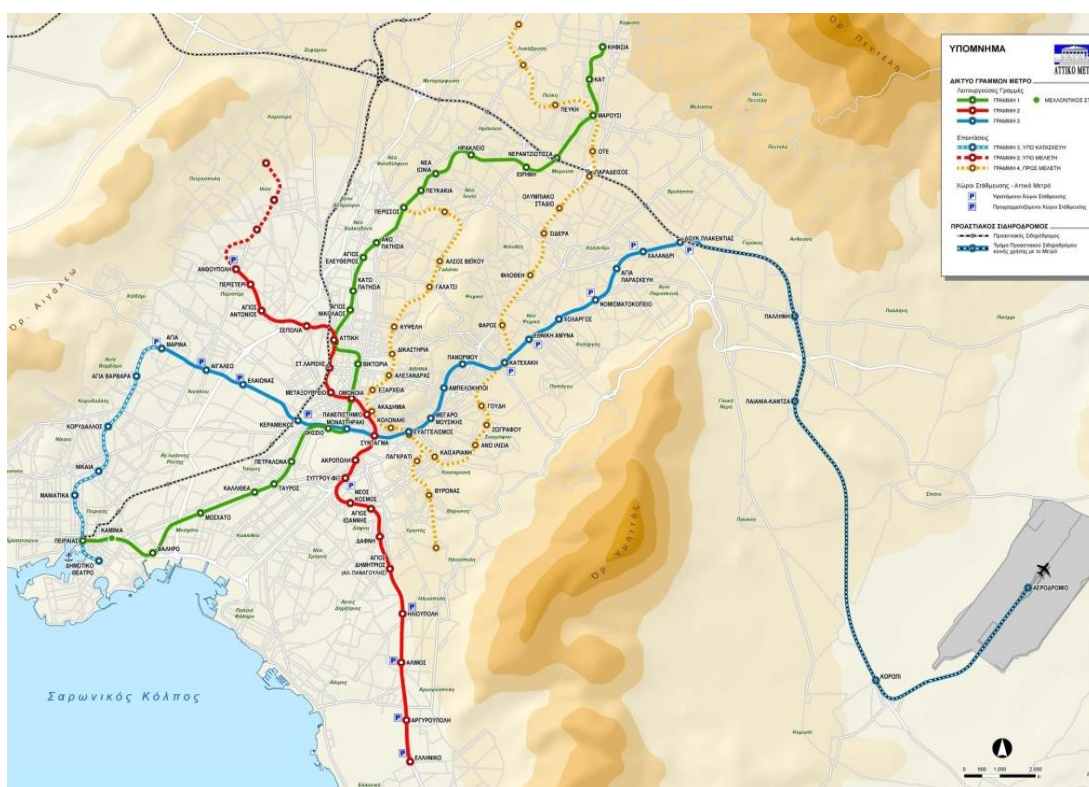
Αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης του θορύβου στο Μετρό Αθηνών και στον Η.Σ.Α.Π.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται, αρχικά, μια περιγραφή του δικτύου του Η.Σ.Α.Π. και του Μετρό Αθηνών καθώς και οι τεχνικές που εφάρμοσαν για τη μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου. Επιπλέον, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγιναν μετρήσεις για την αποτελεσματικότητα των ηχοαπορροφητικών πλακών, μιας τεχνικής που πρόσφατα εγκατέστησε ο ΗΣΑΠ στο τμήμα του δικτύου του το οποίο αποτελείται από σταθερή επιδομή. Η τεχνική έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2. Επίσης, παρουσιάζεται η μεθοδολογία της επεξεργασίας των δεδομένων καθώς και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

5.1 Το δίκτυο του Μετρό Αθηνών και οι εφαρμοζόμενες τεχνικές θορύβου

Το δίκτυο του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας αποτελείται από τις Γραμμές 2 και 3 με 41 σταθμούς επιβίβασης ατόμων. Έχει συνολικό μήκος 59,1 km και υπάρχει η δυνατότητα μετάβασης στο αεροδρόμιο «Ελ. Βενιζέλος». Το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου είναι υπόγειο και μόνο ένα τμήμα της Γραμμής 3 είναι υπέργειο σε κοινή χρήση με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο. Ήδη, κατασκευάζεται η επέκταση της Γραμμής 3 Αγία Μαρίνα-Πειραιάς και με την ολοκλήρωσή του θα είναι δυνατή η άμεση μεταφορά από το λιμάνι στο αεροδρόμιο. Παράλληλα, σχεδιάζεται η δημιουργία της νέας Γραμμής 4 καθώς και επέκταση της υπάρχουσας Γραμμής 2 (Εικόνα 5.1) [46].

Ο στόλος του ΜΕΤΡΟ αποτελείται συνολικά από 56 συρμούς. Από αυτούς οι 28 είναι πρώτης γενιάς, γαλλικής προέλευσης, κάθε ένας από τους οποίους έχει 6 βαγόνια. Ομοίως, οι 21 είναι δεύτερης γενιάς, κορεάτικης προέλευσης, παρόμοιας σύνθεσης. Η χωρητικότητά τους είναι 1050 επιβάτες/συρμό και η μέγιστη ταχύτητά τους κυμαίνεται από 80-120 km/h κατά περιπτώσεις. Από το καλοκαίρι του 2014 δόθηκαν στην κυκλοφορία 17 νέοι, σύγχρονοι συρμοί τρίτης γενιάς, κορεάτικης προέλευσης και παρόμοιας σύνθεσης. Καθημερινά περίπου 968.000 επιβάτες εξυπηρετούνται από τις Γραμμές 2 και 3 του Μετρό ενώ με τις νέες επεκτάσεις και κατασκευές ο αριθμός αυτός θα πολλαπλασιαστεί [46].



Εικόνα 5.1: Χάρτης υπάρχοντος δικτύου Η.Σ.Α.Π. και ΜΕΤΡΟ Αθηνών καθώς και μελλοντικών γραμμών και επεκτάσεων [46]

Το μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου του Μετρό Αθηνών είναι υπόγειο, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Το υπέργειο τμήμα του βρίσκεται μεταξύ των σταθμών Δουκίσσης Πλακεντίας και Αεροδρόμιο. Επίσης, υπέργεια κινούνται οι συρμοί κατά την είσοδο ή έξοδο, από και προς το αμαξοστάσιο Σεπολίων (Εικόνες 5.2, 5.3). Η είσοδος και η έξοδος των συρμών γίνεται συγκεκριμένες ώρες της ημέρας και κυρίως τις νυχτερινές. Πολλοί περίοικοι διαμαρτυρήθηκαν για τα υψηλά επίπεδα θορύβου καθώς, πλησίον του αμαξοστασίου, υπάρχουν κατοικίες και μία σχολική μονάδα [14].



Εικόνα 5.2: Τμήμα γραμμής στο αμαξοστάσιο Σεπολίων



Εικόνα 5.2: Αμαξοστάσιο Σεπολίων

Η ΣΤΑΣΥ, εταιρία που έχει αναλάβει τη λειτουργία του Μετρό, λαμβάνοντας υπόψη τις διαμαρτυρίες των περίοικων έχει λάβει μέτρα για τον περιορισμό του θορύβου. Η τεχνική την οποία εφαρμόζει είναι τα βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται τόσο στη σιδηροτροχιά όσο και στον τροχό. Πιο συγκεκριμένα, τα βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται στον τροχό εφαρμόζονται μόνο στους συρμούς τρίτης γενιάς (Εικόνα 5.3) ενώ η επάλειψη της σιδηροτροχιάς στο αμαξοστάσιο των Σεπολίων γίνεται δια χειρός (Εικόνα 5.4). Η τεχνική των βελτιωτικών τριβής έχει περιγραφεί πιο αναλυτικά στα Κεφάλαια 2.1.6 και 2.2.4.



Εικόνα 5.3: Δια χειρός επάλειψη βελτιωτικού τριβής σε τμήμα γραμμής στο αμαξοστάσιο Σεπολίων



Εικόνα 5.4: Βελτιωτικό τριβής επί σιδηροδρομικού οχήματος τρίτης γενιάς του Μετρό Αθηνών

5.2 Το δίκτυο του Η.Σ.Α.Π.

Ο Αστικός Σιδηρόδρομος Πειραιά – Κηφισιάς, γνωστός και ως «Ηλεκτρικός» εγκαινιάστηκε το 1869 με μήκος 8,5 χιλιόμετρα και ένωνε με μονή γραμμή το Θησείο με τον Πειραιά. Καθώς η κυκλοφορία της γραμμής αυξανόταν δημιουργήθηκε η ανάγκη κατασκευής νέων σταθμών, επέκτασης της διαδρομής Πειραιάς-Θησείο μέχρι την Ομόνοια με τη διάνοιξη σήραγγας και αντικατάστασης της μονής με διπλή γραμμή [10]. Το 1904, αφού ολοκληρώθηκαν οι αναγκαίες εργασίες υποδομής και η παραλαβή ηλεκτροκίνητων οχημάτων πραγματοποιήθηκε η ηλεκτροδότηση του σιδηροδρόμου. Σταδιακά, αλλά κυρίως μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, επεκτάθηκε προς τα βόρεια, μέχρι που έφθασε στην Κηφισιά το 1957.

Το σημερινό δίκτυο του Η.Σ.Α.Π. (Γραμμή 1 του δικτύου μετρό της Αθήνας) αποτελείται από μία διπλή γραμμή μήκους 25,6 km ανά κατεύθυνση μεταξύ των σταθμών Πειραιά και Κηφισιάς καθώς και από 10,4 km γραμμών εναπόθεσης κλπ. Το δίκτυο περιλαμβάνει επίσης 24 σταθμούς για την εξυπηρέτηση των επιβατών οι οποίοι ανακαινίσθηκαν πλήρως την περίοδο πριν τους Ολυμπιακούς Αγώνες του 2004 [10]. Την τριετία μεταξύ 2008 και 2011 υλοποιήθηκε ανακαίνιση της υποδομής και της επιδομής στο μεγαλύτερο μέρος του δικτύου, μεταξύ των σταθμών Ν. Φάληρο-Κηφισιά, με αντικατάσταση της σκυρογραμμής με σταθερή επιδομή [47].

Οι συρμοί του Η.Σ.Α.Π. σχηματίζονται από 6 βαγόνια και λιγότερο συνηθέστερα από 5. Ο στόλος του σήμερα αποτελείται από 44 συμούς τριών διαφορετικών παραλαβών: 8ης (1984-1985), 10ης (1994) και 11ης παραλαβής (2000-2003). Συνηθέστερα, σχηματίζεται ένας συρμός των 6 βαγονιών από 2 ημίσυμους 8ης παραλαβής των 3 βαγονιών ο καθένας [48]. Καθημερινά εκτελούνται από τους συμούς των ΗΣΑΠ περισσότερα από 600 δρομολόγια και μεταφέρονται περισσότεροι από 450.000 επιβάτες. Το 2004 τα διανυθέντα οχηματοχιλιόμετρα έφτασαν τις 23.966.813 [49].

5.2.1 Εφαρμογή ηχοαπορροφητικών πλακών σε τμήμα του δικτύου Η.Σ.Α.Π.

Ο ΗΣΑΠ, αναγνωρίζοντας το πρόβλημα του σιδηροδρομικού θορύβου, έχει τοποθετήσει στο δίκτυό του ορισμένες τεχνικές μείωσης. Τεχνικές όπως τα ηχοπετάσματα, τα βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται επί της σιδηροτροχιάς με ειδικές συσκευές έκχυσης και αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιάς. Πέραν αυτών, τοποθέτησε πρόσφατα ηχοαπορροφητικές πλάκες ανάμεσα στις σιδηροτροχιές καθώς και σε μικρή απόσταση από αυτές. Οι ηχοαπορροφητικές πλάκες έχουν τοποθετηθεί σε όλο το μήκος του δικτύου του ΗΣΑΠ το οποίο αποτελείται από σταθερή επιδομή. Η τεχνική αυτή αναλύεται περισσότερο στο Κεφάλαιο 2.1.5.

5.2.2 Μετρήσεις θορύβου στη γραμμή Ν. Ιωνία – Ν. Ηράκλειο

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγιναν μετρήσεις πεδίου για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ηχοαπορροφητικών πλακών στο δίκτυο του ΗΣΑΠ μεταξύ των σταθμών Ν. Ιωνία και Ν. Ηράκλειο.

5.2.2.1 Μετρήσεις ηχοαπορροφητικής ικανότητας των πλακών στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας Ε.Μ.Π.

Στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π. διεξήχθησαν μετρήσεις για τη διαπίστωση της ηχοαπορροφητικής ικανότητας του υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι ηχοαπορροφητικές πλάκες. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με τη μέθοδο της αίθουσας αντήχησης.

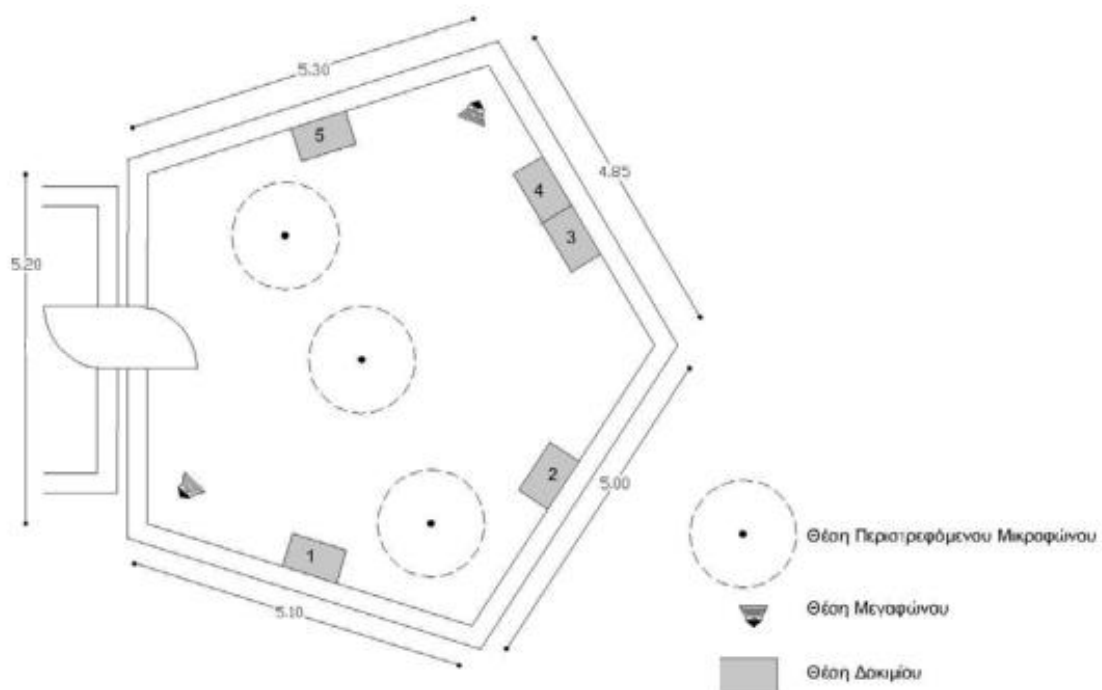
Ο υπολογισμός του συντελεστή ηχοαπορρόφησης (α_s) μέσω της παραπάνω μεθόδου, στηρίζεται στον προσδιορισμό της αύξησης της συνολικής ισοδύναμης ηχοαπορρόφησης στην αίθουσα αντήχησης όταν τοποθετηθεί σε αυτή δείγμα του μετρούμενου υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης T_R πριν και μετά την τοποθέτηση των δοκιμών. Ως χρόνος αντήχησης (T_R , σε sec) ενός χώρου για κάθε συχνότητα ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται ώστε επιτευχθεί μείωση της στάθμης του ήχου, L , που δημιουργείται στο χώρο από μία ηχητική πηγή, κατά 60 dB μετά την παύση της [50].

Ο χώρος στον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις βρίσκεται στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π. και αποτελείται από μία αίθουσα με μεγάλο χρόνο αντήχησης. Η αίθουσα αυτή είναι σχεδιασμένη ώστε οι επιφάνειές της να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ηχοανακλαστικές για να εξασφαλίζονται οι υψηλές τιμές του χρόνου αντήχησης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που ενδιαφέρει και η δημιουργία κατά το δυνατό διάχυτου ηχητικού πεδίου. Στη δημιουργία ηχητικού πεδίου συμβάλλει η ανάρτηση από την οροφή της αίθουσας, με εντελώς τυχαίο τρόπο, πολλών ελαφρά κυρτωμένων φύλλων κόντρα πλακέ ή παρόμοιων υλικών τα οποία έχουν επαλειφθεί με βερνίκι (Εικόνα 5.5) [50].



Εικόνα 5.5: Αναρτημένα, ελαφρώς κυρτωμένα φύλλα κόντρα πλακέ στην αίθουσα αντήχησης του Εργαστηρίου Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π. [50]

Επιπλέον, για τη δημιουργία της απαραίτητης ισοκατανομής των ιδιοσυχνοτήτων της αίθουσας οι πλευρικοί τοίχοι και η οροφή, οφείλουν να μην σχηματίζουν ορθές γωνίες. Για το λόγο αυτό, η κάτοψη της αίθουσας έχει μορφή πενταγώνου και όγκο $V=200 \pm 20 \text{ m}^3$ (Εικόνα 5.6) [50].



Εικόνα 5.6: Κάτοψη αίθουσας αντήχησης στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας Ε.Μ.Π. [51]

Το δοκίμιο του υλικού το οποίο πρόκειται να μετρηθεί πρέπει να έχει ορθογώνιο σχήμα, συνολικό εμβαδό $S= 10 \div 12 \text{ m}^2$ και ο λόγος μεταξύ πλάτους και μήκους να είναι 0,7-1,0. Η στήριξη του δοκιμίου πρέπει να γίνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στις πρακτικές εφαρμογές του μετρούμενου υλικού.

Στην πρώτη φάση του πειράματος, δημιουργείται, μέσω κατάλληλης διάταξης, ηχητικό σήμα ορισμένης συχνότητας το οποίο διαδίδεται μέσω των μεγαφώνων εντός της κενής αίθουσας ηχητικό σήμα και αναπτύσσεται διάχυτο ηχητικό πεδίο. Στη συνέχεια, το ηχητικό σήμα συλλέγεται από τα μικρόφωνα και σε ειδικό χαρτί αποτυπώνεται η στάθμη του ηχητικού σήματος. Μετά την παύση λειτουργίας της ηχητικής πηγής, το ηχητικό σήμα στην αίθουσα μειώνεται με εκθετικά σε σχέση με το χρόνο, λόγω του φαινομένου της αντήχησης, έως ότου φτάσει τη στάθμη του θορύβου περιβάλλοντος της αίθουσας. Ο χρόνος αυτός αποτελεί το χρόνο αντήχησης για κενή αίθουσα ο οποίος καταγράφεται σε ειδική φόρμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις μετρούμενες συχνότητες. η δεύτερη φάση του πειράματος περιλαμβάνει την τοποθέτηση των δοκιμίων εντός της αίθουσας αντήχησης και καταγράφεται ο αντίστοιχος χρόνος αντήχησης.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης και του συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι ηχοαπορροφητικές πλάκες, για τις αντίστοιχες συχνότητες όπως αυτές μετρήθηκαν στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π. (Εικόνα 5.7).

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος αντήχησης (α) T_1 [s]	Χρόνος αντήχησης (β) T_2 [s]	Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α_s (Sab) (*)
100	14,12	6,43	0,26
125	12,75	4,27	0,48
160	12,55	3,03	0,76
200	13,38	3,91	0,55
250	12,73	3,81	0,56
315	11,58	3,67	0,60
400	10,01	2,81	0,78
500	10,10	2,43	0,95
630	8,87	2,30	0,98
800	8,53	2,52	0,85
1000	7,91	2,77	0,72
1250	7,11	2,61	0,74
1600	6,33	2,36	0,81
2000	5,26	2,08	0,89
2500	4,37	1,98	0,84
3150	3,40	1,73	0,87
4000	2,71	1,53	0,87
5000	2,26	1,40	0,83

Εικόνα 5.7: Χρόνοι αντήχησης της αίθουσας α) κενής και β) με τοποθετημένες τις ηχοαπορροφητικές πλάκες και συντελεστής ηχοαπορρόφησης α_s σε συνάρτηση με την αντίστοιχη συχνότητα όπως αυτά μετρήθηκαν στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π.

(*) Ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή ηχοαπορρόφησης α_s παρουσιάζεται στην πηγή [50].

5.2.2.2 Μεθοδολογία μέτρησης θορύβου

Μετρήσεις έγιναν σε μία θέση του δικτύου του Η.Σ.Α.Π. λόγω των προχωρημένων εργασιών της εργολαβίας για την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών. Έγινε προσπάθεια εφαρμογής, όσο ήταν δυνατό, του διεθνούς προτύπου «ISO 3095:1975 Acoustics – Railway applications – Measurement of noise emitted by railbound vehicles» [52]. Η νεότερη έκδοση του συγκεκριμένου ISO εκδόθηκε το 2013 αλλά δεν ήταν δυνατό να βρεθεί. Σύμφωνα με το διαθέσιμο ISO, το ηχόμετρο τοποθετείται σε απόσταση 7,5 m από το μέσο της απόστασης των σιδηροτροχιών σε ύψος 1,5 m από την άνω στάθμη της κεφαλής της σιδηροτροχιάς.

Οι μετρήσεις στο δίκτυο του ΗΣΑΠ διήρκησαν δύο ημέρες με διαφορά ενός μήνα μεταξύ τους . Οι μετρήσεις για την καταγραφή των σταθμών θορύβου πριν την τοποθέτηση των πλακών έγιναν το μήνα Απρίλιο του 2014 (Εικόνα 5.8) και οι μετρήσεις μετά την τοποθέτηση το Μάιο της ίδιας χρονιάς (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.8: Τμήμα γραμμής του δικτύου ΗΣΑΠ στη θέση μέτρησης (Χ.Θ. 18+300) πριν την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών (Πέμπτη 3 Απριλίου 2014)



Εικόνα 5.9: Τμήμα γραμμής του δικτύου ΗΣΑΠ στη θέση μέτρησης (Χ.Θ. 18+300) μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών (Τρίτη 6 Μαΐου 2014)

Έγινε προσπάθεια ούτως ώστε τα κλιματολογικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά να είναι παρόμοια κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για την ακριβέστερη αποτύπωση του θορύβου το ηχόμετρο είχε ρυθμιστεί ώστε να καταγράφει τη στάθμη θορύβου ανά 1 sec. Προκειμένου να γίνει καλύτερη αποτύπωση του ακουστικού περιβάλλοντος και της διακύμανσης του θορύβου μέσα στη μέρα πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι μετρήσεις έγιναν πρωινές ώρες, μεταξύ του διαστήματος 10.00 με 11.00, μεσημεριανές, 13.00 με 14.00 και απογευματινές 16.00 με 17.00. Κάθε μέτρηση διήρκησε 30 λεπτά, θεωρώντας το χρόνο ικανοποιητικό αφού πραγματοποιήθηκαν δέκα διελεύσεις συνολικά, πέντε ανά κατεύθυνση δηλαδή. Το διάστημα μεταξύ των διελεύσεων ήταν από 3 μέχρι 10 λεπτά ανά κατεύθυνση.

5.2.2.3 Όργανα μέτρησης

Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι το CEL-490 της εταιρίας CASELLA από τον εξοπλισμό του Τομέα Μ.Σ.Υ. του Ε.Μ.Π. (Εικόνα 5.10) Το συγκεκριμένο ηχόμετρο είναι σύμφωνο με το διεθνές πρότυπο IEC 61672:2003 [53]. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, τα ηχόμετρα διακρίνονται ανάλογα με την ακρίβειά τους σε δύο «κλάσεις», 1 και 2. Τα ηχόμετρα κλάσης 1, όπως το CEL-490 που χρησιμοποιήθηκε, χαρακτηρίζονται από το διευρυμένο πεδίο συχνοτήτων, τα στενότερα όρια ανοχής σφάλματος καθώς και την μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα μοντέλα «κλάσης 2». Πιο συγκεκριμένα, στα ηχόμετρα «κλάσης 1» η ανοχή σφάλματος είναι $\pm 0,7$ dB και ενδείκνυνται για μελέτες περιβαλλοντικού θορύβου και εργαστηριακών ερευνών ενώ τα αντίστοιχα «κλάσης 2» η ανοχή σφάλματος είναι ± 1 dB και είναι καταλληλότερα για τη μέτρηση εργασιακού θορύβου και είναι χαμηλότερου κόστους.

Όσον αφορά τη λειτουργία των ηχομέτρων αναφέρονται τρία σταθμιστικά φίλτρα, A, C και Z. Το εύρος των μετρήσεων των φίλτρων κυμαίνεται από 0 έως 140 dB, ενώ η στάθμη αιχμής, η οποία μετρείται με τη χρήση του φίλτρου Z, μπορεί να μετρηθεί για μέγιστες τιμές στο διάστημα 140-143 dB.

Επιπλέον, το CEL-490, όπως όλα τα ηχόμετρα, είναι ικανό να πραγματοποιήσει μετρήσεις ολικής στάθμης του ήχου αλλά έχει τη δυνατότητα να προβαίνει και σε οκταβική ανάλυση. Στην οκταβική ανάλυση το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 16 Hz έως 16 kHz. Οι κεντρικές συχνότητες, σε Hz, είναι : 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000.

Επίσης, το συγκεκριμένο ηχόμετρο μετράει τα παρακάτω μεγέθη: L_{eq} , L_{max} , L_{min} με χρήση όλων των σταθμιστικών φίλτρων A, C, Z καθώς και διάφορους ποσοστομοριακούς (στατιστικούς) δείκτες L_N , όπου $N=0,1-99,9$ %. Οι πιο δείκτες που μετρήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν οι εξής: L_{10} , L_{50} , L_{90} , L_{95} , L_{99} .

Πρέπει να σημειωθεί και η αναγκαιότητα χρήσης του βαθμονομητή ηχομέτρου (acoustical calibrator) κατά τη διενέργεια των μετρήσεων (Εικόνα 5.10). Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του ηχομέτρου πριν και μετά από κάθε μέτρηση για διασφαλιστεί η ακρίβειά της. Για ηχόμετρα «κλάσης» 1 η βαθμονόμηση γίνεται στα 114 dB στα 1 kHz.



Εικόνα 5.10: CEL-490 και acoustical calibrator [13]

Για ακριβέστερη χρήση του ηχομέτρου χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό κάλυμμα μικροφώνου για τον άνεμο προκειμένου να μειώσει το θόρυβο και να μην επιφέρει αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Πέραν αυτού, χρησιμοποιήθηκε τρίποδας στήριξης με μέγιστο ύψος 1,5 μέτρο ενώ έγινε μεταφορά των μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κατάλληλου λογισμικού που παρέχεται μαζί με την αγορά του ηχομέτρου. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ρολόι χειρός και σύμφωνα με αυτό έγινε καταγραφή της κάθε διέλευσης για τον μετέπειτα εντοπισμό και ταυτοποίηση των διελεύσεων κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

5.2.2.4 Θέση μέτρησης (Απρίλιος-Μαΐος 2014)

Η θέση στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (Εικόνα 5.11) βρίσκεται στη Χ.Θ. 18+300 ανάμεσα στους σταθμούς Νέα Ιωνία και Νέο Ηράκλειο και σε απόσταση 400 m περίπου από τον κοντινότερο σταθμό (Νέα Ιωνία) (Εικόνα 5.12). Μετρήσεις έγιναν μόνο σε μία θέση διότι το έργο τοποθέτησης των ηχοαπορροφητικών πλακών πλησίαζε προς την ολοκλήρωσή του και δεν υπήρχαν άλλες διαθέσιμες θέσεις μέτρησης. Το τμήμα του ΗΣΑΠ στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις είναι κατασκευασμένο από σταθερή επιδομή και διπλή γραμμή. Οι στρωτήρες είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα και είναι κατάλληλοι για τη σταθερή επιδομή Rheda 2000 και η μεταξύ τους απόσταση κυμαίνεται από 0,65-0,67 m [54]. Το ηχώμετρο τοποθετήθηκε στο ρεύμα ανόδου με κατεύθυνση προς Κηφισιά (Εικόνα 5.13), στο κυρτό μέρος της καμπύλης, γιατί τα γύρω κτίσματα ήταν μονώροφα ενώ αντίθετα η ύπαρξη σχολικής μονάδας στο ρεύμα καθόδου αποτελούσε περιστασιακά πηγή θορύβου που θα επηρέαζε σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τα διερχόμενα οχήματα και μοτοσυκλέτες ήταν λίγα, κυρίως τις πρωινές ώρες, με ελάχιστα βαρέα οχήματα και μόνη εξαίρεση την ύπαρξη αστικού λεωφορείου κυκλικής διαδρομής ανά 45 λεπτά.



Εικόνα 5.11: Θέσης μέτρησης



Εικόνα 5.12: Σχετική απόσταση θέσης μέτρησης και παρακείμενων σταθμών



Εικόνα 5.13: Ηχόμετρο στη θέση μέτρησης πριν την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών
(Μετρήσεις Πέμπτη 3 Απριλίου 2014)

5.2.2.5 Επεξεργασία και αποτελέσματα μετρήσεων

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία τους. Με κατάλληλο λογισμικό το οποίο παρέχεται με την αγορά του ηχομέτρου οι μετρήσεις μεταφέρθηκαν στον υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση. Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε υπολογίζει αυτόματα το δείκτη ισοδύναμης στάθμης θορύβου (Leq) σε dBA για κάθε διάστημα μέτρησης. Ο παρακάτω πίνακας (Εικόνα 5.14) δείχνει το δείκτη Leq όπως αυτός διαμορφώθηκε για κάθε ημίωρο μέτρησης πριν και μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στο τμήμα της γραμμής του ΗΣΑΠ όπου έγιναν οι μετρήσεις.

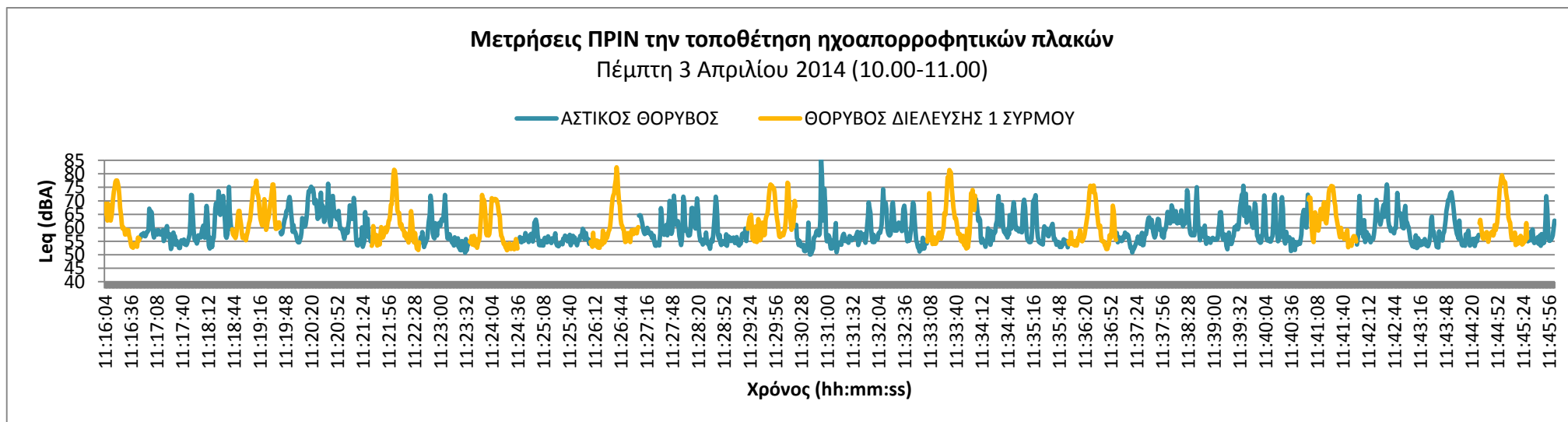
	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ Leq (dBA)		
	1η μέτρηση (10.00-11.00)	2η μέτρηση (13.00-14.00)	3η μέτρηση (16.00-17.00)
ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (3/4/2014)	66.15	64.73	66.82
ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (6/5/2014)	65.13	65.58	67.27
ΔΙΑΦΟΡΑ	-1.02	0.85	0.45

Εικόνα 5.14: Ισοδύναμη συνεχής στάθμη θορύβου Leq ανά περίοδο πριν και μετά την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

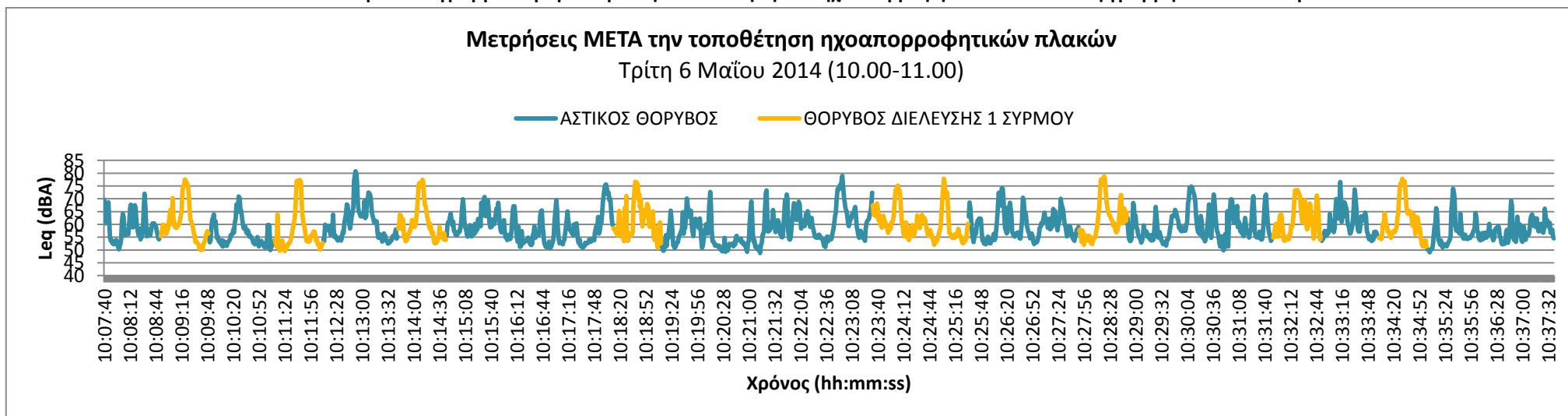
Για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την αποτελεσματικότητα των ηχοαπορροφητικών πλακών, έγινε επεξεργασία των μετρήσεων με τρεις διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Α' τρόπος: Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου (χωρίς διέλευση συρμών), με τη στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση των συρμών

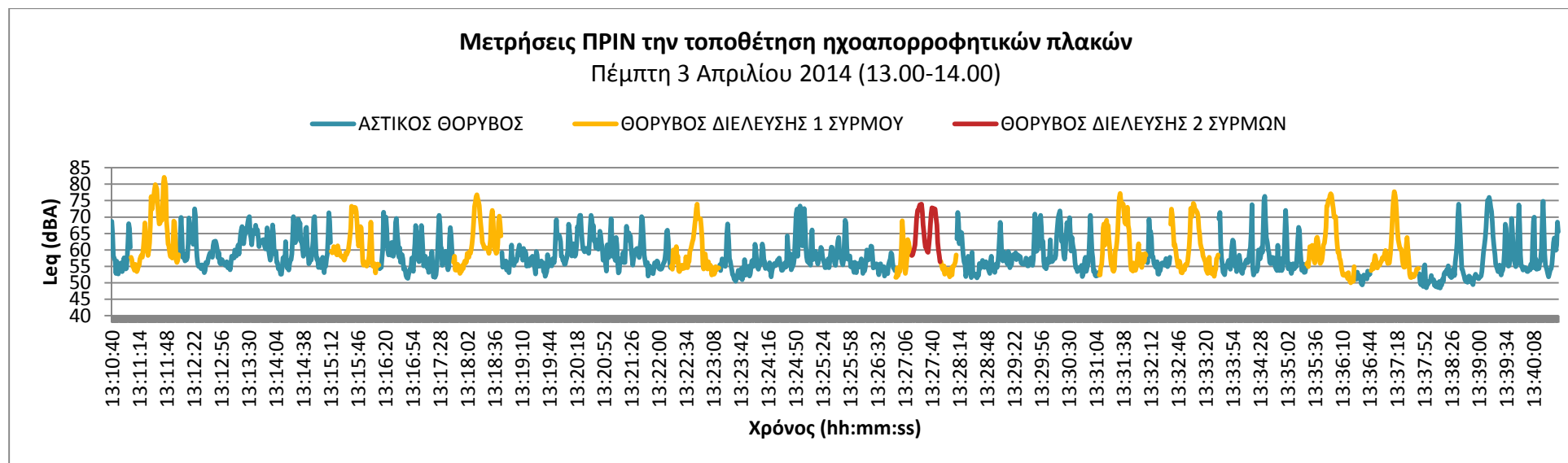
Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων με τον α' τρόπο, ήταν αρχικά απαραίτητος ο εντοπισμός της κάθε διέλευσης πάνω στο χρονοδιάγραμμα θορύβου της κάθε περιόδου (Εικόνες 5.15-20). Έγινε ταυτοποίηση και συγχρονισμός των μετρήσεων με τις αντίστοιχες σημειώσεις διελεύσεων που είχαν γίνει κατά τη διάρκεια των επιτόπιων μετρήσεων. Η διάρκεια διέλευσης κάθε συρμού από το σημείο που τοποθετήθηκε το ηχόμετρο υπολογίστηκε στα 20 sec (βλέπε χρονοδιάγραμμα θορύβου Εικόνες 5.15-5.20). Παρόλ' αυτά, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων κάθε διέλευση είχε διάρκεια 1 min· προστέθηκε, δηλαδή, ένα επιπλέον διάστημα 20 sec πριν και μετά τη διέλευση, επαρκές για να περιγράψει το θόρυβο που δημιουργείται πριν και μετά τη διέλευση και οφείλεται στη διέγερση των σιδηροτροχιών. Με τον όρο αστικός θόρυβος εννοείται η στάθμη θορύβου που επικρατούσε το διάστημα κατά το οποίο δεν υπήρξε διέλευση συρμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπήρξαν ταυτόχρονες διελεύσεις συρμών από τις δύο κατευθύνσεις ή με χρονική απόσταση μικρότερη των 20 sec (Εικόνα 5.17-19). Οι διελεύσεις αυτές εξαιρέθηκαν από το δείγμα.



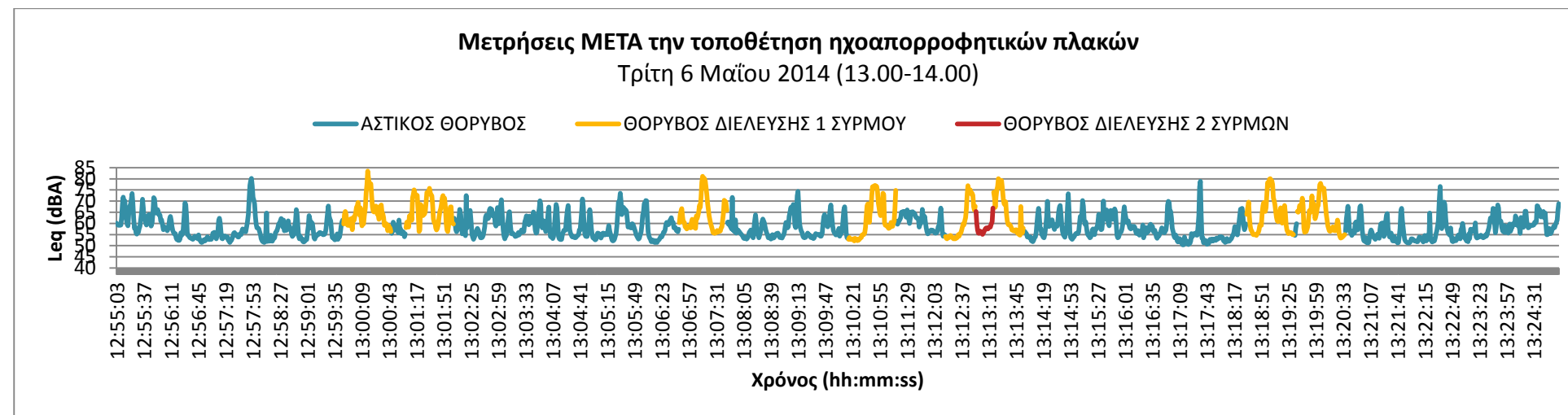
Εικόνα 5.15: Χρονοδιάγραμμα θορύβου πριν την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ



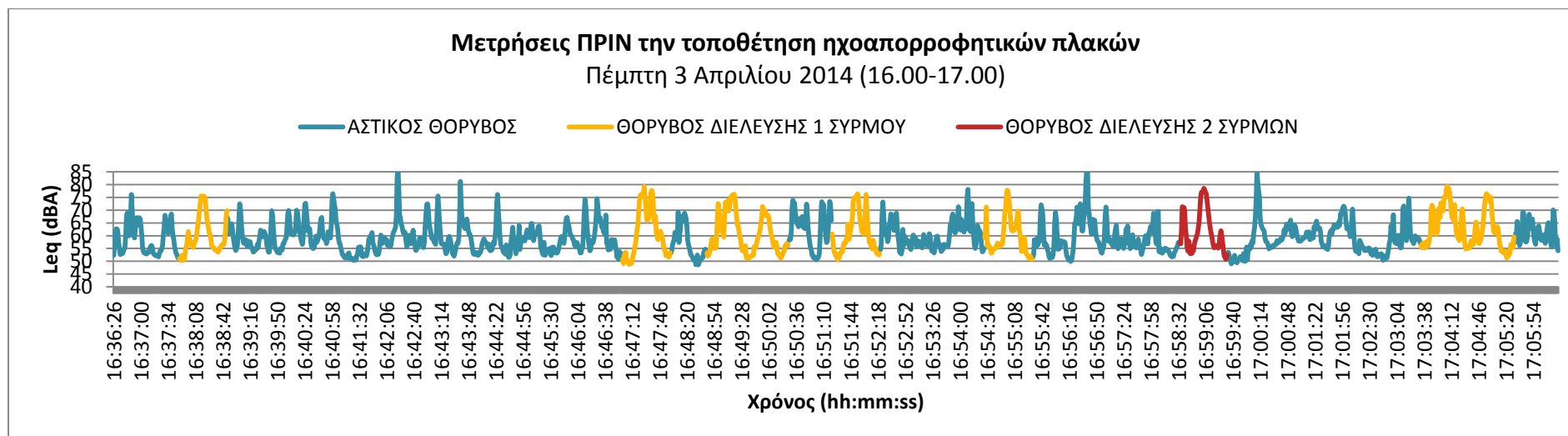
Εικόνα 5.16: Χρονοδιάγραμμα θορύβου μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ



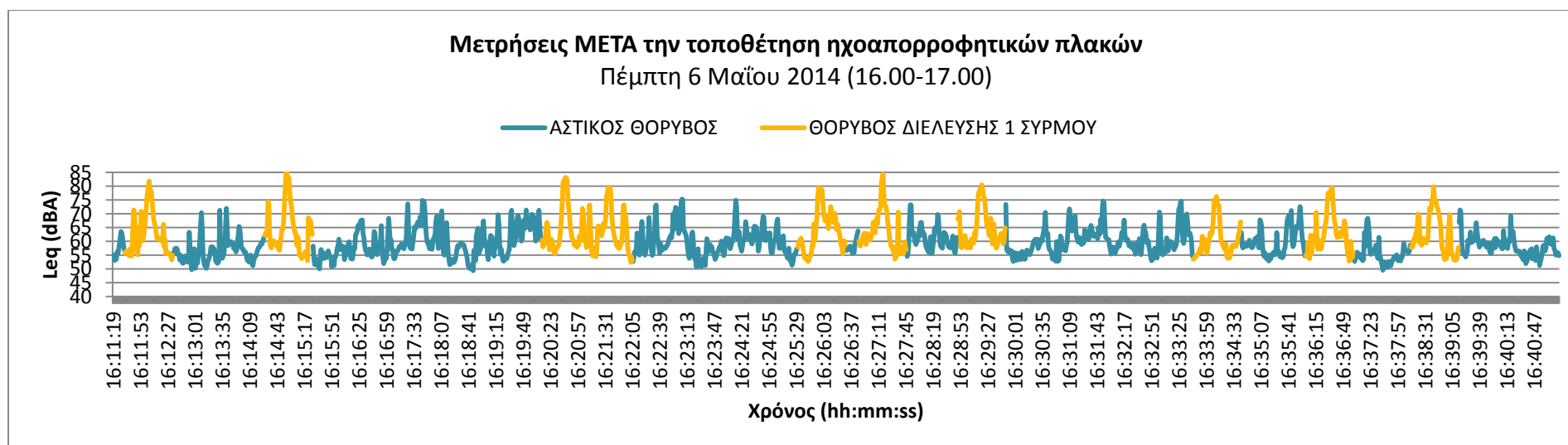
Εικόνα 5.17: Χρονοδιάγραμμα θορύβου πριν την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ



Εικόνα 5.18: Χρονοδιάγραμμα θορύβου μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ



Εικόνα 5.19: Χρονοδιάγραμμα θορύβου πριν την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ



Εικόνα 5.20: Χρονοδιάγραμμα θορύβου μετά την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών στη γραμμή Ν. Ιωνία-Ν. Ηράκλειο του ΗΣΑΠ

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων με τον Α' τρόπο φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (Εικόνα 5.21). Για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των ηχοαπορροφητικών πλακών είναι απαραίτητη η σύγκριση της διαφοράς του αστικού θορύβου από το θόρυβο διέλευσης 1 συρμού πριν και μετά την τοποθέτηση. Στην περίπτωση που η παραπάνω διαφορά είναι αρνητικός αριθμός, η τοποθέτηση κρίνεται αποτελεσματική και υπάρχει μείωση του σιδηροδρομικού θορύβου. Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι η μετρούμενη διαφορά για τις δύο από τις τρεις περιόδους είναι θετικός αριθμός.

Α' τρόπος

Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου (χωρίς διέλευση συρμών), με τη στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση των συρμών

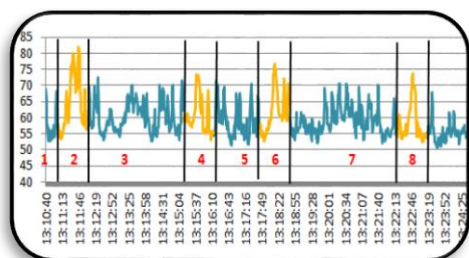
		ΣΤΑΘΜΗ ΑΣΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ (ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΣΥΡΜΟΥ) (dBA)	ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΕΝΟΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΣΥΡΜΟΥ (dBA)	ΔΙΑΦΟΡΑ
1η μέτρηση	ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 3/4/2014 στο διάστημα 10.00-11.00)	64.06	68.69	4.63
	ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 5/6/2014 στο διάστημα 10.00-11.00)	63.74	67.31	3.57
	ΔΙΑΦΟΡΑ	-0.32	-1.38	-1.06
2η μέτρηση	ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 3/4/2014 στο διάστημα 13.00-14.00)	58.35	63.96	5.6
	ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 5/6/2014 στο διάστημα 13.00-14.00)	62.51	67.87	5.36
	ΔΙΑΦΟΡΑ	4.15	3.92	-0.24
3η μέτρηση	ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 3/4/2014 στο διάστημα 16.00-17.00)	66.59	66.93	0.34
	ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών (Μετρήσεις 5/6/2014 στο διάστημα 16.00-17.00)	60.96	68.32	7.37
	ΔΙΑΦΟΡΑ	-5.64	1.39	7.03

Εικόνα 5.21: Αποτελέσματα Α' τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων

B1' τρόπος: Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου (χωρίς διέλευση συρμών) με στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού

Κατά την ανάλυση, θεωρήθηκε ως δείγμα κάθε ανεξάρτητη διέλευση από την οποία αφαιρέθηκε ο αστικός θόρυβος που μετρήθηκε πριν και μετά την εκάστοτε διέλευση ($\Delta Leq^x = Leq^{(i)} - Leq^{[(i-1)+(i+1)]/2}$). τη συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των διαφορών ($\Sigma \Delta Leq^x / n$). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις μετρήσεις που έγιναν μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών. Ύστερα, έγινε η σύγκριση των δύο μέσων όρων, πριν και μετά την τοποθέτηση των πλακών (Εικόνα 5.22).

**Μετρήσεις ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών
(Πέμπτη 3/4/2014)**



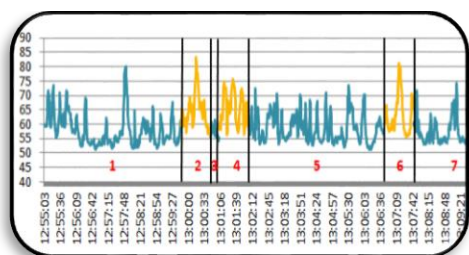
Υπολογισμός διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\Delta Leq^{bx} = Leq^{bi} - Leq^{[b(i-1)+b(i+1)]/2}$$

Σύγκριση Μέσου Όρου της διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΠΡΙΝ-ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\frac{\sum_{i=0}^{nb} \Delta Leq^{bx}}{n_b} \quad ? \quad \frac{\sum_{i=0}^{na} \Delta Leq^{ax}}{n_a}$$

**Μετρήσεις ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών
(Τρίτη 6/5/2014)**



Υπολογισμός διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\Delta Leq^{ax} = Leq^{ai} - Leq^{[a(i-1)+a(i+1)]/2}$$

Εικόνα 5.22: Σχηματική απεικόνιση του B1' τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων

Τα διαστήματα στα οποία υπήρξε ταυτόχρονη διέλευση συρμών από της 2 κατευθύνσεις ή η χρονική απόσταση μεταξύ 2 διελεύσεων ήταν μικρότερη από 20 sec, εξαιρέθηκαν. Δεν λήφθηκε υπόψη η πρώτη διέλευση της πρώτης περιόδου (10.00-11.00) πριν την τοποθέτηση των πλακών αφού πραγματοποιήθηκε ελάχιστα δευτερόλεπτα μετά την ενεργοποίηση του ηχομέτρου. Οι αριθμοί εντός των παρενθέσεων στον παρακάτω πίνακα αντιστοιχούν στις διελεύσεις και στα διαστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του αστικού θορύβου και της αντίστοιχης διέλευσης. Αριθμημένα χρονοδιαγράμματα θορύβου, αντίστοιχα με την αρίθμηση εντός των παρενθέσεων στον παρακάτω πίνακα, βρίσκονται στο Παράρτημα Π2.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων με το Β' τρόπο (Εικόνα 5.23).

Β1' τρόπος

Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου (χωρίς διέλευση συρμών) με στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού

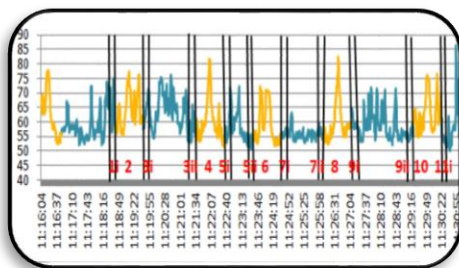
Μέτρηση	Μετρήσεις πριν την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών (3/4/2014)			Μετρήσεις μετά την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών (6/5/2014)			Διαφορά στάθμης θορύβου πριν-μετά την τοποθέτηση των ηχ/κών πλακών (dBA)
	Στάθμη αστικού θορύβου (περίοδος χωρίς διέλευση συρμου) (dBA)	Στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού (dBA)	Διαφορά	Στάθμη αστικού θορύβου (περίοδος χωρίς διέλευση συρμου) (dBA)	Στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού (dBA)	Διαφορά	
1η	65.26 (1 & 3) ⁽¹⁾	68.87 (2)	3.61	60.92 (1 & 3)	67.82 (2)	6.9	
	64.31 (3 & 5)	69.46 (4)	5.15	63.75 (3 & 5)	67.39 (4)	3.64	
	59.06 (5 & 7)	64.57 (6)	5.51	65.46 (5 & 7)	67.55 (6)	2.09	
	59.17 (7 & 9)	69.15 (8)	9.98	63.79 (7 & 9)	67.15 (8)	3.36	
	64.27 (9 & 11)	68.51 (10)	4.24	63.51 (10 & 12)	68.98 (11)	5.47	
	64.79 (11 & 13)	70.92 (12)	6.13				
	63.21 (13 & 15)	66.57 (14)	3.36	64.29 (12 & 14)	66.00 (13)	1.71	
	63.82 (15 & 17)	67.29 (16)	3.47				
	62.23 (17 & 19)	69.41 (18)	7.18	62.53 (14 & 16)	68.14 (15)	5.61	
M.O.	62.90	68.31	5.40	63.46	67.58	4.12	-1.28
2η	62.11 (1 & 3)	72.58 (2)	10.47	60.73 (1 & 3)	70.85 (2)	10.12	
	62.60 (3 & 5)	65.05 (4)	2.45				
	61.8 (5 & 7)	67.68 (6)	5.88	59.78 (3 & 5)	68.96 (4)	9.18	
	61.03 (7 & 9)	63.34 (8)	2.31				
	60.89 (11 & 13)	67.58 (12)	6.69	61.76 (5 & 7)	70.48 (6)	8.72	
	61.46 (13 & 15)	65.94 (14)	4.48				
	57.48 (15 & 17)	67.89 (16)	10.41	61.81 (7 & 9)	68.89 (8)	7.08	
	57.94 (17 & 19)	66.03 (18)	8.09				
M.O.	60.66	67.01	6.35	61.02	69.8	8.78	2.43
3η	64.53 (1 & 3)	66.79 (2)	2.27	59.29 (1 & 3)	70.59 (2)	11.31	
				61.46 (3 & 5)	74.16 (4)	12.71	
	63.71 (3 & 5)	70.07 (4)	6.36	61.39 (8 & 10)	69.80 (9)	8.41	
				61.32 (10 & 12)	71.46 (11)	10.14	
	65.63 (8 & 10)	67.72 (9)	2.09	63.51 (12 & 14)	71.12 (13)	7.62	
				63.16 (14 & 16)	66.36 (15)	3.21	
	66.30 (10 & 12)	66.77 (11)	0.47	61.42 (16 & 18)	69.57 (17)	8.15	
				60.09 (18 & 20)	68.60 (19)	8.51	
M.O.	65.04	67.84	2.80	61.45	70.21	8.76	5.96

Εικόνα 5.23: Αποτελέσματα Β' τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων

B2' τρόπος: Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου (χωρίς διέλευση συρμών) με στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού για περιορισμένο χρονικό διάστημα μέτρησης αστικού θορύβου

Παραλλαγή του προηγούμενου τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων, αποτελεί ο B2' τρόπος. Ομοίως με το B1' τρόπο, απομονώνεται ο αστικός θόρυβος (θόρυβος χωρίς τη διέλευση συρμού) από το θόρυβο της διέλευσης ενός συρμού. Η διαφορά έγκειται στο διάστημα υπολογισμού της στάθμης του αστικού θορύβου (Εικόνα 5.24). Κατά την ανάλυση των μετρήσεων με τον τρόπο B2', ως αστικός θόρυβος θεωρείται η στάθμη θορύβου που επικρατούσε 20 sec πριν και μετά από κάθε διέλευση συρμού. Με τον τρόπο αυτό, δεν λαμβάνονται υπόψη τυχαία περιστατικά (π.χ. τυχαία φρεναρίσματα από οδικά οχήματα) κατά τον υπολογισμό της στάθμης αστικού θορύβου. Τα αντίστοιχα χρονοδιαγράμματα με την εκ νέου αρίθμηση βρίσκονται αναλυτικά στο Παράρτημα Π3.

Μετρήσεις ΠΡΙΝ
την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών



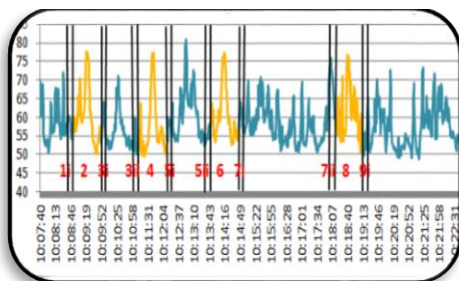
Υπολογισμός διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\Delta Leq^{bx} = Leq^{bk} - Leq^{[b(k-1)_{ii} + b(k+1)_l]/2}$$

Σύγκριση Μέσου Όρου της διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΠΡΙΝ-META την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\frac{\sum_{m=0}^{nb} \Delta Leq^{bx}}{n_b} \quad ? \quad \frac{\sum_{m=0}^{na} \Delta Leq^{ax}}{n_a}$$

Μετρήσεις META
την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών



Υπολογισμός διαφοράς στάθμης αστικού θορύβου από στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού META την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

$$\Delta Leq^{ax} = Leq^{ak} - Leq^{[a(k-1)_{ii} + a(k+1)_l]/2}$$

Εικόνα 5.24: Σχηματική απεικόνιση της παραλλαγής του B1' τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων (B2' τρόπος) στον οποίο η στάθμη αστικού θορύβου υπολογίζεται για διάστημα 20 sec πριν και μετά τη διέλευση του συρμού

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων με το Γ' τρόπο (Εικόνα 5.25).

B2' τρόπος

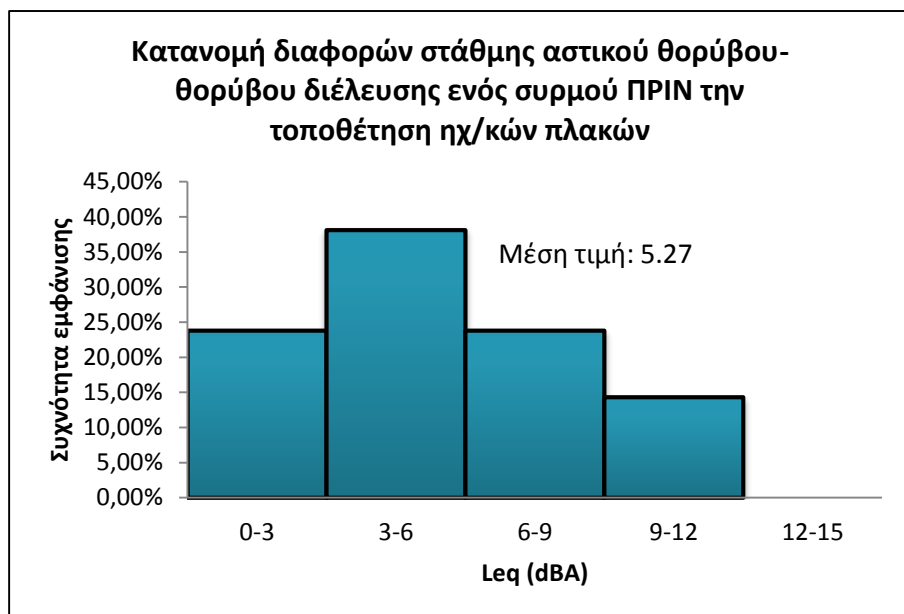
Σύγκριση στάθμης αστικού θορύβου με στάθμη θορύβου διέλευσης ενός συρμού για περιορισμένο χρονικό διάστημα μέτρησης αστικού θορύβου

Μέτρηση	Μετρήσεις πριν την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών (3/4/2014)			Μετρήσεις μετά την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών (6/5/2014)			Διαφορά στάθμης θορύβου πριν-μετά την τοποθέτηση των ηχ/κών πλακών (dBA)
	Στάθμη αστικού θορύβου (περίοδος χωρίς διέλευση συρμού) (σε dBA)	Στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού (σε dBA)	Διαφορά	Στάθμη αστικού θορύβου (περίοδος χωρίς διέλευση συρμού) (σε dBA)	Στάθμη θορύβου κατά τη διέλευση ενός συρμού (σε dBA)	Διαφορά	
1η	66.92 (1i & 3i)	(2) 68.87	1.95	60.06 (1i & 3i)	67.82 (2)	7.76	
	60.7 (3ii & 5i)	(4) 69.46	8.76	55.88 (3ii & 5i)	67.39 (4)	11.51	
	55.07 (5ii & 7i)	(6) 64.57	9.50	57.6 (5ii & 7i)	67.55 (6)	9.95	
	58.37 (7ii & 9i)	(8) 69.15	10.78	63.68 (7ii & 9i)	67.15 (8)	3.47	
	55.72 (9ii & 11i)	(10) 68.51	12.79	59.74 (10ii & 12i)	68.98 (11)	9.24	
	61.86 (11ii & 13i)	(12) 70.92	9.06				
	55.77 (13ii & 15i)	(14) 66.57	10.80	57.79 (12ii & 14i)	66.00 (13)	8.21	
	62.49 (15ii & 17i)	(16) 67.29	4.80				
	55.92 (17ii & 19i)	(18) 69.41	13.49	58.45 (14ii & 16i)	68.14 (15)	9.69	
M.O.	59.20	68.31	9.10	59.03	67.58	8.55	-0.55
2η	62.54 (1i & 3i)	72.58 (2)	10.04				
	63.11 (3ii & 5i)	65.05 (4)	1.94	58.9 (1i & 3i)	70.85 (2)	11.95	
	59.86 (5ii & 7i)	67.68 (6)	7.82				
	59.27 (7ii & 9i)	63.34 (8)	4.07	60.38 (3ii & 5i)	68.96 (4)	8.58	
	60.22 (11ii & 13i)	67.58 (12)	7.36				
	61.13 (13ii & 15i)	65.94 (14)	4.81	60.22 (5ii & 7i)	70.48 (6)	10.26	
	55.61 (15ii & 17i)	67.89 (16)	12.28				
	51.57 (17ii & 19i)	66.03 (18)	14.46	61.59 (7ii & 9i)	68.89 (8)	7.3	
M.O.	59.16	67.01	7.85	60.27	69.80	9.52	1.67
3η				57.26 (1i & 3i)	70.59 (2)	13.33	
	63.97 (1i & 3i)	66.79 (2)	2.82	55.77 (3ii & 5i)	74.16 (4)	18.39	
				58.01 (8ii & 10i)	69.80 (9)	11.79	
	60.00 (3ii & 5i)	70.07 (4)	10.07	62.54 (10ii & 12i)	71.46 (11)	8.92	
				60.91 (12ii & 14i)	71.12 (13)	10.21	
	66.65 (8ii & 10i)	67.72 (9)	1.07	63.85 (14ii & 16i)	66.36 (15)	2.51	
				63.74 (16ii & 18i)	69.57 (17)	5.83	
	63.92 (10ii & 12i)	66.77 (11)	2.85	59.62 (18ii & 20i)	68.60 (19)	8.98	
M.O.	63.64	67.84	4.20	60.21	70.21	10.00	5.80

Εικόνα 5.25: Αποτελέσματα Γ' τρόπου επεξεργασίας των μετρήσεων

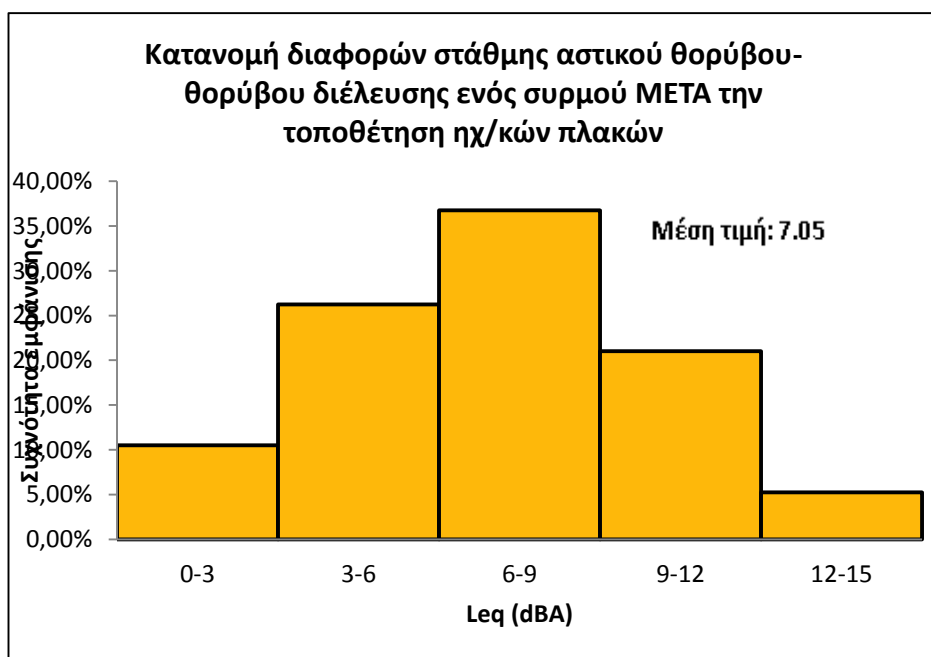
Η επιρροή της ταχύτητας, της παλαιότητας του τροχαίου υλικού και της σύνθεσης των είναι φανερή από τη διακύμανση στη διαφορά στάθμης του αστικού θορύβου από το θόρυβο διέλευσης ενός συρμού πριν και μετά την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών πλακών στο τμήμα της γραμμής του ΗΣΑΠ (Εικόνες 5.26-28) όπως προέκυψε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων με τον τρόπο Β1' (Εικόνα 5.23). όπως φαίνεται και παρακάτω η τιμή της διαφοράς αυτής κυμαίνεται από 0,5 μέχρι 12 dBA.

Διαφορές στάθμης αστικού- θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχο/κών πλακών	
3.61	2.45
5.15	5.88
5.51	2.31
9.98	6.69
4.24	4.48
6.13	10.41
3.36	8.09
3.47	2.26
7.18	6.36
10.47	2.09
	0.47
Μέση Τιμή:	5.27
Τυπ. απόκλιση :	2.78



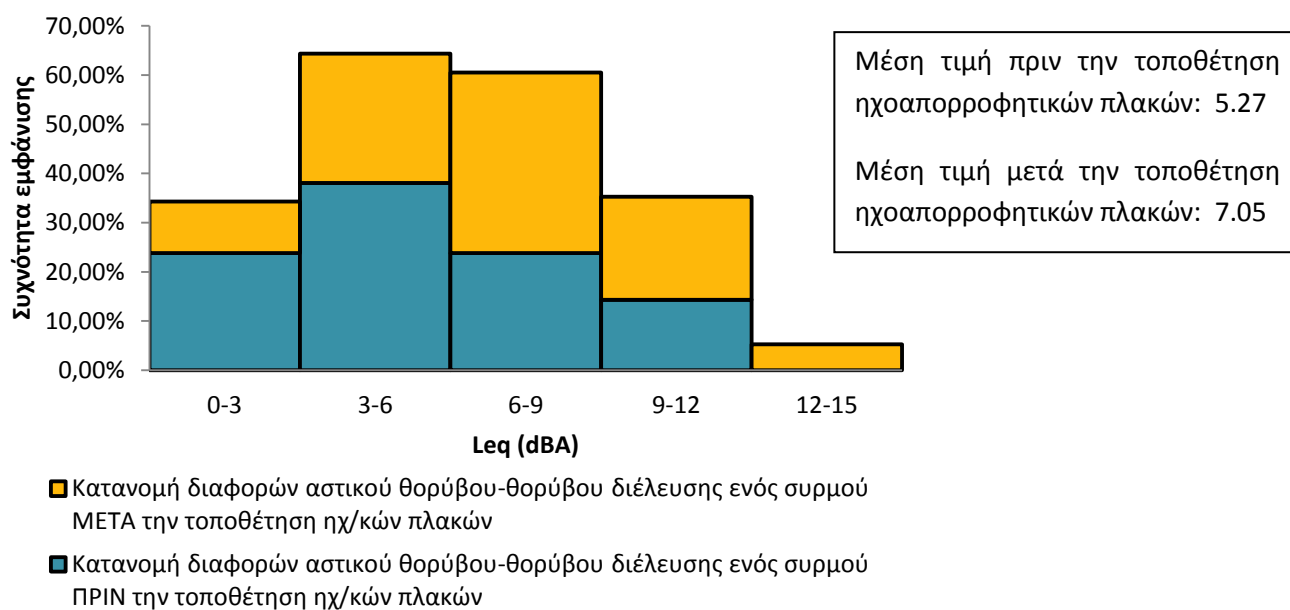
Εικόνα 5.26: Κατανομή διαφορών στις στάθμες αστικού-θορύβου διέλευσης ενός συρμού πριν την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

Διαφορές στάθμης αστικού- θορύβου διέλευσης ενός συρμού ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχο/κών πλακών	
6.9	7.08
3.64	11.31
2.09	12.71
3.36	8.41
5.47	10.14
1.71	7.62
5.61	3.21
10.12	8.15
9.18	8.51
8.72	
Μέση Τιμή:	7.05
Τυπική Απόκλιση :	3.07



Εικόνα 5.27: Κατανομή διαφορών στις στάθμες αστικού-θορύβου διέλευσης ενός συρμού μετά την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

**Κατανομή διαφορών στάθμης αστικού-θορύβου ενός
συρμού πριν και μετά την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών**



Εικόνα 5.28: : Κατανομή διαφορών στις στάθμες αστικού-θορύβου διέλευσης ενός συρμού πριν και μετά την τοποθέτηση ηχ/κών πλακών

5.2.2.6 Ορθή μεθοδολογία μετρήσεων

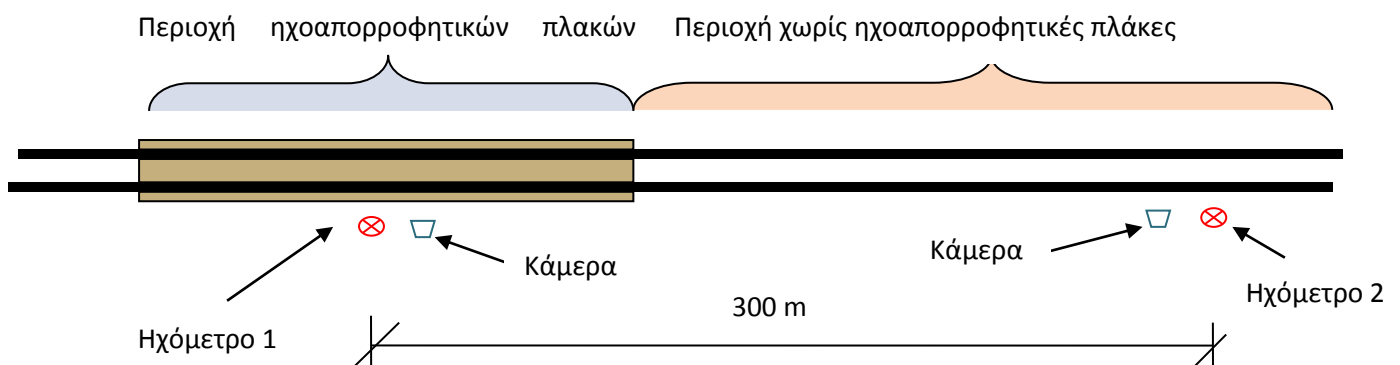
Οι επιτόπιες μετρήσεις θορύβου που έγιναν καταδεικνύουν τις δυσκολίες που έχει η διαδικασία της αποτίμησης του σιδηροδρομικού θορύβου. Για την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την αποτελεσματικότητα της τοποθέτησης των ηχοαπορροφητικών πλακών, θα έπρεπε να επισημανθούν και να γίνουν ορισμένες αλλαγές ως προς τη μεθοδολογία μέτρησης ούτως ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η επιρροή διαφόρων παραγόντων (ταχύτητα συρμών, τύπος μηχανής έλξης, παλαιότητα, φθορά τροχού/σιδηροτροχιάς κτλ) που αλλοίωσαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Για την όσο το δυνατό εξάλειψη των παραπάνω παραγόντων, τοποθετούνται ηχοαπορροφητικές πλάκες για μήκος περίπου 200 m (μήκος μεγαλύτερο του μήκους ενός συρμού). Επίσης τοποθετούνται δύο ηχόμετρα σε διαφορετικά σημεία της γραμμής του ΗΣΑΠ, με και χωρίς την εφαρμογή των ηχοαπορροφητικών πλακών. Η απόσταση των δύο θέσεων είναι περί τα 300 m ούτως ώστε ολόκληρος ο συρμός να βρίσκεται εκτός της περιοχής τοποθέτησης των ηχοαπορροφητικών πλακών. Η απόσταση και το ύψος των ηχομέτρων από τις σιδηροτροχιές ορίζεται στο ISO 3095:1975 (7,5 m και 1,2 m αντίστοιχα) (Εικόνα 1).

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, μετράται ένας συρμός όταν διέρχεται από το τμήμα με τις ηχοαπορροφητικές πλάκες και το τμήμα με τη σταθερή επιδομή. Με αυτόν τον τρόπο, η επιρροή του τύπου της μηχανής έλξης και της παλαιότητας των συρμών υπεισέρχεται στις μετρήσεις που καταγράφουν και τα δύο ηχόμετρα. Επίσης, είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων συνεννόηση με τους υπεύθυνους του ΗΣΑΠ ώστε ο οδηγός του συρμού να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα κίνησης η οποία θα ελέγχεται ταυτόχρονα από ειδικό όργανο. Τα δύο ηχόμετρα εκκινούν τη λειτουργία τους τη χρονική στιγμή την οποία ολόκληρος ο συρμός να βρίσκεται εντός της αντίστοιχης περιοχής μέτρησης και παύουν να λειτουργούν όταν ο συρμός παρέλθει από την περιοχή μέτρησης. Επιπλέον, κάμερες είναι τοποθετημένες σε θέσεις πλησίον των ηχομέτρων για την καταγραφή των διελεύσεων και τυχόν άλλων παραγόντων, π.χ. διέλευση βαρέως θορυβώδους οδικού οχήματος που παρεμβάλει έντονα στην μέτρηση, οι οποίοι δεν είναι δυνατό να τεθούν υπό έλεγχο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι αντίστοιχες διελεύσεις εξαιρούνται από το δείγμα.

Ως προς την επίδραση της φθορά των τροχών και της σιδηροτροχιάς στα αποτελέσματα των μετρήσεων θεωρείται κοινή σε όλο το δείγμα αφού οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο ίδιο τμήμα της γραμμής και για την ίδια χρονική περίοδο.

Η μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση ορθότερης μεθοδολογίας μετρήσεων θορύβου σε τμήμα του δικτύου ΗΣΑΠ

6

Συμπεράσματα

Ο σιδηροδρομικός θόρυβος αποτελεί ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και τα ίδια τα κράτη μέσω της νομοθεσίας και της πολιτικής τους θεσπίζουν μέτρα για τον περιορισμό του θορύβου. Το πρόβλημα αυτό έχει γίνει αντικείμενο ερευνητικών δραστηριοτήτων σχετικές με την ανάπτυξη και την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας τεχνικών μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου.

Οι τεχνικές διακρίνονται σε: α) τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή, β) τεχνικές που εφαρμόζονται στο τροχαίο υλικό, και, γ) στα ηχοπετάσματα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι τεχνικές αυτές (ανά κατηγορία) και η αντίστοιχη ηχομείωση που προσφέρουν παρουσιάζονται παρακάτω.

A) Τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή:

- Ελαστικά υποθέματα (2-8 dBA, 8-9 dBA σε συνδυασμό με την τοποθέτηση ηχοπετασμάτων)
- Λείανση σιδηροδροχιάς (2-10 dBA, μέγιστη ηχομείωση 20 dBA σε συνδυασμό με τورνευμένο τροχό)
- Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών (3-7.5 dBA)
- Ηχοαπορροφητικές πλάκες (3-4 dBA)
- Βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται στη σιδηροτροχιά (12-14.2 dBA)

Β) Τεχνικές που εφαρμόζονται στο τροχαίο υλικό:

- Τόρνευση τροχού (3-6 dBA)
- Μεταλλοελαστικοί τροχοί (2-4 dBA)
- Αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών (3-5 dBA)
- Αντικατάσταση του συστήματος πέδησης (9-10 dBA τύπου K-blocks,
10 dBA τύπου LL-blocks,
5-10 dBA τα δισκόφρενα)
- Ηχοαπορροφητικές ποδιές (0-10 dBA, 5-10 dBA σε συνδυασμό με την τοποθέτηση
ηχοπετασμάτων)
- Κάλυμμα παντογράφου (4-10 dBA)

Γ) Ηχοπετάσματα:

- Συμβατικά ηχοπετάσματα (3-15 dBA)
- Πράσινα ηχοπετάσματα (1-2 dBA)

Ο ΗΣΑΠ αναγνωρίζοντας τη σημαντικότητα του προβλήματος του σιδηροδρομικού θορύβου, τοποθέτησε ηχοαπορροφητικές πλάκες σε μεγάλο τμήμα του δικτύου του. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, έγιναν μετρήσεις θορύβου για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής αυτής. Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά των δυσκολιών που παρουσιάζει η μέτρηση του σιδηροδρομικού θορύβου. Η επιρροή εξωτερικών παραγόντων (όπως π.χ. η ταχύτητα του συρμού, ο τύπος και η παλαιότητα του τροχαίου υλικού, η σύνθεση των συρμών) κατά τη διαδικασία των μετρήσεων δεν επέτρεψε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της τοποθέτησης των ηχοαπορροφητικών πλακών στη θέση μέτρησης κατέληξαν όμως σε συμπεράσματα για τον τρόπο που οι μετρήσεις αυτές πρέπει να γίνονται και στις παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία των μετρήσεων.

7

Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα ως προς την αντιμετώπιση του σιδηροδρομικού θορύβου.

Οι προτάσεις αφορούν στην διαδικασία των μετρήσεων πεδίου. Προτείνεται η συστηματική διερεύνηση της επιρροής των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις σιδηροδρομικού θορύβου όπως η ταχύτητα, ο τύπος και η παλαιότητα του τροχαίου υλικού, η σύνθεση των συρμών κ.α.

Προτείνεται ακόμη η τεχνικοοικονομική σύγκριση της τεχνικής των ηχοαποροφητικών πλακών που εφαρμόστηκε στον ΗΣΑΠ με την τεχνική του επαλειφόμενου στον τροχό/σιδηροτροχιά βελτιωτικό τριβής που δοκιμάζεται πιλοτικά στο Μετρό.

Βιβλιογραφία

- [1]: Κ. Λυμπέρης (2009). Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές, Τόμος Ι. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.
- [2]: Commission of the European Communities (2001). White paper European transport policy for 2010: time to decide.
- [3]: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2012). Μείωση της ηχορρύπανσης από τους σιδηροδρόμους.
- [4]: Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2011). Λευκή Βίβλος: Χάρτης πορείας για έναν ενιαίο Ευρωπαϊκό χώρο μεταφορών – Για ένα ανταγωνιστικό και ενεργειακά αποδοτικό σύστημα μεταφορών.
- [5]: Χ. Πυργίδης (2009). Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών (Υποδομή – Τροχαίο Υλικό – Εκμετάλλευση). Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.
- [6]: George Paul Wilson, Rail System Noise and Vibration Control, Proceedings of ACOUSTICS 2004.
- [7]: Χ. Σιάλμα (2013). Διερεύνηση της συμπεριφοράς σταθερής επιδομής τύπου STEDEF και RHEDA 2000 κατά τη διέλευση ενός συρμού, ΕΜΠ.
- [8]: Κ. Λυμπέρης (2009). Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές, Τόμος ΙΙ. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.
- [9]: Indian railways institute of civil engineering (2012). Guidelines for working of rail grinding machine (for Indian railways).
- [10]: Ιστότοπος Wikipedia.
- [11]: UIC (July 2013). Railway noise technical measures catalogue.
- [12]: Δ. Αργυρόπουλος (2010). Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης θορύβου από τη λειτουργία της γραμμής- Τεχνική έκθεση. ΗΣΑΠ.
- [13]: Εικόνες ιστότοπου Google.
- [14]: Συζήτηση με εκπρόσωπο της ΣΤΑ.ΣΥ.
- [15]: Τεχνικό φυλλάδιο ηχοαπορροφητικών πλακών Durisol.
- [16]: F. Kruger (1994). Kurvenquietschen im Nahverkehr. Forschungsbericht FE-Nr. 70413/93.
- [17]: R. Gunacker, Pressbaum/Oesterreich (6/2014). Kurvenquietschen und die Moeglichkeiten seiner Vermeidung, Der Nahverkehr S. 23-26.

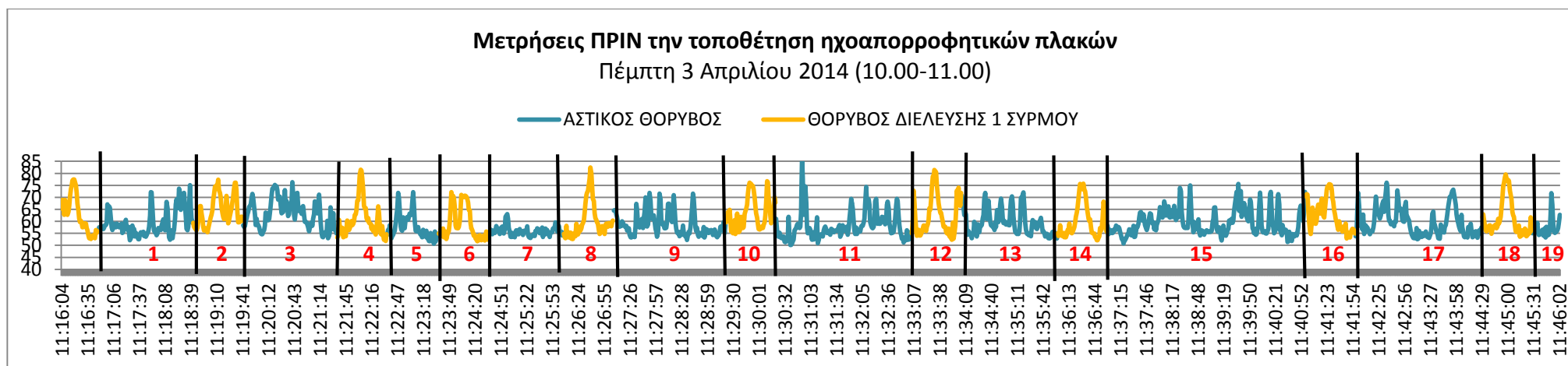
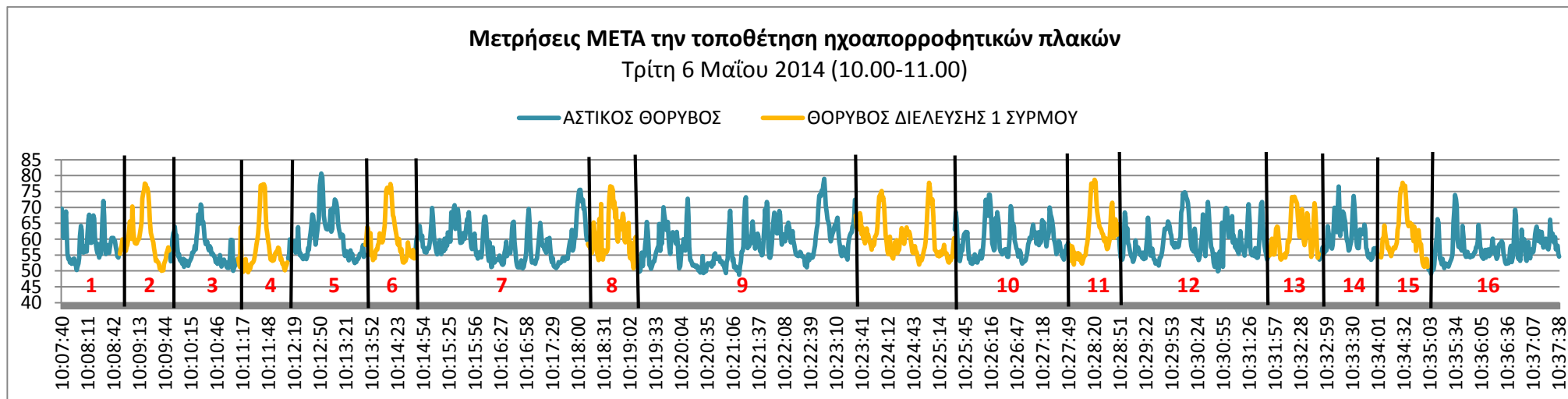
- [18]: Γ. Νίνος. Τροχός και Σιδηροτροχιά.
- [19]: D. T. Eadie, M. Santoro, W. Powell (2003). Local control of noise and vibration with KELTRACK friction modifier and Protector trackside application: an integrated solution. *Journal of Sound and Vibration* 267 p. 761-772.
- [20]: Εικόνες ιστότοπου KELSAN-LB Foster.
- [21]: Μ. Ανδρουλάκη (2013). Διερεύνηση θεμάτων φθοράς και αποκατάστασης της επιφάνειας κύλισης σιδηροδρομικών τροχών, ΕΜΠ.
- [22]: B. Suarez, J. A. Chover, P. Rodríguez and F.J. González. Effectiveness of resilient wheels in reducing noise and vibrations.
- [23]: B. Betgen, P. Bouvet, D. J. Thompson, F. Demilly, T. Gerlach (2012). Assessment of the efficiency of railway wheel dampers using laboratory methods within the STARDAMP project. *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*.
- [24]: K. Chiddick, D. Eadie (1999). Wheel/Rail friction management solutions. 14th Conference on Current Problems in Rail Vehicles, PRORAIL 99.
- [25]: Α. Μπαλλής, Ι. Λαγού (2010). Σιδηροδρομικός θόρυβος: προβλήματα, τεχνικές αντιμετώπισης και ερευνητικές δραστηριότητες. *Ακουστική* 2002.
- [26]: Γ. Τσώχος, Χ. Πυργίδης, Ν. Δεμφίδης (2001). Συμβολή στην πρόβλεψη του σιδηροδρομικού θορύβου. ΤΕΕ.
- [27]: C. Talotte et al. (2003). Identification, modeling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey. *Journal of Sound and Vibration* 267 p. 447-468.
- [28]: T. Okamura, Y. Kusumi, T. Hariyama. Development and prospect for low noise pantographs. *InterNoise* 2000.
- [29]: Γ. Κανελλαΐδης, Α. Καλτσούνης, Α. Μπαλλής (2011). Σημειώσεις Ειδικών Κεφαλαίων Οδοποιίας-Β. Στοιχεία Κυκλοφοριακού Θορύβου. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- [30]: Δ. Τσανακτοΐδης , Δ. Τσιτσούλας. *Ηχοπετασματα* .
- [31]: A. Wang, S. J. Cox, D. Gosling, J. E. W. Prudhoe (1999). Railway bridge noise control with resilient baseplates. *Journal of Sound and Vibration* 231 p. 907-911.
- [32]: F. Poisson, F. Margiocchi (2006). The use of dynamic dampers on the rail to reduce the noise of steel railway bridges. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 944-952.
- [33]: D. T. Eadie, M. Santoro (2006). Top-of-rail friction control for noise curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 747-757.
- [34]: L. G. Kurzweil (1983). Wheel/rail noise – means for control. *Journal of Sound and Vibration* 87 p. 197-220.

- [35]: D. T. Eadie, M. Santoro, J. Kalousek (2005). Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear* 258 p. 1148-1155.
- [36]: N. Van Doninck, L. Schillemans (2003). Environmental integration of measures to reduce railway noise in the Brussels Capital Region. *Journal of Sound and Vibration* 267 p. 419-429.
- [37]: G. Xiaoan (2006). Railway environmental noise control in China. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 1078-1085.
- [38]: Μ. Υδραίος (2005). Πρόγνωση Σιδηροδρομικού Θορύβου. ΕΜΠ.
- [39]: Δ. Αργυρόπουλος (2010). Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης θορύβου από τη λειτουργία της γραμμής του Η.Σ.Α.Π.
- [40]: Κ. Vogiatzis, C. Antoniadis, V. Liapis, N. Konstantopoulos, A. Argyropoulos (2014). The QUIET-TRACK Project-Noise Mitigation Measures at ISAP Line 1. Πρακτικά Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2014, Θεσσαλονίκη.
- [41]: B. Barshikow, W. F. King, III and E. Pfizenmaier (1987). Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones. *Journal of Sound and Vibration* 118(1) p. 99-122.
- [42]: B. Muller, J. Oertli (2006). Combating curve squeal: Monitoring existing applications. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 728-734.
- [43]: P. H. de Vos, M. Bergendorff, M. Brennan, F. van der Zijpp (2006). Implementing the retrofitting plan for the European rail freight fleet. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 1051-1057.
- [44]: A. Frid (2003). Skirts and barriers for reduction of wayside noise from railway vehicles-an experimental investigation with application to the BR185 locomotive. *Journal of Sound and Vibration* 267 p. 709-719.
- [45]: Μ. Πατσή, Κ. Βογιατζής (2006). Ακουστική μελέτη εφαρμογής ηχοπετασμάτων στο δίκτυο του ΗΣΑΠ.
- [46]: Ιστότοπος www.ametro.gr
- [47]: Ιστότοπος www.stasy.gr
- [48]: Ιστότοπος www.mesametaforas.gr
- [49]: Α. Γ. Γουδέλης. ΗΣΑΠ: 100 χρόνια ηλεκτροκίνησης. ΤΕΕ.
- [50]: Α. Κορωναίος, Γ. Πουλάκος (2005). Τεχνικά Υλικά - Τόμος 3. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- [51]: Α. Κορωναίος (2005). Εργαστήριο Ηχοτεχνίας. Αθήνα, Ε.Μ.Π.

- [52]: ISO 3095:1975 Acoustics – Railway applications – Measurement of noise emitted by railbound vehicles
- [53]: IEC 61672:2003
- [54]: Ιστότοπος www.isap.gr

Παράρτημα

Π2. Αρίθμηση διαστημάτων αστικού θορύβου και θορύβου διέλευσης ενός συρμού κατά τη επεξεργασία των μετρήσεων με τον τρόπο Β1' για τα χρονοδιαγράμματα θορύβου των αντίστοιχων περιόδων μέτρησης σε τμήμα της γραμμής ΗΣΑΠ Ν. Ιωνία – Ν. Ηράκλειο



Μετρήσεις ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Πέμπτη 3 Απριλίου 2014 (13.00-14.00)



Μετρήσεις ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Τρίτη 6 Μαΐου 2014 (13.00-14.00)



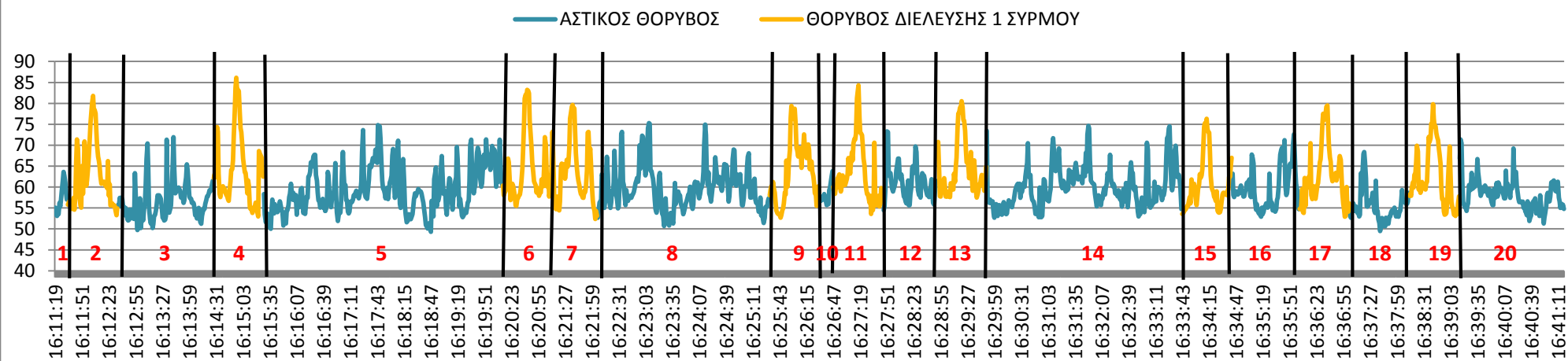
Μετρήσεις ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Πέμπτη 3 Απριλίου 2014 (16.00-17.00)



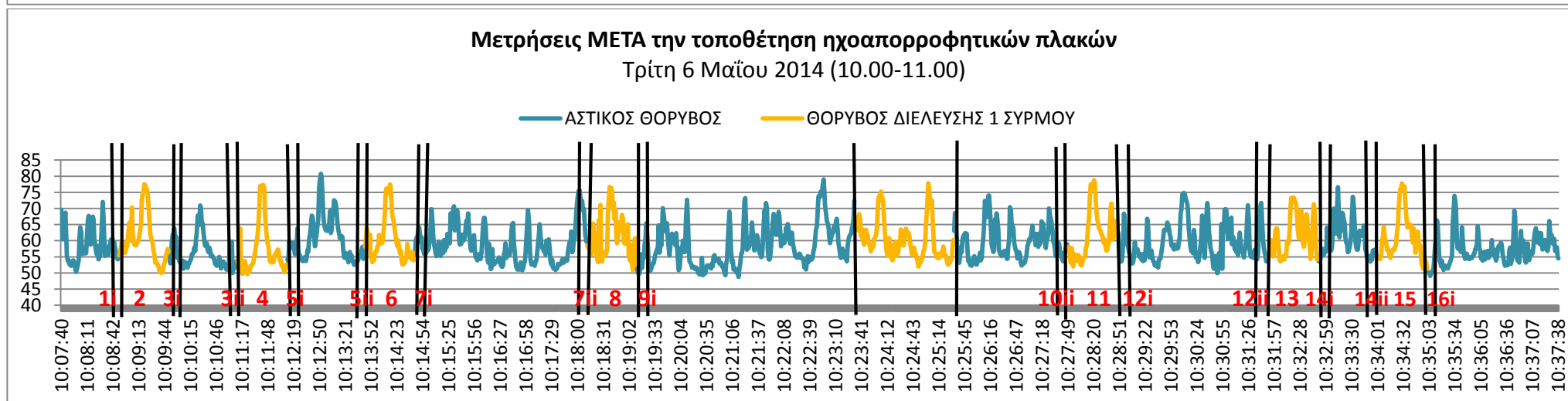
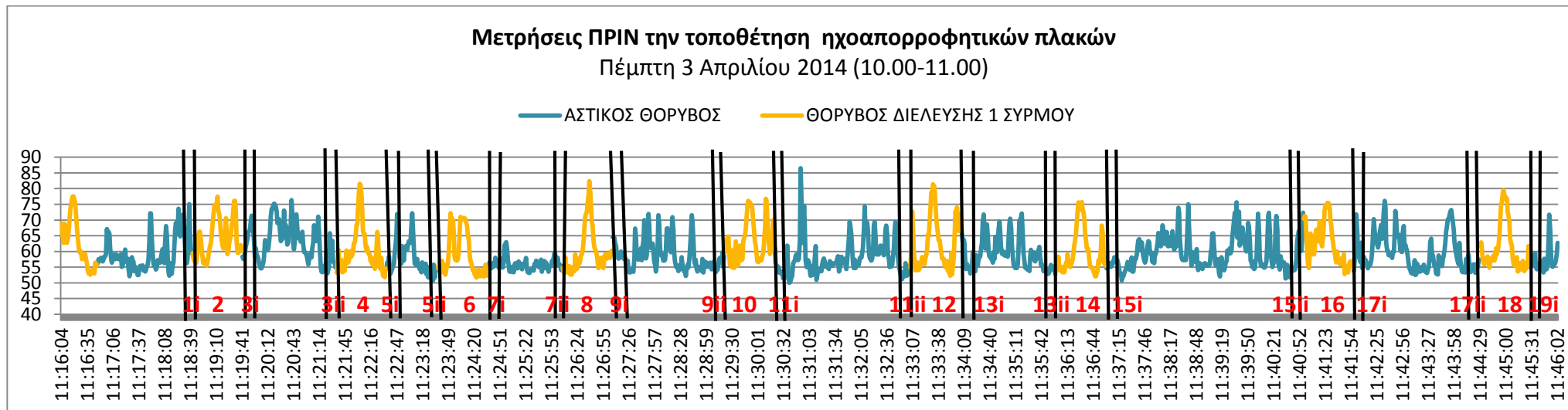
Μετρήσεις ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Τρίτη 6 Μαΐου 2014 (16.00-17.00)



Π3. Αρίθμηση διαστημάτων αστικού θορύβου και θορύβου διέλευσης ενός συρμού κατά τη επεξεργασία των μετρήσεων με τον τρόπο B2' για τα χρονοδιαγράμματα θορύβου των αντίστοιχων περιόδων μέτρησης σε τμήμα της γραμμής ΗΣΑΠ Ν. Ιωνία – Ν. Ηράκλειο

Κατά τον τρόπο B2' ως στάθμη αστικού θορύβου θεωρείται ο μέσος όρος της στάθμης θορύβου για διάστημα 20 sec πριν και μετά τη διέλευση ενός συρμού.



Μετρήσεις ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Πέμπτη 3 Απριλίου 2014 (13.00-14.00)



Μετρήσεις ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Τρίτη 6 Μαΐου 2014 (13.00-14.00)



Μετρήσεις ΠΡΙΝ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Πέμπτη 3 Απριλίου 2014 (16.00-17.00)



Μετρήσεις ΜΕΤΑ την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών πλακών

Πέμπτη 6 Μαΐου 2014 (16.00-17.00)

