



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ  
ΘΟΡΥΒΟΥ**

**ΜΑΡΙΑ ΑΡΓΥΡΙΟΥ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Βουγιούκας Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής

ΕΙΔΙΚΟΙ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ: Μπαλλής Αθανάσιος, Καθηγητής

Σωτηροπούλου Αλεξάνδρα, τ. αν. Καθηγήτρια

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Βουγιούκας Εμμανουήλ, Επ. Καθηγητής

Μπαλλής Αθανάσιος, Καθηγητής

Μπαδογιάννης Ευστράτιος, Επ. Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τους καθηγητές, των οποίων τα ονόματα αναγράφονται στο παρόν πρωτοσέλιδο, για την πολύτιμη στήριξή τους στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Ιδιαίτερος, ευχαριστώ τον καθηγητή **Μπαλλή Αθανάσιο**, ο οποίος με την ιδιότητά του ως ειδικός σύμβουλος, συνέβαλε τα μέγιστα τόσο στην πορεία όσο και στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε όλα τα χρόνια του ακαδημαϊκού μου βίου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εξετάζει μέσω μιας συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης τις διεθνώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές μείωσης θορύβου σε σιδηροδρόμους. Ακολουθώντας, έχοντας ως εφαλτήριο το θεωρητικό υπόβαθρο κάθε τεχνική, χρησιμοποιείται μια προτεινόμενη ποιοτική μεθοδολογία αξιολόγησης που έχει σαν στόχο την εύρεση των βέλτιστων λύσεων σε επίπεδο προκαταρκτικού σταδίου έρευνας για τις ηχομονωτικές μεθοδολογίες στους σταθμούς του μετρό στην Αθήνα. Το εν λόγω σύστημα αξιολόγησης έχει καθαρά ποιοτικά χαρακτηριστικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επίπεδο προκαταρκτικού σταδίου έρευνας. Τα κριτήρια που επιλέγονται για την αξιολόγηση των μεθόδων είναι το ποσοστό μείωσης των dB(A), η ασφάλεια κάθε μεθόδου, η ευκολία στην εφαρμογή της, το κόστος κατασκευής και συντήρησης, η αποδοχή από την τοπική κοινωνία και η επιρροή στο φυσικό περιβάλλον. Εξάγεται ένα πρώτο συμπέρασμα για την βέλτιστη ποιοτικά λύση που μπορεί να εφαρμοσθεί στους σιδηροδρόμους της Αθήνας. Προτείνεται για μελλοντική έρευνα η μαθηματική μοντελοποίηση του παραπάνω συστήματος ώστε να εξελιχθεί σε πολυκριτήρια ανάλυση βέλτιστης λήψης απόφασης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μείωση σιδηροδρομικού θορύβου, Ηχοπετάσματα, Φύτευση, Αττικό Μετρό

## ABSTRACT

This dissertation examines through a systematic literature review the internationally used noise reduction techniques on railways. Then, having as a starting point the theoretical background of each technique, a proposed qualitative evaluation methodology is used which aims to find the best solutions at the level of preliminary research for the sound insulation methodologies in the metro stations in Athens. This evaluation system has clear qualitative characteristics and can be used at a preliminary research level. The criteria selected for the evaluation of the methods are the percentage reduction of dB (A), the safety of each method, the ease of its application, the cost of construction and maintenance, the acceptance by the local community and the influence on the natural environment. A first conclusion is drawn for the best quality solution that can be applied to the railways of Athens. It is proposed for future research the mathematical modeling of the above system in order to develop into a multi-criteria analysis of optimal decision making.

KEY WORDS: Railway noise reduction, Sound curtains, Planting, Attiko Metro

## Περιεχόμενα

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ .....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	11
1.1. Γενικές έννοιες.....	11
1.1.1. Ηχητικά κύματα .....	12
1.1.2. Θεμελιώδεις έννοιες.....	13
1.1.3. Συχνότητα και μήκος κύματος.....	15
1.1.4. Σύνθετα κύματα .....	15
1.2.5. Ζώνες συχνοτήτων.....	16
1.2. Ακουστική Κλειστών Χώρων .....	17
1.2.1. Εισαγωγικά .....	17
1.2.2. Ανάκλαση .....	18
1.2.3. Διάθλαση.....	19
1.2.4. Περίθλαση του ήχου .....	19
1.2.5. Αντήχηση .....	20
1.2.6. Διάχυση.....	20
1.2.7. Απορρόφηση ήχου .....	21
1.2.8. Φαινόμενο του συντονισμού.....	22
1.2.9. Ηχώ .....	23
1.2.10. Πλαταγιασμός .....	25
1.3. Στοιχεία Θορύβου .....	26
1.3.1. Είδη θορύβου .....	26
1.3.2. Κριτήρια Επιλογής Θορύβου - Στόχου.....	27

1.3.3. Η φυσιολογία του αυτιού .....	28
1.3.4. Απόκριση αυτιού.....	29
1.3.5. Ακοή με τα δύο αυτιά – Προσδιορισμός κατεύθυνσης .....	30
1.3.6. Υποκειμενικές μονάδες μέτρησης .....	31
1.4. Σκοπός της έρευνας .....	32
1.5. Διάρθρωση της διπλωματικής.....	33
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	34
2.1. Εισαγωγή.....	34
2.2. Τεχνικές με επεμβάσεις στην υποδομή.....	34
2.3. Τεχνικές με επεμβάσεις στο όχημα.....	44
2.4. Η επιρροή των υλικών .....	52
2.7. Βιβλιογραφική Επισκόπηση Θεωρίας Ανάλυσης Αποφάσεων .....	54
2.8. Σύνοψη επιμέρους συμπερασμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	59
Κεφάλαιο 3. Κριτήρια αξιολόγησης μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου .....	61
3.1. Εισαγωγή.....	61
3. 2. Κριτήρια.....	61
3.3. Προτεινόμενη ποιοτική μοντελοποίηση του προβλήματος .....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μέθοδοι μετριασμού της ηχορρύπανσης στο δίκτυο μετρό και σιδηροδρόμων στην Αθήνα.....	67
4.1. Συμβατικά ηχοπετάσματα.....	67
4.2. Χρήση κατάλληλης φύτευσης.....	74
4.3. Rail Dampers – Ηχητικοί αποσβεστήρες σιδηροτροχιάς .....	80
4.4. Σύγκριση λύσεων .....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα .....	86
5.1. Γενικά Συμπεράσματα .....	86
5.2. Συμπεράσματα από τη μελέτη περίπτωσης .....	87
5.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	87

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88
APPENDIX.....	92
ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ.....	92
A.1. Building acoustics in subway railways .....	92
A.2. Special issues of acoustics in Metro stations .....	104
A.2.1. Principles for perceptive criteria .....	104
A.2.2. Principles for Spatial Orientation and Design.....	104
A.2.3. Principles for Aesthetical Criteria.....	105
A.2.4. Principles for Verbal Messages, Jingles and Signals via Speakers.....	106

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχέσεις πλάτους για ημιτονοειδείς κυματομορφές, οι οποίες ισχύουν για ημιτονοειδή κύματα ηλεκτρικής τάσης ή ρεύματος, καθώς και για ακουστικές παραμέτρους όπως ηχητική πίεση. [8].....	12
Εικόνα 2: Πορεία σωματιδίων που σχετίζονται με τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε κυκλικές, εγκάρσιες ή διαμήκεις κινήσεις [8].....	13
Εικόνα 3: Κατανομή ίδιας ηχητικής ενέργειας σε σφαιρικές επιφάνειες αυξανόμενης περιοχής με προκύπτοντα όγκος αντιστρόφως ανάλογου με το τετράγωνο της απόστασης από τη σημειακή πηγή. [8].....	14
Εικόνα 4: Απεικόνιση της γραφικής παράστασης ενός κύματος και των χαρακτηριστικών του (μήκος, χρόνος, μέγιστο πλάτος) [15].....	15
Εικόνα 5: Σύγκριση Αρμονικών (γραμμική σχέση) και Οκτάβων (λογαριθμική σχέση) [8].....	17
Εικόνα 6: Απεικόνιση του φαινομένου της ανάκλασης μεταξύ πηγής και ακροατή [84].....	18
Εικόνα 7: Απεικόνιση του φαινομένου της Περίθλασης με οριοθέτηση των κατηγοριών συχνοτήτων (υψηλές, μεσαίες, χαμηλές) [84].....	19
Εικόνα 8: Απεικόνιση του μήκους εξασθένησης (χρόνου) αναλόγως της έντασης της πηγής [4].....	20



Εικόνα 9: Οι κοίλες επιφάνειες (Α) έχουν την τάση να εστιάζουν τον ήχο, ενώ οι κοίλες (Β) έχουν την τάση να τον διαχέουν. Οι κοίλες επιφάνειες πρέπει να αποφεύγονται αν σκοπός μας είναι να πετύχουμε ήχο με καλή διάχυση [8] .....	21
Εικόνα 10: Απεικόνιση της διαφοράς κατεύθυνσης ηχητικών κυμάτων μεταξύ της απορρόφησης ήχου (μαύρα βέλη) και ανάκλασης (λευκά βέλη) [8] .....	22
Εικόνα 11: Απεικόνιση κλειστού ακουστικού σωλήνα στα άκρα και εύρεση χαρακτηριστικής συχνότητας συντονισμού. [8] .....	23
Εικόνα 12: Απεικόνιση της πορείας των κυμάτων σε κτήριο με ψηλή οροφή στο φαινόμενο της ηχούς [8].....	24
Εικόνα 13: Αποδεκτές στάθμες ηχούς για ομιλία σε συνθήκες αντήχησης [33].....	24
Εικόνα 14: Πλαταγιασμός Α. Αποφυγή παραλληλίας μεταξύ αντικρυστών παρειών ενός χώρου Β. Χρήση ηχοαπορροφητικής επένδυσης Γ. Χρήση μορφολογικών στοιχείων σε μία εκ των δύο παρειών [33].....	25
Εικόνα 15: Κριτήρια Θορύβου - Στόχου αναλόγως της στάθμης πίεσης ήχου (dB) και της συχνότητας (Hz) [9].....	27
Εικόνα 16: Ανατομία του αυτιού και απεικόνιση των εσωτερικών ιστών του [2].....	29
Εικόνα 17: Ύψος ήχου (υποκειμενική μονάδα mel) σε συσχέτιση με τη συχνότητα (Hz, φυσική μονάδα) σύμφωνα με καμπύλη που ελήφθη από ακροατές- κριτές. [8].....	29
Εικόνα 18: Απεικόνιση περιοχής ακουστότητας ανθρώπινου αυτιού μέσω 2 καμπύλων κατωφλιού, (Α) το κατώφλιο ακοή (ανιχνεύσιμοι ήχοι χαμηλής στάθμης) (Β) το κατώφλιο αίσθησης (άνω άκρο) .....	30
Εικόνα 19: Περιγράμματα ίσης ηχηρότητας του ανθρώπινου αυτιού. Σχετική έλλειψη ευαισθησίας του αυτιού σε χαμηλούς τόνους, ιδιαίτερα σε μικρότερες στάθμες ήχου [16].....	32
Εικόνα 20: Τρεις βασικοί τύποι ελαστικών υποθεμάτων μη συνδεδεμένο, συνδεδεμένο και το «αυγό της Κολωνίας» [9].....	35
Εικόνα 21: Σκαρίφημα μη συνεχόμενης πλωτής πλάκας έδρασης από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα για μήκος 1500 mm [5].....	38
Εικόνα 22 Α,Β: Μεταλλικά ηχοπετάσματα πλησίον του σταθμού ΗΣΑΠ του Μοσχάτου.....	67
Εικόνα 23: Τοποθέτηση ηχοπετασμάτων από σκυρόδεμα και ηχοαπορροφητικά υλικά στο τμήμα του προαστιακού κοντά στο Αεροδρόμιο.....	68

Εικόνα 24: Προεκτίμηση κόστους μεταλλικού ή συνθετικού ηχοπετάσματος μήκους 100m και ύψους 4m .....	70
Εικόνα 25: Εικονογράφηση του φαινομένου "φαραγγίου" και πώς μπορεί να προληφθεί με απορροφητική επένδυση .....	72
Εικόνα 26: Φύτευση ως μέσο ηχοπροστασίας συνδυαστικά με συμβατικά ηχοπετάσματα στο τμήμα του ΗΣΑΠ κοντά στο Ηράκλειο Αττικής .....	74
Εικόνα 27: Περίπτωση πτώσης κορμών στις σιδηροτροχιές του ΗΣΑΠ .....	76
Εικόνα 28: Τοποθέτηση ηχητικών αποσβεστήρων σιδηροτροχιάς στη γραμμή 1 του Αττικό Μετρό (Konstantinos Vogiatzis &, Patrick Vanhonacker, 2015).....	80
Εικόνα 29: Το DSS (decision support system) ως κατευθυντήρια γραμμή για το σχεδιασμό υπόγειων σταθμών, καθώς και για τη μέτρηση της ποιότητας των υπαρχόντων σταθμών (Durmisevic, 2001)	94
Εικόνα 30: Διάγραμμα του ACLE, ένα μοντέλο πρόβλεψης ακουστικών δεικτών σε μεγάλους υπόγειους χώρους. (Kang, 1997 (α).ong u.....	95
Εικόνα 31: Μετρημένες και προβλεπόμενες τιμές STI σε κλίμακες οκτάβων από 125 σε 4000 Hz. (Yang & Shield, 2001).....	97
Εικόνα 32: Υπολογισμός τιμών RASTI σε σταθμό μετρό «κλειστού σωλήνα» (Harrisson, 2001) ....	98
Εικόνα 33: Συσχέτιση μεταξύ προβλεπομένων και μετρώμενων τιμών STI (Wijngaarde and Verhava, 2001) .....	99
Εικόνα 34: Η κατανομή του επιπέδου θορύβου όταν λειτουργούν και οι τέσσερις ανεμιστήρες εξαερισμού σηράγγων σε πλατφόρμες ορόφους του σταθμού Sogutozu light του μετρό (Zühre Sü and Mehmet Caliskan, 2007) .....	101
Εικόνα 35: Τιμές STI πριν και μετά τις ακουστικές διορθώσεις. (Berardi et al (2015)).....	102
Εικόνα 36: Ισοδυναμίες και ποσοστό διακύμανσης των αρχικών παραγόντων - Tavros Terminal (Stavroulaki S., Travlou M and Sotiropoulou, 2008) .....	103

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

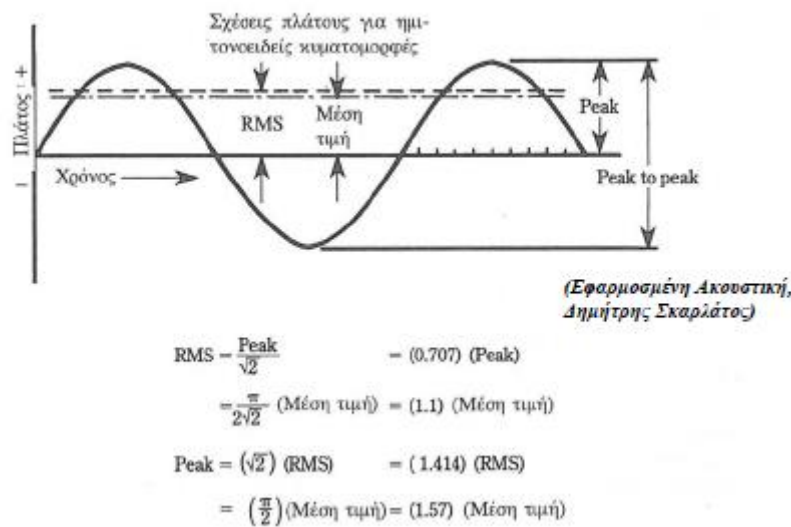
### 1.1. Γενικές έννοιες

Η ακουστική είναι η επιστήμη που εξετάζει την παραγωγή, τη διάδοση και τις εφαρμογές του ήχου. Η ακουστική είναι μια επιστήμη μεγάλου ενδιαφέροντος επειδή ο ήχος συνοδεύει σχεδόν όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Ο ήχος μπορεί να οριστεί ως κίνηση κυμάτων στον αέρα ή άλλα ελαστικά μέσα (ερέθισμα) ή ως διέγερση του μηχανισμού ακοής που οδηγεί στην αντίληψη του ήχου (αίσθηση). Ο ορισμός που ισχύει εξαρτάται από το αν η προσέγγιση είναι φυσική ή ψυχοφυσική. Το είδος του προβλήματος υπαγορεύει την προσέγγιση του ήχου. Αν το ενδιαφέρον είναι για τη διαταραχή του αέρα που δημιουργείται από ένα μεγάφωνο, τότε έχουμε πρόβλημα φυσικής. Εάν το ενδιαφέρον έγκειται στον τρόπο ακρόασης ενός ατόμου κοντά στο μεγάφωνο, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ψυχοφυσικές μέθοδοι.

Αυτές οι δύο πτυχές του ήχου παρουσιάζονται με όρους οικείους σε όσους ενδιαφέρονται για την ακουστική και τη μουσική. Η συχνότητα είναι μια ιδιότητα περιοδικών κυμάτων που μετρώνται σε Hz και μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν σε παλμογράφο ή να μετρηθούν με μετρητή συχνότητας. Το αυτί αντιλαμβάνεται διαφορετικό επίπεδο ήχου σε απαλό ήχο 100 Hz από ό, τι σε δυνατό τόνο. Καθώς αυξάνεται η ένταση, το ύψος ενός τόνου χαμηλής συχνότητας μειώνεται, ενώ το ύψος ενός τόνου υψηλής συχνότητας αυξάνεται. Δεν μπορούμε να εξισώσουμε τη συχνότητα και το ύψος, αλλά τα δύο είναι παρόμοια.

Το ίδιο ισχύει και για την ένταση και τον ήχο. Η σχέση μεταξύ τους δεν είναι γραμμική. Παρομοίως, η σχέση μεταξύ κυματομορφής (ή φάσματος) και αντιληπτής ποιότητας (ή τόνου) καθίσταται περίπλοκη από τη λειτουργία του μηχανισμού ακοής. Το ημιτονοειδές κύμα είναι μια βασική κυματομορφή που σχετίζεται στενά με την απλή αρμονική κίνηση.



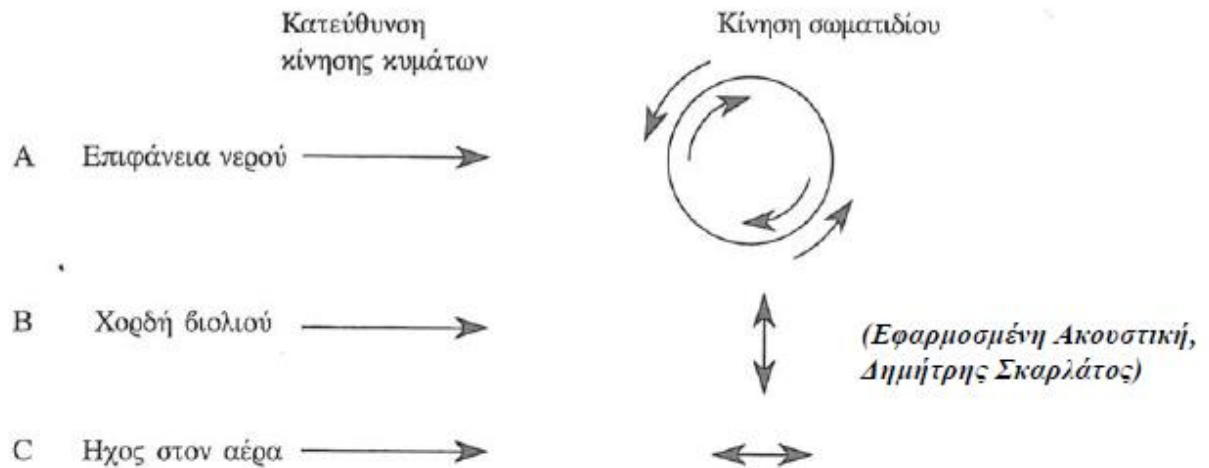
Εικόνα 1: Σχέσεις πλάτους για ημιτονοειδείς κυματομορφές, οι οποίες ισχύουν για ημιτονοειδή κύματα ηλεκτρικής τάσης ή ρεύματος, καθώς και για ακουστικές παραμέτρους όπως ηχητική πίεση. [8]

### 1.1.1. Ηχητικά κύματα

Εάν ένα σωματίδιο αέρα αφαιρεθεί από την αρχική του θέση, οι ελαστικές δυνάμεις του αέρα τείνουν να το επαναφέρουν στην αρχική του θέση. Λόγω της αδράνειας του, το σωματίδιο ταξιδεύει στη θέση ηρεμίας του, ενεργοποιώντας ελαστικές δυνάμεις στην αντίθετη κατεύθυνση και ούτω καθεξής. Ο ήχος διαδίδεται εύκολα σε αέρια, υγρά και στερεά όπως ο αέρας, το νερό, ο χάλυβας, το σκυρόδεμα κ.λπ., τα οποία είναι ανθεκτικά.

Χωρίς τα μέσα διάδοσης, ο ήχος δεν μπορεί να αναπαραχθεί. Ο ήχος διαδίδεται στα αέρια μόνο με διαμήκη κύματα, ενώ στα υγρά με διαμήκη και επιφανειακά κύματα. Στα στερεά, ο ήχος διαδίδεται σε όλους τους τύπους κυμάτων. Στα διαμήκη κύματα η ταχύτητα διάδοσης με τον ρυθμό ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο του ηχητικού κύματος είναι παράλληλη. Εγκάρσια είναι τα κύματα στα οποία η ταχύτητα διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου είναι κάθετη.

Επιφανειακά κύματα είναι αυτά που διαδίδονται στην ελεύθερη επιφάνεια στερεών και τα σωματίδια του μέσου διάδοσης οριοθετούν ελλειπτικές τροχιές με τον μεγάλο άξονα κάθετο στην επιφάνεια και κεντράρουν τη θέση ισορροπίας.



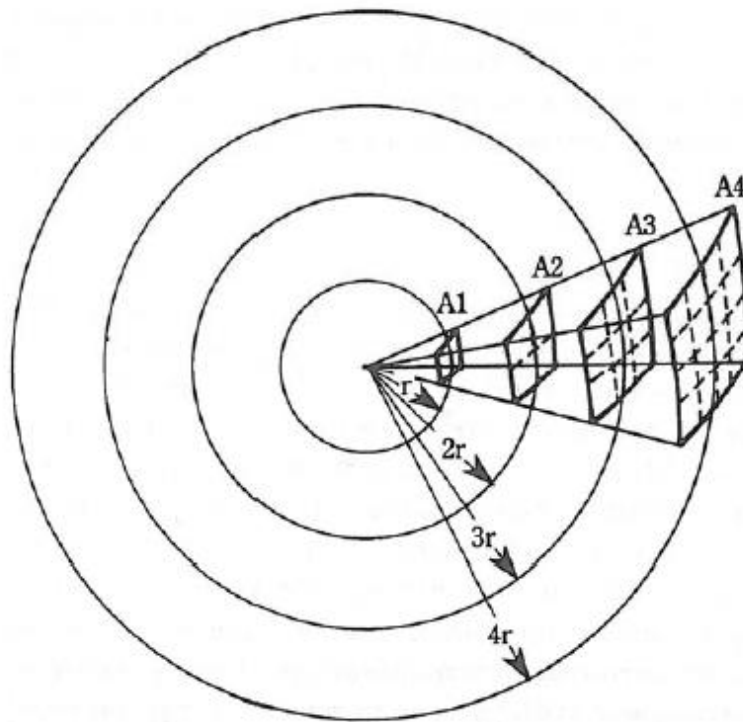
Εικόνα 2: Πορεία σωματιδίων που σχετίζονται με τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε κυκλικές, εγκάρσιες ή διαμήκεις κινήσεις [8]

### 1.1.2.Θεμελιώδεις έννοιες

α) Η πηγή είναι το μέσο παραγωγής των ηχητικών κυμάτων. Τα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με την παραγωγή ήχου είναι: [8]

- Δυνάμεις ή ροπές που αλλάζουν αντικείμενα (π.χ. θόρυβος πρόσκρουσης).
- Δυνάμεις ή ροπές δυνάμεων που αλλάζουν ρευστά (π.χ. θόρυβος έλικας).
- Διακύμανση της ροής μάζας σε ελαστικό μέσο (π.χ. θόρυβος εκτόξευσης).

Η ένταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου ορίζει ότι ο όγκος στο ελεύθερο πεδίο είναι αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή.



Εικόνα 3: Κατανομή ίδιας ηχητικής ενέργειας σε σφαιρικές επιφάνειες αυξανόμενης περιοχής με προκύπτοντα όγκος αντιστρόφως ανάλογου με το τετράγωνο της απόστασης από τη σημειακή πηγή. [8]

Από άποψη παραγωγής ο ήχος διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1) Κτυπογενής : είναι ο ήχος που προέρχεται από ταλαντούμενες επιφάνειες

2) Αεροδυναμικός: είναι ο ήχος που παράγεται από τις διακυμάνσεις της πίεσης σε μη στρωτή ροή ρευστών (π.χ. θόρυβος ακροφυσίων).

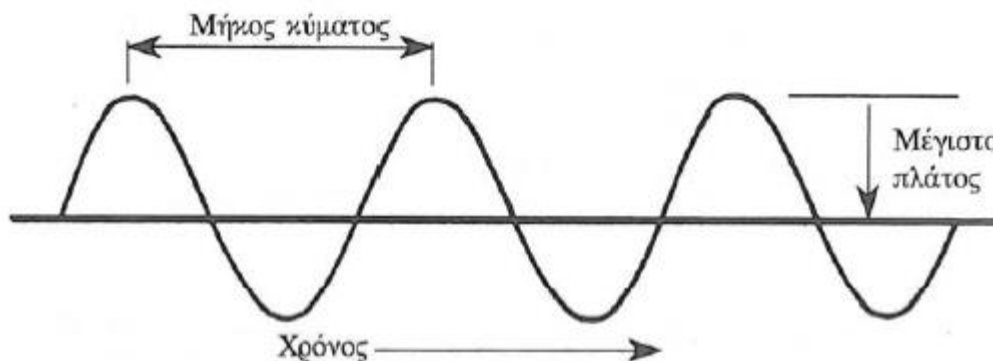
β) Το μέσο διάδοσης είναι ένα ελαστικό μέσο που μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Η κυματική φύση του ήχου – ο ήχος μεταδίδεται με μηχανικά κύματα- κάνει απαραίτητη την ύπαρξη του μέσου διάδοσης.

γ) Ο δέκτης είναι το αισθητήριο (ανθρώπινο αυτί, μικρόφωνο) που διεγείρεται από τις μεταβολές της πίεσης που δημιουργεί ο ήχος στο μέσο διάδοσης. [8]

### 1.1.3. Συχνότητα και μήκος κύματος

Μήκος κύματος είναι η απόσταση κατά την οποία μετακινείται το κύμα μέσα στον χρόνο που χρειάζεται για να συμπληρωθεί μια περίοδος. Το μήκος κύματος μπορεί να μετρηθεί μεταξύ διαδοχικών κορυφών ή μεταξύ οποιονδήποτε αντίστοιχων σημείων μέσα σε μια περίοδο. Αυτό ισχύει και για περιοδικά κύματα διαφορετικά από τα ημιτονοειδή. Συχνότητα είναι το πλήθος των περιόδων ανά δευτερόλεπτο (ή hertz). Η συχνότητα και το μήκος κύματος συνδέονται ως εξής:

- Μήκος κύματος είναι η απόσταση κατά την οποία κινείται ένα κύμα στον χρόνο που χρειάζεται να συμπληρωθεί μια περίοδος. Μπορεί να εκφραστεί σαν η απόσταση από ένα σημείο σε περιοδικό κύμα μέχρι το αντίστοιχο σημείο της επόμενης περιόδου του κύματος. [15]



Εικόνα 4: Απεικόνιση της γραφικής παράστασης ενός κύματος και των χαρακτηριστικών του (μήκος, χρόνος, μέγιστο πλάτος) [15]

### 1.1.4. Σύνθετα κύματα

Οι κυματομορφές ομιλίας και μουσικής διαφέρουν ριζικά από την απλή ημιτονοειδή κυματομορφή. Ωστόσο, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του κύματος, αυτό μπορεί να αναλυθεί σε ημιτονοειδείς συνιστώσες, όσο διατηρείται σταθερό. Το αντίστροφο είναι ότι, θεωρητικά, οποιοδήποτε σύνθετο περιοδικό κύμα μπορεί να συντεθεί από ημιτονοειδή κύματα διαφορετικών συχνοτήτων, διαφορετικών πλάτων και διαφορετικών χρονικών σχέσεων (φάσεων).

Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας. Ακουστική ισχύς πηγής είναι η ακουστική ενέργεια που εκπέμπει η πηγή ανά μονάδα

χρόνου προς όλες τις διευθύνσεις. Ως συχνότητα του ήχου ορίζεται η συχνότητα ταλάντωσης τωνωματιδίων του μέσου διάδοσης

### 1.2.5. Ζώνες συχνοτήτων

Λόγω του ότι οι ακουστικές ιδιότητες των υλικών αλλά και η απόκριση του συστήματος πηγή – μέσο διάδοσης- δέκτης δεν είναι ούτε σταθερή ούτε καν γραμμική σε σχέση με την συχνότητα, για την μελέτη ενός ακουστικού

φαινομένου απαιτείται η μελέτη σε όλες τις συχνότητες του ακουστικού φάσματος. η μελέτη αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα και για τον λόγο αυτό όλη η περιοχή των συχνοτήτων χωρίζεται σε διαδοχικές περιοχές που ονομάζονται ζώνες συχνοτήτων (bands), ή φασματικές ζώνες. Οι ζώνες μπορεί να έχουν σταθερό ή μεταβλητό εύρος.

Κάθε ζώνη μεταβλητού εύρους περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες μεταξύ  $f_1$  και  $f_2$  χαρακτηρίζεται δε από τις δύο πλευρικές συχνότητες  $f_1$ ,  $f_2$  και την κεντρική  $f_0$  που είναι ο γεωμετρικός μέσος των πλευρικών δηλαδή:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1)$$

Το εύρος ζώνης στην περίπτωση αυτή μεταβάλλεται λογαριθμικά στις διαδοχικές ζώνες.

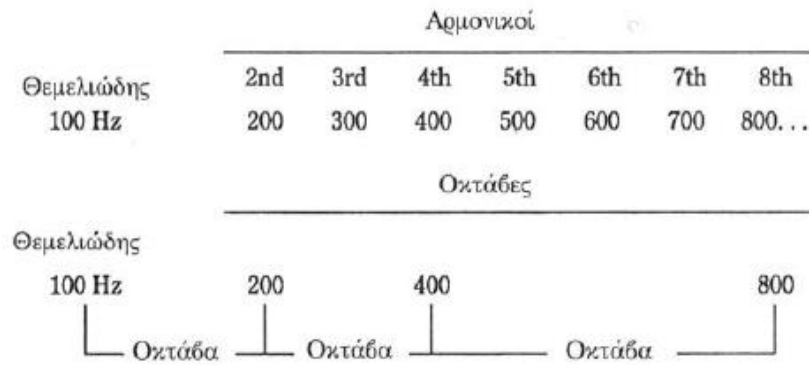
Όταν χρησιμοποιούμε ζώνες σταθερού εύρους και γραμμική κλίμακα συχνοτήτων, ως κεντρική συχνότητα χρησιμοποιούμε την αριθμητική μέση τιμή των ακραίων συχνοτήτων:

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (2)$$

Από τις σπουδαιότερες ζώνες είναι οι οκτάβες, οι τριτοοκτάβες και οι δεκατοοκτάβες. Οι ζώνες αυτές ορίζονται έτσι ώστε ο λόγος της μεγαλύτερης πλευρικής προς την μικρότερη να είναι ίσος με  $2^{1/2}, 2^{1/3}, 2^{1/10}$  αντίστοιχα. Δηλαδή έχουμε οκτάβες όταν:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (3)$$





Εικόνα 5: Σύγκριση Αρμονικών (γραμμική σχέση) και Οκτάβων (λογαριθμική σχέση) [8]

Λόγω του ότι το εύρος των μεγεθών της ακουστικής είναι πολύ μεγάλο, η χρήση λογαριθμικών κλιμάκων είναι πιο εύχρηστη. Για την μέτρηση συνεπώς των μονάδων που σχετίζονται με την ακουστική χρησιμοποιούμε λογαριθμικές μονάδες που ονομάζονται γενικά στάθμες. Μία τέτοια μονάδα είναι η μονάδα decibel.

Η μονάδα Decibel ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου μιας αδιάστατης ποσότητας. Αδιάστατες ποσότητες είναι ο λόγος δύο ομοειδών ποσοτήτων π.χ. ισχύων, εντάσεων. Γενικά η μονάδα Decibel ορίζεται από τη σχέση ( $K_1, K_{ref}$  δύο τιμές ίδιου μεγέθους):

$$A = 10 \log \frac{k_1}{k_{ref}} \quad (4)$$

## 1.2. Ακουστική Κλειστών Χώρων

### 1.2.1. Εισαγωγικά

Όταν μελετάμε την ακουστική των κλειστών χώρων θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας την κυματική φύση του ήχου. Οι διαστάσεις του χώρου και η συχνότητα του ήχου είναι οι δυο βασικότεροι παράγοντες που σχετίζονται με την ακουστική συμπεριφορά του χώρου. Οι χώροι όσον αφορά την ακουστική τους διακρίνονται σε μικρούς, μεγάλους και πολύ μεγάλους. Ένας χώρος θεωρείται μεγάλος όταν η μικρότερη διάσταση του είναι τουλάχιστον δυο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που μας ενδιαφέρει. Ο ίδιος χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν οι αποστάσεις των επιφανειών που ορίζουν το χώρο είναι τόσο μεγάλες ώστε η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα να είναι σημαντική.

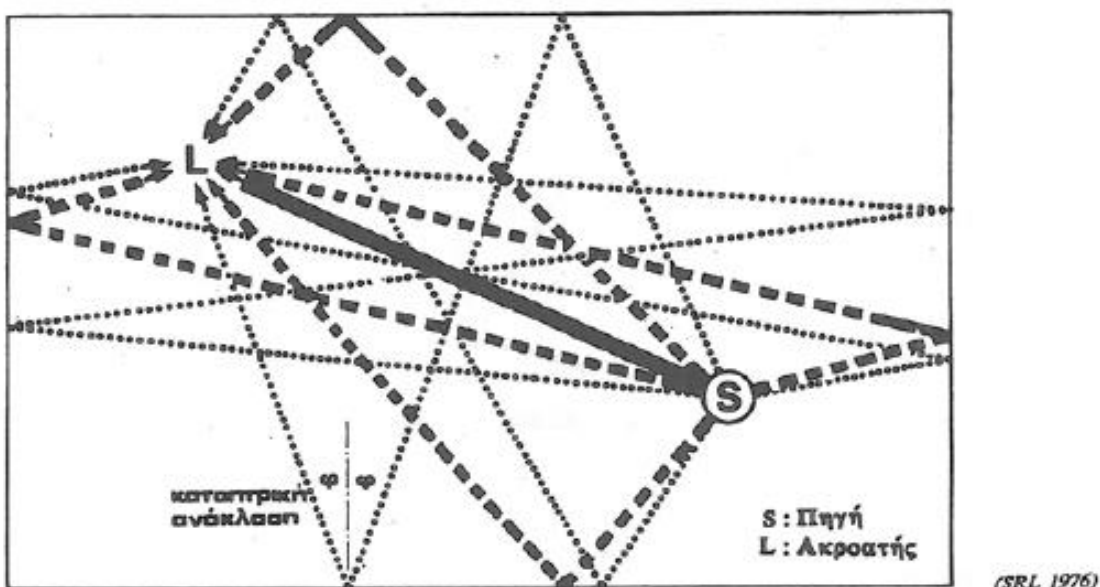
Στην ακουστική των μεγάλων χώρων, ή αλλιώς ακουστική υψηλών συχνοτήτων η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με την βοήθεια της στατιστικής ακουστικής κι αυτό γιατί τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ «μπλεγμένα».

Στην ακουστική των μικρών χώρων, ή ακουστική μικρών συχνοτήτων οι στατιστικοί υπολογισμοί πολλές φορές δίδουν μεγάλες αποκλίσεις από τις μετρούμενες τιμές, διότι τα κυματικά φαινόμενα όπως αυτό της συμβολής είναι πολύ έντονα.

Όταν σε ένα δωμάτιο ή γενικά σε έναν κλειστό χώρο υπάρχει μια ηχητική πηγή, τα φαινόμενα που σχετίζονται με την ακουστική συμπεριφορά του χώρου είναι: η ανάκλαση του ήχου, ο συντονισμός του χώρου, ο χρόνος αντήχησης και η διάδοση του ήχου. [8]

### 1.2.2. Ανάκλαση

Όταν η πηγή βρίσκεται σε μικρό σχετικά ύψος πάνω από το έδαφος, τότε αυτό ανακλά τον ήχο και στο σημείο λήψης έχουμε το φαινόμενο της συμβολής του απ' ευθείας διαδιδόμενου ήχου με τον ανακλώμενο. Στην περίπτωση που ο εκπεμπόμενος ήχος είναι τόνος τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορά φάσης. Στην γενική όμως περίπτωση εκπομπής θορύβου ευρέως φάσματος η πηγή και η εικόνα της συμπεριφέρονται ως ασυσχέτιστες, οπότε λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις πυκνότητες ενέργειας..



Εικόνα 6: Απεικόνιση του φαινομένου της ανάκλασης μεταξύ πηγής και ακροατή [84]

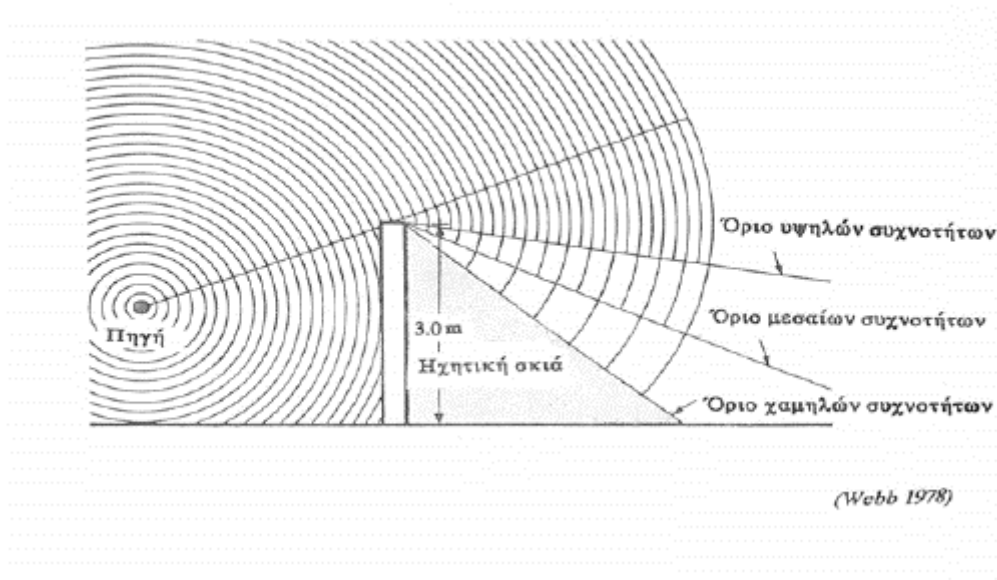
### 1.2.3. Διάθλαση

Το υπόλοιπο της ισχύος του κύματος εισχωρεί στο μέσο II όπου υφίσταται μια αλλαγή της πορείας του και δημιουργείται έτσι το φαινόμενο της διαθλάσεως.

Ισχύει και εδώ ο νόμος της διαθλάσεως δηλ. η διαθλώμενη ακτίνα βρίσκεται στο κάθετο επίπεδο της επιφάνειας και ο λόγος του ημίτονου της γωνίας διάθλασης προς το ημίτονο της γωνίας προσπτώσεως είναι σταθερός και καλείται συντελεστής διάθλασης δηλ. Συντελεστής διάθλασης  $= \frac{\sin\theta}{\sin\pi} = \frac{\text{ταχύτητα μέσου I}}{\text{ταχύτητα μέσου II}}$ . [8]

### 1.2.4. Περίθλαση του ήχου

Ο ήχος όπως ακριβώς και το φως παρουσιάζει το φαινόμενο της περίθλασης δηλαδή μεταδίδεται ακόμη και όταν μεταξύ της πηγής και του δέκτη παρεμβάλλεται επιφάνεια περιορισμένων διαστάσεων με πολλή μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) ηχομείωση. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι ιδιαίτερα αισθητό στην ακουστική διότι το μήκος κύματος του ήχου είναι σχετικά μεγάλο. Επιφάνειες όπως οι πόρτες τα μισάνοικτα παράθυρα παρουσιάζουν έντονα το φαινόμενο αυτό. Το φαινόμενο της περίθλασης περιορίζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των ηχοφραγμάτων. [8]



Εικόνα 7: Απεικόνιση του φαινομένου της Περίθλασης με οριοθέτηση των κατηγοριών συχνοτήτων (υψηλές, μεσαίες, χαμηλές) [84]

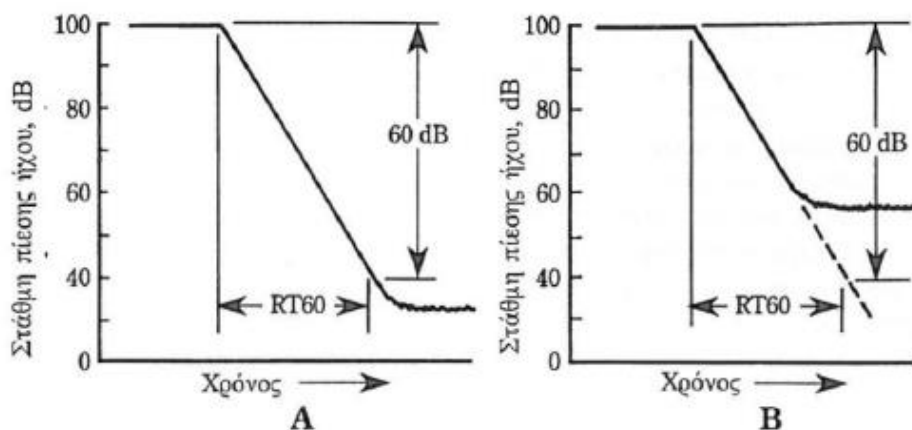
### 1.2.5. Αντήχηση

Η στάθμη στο χώρο μετά τον μηδενισμό της πηγής δεν μηδενίζεται ακαριαία αλλά λόγω των διαφορετικών ανακλάσεων στα τοιχώματα του χώρου φθίνει εκθετικά με το χρόνο. Όταν η ενέργεια εκφράζεται σε μονάδες Decibel που είναι μέγεθος λογαριθμικό, η κλίση της καμπύλης μείωσης της στάθμης είναι ευθεία γραμμή.

Αυτό το ρυθμό μείωσης τον μετράμε με το χρόνο αντήχησης, που ορίζεται ως εξής:

Χρόνος αντήχησης  $T_{60}$  (Reverberation Time) Ως χρόνος αντήχησης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου ( $L_p$ ) σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60 dB, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή.

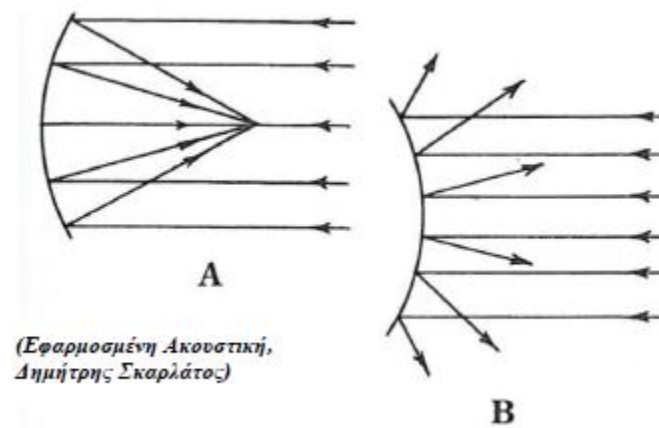
Το μήκος της εξασθένησης εξαρτάται από την ένταση της πηγής και από την στάθμη θορύβου. Στην πράξη σπάνια έχουμε πλήρη εξασθένηση 60 dB. Για τον καθορισμό του χρόνου αντήχησης προεκτείνεται η περιορισμένη εξασθένηση. [4]



Εικόνα 8: Απεικόνιση του μήκους εξασθένησης (χρόνου) αναλόγως της έντασης της πηγής [4]

### 1.2.6. Διάχυση

Σε υψηλές κυρίως συχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι μικρό, σε κάποιο χώρο που δεν περιλαμβάνει πηγή, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο ήχος αποτελείται από επίπεδα κύματα που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με ίδια πιθανότητα. Αν το μέσο τετράγωνο της πίεσης για κάθε επίπεδο κύμα έχει την ίδια μέση τιμή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση, τότε ο ήχος ονομάζεται διάχυτος. [8]



Εικόνα 9: Οι κοίλες επιφάνειες (A) έχουν την τάση να εστιάζουν τον ήχο, ενώ οι κοίλες (B) έχουν την τάση να τον διαχέουν. Οι κοίλες επιφάνειες πρέπει να αποφεύγονται αν σκοπός μας είναι να πετύχουμε ήχο με καλή διάχυση [8]

### 1.2.7. Απορρόφηση ήχου

Η απορρόφηση του ήχου από τα τοιχώματα παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στην ακουστική των χώρων. Η απορρόφηση αυτή οφείλεται κυρίως σε δύο φαινόμενα: [8]

1) Καθώς το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Έχουμε δηλαδή μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική.

2) Το ηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται. Ο συντελεστής απορρόφησης που εκφράζει την απορρόφηση, εξαρτάται από το είδος της επιφάνειας, και για την ίδια επιφάνεια από τη συχνότητα του ήχου και από την γωνία πρόσπτωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία πρόσπτωσης είναι άγνωστη ή μπορεί να μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται ο στατικός συντελεστής απορρόφησης  $\alpha_{ST}$ .

Ο στατικός συντελεστής απορρόφησης ορίζεται ως ο λόγος της απορροφούμενης ενέργειας από μία απείρων διαστάσεων επιφάνεια προς την προσπίπτουσα όταν το ηχητικό πεδίο είναι διάχυτο. Η μέτρηση ενός τέτοιου συντελεστή είναι δύσκολη διότι ένα διάχυτο 100% πεδίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί.

Ο συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine, που υπολογίζεται με τοποθέτηση των προς μέτρηση υλικών σε ένα χώρο με υψηλή απορροφητικότητα όπου το πεδίο είναι σχεδόν 100% διάχυτο. Για τον πλήρη καθορισμό της ηχοαπορροφητικότητας μιας επιφάνειας καθορίζεται ο συντελεστής απορρόφησης για κάθε κεντρική συχνότητα 1/1 οκτάβας ή 1/3 οκτάβας από τα 125 έως τα 8000Hz.

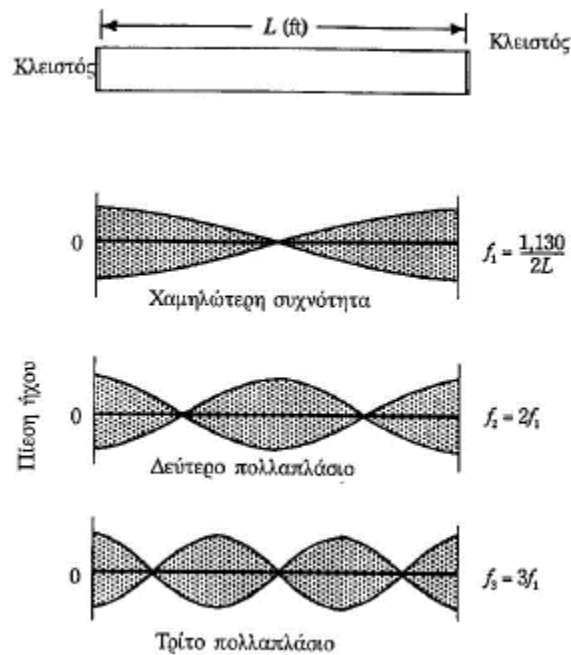


Εικόνα 10: Απεικόνιση της διαφοράς κατεύθυνσης ηχητικών κυμάτων μεταξύ της απορρόφησης ήχου (μαύρα βέλη) και ανάκλασης (λευκά βέλη) [8]

### 1.2.8. Φαινόμενο του συντονισμού

Σε πολύ μικρές συχνότητες η σκληρότητα των υλικών τα εμποδίζει να ταλαντώνονται. Ο συνδυασμός στις σκληρότητας με τη μάζα των τοιχωμάτων δρα στις το σύστημα μάζας-ελατηρίου, με συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Για ορισμένες συχνότητες συμβαίνει συντονισμός του διαδιδόμενου ήχου με την ταλάντωση των τοιχωμάτων και για το λόγο αυτό έχουμε μέγιστη απορρόφηση ενέργειας, με συνέπεια τη μείωση στις ηχομονωτικής ικανότητας του χωρίσματος.

Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται φαινόμενο συντονισμού, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μερικών βυθισμάτων στις χαμηλές κυρίως συχνότητες στην καμπύλη που εκφράζει με την ηχομονωτική ικανότητα των υλικών συναρτήσει της συχνότητας.

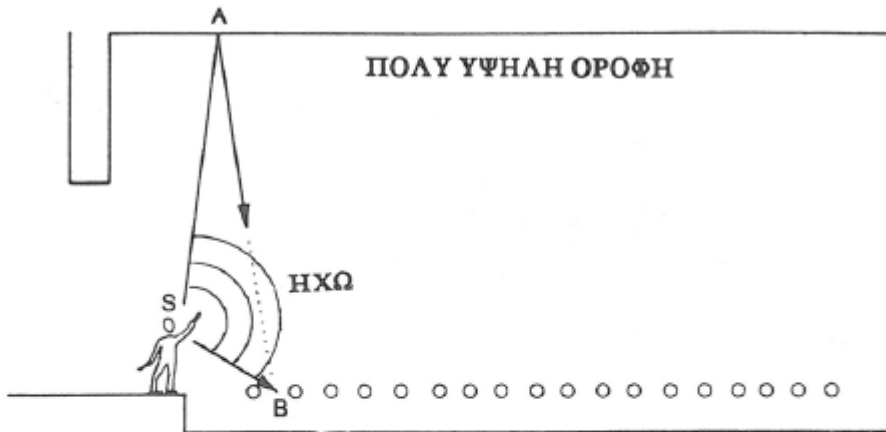


Εικόνα 11: Απεικόνιση κλειστού ακουστικού σωλήνα στα άκρα και εύρεση χαρακτηριστικής συχνότητας συντονισμού. [8]

### 1.2.9. Ηχώ

Αν από μία πηγή που βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο εκπνευθεί ένας ήχος, ο ήχος αυτός γίνεται αμέσως ακουστός από κάποιον που βρίσκεται στον ίδιο χώρο. Αν αμέσως μετά ακουστεί το ανακλώμενο ηχητικό σήμα σαν ξεχωριστό ηχητικό γεγονός, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηχώ. Η ηχώ είναι τελείως διαφορετικό φαινόμενο από την αντήχηση κατά την οποία η ανάκλαση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ξεχωριστό γεγονός. Η ηχώ καταστρέφει την καλή ακουστική των χώρων διότι η επικοινωνία γίνεται δύσκολη ή αλλοιώνεται ο ρυθμός της μουσικής. Γενικά έχουμε το φαινόμενο της ηχούς όταν η ανάκλαση σε σχέση με τον απ' ευθείας ήχο καθυστερεί κατά 30-40 ms.

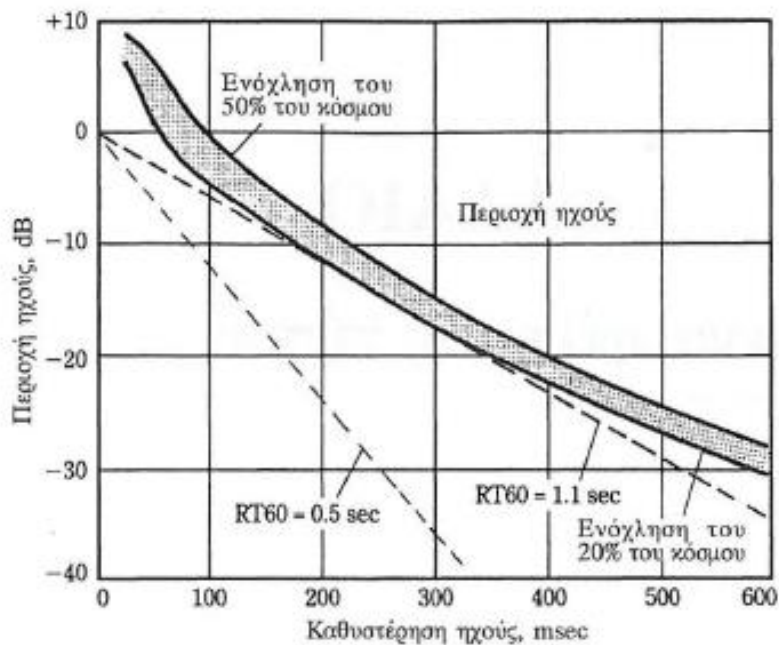
Ωστόσο όμως η εμφάνιση της ηχούς δεν εξαρτάται μόνο από τη χρονική καθυστέρηση αλλά και άλλους παράγοντες όπως η κατεύθυνση πρόσπτωσης σε σχέση με την ανακλώμενη, τη στάθμη της ανακλώμενης κ.λ.π.



(Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου  
1996. Εμβάθυνση στο  
Σχεδιασμό Χώρων Ακρόασης.  
Εκδόσεις ΕΜΠ.)

$$[(SAB)-(SB)] \geq \left\{ \begin{array}{l} 14.0 \text{ m (ομιλία)} \\ 34.0 \text{ m (μουσική)} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{ΗΧΩ}$$

Εικόνα 12: Απεικόνιση της πορείας των κυμάτων σε κτήριο με ψηλή οροφή στο φαινόμενο της ηχούς [8]



(Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου  
1996. Εμβάθυνση στο  
Σχεδιασμό Χώρων Ακρόασης.  
Εκδόσεις ΕΜΠ.)

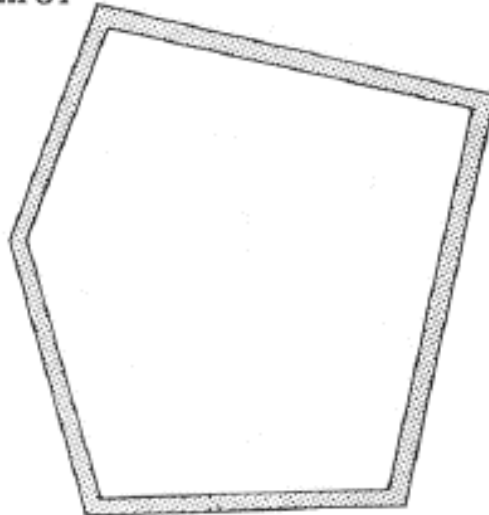
Εικόνα 13: Αποδεκτές στάθμες ηχούς για ομιλία σε συνθήκες αντήχησης [33]



### 1.2.10.Πλαταγισμός

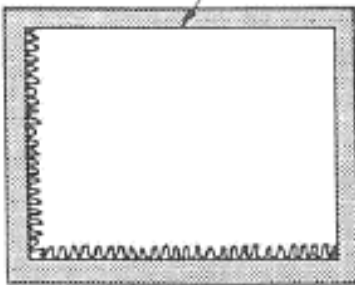
Πλαταγισμός είναι ένα άκουσμα (αίσθημα) μίας επαναλαμβανόμενης ανάκλασης ηχητικών κυμάτων μεγάλης έντασης..

#### 1. ΑΠΟΦΥΓΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΝΤΙΚΡΥΣΤΩΝ ΠΑΡΕΙΩΝ ΕΝΟΣ ΧΩΡΟΥ

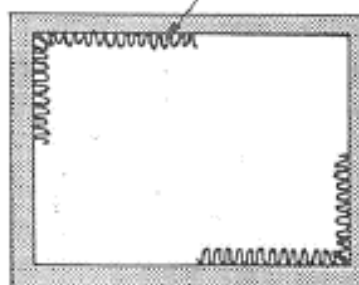


#### 2. Χρήση ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΚ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΠΑΡΕΙΩΝ

ανακλαστική επιφάνεια



ηχοαπορροφητική επένδυση



#### 3. ΧΡΗΣΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΜΙΑ ΕΚ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΠΑΡΕΙΩΝ (ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΧΥΤΟΥ ΗΧΟΥ)

(Egan 1972)

Εικόνα 14: Πλαταγισμός Α.Αποφυγή παραλληλίας μεταξύ αντικρυστών παρειών ενός χώρου Β. Χρήση ηχοαπορροφητικής επένδυσης Γ. Χρήση μορφολογικών στοιχείων σε μία εκ των δύο παρειών [33]

### 1.3.Στοιχεία Θορύβου

#### 1.3.1.Είδη θορύβου

Θόρυβος είναι κάθε ανεπιθύμητος ήχος. Ο θόρυβος γενικά επιδρά δυσμενώς στον άνθρωπο. Οι επιδράσεις του θορύβου συνοψίζονται στα εξής κυρίως φαινόμενα: [8]

1. Ενόχληση
2. Επικάλυψη θορύβου
3. Απώλεια ακοής
4. Παθολογικές βλάβες, κόπωση
5. Μείωση στην απόδοση κατά την εργασία

Ο θόρυβος οφείλεται στις ηχητικές συνθήκες του χώρου και προκαλείται από την συμβολή πολλών ηχογόνων παραγόντων (άνεμος, τροχαία κίνηση, βιομηχανία, ανθρώπινες δραστηριότητες)

Λευκός θόρυβος είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων που ενδιαφέρει και σταθερή φασματική πυκνότητα.

Η στάθμη ζώνης για το λευκό θόρυβο εκτός από τη φασματική στάθμη (που για το λευκό θόρυβο είναι σταθερή ανεξάρτητα από τη συχνότητα του ήχου), περιλαμβάνει και την ποσότητα  $10 \log \Delta f$ , όπου  $\Delta f$  το εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό για τις διαδοχικές οκτάβες διπλασιάζεται σύμφωνα με τον ορισμό συνεπώς η στάθμη ζώνης του λευκού θορύβου θα παρουσιάζει μία αύξηση +3dB/οκτάβα.

Ροζ θόρυβος είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη σταθερού σχετικού ζωνικού εύρους.

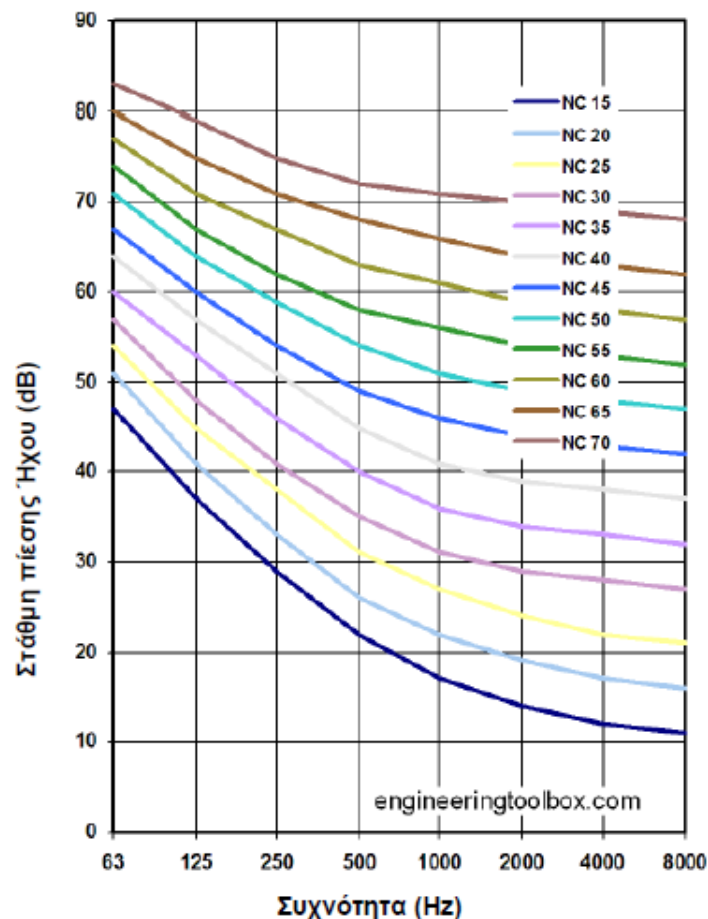
Το φάσμα του ροζ θορύβου όταν αυτό ληφθεί με φίλτρα σταθερού εύρους ή ψηφιακά μέσω FFT λόγω της παραπάνω ιδιότητας θα αποτελείται από μία ευθεία γραμμή με κλίση -3dB/οκτάβα. Όταν το φάσμα ληφθεί μέσω φίλτρων μεταβλητού εύρους λόγω του ότι το εύρος των φίλτρων αυξάνει με τη συχνότητα με ρυθμό αντίστροφο από ότι ελαττώνεται το τετράγωνο της rms πίεσης τότε οι τιμές του φάσματος που αντιστοιχούν στις κεντρικές συχνότητες των διαφόρων ζωνών θα βρίσκονται σε ευθεία γραμμή παράλληλη με τον άξονα των συχνοτήτων.

Θόρυβος περιβάλλοντος είναι ο θόρυβος που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές που δεν μας ενδιαφέρουν κατά τη στιγμή της μέτρησης. Παράδειγμα τέτοιου θορύβου είναι ο θόρυβος ενός κλιματιστικού μηχανήματος σε αίθουσα διδασκαλίας.

Θόρυβος βάθους ονομάζεται ο θόρυβος που εκπέμπεται από όλες τις πηγές που βρίσκονται στο περιβάλλον και δεν μας ενδιαφέρουν. Ο θόρυβος περιβάλλοντος είναι μέρος του θορύβου βάθους.

### 1.3.2.Κριτήρια Επιλογής Θορύβου - Στόχου

Η περισσότερο σημαντική απόφαση σχετικά με τον θόρυβο υποβάθρου είναι η επιλογή του στόχου για τη στάθμη θορύβου. Η σχεδόν αποκλειστική προσέγγιση στο θέμα αυτό περιέχεται στην οικογένεια καμπυλών Σταθμισμένου Κριτηρίου Θορύβου Στόχου (Balanced Noise Criterion). Η επιλογή ενός από τα περιγράμματα αυτά δημιουργεί τον στόχο της μέγιστης επιτρεπτής στάθμης πίεσης ήχου σε κάθε ζώνη οκτάβας. Αν ο στόχος θορύβου μπει στην μορφή αυτή, μπορεί να ελέγχεται εύκολα από όργανα. Η κατωφερική κλίση των περιγραμμάτων αυτών δείχνει αφενός την μικρότερη ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού στις χαμηλές συχνότητες και αφ' ετέρου το γεγονός ότι περισσότεροι θόρυβοι με κατανεμημένη ενέργεια πέφτουν με την συχνότητα. Για να καθορίσουμε αν ο θόρυβος σε δεδομένο δωμάτιο ικανοποιεί το επιλεγμένο περίγραμμα στόχου, λαμβάνονται οι ενδείξεις της στάθμης πίεσης ήχου σε κάθε οκτάβα. [9]



Εικόνα 15:Κριτήρια Θορύβου - Στόχου αναλόγως της στάθμης πίεσης ήχου (dB) και της συχνότητας (Hz) [9]

### 1.3.3. Η φυσιολογία του αυτιού

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την απόκριση κάθε ατόμου στην επίδραση του θορύβου πρέπει να γνωρίζουμε την λειτουργία του αισθητηρίου της ακοής.

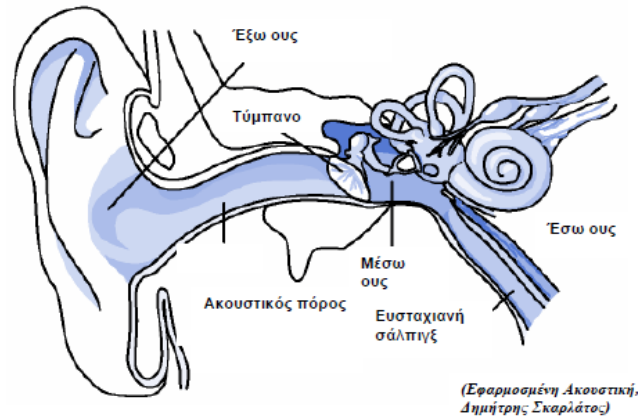
Το αισθητήριο της ακοής για τον άνθρωπο είναι το αυτί. Η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή του μικροφώνου μεμβράνης, διαφέρει όμως ως προς την καμπύλη απόκρισής του. Ενώ η καμπύλη απόκρισης ενός καλού μικροφώνου είναι ευθεία σε όλες τις συχνότητες, η καμπύλη απόκρισης του αυτιού δεν είναι. Το αυτί για ευνόητους λόγους είναι πιο ευαίσθητο σε συχνότητες κοντά στις συχνότητες της ανθρώπινης ομιλίας και λιγότερο σε άλλες.

Το αυτί αποτελείται από τρία μέρη: Το εξωτερικό, το μέσο και το εσωτερικό αυτί. Το εξωτερικό αυτί αποτελείται από την κόγχη και τον ακουστικό πόρο. Η κόγχη συγκεντρώνει το ηχητικό κύμα και το μεταφέρει στον ακουστικό πόρο.

Η σημασία του μηχανισμού του εξωτερικού αυτιού είναι να προσαρμόζει την μηχανική σύνθετη αντίσταση του τύμπανου στην ειδική σύνθετη αντίσταση του αέρα. Η προσαρμογή αυτή είναι πολύ καλή στην συχνότητα των 800 Hz, παραμένει καλή σε μεγαλύτερες συχνότητες αλλά είναι μικρή σε συχνότητες κάτω από 400Hz. Η καμπύλη του συντονισμού είναι αρκετά ευρεία με αποτέλεσμα να έχουμε μία αύξηση της ηχητικής πίεσης κατά 10 dB στο τύμπανο. [8]

Το μέσο από το εξωτερικό αυτί χωρίζεται με το τύμπανο. Ο ήχος διεγείρει το τύμπανο σε ταλάντωση (στα 1000Hz το χαμηλότερο πλάτος της ταλάντωσης που μπορεί να ανιχνευθεί είναι μόλις το ένα δέκατο της διαμέτρου του μορίου του υδρογόνου) και το ερέθισμα μεταφέρεται μηχανικά στο εσωτερικό αυτί στον κοχλία, μέσω τριών οστών, της σφύρας, του άκμονα και του αναβολέα. Στον κοχλία γίνεται η ανάλυση του ήχου. Κατά μήκος του κοχλία υπάρχει μία μεμβράνη, η βασική μεμβράνη που φέρει 23.000-24.000 νευρικές απολήξεις με την μορφή τριχιδίων. Το κάθε τριχίδιο της μεμβράνης του κοχλία συντονίζεται σε μία συγκεκριμένη συχνότητα ενώ όλη η μεμβράνη ταλαντώνεται και το ερέθισμα που είναι μία πιεζοηλεκτρική τάση μεταφέρεται στον εγκέφαλο μέσω νεύρων, όπου προκαλείται το ανάλογο αίσθημα. Αν κάποιο όργανο που μεταφέρει το ηχητικό ερέθισμα πάθει κάποια βλάβη, τότε αυτό θα έχει σαν συνέπεια την αλλοίωση του ερεθίσματος που φτάνει στον εγκέφαλο.

Γενικά δεχόμαστε ότι η αναγνώριση της συχνότητας γίνεται από τον συντονισμό των τριχιδίων, ενώ η αναγνώριση της έντασης από το πλάτος ταλάντωσης της μεμβράνης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η απόσταση (από το τέλος του κοχλία) του σημείου που συντονίζεται σε κάποια συχνότητα είναι ανάλογη με την λογάριθμο της συχνότητας.



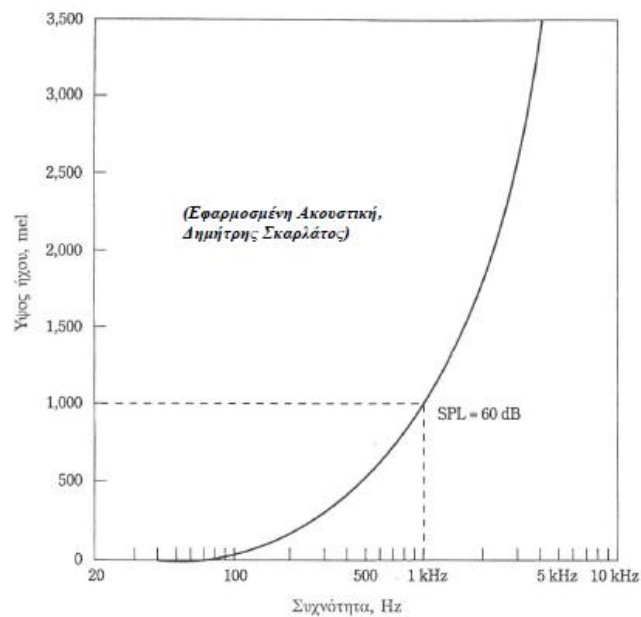
Εικόνα 16: Ανατομία του αυτιού και απεικόνιση των εσωτερικών ιστών του [2]

### 1.3.4. Απόκριση αυτιού

Η απόκριση του ανθρώπινου οργάνου στα δύο χαρακτηριστικά του ήχου στάθμη και συχνότητα, δεν είναι γραμμική. Μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι το αυτί μπορεί να διακρίνει 280 διαφορετικές στάθμες και 1.400 διαφορετικές συχνότητες. Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που σχετίζονται με την απόκριση του ανθρώπου σ' αυτόν είναι τρία: το ύψος, η ακουστότητα και η χροιά.

Ύψος (Pitch)

Ύψος είναι η υποκειμενική απόκριση του αυτιού στην συχνότητα.



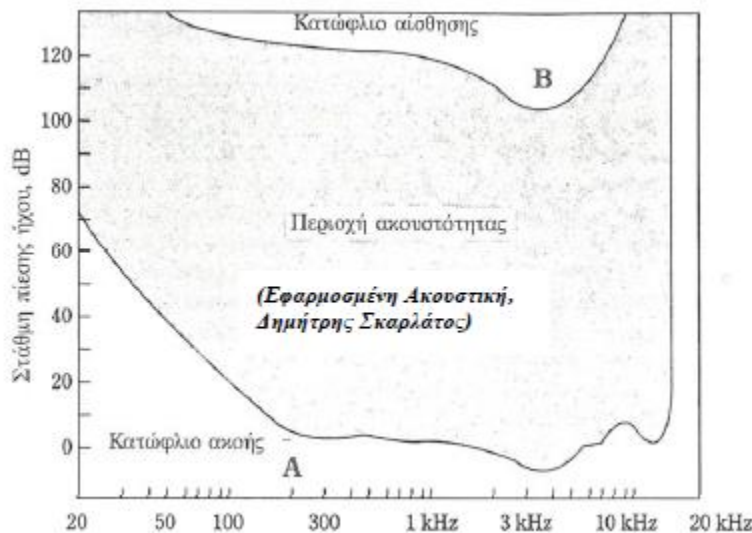
Εικόνα 17: Ύψος ήχου (υποκειμενική μονάδα mel) σε συσχέτιση με τη συχνότητα (Hz, φυσική μονάδα) σύμφωνα με καμπύλη που ελήφθη από ακροατές-κριτές. [8]

## Χροιά (Timbre)

Χροιά ονομάζουμε τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου τα οποία κάνουν δυνατό τον διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας αλλά διαφορετικών κυματομορφών.

## Ακουστότητα (Loudness)

Σαν ακουστότητα ορίζουμε την υποκειμενική απόκριση του αυτιού στην στάθμη του ήχου



Εικόνα 18: Απεικόνιση περιοχής ακουστότητας ανθρώπινου αυτιού μέσω 2 καμπύλων κατωφλίου, (A) το κατώφλιο ακοή (ανιχνεύσιμοι ήχοι χαμηλής στάθμης) (B) το κατώφλιο αίσθησης (άνω άκρο)

### 1.3.5. Ακοή με τα δύο αυτιά – Προσδιορισμός κατεύθυνσης

Μία σπουδαία ιδιότητα του αυτιού είναι η ικανότητά του να ξεχωρίζει την κατεύθυνση από την οποία προέρχεται ο ήχος και συνεπώς να προσδιορίζει τη θέση των ηχητικών πηγών. Ο προσδιορισμός αυτός οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση του κάθε αυτιού από την πηγή είναι διαφορετική και το ένα από δύο ηχητικά κύματα που φτάνουν στα αυτιά φτάνει με καθυστέρηση σε σχέση με το άλλο. Στην καθυστέρηση αυτή αντιστοιχεί μία διαφορά φάσης, που εξαρτάται από την θέση της πηγής. Επιπλέον το ένα από δύο αυτιά βρίσκεται στην σκιά του κεφαλιού από την πηγή και συνεπώς το ηχητικό κύμα φτάνει σε αυτό με μειωμένη στάθμη. Ο τρίτος και κυριότερος λόγος με τον οποίο γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής είναι το γεγονός ότι τα ηχητικά κύματα φτάνουν με διαφορετική γωνία στους ακουστικούς πόρους με συνέπεια να διαφέρουν οι συναρτήσεις μεταφοράς των αυτιών.

Λόγω της διαφορετικής ακουστότητας των ήχων με το ένα ή τα δύο αυτιά, για την μελέτη της ακουστότητας θα πρέπει να ορίσουμε τον τρόπο ακοής. Έτσι μπορούμε να δώσουμε τους ορισμούς.

Αμφιωτική ακοή είναι η φυσιολογική ακοή με τα δύο αυτιά, ή η ακοή με τα δύο αυτιά μέσω χωριστών ηλεκτροακουστικών καναλιών.

Φυσιολογικό κατώφλι αμφιωτικής ακοής σε ορισμένη συχνότητα είναι τιμή του κατωφλίου αμφιωτικής ακοής που αντιστοιχεί στην υποκειμενική εκτίμηση ωτολογικά φυσιολογικού ατόμου ηλικίας από 18-25 ετών.

Κατώφλι αμφιωτικής ακοής ενός ατόμου σε ορισμένη συχνότητα είναι η ελάχιστη τιμή της στάθμης ηχητικής πίεσης που διεγείρει την αίσθηση της αμφιωτικής ακοής του υπόψη ατόμου.

### 1.3.6.Υποκειμενικές μονάδες μέτρησης

Για την υποκειμενική μέτρηση του θορύβου χρησιμοποιούνται οι εξής μονάδες: [8]

Phon: Μετρά τη στάθμη ακουστότητας.

Sone: Μετρά την υποκειμενική ακουστότητα.

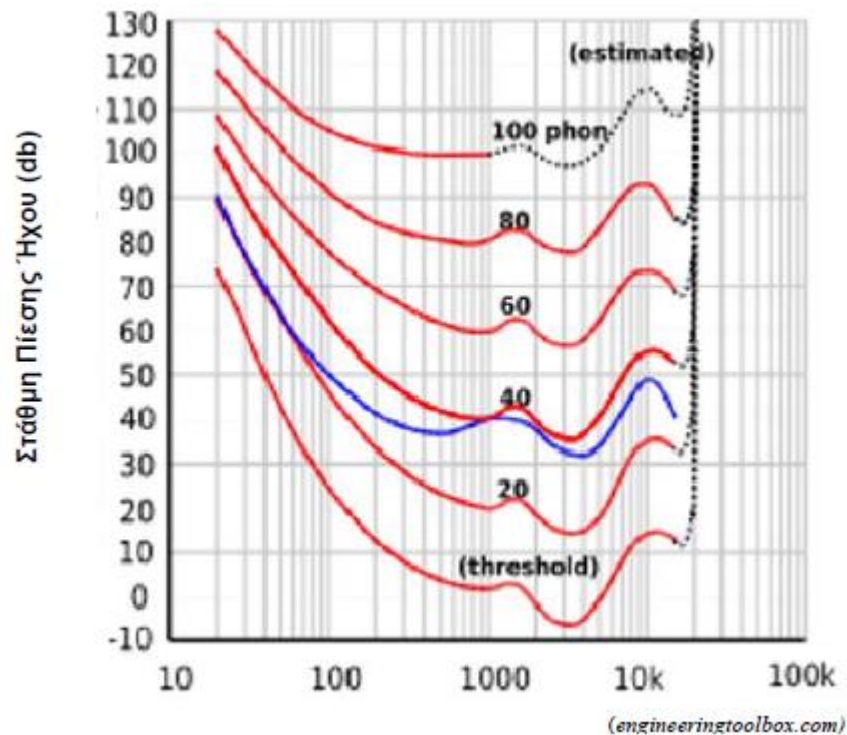
Pndb: Μετρά την στάθμη αντιληπτότητας.

Noy: Μετρά την υποκειμενική αντιληπτότητα (ή ενοχλητικότητα)

Οι μονάδες αυτές ορίζονται ως εξής:

Μονάδα Στάθμης Ακουστότητας

Μονάδα στάθμης ακουστότητας είναι το PHON. Η μονάδα PHON ορίζεται ως εξής: Ένας τόνος με συχνότητα 1000Hz έχει στάθμη ακουστότητας τόσα PHON όση είναι η στάθμη του σε Db. Ένας άλλος τόνος οποιασδήποτε συχνότητας έχει στάθμη ακουστότητας τόσα PHON όση είναι η στάθμη του τόνου των 1.000Hz που είναι το ίδιο ακουστή.



Εικόνα 19: Περιγράμματα ίσης ηχηρότητας του ανθρώπινου αυτιού. Σχετική έλλειψη ευαισθησίας του αυτιού σε χαμηλούς τόνους, ιδιαίτερα σε μικρότερες στάθμες ήχου [16]

#### Μονάδα ακουστότητας

Η μονάδα ακουστότητας SONE ορίζεται ως εξής: Ένας ήχος με συχνότητα 1.000Hz και στάθμη πίεσης  $L_p$  40 Db ορίζεται ότι έχει ακουστότητα 1 SONE.

#### Στάθμη Αντιληπτού Θορύβου ( $L_pN$ )

Η στάθμη αυτή χρησιμοποιήθηκε κατ' αρχάς για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αντιληπτότητας από τα αεροσκάφη. Μονάδα μέτρησης είναι το dB αντιληπτού θορύβου και με ανάλογο τρόπο όπως και η στάθμη ακουστότητας.

Ένας ήχος έχει στάθμη αντιληπτού θορύβου τόσα PndB όση η στάθμη ηχητικής πίεσης που έχει ένας τυχαίος θόρυβος εύρους ζώνης μιας οκτάβας, με κεντρική συχνότητα 1000 Hz και με μετωπική πρόσπτωση ώστε υποκειμενικά να κριθεί εξ' ίσου θορυβώδης με τον εξεταζόμενο ήχο.

### 1.4.Σκοπός της έρευνας

Ο σχεδιασμός των ηχητικά αποδοτικών υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών μπορεί να είναι επιτυχής όταν βασίζεται σε σαφή κατανόηση της απόκρισης των επιβατών στον υπόγειο περιβαλλοντικό θόρυβο. Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του θορύβου και των κραδασμών των σιδηροδρόμων έχουν αναφερθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία.



[1],[2],[3] Ωστόσο, η υποκειμενική επίδραση του περιβαλλοντικού θορύβου στην κατασκευή και η δομή των αστικών υπόγειων σταθμών δεν έχει ακόμη μελετηθεί συστηματικά.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, αυτή η μελέτη στοχεύει στον εντοπισμό, χρησιμοποιώντας ένα προτεινόμενο από τη συγγραφέα της πτυχιακής σύστημα βαθμονόμησης με σταθμισμένα σκορ, τις βέλτιστες λύσεις ηχομονωτικών μεθοδολογιών για τους σταθμούς του μετρό στην Αθήνα.

### **1.5. Διάρθρωση της διπλωματικής**

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας δίνονται οι γενικές έννοιες του προβλήματος που θα μελετηθεί, ο σκοπός και τα προσδοκώμενα αποτελέσματα της έρευνας, καθώς και η διάρθρωση της πτυχιακής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος που εξετάζεται, με βάση ελληνικές και διεθνείς έρευνες (βιβλία και paper) της τελευταίας 20ετίας. Η ανεύρεση των βιβλιογραφικών πηγών έγινε με χρησιμοποίηση online βάσεων δεδομένων δημοσιεύσεων και βιβλίων (scopus, google scholar κλπ).

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την περιγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης. Εξετάζεται καταρχήν ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκε το πρόβλημα και τα κριτήρια, καθώς και οι δημοσιεύσεις στις οποίες στηριχθήκαμε για την μετέπειτα αξιολόγηση.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει την αξιολόγηση των μεθόδων μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου στις γραμμές του μετρό της Αθήνας, με βάση ένα προτεινόμενο σύστημα βαθμονόμησης (που σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί κάποιο είδος πολυκριτήριας ανάλυσης, απλώς είναι μία πρόταση για προκαταρκτική αξιολόγηση κάποιων πιθανών λύσεων στο εν λόγω πρόβλημα). Με βάση την προκαταρκτική αυτή εξέταση που έχει κυρίως ποιοτικό χαρακτήρα εξάγεται μια πρώτη προσέγγιση για το καλύτερο δυνατό σύστημα μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου για τα δεδομένα της Αττικής.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί σύνοψη των συμπερασμάτων που εξάχθηκαν από θεωρία και πρακτικό μέρος και παρέχει πιθανές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

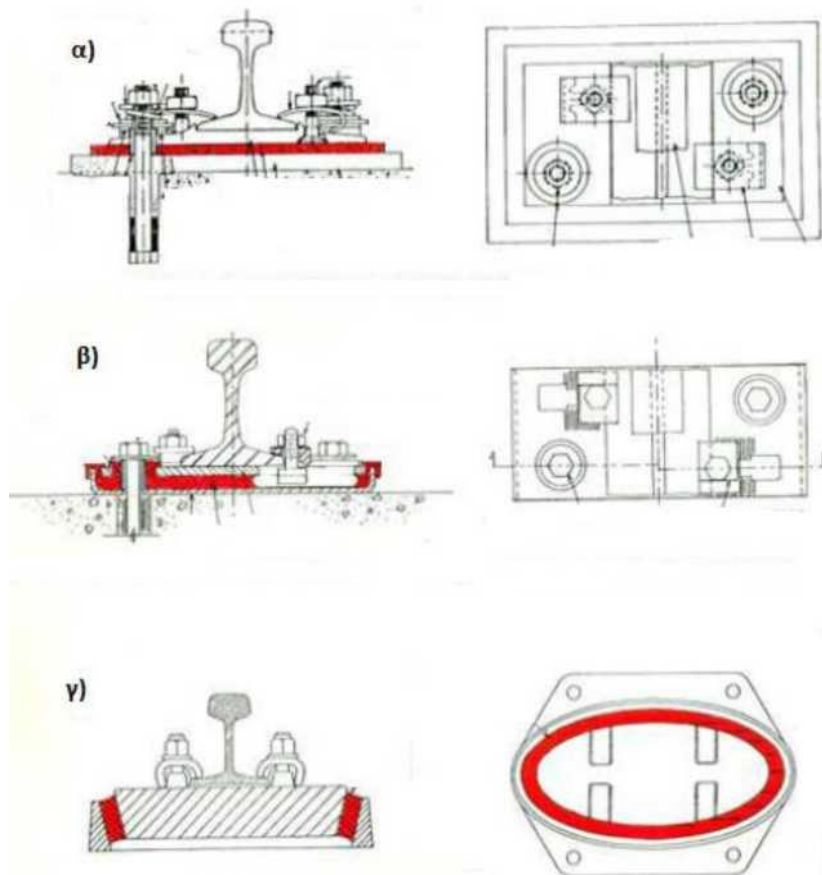
### 2.1.Εισαγωγή

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.

### 2.2.Τεχνικές με επεμβάσεις στην υποδομή

Η αποτελεσματικότητα των ελαστικών υποθεμάτων εξετάστηκε από τον Wang και άλλους ερευνητές [34] 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 [9] 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 όπως φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Τρεις βασικοί τύποι ελαστικών υποθεμάτων μη συνδεδεμένο, συνδεδεμένο και το «αυγό της Κολωνίας» [9]

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 [9] 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. Χάρη 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. 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 [34] ήταν η εφαρμογή αποσβεστήρων ταλαντώσεων στον κορμό της σιδηροτροχιάς. 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 [36] η αποτελεσματικότητα των βελτιωτικών τριβής στην κορυφή της σιδηροτροχιάς. Για την εργασία τους πραγματοποίησαν ακουστικές μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές χώρες. Τα σημεία που μετρήθηκαν αφορούσαν γραμμές METRO 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 [9], αναφέρει την τοποθέτηση πλωτής πλάκας 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,

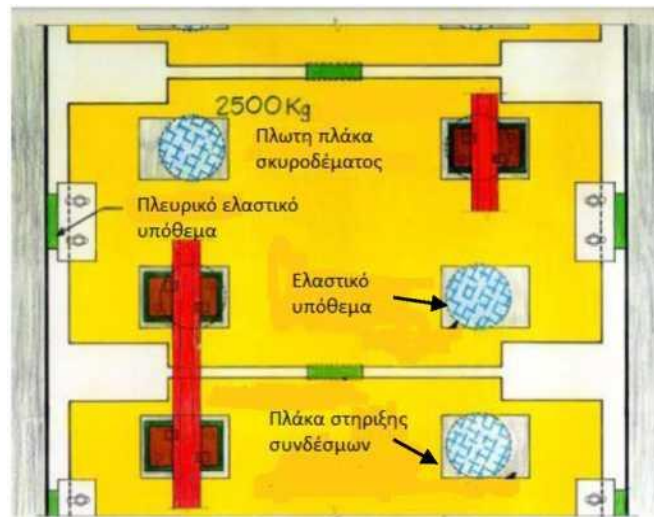
(β) μέγιστο πάχος της πλάκας και των ελαστικών υποθεμάτων τα 30 cm και

(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 21).



Εικόνα 21: Σκαρίφημα μη συνεχόμενης πλωτής πλάκας έδρασης από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα για μήκος 1500 mm [5]

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 [37], 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. 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 [38] 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 ηχώμετρο τοποθετήθηκε στο κέντρο της καμπύλης, σε συγκριμένη 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 [22] 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 υποβιβάζει την ποιότητα στην 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 [39] 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 κατασκευής της αντίστοιχης γραμμής σε επίχωμα.

Στην εργασία των Talotte et al. [30] 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 Χίαοan [40] 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 [41], στη διπλωματική του εργασία, συνέλεξε 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

dBΑ. Επιπλέον μειώσεις που φτάνουν τα 4-7 dBΑ 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 dBΑ 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 dBΑ. 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 dBΑ. 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 dBΑ.

Ο Αργυρόπουλος [42], 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 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 dBΑ 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 dBΑ 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 dBΑ. όσον αφορά στη συγκριτική αξιολόγηση του υλικού της Tiflex, ο ερευνητής αναφέρει ότι μειώνει το θόρυβο κατά 2,4 dBΑ 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, 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 ισοθρουβικών 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 3ο όροφο, ενώ στον 5ο και 6ο 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 [43], 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.

### 2.3. Τεχνικές με επεμβάσεις στο όχημα

Ο Barsikow και άλλοι ερευνητές [44], στην εργασία τους για την αποτελεσματικότητα των αποσβεστήρων ταλαντώσεων τροχών καθώς και της τόννευσης των τροχών, 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 τοννευτεί και είχαν τοποθετηθεί σ' αυτούς αποσβεστήρες ταλαντώσεων, ενώ άλλοι είχαν τοννευτεί 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 τοννευμένων τροχών, ενώ ο συνδυασμός τόννευσης και εφαρμογής του αποσβεστήρα ταλαντώσεων μείωσε το θόρυβο κατά 8 dBA. Σε επίπεδο φασματικής ανάλυσης, οι τοννευμένοι 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 [45] 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 [46] οι οποίοι εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της αντικατάστασης του συστήματος πέδησης των συρμών. 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 (LL Blocks) 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 [37] 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

τόρνευση 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 τόρνευσης των τροχών.

Η δεύτερη κατηγορία τεχνικών αφορά επεμβάσεις στα σιδηροδρομικά οχήματα. Ένα από τα κυριότερα μέτρα αποτελούν οι ηχοαπορροφητικές ποδιές (Sound Absorbing Aprons). 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 [39] 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. [30] 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 αντισυμβατική.

Οι ερευνητές, εξετάζοντας το πρόβλημα του αεροδυναμικού θορύβου που δημιουργείται λόγω του παντογράφου των συρμών πρότειναν την τοποθέτηση καλύμματος 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 [47] 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 ηχοπετάσματος 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 Χίαοαν [40] 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.

## 2.4.Η επιρροή των υλικών

Ένας υπόγειος σιδηροδρομικός σταθμός μπορεί να είναι ένα πολύ αντηχητικό πεδίο ήχου. Οι τοίχοι και η οροφή ενός υπόγειου σταθμού καλύπτονται συνήθως με πυρίμαχα υλικά (π.χ., ατσάλινα ή υαλοβάμβακα πάνελ) Ως αποτέλεσμα, οι ηχητικές αντανakλάσεις και αντηχήσεις προκαλούν αύξηση του θορύβου των αμαξοστοιχιών σε σταθμούς (TNIS – Train Noise Increase in Stations) [59][60] και μείωση της κατανόησης ομιλίας των συστημάτων δημόσιας διεύθυνσης (PA – Public Administration) [61], [62]. Κατά συνέπεια, οι επιβάτες που χρησιμοποιούν υπόγειες σιδηροδρομικές γραμμές σε καθημερινή βάση ενδέχεται να εκτίθενται σε τέτοιο TNIS υψηλής πίεσης και η αθροιστική ημερήσια έκθεση σε θόρυβο μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ακοής που προκαλείται από θόρυβο [63],[64], [65]. Οι ηλικιωμένοι ειδικότερα μπορεί να δυσκολεύονται να ακούσουν τις ανακοινώσεις της PA στο αντηχητικό πεδίο ήχου [66]. Στον σταθμό Tenjin-Minami του μετρό στην πόλη Fukuoka της Ιαπωνίας, τοποθετήθηκαν κεραμικά πάνελ ηχοαπορρόφησης στους πλευρικούς τοίχους του επιπέδου της πλατφόρμας, με αποτέλεσμα ο σταθμός να θεωρείται ένα σχετικά ήσυχο περιβάλλον με υποκειμενικές αξιολογήσεις. Ωστόσο, είναι σπάνιο να εισαχθούν πρακτικές ακουστικές λύσεις σε υπόγειους σιδηροδρομικούς σταθμούς. Απαιτείται αποτελεσματικός έλεγχος των ηχητικών ανακλάσεων και αντηχιών για την παραγωγή ικανοποιητικής ακουστικής.

Είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα ακουστικά χαρακτηριστικά των υπόγειων σταθμών για να παρέχεται αποτελεσματική ακουστική επεξεργασία όπου είναι απαραίτητο. Ορισμένες προηγούμενες μελέτες έχουν διερευνήσει τα ακουστικά χαρακτηριστικά των υπόγειων σταθμών και των οδικών σηράγγων, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι ο χρόνος πρώιμης αποσύνθεσης (EDT – Early Decomposition Time) είναι από 2 έως 4 δευτερόλεπτα στη ζώνη οκτάβας 1-kHz και ότι ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI – Speech Transition Index) κυμαίνεται από 0,4 έως 0,6 [38],[40]. Στους υπόγειους σταθμούς και τις σήραγγες που εξετάστηκαν, το EDT βρέθηκε να είναι μεγαλύτερο από αυτό σε μια αίθουσα συναυλιών, και η βαθμολογία κατανόησης ομιλίας με βάση το STI ήταν «δίκαιη» έως «φτωχή» [69]. Ο σκοπός αυτών των προηγούμενων μελετών ήταν να βελτιώσει την κατανόηση της ομιλίας του συστήματος PA, και για το λόγο αυτό τόσο η πηγή ήχου όσο και ο δέκτης εντοπίστηκαν στην πλατφόρμα, προσομοιώνοντας ένα σύστημα PA και έναν επιβάτη, αντίστοιχα. Ωστόσο, δεν υπάρχουν μελέτες για την εξέταση των ηχητικών πεδίων των υπόγειων σταθμών με προσομοίωση του TNIS. Το TNIS σε υπόγειους σταθμούς είναι περίπου 6 dB μεγαλύτερο από αυτό στους σταθμούς πάνω από το έδαφος. [47] Αν και η αύξηση του TNIS οφείλεται κυρίως στον προβληματισμό του υπόγειου σταθμού και των σηράγγων του, δεν είναι σαφές πώς το TNIS φτάνει στους επιβάτες σε τέτοιες καταστάσεις.

Ο στόχος της μελέτης Shimokura και Soeta ήταν να εξετάσει τα χαρακτηριστικά του ηχητικού πεδίου των υπόγειων σταθμών για να εξετάσει πιθανές ακουστικές λύσεις για το TNIS.

Συγκεκριμένα, υπέθεσαν ότι οι μονωτές στα μονοπάτια ανάκλασης ή τα απορροφητικά για τοιχώματα ανάκλασης μπορεί να αποδυναμώσουν το TNIS. Επομένως, μέτρησαν τις παλμικές αποκρίσεις εντοπίζοντας μια πηγή ήχου και έναν δέκτη τόσο στην πίστα αμαξοστοιχίας όσο και στην πλατφόρμα για την προσομοίωση αμαξοστοιχίας και επιβάτη, αντίστοιχα. Επειδή τα ηχητικά πεδία είναι διαφορετικά ανάλογα με το εσωτερικό υλικό και τη θέση της πηγής θορύβου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο σταθμούς των οποίων τα πλευρικά τοιχώματα καλύφθηκαν από μεταλλικά και ξύλινα πάνελ, αντίστοιχα, για την επαλήθευση της επίδρασης διαφορετικών εσωτερικών υλικών (Σύγκριση I). Στη συνέχεια, για να επαληθεύσουν το αποτέλεσμα της θέσης της πηγής θορύβου, τοποθέτησαν μια πηγή ήχου τόσο στο σταθμό όσο και στη σήραγγα (Σύγκριση II). Μια προηγούμενη μελέτη ανέφερε ότι το TNIS τροποποιήθηκε από διαφορετικά πεδία ήχου στο σταθμό και τη σήραγγα. Ειδικότερα, το TNIS από τη σήραγγα ήταν κατευθυντικό και λιγότερο εξασθενημένο, ενώ το TNIS όταν πλησίαζε μια αμαξοστοιχία στη σήραγγα προκάλεσε το επίπεδο θορύβου να είναι ιδιαίτερα υψηλότερο [61]. Τα χαρακτηριστικά του TNIS στο διάστημα στο οποίο πλησιάζει μια αμαξοστοιχία μπορούν έτσι να εξηγηθούν εξετάζοντας τις παλμικές αποκρίσεις που λαμβάνονται όταν η πηγή ήχου τοποθετείται στη σήραγγα.

Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του ηχητικού πεδίου, οι ακουστικές παράμετροι, όπως η ένταση (G), ο χρόνος αντήχησης (EDT), ο συντελεστής διασταυρούμενης συσχέτισης (IACC) και η κατεύθυνση της άφιξης (DOA – Directions of Arrival) υπολογίστηκαν από αμφίπλευρα και τρισδιάστατα (3D) προσομοιώματα. Στις περισσότερες έρευνες θορύβου, ένας μετρητής στάθμης ήχου χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση του επιπέδου ηχητικής πίεσης μιας πηγής θορύβου. Ωστόσο, όταν ο περιβαλλοντικός θόρυβος επηρεάζεται από ηχητικές αντανάκλασεις και αντήχηση, τέτοιες ακουστικές τεχνολογίες δωματίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου ενίσχυσης του θορύβου στο βαθμό που προκαλεί ενόχληση στους επιβάτες [3,13]. Οι παράμετροι G και EDT υποδεικνύουν την ισχύ και το μήκος αντήχησης, και έτσι η ενίσχυση του TNIS μπορεί να θεωρηθεί ότι σχετίζεται με αυτές τις παραμέτρους. Περαιτέρω, το EDT είναι ευαίσθητο στον συντελεστή απορρόφησης των ορίων [9], και έτσι μπορεί να εμφανίζει διαφορετικά ακουστικά χαρακτηριστικά σε σταθμούς με διαφορετικά εσωτερικά υλικά. Η παράμετρος DOA αντιπροσωπεύει τη θέση των ανακλαστικών τοιχωμάτων, και έτσι μπορεί να μας καθοδηγήσει στο πού πρέπει να εισαχθούν ηχοαπορροφητικά. Η παράμετρος IACC αντιπροσωπεύει τη διάχυση του εισερχόμενου ήχου και έτσι το DOA και το IACC μπορούν να χρησιμεύσουν μαζί ως οδηγός για το πού πρέπει να εισαχθούν οι διαχύτες ήχου. Ορισμένες προηγούμενες μελέτες ανέφεραν ότι ο ήχος σε ένα μακρύ, ορθογώνιο περίβλημα, όπως ένας υπόγειος σταθμός, δεν διαχέεται καλά [9-11]. Ένα τέτοιο ηχητικό πεδίο προκαλεί ένα όρθιο κύμα, και ως εκ τούτου είναι δυνατό να ενισχυθούν συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων του TNIS. Στην πραγματικότητα, το

TNIS σε έναν υπόγειο σταθμό περιλαμβάνει ισχυρότερα τονικά στοιχεία από αυτό σε έναν σταθμό πάνω από το έδαφος. Επιπλέον, μια προηγούμενη μελέτη έχει επισημάνει τον κίνδυνο ότι τα καθαρά βήματα του TNIS ενδέχεται επίσης να ενοχλήσουν τους επιβάτες [2].

## 2.7. Βιβλιογραφική Επισκόπηση Θεωρίας Ανάλυσης Αποφάσεων

Σε βιβλιογραφικό επίπεδο, η ανάλυση αποφάσεων [66] (είτε αν πρόκειται για εκτεταμένη πολυκριτήρια ανάλυση, είτε αν πρόκειται όπως στην περίπτωση μας για μια απλή ποιοτική αξιολόγηση σε επίπεδο προκαταρκτικού σταδίου έρευνας) είναι ένα προηγμένο πεδίο επιχειρησιακής έρευνας, το οποίο κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει αναλυθεί εκτεταμένα τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά. Βασικός ρόλος στην ανάπτυξη και τη διάδοση της ανάλυσης αποφάσεων ήταν το απλό εύρημα ότι η επίλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερα σημαντικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων δεν μπορεί να επιτευχθεί με μονόπλευρη και μονοδιάστατη ανάλυση. Ωστόσο, όταν προσπαθούμε να εξετάσουμε όλες τις παραμέτρους ενός προβλήματος και τα κριτήρια που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων, δημιουργείται ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο μερικές φορές αποθαρρύνει τους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων και τους αναλυτές να υιοθετήσουν αυτήν την πιο ρεαλιστική προσέγγιση. Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο όλες οι παράμετροι μπορούν να συντεθούν ώστε να επιτρέπουν την ορθολογική λήψη αποφάσεων.

Είναι κατανοητό ότι το αποτέλεσμα οποιασδήποτε ανάλυσης για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος λήψης αποφάσεων εξαρτάται τελικά από τον ίδιο τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Επομένως, η ανάπτυξη μοντέλων λήψης αποφάσεων μέσω μεθοδολογικών προσεγγίσεων που δεν είναι ικανές να ενσωματώσουν τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων και τις προτιμήσεις του στη διαδικασία ανάπτυξης αυτών των μοντέλων, δίνουν ουσιαστικά στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων παθητικό ρόλο, ο οποίος περιορίζεται στην παρακολούθηση και εφαρμογή μαθηματικών αποτελεσμάτων. Υπό το φως αυτών των παρατηρήσεων, η ανάλυση αποφάσεων έδωσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην έρευνα σε θέματα που σχετίζονται με την ανάλυση, τη μαθηματική μοντελοποίηση και την εκπροσώπηση των προτιμήσεων πολιτικής για τη λήψη κάποιας επιλογής. Ο απώτερος στόχος είναι να παράσχει τις απαραίτητες πληροφορίες για να στηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των βασικών χαρακτηριστικών του υπό εξέταση προβλήματος καθώς και στις ιδιαιτερότητες των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων. Οι μεθοδολογικές εξελίξεις που έγιναν κατά την ιστορική πορεία του πεδίου ανάλυσης αποφάσεων καλύπτουν, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, όλα τα είδη των προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Οι ακόλουθες παράγραφοι περιγράφουν τις κύριες μεθοδολογικές προσεγγίσεις της ανάλυσης του πεδίου της λήψης αποφάσεων.

Το έργο του Pareto (1896), που έθεσε τα απαραίτητα αξιώματα, εισάγοντας μία από τις πιο βασικές έννοιες της σύγχρονης ανάλυσης αποφάσεων, την έννοια της αποτελεσματικότητας, μπορεί να θεωρηθεί ως η πρώτη τεκμηριωμένη προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της σύνθεσης πολλαπλών κριτηρίων. Μετά τον πόλεμο, ο Koopmans (1951) επέκτεινε την έννοια της αποτελεσματικότητας του Pareto εισάγοντας την έννοια του αποτελεσματικού συνόλου, δηλαδή της δέσμης εναλλακτικών δραστηριοτήτων που δεν ορίζονται από κανένα άλλο μη κυριαρχούμενο σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Κατά την ίδια χρονική περίοδο (1940-1950) οι Von Neumann και Morgenstern (1944) ανέπτυξαν τη θεωρία χρησιμότητας, η οποία αποτελεί τη βάση ενός από τα κύρια μεθοδολογικά ρεύματα της ανάλυσης αποφάσεων. Στη δεκαετία του 1960 όλα τα προαναφερθέντα «προκαταρκτικά» ερευνητικά έργα πυροδότησαν περαιτέρω έρευνα από τον Charnes και Cooper (1961) σχετικά με τη σχέση μεταξύ θεωρίας γραμμικού προγραμματισμού και ανάλυσης αποφάσεων (προγραμματισμός στόχων), καθώς και τον Fishburn (1965) σχετικά με την επέκταση της χρησιμότητας της θεωρίας σε πολλαπλά κριτήρια λήψης αποφάσεων. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1960, άρχισε να αφορά και την ανάλυση μεταξύ κριτηρίων για τους ευρωπαϊούς επιχειρηματικούς ερευνητές. Ο Roy (1968) ήταν ο πρωτοπόρος μεταξύ τους, ο οποίος ανέπτυξε τη θεωρία των σχέσεων εξωστρέφειας και θεωρείται ο ιδρυτής του «ευρωπαϊκού σχολείου» της ανάλυσης λήψης αποφάσεων. Κατά τις επόμενες δύο δεκαετίες (1970-1990), η ανάλυση λήψης αποφάσεων αναπτύχθηκε ταχέως τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πρακτικές εφαρμογές, προκειμένου να αντιμετωπίσει διάφορα σύνθετα προβλήματα λήψης αποφάσεων σε πραγματικό κόσμο. Από αυτή την άποψη, η συμβολή της επιστήμης υπολογιστών και της πληροφορικής ήταν σημαντική. Η ταχεία τεχνολογική πρόοδος σε αυτούς τους τομείς, ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, παρείχε τα απαραίτητα μέσα για την εφαρμογή των μεθοδολογικών εξελίξεων της πολυκριτήριας ανάλυσης σε ολοκληρωμένα συστήματα πληροφοριών (πολυκριτήρια συστήματα υποστήριξης αποφάσεων), τα οποία συνέβαλαν και στις εφαρμογές της πολυκριτήριας ανάλυσης.

Το πρώτο βήμα είναι να διατυπώσουμε το πρόβλημα. Αυτό το στάδιο αφορά:

### *1.Ορισμός μεταβλητών απόφασης*

Οι μεταβλητές απόφασης αναφέρονται σε όλους τους παράγοντες των οποίων οι τιμές πρέπει να προσδιοριστούν για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα διαχείρισης της παραγωγής, οι μεταβλητές μπορούν να σχετίζονται με το επίπεδο παραγωγής διαφορετικών προϊόντων, τον τύπο και τον όγκο των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών κ.λπ. (μεταβλητές απόφασης).

### *2.Καθορισμός του στόχου του προβλήματος.*

Ο στόχος ορίζει το κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας των πιθανών λύσεων στο πρόβλημα. Παραδείγματα στόχων είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους, η ελαχιστοποίηση του κινδύνου κ.λπ.

### *3. Προσδιορισμός του χώρου των εφικτών λύσεων*

Στην πλειοψηφία των προβλημάτων λήψης αποφάσεων, οι πιθανές λύσεις στο πρόβλημα εντοπίζονται από ένα σύνολο περιορισμών. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τους διαθέσιμους πόρους (υλικά, κεφάλαιο, ανθρώπινο δυναμικό) καθώς και το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνεται η απόφαση (π.χ. νομικοί περιορισμοί). Με βάση την παραπάνω διατύπωση του προβλήματος, το δεύτερο βήμα είναι η κατασκευή του κατάλληλου μοντέλου που περιγράφει το πρόβλημα. Το μοντέλο ορίζεται ως η μαθηματική αναπαράσταση (περιγραφή) του προβλήματος στο οποίο απεικονίζονται όλες οι μεταβλητές απόφασης, οι στόχοι και οι περιορισμοί. Φυσικά, στις περισσότερες περιπτώσεις η πραγματικότητα είναι πολύ περίπλοκη για να αναπαρασταθεί πλήρως σε ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων. Για το λόγο αυτό, το κτίριο μοντέλων βασίζεται πάντοτε σε κάποιες υποθέσεις, έτσι ώστε το πρόβλημα να μπορεί να αναλυθεί ποσοτικά. Όσο πιο ρεαλιστικές είναι οι υποθέσεις στις οποίες βασίζεται το μοντέλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το μοντέλο να επιτύχει στην αντιμετώπιση του υπό εξέταση προβλήματος. Το τρίτο βήμα της ανάλυσης είναι η επίλυση του μοντέλου με την κατάλληλη μαθηματική διαδικασία (μέθοδος, αλγόριθμος), προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που αντιστοιχούν σε μια εφικτή λύση που βελτιστοποιεί το στόχο του προβλήματος. Η φάση αξιολόγησης περιλαμβάνει την ανάλυση της ποιότητας της λύσης (ευαισθησία, σταθερότητα κλπ.) Με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου, τις παραδοχές που έγιναν και τα δεδομένα προβλημάτων. Τέλος, το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αφορά την εφαρμογή της λύσης και την υποστήριξή της (αιτιολόγηση) όπου είναι απαραίτητο.

Με βάση τις ιδιαιτερότητες των προβλημάτων λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, η περιοχή ΠΑ έχει τους ακόλουθους τρεις κύριους στόχους [66]:

- Ανάλυση του ανταγωνιστικού χαρακτήρα των κριτηρίων.
- Μοντελοποίηση των προτιμήσεων του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων.
- Προσδιορισμός ικανοποιητικών λύσεων.

Για να επιτύχει αυτούς τους στόχους, ο Roy (1996) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο ακολουθείται στο πλαίσιο της ανάλυσης λήψης αποφάσεων. Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από τέσσερα στάδια. Όπως είναι εμφανές, το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις στις οποίες είναι δυνατή η ανατροφοδότηση. Αυτά τα βήματα εξετάζονται παρακάτω.



### 1. Σκοπός της απόφασης

Αυτό το πρώτο στάδιο του μεθοδολογικού πλαισίου της ΠΑ αφορά τον ορισμό όλων των εναλλακτικών δραστηριοτήτων και την προβληματική ανάλυση τους. "Εναλλακτική" ορίζεται ως κάθε πιθανή επιλογή η οποία αποτελεί λύση στο υπό εξέταση πρόβλημα και πρέπει να αξιολογηθεί για την καταλληλότητά της. Το σύνολο των εναλλακτικών δραστηριοτήτων μπορεί να οριστεί είτε ως ένα διακεκριμένο σύνολο είτε ως ένα συνεχές σύνολο. Μετά τον εντοπισμό όλων των εναλλακτικών δραστηριοτήτων, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η απόφαση του μελετητή. Γενικά, υπάρχουν τέσσερα προβλήματα που καλύπτουν όλες τις πρακτικές περιπτώσεις:

**Προβλήματα α (επιλογή):** Ο τύπος προβλήματος α αναφέρεται στην επιλογή μιας ή περισσότερων εναλλακτικών λύσεων που θεωρούνται καταλληλότερες. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης, το πρόβλημα αφορά την επιλογή της καταλληλότερης θέσης.

**Προβλήματα β (διαλογή):** Ο τύπος προβλήματος β αναφέρεται στην ταξινόμηση εναλλακτικών δραστηριοτήτων σε προκαθορισμένες ομοιογενείς κατηγορίες. Για παράδειγμα, κατά την αξιολόγηση μιας αίτησης δανείου το αντικείμενο της ανάλυσης είναι να αξιολογήσει τον αιτούντα (επιχείρηση ή άτομο) και να το ταξινομήσει είτε στην κατηγορία των επιλέξιμων αιτήσεων είτε στην κατηγορία των αιτήσεων που απορρίφθηκαν.

**Προβλήματα γ** Για παράδειγμα, όταν οι φοιτητές γίνονται δεκτοί σε πανεπιστημιακό σχολείο, απαιτείται να ταξινομηθούν με βάση τα σημάδια τους στις εξετάσεις εισόδου. **(κατάταξη):** Ο τύπος προβλήματος c αναφέρεται στην κατάταξη εναλλακτικών δραστηριοτήτων από το καλύτερο στο χειρότερο.

#### Προβλήματα δ

**(περιγραφή):** Ο τύπος προβλήματος d αναφέρεται στην περιγραφή εναλλακτικών δραστηριοτήτων βάσει των επιδόσεών τους στα επιμέρους κριτήρια αξιολόγησης. Η επιλογή του σωστού προβλήματος αφορά αποκλειστικά το πρόβλημα που εξετάζεται. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί να συνδυάσετε δύο προβλήματα για την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος.

### 2. Συνεπής οικογένεια κριτηρίων

Το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας ορίζει μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων. Το κριτήριο θεωρείται ότι είναι μια μονοτονική συνάρτηση  $x$ , υποδεικνύοντας την προτίμηση του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, έτσι ώστε να ισχύει και για τις δύο εναλλακτικές  $x$  'και  $x'$ :

$$x' > x'' \Leftrightarrow x' P x''$$

$$x' = x'' \Leftrightarrow x' I x''$$

(5)

Όπου: -  $x'$  και  $x''$  είναι οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων  $x'$  και  $x''$  στο κριτήριο  $x - P$  και  $I$  είναι αντίστοιχα οι σχέσεις προτίμησης και αδιαφορίας που καθορίζονται έτσι ώστε:

$x' P x''$ : η εναλλακτική  $x'$  προτιμάται από το  $x''$  (προτιμάται)

$x' I x''$ : οι εναλλακτικές λύσεις  $x'$  και  $x''$  είναι ισοδύναμες (αδιαφορία)

Προκειμένου να ληφθούν ορθολογικές αποφάσεις με πολλαπλά κριτήρια, πρέπει να διασφαλιστεί ότι όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια αποτελούν ένα συνεκτικό σύνολο κριτηρίων. Ένα σύνολο κριτηρίων  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  θεωρείται ότι αποτελεί ένα συνεκτικό σύνολο κριτηρίων εάν και μόνο αν έχει τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες:

- Μονοτονία

Ένα σύνολο κριτηρίων θεωρείται ότι έχει την ιδιότητα της μονοτονίας, αν και μόνο εάν, για οποιοδήποτε δύο εναλλακτικές  $x'$  και  $x''$  τέτοιο ώστε  $x'_i > x''_i$  για κάποιο κριτήριο  $x_i$  και  $x'_j = x''_j$  για όλα τα άλλα κριτήρια  $x_j$  ( $j \neq i$ ), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι:  $x' P x''$ .

- Επάρκεια

Ένα σύνολο κριτηρίων θεωρείται ότι έχει την ιδιότητα της επάρκειας, εάν και μόνο εάν, για κάθε δύο εναλλακτικές  $x'$  και  $x''$  τέτοιο ώστε  $x'_i = x''_i$  για όλα τα κριτήρια  $x_i$ , συμπεραίνεται ότι  $x' I x''$ . (εξαντλητικότητα)

- Δεν υπάρχει πλεονασμός

Ένα σύνολο κριτηρίων θεωρείται ότι δεν είναι περιττό αν και μόνο εάν, η διαγραφή οποιουδήποτε κριτηρίου  $x_i$  παραβιάζει τις ιδιότητες της μονοτονίας ή της ικανότητας.

- Σύνολο προτίμησης

Μετά την ολοκλήρωση των δύο προηγούμενων σταδίων της ανάλυσης (προβληματική και συνεπής οικογένεια κριτηρίων), το επόμενο βήμα είναι να κατασκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο συνολικής αξιολόγησης. Το μοντέλο γενικής προτίμησης θεωρείται ότι συνδυάζει όλα τα κριτήρια προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της ανάλυσης σύμφωνα με το πρόβλημα που εντοπίστηκε. Το γενικό πρότυπο προτιμήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για:

A. Προσδιορισμός συνολικής αξιολόγησης για κάθε εναλλακτική λύση.

B. Διμερείς συγκρίσεις μεταξύ εναλλακτικών επιλογών.

Γ.Εξερεύνηση όλων των εναλλακτικών λύσεων όταν βρίσκονται σε εξέλιξη.

Η ανάπτυξη του προτύπου γενικής προτίμησης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

1. Διαδραστική μέσω της συνεργασίας του αναλυτή με τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Με αυτήν την προσέγγιση, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων καθορίζει ένα σύνολο παραμέτρων σχετικών με την πολιτική λήψης αποφάσεων που ακολουθεί (για παράδειγμα, τα βάρη των κριτηρίων).

2. Αναλύοντας τις αποφάσεις που λαμβάνονται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων προκειμένου να αναπτυχθεί μια κατάλληλη πολιτική παγκόσμιας προτίμησης που να είναι συμβατή με τη λήψη αποφάσεων πολιτικής που ακολουθεί ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων. Αυτή η προσέγγιση έχει πολλές ομοιότητες με τη μεθοδολογία παλινδρόμησης, η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στον τομέα των στατιστικών.

## 2.8.Σύνοψη επιμέρους συμπερασμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης

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 εφαρμοζόμενες στην υποδομή: ([5],[9],[22],[30],[34],[36],[37],[38],[40],[41],[42],[43])

- 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 τορνευμένο τροχό)
- Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών (3-7.5 dBA)
- Ηχοαπορροφητικές πλάκες (3-4 dBA)
- Βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται στη σιδηροτροχιά (12-14.2 dBA)

B) Τεχνικές που εφαρμόζονται στο τροχαίο υλικό: ([30],[37],[39],[40],[44],[45],[46])

- 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 και υλικά ([2],[9],[11],[61])

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

## Κεφάλαιο 3. Κριτήρια αξιολόγησης μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου

### 3.1.Εισαγωγή

Ορισμένα μέτρα μείωσης του θορύβου εφαρμόζονται σε ολόκληρο τον κόσμο όσον αφορά την πηγή θορύβου, τη διάδοση του θορύβου και την επίδραση στα γειτονικά κτίρια. Για παράδειγμα, μία από τις μεθόδους για τη μείωση του θορύβου που εκπέμπεται από την αλληλεπίδραση τροχού-σιδηροτροχιάς είναι η αύξηση του μεγέθους της περιοχής επαφής μεταξύ τους ή η μείωση της ακαμψίας επαφής (μείωση 5-10 dB) [29]. Τα μέτρα μείωσης του θορύβου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν από κοινού, π.χ. επικαλυπτόμενες οθόνες (προστατευτικές θωρακίσεις μαζί με φραγμούς χαμηλού θορύβου). Διεξήχθησαν μελέτες για τον προσδιορισμό της απόδοσης των πολύ χαμηλών ηχοπετασμάτων που τοποθετούνται δίπλα στη σιδηροτροχιά μαζί με μεθοδολογίες μείωσης θορύβου με εξαρτήματα που είναι τοποθετημένα στο συρμό (πχ αποσβεστήρες τοποθετημένοι στις ρόδες του συρμού). Η υψηλότερη αποτελεσματικότητα επιτεύχθηκε όταν τα δύο αυτά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν από κοινού [30]. Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το φάσμα των μέτρων μετριασμού του θορύβου είναι αρκετά ευρύ. Μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με τον τύπο θορύβου που πρέπει να μειωθεί. Οι τροχοί με συστήματα απόσβεσης δεν είναι πολύ αποτελεσματικοί σε ίσια τμήματα γραμμής. Από την άλλη πλευρά, είναι αρκετά αποτελεσματικοί ως ένα μέσο για τη μείωση του θορύβου ψαλιδίσματος σε αιχμηρές καμπύλες. Δεν είναι απαραίτητη η λείανση των σιδηροτροχιών ή η τριβή των τροχών σε ευθείες διαδρομές εάν οι ράγες ή οι τροχοί είναι σε καλή κατάσταση [4].

Με βάση την παρούσα διατριβή, θα διεξαχθεί η μεθοδολογία προκαταρκτικής και ποιοτικής βαθμονόμησης κριτηρίων για την επιλογή της καλύτερης δυνατής λύσης σε επίπεδο προκαταρκτικού σταδίου έρευνας για τη μείωση του θορύβου των σιδηροδρόμων στις γραμμές του μετρό της Αθήνας.

### 3. 2. Κριτήρια

Η προαναφερθείσα στρατηγική θα γίνει στην παρούσα ανάλυση της επιλογής της βέλτιστης μεθόδου μείωσης του ήχου για τις γραμμές του μετρό στην Αθήνα. Τα κριτήρια που θα εξεταστούν καθώς το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί βασίζονται στην σχετικά πρόσφατη ερευνητική εργασία των Aja Tumacice et al. (2016) οι οποίοι πραγματοποίησαν διερεύνηση για την εύρεση των προτιμότερων μεθόδων μείωσης θορύβου στους αστικούς και υπεραστικούς λιθουανικούς σιδηροδρόμους.

Πίνακας 1 Μέθοδοι μείωσης του θορύβου για τους σιδηροδρόμους (Βασισμένο στους Aja Tumavice et al., 2016)

Μέθοδος	Κατηγορία	Στοιχείο	Μέτρο μείωσης θορύβου	Αναμενόμενη Απόδοση	
Ακουστικές	Στην πηγή	Τροχαίο υλικό	Αλλαγή block πέδησης	8-10 dB(A)	
			Σχεδιασμός τροχού (σχήμα τροχού, διάμετρος, κλπ)	0-6 dB(A)	
			Υλικό τροχού (ελαστικά, πολλαπλά υλικά, κλπ)	μέχρι 5-10 dB(A)	
			Απορροφητές τροχών	1-3 dB(A)	
			Βελτιωτές τριβής με βάση το όχημα	–	
			αποτελεσματικός σιγαστήρας θορύβου ατμομηχανής ντίζελ, συστήματα ψύξης που εκπέμπουν χαμηλό θόρυβο, έλεγχος θορύβου διακένου αέρα (σιγαστήρες, ενεργά συστήματα ελέγχου)	μέχρι 13 dB(A)	
			κάλυπτρα	0-10 dB(A)	
			παντογράφος χαμηλού θορύβου (σε ηλεκτρικές γραμμές υψηλής ταχύτητας) βελτιστοποίηση σχήματος κεφαλής παντογράφου, ειδικά υλικά όπως πορώδες επίστρωμα παντογράφων, θωράκιση κ.λπ.) παντογράφος χαμηλού θορύβου (σε ηλεκτρικές γραμμές υψηλής ταχύτητας)	μέχρι 4 dB(A)	
			τακτική συντήρηση (παρακολούθηση τροχών, επίβλεψη τροχών)	μέχρι 20 dB(A)	
			–	–	
		Τροχιές και υποδομή	Σχεδιασμός τροχιάς (διαφορετικές φόρμες ράγας κλπ)	–	
			Απορροφητήρες τροχιών	1-3 dB(A)	
			ανθεκτική τροχιά (ελαστικές πλάκες βάσης, ειδικοί αποσβεστήρες σιδηροτροχιάς κ.λπ.)	–	
			αποφεύγοντας την απότομη μετατόπιση της δομής ή τη γεωμετρία του ίχνους	–	
	ηχοαπορρόφηση σιδηροδρόμου με θετικό σύστημα συγκράτησης		0-5 dB(A)		
	τροχιά με σκυροδέματα αντί για ξύλινα στρώματα		1-3 dB(A)		
	κομμάτι έρματος αντί για πλάκα από σκυροδέμα		4-5 dB(A)		
	Τροχιά χωρίς ενδιάμεσες αρθρώσεις		0-5 dB(A)		
	αλλαγή θέσης εγκατάστασης σημάτων σε περιοχές ευαίσθητες στον θόρυβο κ.λπ.	–			
	–	–	Μέχρι 20 dB(A)		
	Στο μονοπάτι διάδοσης	–	φράγματα θορύβου (τοίχοι, επιχώματα, φράγματα θορύβου τροποποιημένα στις άκρες, φυσικά φράγματα θορύβου, πράσινο, χαρακώματα, κ.λπ.)	0-15 dB(A)	
			περιβλήματα	10-30 dB(A)	
	Στα γειτονικά κτήρια	–	Ηχοαπορροφητικά παράθυρα	10-30 dB(A)	
			Ηχοαπορροφητικές προσόψεις (πράσινοι τοίχοι, διπλές προσόψεις κλπ)	–	
			Ηχοαπορροφητικές πόρτες	0-10 dB(A)	
	Μη ακουστικές	–	Κανονισμοί	οδηγίες σχετικά με το θόρυβο, οριακές τιμές, έλεγχος δράσης κ.λπ.	–
		–	Κοινωνικά και οικονομικά Μέσα	κοινωνικά μέσα (δημόσια εκπαίδευση, εκπαίδευση προσωπικού κ.λπ.) οικονομικά μέσα (επιβαρύνσεις σιδηροδρομικής υποδομής για ρυπαντές με υψηλό θόρυβο, μέσα οικονομικής στήριξης, αποζημίωση κ.λπ.)	–
–		Χωροταξικός σχεδιασμός και διαχείριση	κτίρια τοποθετημένα μακριά από την πηγή, σχεδιασμός κτιρίου, διάταξη, σχήμα και διάταξη των τοίχων του κτιρίου, προσανατολισμός του κτιρίου, σχεδιασμός πάρκων και χώρων πρασίνου, χωρική χωροθέτηση, σχεδιασμός της κυκλοφορίας, της δρομολόγησης, κυκλοφορία με χρήση εναλλακτικής διαδρομής (μακριά από περιοχές ευαίσθητες στον θόρυβο)	μέχρι 20 dB(A)	

Συνεπώς, συνοψίζοντας τον Πίνακα 1 γίνεται αντιληπτό πως οι Tumavice et al. έθεσαν συγκεκριμένο κατάλογο γενικών κριτηρίων που εξετάζονται για την εφαρμογή μέτρων μετριασμού του θορύβου που συνοψίζονται στα εξής:

#### 1. Αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη μείωση των dBA

Εξετάζεται σε τι βαθμό το εκάστοτε μέτρο μειώνει τα dBA μετά την εφαρμογή του (ένα κριτήριο που μπορεί να παρουσιαστεί και ποσοτικά με αρκετή ευκρίνεια)

#### 2. Ασφάλεια κυκλοφορίας

Εξετάζονται οι πιθανοί κίνδυνοι που μπορεί να προέλθουν από την εφαρμογή του εκάστοτε μέτρου ή και η πιθανή ελαχιστοποίηση υφιστάμενων κινδύνων σε σχέση με την προτέρα κατάσταση (πχ σε φυτοκάλυψη υπάρχει κίνδυνος πτώσης δέντρου μέσα στις γραμμές αν εφαρμοστεί το μέτρο ή αντιθέτως στα ηχοπετάσματα μειώνεται ο κίνδυνος εισόδου ανθρώπου ή ζώου εντός των γραμμών με την παρουσία τους)

#### 3. Κόστος Κατασκευής (υλικά, μηχανισμοί και τοποθέτηση)

Εξετάζεται αν η προτεινόμενη λύση έχει συνολικά χαμηλό ή αυξημένο κόστος εφαρμογής και συντήρησης.

#### 4. Αποδοχή από την κοινωνία

Είναι κοινωνικό κριτήριο και εξετάζει το αν μετά την εφαρμογή του μέτρου η ψυχολογία των περίοικων και γενικότερα των χρηστών του συρμού, είναι θετική, αρνητική ή ουδέτερη.

#### 5. Ευκολία Εφαρμογής

Εξετάζεται το πόσο εύκολη είναι η εφαρμογή ενός μέτρου, αν πιθανώς υπάρχει απαίτηση για χρήση ειδικών τεχνολογιών που για τα ελληνικά δεδομένα δεν υπάρχει η απαιτούμενη τεχνογνωσία στα αντίστοιχα συνεργεία ή ακόμα και ο απαραίτητος εξοπλισμός

#### 6. Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Εξετάζεται πιθανή υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος μετά την εφαρμογή του εκάστοτε μέτρου ή και πιθανές θετικές επιπτώσεις.

Τα παραπάνω κριτήρια θα χρησιμοποιηθούν και για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης περίπτωσης.

Στους ελληνικούς σιδηροδρόμους λίγα μέτρα έχουν ληφθεί για τη μείωση του θορύβου. Συγκεκριμένα, κατά την διερεύνηση των Σιδηροδρόμων στην Αθήνα (ΗΣΑΠ, Προαστιακός, Αττικό Μετρό) εντοπίστηκαν τα ακόλουθα μέτρα (τα οποία και θα αξιολογηθούν):

#### 1. Συμβατικά ηχοπετάσματα (από γυαλί, πλαστικό, μεταλλικά, σκυρόδεμα ή άλλα υλικά)

2.Φυτοκάλυψη (για τμήματα του ΗΣΑΠ σε εξωτερικούς χώρους)

3.Αποσβεστήρες φρένων

Τα υπόλοιπα μέτρα που αναφέρονται στον Πίνακα 1 δεν εντοπίστηκαν στην περιήγηση που έγινε στους συρμούς του Μετρό της Αθήνας, ούτε και υπήρξε εφικτό να βρεθεί κάποιο στοιχείο διαδικτυακά ή με επί τόπου επικοινωνία με αρμοδίους για λήψη άλλου είδους μέτρων. Επί παραδείγματι, θα ήταν πιθανό, όπως συμβαίνει σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, να έχουν σχεδιαστεί καταλλήλως χωροταξικά αλλά και από άποψη δομικών υλικών (κουφώματα, προσόψεις κλπ) ολόκληρες γειτονιές που συνορεύουν με τις γραμμές του ΗΣΑΠ ώστε να αποφεύγεται η έντονη όχληση στους κατοίκους που διαμένουν στα κτίσματα αυτά, ωστόσο αυτό δεν εμφανίστηκε να συμβαίνει πουθενά στην Αθήνα (τουλάχιστον εντοπίστηκε μόνο σε μεμονωμένα κτήρια, κάτι που υποδηλώνει πιο πολύ πρωτοβουλία του εκάστοτε ιδιοκτήτη και όχι κάποιο οργανωμένο σχέδιο προστασίας των κατοικιών από την ηχορρύπανση του γειτονικού σιδηροδρόμου). Άρα, απουσία περαιτέρω στοιχείων που να υποδηλώνουν ότι στην Αθήνα έχουν ληφθεί και άλλα μέτρα μείωση θορύβου από σιδηροδρόμους, εξετάστηκαν μόνο τα 3 προφανή μέτρα, στα οποία βρέθηκε και επαρκές φωτογραφικό υλικό.

Βάσει των θεμελιωδών στοιχείων μιας ανάλυσης λήψης αποφάσεων, θα δημιουργηθεί ένας σταυρός πίνακα κριτηρίων και μέτρων μετριασμού του θορύβου (3x6 τετραγωνικός πίνακας).

### 3.3. Προτεινόμενη ποιοτική μοντελοποίηση του προβλήματος

Για τις ανάγκες της αξιολόγησης των πιθανών μέτρων μείωσης θορύβου θα χρησιμοποιηθεί μια **ποιοτική κλίμακα 5 κατηγοριών**. Οι κατηγορίες αξιολόγησης θα είναι οι ακόλουθες:

- 1.Εντελώς αναποτελεσματικό μέτρο
2. Αναποτελεσματικό μέτρο
- 3.Ελαφρώς αποτελεσματικό μέτρο
- 4.Αρκετά αποτελεσματικό μέτρο
- 5.Πάρα πολύ αποτελεσματικό μέτρο.

Οι ανωτέρω ποιοτικές κατηγορίες αξιολόγησης θα τεθούν σε όλα τα κριτήρια απόδοσης και σε όλες τις πιθανές λύσεις. Για τους σκοπούς της παρούσας πτυχιακής εργασίας η αξιολόγηση θα γίνει με βάση την υποκειμενική κρίση του ερευνητή της εργασίας βασιζόμενος στα δεδομένα που άντλησε



σε κάθε περίπτωση. Στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων προτείνεται εκτός των άλλων σε εκτεταμένο επίπεδο μια διενέργεια έρευνας μέσω ερωτηματολογίων, όπου η ίδια κλίμακα (που ομοιάζει με την 5βάθμια κλίμακα Likert) θα χρησιμοποιηθεί για να απαντηθούν ερωτήσεις αποτελεσματικότητας των μέτρων από κατοίκους που μένουν κοντά σε ενεργές σιδηροτροχιές. Λόγω περιορισμού χρόνου αλλά και της καραντίνας (Covid19) ήταν αδύνατον να διαμοιρασθούν ερωτηματολόγια και επίσης αδύνατον να υπάρξει αντικειμενικότητα στις απαντήσεις των κατοίκων της περιοχής, εφόσον τα δρομολόγια του τρένου έγιναν σπανιότατα στο διάστημα εκείνο. Ως εκ τούτου, η παρούσα έρευνα περιορίζεται στην κριτική ικανότητα της συγγραφέα της εργασίας αλλά αποτελεί ένα πρώτο βήμα για κατάρτιση ερωτηματολογίου και ψυχομετρικής απόδοσης αποτελεσματικότητας μέτρων μείωσης θορύβου από σιδηροδρόμους.

Για λόγους κατάταξης και σωστής ταξινόμησης, παρόλο που εκτιμώνται όλα τα κριτήρια ως ισοδύναμα από ποιοτικής άποψης, ταξινομούνται σε 2 κατηγορίες

#### Κατηγορία 1: Κριτήρια απόδοσης κόστους

1. Αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη μείωση του dBA → Απόδοση
2. Ασφάλεια κυκλοφορίας → Απόδοση ασφαλείας
3. Κόστος Κατασκευής (τοποθέτηση και αποδοχή) → Οικονομική αποδοτικότητα

#### Κατηγορία 2: Επιπτώσεις στο κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον

4. Αποδοχή από την κοινωνία
5. Ευκολία Εφαρμογής
6. Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον

Ο συνολικός ποιοτικός βαθμός όλων των πιθανών λύσεων θα συγκριθεί και η απόφαση σε κάθε περίπτωση θα βασίζεται στο πόσα κριτήρια παρουσιάζουν βελτίωση με την εφαρμογή του εκάστοτε μέτρου μείωσης θορύβου. Ένας ενδεικτικός συγκεντρωτικός πίνακας που συνοψίζει τα παραπάνω είναι ο ακόλουθος:

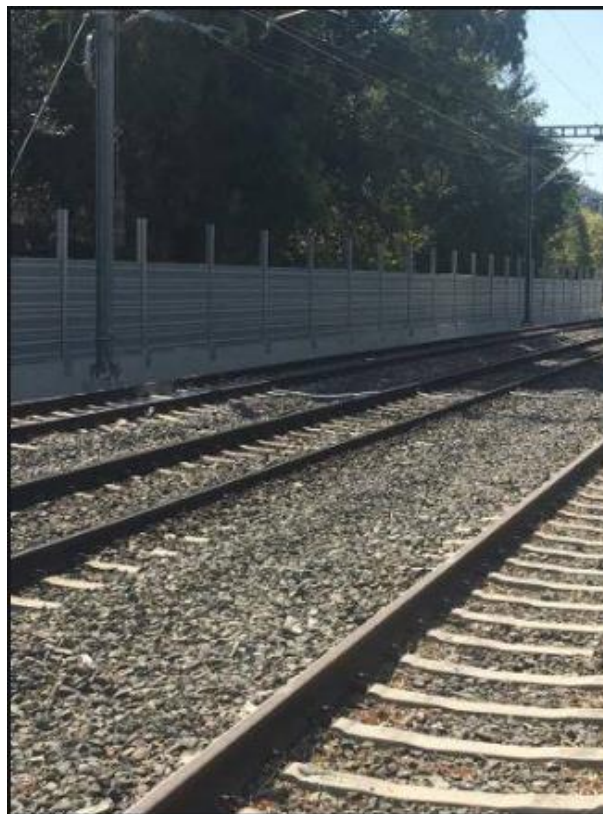
Πίνακας 2: Πίνακας Αξιολόγησης Πιθανών Λύσεων με βάση επιλεγθέντα κριτήρια

Κριτήρια/Πιθανή Λύση	Συμβατικά ηχοπετάσματα	Φύτευση	Rail Dampers
1.Μείωση των dbA			
2.Ασφάλεια Κυκλοφορίας			
3.Κόστος Κατασκευής			
4.Αποδοχή από την κοινωνία			
5.Ευκολία Εφαρμογής			
6.Επιπτώσεις στο περιβάλλον			

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μέθοδοι μετριασμού της ηχορύπανσης στο δίκτυο μετρό και σιδηροδρόμων στην Αθήνα

### 4.1. Συμβατικά ηχοπετάσματα

Στις ακόλουθες εικόνες παρατίθενται παραδείγματα εφαρμογής του εν λόγω μέτρου απορρόφησης ηχορύπανσης στο δίκτυο Μετρό της Αθήνας.



Εικόνα 22 Α,Β: Μεταλλικά ηχοπετάσματα πλησίον του σταθμού ΗΣΑΠ του Μοσχάτου



Εικόνα 23: Τοποθέτηση ηχοπετασμάτων από σκυρόδεμα και ηχοαπορροφητικά υλικά στο τμήμα του προαστιακού κοντά στο Αεροδρόμιο

Ακολουθεί η ανάλυση της εν λόγω προτεινόμενης λύσης.

***Κριτήριο 1: Αποτελεσματικότητα όσον αφορά την μείωση των dbA***

Ενώ ένα ηχητικό φράγμα δεν θα κάνει πολλά για να μειώσει την έκχυση του θορύβου της αμαξοστοιχίας (που πρέπει να ακουστεί για λόγους ασφαλείας), μπορεί σίγουρα να βοηθήσει τη γενική μείωση του θορύβου των τρένων σε πιο αποδεκτά επίπεδα.

Με κατάλληλα σχεδιασμένα απορροφητικά ηχητικά φράγματα, μεγάλο μέρος του προσβλητικού ήχου θα απορροφηθεί από το πατενταρισμένο σχέδιο πάνελ. Τα ηχοπετάσματα είναι ένας από τους ευκολότερους τρόπους για την καταπολέμηση του θορύβου της αμαξοστοιχίας. Αυτά τα ηχοπετάσματα είναι σε θέση να δημιουργήσουν απώλεια μετάδοσης 35 ντεσιμπέλ σε υψηλές συχνότητες, καθιστώντας τους την ιδανική άμυνα κατά του θορύβου της αμαξοστοιχίας. Σε κατοικημένες περιοχές, η πλειοψηφία των ντεσιμπέλ που προκαλείται από ενοχλητικό θόρυβο εισέρχεται μέσα από τα παράθυρα και γι 'αυτό, για τους συρμούς της Αθήνας που ως επί το πλείστον

διέρχονται από πυκνοκατοικημένες περιοχές, τα ηχοπετάσματα θεωρούνται μια αρκετά ικανοποιητική λύση. (Ποιοτική Κατάταξη → Αρκετά αποτελεσματικό Μέτρο)

### **Κριτήριο 2: Ασφάλεια Κυκλοφορίας**

Από το εγχειρίδιο σχεδιασμού φραγμού θορύβου από τη διοίκηση της ομοσπονδιακής οδού, βρίσκουμε ποιοτική αξιολόγηση της ασφάλειας κυκλοφορίας σε σχέση με τη λύση των συμβατικών ηχοπετασμάτων.

Η ποιοτική αξιολόγηση με τη σκέψη / επανεξέταση των ακόλουθων παραγόντων θεωρείται επιτακτική ανάγκη στο σχεδιασμό φραγμών θορύβου όπου υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια:

*Θέση ηχοπετάσματος* - Η θέση του ηχοπετάσματος μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να τοποθετηθεί σε μια θέση όπου είναι λιγότερο ευάλωτη στις επιπτώσεις που θα έχει στα οχήματα.

*Στοιχεία σύνδεσης / οπλισμού φραγμού* - Η στερέωση του ηχοπετάσματος ή / και οι λεπτομέρειες ενίσχυσης μπορούν να τροποποιηθούν.

*Τύπος ηχοπετάσματος* - Ο τύπος του ηχοπετάσματος μπορεί να τροποποιηθεί ως προς τον τύπο υλικού ή / και τη διαμόρφωση του.

*Προστατευτικές διατάξεις ηχοπετάσματος* - Επιπλέον των προαναφερθέντων προβλημάτων, η πιθανότητα πρόσκρουσης ενός φράγματος θορύβου μπορεί να μειωθεί με την τοποθέτηση ενός προστατευτικού συστήματος φραγής / συγκράτησης (χαλύβδινη προστατευτική ράβδος, φράγμα από σκυρόδεμα Jersey κλπ.) μεταξύ του φράγματος θορύβου και την οδική κυκλοφορία ή με την ανέγερση ενός φραγμού ασφαλείας υψηλότερου από το κανονικό μπροστά από ένα φράγμα θορύβου σε άμεση γειννίαση με την κυκλοφορία. Δεδομένου ότι τα προστατευτικά εμπόδια θεωρούνται ότι αποτελούν εμπόδιο, κάθε τέτοιο προστατευτικό φράγμα πρέπει να σχεδιάζεται σύμφωνα με τα κατάλληλα πρότυπα. Επιπλέον, οι συνέπειες από την πρόσκρουση ενός οχήματος που έπληξε το προστατευτικό φράγμα πρέπει να ζυγίζονται κατά των συνεπειών της κρούσης που θα υπήρχαν απουσία μιας τέτοιας προστατευτικής διάταξης.

Από τα παραπάνω στοιχεία διαπιστώνεται ότι το ζήτημα της ασφάλειας είναι πολυπαραμετρικό στην περίπτωση των ηχοπετασμάτων και ιδιαίτερα περίπλοκο στην επιτυχή εφαρμογή. Συνεπώς έχουμε ποιοτική κατάταξη → Ελαφρώς αποτελεσματικό Μέτρο

### Κριτήριο 3: Κόστος Κατασκευής

Τα υφιστάμενα ηχοπετάσματα στις γραμμές του Αττικό Μετρό είναι Μεταλλικά ή από Συνθετικό Ακρυλικό Υλικό (πιθανότατα λόγω μεγαλύτερης κατασκευαστικής ευκολίας). Τα Μεταλλικά ηχοπετάσματα κατασκευάζονται από φύλλα χαλύβδινα γαλβανισμένα ή αλουμινίου, σε διάφορα πάχη, ανάλογα με την απαιτούμενη ηχομονωτική αξία και βαμμένα με κατάλληλη βαφή ή με ειδική συνθετική επίστρωση για μεγαλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία. Η όψη τους προς την πλευρά του θορύβου είναι διάτρητη και στο εσωτερικό τους είναι τοποθετημένο ηχοαπορροφητικό υλικό από θερμοσυγκολλητές ίνες πολυεστέρα που έχει απεριόριστη διάρκεια ζωής και δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Με την ηχοαπορροφητική τους ικανότητα εξασφαλίζουν τη δραστική μείωση του περιβαλλοντικού θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία αυτοκινήτων, τρένων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Τοποθετούνται σε στύλους από μορφοσίδηρο.

Κάνουμε μια προεκτίμηση του κόστους τέτοιων ηχοπετασμάτων στην περίπτωση του υφιστάμενου ηχοπετάσματος στο Μοσχάτο, το οποίο είναι μήκους 100m. Γίνεται χρήση του Online εργαλείου μέτρησης κόστους ηχοπετασμάτων που είναι διαθέσιμο ελεύθερα στο ακόλουθο διαδικτυακό τόπο: <https://www.nzta.govt.nz/roads-and-rail/highways-information-portal/tools/noise-barrier-cost-calcul>

The image shows a web-based calculator for noise barrier costs. It is divided into two main sections: 'Geometry' and 'Summary'. In the 'Geometry' section, the user has input a barrier length of 100 meters, selected 'Acrylic' as the material, and set the height to 4.0 meters. Below these inputs is a diagram illustrating a house on the left, a 4m high barrier in the middle, and a car on the right. The 'Summary' section on the right provides a breakdown of the costs: Barrier type is 'Wall', Length is '100m', Material is 'Acrylic', Height is '4.0m', and the cost per linear metre is '\$3700'. At the bottom of the interface, a 'Total cost' of '\$370000' is shown.

Εικόνα 24: Προεκτίμηση κόστους μεταλλικού ή συνθετικού ηχοπετάσματος μήκους 100m και ύψους 4m

Παρατηρούμε ότι το κόστος που προκύπτει είναι 370,000 ευρώ. Είναι αρκετά αυξημένο σε σχέση με άλλες λύσεις που θα προταθούν ακολούθως. Συνεπώς έχουμε ποιοτική κατάταξη → ελαφρώς αποτελεσματικό μέτρο.

**Κριτήριο 4: Αποδοχή από την κοινωνία**

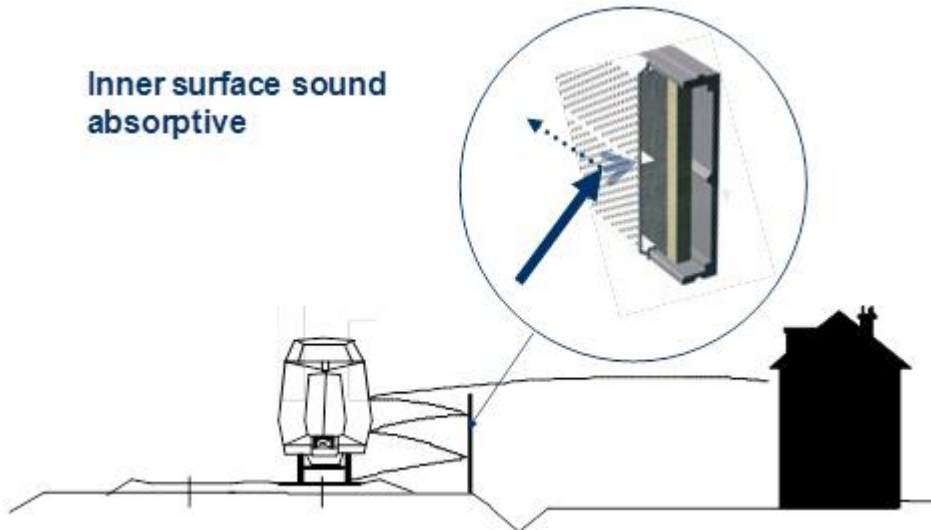
Για τους κατοίκους, οι φράκτες ηχοπετασμάτων συχνά αντιμετωπίζονται ως παρεμβολή στην οπτική τους ποιότητα. Στις διαδικασίες σχεδιασμού, όταν πρέπει να τηρούνται αυστηρά όρια θορύβου, οι κάτοικοι τείνουν να αμφισβητούν τα επιχειρήματα που οδηγούν στην κατασκευή του φράγματος και μπορεί να απαιτούν εναλλακτικές λύσεις. Ένας τρόπος για να λύσουμε αυτό το δίλημμα είναι να επιτρέψουμε στους κατοίκους να συμμετέχουν στην απόφαση και στον αισθητικό σχεδιασμό του φραγμού. Σε ορισμένους τύπους νέων στοιχείων σχεδίασης αμαξοστοιχιών, βοηθητικός εξοπλισμός (ακόμη και συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα ντίζελ) έχει τοποθετηθεί στην οροφή των πούλμαν. Αυτός ο σχεδιασμός επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των φραγμών θορύβου, τα οποία στη συνέχεια θα πρέπει να κατασκευαστούν υψηλότερα ώστε να έχουν το ίδιο αποτέλεσμα όπως και για τον πιο συμβατικό σχεδιασμό.

Επί του παρόντος οι φράκτες ηχοπετασμάτων που βρίσκονται στους συρμούς του Αττικό Μετρό, έχουν κατασκευαστεί σε αρκετά μεγάλο ύψος (4m) κάτι που δημιουργεί στους περίοικους μια αίσθηση ότι καταστρέφεται ο οπτικός τους ορίζοντας και κανένα μέτρο δεν έχει παρθεί για μετριασμό αυτής της αισθητικής – αρχιτεκτονικής επίπτωσης. Συνεπώς έχουμε ποιοτική κατάταξη  
→Αναποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 5: Ευκολία Εφαρμογής**

Τα περισσότερα ηχοπετάσματα κοντά σε σιδηροδρομικές γραμμές έχουν ύψος μεταξύ 1 και 4 μέτρων, αλλά σε εξαιρετικές περιπτώσεις δημιουργούνται πολύ μεγάλα φράγματα (μέχρι 10 μέτρα). Η βασική παράμετρος για την αποτελεσματικότητα του φραγμού είναι η γεωμετρία, δηλ. η θέση του άνω άκρου του φράγματος σε σχέση με τη θέση της πηγής θορύβου. Σημαντικό αποτέλεσμα είναι η αντανάκλαση του ήχου μεταξύ του φράγματος και του αμαξώματος του τρένου, που μπορεί να επηρεάσει την επιτεύξιμη μείωση. Αυτό το λεγόμενο φαινόμενο φαραγγιού μπορεί να αποφευχθεί με μια επένδυση με υψηλό συντελεστή απορρόφησης της πλευράς φραγμού που βλέπει προς τις τροχιές. Εναλλακτικά, το φράγμα μπορεί να τοποθετηθεί σε κεκλιμένη θέση, προκειμένου να κατευθύνει τις αντανάκλασεις προς τον ουρανό (φράγματα κεκλιμένα προς τα πίσω) ή προς το στραγγαλιστικό πηνίο (φράγμα με κλίση προς την τροχιά). Μια κεκλιμένη θέση επιλέγεται με διαφανή φράγματα, τα οποία δεν μπορούν να επιτύχουν την ηχοαπορρόφηση στην πλευρά του ήχους. Καλά σχεδιασμένα και τοποθετημένα φράγματα θορύβου μπορεί να είναι αποτελεσματικά με εξασθένηση 10 dB (A) ή περισσότερο στην πρόσοψη του δέκτη (όταν ο φραγμός εμποδίζει άμεσα την οπτική επαφή μεταξύ της πηγής θορύβου και του δέκτη).





Εικόνα 25: Εικονογράφιση του φαινομένου "φαραγγίου" και πώς μπορεί να προληφθεί με απορροφητική επένδυση

Τα πάνελ φραγμού θορύβου (ή τα εξαρτήματά τους) κανονικά είναι προκατασκευασμένα και αποστέλλονται στο χώρο του έργου. Το μέγεθος και η διαμόρφωση των πάνελ ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή του έργου. Τα πάνελ μπορούν γενικά να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες - πάνελ πλήρους ύψους (συμπεριλαμβανομένων των πάνελ που έχουν συναρμολογηθεί σε μέγεθος πλήρους ύψους) και πάνελ στοιβαγμένα στο χώρο

Όταν εξετάζουμε τον τύπο του ηχοπετάσματος (πλήρους ύψους ή στοιβαγμένα στο χώρο), πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

Απόσταση διαστήματος – Οι μεγαλύτερες αποστάσεις μπορεί να είναι πιο οικονομικές από τα μικρότερα διαστήματα, αλλά μπορεί να υπαγορεύουν τη χρήση στοιβαγμένων πλαισίων εξαιτίας περιορισμών αποστολής. Οι μακρύτεροι, στενότεροι πίνακες είναι, κατά κανόνα, περισσότερο επιρρεπείς στη στρέβλωση (σε όλες τις κατευθύνσεις) από τα κοντύτερα πάνελ για ορισμένους τύπους υλικών. Το αποτέλεσμα αυτής της στρέβλωσης πρέπει να εξεταστεί υπό το πρίσμα των σωρευμένων αρμών, των συνδέσεων μετά την τοποθέτηση και των οπτικών επιπτώσεων (όπως οι σκιές που προκαλούνται από ανομοιόμορφους αρμούς).

Απαιτήσεις αποστολής - Λόγω περιορισμών τα μεγάλα πάνελ πλήρους ύψους που αποστέλλονται σε κατακόρυφη ή σχεδόν κάθετη θέση ενδέχεται να πρέπει να τοποθετηθούν στις πλευρές τους σε φορτηγά. Αυτό μπορεί να υπαγορεύει την τοποθέτηση των ενθέτων ανύψωσης τόσο στην κορυφή όσο και στις πλευρές των πλαισίων. Εάν τα panel αυτά μεταφέρονται σε οριζόντια θέση, ενδέχεται να απαιτούνται υπερβολικές άδειες φορτίου με περιορισμούς των οριζόντιων διαστημάτων των υπόγειων διαβάσεων αυτοκινητοδρόμων και των υπερβατικών διαβάσεων.



Το συμπέρασμα είναι ότι η κατασκευή και εφαρμογή των συμβατικών panel ηχοπετασμάτων είναι μια διαδικασία που εμπεριέχει κάποιους περιορισμούς και σημεία προσοχής, ωστόσο δεν αποτελεί μια δύσκολη στην πράξη λύση κατασκευαστικά για τους σιδηροδρόμους της Αττικής. Ως εκ τούτου το εν λόγω κριτήριο έχει ποιοτική κατάταξη → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

### ***Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον***

Όπως αναφέρθηκε στην κατηγορία «αποδοχή από το κοινωνικό σύνολο», τα υφιστάμενα ηχοπετάσματα στους συρμούς της Αττικής είναι μεταλλικές κατασκευές ή από συνθετικό υλικό συνδυασμένο με σκυρόδεμα πτωχής αισθητικής ποιότητας. Υπάρχει μια πληθώρα λύσεων στους συμβατικούς φράκτες ήχου που είναι ταυτοχρόνως και οικολογικές, όπως για παράδειγμα η επιλογή χρωματισμών κοντινών στο περιβάλλον γύρω από τις ράγες του τρένου, ή χρήση επένδυσης αναρριχόμενων φυτών ή ακόμα και η κατασκευή φραγμάτων από τα εδαφικά υλικά της περιοχής. Καμία από τις ανωτέρω «οικολογικότερες» προτάσεις δεν υιοθετήθηκε, συνεπώς εκτιμούμε πως είναι μέτρια ως και κακή η εφαρμογή των συμβατικών ηχοπετασμάτων στους σιδηροδρόμους της Αττικής από πλευράς εναρμόνισής τους με το φυσικό περιβάλλον. Άρα το εν λόγω κριτήριο έχει ποιοτική κατάταξη → Ελαφρώς αποτελεσματικό μέτρο

### ***Συνολική Εικόνα 1<sup>ης</sup> Προτεινόμενης Λύσης***

Κατηγορία 1: Κριτήρια απόδοσης κόστους

1. Αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη μείωση του dBA → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο
2. Ασφάλεια κυκλοφορίας → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο
3. Κόστος (τοποθέτηση και αποδοχή) → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο

Κατηγορία 2: Επιπτώσεις στο κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον

4. Αποδοχή από την κοινωνία → Αναποτελεσματικό Μέτρο
5. Εφαρμογή → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο
6. Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο

## 4.2.Χρήση κατάλληλης φύτευσης

Η εν λόγω λύση αν και είναι οικονομική και τεχνικά εύκολη (πέραν του οικολογικού της περιεχομένου) χρησιμοποιείται ελάχιστα στους σιδηροδρόμους της Αττικής και συνηθέστατα σε συνδυασμό με κάποιο είδος συμβατικού ηχοπετάσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ακόλουθη φωτογραφία στην περιοχή του Ηρακλείου Αττικής, όπου βλέπουμε μια πρωτόλεια προσπάθεια συνδυασμού φύτευσης για ηχοπροστασία μαζί με συμβατικά ηχοπετάσματα.



Εικόνα 26: Φύτευση ως μέσο ηχοπροστασίας συνδυαστικά με συμβατικά ηχοπετάσματα στο τμήμα του ΗΣΑΠ κοντά στο Ηράκλειο Αττικής

Ακολουθεί η ανάλυση λήψης απόφασης σε προκαταρκτικό ποιοτικό επίπεδο της εν λόγω προτεινόμενης λύσης.

### **Κριτήριο 1: Αποτελεσματικότητα όσον αφορά την μείωση των dbA**

Η χρήση κατάλληλης φύτευσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πιο καλαίσθητους τρόπους μείωσης της στάθμης ηχορύπανσης. Η αποτελεσματικότητα της χρήσης των φυτών στον έλεγχο θορύβων εξαρτάται από αυτή καθ' αυτή τη φύση των θορύβων, το είδος των φυτών, τη δομή της φύτευσης και από τις κλιματολογικές συνθήκες. Εκτιμάται ότι κατά μέσο όρο το δάσος μειώνει τους θορύβους κατά 7 dB(A) ανά 30,00 μ. απόσταση. Η μείωση αυτή εξαρτάται από το είδος βλάστησης, το ύψος των δέντρων και τη δομή του δάσους. Τη μεγαλύτερη μείωση παρουσιάζουν τα κηπευτά δάση (8-12 dB(A)), τα δάση δηλαδή, που περιλαμβάνουν δένδρα διαφορετικών ηλικιών και

επομένως διαφορετικού ύψους και τη μικρότερη, ομοιόμορφες συστάδες (8-12 dB(A)). Έρευνες του Γεωπονικού Πανεπιστημίου στον εθνικό κήπο (Parafotiou et al. 2004), απέδειξαν ότι πυκνή βλάστηση από δένδρα και θάμνους μειώνουν κατά 2dB(A) έως 4dB(A) περισσότερο το κυκλοφοριακό θόρυβο σε σχέση με εκτάσεις που καλύπτονται με χλοοτάπητα και χαμηλή βλάστησης. Οι γερμανικοί κανονισμοί προστασίας (Schuizgenen Verkehrslarm, 1988) αναφέρουν ότι για να πραγματοποιηθεί μια αντιληπτή μείωση κυκλοφοριακού θορύβου σε σύγκριση με την ελεύθερη διάδοση του θορύβου, απαιτείται πυκνή βλάστηση συμπαντικού βήθους με αρκετό ύψος και συνεχίζουν πως όταν η διάδοση του ήχου γίνεται μέσα από πυκνή βλάστηση με φυλλωσιά, υπολογίζεται μια πρόσθετη μείωση της τάξης του 1,5 dB(A) κάθε 10 μέτρα βήθους βλάστησης. Η μείωση του θορύβου από τη φύτευση εξετάστηκε από διάφορους ερευνητές όπως ο Heisler et al. (1987), Aylor (1972). Αείφυλλα είδη είναι περισσότερο αποτελεσματικά για τη μείωση θορύβων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (Βογιατζής κ.α. 1990, Ντάφης 2000). Οι γαλλικοί κανονισμοί (Guide de bruit des Transport Terrestres), βασισμένοι στα αποτελέσματα του εθνικού κέντρου δασικών ερευνών της Γαλλίας δέχονται ότι οι ζώνες πρασίνου μπορούν να επιτύχουν σημαντικές μειώσεις του κυκλοφοριακού φόρτου κατά 5-10 dB(A) ανά 10 μέτρα φύτευσης. Ο συνδυασμός δε φυτεύσεων και αντιθορυβικών πετασμάτων διαφόρων τύπων κατασκευής, μπορεί να είναι απολύτως αποτελεσματικός, χωρίς βέβαια η αποτελεσματικότητα αυτή να ξεπερνά το 1,5 dB (A) ανά 10 μ. φύτευσης (Βογιατζής κ.α. 1990). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών της διεθνούς εμπειρίας, διαπιστώθηκε ότι οι ζώνες πρασίνου μπορούν να ενταχθούν όχι μόνο στο πλαίσιο των προσπαθειών για τη μείωση του θορύβου, αλλά και να δώσουν μια λύση στο πρόβλημα της οπτικής ρύπανσης που προκαλούν τα συνήθη αντιθορυβικά πετάσματα.

Στην περίπτωση των ελαχίστων εφαρμογών στον ΗΣΑΠ (κυρίως) και στον προαστιακό (δευτερευόντως) η τοποθέτηση της κατάλληλης φύτευσης έγινε με πρόχειρο τρόπο, χωρίς την επιλογή των καταλλήλων αποστάσεων και ειδών δέντρων. Ωστόσο, το θετικό είναι ότι με έναν απλό επανασχεδιασμό, μπορεί τούτο το μέτρο να βελτιωθεί στα σημεία όπου τοπικά εφαρμόζεται. Εν γένει δεν μπορούμε να φτάσουμε στη μεγάλη μείωση των db όπως φαίνεται στα συμβατικά ηχοπετάσματα, αλλά δεν παύει να είναι μια ικανοποιητική λύση, αν μάλιστα χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά.

Συνεπώς κρίνουμε πως η ποιοτική κατάταξη είναι → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

### Κριτήριο 2: Ασφάλεια κυκλοφορίας

Η φύτευση της εξωτερικής πλευράς της καμπύλης της σιδηροτροχιάς βοηθά την οπτική καθοδήγηση. Οι συστάδες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ολιγόλεπτη στάθμευση (αν τούτο καταστεί απαραίτητο). Αν η εσωτερική πλευρά είναι ήδη τονισμένη με φύτευση, τότε πρέπει για οπτική ισορροπία, να φυτευθούν και στην εξωτερική πλευρά μεγάλα δένδρα. Η φύτευση στις ενδιάμεσες νησίδες, αειθαλών θάμνων, ανθεκτικών στους ρύπους, αυξάνουν την ασφάλεια κυκλοφορίας καθώς προστατεύουν τους οδηγούς από τα εκτυφλωτικά φώτα του συρμού της αντίθετης κατεύθυνσης αλλά ταυτόχρονα τονίζουν την αισθητική του έργου ενώ σε επικίνδυνα μέρη του σιδηροδρομικού άξονα, εκεί που το όχημα μπορεί να εκτραπεί της πορείας του και να φύγει από το οδόστρωμα, ελαστικά δένδρα και χαμόκλαδα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο ασφαλείας.

Η παρουσία ειδικής βλάστησης -ιδίαι της δασικής- στο κατάντη της σιδηροτροχιάς προς την πλευρά του αστικού περιβάλλοντος αποτρέπει επίσης την εμφάνιση των πλημμυρικών φαινομένων.

Το μειονέκτημα είναι πως είναι πολύ πιθανό να υπάρχει πτώση κλαδιών (ή και κορμών στην ακραία περίπτωση) πάνω στη σιδηροτροχιά κάτι που μπορεί να επιφέρει καθυστερήσεις στα δρομολόγια καθώς είναι άκρως επικίνδυνη η διέλευση του ηλεκτρικού συρμού από μία σιδηροτροχιά που έχει έστω και το παραμικρό εμπόδιο. Μάλιστα δεν είναι σπάνιο το φαινόμενο πτώσης κλαδιών στη σιδηροτροχιά, ιδιαίτερα στον ΗΣΑΠ που δεν έχουν τηρηθεί και οι κατάλληλες αποστάσεις.



Εικόνα 27: Περίπτωση πτώσης κορμών στις σιδηροτροχιές του ΗΣΑΠ

Συνεπώς, με συνυπολογισμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν κρίνουμε πως η ποιοτική κατάταξη είναι → Αναποτελεσματικό Μέτρο.

### ***Κριτήριο 3: Κόστος Κατασκευής***

Το κόστος τοποθέτησης κατάλληλης φύτευσης ως μέσου ηχοπροστασίας του σιδηροδρόμου είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό του συμβατικού ηχοπετάσματος (πχ από σκυρόδεμα), ωστόσο έχει πολύ πιο μεγάλο κόστος συντήρησης κάτι που το καθιστά εξίσου δαπανηρό τελικό κατά τον κύκλο ζωής του (εφόσον φυσικά γίνεται η κατάλληλη συντήρηση και δεν αφήνεται ο φυτοφράκτης δίχως περιποίηση).

Ορισμένοι τύποι βλάστησης απαιτούν περισσότερη υγρασία από άλλους. Για παράδειγμα, οι ιτιές ευδοκιμούν σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας και απαιτούν συνεχές πότισμα, ειδικά κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα ενσωμάτωσης της βλάστησης που είναι ανθεκτική στις δυσμενείς συνθήκες μπορεί να μειώσει το ποσό των αρδευτικών και των δαπανών συντήρησης. Λόγω της περιστασιακής έλλειψης υγρασίας στην Αττική, είναι επιτακτική η επιλογή ενός πράσινου φραγμού θορύβου που έχει την ικανότητα να ενσωματώνει βλάστηση που μπορεί να επιβιώσει με ελάχιστη υγρασία.

Εν τέλει διαπιστώνουμε ότι το κόστος στον κύκλο ζωής του έργου είναι παρόμοιας τάξης μεγέθους με αυτό των συμβατικών ηχοπετασμάτων.

Ποιοτική Κατάταξη → Αρκετά αποτελεσματικό μέτρο

### ***Κριτήριο 4: Αποδοχή από την κοινωνία***

Για τους κατοίκους, η δημιουργία «φυσικών» φρακτών ηχοπροστασίας μέσω κατάλληλης φύτευσης έχει απόλυτη αποδοχή. Παρόλο που μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να μειώνει την υφιστάμενη θέα κάποιων κατοικιών, το ωραίο αισθητικό και οικολογικό αποτέλεσμα οδηγούν στην ευφορία του κατοίκου της περιοχής κοντά στο σιδηρόδρομο. Με την κατάλληλη μάλιστα αρχική διαμόρφωση και συντήρηση των φυτικών «φρακτών» το αποτέλεσμα δίνει την αίσθηση ότι μια πυκνοκατοικημένη συνοικία μετατρέπεται (έστω εν μέρει) σε χώρο πρασίνου.

Ποιοτική Κατάταξη → Πολύ αποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 5: Ευκολία Εφαρμογής**

Ενώ πολλοί πράσινοι φραγμοί θορύβου ήταν επιτυχείς σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, οι περισσότερες από αυτές τις επιτυχίες ήταν σε μέτρια κλίματα όπου υπάρχει μικρή αλλαγή θερμοκρασίας και άφθονη υγρασία. Στη βιβλιογραφία διατυπώνονται αρκετές ανησυχίες σχετικά με ορισμένα από τα πράσινα προϊόντα φραγμού θορύβου. Οι βασικές ανησυχίες περιλαμβάνουν την ικανότητα του πράσινου προϊόντος φραγμού θορύβου να συλλάβει και να συγκρατεί την υγρασία, την ικανότητα του φράγματος να ενσωματώνει κατάλληλη βλάστηση για το επικρατούμενο περιβάλλον, την ικανότητα του φράγματος να αντιστέκεται στη διάβρωση και τους περιορισμούς ύψους του φράγματος.

Τα πράσινα φράγματα θορύβου τυπικά έχουν ένα σχετικά μικρό αποτύπωμα με ένα πλάτος βάσης περίπου 3 έως 12 πόδια. Αυτό το πλάτος δεν επιτρέπει αυτά τα εμπόδια να συλλάβουν αρκετή υγρασία για τη διατήρηση της βλάστησης. Επιπλέον, αυτά τα εμπόδια έχουν μεγάλες επιφάνειες που εκτίθενται στον ήλιο και τον άνεμο, αυξάνοντας την ταχύτητα εξάτμισης της υγρασίας μέσα στο φράγμα. Ως εκ τούτου, εκτός εάν το φράγμα βρίσκεται σε πολύ υγρό περιβάλλον κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα, απαιτείται σύστημα άρδευσης για τη διατήρηση της βλάστησης.

Μια άλλη ανησυχία είναι η διάβρωση του εδάφους από το πράσινο φράγμα του θορύβου. Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά σε ένα οικιστικό περιβάλλον, το έδαφος υπόκειται σε διάβρωση, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλεια βλάστησης και μείωση του μετριασμού του θορύβου. Αυτή η απώλεια του εδάφους θα μπορούσε επίσης να αυξήσει το κόστος συντήρησης και να μειώσει την αισθητική των δομών. Ως αποτέλεσμα, ο επιλεγμένος σχεδιασμός θα πρέπει να αντισταθεί στη διάβρωση από τον άνεμο και τη βροχή.

Ποιοτική Κατάταξη → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 6: Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον**

Η εξεταζόμενη πρόταση έχει μόνο θετικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπως αυτές της Αθήνας που έχουν ανάγκη από την παρουσία μικρών πνευμόνων πρασίνου, όπου αυτό είναι εφικτό.

Ποιοτική κατάταξη → Πολύ αποτελεσματικό Μέτρο



**Συνολική Εικόνα 2<sup>ης</sup> Προτεινόμενης Λύσης**

Κατηγορία 1: Κριτήρια απόδοσης κόστους

1. Αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη μείωση του dBA → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο
2. Ασφάλεια κυκλοφορίας → Αναποτελεσματικό Μέτρο
3. Κόστος (τοποθέτηση και αποδοχή) → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

Κατηγορία 2: Επιπτώσεις στο κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον

4. Αποδοχή από την κοινωνία Πολύ Αποτελεσματικό Μέτρο
5. Εφαρμογή → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο
6. Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον → Πολύ Αποτελεσματικό Μέτρο

### 4.3.Rail Dampers – Ηχητικοί αποσβεστήρες σιδηροτροχιάς

Είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται σε αρκετά σημεία του δικτύου σιδηροδρόμων της Αττικής (και σε τμήματα του ΗΣΑΠ μετά την ανακαίνιση, και στο Μετρό και στον Προαστιακό). Η μορφή που έχουν αυτοί οι ηχητικοί αποσβεστήρες σε ένα ενδεικτικό τμήμα της γραμμής 1 (ΗΣΑΠ) κοντά στο σταθμό Αττική, φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 28: Τοποθέτηση ηχητικών αποσβεστήρων σιδηροτροχιάς στη γραμμή 1 του Αττικό Μετρό (Konstantinos Vogiatzis &, Patrick Vanhonacker, 2015)

Η ποιοτική ανάλυση βαθμονόμησης με βάση το σταθμισμένο μοντέλο που έχει προταθεί, φαίνεται ακολούθως.

#### ***Κριτήριο 1: Αποτελεσματικότητα όσον αφορά την μείωση των dbA***

Οι αποσβεστήρες των σιδηροτροχιών μπορούν να περιγραφούν ως προκατασκευασμένα ή ρυθμιζόμενα στοιχεία, συνήθως συναρμολογημένα στις πλευρικές πλευρές των σιδηροτροχιών, χρησιμοποιώντας συνδετήρες, μπουλόνια ή κόλλα, ενώ ορισμένοι τύποι έχουν ένα τμήμα κάτω από το πόδι της σιδηροτροχιάς, για τη μείωση του θορύβου κύλισης απορροφώντας τους κραδασμούς της σιδηροτροχιάς.



Υπάρχουν διακριτικοί αποσβεστήρες σιδηροδρόμων και συνεχείς αποσβεστήρες σιδηροδρόμων, ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης στη σιδηροτροχιά. Οι διακριτοί αποσβεστήρες σιδηροτροχιάς είναι τοποθετημένοι στη σιδηροτροχιά, σε ίση απόσταση, συνήθως μισή απόσταση μεταξύ κάθε θέσης λιναριού ή συνδετήρων. Ο συνεχής αποσβεστήρας σιδηροτροχιάς βρίσκεται κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, αλλά αυτή η διαμόρφωση δεν χρησιμοποιείται καθόλου. Οι αποσβεστήρες των σιδηροτροχιών πρέπει να τοποθετηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζουν την κανονική κατασκευή της γραμμής και να παρεμποδίζουν τις εργασίες συντήρησης.

Όλοι οι αποσβεστήρες γραμμής αποτελούνται από χαλύβδινα στοιχεία Η συχνότητα ταλάντωσης στην οποία μεταφέρεται η ενέργεια δόνησης των σιδηροτροχιών στον αποσβεστήρα εξαρτάται από τη δυσκαμψία και τους συντελεστές απόσβεσης του καουτσούκ. Μια αλλαγή στον τύπο του καουτσούκ φέρνει μια τροποποίηση στο εύρος της συχνότητας λειτουργίας του αποσβεστήρα ή μια βελτίωση στη διάχυση της μεταφερόμενης ενέργειας. Ομοίως, η συχνότητα λειτουργίας του αποσβεστήρα σιδηροτροχιάς εξαρτάται από το μοντέλο του. Ένας αποδοτικός αποσβεστήρας συντονίζεται σε ευρεία κλίμακα μεταξύ 500 και 2000 Hz, όπου οι δονήσεις των σιδηροτροχιών είναι σημαντικές πηγές θορύβου κύλισης [4]. Στην πραγματικότητα, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου αποσβεστήρα είναι πιο σύνθετος από ό, τι φαίνεται στην αρχή. Τα ζητήματα προέρχονται από το γεγονός ότι το καουτσούκ είναι ένα υλικό του οποίου τα χαρακτηριστικά της ακαμψίας και της απόσβεσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το φορτίο, τη συχνότητα και τη θερμοκρασία.

Η απόδοση του αποσβεστήρα σιδηροτροχιάς περιγράφεται με το ρυθμό αποσύνθεσης γραμμής (TDR). Όσο υψηλότερο είναι το TDR, τόσο χαμηλότερη είναι η εκπομπή θορύβου. Πρακτικά, το TDR περιγράφει τα χαρακτηριστικά των κραδασμών των σιδηροτροχιών, πιο συγκεκριμένα το ρυθμό εξασθένησης των κραδασμών κατά μήκος της σιδηροτροχιάς. Εάν R είναι ο συντελεστής μείωσης του πλάτους στο μήκος κύματος ταλάντωσης ανά μέτρο, τότε το TDR δίνεται από το  $-20\log_{10} R$ .

Το TDR εκφράζεται κανονικά σε dB / m και εξαρτάται από τη συχνότητα ταλάντωσης. Το TDR μετράται τόσο για τους κατακόρυφους όσο και για τους πλευρικούς κραδασμούς της σιδηροτροχιάς.

Για TDR περίπου 10 dB / m, η μείωση των κραδασμών είναι τόσο υψηλή ώστε ο εκπεμπόμενος θόρυβος δεν είναι πια σημαντικός. Κατά συνέπεια, οι αυξήσεις του TDR πάνω από 10 dB / m δεν έχουν σημασία. Δεδομένου ότι οι αποσβεστήρες σιδηροδρόμων παίζουν το ρόλο του μετριασμού των δονήσεων των σιδηροδρομικών γραμμών, που αντιστοιχούν σε αυξημένο TDR, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι το TDR θα πρέπει να είναι κάτω από 10 dB / m κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του αποσβεστήρα.

Το TDR εξαρτάται από τις παραμέτρους κατασκευής τροχιάς και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, γεγονός που εξηγεί τις μεγάλες διακυμάνσεις του TDR κατά μήκος της διαδρομής. Οι υψηλές τιμές του TDR σε χαμηλές συχνότητες, κάτω από 400 Hz - για τους πλευρικούς κραδασμούς και μικρότερες από 700 Hz για τους κατακόρυφους κραδασμούς, είναι δυνατές ως αποτέλεσμα της σύζευξης μεταξύ των δονήσεων των σιδηροτροχιών και των χώρων για το κρεβάτι και του εδάφους. Από την άλλη πλευρά, το TDR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακαμψία του ταμπόν.

Η μείωση της εκπομπής θορύβου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του συστήματος τροχιάς χωρίς αποσβεστήρες. Στα περισσότερα συστήματα τροχιάς, η ισχύς του ήχου που εκπέμπεται από το όχημα είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που προέρχεται από την σιδηροτροχιά, η οποία είναι ορατή στα παρακάτω διαγράμματα. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ο αποσβεστήρας σιδηροτροχιάς δεν επηρεάζει τη συμβολή του τροχού. Κατά συνέπεια, ο συνολικός θόρυβος μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των αποσβεστήρων σιδηροδρόμων, εάν η τροχιά είναι η κυρίαρχη πηγή θορύβου. στην περίπτωση αυτή πρόκειται για μείωση περίπου 4 dB (A).

Η απόδοση των αποσβεστήρων εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας. Επομένως, οι αποσβεστήρες των σιδηροδρόμων θα είναι ανεπαρκείς σε ταχύτητες κάτω των 30 km / h, όπου ο θόρυβος έλξης είναι γενικά κυρίαρχος. Σε υψηλές ταχύτητες, όπου ο αεροδυναμικός θόρυβος καθίσταται σημαντικός, είναι εμφανής η μειωμένη απόδοση των αποσβεστήρων σιδηροτροχιάς, περίπου 1 dB (A) [32].

Από τα ανωτέρω στοιχεία συμπεραίνουμε ότι η εν λόγω μέθοδος δεν έχει τόσο μεγάλη επίδραση στη συνολική μείωση των dB σε σχέση με τις 2 προαναφερθείσες μεθόδους. Ωστόσο είναι χρήσιμη γιατί μπορεί να εφαρμοσθεί συνδυαστικά με κάποια άλλη μεθοδολογία για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Ποιοτική Κατάταξη → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο

### **Κριτήριο 2: Ασφάλεια Κυκλοφορίας**

Η εν λόγω μεθοδολογία είναι μια πολύ διακριτική λύση και ελάχιστη επιρροή έχει στο συνολικό περιβάλλον του σιδηροδρόμου. Άρα δεν έχει ούτε ευνοϊκή ούτε επιβαρυντική επιρροή στη συνολική κυκλοφοριακή ασφάλεια μιας σιδηροτροχιάς. Η απουσία οποιουδήποτε πιθανού κινδύνου κρίνεται θετικά.

Ποιοτική Κατάταξη → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 3: Κόστος Κατασκευής**

Το κόστος τοποθέτησης των αποσβεστήρων είναι πολύ υψηλό εάν το σιδηροδρομικό δίκτυο είναι υφιστάμενο και δεν έχουν τεθεί εξαρχής στις κατάλληλες θέσεις των σιδηροτροχιών. Ωστόσο, λόγω της τεχνολογικής προόδου στον κλάδο των αποσβεστήρων, υφίστανται επί του παρόντος συγκεκριμένοι μηχανισμοί που επιτρέπουν την εύκολη πρόσβαση και αντικατάστασή τους από το συνεργείο, καθιστώντας το κόστος συντήρησης πολύ χαμηλό.

Ποιοτική Κατάταξη → Ελαφρώς αποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 4: Αποδοχή από την κοινωνία**

Πρόκειται για μια λύση ελάχιστα παρεμβατική και με μηδενική αισθητική τροποποίηση του κοινωνικού περιβάλλοντος. Άρα δεν γίνεται καν αντιληπτή από τους χρήστες του δικτύου και τους περίοικους. Τούτο οδηγεί σε μια (πρακτικώς) σιωπηρή αποδοχή της εν λόγω λύσης.

Ποιοτική Κατάταξη → Πολύ αποτελεσματικό μέτρο

**Κριτήριο 5: Ευκολία Εφαρμογής**

Η εγκατάσταση πραγματοποιείται με γρήγορο και οικονομικό τρόπο χρησιμοποιώντας τα βοηθήματα συναρμολόγησης που δίνονται από την κατασκευαστική εταιρία, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.

Το σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί με ασφάλεια κατά τη διάρκεια των κατάλληλων διαστημάτων πρόσβασης σε τροχιά καθώς και κατά τη διάρκεια της τρέχουσας λειτουργίας (ζωντανός σιδηρόδρομος), με την προϋπόθεση ότι τα σπασίματα αμαξοστοιχίας (χρονικό παράθυρο) υπερβαίνουν τα πέντε (5) λεπτά μεταξύ πρόσβασης και εκκένωσης της τροχιάς.

Οι μονάδες απορρόφησης δεν εμποδίζουν τις εργασίες συντήρησης γραμμής και είναι οπτικά διακριτικές. Οι μονάδες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν όταν αλλάζουν οι σιδηροτροχιές.

Η προσωρινή αφαίρεση για εργασίες συγκόλλησης σιδηροτροχιών εκτελούνται χωρίς προβλήματα και είναι δυνατή ανά πάσα στιγμή. Δεν χρειάζεται να αποσυναρμολογήσει το συνεργείο τα στοιχεία κατά τη συμπίεση ή / και την τροχιά λείανσης των τροχιών. Οι εργασίες ελέγχου και / ή επιθεώρησης των σιδηροτροχιών δεν επηρεάζονται ούτε παρεμποδίζονται.

Το μόνο μειονέκτημα είναι η σχετική δυσκολία της πρώτης εφαρμογής σε υφιστάμενο δίκτυο λόγω έλλειψης εξειδικευμένων συνεργείων στην Ελλάδα.

Ποιοτική Κατάταξη → Αρκετά αποτελεσματικό Μέτρο

**Κριτήριο 6: Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον**

Δεν υπάρχει καμία αρνητική επίπτωση στο φυσικό περιβάλλον καθώς είναι μια μέθοδος ελάχιστα παρεμβατική και πολύ διακριτική. Ωστόσο δεν εμπεριέχει και κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα όπως θα είχε για παράδειγμα ένας φυτοφράκτης που αναβαθμίζει το φυσικό τοπίο γύρω από το σιδηρόδρομο.

Ποιοτική Κατάταξη → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

**Συνολική εικόνα 3<sup>ης</sup> λύσης**

Κατηγορία 1: Κριτήρια απόδοσης κόστους

1. Αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη μείωση του dBA → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο
2. Ασφάλεια κυκλοφορίας → Αρκετά αποτελεσματικό Μέτρο
3. Κόστος Κατασκευής (τοποθέτηση και αποδοχή) → Ελαφρώς Αποτελεσματικό Μέτρο

Κατηγορία 2: Επιπτώσεις στο κοινωνικό και φυσικό περιβάλλον

4. Αποδοχή από την κοινωνία → Πολύ Αποτελεσματικό Μέτρο
5. Ευκολία Εφαρμογής → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο
6. Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον → Αρκετά Αποτελεσματικό Μέτρο

#### 4.4. Σύγκριση λύσεων

Πίνακας 3: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Κριτήρια/Πιθανή Λύση	Συμβατικά ηχοπετάσματα	Φύτευση	Rail Dampers
1.Μείωση των dbA	4	4	3
2.Ασφάλεια Κυκλοφορίας	3	2	4
3.Κόστος Κατασκευής	3	4	3
4.Αποδοχή από την κοινωνία	2	5	5
5.Ευκολία Εφαρμογής	4	3	4
6.Επιπτώσεις στο περιβάλλον	2	4	4

5=Πολύ αποτελεσματικό

4=Αρκετά Αποτελεσματικό

3=Ελαφρώς Αποτελεσματικό

2=Αναποτελεσματικό

1=Εντελώς αναποτελεσματικό

Η λύση που διαφαίνεται να συγκεντρώνει τα περισσότερα θετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά είναι η εφαρμογή αποσβεστήρων σιδηροτροχιάς. Παρότι είναι τελικά η μεθοδολογία που έχει τη μικρότερη επίδραση στη μείωση του θορύβου μιας σιδηροτροχιάς, αποδεικνύεται ότι συγκεντρώνει τα περισσότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα στις άλλες κατηγορίες της πολυκριτήριας ανάλυσης. Το κυριότερο πλεονέκτημα που εντοπίζεται είναι πως μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο μείωσης θορύβου και είναι ελάχιστα παρεμβατική στο συνολικό σύστημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα

### 5.1. Γενικά 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 τορνευμένο τροχό)

Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδηροτροχιών (3-7.5 dBA)

Ηχοαπορροφητικές πλάκες (3-4 dBA)

Βελτιωτικά τριβής που επαλείφονται στη σιδηροτροχιά (12-14.2 dBA)

B) 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)

Η επιρροή εξωτερικών παραγόντων (όπως π.χ. η ταχύτητα του συρμού, ο τύπος και η παλαιότητα του τροχαίου υλικού, η σύνθεση των συρμών) καθιστά τη διαδικασία της ανάλυσης λήψης αποφάσεων ασαφή εν μέρει όσον αφορά την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της τοποθέτησης της εκάστοτε μεθοδολογίας.

Στο τελευταίο μέρος 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.

## 5.2. Συμπεράσματα από τη μελέτη περίπτωσης

Η προτιμότερη λύση είναι η εφαρμογή αποσβεστήρων σιδηροτροχιάς. Παρότι είναι τελικά η μεθοδολογία που έχει τη μικρότερη επίδραση στη μείωση του θορύβου μιας σιδηροτροχιάς, αποδεικνύεται ότι συγκεντρώνει τα περισσότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα στις άλλες κατηγορίες της πολυκριτήριας ανάλυσης. Το κυριότερο πλεονέκτημα που εντοπίζεται είναι πως μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο μείωσης θορύβου και είναι ελάχιστα παρεμβατική στο συνολικό σύστημα.

## 5.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προτείνεται το σύστημα βαθμονόμησης που εφαρμόζεται σε επίπεδο Ποιοτικής Προκαταρκτικής Μελέτης να εφαρμοσθεί σε διάφορους σιδηροδρόμους στην Ελλάδα, με διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές ανάγκες σε σχέση με το κοινωνικό, οικονομικό και φυσικό περιβάλλον σε κάθε περιοχή. Ακολούθως, προτείνεται η παρούσα ποιοτική μελέτη να επεκταθεί και με χρήση κατάλληλου λογισμικού να μετατραπεί σε πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων. Από την εξαγωγή ακριβούς μαθηματικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων που θα δώσει για διάφορους σιδηροδρόμους στην Ελλάδα, θα εξετασθεί κατά πόσον το «χονδροειδές» σύστημα βαθμονόμησης που προτάθηκε μπορεί να αποτελέσει μια καλή και γρήγορη λύση σε επίπεδο προκαταρκτικής μελέτης (πιθανόν για να απορριφθούν γρήγορα κάποιες οφθαλμοφανώς ακατάλληλες λύσεις).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Xiaolan, G., 2006. Railway environmental noise control in China. *J. Sound Vib.*, vol. 293 (3-5), pp. 1078-1085.
- [2] Kalivoda, M., Danneskiold-Samsøe, K., Krueger, F., Barsikow, B., 2003. EURailNoise: a study of European priorities and strategies for railway noise abatement. *J. Sound Vib.*, vol. 267 (3), pp. 387-396.
- [3] Hardy, A.E.J., 2000. Measurement and Assessment of noise within passenger trains. *J. Sound Vib.*, vol. 231 (3), pp. 819-829.
- [4] Κ. Λυμπέρης (2009). *Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές*, Τόμος Ι. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.
- [5] Commission of the European Communities (2001). *White paper European transport policy for 2010 time to decide*.
- [6] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2012). *Μείωση της ηχορρύπανσης από τους σιδηροδρόμους*.
- [7] Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2011). *Λευκή Βίβλος Χάρτης πορείας για έναν ενιαίο Ευρωπαϊκό χώρο μεταφορών - Για ένα ανταγωνιστικό και ενεργειακά αποδοτικό σύστημα μεταφορών*.
- [8] Χ. Πυργίδης (2009). *Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών (Υποδομή – Τροχαίο Υλικό - Εκμετάλλευση)*. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.
- [9] George Paul Wilson, *Rail System Noise and Vibration Control*, Proceedings of ACOUSTICS 2004.
- [10] Χ. Σιάλμα (2013). *Διερεύνηση της συμπεριφοράς σταθερής επιδομής τύπου STEDEF και RHEDA 2000 κατά τη διέλευση ενός συρμού*, ΕΜΠ.
- [11] Κ. Λυμπέρης (2009). *Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές*, Τόμος ΙΙ. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.
- [12] Indian railways institute of civil engineering (2012). *Guidelines for working of rail grinding machine (for Indian railways)*.
- [13] Ιστότοπος Wikipedia.
- [14] UIC (July 2013). *Railway noise technical measures catalogue*.
- [15] Δ. Αργυρόπουλος (2010). *Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης θορύβου από τη λειτουργία της γραμμής- Τεχνική έκθεση*. ΗΣΑΠ.
- [16] Εικόνες ιστότοπου Google.
- [17] Συζήτηση με εκπρόσωπο της ΣΤΑ.ΣΥ.
- [18] Τεχνικό φυλλάδιο ηχοαπορροφητικών πλακών Durisol.
- [19] F. Kruger (1994). *Kurvenquietschen im Nahverkehr*. Forschungsbericht FE-Nr. 70413/93.
- [20] R. Gunacker, Pressbaum/Oesterreich (6/2014). *Kurvenquietschen und die Moeglichkeiten seiner Vermeidung*, Der Nahverkehr S. 23-26.
- [21] Γ. Νίνος. *Τροχός και Σιδηροτροχιά*.
- [22] 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.
- [23] Εικόνες ιστότοπου KELSAN-LB Foster.



- [24] Μ. Ανδρουλάκη (2013). *Διερεύνηση θεμάτων φθοράς και αποκατάστασης της επιφάνειας κύλισης σιδηροδρομικών τροχών*, ΕΜΠ.
- [25] B. Suarez, J. A. Chover, P. Rodriguez and F.J. Gonzalez. (2015) *Effectiveness of resilient wheels in reducing noise and vibrations*.
- [26] 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.
- [27] K. Chiddick, D. Eadie (1999). *Wheel/Rail friction management solutions*. 14<sup>th</sup> Conference on Current Problems in Rail Vehicles, PRORAIL 99.
- [28] Α. Μπαλλής, Ι. Λαγού (2010). *Σιδηροδρομικός θόρυβος προβλήματα, τεχνικές αντιμετώπισης και ερευνητικές δραστηριότητες*. Ακουστική 2002.
- [29] Γ. Τσάχος, Χ. Πυργίδης, Ν. Δεμιρίδης (2001). *Συμβολή στην πρόβλεψη του σιδηροδρομικού θορύβου*. ΤΕΕ.
- [30] 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.
- [31] T. Okamura, Y. Kusumi, T. Hariyama. *Development and prospect for low noise pantographs*. InterNoise 2000.
- [32] Γ. Κανελλαΐδης, Α. Καλτσούνης, Α. Μπαλλής (2011). *Σημειώσεις Ειδικών Κεφαλαίων Οδοποιίας-Β. Στοιχεία Κυκλοφοριακού Θορύβου*. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- [33] Δ. Τσανακτσίδης, Δ. Τσιτσούλας. (2011) *Ηχοπετασματα*.
- [34] 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.
- [35] Ho, Wilson & Wong, Banting & England, David. (2011). *Tuned Mass Damper for Rail Noise Control*. 10.1007/978-4-431-53927-8\_11.
- [36] 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.
- [37] L. G. Kurzweil (1983). Wheel/rail noise - means for control. *Journal of Sound and Vibration* 87 p. 197-220.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] G. Xiaolan (2006). Railway environmental noise control in China. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 1078-1085.
- [41] Μ. Υδραΐος (2005). *Πρόγνωση Σιδηροδρομικού Θορύβου*. ΕΜΠ.
- [42] Δ. Αργυρόπουλος (2010). *Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης θορύβου από τη λειτουργία της γραμμής του Η.Σ.Α.Π.*
- [43] K. 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.

- [44] 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.
- [45] B. Muller, J. Oertli (2006). Combating curve squeal Monitoring existing applications. *Journal of Sound and Vibration* 293 p. 728-734.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Μ. Πατσή, Κ. Βογιατζής (2006). *Ακουστική μελέτη εφαρμογής ηχοπετασμάτων στο δίκτυο του ΗΣΑΠ*.
- [49] Ιστότοπος [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr)
- [50] Ιστότοπος [www.stasy.gr](http://www.stasy.gr)
- [51] Ιστότοπος [www.mesametaforas.gr](http://www.mesametaforas.gr)
- [52] Α. Γ. Γουδέλης.(2010) *ΗΣΑΠ 100 χρόνια ηλεκτροκίνησης*. ΤΕΕ.
- [53] Α. Κορωνάιος, Γ. Πουλάκος (2005). *Τεχνικά Υλικά - Τόμος 3*. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- [54] Α. Κορωνάιος (2005). *Εργαστήριο Ηχοτεχνίας*. Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- [55] ISO 3095:1975 *Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles*
- [56] IEC 61672:2003
- [57] Ιστότοπος [www.isap.gr](http://www.isap.gr)
- [58] Altay, Y. (January 1997). *Planning considerations for underground train stations*. M.F.A Thesis, Bilkent University, Ankara.
- [59] Alves-Pereira, M., Melo, J. J. and Branco, C. (2004). *Low frequency noise in subways*. The 33rd international congress and exposition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2004, Prague.
- [60] Beranek, L. L. (1988). *Acoustical measurements*. 3rd ed. New York ASA.
- [61] Carman, R. (2004). *Prediction of train noise in tunnels and stations*. The 33<sup>rd</sup> international congress and exposition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2004, Prague.
- [62] Christensen, C. L. (2002). *ODEON room acoustics program version 6.0 user manual, industrial, auditorium and combined editions*. Lyngby Oersted Plads.
- [63] Crockett, A. R. and Pyke, J. R. (2000). Viaduct design for minimization of direct and structure-radiated train noise. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 883–897.
- [64] Durmisevic, S. (1999). The future of the underground space. *Cities*, 16(4), 233–245.
- [65] Durmisevic, D. and Sariyildiz, S. (2001). A systematic quality assessment of underground spaces – public transport stations. *Cities*, 18(1), 13–23.
- [66] Gungor, F. E. (January 2003). *Computer Aided Noise Prediction in Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems*. M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- [67] Harris, C. M. (1979). *Handbook of Noise Control*. Second Ed. New York McGraw-Hill.

- [68] Harrison, M. F. (2001). Calculating speech intelligibility for the design of public address system at railway stations. *Mechanical Engineers*, 215, 319–329.
- [69] Irvine, L. K. and Richards, R. L. (1998). *Acoustics and noise control handbook for architects and builders*. Florida Krieger.
- [70] Kang, J. (1997a). Acoustics of long underground spaces. *Tunneling and underground space technology*, 12(1), 15–21.
- [71] Kang, J. (1997b). A method for predicting acoustic indices in long enclosures. *Applied Acoustics*, 51(2), 169–180.
- [72] Kang, J. (1997c). Scale modeling of train noise propagation in an underground station. *Journal of Sound and Vibration*, 202(2), 298–302.
- [73] Lam, P. M. and Li, K. M. (2004). *The predicted reverberation time in a rectangular long enclosure*. The 33rd international congress and exposition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2004, Prague.
- [74] Lawrence, D. (1994). *Underground architecture*. Wiltshire Capital transport publishing.
- [75] Naylor, G. M. (1993). ODEON – Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustic*, 38, 131–143.
- [76] *Turkish Noise Control Act*. Article 12, Passage 3, Table 5.
- [77] Rindel, J. H. Rindel. (2000). The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. *Journal of Vibroengineering*, 3, 219–224.
- [78] Schmidt, A. M. D. and Kirkegaard, P. L. (2004). *On architectural acoustics design using computer simulation*. Eleventh international congress on sound and vibration July 2004, Petersburg.
- [79] Shuo-xian, W. and Yue-zhe, Z. (2004). *Predicting STI in a tunnel in case of emergency with the image wall method*. The 33rd international congress and exposition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2004, Prague.
- [80] Wijngaarden, W. S. J. and Verhava, J. A. (2001). *The influence of fan and traffic noise on speech intelligibility in Dutch traffic tunnels*. The 2001 international congress and exhibition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2001, The Hague, Netherlands.
- [81] VDI-Richtlinie 2716. *Luft-und Körperschall bei Schienenbahnen des städtischen Nahverkehrs*.
- [82] Yang, L. and Shield, B. M. (2001). The prediction of speech intelligibility in underground stations of rectangular cross section. *JASA*, 109.1, 266–273.
- [83] Z. Sü, M. Çalışkan, Acoustical Design and Noise Control in Metro Stations: Case Studies of the Ankara Metro System, *Build. Acoust.* 14(3), 203–221 (2007).
- [84] Stavroulaki S., Travlou M and Sotiropoulou A. (2013) “*The perception of noise at the Athens metro lines; "factory" description of the concept*”, National Technical University of Athens (NTUA)

## APPENDIX

### ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ

#### A.1. Building acoustics in subway railways

Metro frameworks improve the urban condition by assuaging weight on surface transportation, and diminishing clamor and improving air quality. Metro stations ought to furnish both open and staff with perfect and splendid offices upgraded by great structure [Lawrence, 1994]. In any case, metro stations have acoustically dangerous inside spaces. Research on commotion control and acoustical plan of metro stations is significant particularly from the point of view of discourse comprehensibility. In a crisis, an open address framework is fundamental for peril cautioning or other data. Discourse coherence ought to agree to a for the most part acknowledged least standard for such cases. Another purpose behind clamor control is that, low recurrence commotion in metro stations can cause vibroacoustic infection of station staff [Alves-Pereira et al., 2004].

Nonetheless, other structure choices make it hard to control the commotion and lessening the level of comprehensibility. A model is the utilization of hard and intelligent material on inward surfaces of the stations for control of vandalism, fire, support and cleanliness. Inside surface materials are not chosen basically as per acoustic characteristics, but instead for wellbeing. The utilization of appropriate materials with various sound assimilation and dispersing properties has a critical job in the focused on execution. The absolute surface region of these materials situated at fitting spots additionally influences the accomplishment of acoustical plan.

Ongoing investigations of metro stations are worried about by and large plan factors. Altay [1997] considered the issues identified with flow and spatial direction, security, and the mental what's more, physiological solace of clients. The examination recognized clamor levels as a significant factor in natural fulfillment. Durmisevic [1999] likewise contemplated the lighting, fire, air condition, wayfinding and mental issues, however prohibited the acoustical perspectives. A increasingly complete examination by Durmisevic and Sariyildiz [2001] inspected the human and solace factors in underground spaces. This examination likewise included parts of commotion.

Metro stations are long fenced in areas with various acoustical properties to ordinary rooms, because of nonlinear rot attributes. Along these lines, the old style hypothesis of acoustics isn't suitable for examination. The sound forecast studies can be gathered in two wide classes, specifically: examines on PC demonstrating methods, and scale model examinations.

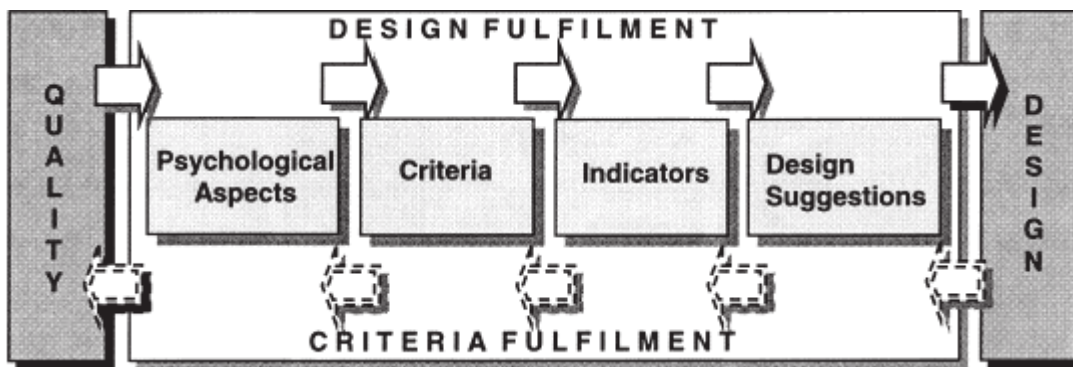
PC displaying is worried about the estimation of resonance time and discourse comprehensibility. Kang [1997a] contemplated the essential qualities of sound dispersion and resonance in long spaces. Lam and Li [2004] likewise considered resonance time attributes and built up a hypothetical model for rectangular long walled in areas. A beam following PC model was created by Yang and Shield higher when there is less by and large ingestion inside the space. To acquire a higher weakening, the safeguards ought to be equally organized in an area. Crockett and Pyke [2000] showed that for a given number of safeguards, when they are put on the roof and sidewalls, rather than the roof just, the early rot time could be shorter, and the sound weight level lessening could be more prominent. The assimilation can be expanded by utilizing absorptive parapet dividers, by making commotion trap underneath the walkways, and by applying sound ingestion on the inside looking of the skirts and anxious dividers.

Shuo-xian and Yue-zhe [2004] contemplated the essential medications when the train is in the passage. Train commotion can be decreased by a firmly permeable segment close to the passage entrance. The retentive treatment on an end divider is compelling. Indeed, even a little region of ingestion can efficiently build the sound constriction along the length of stage.

Kang [1997a] examined film safeguards as commonplace non-sinewy sound safeguards. Carman [2004] inspected shower connected cementitious materials. The material is observed to be compelling when connected to the divider inverse the stages just as underneath the stage overhang. Irvine and Richards [1998] inspected suspended roof treatment over the stages. Roof frameworks of mineral fiber and glass fiber lay-in boards with required fire rating were observed to be powerful for metro station applications [2001] for expectation of clarity in stations with rectangular cross segment. Discourse coherence and discourse transmission list were additionally considered by Shuo-xian and Yue-zhe [2004] utilizing a picture strategy. Harrison [2001] built up a computation technique for discourse clarity of open location frameworks at metro stations. Carman [2004] built up a hypothetical model for the forecast of train commotion in stations and its impact on discourse comprehensibility. The investigations on scale models are restricted in number. As of late, Kang [1997b] utilized scale models with thoughtfulness regarding the discourse understandability of different amplifier open location frameworks. Another examination by Kang [1997c] concerns the scale demonstrating of train clamor spread.

Recent studies of metro stations are concerned with overall design factors. Altay [1997] studied the issues related to circulation and spatial orientation, safety, and the psychological and physiological comfort of users. The research identified noise levels as an important factor in environmental satisfaction. Durmisevic [1999] also studied the lighting, fire, air condition, wayfinding and psychological issues, but excluded the acoustical aspects. A more comprehensive study by

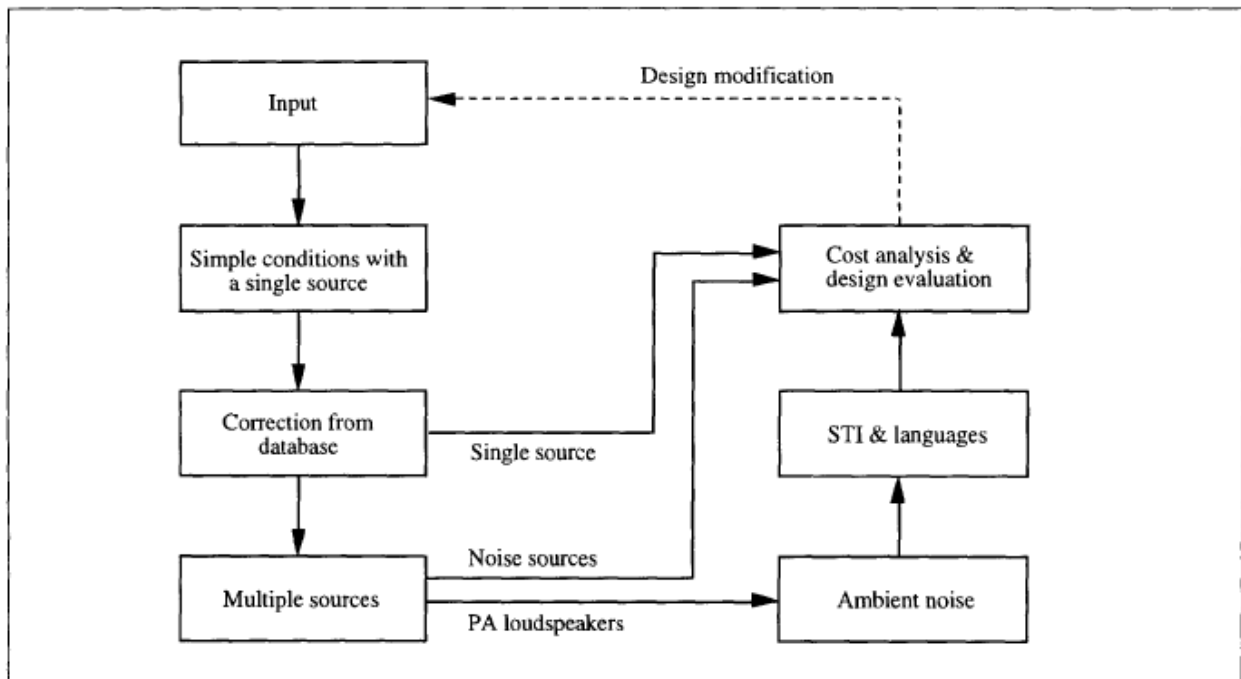
Durmisevic and Sariyildiz [2001] examined the human and comfort factors in underground spaces. This study also included aspects of noise. More specifically, this paper proposes an approach for a consistent assessment of these factors so that in future it can be integrated into a decision support system that can help indicate problem in existing underground spaces and offer support to architects designing new underground spaces. This paper focused on underground station design. Analysis of data for data optimization was done using the neural network method. With a neural network, the input–output associations for various aspects were obtained and thereafter the representative case for each aspect was obtained. These were the cases that were closest to the general public opinion regarding the quality of underground stations, and therefore also represent the focus for the development of the design guidelines. The main objective of this paper was to prepare a base for setting a Decision Support System for underground space design. This system will in the future be designed for architects as an important decision support tool during the conceptual design phase.



Εικόνα 29: Το DSS (decision support system) ως κατευθυντήρια γραμμή για το σχεδιασμό υπόγειων σταθμών, καθώς και για τη μέτρηση της ποιότητας των υπάρχοντων σταθμών (Durmisevic, 2001)

Metro stations are long enclosures with different acoustical properties to normal rooms, due to nonlinear decay characteristics. Therefore, the classical theory of acoustics is not appropriate for analysis. The sound prediction studies can be grouped in two broad classes, namely: studies on computer modeling techniques, and scale model investigations. Computer modeling is concerned with the estimation of reverberation time and speech intelligibility. Kang [1997a] studied the basic characteristics of sound distribution and reverberation in long spaces. In the research: (1) The basic characteristics of sound distribution and reverberation in long spaces have been theoretically studied; (2) The effectiveness of strategic architectural acoustic treatments in long spaces, especially for improving the intelligibility of multiple loudspeaker public address systems in underground stations, has been systematically tested in two 1:16 scale models; (3) The speech intelligibility in long spaces, particularly the differences in speech intelligibility among different languages, has been investigated by carrying out a series of articulation tests; and (4) Based on the above results, a model for predicting acoustic indices in long spaces has been developed. The physical scale modelling in two

1:16 scale models of underground stations has demonstrated the effectiveness of strategic architectural acoustic treatments in long spaces, particularly for improving the speech intelligibility of multiple loudspeaker public address systems. Moreover, the effectiveness of diffusers for increasing the sound attenuation along the length has been proved. Furthermore, the effectiveness of architectural baffles for increasing the loudspeaker directionality has been experimentally demonstrated. In general, the measurement results correspond to the theoretical analysis. Based on a series of articulation tests in both English and Chinese using loudspeaker sources, it has been demonstrated that with a constant speech transmission index, the speech intelligibility in a long space could be noticeably higher than that in a regularly-shaped (i.e., quasi-cubic) room. The results also suggest that in terms of speech intelligibility, Mandarin is slightly better than English under reverberant conditions, and English is considerably better than Mandarin under noisy conditions. A comprehensive model has been developed for predicting acoustic indices in long spaces, particularly the speech intelligibility of multiple loudspeaker public address systems in underground stations. Also, a model for predicting the temporal and spatial distribution of train noise in underground stations has been produced. The models have been validated in actual underground stations.



Εικόνα 30: Διάγραμμα του ACLE, ένα μοντέλο πρόβλεψης ακουστικών δεικτών σε μεγάλους υπόγειους χώρους. (Kang, 1997 (α)).

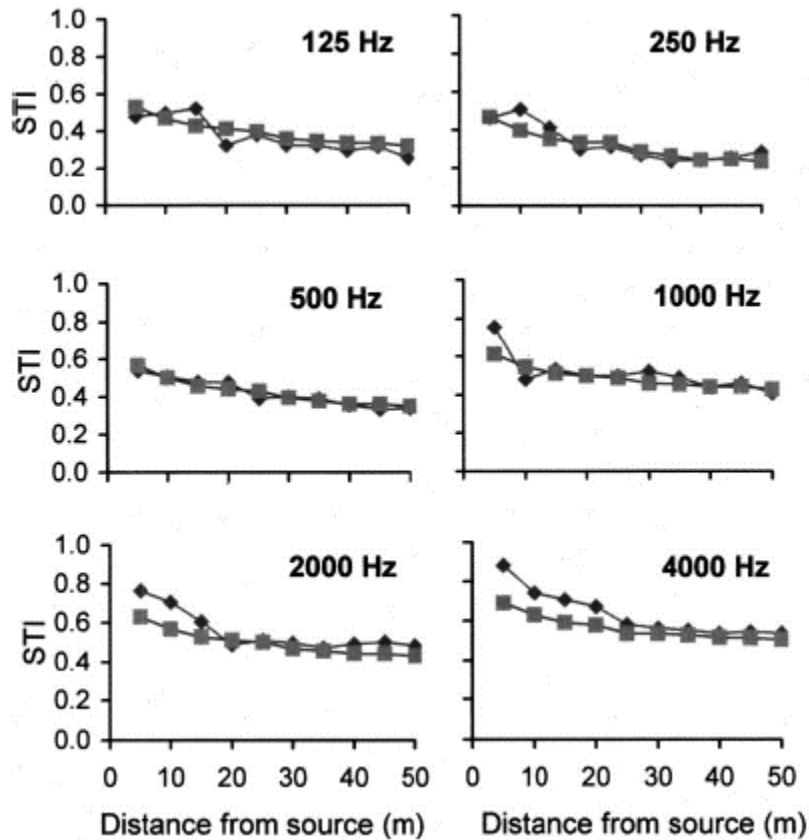
Lam and Li [2004] also studied reverberation time characteristics and developed a theoretical model for rectangular long enclosures. The aim of this paper was first to review the best known reverberation time formulae and then to show that the reverberation time cannot be thereby predicted

accurately in cases mostly encountered in practice, where the sound field is not diffuse. Introducing a correction to Fitzroy's formula allows better prediction of the reverberation time in the case of nonuniformly distributed sound absorption. Comparison of calculation results obtained on both the basis of classical equations and the new time reverberation formula introduced is shown. In addition, the results obtained by measuring reverberation conditions in situ and those predicted for the same enclosure are compared and conclusions drawn.

A ray tracing computer model was developed by Yang and Shield [2001] for prediction of intelligibility in stations with rectangular cross section. This paper described the development of a model for use in underground stations of rectangular cross section. The model predicts the sound-pressure level, early decay time, clarity index, and definition at receiver points along the enclosure. The model also calculates the value of the speech transmission index at individual points. Measurements of all parameters have been made in a station of rectangular cross section, and compared with the predicted values. The predictions of all parameters show good agreement with measurements at all frequencies, particularly in the far field of the sound source, and the trends in the behavior of the parameters along the enclosure have been correctly predicted. Errors occur at particular receiver points and frequencies for some of the parameters. Possible sources of error include the fact that the predictions are based on approximations of the geometry and acoustic characteristics of the space. In the validation described here, for example, the scattering of sound from edges of the escalators and staff-viewing boxes and from tracks has not been taken into account. Furthermore, the surface absorption coefficient was assumed as angle independent, but this is not the case in practice. In general, predictions of all parameters are more accurate in the far field than the near field of the source. The loudspeaker source used for the measurements was treated as an omnidirectional point source in the model, which may be a cause of error in the near field.

The size of the receiver volume may also lead to errors in the predictions in the near field. In this particular model the receiver was assumed to be a 1-m sphere in the space. This size of receiver relative to the dimensions of the space can give reasonable results in the far field and for later reflections, but for the near field and early part of the sound it may not give accurate results. For more accurate results, the receiver volume should be smaller, but the number of rays will then be increased significantly since it depends on the volume of the receiver, so the running time will be correspondingly increased. However, with recent and continuing increases in computer power it should be possible to develop an efficient, fast, and more accurate model simply by increasing the number of rays traced.

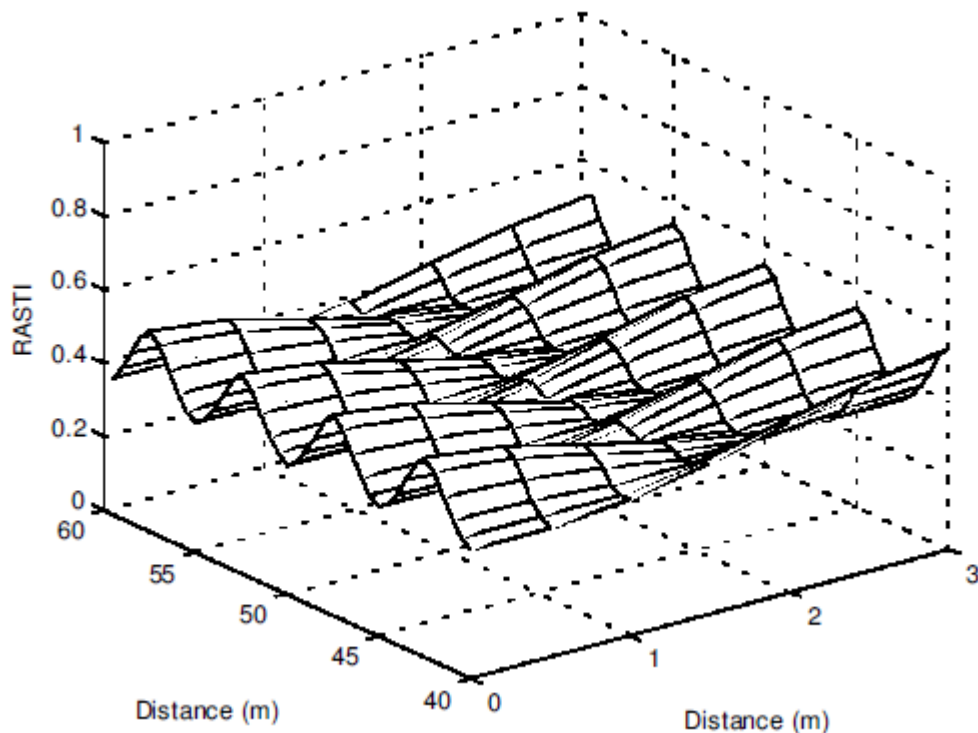




Εικόνα 31: Μετρημένες και προβλεπόμενες τιμές STI σε κλίμακες οκτάβων από 125 σε 4000 Hz. (Yang & Shield, 2001)

Speech intelligibility and speech transmission index were also studied by Shuo-xian and Yue-zhe [2004] using an image method. Harrison [2001] developed a calculation method for speech intelligibility of public address systems at metro stations. Station public address (PA) forms part of a wider passenger information system that otherwise provides visual information. The PA system makes a unique contribution as information is actively broadcast rather than passively displayed and people's attention, including those with impaired vision, is thereby attracted. This valuable contribution is lost in cases where the announcements are unintelligible. A method is presented for the calculation of the speech transmission index (STI) of speech intelligibility in railway stations; this method may be used to design new PA systems. The method uses a quasi-diffuse model to calculate the level of PA announcements broadcast over a given physical area, the modulation transfer function and finally the STI. The method is shown to produce predictions of the rapid speech transmission index (RASTI) that agree well with results measured on railway station platforms in the open air and on platforms in deep-tube underground stations. The method is described as being hybrid empirical/deterministic as it requires prior knowledge of the spatial average reverberation times and of the prevailing background noise levels while calculating other parameters. This approach along with simplifying assumptions for the relative influence of direct and reverberant

speech allows the rapid calculation of STI or RASTI and removes the need to describe the station structure in three dimensions as required by completely deterministic methods. The common requirement for PA systems to meet a performance target of at least 0.5 STI is investigated for station platforms in the open air and those in deep-tube underground stations.



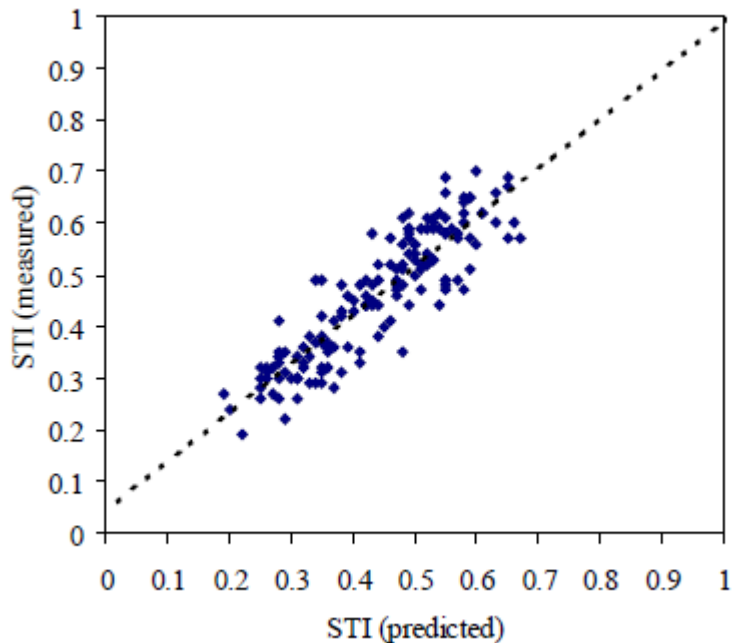
Εικόνα 32: Υπολογισμός τιμών RASTI σε σταθμό μετρό «κλειστού σωλήνα» (Harrison, 2001)

Carman [2004] developed a theoretical model for the prediction of train noise in stations and its effect on speech intelligibility.

The studies on scale models are limited in number. Kang [1997b] used scale models with attention to the speech intelligibility of multiple loudspeaker public address systems. Another study by Kang [1997c] concerns the scale modeling of train noise propagation.

Volume, room shape and surface materials determine the acoustics of metro stations. Surface materials are not primarily selected on the basis of acoustic quality, but rather according to various safety-related criteria. The geometric proportions of the stations, combined with the reflectivity of tiled or concrete walls and ceilings result in long reverberation times that has an adverse effect on speech intelligibility [Wijngaarde and Verhava, 2001]. A computational procedure was developed, based on ray-tracing techniques, to predict the Speech Transmission Index. The resulting speech intelligibility predictions are found to be very useful in the design stage of public address systems for tunnels. This is illustrated by means of predictions for the newly built Benelux tunnel. By systematically varying several design parameters, and computing the effects on speech intelligibility,

better design choices can be made. The procedure developed to predict speech intelligibility in tunnels yields STI predictions that correspond well with measurements carried out in existing tunnels. Application of the procedure on a new tunnel shows that the procedure enables PA-system designers to quantify the effects of loudspeaker type, loudspeaker position relative to noise sources, and distance between loudspeaker clusters on speech intelligibility. It is fair to assume that the influence of other design parameters may be predicted equally well.



Εικόνα 33: Συσχέτιση μεταξύ προβλεπομένων και μετρώμενων τιμών STI (Wijngaarde and Verhava, 2001)

On the other hand, carefully designed combination of various architectural treatments can significantly improve the intelligibility and decrease noise pollution. According to Kang [1997a] absorbers should be put on the surfaces of metro stations in order to improve the speech intelligibility. The efficiency of absorbers is higher when there is less overall absorption within the space. To obtain a higher attenuation, the absorbers should be evenly arranged in a section. Crockett and Pyke [2000] demonstrated that for a given number of absorbers, when they are placed on the ceiling and sidewalls, instead of the ceiling only, the early decay time could be shorter, and the sound pressure level attenuation could be greater. The absorption can be increased by using absorptive parapet walls, by creating noise trap beneath the walkways, and by applying sound absorption on the interior facing of the skirts and on edge walls.

Shuo-xian and Yue-zhe [2004] studied the necessary treatments when the train is in the tunnel. Train noise can be reduced by a strongly absorbent section near the tunnel entrance. The absorbent

treatment on an end wall is effective. Even a small area of absorption can systematically increase the sound attenuation along the length of platform.

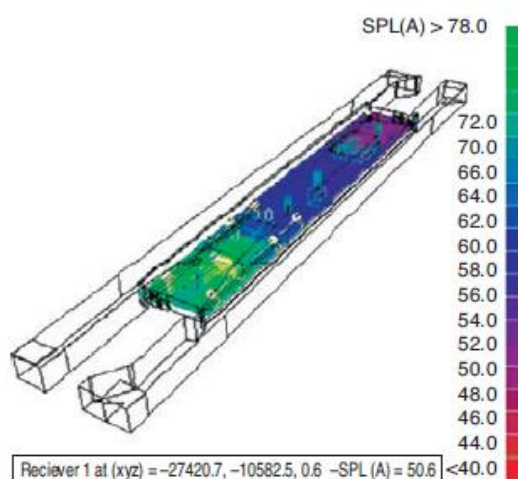
Kang [1997a] studied membrane absorbers as typical non-fibrous sound absorbers. Carman [2004] examined spray-applied cementitious materials. The material is found to be effective when applied to the wall opposite the platforms as well as underneath the platform overhang. Irvine and Richards [1998] examined suspended ceiling treatment above the platforms. Ceiling systems of mineral fibre and glass fibre lay-in panels with required fire rating were found to be effective for metro station applications.

A very important research paper about the acoustics in the underground railway stations was written by Zühre Sü and Mehmet Caliskan (2007). More specifically, The aim of that research was to demonstrate the importance of initial strategies in acoustical design of underground metro stations. The paper searched for practical design solutions by evaluating different materials for providing optimum acoustical conditions in such spaces. Acoustical designs of three metro stations on a new expansion line in Ankara including Sogutozu, Bilkent and ODTU metro stations are presented through computer simulation. Predictions of room acoustical parameters are presented for both platform and ticket office floors in terms of parameters like reverberation time (RT), speech transmission index (STI) and A-weighted sound level (SPL) distribution within spaces. Simulated reverberation times are evaluated in view of legislative requirements. The study confirms the importance of using sound absorbing materials on the ceiling and sidewalls together. The nonwoven material, used behind perforated metal suspended ceilings, has proved effective in reverberation control.

Acoustical simulations for empty metro stations illustrate that the reverberation requirements and noise limits specified in the Turkish Noise Control Act are satisfied in the three metro stations considered although some values are on the limits. There is no specification related to intelligibility in the regulations. STI, as one of the most popular tools to evaluate intelligibility, was used, although its applicability for the Turkish language is still contested. It is found that STI is within acceptable limits for all the three metro stations. STI is known to be well correlated with reverberation times for signal-to-noise ratios in the excess of 30 dB. EDT values have even better correlation with STI figures in case of such high signal-to-noise ratios.

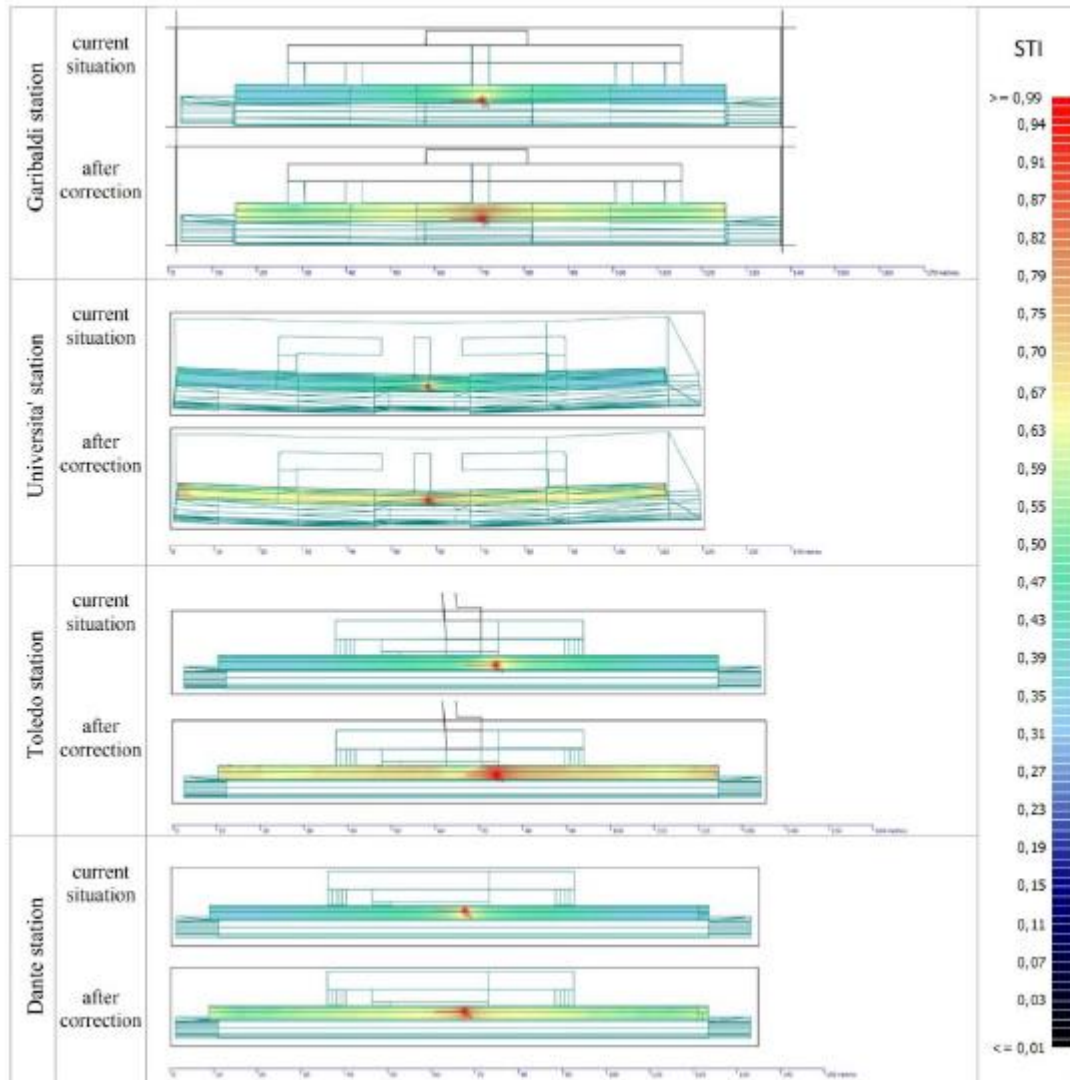
In this study, different materials were tried on the tunnel walls until optimum acoustical conditions were obtained. The importance of using sound absorbing materials on the ceiling and sidewalls, instead of the ceiling only is confirmed as Crockett and Pyke [2000] claimed. Moreover, the rough concrete and ballast are found to be economical and effective acoustical materials [Carman, 2004].

The nonwoven material that was used at the ceiling system, as a lay-in material, has proved to be effective in sound attenuation. The nonwovens complying with proper fire rating, which are the products of recent technological developments in the material industry, should be regarded an integral part of the metro station applications as demonstrated in this study. Overall, the computer simulation technique proved to be a powerful tool for the acoustical assessments of long spaces or enclosures where sound decay curves are not linear. However, different design solutions could still be tested through computer simulations at the design phase on relative scale for material combinations and given geometry. Maps that illustrate spatial distribution of acoustical parameters are invaluable for evaluation of the overall condition. Capability of producing such tools of comparison is definitely an asset in acoustical design process. Finally, results of different parameters obtained from the simulations can be compared with the limiting values specified in the regulations and technical specifications.



Εικόνα 34: Η κατανομή του επιπέδου θορύβου όταν λειτουργούν και οι τέσσερις ανεμιστήρες εξαερισμού σηράγγων σε πλατφόρμες ορόφους του σταθμού Sogutozu light του μετρό (Zühre Sü and Mehmet Caliskan, 2007)

Berardi et al (2015) have written one of the most recent research papers about the discussed topic. This study evaluated the acoustic characteristics of four new subway stations in Naples, Italy. Using the impulse response method, monaural parameters were measured. Results indicated average reverberation times longer than three seconds at middle frequency, and values of clarity (both C80 and D50) and sound transmission index (STI) far from optimal for listening perception. As expected, the train tunnels of the subway lines resulted in a high absorption at low frequencies, making subway stations particularly frequency-selective. Acoustic corrections for reducing the noise levels and improving the acoustic characteristics are studied. In particular, this paper investigates the effect of adopting a sound-absorbing and fire-resistant plaster on the ceiling of the subway tunnel.



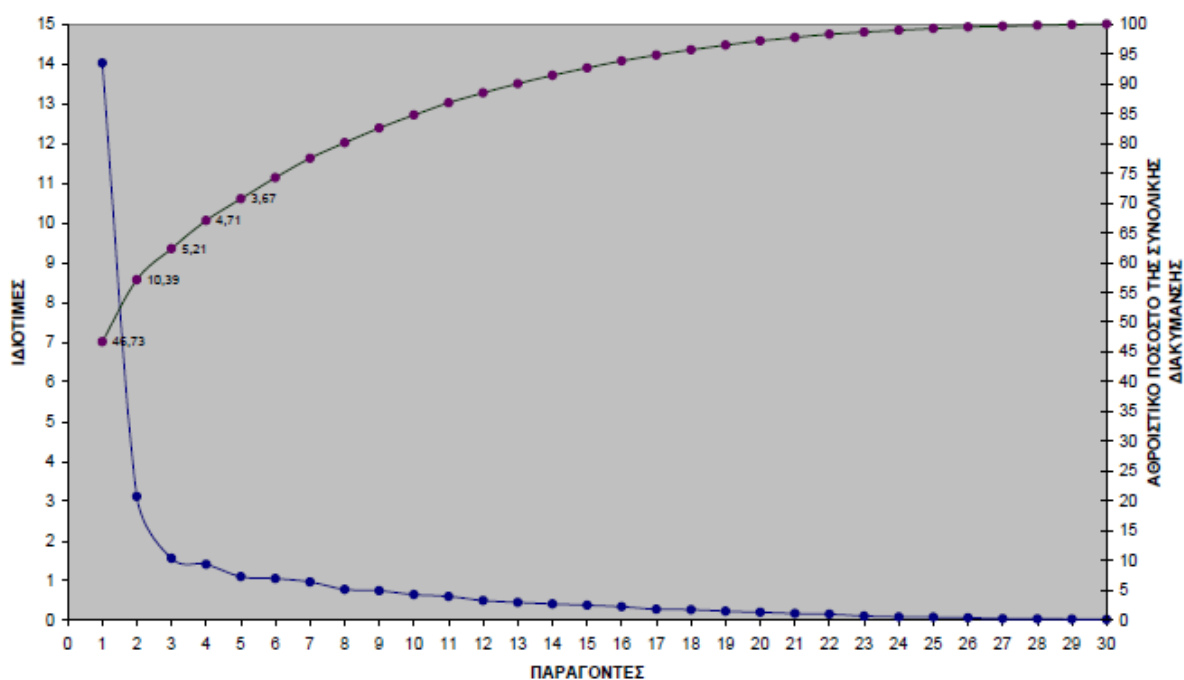
Εικόνα 35: Τιμές STI πριν και μετά τις ακουστικές διορθώσεις. (Berardi et al (2015))

Finally, an important diploma thesis about the aforementioned topic was written in 2008 by Stavroulaki S., Travlou M and Sotiropoulou A. in National Technical University of Athens (NTUA) with the title “The perception of noise at the Athens metro lines; "factory" description of the concept”. More specifically, on the context of this research experiments of Noise Perception on the Athens Metro were conducted at the Metro stations: Katehaki, National Defense and Monastiraki and at the ISAP stations: Omonia, Victoria and Tavros using bipolar noise measurement scales. The originality of the research lies in the fact that the sample of the research consisted of students from the Department of Civil Engineering of the National Technical University of Athens and was stable, resulting in a constant subjective error. The experimental data were analyzed through Factor Analysis, which produced five independent factors of noise perception for the combination of Metro stations: "Influence on Feeling of Tiredness", "Influence on Feeling of Tranquility", "Influence on Sociability", "Influence "Feeling Concern - Anxiety" and "Influence on Human Communication", four for the combination of the similar stations of the ISON Omonia, Victoria, namely: "Influence on

Human Communication", "Influence on the Anxiety-Anxiety" and "Influence on Feeling of Calmness" and three for Taurus Station, namely: "Influence on Feeling of Tiredness - Calmness - Anxiety", "Influence on Sociality" and "Influence on Awakening". The above factors describe some of the ways in which a large sample of the student population perceives the psychological effects of noise on the Athens Metro.

The conclusions we have reached in this paper are as follows:

- The results of previous studies are confirmed (Sotiropoulou A. et al 2007, Rousochatzakis I, 2007). This means that the group of young people with a high level of education perceives the noise in the same way that a wide passenger profile perceives it.
- Some of the ways in which the noise in the Metro is perceived by the daily passenger were understood. Apart from that to which the architectural design of the structured space is addressed, the present results may have sociological, medical, etc. applications.
- For one of the factors exported and specifically for the factor "Influence on human communication", a statistically significant difference was found in the assessment of the passengers for station-to-line noise. This fact allowed the researchers to investigate the correlation of this subjective factor with the physical characteristics of space and may give insight into how to design the Metro area. The natural cause to which the abovementioned differentiation relates may be the subject of a further study.



Εικόνα 36: Ισοδυναμίες και ποσοστό διακύμανσης των αρχικών παραγόντων - Taurus Terminal (Stavroulaki S., Travlou M and Sotiropoulou, 2008)



## **A.2..Special issues of acoustics in Metro stations**

### **A.2.1.Principles for perceptive criteria**

A dimensional factor when planning stations deals with how travellers perceive sounds. Since sound perception is crucial for spatial orientation as well as how people act, interact and communicate, it is necessary to clarify what types of perceptive criteria that are suitable within the different spaces (entrance, passage and platform). The researcher Pascal Amphoux has defined three different types of perceptive criteria: listening, hearing and attending (Amphoux).

Listening deals with the mediation and the event that caused the sound. The category correlates to ‘sonic signals’ – the signals, literally speaking, grabs our attention; they suddenly appear in our mind unexpectedly – we do not have to listen, but the signal will always call for our attention. From a temporal viewpoint, the signal is always a discontinuity; it is a sonic event that makes us listen. E.g. a verbal message via a speaker or an incoming train on the platform evokes a ‘listening’ mode. Hearing refers to an order that one does not pay attention to. The category correlates to ‘sonic background’ – yet the sounds are clearly audible from the moment one starts to listen actively. From a temporal perspective, sonic background can be outlined in terms of continuity or duration i.e. it is an ongoing stream – a continuum – of sounds.

Attending deals with a perceptual field when we do not search for the sound’s derivation and origin. The category correlates to ‘sonic ambience’ – our perception operates on a selective level; we search for the specific qualities of a certain sound and/or a sonic ambience. Thus the sounds themselves are in focus and not their physical context. From a temporal viewpoint, this perceptive criterion can be characterised through its dynamics – it is the mobility, the movement, the rhythm and alteration of the sonic units of a cohesive ensemble that constitutes the sonic ambience of a place, like the ‘pub’, ‘café’ and ‘station’.

### **A.2.2.Principles for Spatial Orientation and Design**

Sound is a dimensional factor for spatial orientation. AD makes it possible to enhance the awareness of the physical space and also to make its spatial form clearer. These aspects are essential for the traveller regarding comfort as well as from a security perspective. The consequences might be serious if it is not possible to locate the sounds on a platform; sometimes visually handicapped fall down on the track. This is often due to insufficient acoustics and lack of supportive auditory information.

Therefore in such cases, the physical space should correlate with the sonic space; or more clearly – in order to orientate on platforms, people need to know where the sounds derive.



Since sounds constitute spatial formations, AD makes it practically possible to create sonic spaces with different qualities within the one and the same room. In such a way one may differentiate a room. An essential difference between auditory and visual perception is that one may “listen behind the corner”, which makes it possible to announce spaces that are situated beyond the visual field.

Nodes where different spaces converge are of particular interest, for instance entrance/passage and passage/platform. And there are three basic sonic spatial principles that deal with design of such nodes:

- An abrupt sonic change between two spaces;
- A smooth passage, where the sounds of two sonic spaces partially overlap each other;
- A sharply marked sonic space that is put inside another sonic space.

These principles possess specific qualities, which have an effect on how we perceive, interact and communicate in the intersection between different types of sonic spaces. In such a way the spatial atmosphere at a station may be given a characteristic architectonic expression and identity, and – in consequence – a place where the traveller feels comfortable and secure.

### **A.2.3.Principles for Aesthetical Criteria**

The aesthetics of sounds may be discussed from different perspectives, but is mainly connected to auditory supplements like music and sound-art installations. It is preferable to plan such supplements in concordance with architectural and artistic group of themes and design.

Research findings point out that aesthetical installations – via speakers – should be applied with caution. In most cases these are interesting at the beginning, but over time the effect is the opposite (Delage). There is an abundance of possibilities. Sitespecific installations are preferable; the composer/artist cultivates and experiments with the local sounds in the surroundings. The effect is that the traveller gets into contact with the urban life, supporting the transportation between the underground and the street. Since sound-art installations as isolated phenomena might confuse the traveller, it is preferable to complement the installations with visual effects, especially lighting design. Cafés and waiting rooms are propitious milieus for music and soundart installations. But also monotonous milieus like long passageways are suitable for design of qualitative listening spaces.

A new international tendency is to play music at railway stations for the purpose of preventing crime. The idea is to distribute music – above all classical music, especially Mozart – in order to deter “unwanted people” like youngsters and drug addicts. This method becomes more and more accepted, and is to be found in, e.g., Stockholm, London, Hamburg, Copenhagen, Brussels and Vienna. In London Underground one has tested this during 18 months at four stations. As a result, the intention is now to install equipment for playing recordings of classical music at 35 other stations.

This is a quite odd and unsound method since it is just a matter of moving people. Responsible persons at the London Underground claim that the reason why playing classical music is that most of the “unwanted people” do not like such music; the music is “uncool” (Shoesmith). So, it is also an expression of social and cultural marking; a highbrow culture that uses music as a sonic virus to combat new target groups. In other words, the music is not aimed for aesthetical purposes but for protective ditto. For that reason, we must hope that this method will soon pass.

On the other hand, it would be more appropriate and demanding to make the opposite, i.e., to create a sonic environment that makes people listen, evoking a sentiment of comfort. Such an environment should comprise private spaces where the passengers feel safe and undisturbed, and at the same time as they are a part of the public space. Thus, a key concept in regard to this is *sound perception*, since it is a basic qualitative tool for the acoustic designer when exploring the relation between sound and the user’s space.

We could learn a lot about the relations between sound perception, environmental sounds and music by studying the ‘Sony Walkman movement’ that came up in the 1980s, which today has turned over to an ‘mp3 and iPod movement’; music becomes a substitute for urban sounds (Bull). This is an expression for a slowly break up of ingrained opinions of musical and sonic environmental representation. One may therefore ask – Why avoid stimulation from outside? What does this mean to urban culture and social life? What is the effect of disconnecting visual information from auditory information? Could such auditory spaces be understood in terms of ‘personal soundtracks of urban life’? Etcetera. So, instead of installing equipment for playing recordings of classical music in 35 stations in London, such investigation would probably in the long term be more fruitful and praiseworthy.

#### **A.2.4..Principles for Verbal Messages, Jingles and Signals via Speakers**

Design and installation of messages, jingles and signals via speakers are highly relevant for AD since these aspects have an effect on issues like information, communication, orientation, spatial design and aesthetics. Messages, jingles and signals are frequently applied in different types of technical installations at railway and underground stations. For instance, warning signals, electronic displays for information, turnstiles, verbal announcements, train arriving and doors closing. However, these systems are often under dimensioned and do not work properly; it is problematic to catch the different types of messages, which especially make things difficult for visually handicapped. The following criteria should be taken into consideration:

- *Information – audibility*. Sounds must be articulated and distinct. Therefore, the sound equipment must be of high quality. Jingles announcing verbal messages are very important in order to make people conscious of the ongoing activities. The room acoustics is a basic dimensional factor.

- *Orientation – location.* The sonic information is important regarding these aspects.
- *Synchronisation.* All different types of signals and jingles should be systemised and co-ordinated. For that reason, it is important to formulate an overall strategy, in the same way as composing music.
- *Aesthetics.* The aesthetical qualities of signals and jingles are central, especially in regard to aspects of comfort, and should therefore be performed by a composer.

These criteria may be improved by making the jingles and signals distinct in terms of, e.g., articulation of timbre, pitch, harmonics, transient, counterpoint and rhythm. All jingles and signals should be short since it minimizes the risk of masking effects, as well as it sharpens people's attention (Rubin).

Summing up, a sonic environment that “sounds good” may be created by synchronized, distinct and homogenous sounds and systems; the sounds should be as intelligible as possible since their main task is to inform people (Delage).

Another common problem regarding information via speakers may be discussed in terms of the concept of ‘schizophonia’, introduced by R. Murray Schafer. The concept concerns the effect when isolating the sound from its original context and reproducing it into another. The consequence is that the listener is situated between two acoustic spaces of which the sonic climates are radically different (Schafer). Therefore, cutting a sound from a certain environment and inserting it into another is not unproblematic since it can disrupt our perception and behaviour when acting in the environment. One may ask: What are the spatial consequences when the sound is detached from its context and reproduced through loudspeakers? And what do the sources represent from environmental, cultural, social and aesthetic points of view?

The composer and music theorist Trevor Wishart uses the concept of ‘formalised acoustic space’ to distinguish it from ‘real acoustic space’. The formalisation of acoustic spaces is to be found in all kinds of music. For instance, in a rock music production the voice might be simulated as coming from a telephone, and simultaneously it is rebalanced to have the same intensity as the amplified rock band.

Hence, with sound effects such as reverberation, echo, phase shifting, compression and harmonisation etc., it is possible to manipulate an acoustic space (Wishart). The concepts of formalised acoustic space and real acoustic space are crucial.

Briefly, these two concepts are not only spatial phenomena to be discussed within the musical field, but the concepts might also be applied into an acoustic and architectural context. Since the formalised acoustic space becomes more and more common in everyday life – muzak in elevators, signals or jingles in metros, amplified street music etc. – it is important to investigate the interaction between built form and the acoustic space, and to examine what effects this mix of different acoustic

entities have on people's behaviour when acting in public space. For example, how might one describe the acoustic interaction between the formalised acoustic space of the information distributed through loudspeakers at a metro station – e.g., the kind of melodic jingle and pre-recorded voice that is heard at the metro stations in Paris and Stockholm – and the natural acoustic space at the same station? Does this type of acoustic interaction represent a real acoustic space or a formalised acoustic space?