

Διερεύνηση Εδαφομεταφερόμενου Θορύβου και Δονήσεων από την Εφαρμογή Ελαστικής Εμπέδωσης Σιδηροτροχιάς και Πλωτών Πλακών σε Τμήματα του Τροchioδρομικού Δικτύου της Αθήνας

ΔΡ ΚΩΝ/ΝΟΣ Ε. ΒΟΓΙΑΤΖΗΣ

Εντ. Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Περίληψη

Η αντικραδασμική, αντιδονητική και αντιθορυβική προστασία του πολιτισμικού και δομημένου περιβάλλοντος αποτελεί βασική συνιστώσα της συμβατότητας των έργων σταθερής τροχιάς με το περιβάλλον του και συνεπώς απαιτείται πλήρης και διεξοδική ανάλυση του προβλήματος και των βέλτιστων δυνατών προτάσεων για τη μείωση του εδαφο-μεταφερόμενου θορύβου και των δονήσεων από τη λειτουργία του.

Το παρόν άρθρο έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοσθεισών αντιδονητικών διατάξεων του Τραμ της Αθήνας για τον συρμό SIRIO/ANSALDOBREDA, λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά πρόσφατα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης θορύβου και δονήσεων στο ήδη εν λειτουργία δίκτυο. Λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς περιβαλλοντικούς όρους του έργου και σχετικές τεχνικές προδιαγραφές του έργου, προκειμένου να εξασφαλισθεί το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο εδαφομεταφερόμενου θορύβου των 40 dB(A), εφαρμόστηκαν συγκεκριμένες λύσεις (α) για αποστάσεις πηγής δέκτη $L < 8$ έως 10μ. με συνολική αντιδονητική αποτελεσματικότητα ίση με 20dBV στα 63Hz (β) για αποστάσεις πηγής δέκτη $8-10\mu < L < 30\mu$ ίση με 7dBV στα 63Hz και (γ) για αποστάσεις πηγής δέκτη $L > 30\mu$ χωρίς ιδιαίτερη αντιδονητική εφαρμογή πέραν της απλής ενθυλάκωσης της σιδηροτροχιάς.

Επισημαίνεται, τέλος, ότι το ενιαίο βασικό σύστημα στήριξης της τροχιάς του Τραμ της Αθήνας (στο σύνολο των τμημάτων της γραμμής πλην του τμήματος προς το αμαξοστάσιο Ελληνικού) προβλέπει τη γενική εφαρμογή ενθυλάκωσης της τροχιάς εντός ειδικού προ-εφαρμοσμένου (jacquetted) ελαστομερούς υλικού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειτουργία σιδηροδρομικών συστημάτων στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργεί δονήσεις, οι οποίες διαδίδονται μέσω του εδάφους στα γειτονικά κτίρια. Οι δονήσεις των κτιρίων με τη σειρά τους δημιουργούν θόρυβο, ο οποίος ονομάζεται δομό-

φερτος ή εδαφομεταφερόμενος θόρυβος (structure borne noise) ή εδαφο-μεταφερόμενος (ground borne noise).

Συμβατικές σιδηροτροχιές ή σιδηροτροχιές τραμ που τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρόμου (εγκιβωτισμένες σε άσφαλο ή κυβόλιθους) είναι συνήθως μια πηγή ενοχλητικού εδαφο-μεταφερόμενου θορύβου για τα κοντινά κτίρια.

Οι ατέλειες, τα ελαττώματα στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών ή των τροχών ή η συσσώρευση ακαθαρσιών στην επιφάνεια των γραμμών ή μέσα στα αυλάκια σπάνια είναι δυνατόν να αποφευχθούν.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται δονήσεις μιας αρκετά μεγάλης συχνότητας φάσματος (10 έως και 200Hz), οι οποίες, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, μεταφέρονται μέσω του εδάφους και της επιφάνειας του δρόμου στα περιβάλλοντα κτίρια.

Το παραπάνω φαινόμενο δίνει την αντίληψη πολύ ενοχλητικών δονήσεων και ηχητικών κυμάτων.

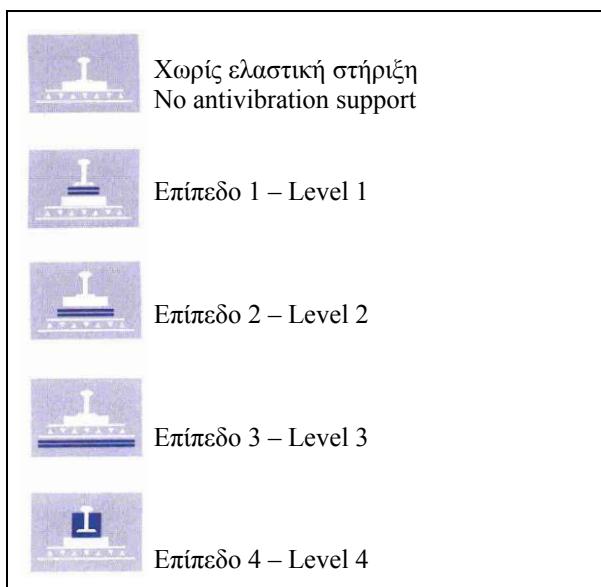
Η αντικραδασμική / αντιδονητική / αντιθορυβική προστασία του πολιτισμικού και δομημένου περιβάλλοντος αποτελεί βασική συνιστώσα της συμβατότητας των σιδηροδρομικών έργων με το περιβάλλον του και συνεπώς απαιτείται πλήρης και διεξοδική ανάλυση του προβλήματος και των βέλτιστων προτάσεων για τη μείωση του εδαφομεταφερόμενου θορύβου και των δονήσεων από τη λειτουργία του.

Το παρόν άρθρο έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοσθεισών αντιδονητικών διατάξεων του Τραμ της Αθήνας για το συρμό SIRIO/ANSALDOBREDA, (το οποίο μετρήθηκε και αξιολογήθηκε στο Μιλάνο στο πλαίσιο σχετικού ερευνητικού προγράμματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας^[1]) λαμβάνοντας υπόψη και τα σχετικά πρόσφατα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης θορύβου και δονήσεων στο ήδη εν λειτουργία δίκτυο^[2].

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΤΙΔΟΝΗΤΙΚΩΝ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, οι βασικοί εναλλακτικοί τρόποι αντι-δονητικής στήριξης αστικών σιδηροδρομικών συστημάτων εξαρτώνται αποκλειστικά από την ανάγκη προστασίας παρακείμενων κτιρίων, κατοικιών ή άλλων ειδικών χρήσεων, για τα οποία είναι αναγκαία η κατάλληλη αντιθρομβική και αντιδονητική προστασία και παρουσιάζονται στο σχετικό σκαρίφημα στη συνέχεια, εκφρασμένοι σε τέσσερα βασικά επίπεδα (Σχήμα 1)^{[3],[4]}:

- ✓ **Επίπεδο 1:** απ' ευθείας στήριξη της σιδηροτροχιάς σε ελαστικά υποθέματα ή λωρίδες ελαστομερούς υλικού.
- ✓ **Επίπεδο 2:** εφαρμογή ελαστικών υποθεμάτων ή πλακών κάτωθεν των «baseplates».
- ✓ **Επίπεδο 3:** εφαρμογή πλωτής πλάκας.
- ✓ **Επίπεδο 4:** ελαστική ενθυλάκωση της σιδηροτροχιάς με ή χωρίς επιπλέον ελαστική στήριξή της.



Σχήμα 1: Βασικοί εναλλακτικοί τρόποι αντι-δονητικής στήριξης αστικών σιδηροδρομικών συστημάτων.

Figure 1: Alternative basic antivibration support systems for railways systems.

Τα ανωτέρω αποτελούν πρακτικά τις πλέον βασικές εναλλακτικές περιπτώσεις αντικραδασμικών εδράσεων. Η επιλογή της καταλληλότερης εξ αυτών εξαρτάται αποκλειστικά και μόνον από την αναγκαιότητα εξασφάλισης μεγαλύτερης ή μικρότερης προστασίας για την κάλυψη των σχετικών κριτηρίων ανάλογα με την απόστασή τους από την εξωτερική σιδηροτροχιά και την μορφή τους.

Οι λύσεις αυτές προσαρμόστηκαν στην περίπτωση του Τραμ της Αθήνας, όπως επιγραμματικά αναφέρονται στη

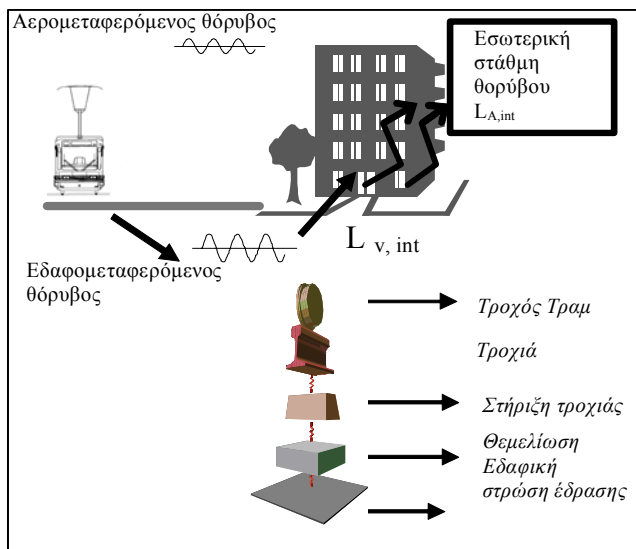
συνέχεια:

- ✓ **Απ' ευθείας στήριξη σιδηροτροχιάς στη βάση της έδρασης (direct fixation)**, η οποία συνήθως είναι έρμα, (ballast) όπως στην περίπτωση του ΤΡΑΜ Τ2 των Παρισίων ή και πλάκα σκυροδέματος, όπως στην περίπτωση τμημάτων του ΤΡΑΜ της Νάντης. Ο τρόπος έδρασης αυτός χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις μη ανάγκης αντιθρομβικής αντικραδασμικής προστασίας, λόγω μεγάλων αποστάσεων των παρακείμενων δεκτών ή εξαιρετικά απορροφητικών εδαφών και συνήθως για ζώνες εκτός των 40 μέτρων (π.χ. Αμαξοστάσιο).
- ✓ **Ενθυλάκωση σιδηροτροχιάς:** Ειδικά για τις περιπτώσεις ΤΡΑΜ σε καθαρά αστικό χώρο, **οι εξωτερικές σιδηροτροχιές ενθυλακώνονται** στο επίπεδο κίνησης πεζών ή τροχοφόρων (άσφαλτος, πεζοδρομημένη επιφάνεια κλπ.). Η **ενθυλάκωση γίνεται εντός ειδικού ελαστομερούς υλικού** (χυτού ή προ-διαμορφωμένου στον τύπο της σιδηροτροχιάς), η οποία προστατεύει μικρο-μετακινήσεις της σιδηροτροχιάς μέσα στην πλάκα έδρασης ιδιαίτερα σε περιπτώσεις καμπύλων οριζοντιογραφικά τμημάτων μικρής ακτίνας. Η εφαρμογή της βασικής αυτής στήριξης στο ΤΡΑΜ της Αθήνας περιορίζει την κρίσιμη ζώνη επιρροής των δονήσεων στη ζώνη άνω των 30 μέτρων.
- ✓ **Ελαστική αντιδονητική στήριξη ενθυλακωμένης σιδηροτροχιάς:** με επιπλέον εναπόθεση αντικραδασμικού ελαστομερούς ή άλλου κατάλληλου ελαστικού υλικού στην διεπιφάνεια σιδηροτροχιάς - πλάκας στήριξης (strip). Η επιλογή του ελαστομερούς υλικού επιβάλλεται από την ανάγκη απορρόφησης των δονήσεων σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του εδάφους (συνάρτηση διάχυσης δονήσεων από πηγή σε δέκτη), τα χαρακτηριστικά του εσωτερικού του δέκτη, λαμβανομένων προφανώς υπόψη των χαρακτηριστικών της πηγής δόνησης που θα χρησιμοποιηθεί (τελική τυπολογία συρμού, αξονικά φορτία, σταθερή αξονική δύναμη ανά συχνότητα, κλπ.). Η εφαρμογή αυτής της στήριξης στο ΤΡΑΜ της Αθήνας, περιορίζει τη ζώνη επιρροής των δονήσεων ανάλογα της ποιότητας του ελαστομερούς μέχρι και στα 8-10 μέτρα από τον πλησιέστερο υπό προστασία δέκτη.
- ✓ **Εφαρμογή πλωτού δαπέδου (Floating slab)** στις ευαίσθητες θέσεις σε απόσταση ίση ή μικρότερη από 8 μέτρα από την εξωτερική σιδηροτροχιά, όταν βέβαια η συγκεκριμένη χρήση επιβάλλει την αναγκαία προστασία. Η λύση αυτή ουσιαστικά επιβάλλει την τοποθέτηση ειδικών ελαστομερών υλικών στην διεπιφάνεια εδάφους και της βάσης οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία υλοποιείται σε μορφή «σκάφης» και λειτουργεί ως μάζα αδράνειας. Η τοποθέτηση του ελαστομερούς γίνεται, τόσο σε μορφή mat (πάπλωμα-κάλυψη όλη της επιφάνειας), όσο και σε μορφή stripes (λωρίδες - απαιτείται μικρότερη επιφάνεια απλά σκληρότερο και ακριβότερο υλικό) ή ακόμη και σε τετραγωνικής μορφής ανεξάρτητων πολλαπλών στηρίξεων λύση που απαιτεί ακόμη μικρότερη επιφάνεια πλέον άκαμπτου ελαστομερούς υλικού.

3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΤΙΔΟΝΗΤΙΚΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΟ TRAM ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Στο σχήμα 2, στη συνέχεια, δίνεται η βασική διαδρομή των δονήσεων από την πηγή στον δέκτη, η διαμόρφωση της στάθμης του εδαφομεταφερόμενου θορύβου στο εσωτερικό των κατοικιών κλπ ευαίσθητων χρήσεων, καθώς και το πρότυπο στήριξης σιδηροτροχιάς. Οι συνολικές βασικές τεχνικές προδιαγραφές των αναγκαίων στηρίξεων^{[3] & [4]} δίνονται στη συνέχεια :

- ✓ Ανώτατο επιτρεπόμενο όριο αερομεταφερόμενου θορύβου ίσο με 67dB(A) για το δείκτη $L_{eq}(24\text{ωρών})$.
- ✓ Ανώτατο επιτρεπόμενο όριο εδαφομεταφερόμενου θορύβου ίσο με 40dB(A) για κατοικίες και 35dB(A) σε ιδιαίτερα ακουστικά ευαίσθητες χρήσεις (π.χ. θέατρα κλπ.)
- ✓ Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση σιδηροτροχιάς (maximum allowable rail deflection) = 2mm (διέλευση συρμού με αξονικό φορτίο 120 kN).



Σχήμα 2: Βασική διαδρομή δονήσεων και εδαφομεταφερόμενου θορύβου από την πηγή στον δέκτη- πρότυπο στήριξης.

Figure 2: Vibration & ground borne noise diffusion from source to receiver- modeled rail-track support system.

Λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς περιβαλλοντικούς όρους του έργου^[5] και σχετικές τεχνικές προδιαγραφές του έργου, προκειμένου να εξασφαλισθεί το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο εδαφομεταφερόμενου θορύβου, απαιτείται:

- ✓ Για αποστάσεις πηγής δέκτη $L < 8$ έως 10 m η εξασφάλιση συνολικής αντιδονητικής αποτελεσματικότητας (IL : insertion loss) της προς επιλογή λύσης ίσης με 20dBV στα 63Hz,

- ✓ Για αποστάσεις πηγής δέκτη $8-10\text{m} < L < 30\text{m}$ η εξασφάλιση συνολικής αντιδονητικής αποτελεσματικότητας (IL : insertion loss) της προς επιλογή λύσης ίσης με 7dBV στα 63Hz,
- ✓ Για αποστάσεις πηγής δέκτη $L > 30 \text{ m}$ δεν απαιτείται ιδιαίτερη αντιδονητική εφαρμογή περά της απλής ενθυλάκωσης της σιδηροτροχιάς.

Προκειμένου να εξασφαλισθούν οι ανωτέρω απαιτήσεις μετά από σχετική πρόταση της κοινοπραξίας (Κ/Ξ) κατασκευής του έργου και έγκριση της ΤΡΑΜ Α.Ε. εφαρμόστηκαν τρεις εναλλακτικές διατάξεις στήριξης, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 1 που ακολουθεί.

Επισημαίνεται άλλωστε ότι το ενιαίο βασικό σύστημα στήριξης της σιδηροτροχιάς του Τραμ της Αθήνας (στο σύνολο των τμημάτων της γραμμής πλην του τμήματος προς το αμαξοστάσιο Ελληνικού), προβλέπει τη γενική εφαρμογή λύσης επιπέδου 1 με **ενθυλάκωση** της σιδηροτροχιάς εντός ειδικού προ-εφαρμοσμένου (jacqueted) ελαστομερούς υλικού τύπου «Fastener-less PREFARAIL®» σε συνδυασμό με ελαστομερή υλικά «CDM®»^[4].

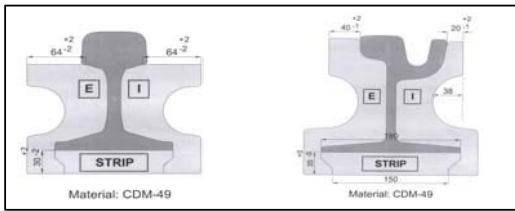
Πίνακας 1: Εφαρμοσθείσες διατάξεις αντιδονητικής στήριξης στο Τραμ της Αθήνα.

Table 1: Alternative antivibration support solutions in Athens Tram.

Κλιμάκωση αποστάσεων πηγής - δέκτη (σε μ)	Αντιδονητική αποτελεσματικότητα σιδηροτροχιάς	Τύπος ΤΡΑΜ	ΤΕΛΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	Track modulus [MN/m/lmst]
1: $L > 30\text{m}$	ΔΕΝ απαιτείται	Ri60N	Cyptramat® CLASSIC (ενθυλάκωση σιδηροτροχιάς ΧΩΡΙΣ αντιδονητικό strip)	72
		S49		
2: $8/10\mu < L < 30\text{m}$	7 dBV στα 63 Hz.	Ri60N	Cyptramat® COMFORT (ενθυλάκωση τροχιάς ΜΕ αντιδονητικό strip)	32
		S49		
3: $L < 8/10\text{m}$	20 dBV στα 63 Hz.	Ri60N	FST (floating slabtrack type) - Πλωτή πλάκα CDM-DFMA-L10® σε συνδυασμό με Cyptramat® COMFORT	15
		S49		

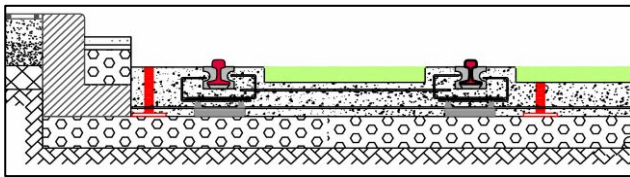
Στο σχήμα 3 στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τυπικές ενθυλακώσεις (ΜΕ ή ΧΩΡΙΣ αντιδονητικό strip από ελαστομερές CDM-49 στη βάση της σιδηροτροχιάς, οι οποίες υλοποιούνται με εφαρμογή ελαστικής ενθυλάκωσης («elastic jacket») από «resin-bonded rubber» για τους δύο τύπους σιδηροτροχιάς του Τραμ της Αθήνας S49 και Ri60N, εμπεδωμένης σε πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ - βλέπε τυπική διατομή στο σχήμα 4 στη συνέχεια).

Στις φωτογραφίες του σχήματος 5 στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανωτέρω εφαρμογή στο εργοστάσιο παραγωγής στο Βέλγιο και το εργοτάξιο του Ελληνικού.



Σχήμα 3: Διάταξη Cytramat® COMFORT (με αντικραδασμικό strip) για σιδηροτροχιές S49 και Ri60N αντίστοιχα.

Figure 3: Cytramat® COMFORT support system (including antivibrational strip) for S49 & Ri60N rails.



Σχήμα 4: Τυπική διατομή εφαρμογής στήριξης Cytramat® COMFORT (ME αντικραδασμικό strip) για σιδηροτροχιά S49 και εμπέδωση σε πλάκα ΩΣ.

Figure 4: Typical cross section for Cytramat® COMFORT solution (including antivibrational strip) for S49 rails support system embedded in concrete slab.



Σχήμα 5: Εφαρμογή ελαστομερούς ενθυλάκωσης στο εργοστάσιο παραγωγής στο Βέλγιο και το εργοτάξιο του Ελληνικού.

Figure 5: Belgium & Hellinikon worksites for embedded rail preparation.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΟ TRAM ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

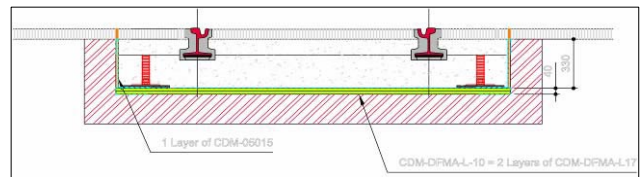
Ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τα ευαίσθητα κτίρια που εντάσσονται στην περίπτωση 3 του πίνακα 1 ($L < 8-10m$), στα τμήματα της γραμμής του Τραμ της Αθήνας ήτοι (α) Οδός Γουβέλη- Νέος Κόσμος, (β) Οδός Κασομούλη – εσωτερική σιδηροτροχιά – Νέος Κόσμος (εξωτ. σιδηροτροχιά : εφαρμογή Cytramat COMFORT (ME αντικραδασμικό strip μόνο), (γ) Οδός Στρογγονόφ προς Καλλιρρόης – εσωτερική τροχιά και (δ) Περιοχή Παναγίτσα - Παλαιό Φάληρο και προκειμένου να μειωθεί δραστικά ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος από τη λειτουργία του τραμ, στις περιπτώσεις αυτές διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα εφαρμογής

πλωτής πλάκας σε συνδυασμό με τη στήριξη σιδηροτροχιάς Cytramat®COMFORT στις ανωτέρω θέσεις (βλέπε τυπική διατομή στο σχήμα (6) για τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του πίνακα 2 στη συνέχεια [4],[6] :

Πίνακας 2: Απαιτούμενα Τεχνικά Χαρακτηριστικά πλωτής πλάκας στο Τραμ της Αθήνας.

Table 2: Technical specifications of floating slab track for Athens Tram.

Ιδιοσυχνότητα πλωτής πλάκας	< 14 Hz
Μέγιστη βύθιση σιδηροτροχιάς	≤ 2mm
Εκτιμώμενη στατική ακαμψία ελαστομερούς : Οριζόντια στρώση Κατακόρυφα στοιχεία	≈19KN/mm ≈13KN/mm
Απαιτούμενη μείωση δονήσεων και εδαφομεταφερόμενου θορύβου	63 Hz : 20dBv 100-200 Hz: ≥ 25 dBv



Σχήμα 6: Πλωτή πλάκα τύπου CDM-DFMA-L10® με στήριξη σιδηροτροχιάς Cytramat® COMFORT.

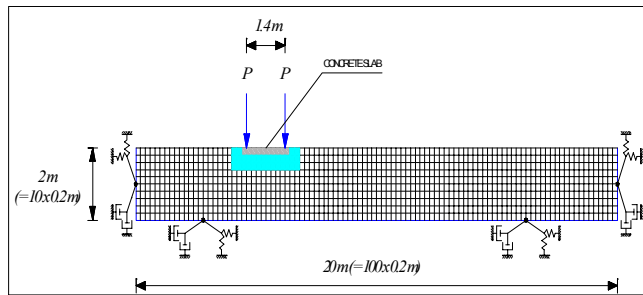
Figure 6: Floating slab track CDM-DFMA-L10® combined with Cytramat® COMFORT.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας όλων των ανωτέρω λύσεων για κάθε ζώνη προστασίας του πίνακα 1, εκπονήθηκε ειδική ακουστική μελέτη [7]. Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτής αναπτύχθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα από πεπερασμένα στοιχεία ως εξής :

- ✓ Η πρώτη σειρά περιλαμβάνει την πλάκα έδρασης, την υπόβαση και το περιβάλλον έδαφος, ώστε να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη των δονήσεων για διαφορετικούς τύπους εδάφους. Για την ανάλυση αυτή δεν προσομοιώνεται καμία αντιδονητική στήριξη.
- ✓ Η δεύτερη σειρά περιλαμβάνει την πλωτή πλάκα, πάνω στην οποία είναι εδρασμένες οι σιδηροτροχιές, με αντιδονητική στήριξη από δυο οριζόντιες στρώσεις CDM-DFMA-L10-TA 2X20 mm και μια κατακόρυφη στρώση CDM-43 πάχους 15mm μεταξύ της πλωτής πλάκας και της πλάκας θεμελίωσης, την πλάκα θεμελίωσης, την υπόβαση και το περιβάλλον έδαφος με τα ίδια ακριβώς μηχανικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της πρώτης σειράς. Στην περίπτωση αυτή η εξωτερική σιδηροτροχιά παραμένει ενθυλακωμένη επί της πλωτής πλάκας με το σύστημα Cytramat®COMFORT .

Ο εδαφομεταφερόμενος θόρυβος υπολογίστηκε για το πλησιέστερο κτίριο στις ανωτέρω θέσεις (από 5 έως 8m. περίπου) και για το πλέον δυσμενές σενάριο διάδοσης δόνησης, τόσο για το κτίριο πλησίον τη εσωτερικής σιδηροτροχιάς, όσο και για αυτό της εξωτερικής. Στο σχήμα 7 στη συ-

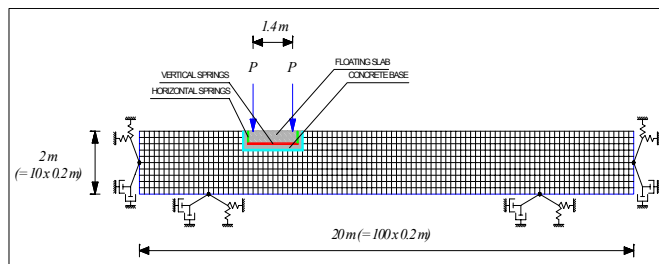
νέχεια παρουσιάζεται η εδαφική τομή διαστάσεων 20m x 2m για την πρώτη σειρά προσομοιωμάτων, όπου περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση του προβλήματος ΧΩΡΙΣ αντιδονητική προστασία. Το πλήρες προσομοίωμα αποτελείται από 1.111 κόμβους με 2 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο και 1.000 στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης.



Σχήμα 7: Αναλυτικό προσομοίωμα ΧΩΡΙΣ αντιδονητική προστασία.

Figure 7: Modeled slab track WITHOUT antivibration measures.

Στο σχήμα 8 παρουσιάζεται η εδαφική τομή διαστάσεων 20m x 2m για την πρώτη σειρά προσομοιωμάτων, όπου περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση του προβλήματος ΜΕ αντιδονητική προστασία για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες στήριξης. Το πλήρες προσομοίωμα αποτελείται από 1128 κόμβους με 2 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο και 1000 στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης και επιπλέον από 11 κατακόρυφα ελατήρια που συνδέουν την πλωτή πλάκα με τη θεμελίωση ακαμψίας 3.090 kN/m και 2 ελατήρια οριζόντια εκατέρωθεν της πλάκας ακαμψίας 3.325 kN/m το καθένα.

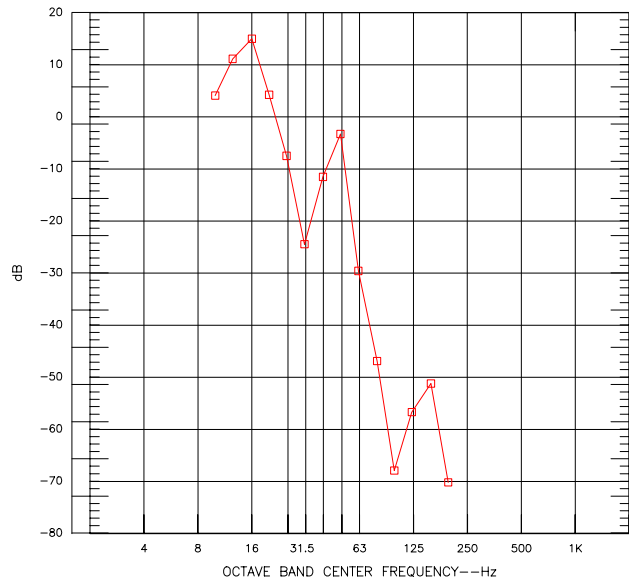


Σχήμα 8: Αναλυτικό προσομοίωμα ΜΕ αντιδονητική προστασία.

Figure 8: Modeled slab track WITH antivibration measures.

Η ανά συχνότητα ταχύτητα επιβλήθηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε στις επιλύσεις χωρίς αντιδονητική προστασία η αναπτυσσόμενη ταχύτητα δόνησης να βρίσκεται μέσα στα όρια του μετρηθέντος φάσματος συρμού SIRIO ANSALDOBREDA^[1]. Η ταχύτητα δόνησης στους κόμβους υπολογίζεται για ποσοστό απόσβεσης 10% σταθερό για όλες τις ιδιομορφές. Από τις δρώσες μάζες προκύπτει ότι η πρώτη και η δεύτερη ιδιομορφή, με συχνότητα $f_1=13.69$ Hz και $f_2=15.43$ Hz αντίστοιχα, αναφέρονται στην κατακόρυφη ταλάντωση και κατά συνέπεια στην ανάλυση για τη διέλευση τρένου. Η τρίτη ιδιομορφή με ιδιοσυχνότητα $f_3=18.54$ Hz σχετίζεται με την οριζόντια διεύθυνση, η οποία λαμβάνεται

υπόψη στη σεισμική ανάλυση. Το βέλος βύθισης της σιδηροτροχιάς για τη δυναμική κατάσταση είναι 1.6 mm, το οποίο κυμαίνεται δηλαδή μέσα στα επιθυμητά όρια. Στο διάγραμμα του σχήματος 9 στη συνέχεια δίνεται η συνάρτηση μεταφοράς της πλωτής πλάκας.



Σχήμα 9: Συνάρτηση μεταφοράς πλωτής πλάκας.

Figure 9: Modeled slab track transfer function.

Πίνακας 3: Έλεγχος συμβατότητας τεχνικών προδιαγραφών με την προτεινόμενη λύση πλωτής πλάκας.

Table 3: Technical specification conformity for the constructed FST.

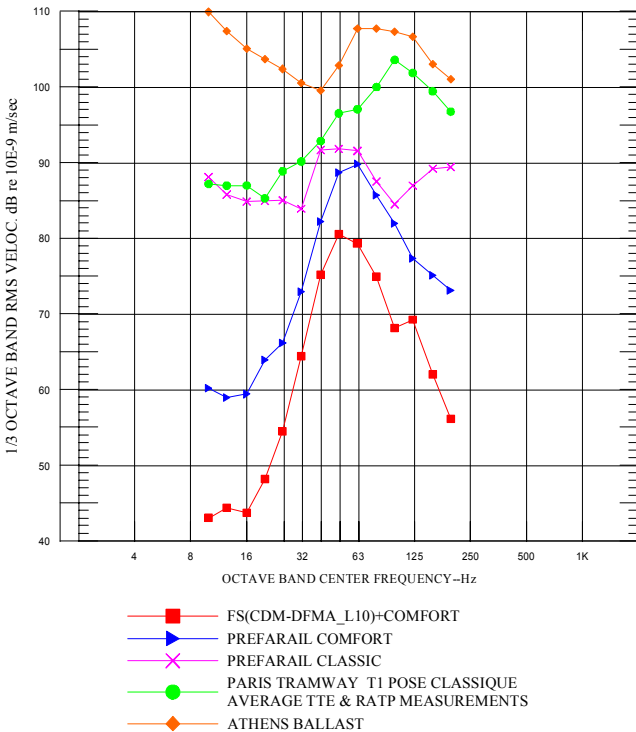
N/A	Παράμετρος αξιολόγησης	Απαιτήση βάσει τεχνικών προδιαγραφών TPAM A.E.	Τελική εφαρμογή στο δίκτυο
1	Ιδιοσυχνότητα πλάκας	< 14 Hz	13,69 Hz
2	Μέγιστη βύθιση σιδηροτροχιάς	≤ 2mm	1.6 mm
3	Πάχος οριζόντιας στρώσης ελαστομερούς	≈ 50mm	2X20mm
4	Στατική ακαμψία ελαστομερούς : Οριζόντια στρώση Κατακόρυφα στοιχεία	≈ 19KN/mm ≈ 13KN/mm σε συνδυασμό με το 1 & 2 ανωτέρω	CDM-43 (one layer k-stat = 17-20 MN/m ²) in 2 layers : k-stat = 10 MN/m ² & k-dyn = 16 MN/m ²).
5	Απαιτούμενη μείωση δονήσεων	63 Hz : 20dBv 100-200 Hz: ≥ 25 dBv	63 Hz ≥ 29 dBv 100-200 Hz: ≥ 40 dBv
6	Χωροθέτηση πλάκας	Κάλυψη απόστασης διάδοσης δονήσεων	NAI
7	Στήριξη σιδηροτροχιάς – Ελαστική ενθυλάκωση στην πλωτή πλάκα	CYPTRAMAT® Comfort για Ri60	CYPTRAMAT® Comfort για Ri60
8	Μετάβαση από σύστημα μη πλωτής πλάκας σε πλωτή πλάκα	-	Προβλέπονται ειδικές ζώνες μετάβασης (TZ)

Στον πίνακα 3 στη συνέχεια δίνεται ο έλεγχος συμβατότητας τεχνικών προδιαγραφών με την εφαρμοσθείσα λύση πλωτής πλάκας

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΧΟΜΕΙΩΤΙΚΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΔΟΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο ειδικού προγράμματος μετρήσεων δονήσεων και εδαφομεταφερόμενου θορύβου, που εκπονήθηκε για λογαριασμό της CYPTRAMAT JV Βελγίου (υπεργολάβου της κατασκευάστριας Κ/Ξ του Τραμ της Αθήνας) στην περιοχή Κασομούλη,^[8] εξάγονται σημαντικά συγκριτικά στοιχεία για την αντιδονητική συμπεριφορά των ανωτέρω διαφόρων τύπων στηριξέων:

- ✓ πλωτή πλάκα (FS) στην οδό Κασομούλη,
- ✓ στήριξη COMFORT στην οδό Κασομούλη,
- ✓ ενισχυμένη στήριξη COMFORT στην οδό Κασομούλη,
- ✓ στήριξη CLASSIC στην οδό Διαδόχου Παύλου,



Σχήμα 10: Σύγκριση αποτελεσματικότητας αντιδονητικών διατάξεων συστημάτων τραμ.

Figure 10: Comparison of various antivibration support systems in tramways.

ενώ παράλληλα γίνεται σύγκριση με σχετικά αποτελέσματα μετρήσεων της κλασικής στήριξης «POSE CLASSIQUE» της γραμμής Τραμ T2 της RATP στο Παρίσι, αλλά και της

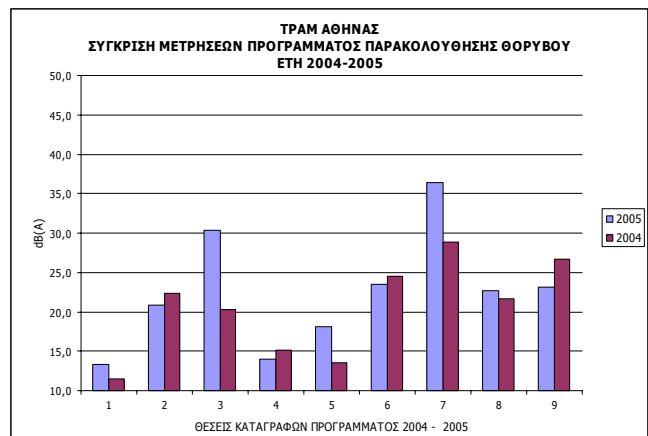
στήριξης σε έρμα (ballast) στο Αμαξοστάσιο Τραμ του Ελληνικού. Τα συγκριτικά αποτελέσματα δίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 10 στη συνέχεια (1/3 οκταβική ανάλυση ταχύτητας δόνησης σε dB ref 10⁻⁹ mm/sec).

Πέραν των ανωτέρω ιδιαίτερα θετικών αποτελεσμάτων για τις εφαρμοσθείσες λύσεις αντιδονητικής στήριξης στο Τραμ της Αθήνας, στο πλαίσιο του σχετικού ετήσιου σχετικού προγράμματος παρακολούθησης θορύβου και δονήσεων στο TRAM της Αθήνας για τον διαρκή έλεγχο του περιβαλλοντικού κριτηρίου εδαφομεταφερόμενου θορύβου^[9], διαπιστώθηκε ότι το σύνολο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων θορύβου και δονήσεων σε αντιπροσωπευτικές θέσεις που δίνονται στον πίνακα 4 στη συνέχεια για τα έτη 2004 και 2005 (βλέπε σχήμα 11), ευρίσκονται εντός των προβλεπόμενων ορίων της σχετικής έγκρισης περιβαλλοντικών όρων (ΕΠΟ) ^[5].

Πίνακας 4: Θέσεις καταγραφής εδαφομεταφερόμενου θορύβου στο πλαίσιο του προγράμματος παρακολούθησης 2004 – 2005.

Table 4: Ground-borne noise measurement locations for 2004 2005

1	Οδός ΔΙΑΔΟΧΟΥ ΠΑΥΛΟΥ – ΓΛΥΦΑΔΑ (κατοικία)
2	Οδός ΞΑΝΘΟΥ - ΓΛΥΦΑΔΑ (Κολυμβητήριο)
3	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ -ΕΚΚΛΗΣΙΑ
4	Πλατεία Νέας Σμύρνης - ΔΗΜΑΡΧΕΙΟ
5	Νέα Σμύρνη – Εκκλ. Αγ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
6	ΟΔΟΣ ΓΟΥΒΕΛΗ (κατοικία)
7	ΟΔΟΣ ΚΑΣΟΜΟΥΛΗ -ΚΑΠΗ
8	ΟΔΟΣ ΚΑΣΟΜΟΥΛΗ – Έναντι ΚΑΠΗ (κατοικία)
9	ΟΔΟΣ ΚΑΣΟΜΟΥΛΗ (κατοικία)



Σχήμα 11: Σύγκριση αποτελεσματικότητας αντιδονητικών διατάξεων συστημάτων σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του Τραμ της Αθήνας για το 2004 και 2005.

Figure 11: Comparison of various antivibration support systems effectiveness in Athens Tram for 2004 & 2005.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δρ Κ. Βογιατζής, Δρ Κ. Μουζάκης, Δρ Ν. Ηλιού «ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: «Μέτρηση και καθορισμός φάσματος δονήσεων συρμού TRAM τύπου SIRIO/ANSALDOBREDA κατά την λειτουργία του». Πολυτεχνική Σχολή Παν. Θεσσαλίας – Σχολή Πολ. Μηχ. Βόλος Φεβρουάριος 2003.
2. Δρ Κ. Βογιατζής, Δρ Κ. Μουζάκης Λέκτορας ΕΜΠ, «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ & ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ TRAM ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ». Κ/Ξ ΤΕΡΝΑ – IMPREGILO & TRAM Α.Ε. 2004 & 2005.
3. ΕΤ&Τ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ – ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ , «ΜΠΕ Τραμ Αθηνών (Θόρυβος & Δονήσεις)», Οκτώβριος 2000.
4. ΕΤ&Τ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, «Ειδική μελέτη Θορύβου & Δονήσεων από την λειτουργία του TRAM της Αθήνας», Μάιος 2001.
5. ΚΥΑ 105061/29-08-2001, Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων του TRAM της Αθήνας.
6. Δρ Κ. Βογιατζής, Δρ Κ. Μουζάκης Λέκτορας ΕΜΠ, Δρ Ν. Ηλιού Επ.Καθ. Πολυτ.Σχολής Παν. Θεσσαλίας “Evaluation of Anti-vibration measures for the protection of Adrianos gate during new Athens Tram Operation”, 4th International Exhibition and Conference on Environmental Technology HELECO 03 – Athens, January, February 2003.
7. Δρ Κ. Βογιατζής, Δρ Κ. Μουζάκης «ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΦΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ & ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ TRAM ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ : Μελέτη εφαρμογής ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ στις περιοχές : «ΚΑΣΟΜΟΥΛΗ», «ΓΟΥΒΕΛΗ», «ΣΤΡΟΓΚΟΝΩΦ» και «ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ» Θεώρηση αποτελεσματικότητας συστήματος «CYPTRAMAT-COMFORT» με βάση το φάσμα του συρμού SIRIO/ANSALDOBREDA», ΣΣΕ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΠΕ Μάρτιος 2003.
8. Prof. Constantinos Vogiatzis & Lect. Harris Mouzakis «Comparison of Different Vibration & Ground borne Noise Mitigation Measures at Athens Tramway : The “PREFARAIL-Classic® & COMFORT®” embedded track & “CDM-DFMA-L10®/ comfort special Floating slab-track” vibration isolation solutions» ΣΣΕ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΠΕ - CYPTRAMAT JV Οκτώβριος 2004.
9. Δρ Κ. Βογιατζής, Δρ Κ. Μουζάκης «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ & ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ TRAM ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ» ΣΣΕ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΠΕ. 2004-2005.

Δρ Κων/νος Ε. Βογιατζής

Εντεταλμένος Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή -Τμήμα Πολιτικών Μηχ/κών, Συγκοινωνιακός Τομέας, Πεδίον Αρεως 383 34 Βόλος.

Extended Summary

Investigation of Ground-borne Noise and Vibration from Rail Elastic Encapsulation and Floating Slab Implementation in the Athens Tramway Network

KONSTANTINOS E. VOGIATZIS

Assoc. Prof. University of Thessaly

Summary

The protection of the cultural and structural environment from noise and vibrations constitutes a basic component for the compatibility of railway projects with the urban environment. Therefore, a complete and thorough analysis of the problem and the optimal possible solutions for the reduction of ground-borne noise and vibrations from its operation is required. The objective of the present article is the examination of the effectiveness of the antivibration mitigation measures applied in the Athens Tramway network operating SIRIO/ANSALDOBREDA trams, taking into account relevant recent results from the yearly noise and vibrations monitoring program during tramway operation. According to the relevant environmental terms and the technical standards, in order to ensure the maximum permitted limit of 40 dB(A) of ground borne noise, specific solutions were applied (a) for track to receptor distance $L < 8$ to 10 m, with total antivibration effectiveness equal to 20dBV at 63Hz; (b) for track to receptor distance $8-10 \text{ m} < L < 30 \text{ m}$ equal to 7dBV at 63Hz; and (c) for track to receptor distance $L > 30 \text{ m}$ no particular antivibration appliance, apart from the elastic encapsulation of rail which constitutes the unified basic rail support system for Athens TRAM.

1. INTRODUCTION

The protection of the cultural and structural environment from noise and vibrations constitutes a basic component for the compatibility of railway projects with the urban environment.

In Athens Tramway a complete and thorough analysis of the problem and the optimal possible solutions for the reduction of ground borne noise and vibrations from its operation were executed. A series of adequate rail & track support antivibration solutions were also adopted. The objective of the present article is to analyze the effectiveness' analysis of the applied antivibration mitigation measures in the Athens Tramway network operating SIRIO/ANSALDOBREDA trams, taking into account relevant

Submitted: Feb 10, 2006 Accepted: June 28, 2006

recent results from specific measurement campaigns especially from the yearly Athens Tramway Noise & Vibration Monitoring program for 2004 & 2005.

2. ANTIVIBRATION MITIGATION MEASURES FOR RAILWAY PROJECTS

According to international practice, the basic alternative solutions for track support in railway projects such as Tramways 7 are presented in figure 1. Their use depends on the environmental criteria to be enforced according to the acoustic sensitivity of the adjacent land uses to be protected. They are summarized in term of 4 basic levels of intervention, regarding the antivibration measure to be enforced:

- ✓ **Level 1:** direct fixation of rail on elastic pads or strips of adequate elastomer material.
- ✓ **Level 2:** elastic pads underneath the rail base plates.
- ✓ **Level 3:** Floating slab.
- ✓ **Level 4:** Elastic encapsulation of rail with or without elastic support of the rail.

3. BASIC ACOUSTIC CRITERIA & BASIC TRACK SUPPORT SOLUTIONS IN ATHENS TRAMWAY

In figure 2 a simplified schematic of both vibration & ground borne noise diffusion from source to receiver and the modeled rail-track support system is presented. The relevant environmental design parameters are as follows :

- ✓ Maximum permissible noise emissions for 15 trains per hour is 67dB(A) LeqT
- ✓ Re-radiated ground-borne noise levels from the tram to be restricted to 40dB(A) in dwellings and to 35dB(A) in

sensitive buildings such as theaters, museums, schools, concert halls, etc.

- ✓ Maximum allowable rail deflection of 2mm during a train pass-by (120kN/axle)

According to the relevant environmental terms and the technical standards, and in order to ensure the maximum permitted limits for ground-borne noise, specific solutions were applied :

- (a) for track to receptor distance $L < 8$ to 10 m, with total antivibration effectiveness equal to 20dBV at 63Hz;
- (b) for track to receptor distance $8-10 \text{ m} < L < 30 \text{ m}$ equal to 7dBV at 63Hz; and
- (c) for track to receptor distance $L > 30 \text{ m}$ no particular antivibration appliance, apart from the elastic encapsulation of rail which constitutes the unified basic rail support system for the entire Athens Tramway network.

In table 1 the relevant alternative antivibration support solutions for Athens Tramway are presented. In figure 3 the Cyptramat® COMFORT support system (including antivibration strip) for S49 & Ri60N tracks is also presented along with the typical cross section for Cyptramat® COMFORT (including antivibration strip) for S49 tracks support system embedded in concrete slab (see figure 4).

4. FLOATING SLABS AT ATHENS TRAMWAY

In the Athens Tramway system the appliance of a full elastic encapsulation of rails in a special pre-applied (jacketed) elastomer material consists the basic support solution, enhanced with a special antivibration strip in cases of receptors at distances between 10 & 30m (Cyptramat®COMFORT system).

However, as far as sensitive buildings (case 3 of table 1 above, $L < 8/10\text{m}$) are concerned, at the following network segments: (a) Gouveli Street in Neos Kosmos, (b) Kasomouli Street – internal rail in Neos Kosmos, (c) Stogonof St. near Kalirois Street and (d) Panagitsa area at Palaio Faliro, the

Cyptramat®COMFORT system was used along with a CDM-DFMA-L10® floating slab-track, according to the relevant Noise & Vibration study. In this case the rail deflects at 1,6 mm. and the track system resonates at 13.69 Hz (see relevant table 3).

In figures 7 & 8 the Modeled slab track WITH and WITHOUT antivibration measures is presented and in figure 9 the calculated transfer function is presented.

5. EVALUATION OF NOISE ATTENUATION EFFICIENCY OF MITIGATION MEASURES IN ATHENS TRAMWAY

In the framework of a special ground borne noise and vibration measurements program, which was carried out by CYPTRAMAT JV Belgium (subcontractor of the TRAM Trust construction of Athens), some important comparative information about the antivibration performance of the above different types of support in Athens TRAM were derived in the Kassomouli area, while additional comparison was also made possible with measurement results of the «POSE CLASSIQUE» rail support of TRAM line T2 of RATP in Paris, and also with the ballast support solution at Athens Tramway depot (Hellinikon Greece).

The comparative results are given in figure 10 above (1/3 octave analysis of vibration speed in dB ref 10^{-9} mm/sec). Furthermore, particularly positive results for the applied solutions concerning the relevant antivibration support solutions implemented in Athens Tramway, were monitored within the frameworks of the relevant noise and vibrations yearly monitoring program.

This program aims at the monitoring of the given environmental criterion of ground- & airborne noise & vibration and has actually been completed for the years, 2004 & 2005. In selected representative locations (as per table 4), the monitored levels of ground borne noise are presented for both yearly periods 2004 & 2005 in figure 11 and proven to be in full conformance with the environmental criterion in all cases.