



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ STEDEF ΚΑΙ RHEDA 2000 ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΡΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΧΡΥΣΑ ΣΙΑΛΜΑ

Επιβλέπων: Λυμπέρης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες για τη συμβολή τους στην παρούσα διπλωματική εργασία στους:

- Κύριο Λυμπέρη Κ., Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ.
- Κυρία Γιαλαμά Τ., Υποψήφια Διδάκτωρ.
- Κύριο Λιάπη, Υπεύθυνο γραμμής των ΗΣΑΠ.
- Κυρία Μαρκαντώνη Κ., Προϊσταμένη Επιδομής του Αττικό Μετρό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή επιχειρεί να περιγράψει δύο συστήματα σταθερής επιδομής, της επιδομής Rheda 2000 που εφαρμόστηκε στην ανακαινισμένη γραμμή του ΗΣΑΠ και της επιδομής Stedef που τοποθετήθηκε στη γραμμή του Αττικό Μετρό. Για κάθε ένα από τα παραπάνω είδη επιδομής γίνονται για συγκεκριμένες παραμέτρους οι απαραίτητοι υπολογισμοί σύμφωνα με τη μέθοδο Zimmermann. Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού πραγματοποιήθηκε έρευνα σε ελληνική και ξένη βιβλιογραφία, στο διαδίκτυο και συγκεντρώθηκαν πληροφορίες από τις αρμόδιες υπηρεσίες του Αττικό Μετρό και των ΗΣΑΠ.

Αρχικά, στην παρούσα εργασία δίνεται μια εικόνα της σιδηροδρομικής γραμμής, δηλαδή αναφέρονται τα είδη επιδομής (με έρμα και σταθερή), περιγράφεται η σταθερή επιδομή και γίνεται μια σύντομη αναφορά σε κάποια είδη της, αναλύονται οι διαφορές της με την επιδομή με έρμα και τέλος αναφέρονται τα υλικά της επιδομής. Τα παραπάνω στόχο έχουν να αποκτήσει ο αναγνώστης μια σαφή εικόνα των παραγόντων που συνθέτουν τη σιδηροδρομική γραμμή και να τον βοηθήσουν να κατανοήσει τα δύο συστήματα που αναλύονται παρακάτω.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα δύο είδη σταθερής επιδομής, της επιδομής Rheda 2000 και της επιδομής Stedef, και αναλύονται οι ιδιαιτερότητες που εμφανίστηκαν κατά την εφαρμογή του κάθε συστήματος. Τέλος, γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί και μορφώνονται τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα για τις παραμέτρους κάθε συστήματος. Καθοριστικό ρόλο για τους υπολογισμούς παίζουν τα ελαστικά υποθέματα, τα οποία είναι απαραίτητα ώστε να αποφεύγεται μία τελείως άκαμπτη κατασκευή.

Λέξεις κλειδιά: σταθερή επιδομή, Rheda 2000, Stedef, στρώση πλάκας σκυροδέματος, ελαστικό υπόθεμα, δείκτης αντίδρασης εδάφους, βύθιση.

ABSTRACT

The following assignment describes two systems of slab track, the Rheda 2000 that has been used within the renewal of ISAP and the Stedef placed along Attiko Metro alignment. For each one of the two types of the slab track and for specific parameters taken, the required calculations have been performed according to Zimmermann method. Information and data has been collected from ESAP and Attiko Metro organizations and also following extended research in both Greek and International bibliography and a web search.

At the beginning of the document, a general view of the rail line is discussed, describing the two different types of track bed (ballast track and slab track) the characteristics and differences of each type are addressed as well as the composition of each in order to provide the reader with a clear picture of the line parameters and to aid understanding of the two systems as described further within the text.

Following the general view, a detailed description of the two systems Rheda 2000 and Stedef is given and the special characteristics of each system are explained. Finally and following the calculations that took place, different charts have been developed based on parameters of each system. A critical factor for the calculations has been the rubber pads which are required in order to avoid a rigid structure.

Key words: slab track, Rheda 2000, Stedef, concrete supporting layer, rubber pad, bedding module, deflection.

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....	4
1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
2. ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	8
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2.2 ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ.....	9
2.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	9
2.3.1 ΕΙΔΗ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	10
2.3.1.1 ΚΛΑΣΙΚΗ ΕΠΙΔΟΜΗ Ή ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ.....	10
2.3.1.2 ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (SLAB TRACK).....	11
2.3.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	14
2.3.1.4 ΕΙΔΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	17
2.4 ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	26
3. Η ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ RHEDA 2000.....	30
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
3.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟ RHEDA ΣΕ RHEDA 2000.....	30
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000.....	37
3.4 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΘΕΣΗ.....	38
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000 ΣΤΟΝ ΗΣΑΠ.....	44
3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	44
3.5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΟΥ ΗΣΑΠ.....	45
3.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000 ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΗ ΓΡΑΜΜΗ.....	47
3.5.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	53
4. Η ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ STEDEF.....	55
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ STEDEF.....	55
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ STEDEF ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ.....	57
4.2.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	57
4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	58
4.2.2.1 ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΓΡΑΜΜΗ.....	58
4.2.2.2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ.....	61

4.2.2.3 ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΛΛΑΓΩΝ.....	63
4.2.2.4 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΩΝ.....	65
4.2.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	65
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	68
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	68
5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	68
5.3 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	70
5.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΣΤΡΩΤΗΡΑ.....	72
5.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c -ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	78
5.6 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....	80
5.7 Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	82
5.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ RHEDA 2000 ΤΟΥ ΗΣΑΠ.....	84
5.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ STEDEF ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ.....	88
5.10 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	92
5.11 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	94
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
7.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121

1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ανάγκη για την ανακάλυψη ενός νέου τύπου επιδομής προκειμένου να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα και οι αυξημένες απαιτήσεις για συντήρηση που παρουσιάζει η κλασική επιδομή οδήγησε στην υιοθέτηση της επιδομής χωρίς έρμα, τη λεγόμενη σταθερή επιδομή. Η επιδομή αυτή επιλέγεται συνήθως σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων και σε γραμμές που βρίσκονται σε σήραγγες ή γέφυρες.

Η χρησιμοποίηση της σταθερής επιδομής τα τελευταία χρόνια έδωσε την ευκαιρία ανάπτυξης διαφόρων τύπων, που ύστερα από τη μελέτη του τρόπου σχεδιασμού και των παραμέτρων, που επηρεάζουν την αντοχή και παραμορφωσιμότητα, οδήγησε αρχικά στη δοκιμαστική εφαρμογή τους και στη συνέχεια στην κατασκευή τους σε διάφορα δίκτυα. Η επιλογή κάθε φορά του είδους της σταθερής επιδομής εξαρτάται από τις επί τόπου συνθήκες του έργου και την υπάρχουσα υπόβαση.

Κύρια διαφορά μεταξύ σκυρογραμμής και σταθερής επιδομής είναι η έδραση της γραμμής που είναι εύκαμπτη και άκαμπτη αντίστοιχα, αφού η στρώση σκύρου της πρώτης αντικαθίσταται από μία πλάκα μπετόν. Επειδή όμως για λόγους φθοράς και άνεσης των επιβατών πρέπει να αποφεύγεται μια τελείως άκαμπτη κατασκευή, τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις ενδιάμεσα ελαστικά υποθέματα, τα οποία υποκαθιστούν τη συμπεριφορά της σκυρόστρωσης.

Στη σταθερή επιδομή τύπου Stedef το ελαστικό υπόθεμα είναι μια ελαστική "σόλα", η οποία τοποθετείται κάτω από το μπετόν μπλοκ του στρωτήρα, όπου όλο μαζί, στρωτήρας και "σόλα", τοποθετούνται εντός της ελαστικής "μπότας". Αντίθετα, στη σταθερή επιδομή Rheda 2000 χρησιμοποιείται συνήθως ο σύνδεσμος Loarn 300 για την στήριξη των σιδηροτροχιών με ελαστικό υπόθεμα Zwp 104, το οποίο είναι τοποθετημένο ανάμεσα στη σιδηροτροχιά και τον στρωτήρα.

Με βάση τα παραπάνω σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δύο συστημάτων σταθερής επιδομής, της Rheda 2000 που χρησιμοποιήθηκε στην καινούργια γραμμή των ΗΣΑΠ και της Stedef που εφαρμόστηκε στο μετρό της Αθήνας, ως προς την ελαστικότητα τους μέσω του υπολογισμού της βύθισης με τη βοήθεια της μεθόδου Zimmermann. Η χρησιμότητα της εργασίας αυτής έγκειται στο γεγονός ότι οι πληροφορίες είναι συγκεντρωμένες δίνοντας έτσι μια σαφή εικόνα των διαφορών των δύο συστημάτων. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- ❖ Γενική περιγραφή της σιδηροδρομικής γραμμής, των ειδών επιδομής και των υλικών επιδομής (Κεφάλαιο 2).
- ❖ Αναλυτική περιγραφή του συστήματος Rheda 2000, δηλαδή περιγραφή των στρώσεων της επιδομής, των υλικών που χρησιμοποιούνται, καθώς και παρουσίαση των διαφοροποιήσεων στην ανακαινισμένη γραμμή των ΗΣΑΠ (Κεφάλαιο 3).
- ❖ Αναλυτική περιγραφή της σταθερής επιδομής Stedef του Αττικό Μετρό (Κεφάλαιο 4).
- ❖ Υπολογισμοί των δύο παραπάνω τύπων σταθερής επιδομής και μόρφωση των διαγραμμάτων της βύθισης και των αντιδράσεων των στρωτήρων για κάθε τύπο (Κεφάλαιο 5).

2. ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

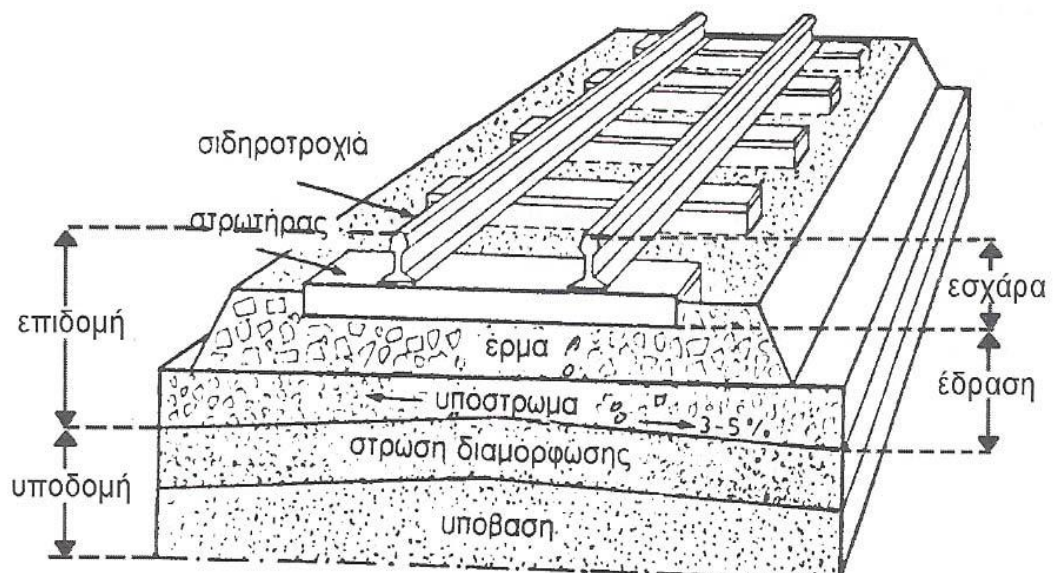
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σιδηροδρομική γραμμή είναι μια αλληλοδιαδοχή καθ' ύψος διάφορων υλικών ή στρώσεων υλικών, που καθορίζουν την τελική της θέση και τις ιδιότητες, με τις οποίες «αντιδρά» στη «δράση» που δημιουργείται από την κίνηση ενός σιδηροδρομικού οχήματος.

Τα υλικά ή οι στρώσεις που απαρτίζουν τη σιδηροδρομική γραμμή μπορεί να προσομοιωθούν από ένα συνδυασμό «ελατηρίων», που λειτουργούν σαν αποσβεστήρες κατά την κίνηση των συρμών.

Η σιδηροδρομική γραμμή περιλαμβάνει δύο επί μέρους υποσυστήματα:

- α) Την υποδομή (στρώση διαμόρφωσης, βάση ή υπόβαση) και
- β) Την επιδομή (σιδηροτροχιές, στρωτήρες, σύνδεσμοι, ελαστικά υποθέματα, έδραση).



Σχήμα 2.1 Σιδηροδρομική γραμμή. ^[1]

2.2 ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ

Η υποδομή της γραμμής είναι το στρώμα του εδάφους πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η επιδομή της γραμμής και περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις:

- Τη στρώση διαμόρφωσης, ως ανώτερη στρώση, που τοποθετείται εφόσον το εδαφικό υλικό δεν είναι καλής ποιότητας.
- Την υπόβαση ή έδαφος θεμελίωσης ως κατώτερη στρώση.

Ο κύριος ρόλος που επιτελεί η υποδομή είναι η εξασφάλιση μιας σταθερής θεμελίωσης των στρώσεων της έδρασης και γενικότερα της επιδομής της γραμμής.

Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να έχει ανθεκτικότητα στον παγετό.
- Να μην υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές όγκου.
- Να εξασφαλίζει τη γραμμή από τον κίνδυνο θραύσης λόγω διάτμησης.

Κατά τη φάση κατασκευής της υποδομής πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή:

- Στην επιλογή της ποιότητας του υλικού υποδομής.
- Στη σωστή συμπύκνωση του υλικού (Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές).
- Στη διαμόρφωση της κλίσης για καλύτερη αποστράγγιση και την κατασκευή ανάλογων τεχνικών έργων (τάφροι, στραγγιστήρια κλπ.).
- Στην προστασία της υποδομής από την παρουσία του ύδατος.
- Στη διαμόρφωση κατάλληλων κλίσεων έναντι ολίσθησης.

2.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

Η επιδομή της γραμμής αποτελείται από τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, τους συνδέσμους, τα ελαστικά υποθέματα και το έρμα.

Η επιδομή της γραμμής έχει σαν κύρια αποστολή:

- Να διανέμει και να μεταφέρει τα φορτία κυκλοφορίας στο φυσικό έδαφος.
- Να εξασφαλίσει τη γρήγορη απομάκρυνση των νερών της βροχής.
- Να αμβλύνει τις δυσμενείς επιπτώσεις σε περίπτωση παγετού.

2.3.1 ΕΙΔΗ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Υπάρχουν δύο είδη επιδομής:

- Η κλασική επιδομή ή επιδομή με έρμα.
- Η σταθερή επιδομή.

2.3.1.1 ΚΛΑΣΙΚΗ ΕΠΙΔΟΜΗ Η΄ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ

Η έδραση της κλασικής επιδομής αποτελείται από:

- Το έρμα σαν ανώτερη στρώση [συνήθως από θραυστά υλικά(σκύρα)], το οποίο έχει πάχος συνήθως 25-30 cm.
- Το υπόστρωμα έρματος σαν κατώτερη στρώση [κατάλληλα διαβαθμισμένο υλικό, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα].



Εικόνα 2.1 Επιδομή με έρμα.

Η παρουσία του έρματος έχει σαν σκοπό:

- Να εξασφαλίσει τη σταθερότητα των στρωτήρων.
- Να λειτουργεί σαν ελατήριο απόσβεσης των δονήσεων από τη διέλευση των συρμών (βύθιση και επαναφορά της γραμμής στην αρχική της θέση).
- Να εμποδίζει τις διαφορικές καθιζήσεις.

- Να επιτρέπει με τη βοήθεια των μηχανημάτων υπογόμεσης τη γρήγορη επανόρθωση των σφαλμάτων και την αποκατάσταση της γεωμετρίας της γραμμής.
- Να παρέχει επαρκή ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών.
- Να εμποδίζει την ανάπτυξη βλάστησης επί της επιδομής.
- Να απορροφά μέρος του θορύβου της κύλισης.

Η παρουσία του υποστρώματος του έρματος επιπλέον έχει σαν σκοπό:

- Να διαχωρίζει τα στρώμα του έρματος από την υποδομή, εμποδίζοντας την εισχώρηση των λεπτόκοκκων υλικών της στο έρμα και ταυτόχρονα να εμποδίζει την τοπική θραύση της άνω επιφάνειας της υποδομής.
- Να επιτρέπει την αποστράγγιση τόσο των υδάτων που προέρχονται από το έρμα όσο και των υπόγειων υδάτων από την υποδομή.

2.3.1.2 ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (SLAB TRACK) ^[1]

ΛΟΓΟΙ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ

Παρόλο που ακόμα και σήμερα στις περισσότερες σιδηροδρομικές κατασκευές επιλέγεται η κλασική επιδομή, η πρόσφατη εμπειρία δείχνει ότι η σταθερή επιδομή αρχίζει να γίνεται ανταγωνιστική σε σχέση με την επιδομή με έρμα. Η ανάγκη για την ανακάλυψη ενός νέου τύπου επιδομής και η αντικατάσταση της κλασικής επιδομής οφείλεται στα μειονεκτήματα που έχει η επιδομή με έρμα και κυρίως στις αυξημένες απαιτήσεις για συντήρηση.

Με την αύξηση της ταχύτητας των συρμών παρατηρήθηκε σημαντική φθορά στο έρμα, το οποίο λόγω των δυναμικών φορτίων, τροχοπεδήσεων κλπ. κυριολεκτικά συνθλίβεται και συμπυκνώνεται με αποτέλεσμα την απώλεια της ελαστικότητάς του, τη δυσχέρεια στην απορροή των όμβριων κλπ.

Υπό αυτές τις συνθήκες η διατήρηση της γεωμετρίας της γραμμής απαιτεί συχνότερες και δαπανηρότερες επεμβάσεις, τα δε επιμέρους δομικά υλικά (στρωτήρες, σιδηροτροχιές, υλικά σύνδεσης κλπ.) υφίστανται ανεπίτρεπτες φθορές και χρήζουν αντικατάστασης πολύ νωρίτερα από τον αναμενόμενο χρόνο ζωής τους. Ακόμα πολλές φορές απαιτούνται δαπανηρές επεμβάσεις και στην υποδομή. Οι απαιτούμενες συντηρήσεις και επεμβάσεις στη σιδηροδρομική γραμμή γίνονται όλο και πιο δύσκολες με τον καιρό καθώς αυξάνεται η κίνηση των συρμών και μειώνεται το ποσοστό του χρόνου κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου δε διέρχονται συρμοί.

Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε άμεση αντικατάσταση του έρματος, που όπως αναφέρθηκε, καθορίζει σημαντικά την ελαστικότητα της γραμμής καθώς και την σταθεροποίηση της γραμμής στις εγκάρσιες δυνάμεις. Οι αρνητικές αυτές εμπειρίες όλων των δικτύων οδήγησαν διεθνώς στην υιοθέτηση της σταθερής επιδομής (Slab Track ή Feste Fahrbahn).

Με την κατασκευή της σταθερής επιδομής αίρονται ουσιαστικά τα μειονεκτήματα της σκυρογραμμής, αφού το έρμα αντικαθίσταται εξ ολοκλήρου από φέρουσα πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος σε κατάλληλα διαμορφωμένο υπόστρωμα.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η τεχνική της έδρασης της σιδηροδρομικής γραμμής σε πλάκα σκυροδέματος αναπτύχθηκε τα τελευταία τριάντα (30) χρόνια περίπου από τα πλέον προηγμένα σιδηροδρομικά δίκτυα του κόσμου στις γραμμές πολύ υψηλών ταχυτήτων λόγω των αρνητικών εμπειριών σε γραμμές επί έρματος. Μερικά παραδείγματα εφαρμογής της σταθερής επιδομής είναι τα εξής:

- Στην Ιαπωνία αποφασίστηκε εδώ και είκοσι χρόνια η μέθοδος σταθερής επιδομής να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κατασκευή νέων γραμμών υψηλών ταχυτήτων. Σήμερα περίπου το 80% των γραμμών του δικτύου διαθέτει αυτή την επιδομή.
- Στη Γερμανία επίσης αποφάσισαν να προδιαγράφουν αποκλειστικά τη μέθοδο σταθερής επιδομής για την κατασκευή γραμμών υψηλών ταχυτήτων μεικτής κυκλοφορίας, μετά από πολυετείς δοκιμές διαφόρων συστημάτων σταθερής επιδομής.
- Στην Κορέα άρχισε η χρησιμοποίηση της σταθερής επιδομής τα τελευταία χρόνια στις γραμμές υψηλών ταχυτήτων.
- Στην Ιταλία, Γαλλία, Αγγλία, Ολλανδία, Αυστρία και Ελβετία χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρά τμήματα ανοικτής γραμμής (κυρίως πάνω σε γέφυρες) καθώς και σε τμήματα υπόγειας διαδρομής (σήραγγες, δίκτυα μετρό).
- Τέλος σε αρκετές χώρες, όπως στην Κίνα, το Βιετνάμ, την Ινδία, τις Η.Π.Α. χρησιμοποιείται δοκιμαστικά σε γραμμές με μεγάλη κυκλοφορία.
- Στην Ελλάδα με σταθερή επιδομή έχει κατασκευαστεί η γραμμή στις σήραγγες των Τεμπών και θα κατασκευαστεί και στις σήραγγες της Όρθρουος και Καλλιδρόμου καθώς και στη γραμμή Κιάτο – Πάτρας, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και στο Αττικό Μετρό και στην ανακαινισμένη γραμμή των ΗΣΑΠ.

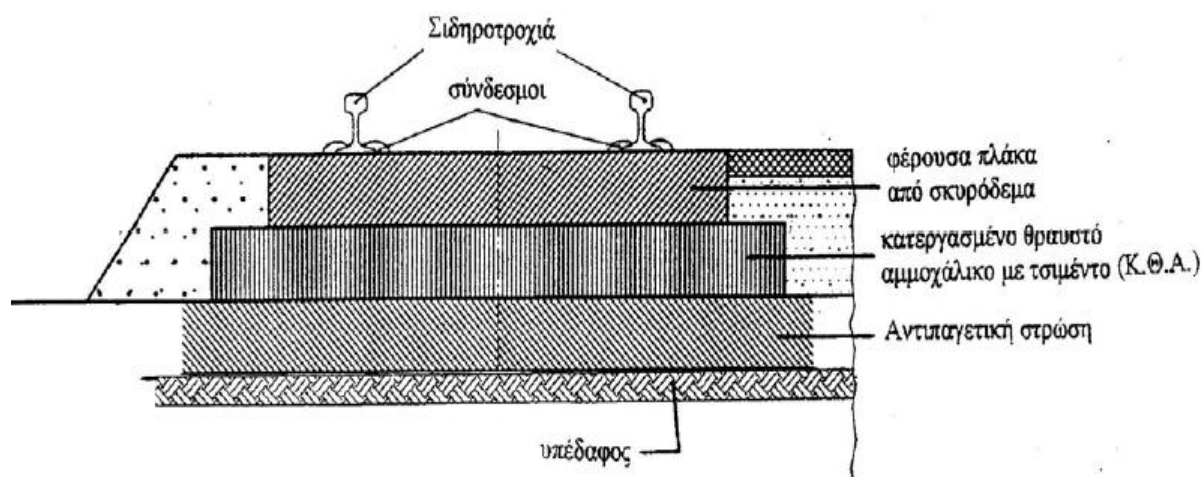
ΓΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η σταθερή επιδομή συνίσταται ουσιαστικά από ένα σύστημα άκαμπτης φέρουσας κατασκευής από σκυρόδεμα (συνήθως) και τους κατάλληλους διαμορφωμένους και στερεωμένους επ' αυτής συνδέσμους, οι οποίοι συγκρατούν τις σιδηροτροχιές.

Η άκαμπτη φέρουσα κατασκευή αποτελείται από φέρουσα διαμήκη, συνεχή, δύσκαμπτη πλάκα από σκυρόδεμα (αλλά και από άσφαλτο) κατάλληλου πάχους και πλάτους (π.χ. 20 cm και 30 cm αντίστοιχα), προκατασκευασμένη ή όχι και εδράζεται κατά κανόνα σε στρώση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο με τσιμέντο (ΗCΙ), κατάλληλου πάχους 20–40 cm και πλάτους όσο της επάνω πλάκας αυξημένου κατά το διπλάσιο του πάχους της ίδιας στρώσης. Η στρώση αυτή εδράζεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο και καλά συμπυκνωμένο (σταθεροποιημένο) έδαφος με ή χωρίς αντιπαγετική στρώση (FSS).

Σκοπός της άκαμπτης αυτής φέρουσας κατασκευής είναι να παραλάβει και να μεταβιβάσει με ασφάλεια στο έδαφος τις δράσεις που πηγάζουν από τα βάρη των συρμών και τις πρόσθετες δυναμικές επιπλοήσεις που προκαλεί η κίνησή τους, καθώς και οι δράσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην προετοιμασία της θεμελίωσης. Οι στρώσεις της υπόβασης θα πρέπει να είναι ομοιογενείς και ικανές να παραλάβουν τα φορτία χωρίς σημαντικές αποκαταστάσεις.



Σχήμα 2.2 Διατομή σταθερής επιδομής. ^[1]

2.3.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Κύρια διαφορά μεταξύ σκυρογραμμής και σταθερής επιδομής είναι η έδραση της γραμμής που είναι εύκαμπτη και άκαμπτη αντίστοιχα. Και στις δυο τεχνικές υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που περιλαμβάνονται στον παρακάτω πίνακα. ^{[4],[8],[1]}

Πίνακας 2.1 Σύγκριση σταθερής και κλασικής επιδομής

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ	ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ
Κόστος κατασκευής	+	-
Κόστος συντήρησης-Διάρκεια ζωής	-	+
Εγκάρσια αντίσταση	-	+
Βάρος κατασκευής	-	+
Διόρθωση σφαλμάτων γεωμετρίας γραμμής	+	-
Ύψος κατασκευής της επιδομής	-	+
Χρόνος κατασκευής	+	-
Ελαστικότητα	+	-
Τεχνική ευρέως διαδεδομένη και γνωστή	+	-
Συμπεριφορά στις διαφορικές καθιζήσεις	+	-
Απορρόφηση θορύβου	+	-
Πρόσβαση από τα οδικά οχήματα σε περίπτωση βλάβης	-	+
«Στροβιλισμός» των σκύρων κατά τη διέλευση των συρμών με υψηλές ταχύτητες	-	+

Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης

Η σταθερή επιδομή απαιτεί μειωμένη συντήρηση σε σύγκριση με την επιδομή με έρμα, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή διαθεσιμότητα της γραμμής. Η επιθεώρηση και έλεγχος της γραμμής είναι βεβαίως απαραίτητες διαδικασίες αλλά εξαιτίας της σταθερής έδρασης της γραμμής δεν υπάρχει η ανάγκη για συχνές εργασίες διόρθωσης της γεωμετρίας της (υψομετρική τακτοποίηση κλπ.).

Κόστος κατασκευής

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής των συστημάτων σταθερής επιδομής είναι υψηλότερο σε σχέση με αυτό της επιδομής με έρμα, ενώ αντιθέτως το κόστος συντήρησης των συστημάτων σταθερής επιδομής είναι σαφώς μικρότερο σε σχέση με την έδραση με έρμα. Στα παραπάνω αξίζει να αναφερθεί ότι η διάρκεια ζωής σχεδιασμού είναι πολύ μεγαλύτερη στη σταθερή επιδομή. Πιο συγκεκριμένα για πάχος έδρασης 40-45 cm το κόστος κατασκευής είναι μεγαλύτερο κατά 10-20% στις διατομές μέσα σε σήραγγα και κατά 70-90% στις διατομές ανοικτής γραμμής. Για το λόγο αυτό η σταθερή επιδομή προτιμάται στα υπόγεια τμήματα γραμμής (σήραγγες, δίκτυα μετρό).

Μικρό βάθος κατασκευής

Η σταθερή επιδομή απαιτεί λιγότερο βάθος κατασκευής από την επιδομή με έρμα, το οποίο είναι σημαντικό για την κατασκευή σταθερής επιδομής στις σήραγγες όπου η εξοικονόμηση χώρου είναι πρωτίστης σημασίας.

Μειωμένο βάρος κατασκευής

Η μείωση του βάρους κατασκευής έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο βάρος ανά τρέχον μέτρο. Για το λόγο προτιμάται η κατασκευή της σταθερής επιδομής πάνω σε γέφυρες.

Λειτουργία σε υψηλότερες ταχύτητες

Στη σταθερή επιδομή μπορούν να αναπτυχθούν υψηλότερες ταχύτητες (έως και 350 km/h), γιατί έχει μεγαλύτερη πλευρική και διαμήκη σταθερότητα στη γραμμή από την επιδομή με έρμα και οι παρεκκλίσεις από την ευθυγραμμία της γραμμής είναι πολύ μικρές και είναι δύσκολο να συμβούν. Η καλή αυτή κατάσταση της γεωμετρίας της γραμμής παρέχει άνεση στους επιβάτες και μειώνει τις απαιτήσεις για συντήρηση.

Θόρυβος και δόνηση

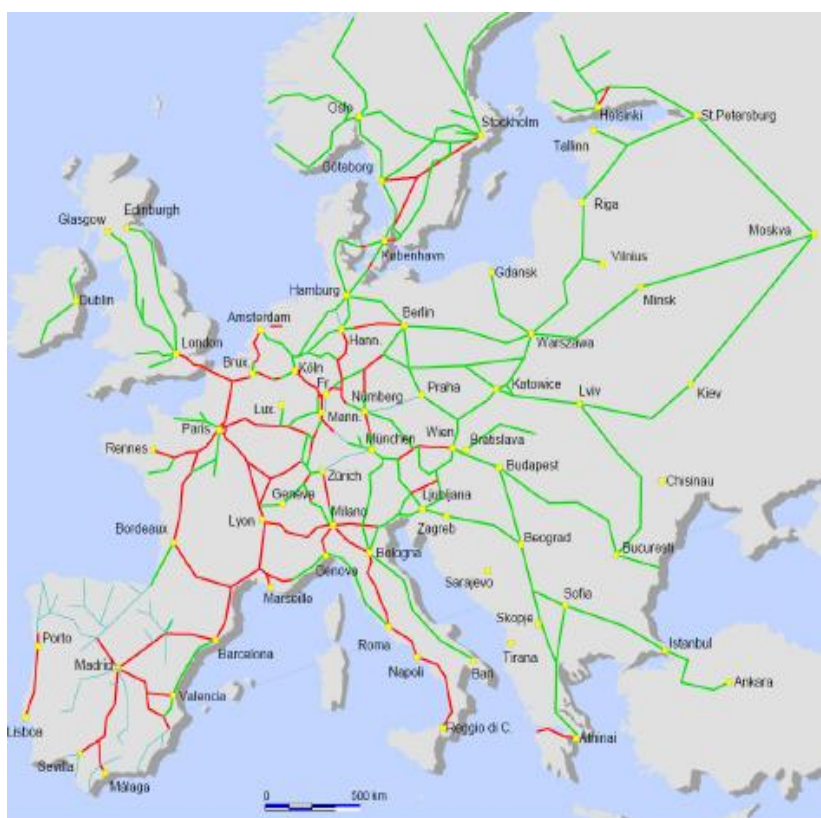
Η σταθερή επιδομή έχει μειωμένη ικανότητα απορρόφησης θορύβου. Ωστόσο μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια επίδοσης όσον αφορά το θόρυβο αλλά και τις δονήσεις.

Τα σημαντικά λοιπόν πλεονεκτήματα της σταθερής επιδομής όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω αυξάνουν την τάση των σιδηροδρομικών οργανισμών για επιλογή συστημάτων σταθερής επιδομής ιδιαιτέρως στους σιδηροδρόμους υψηλών ταχυτήτων σε σήραγγες και σε γέφυρες. Παρόλα αυτά στον ελληνικό χώρο η χρήση της σταθερής επιδομής έχει αρχίσει να εφαρμόζεται μόλις τα τελευταία χρόνια καθώς το ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο στην πλειονότητά του δεν χαρακτηρίζεται από σιδηροδρομικές μεταφορές υψηλών ταχυτήτων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ενδεικτικά μία πρόβλεψη για το ευρωπαϊκό δίκτυο σιδηροδρόμων σε έδραση με σταθερή επιδομή για το έτος 2020.

2020 ΔΙΚΤΥΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Κόκκινη γραμμή:
Γραμμές υψηλών
ταχυτήτων

Πράσινη γραμμή:
Υπό κατασκευή
γραμμές υψηλών
ταχυτήτων



Σχήμα 2.3 Πρόβλεψη δικτύου σταθερής επιδομής στην Ευρώπη το 2020. ^[12]

2.3.1.4 ΕΙΔΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Η χρησιμοποίηση της σταθερής επιδομής τα τελευταία χρόνια έδωσε την ευκαιρία ανάπτυξης διαφόρων τύπων. Στους τύπους αυτούς αρχικά μελετήθηκαν οι τρόποι σχεδιασμού και οι παράμετροι, που επηρεάζουν την αντοχή και παραμορφωσιμότητα τους. Στη συνέχεια, αφού δοκιμάστηκε η εφαρμογή τους, ξεκίνησε η κατασκευή τους σε διάφορα δίκτυα.

Στα διάφορα συστήματα έδρασης της σιδηροδρομικής γραμμής σε πλάκα σκυροδέματος διακρίνουμε τους εξής τύπους:

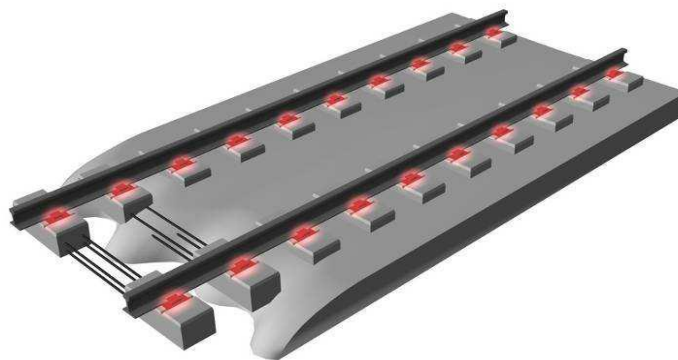
- 1) Σύστημα με ολόσωμους ή διμερείς στρωτήρες (είτε επικαθήμενοι είτε με πλήρη συνεργασία στρωτήρων και φέρουσας πλάκας).
- 2) Σύστημα με απ' ευθείας στήριξη και έδραση σιδηροτροχιών.
- 3) Σύστημα με χρήση προκατασκευασμένων πλακών.

Η επιλογή του είδους της σταθερής επιδομής εξαρτάται από τις επί τόπου συνθήκες του έργου και την υπάρχουσα υπόβαση. Τα κυριότερα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

- α) Ολόσωμοι στρωτήρες εγκιβωτισμένοι στην πλάκα επί ελαστικής υποδοχής (Rheda – Γερμανία, Obb-Porr - Αυστρία).
- β) Διμερείς στρωτήρες επί ελαστικής υποδοχής (Stedef – Γαλλία, Sonnevill - Γαλλία).
- γ) Διμερείς στρωτήρες εγκιβωτισμένοι στην πλάκα επί ελαστικής υποδοχής (Walo – Ελβετία).
- δ) Προκατασκευασμένες πλάκες με προστατευτική υποκείμενη στρώση (Shinkansen – Ιαπωνία, IPA – Ιταλία, Boegl - Γερμανία).
- ε) Χωρίς στρωτήρες, με σιδηροτροχιές εγκιβωτισμένες στην πλάκα επί ελαστικής υποδοχής (ERS – Ολλανδία).^[1]

ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ (ΠΛΗΡΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΡΩΤΗΡΑ ΚΑΙ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΠΛΑΚΑΣ)

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται περισσότερο στη Γερμανία σε σιδηρόδρομους υψηλών ταχυτήτων. Παρακάτω περιγράφονται μερικοί τύποι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.



Σχήμα 2.4 Σύστημα σταθερής επιδομής με ενσωματωμένους στρωτήρες. ^[6]

RHEDA

Η μορφή του συστήματος Rheda περιλάμβανε αρχικά ολόσωμους στρωτήρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, που εδράζονταν σε στρώσεις κατ' αρχάς οπλισμένου σκυροδέματος και στη συνέχεια σε στρώση άοπλου σκυροδέματος για προστασία από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Με την πάροδο του χρόνου, λόγω των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη χρήση του συστήματος, έγιναν διορθώσεις με αλλαγή της διατομής μέχρι που οριστικοποιήθηκε στη τελική της μορφή με το όνομα Rheda 2000. ^[1]

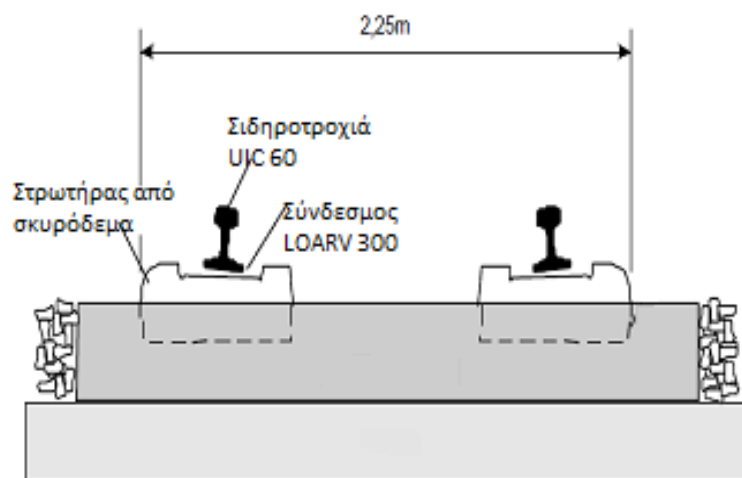


Εικόνα 2.2 Σύστημα σταθερής επιδομής RHEDA 2000.

ZÜBLIN

Το σύστημα Züblin αποτελείται από εγκιβωτισμένους μονομερείς ή διμερείς στρωτήρες από σκυρόδεμα. Η ανάπτυξη του συστήματος Züblin ξεκίνησε το 1974 και στόχο είχε να συνδυάσει έναν μοντέρνο μηχανισμό κατασκευής με χαμηλό κόστος. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή σταθερής επιδομής με το σύστημα Züblin υλοποιείται τοποθετώντας πάνω από την αντιπαγετική στρώση πάχους 30 cm,

στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου (Κ.Θ.Α) καλυπτόμενο από ένα στρώμα σκυροδέματος πάχους 28 cm. Η διαφορά από άλλες μεθόδους κατασκευής σταθερής επιδομής είναι ότι οι στρωτήρες τοποθετούνται και συμπιέζονται εντός της πλάκας σκυροδέματος. Με ειδικό μηχάνημα στρώνονται ταυτόχρονα 8 στρωτήρες επάνω στο μόλις στρωμένο σκυρόδεμα της φέρουσας πλάκας και συμπιέζονται εντός αυτής. Οι στρωτήρες συμπιέζονται με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε το άνω μέρος τους να είναι εκτός σκυροδέματος και να μπορεί να δεχθεί τους συνδέσμους στερέωσης των σιδηροτροχιών.^[8]



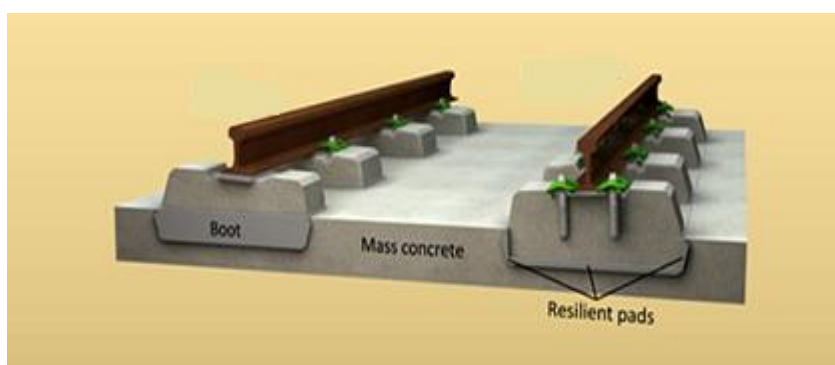
Σχήμα 2.5 Σύστημα σταθερής επιδομής ZUBLIN.^[16]

ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΟΥΣ ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ

Στους επικαθήμενους τύπους σταθερής επιδομής δεν γίνεται ολοκληρωμένη σύνδεση της εσχάρας γραμμής με τη φέρουσα στρώση. Η εσχάρα γραμμής εδράζεται πάνω σε φέρουσα στρώση από σκυρόδεμα ή ασφαλτο με υψομετρική ακρίβεια ± 2 mm. Για την ομοιόμορφη μεταβίβαση του φορτίου οι στρωτήρες φέρουν στην κάτω επιφάνειά τους ειδικό ελαστομερές, με το οποίο αποφεύγονται οι φθορές στο στρωτήρα και στη φέρουσα στρώση. Η απαιτούμενη για τη φέρουσα στρώση επικαθήμενων τύπων σταθερής επιδομής ακρίβεια δημιουργεί υψηλότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις.

STEDDEF

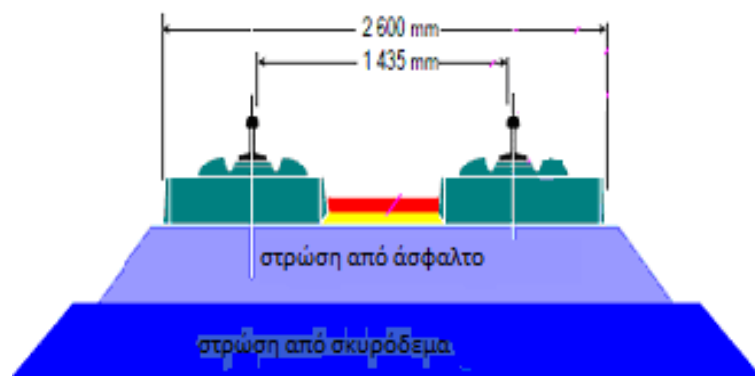
Το γαλλικό Stedef χρησιμοποιεί ελαστομερή βάση κάτω από τους στρωτήρες η οποία και δίνει υψηλό βαθμό ευκαμψίας και διασφαλίζει υψηλή προστασία έναντι θορύβου και δονήσεων. Η μέθοδος κατασκευής που χρησιμοποιείται είναι η “Top-down”. Στην αρχή η πλάκα-βάση οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετείται με την κατάλληλη διαμόρφωση για την τοποθέτηση των στρωτήρων. Σε δεύτερη φάση τοποθετούνται με τις κατάλληλες ανοχές οι στρωτήρες οι οποίοι και ενσωματώνονται στην κατασκευή. Το πλεονέκτημα της κατασκευής είναι η σχετικά εύκολη αντικατάσταση πιθανώς φθαρμένων στρωτήρων. Η σιδηροτροχιά αποσυναρμολογείται τοπικά, οι στρωτήρες απομακρύνονται και στη θέση τους τοποθετούνται οι καινούργιοι. ^{[5],[6]}



Σχήμα 2.6 Σύστημα σταθερής επιδομής Stedef. ^[16]

ΣΥΣΤΗΜΑ ATD

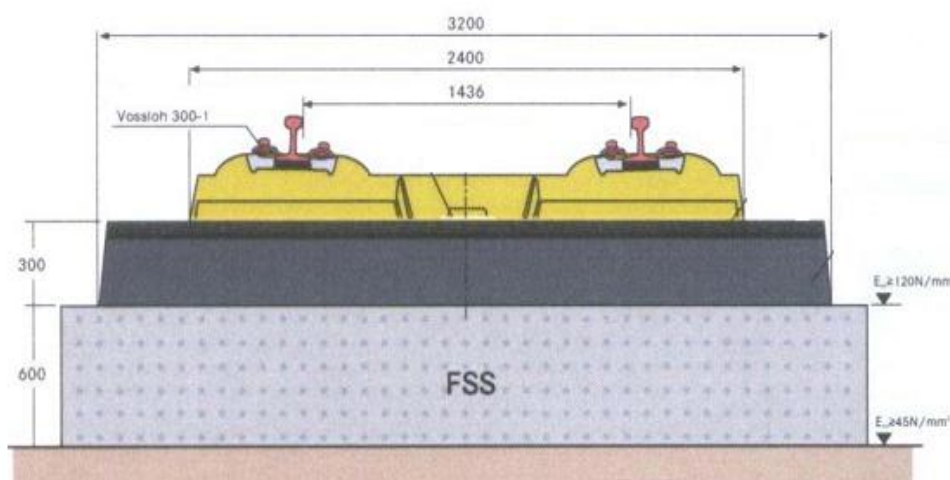
Το σύστημα ATD αποτελείται από επιδομή από σκυρόδεμα και στην κορυφή της μία στρώση από ασφάλτο, στην οποία εδράζονται απευθείας οι στρωτήρες. Το πάχος αυτής της στρώσης κυμαίνεται από 25 cm έως 50 cm. Έχουν αναπτυχθεί ειδικές μίξεις ασφάλτου οι οποίες εγγυώνται 50 με 60 χρόνια ζωής ακόμα και με ακραία καιρικά φαινόμενα. Στο μέσο των στρωτήρων τοποθετείται μία ράβδος, η οποία παρέχει αντίσταση στις εγκάρσιες δυνάμεις. Μετά την οριζοντιογραφική τακτοποίηση της γραμμής ο εναπομένον ελεύθερος χώρος μεταξύ ράβδου, στρωτήρα και στρώσης πληρούται με ελαστικό συνθετικό υλικό. ^{[6],[16]}



Σχήμα 2.7 Σύστημα σταθερής επιδομής ATD. ^[16]

GETRAC

Η εσχάρα γραμμής κατασκευάζεται πάνω σε ασφαλτική στρώση. Ολόσωμοι στρωτήρες επικάθονται πάνω σε αυτή τη στρώση και αγκυρώνονται ελαστικά με τη βοήθεια ενός πείρου από ειδικό τσιμέντο. Ο πείρος αυτός έχει σχεδιασθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει τις διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις των σιδηροτροχιών στο ασφαλτικό στρώμα. Για να μειωθεί η τριβή στο κάτω μέρος των στρωτήρων τοποθετείται ειδική στρώση από γεωύφασμα. Ο ειδικός κυλινδρικός πείρος περιβάλλεται από ελαστικό υλικό και εισέρχεται εντός της οπής, η οποία διανοίγεται στη φέρουσα στρώση ασφάλτου με αναρρόφηση, πριν η ασφαλτος σκληρύνει. Μετά τη στρώση και τακτοποίηση της εσχάρας γραμμής, για να σταθεροποιηθεί αυτή στη θέση της, τοποθετούνται ειδικά τσιμεντένια παρεμβλήματα μεταξύ των στρωτήρων και της φέρουσας πλάκας. ^{[9],[16]}



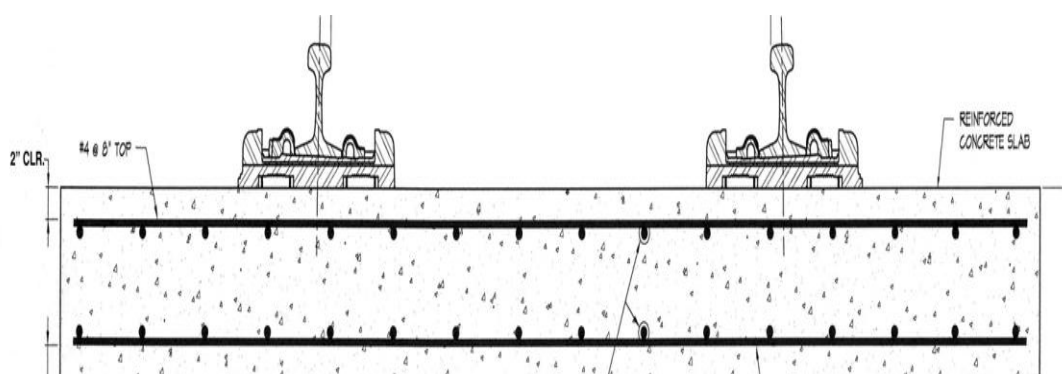
Σχήμα 2.8 Σύστημα σταθερής επιδομής Getrac. ^[1]

ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ (ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΤΕΡΕΩΣΗ)

Στους τύπους αυτούς σταθερής επιδομής η σιδηροτροχιά εδράζεται απευθείας στη στρώση οπλισμένου σκυροδέματος με τη βοήθεια κατάλληλης πλάκας έδρασης. Η σιδηροτροχιά συνδέεται με την πλάκα έδρασης με κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα σύνδεσης και η πλάκα έδρασης συνδέεται με τη στρώση σκυροδέματος με τη βοήθεια κατάλληλων αγκυρίων. Το σύστημα της πλάκας έδρασης περιλαμβάνει ελαστικά υπόθεμα που τοποθετούνται στη βάση της πλάκας έδρασης (αύξηση ελαστικότητας/απορρόφηση δονήσεων) και στη βάση της σιδηροτροχιάς (προσδίδουν ηλεκτρική μόνωση). Φαίνεται λοιπόν πως για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση ειδικών συστημάτων σύνδεσης σιδηροτροχιάς. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι τα συστήματα Pandrol (Μ.Βρετανία) και Vossloh (Γερμανία). ^{[6],[16]}



Εικόνα 2.3 Σύστημα σταθερής επιδομής με απευθείας στερέωση.



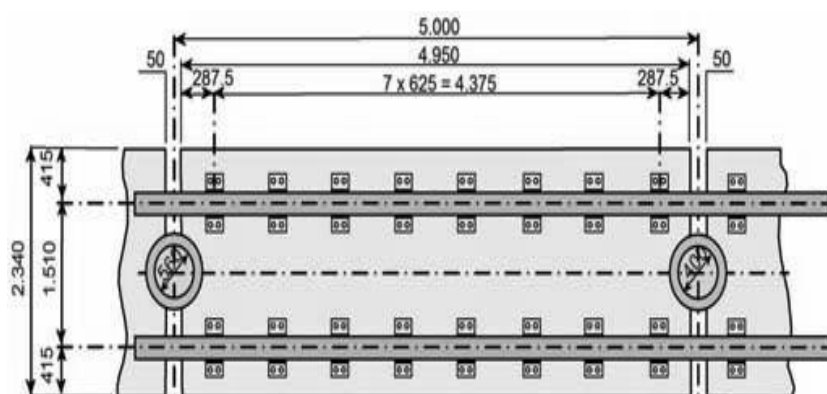
Σχήμα 2.9 Σύστημα σταθερής επιδομής με απευθείας στερέωση. ^[7]

ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΠΛΑΚΕΣ

Η ιδέα για τη χρησιμοποίηση των πλακών προέκυψε προκειμένου να ξεπεραστούν οι επί τόπου δυσκολίες έγχυσης σκυροδέματος που ενδέχεται να παρουσιαστούν, καθώς και μέρος των εργασιών οριστικοποίησης των υψομέτρων των γραμμών της σταθερής επιδομής. Οι προκατασκευασμένες πλάκες κατασκευάζονται σε εργοστάσια και μεταφέρονται στη θέση τοποθέτησής τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι ιδανικότερες συνθήκες για υψηλής ποιότητας κατασκευές. Ακόμα παρέχεται η δυνατότητα προσοχής σε «ευαίσθητα» σημεία της κατασκευής, όπως συνδέσεις, συστήματα οριζοντίωσης κλπ. Στις πλάκες αυτές ενσωματώνονται οι στρωτήρες.

Shinkansen

Το σύστημα Shinkansen αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία και αποτελείται από προκατασκευασμένες πλάκες και στρώμα ασφάλτου-τσιμέντου κάτω από την πλάκα. Οι πλάκες της σταθερής επιδομής είναι από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα ή από προσυμπιεσμένο ενισχυμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 4,93 m x 2,34 m x 0,19 m και πάχους 0,16 m. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται κατάλληλη κυλινδρική σφήνα για την παραλαβή των διαμήκων και εγκάρσιων δυνάμεων και μπλοκ στρωτήρων με ελαστομερές τόσο στη βάση όσο και στις παρειές τους. ^[8]



Σχήμα 2.10 Σύστημα σταθερής επιδομής Shinkansen. ^[5]



Εικόνα 2.4 Σύστημα σταθερής επιδομής Shinkansen.

BogI

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στη Γερμανία το 1977 με σκοπό να δημιουργηθεί ένα σύστημα σταθερής επιδομής υψηλής ποιότητας χωρίς απαιτήσεις συντήρησης και με την υψηλότερη δυνατή διαθεσιμότητα. Ο τύπος αυτός μοιάζει πολύ με το σύστημα Shinkansen, διαφέρει όμως στο ότι το σύστημα BogI είναι φτιαγμένο από ενισχυμένο σκυρόδεμα με ράβδους οπλισμού B55 και έχει πάχος 20 cm, 6,45 m μήκος και 2,55 m ή 2,80 m πλάτος. Στον τύπο αυτό οι στρωτήρες έχουν διαμορφωθεί από το ίδιο σκυρόδεμα της πλάκας σαν εδράσεις των σιδηροτροχιών. Μετά την στρώση των πλακών επί του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου γίνεται οριζοντιογραφική και υψομετρική τακτοποίηση. Οι πλάκες έχουν στο μέσο του άξονα της γραμμής διαμπερείς οπές ανά 2 m έτσι ώστε να πληρωθεί το κενό μεταξύ του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου και των πλακών. Η πλήρωση γίνεται με ρευστό μίγμα ασφαλτοτσιμέντου. ^[8]



Εικόνα 2.5 Σύστημα σταθερής επιδομής BogI. ^[1]

ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ

Στον τύπο αυτό η σιδηροτροχιά δεν συνδέονται με τους στρωτήρες αλλά ενσωματώνεται εντός της πλάκας σκυροδέματος με τη χρήση κατάλληλου ελαστομερούς. Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά εφαρμόστηκε στην περιοχή Deurne της Ολλανδίας και η μελέτη της εφαρμογής της αποκάλυψε ότι μπορεί να αποτελέσει μια πολύ ελκυστική λύση, αφού μπορεί να αποδειχθεί οικονομικά συμφέρουσα καθώς συνδυάζει το μικρό φορτίο με το μικρό κατασκευαστικό ύψος. Το πλεονέκτημα της σχεδόν μηδενικής ανάγκης για συντήρηση είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη καθώς και η καλή συμπεριφορά έναντι θορύβου. ^[8]



Εικόνα 2.6 Σύστημα σταθερής επιδομής με ενσωματωμένες σιδηροτροχιές.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά ορισμένα σιδηροδρομικά έργα στα οποία χρησιμοποιήθηκε το σύστημα της σταθερής επιδομής αντί της κλασικής επιδομής με έρμα.

Πίνακας 2.2 Παραδείγματα γραμμών με σταθερή επιδομή. ^[4]

Γραμμή/σιδηροδρομικό σύστημα	Χώρα	Τύπος σταθερής επιδομής
Shinkansen	Ιαπωνία	Shinkansen
Duerne	Ολλανδία	Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά
Best	Ολλανδία	Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά
Crewe-Kidsgrave	Ηνωμένο Βασίλειο	BBEST Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά
Zuid	Ολλανδία	Rheda 2000
Cologne-Frankfurt	Γερμανία	Rheda Zublin
Hibel & Prestbury Tunnels	Ηνωμένο Βασίλειο	Rheda 2000
Nuremberg-Ingolstadt High Speed Line	Γερμανία	Rheda 2000FF-BogI
Nuremberg-Ingolstadt High Speed Rail	Ταϊβάν	Rheda 2000
Eje Atlantico	Ισπανία	Rheda 2000
Perpignan-Figueras	Ισπανία	Rheda 2000
Guadarrama Tunnel	Ισπανία	Rheda 2000
Beijing-Tianjin Intercity Railway	Κίνα	Rheda 2000
TGV Mediterranee	Γαλλία	Επικαθήμενοι στρωτήρες
Channel Tunnel Rail Link Phase 2	Ηνωμένο Βασίλειο	Επικαθήμενοι στρωτήρες
Gotthard Tunnel	Ελβετία	Επικαθήμενοι στρωτήρες
Αττικό Μετρό	Ελλάδα	Επικαθήμενοι στρωτήρες
Tramway De Grenoble	Γαλλία	Επικαθήμενοι στρωτήρες
Nottingham Express Transit	Ηνωμένο Βασίλειο	Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά
Sheffield Supertram	Ηνωμένο Βασίλειο	Ενσωματωμένη σιδηροτροχιά

Από τα παραπάνω συστήματα θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια το σύστημα RHEDA 2000 με το οποίο κατασκευάστηκε η καινούργια γραμμή των ΗΣΑΠ και το σύστημα STEDEF που χρησιμοποιήθηκε στο μετρό της Αθήνας.

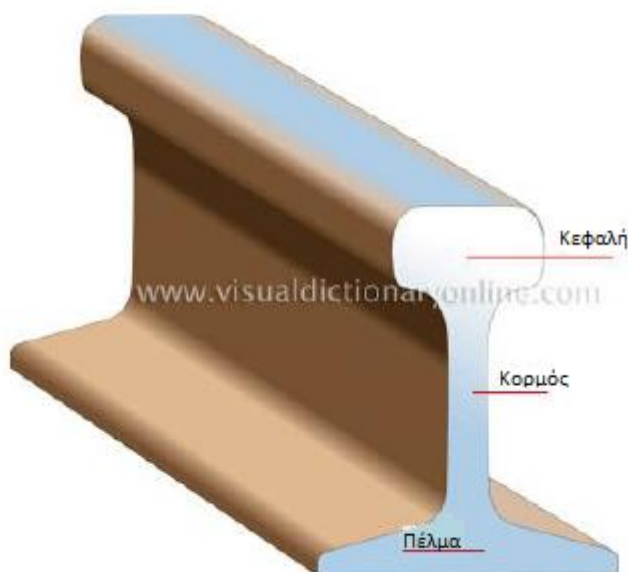
2.4 ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ

Η σιδηροτροχιά είναι στοιχείο της επιδομής που έχει σαν σκοπό να παραλάβει τα φορτία από τους τροχούς και να τα μεταβιβάσει στους στρωτήρες. Ακόμα οφείλει να καθοδηγεί τους τροχούς και να τους προσφέρει μια ομαλή επιφάνεια κύλισης.

Σήμερα, μετά από πολλές διαφοροποιήσεις, η διατομή της σιδηροτροχιάς που επικράτησε και χρησιμοποιείται από όλα τα σιδηροδρομικά δίκτυα είναι η διατομή Vignol, η οποία όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα αποτελείται από το πέλμα, τον κορμό και την κεφαλή. Οι διατομές των σιδηροτροχιών έχουν τυποποιηθεί κατά

UIC. Συνήθης πρακτική στη σιδηροδρομική είναι η χρησιμοποίηση σιδηροτροχιών τύπου UIC 60 (βάρους 60 kg/m) για τις περιπτώσεις χρήσης συστημάτων σταθερής επιδομής. Τύποι όπως ο UIC54 (βάρους 54 kg/m) χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μικρότερων ταχυτήτων και αξονικών φορτίων ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μικρό κατασκευαστικό ύψος. Οι σιδηροτροχιές συνδέονται πλέον μεταξύ τους με συγκολλήσεις και όχι με αμφιδέτες.



Σχήμα 2.11 Διατομή σιδηροτροχιάς ^[15]

ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ

Η μεταβίβαση των δυνάμεων μεταξύ της σιδηροτροχιάς και της πλάκας σκυροδέματος της σταθερής επιδομής γίνεται από τους στρωτήρες, οι οποίοι εξασφαλίζουν ταυτόχρονα τη διατήρηση του εύρους της γραμμής. Οι στρωτήρες έχουν σκοπό:

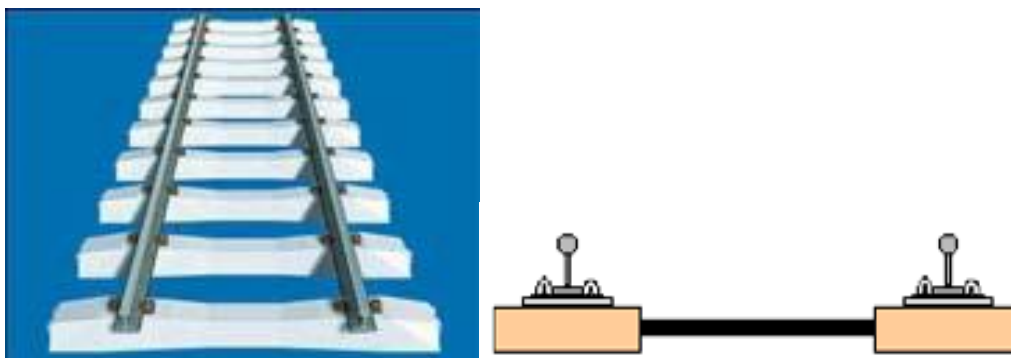
- Να μεταδίδουν τα φορτία από τη σιδηροτροχιά στην πλάκα σκυροδέματος.
- Να διατηρούν σταθερή την εγκάρσια απόσταση των σιδηροτροχιών (εύρος γραμμής).
- Να αποσβένουν τις ταλαντώσεις των σιδηροτροχιών.
- Να μειώνουν τους κραδασμούς και το θόρυβο.

Οι στρωτήρες μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από ξύλο, μέταλλο ή σκυρόδεμα. Σε συστήματα σταθερής επιδομής χρησιμοποιούνται μόνο στρωτήρες από σκυρόδεμα. Υπάρχουν δύο τύποι στρωτήρων από σκυρόδεμα:

- Ο διμερής στρωτήρας που αποτελείται από δύο τραπεζοειδή τμήματα από οπλισμένο σκυρόδεμα που συνδέονται μεταξύ τους με συνδετήρια ράβδο.
- Ο ολόσωμος στρωτήρας από προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Επειδή στο κεντρικό τμήμα οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι μικρές στο τμήμα αυτό μπορεί να γίνει μείωση του υλικού του στρωτήρα. Γι αυτόν το λόγο:

- Στον διμερή στρωτήρα το υλικό του κεντρικού τμήματος αντικαταστάθηκε από τη συνδετήρια ράβδο, που χρησιμεύει για την διατήρηση του εύρους της γραμμής.
- Στον προεντεταμένο στρωτήρα μειώνεται η διατομή στο κεντρικό τμήμα.



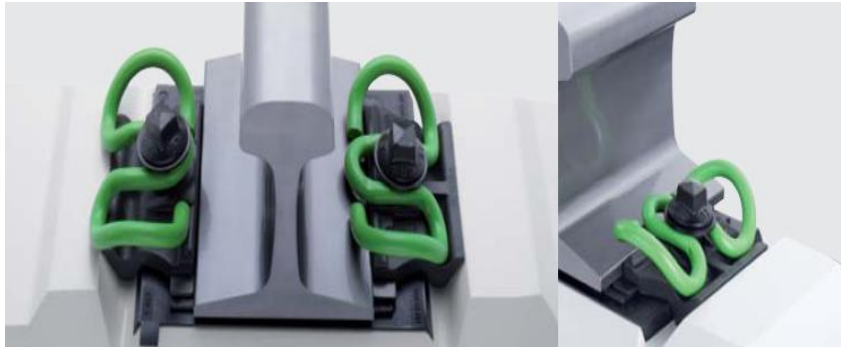
Σχήμα 2.12 Ολόσωμος στρωτήρας (αριστερά) και διμερής στρωτήρας (δεξιά).^[16]

ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

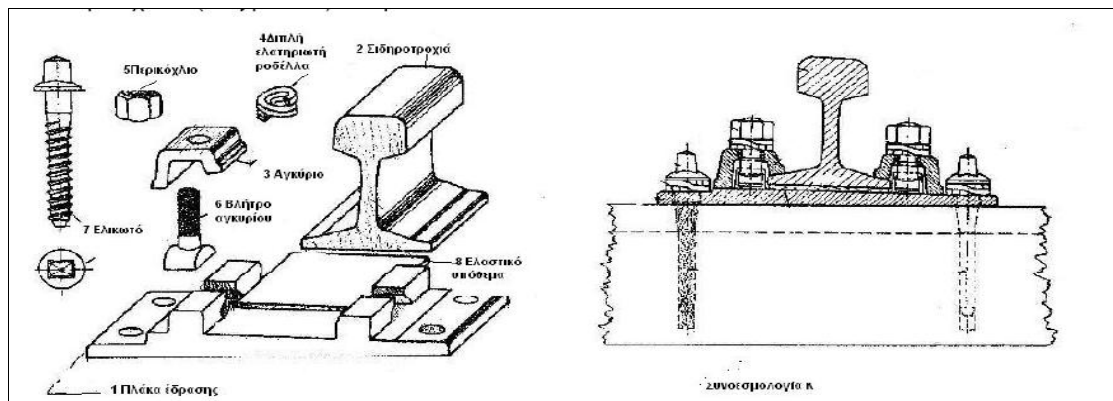
Σύνδεσμοι αποκαλούνται όλα εκείνα τα υλικά, που έχουν σαν αποστολή τη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τον στρωτήρα. Οι σύνδεσμοι επιτελούν ακόμα τις παρακάτω λειτουργίες:

- Διευκολύνουν τη μεταφορά των στατικών και δυναμικών φορτίων των τροχών από τις σιδηροτροχιές στους στρωτήρες.
- Εξασφαλίζουν την σταθερότητα του εύρους της γραμμής και διατηρούν την αρχική κλίση των σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων.
- Αποσβένουν τους κραδασμούς και περιορίζουν το θόρυβο κύλισης.
- Παρέχουν ηλεκτρική μόνωση των δύο σιδηροτροχιών ειδικά στην περίπτωση μεταλλικών στρωτήρων και στρωτήρων σκυροδέματος.

Οι σύνδεσμοι μπορεί να είναι ελαστικοί, ημί-ελαστικοί ή άκαμπτοι. Στους στρωτήρες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται ελαστικοί σύνδεσμοι. Στους συνδέσμους αυτούς όλα ή ορισμένα από τα στοιχεία αγκύρωσης έχουν ελαστικότητα. Οι ελαστικοί σύνδεσμοι υλοποιούν μεταξύ στρωτήρα και σιδηροτροχιάς μία σύνδεση που παρέχει ελαστική αντίσταση στις σχετικές κατακόρυφες μετακινήσεις τους, που διευθύνονται και προς τα άνω και προς τα κάτω και μπορούν να διακριθούν σε συνδέσμους μορφής ελάσματος και συνδέσμους μορφής ελατηρίου.



Σχήμα 2.13 ελαστικός σύνδεσμος μορφής ελατηρίου. ^[13]



Σχήμα 2.14 Ελαστικός σύνδεσμος μορφής ελάσματος. ^[16]

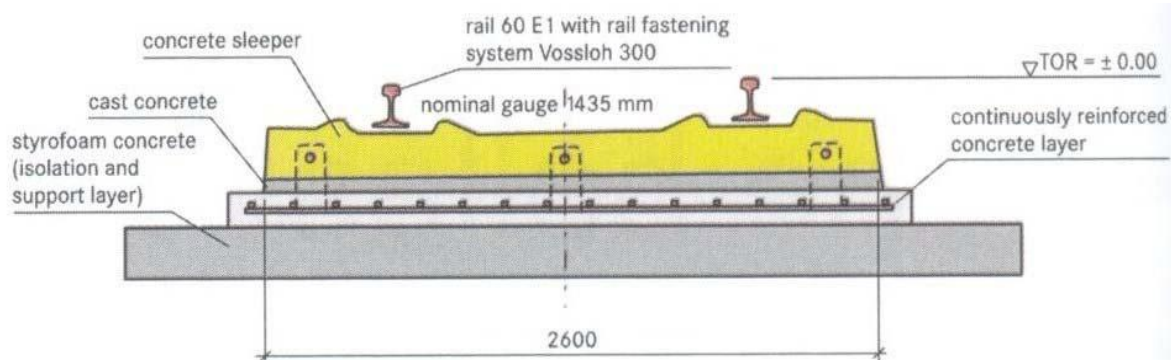
3. Η ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ RHEDA 2000

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα Rheda χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την κατασκευή σταθερής επιδομής το 1974. Πρωτοεμφανίστηκε στη Γερμανία στη γραμμή Bielefeld – Hamm στον σταθμό Rheda και εξελίχθηκε σταδιακά μέχρι σήμερα. Με το σύστημα Rheda έχουν στρωθεί πολλά χιλιόμετρα σταθερής επιδομής σε όλο τον κόσμο μεταξύ των οποίων και η γραμμή στη σήραγγα των Τεμπών, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η Rheda 2000, που αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή της, ικανοποιεί τις αυξημένες απαιτήσεις στις γραμμές υψηλών ταχυτήτων με συχνή κυκλοφορία και παρέχει υψηλά επίπεδα ασφάλειας.

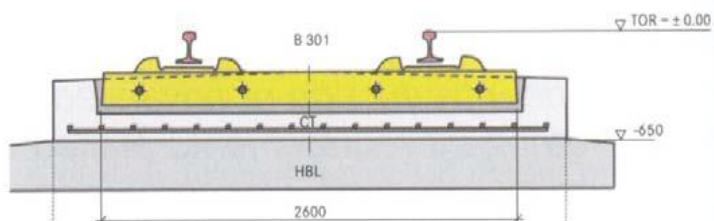
3.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟ RHEDA ΣΕ RHEDA 2000

Η μορφή του συστήματος Rheda περιλάμβανε αρχικά ολόσωμους στρωτήρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, που εδράζονταν σε στρώσεις οπλισμένου σκυροδέματος. Μετά τις πρώτες επιτυχημένες εφαρμογές του κλασικού συστήματος Rheda (1974-1998) οι τεχνικές κατασκευαστικές εταιρίες εξέλιξαν το σύστημα αυτό κυρίως για την διευκόλυνση της κατασκευαστικής διαδικασίας (Rheda – Sengeberg), στο οποίο οι στρωτήρες εδράζονταν σε στρώσεις άοπλου σκυροδέματος. Στη συνέχεια, για την εξασφάλιση αρτιότερης μονολιθικότητας του όλου σώματος της, οριστικοποιήθηκε στην τελική της μορφή με το όνομα Rheda 2000. Το σύστημα Rheda 2000 εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά τον Ιούλιο του 2000 σε ένα τμήμα στη γραμμή υψηλών ταχυτήτων Leipzig-Halle. Η δομή των διάφορων συστημάτων από την κλασική δομή Rheda μέχρι την Rheda 2000 φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

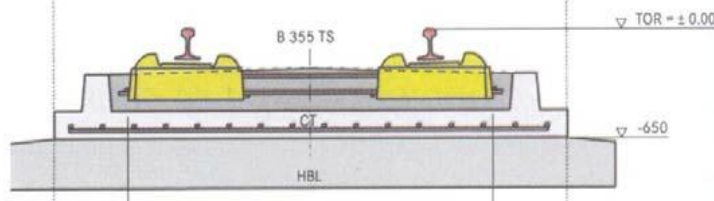


Σχήμα 3.1 Αρχική διατομή συστήματος Rheda. ^[1]

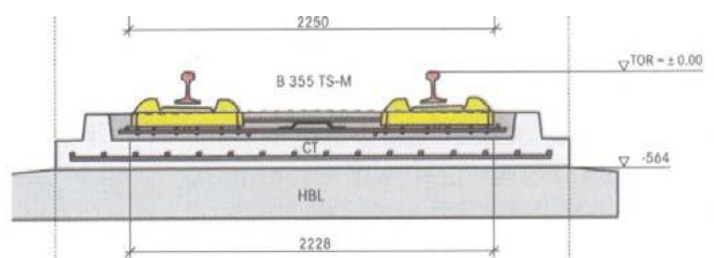
RHEDA (Sengeberg)



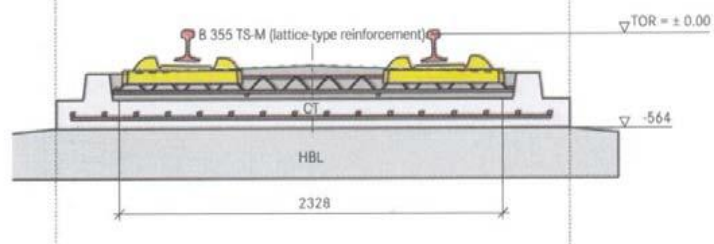
RHEDA-BERLIN HST V1



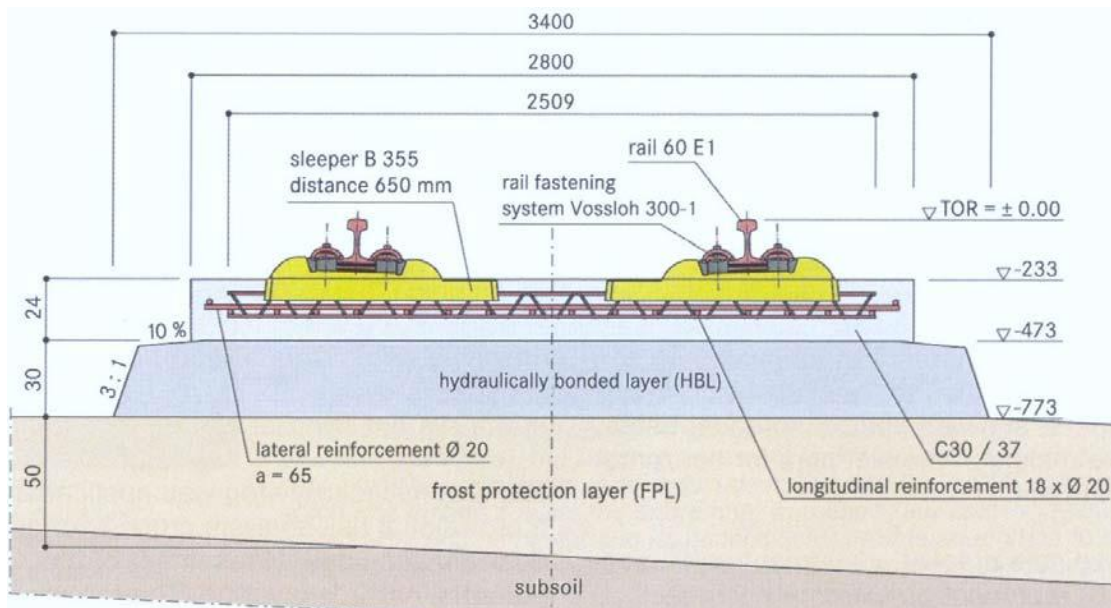
V2



V3



Σχήμα 3.2 Η Εξέλιξη του συστήματος Rheda. ^[1]



Σ.Ε. : $E=34.000 \text{ N/mm}^2$
HBL: $E \geq 5.000 - 10.000 \text{ N/mm}^2$
FPL: $E \geq 120 \text{ N/mm}^2$
ΥΠΕΛΑΦΟΣ: $E > 45 \text{ N/mm}^2$

Σχήμα 3.3 Διατομή Rheda 2000. ^[1]

Η τελική μορφή της διατομής περιλαμβάνει:

- Την αντιπαγετική στρώση [frost protection layer (FPL)] πάχους 50 cm [χαλίκια ή αμμοχάλικα με καλή διαβάθμιση χωρίς (ή με λίγα) λεπτόκοκκα – άμμοι ή χαλικώδεις άμμοι με καλή διαβάθμιση χωρίς (ή με λίγα) λεπτόκοκκα].
- Τη στρώση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (Κ.Θ.Α.) [hydraulically bonded layer (HBL)] πάχους 30 cm.
- Τη φέρουσα πλάκα από σκυρόδεμα C 30/37, που οπλίζεται με διαμήκη οπλισμό (longitudinal reinforcement) 18Φ20 και εγκάρσιο (lateral reinforcement) Φ20/65, πάχους 24 cm. Για κατασκευαστικούς λόγους πρώτα διαστρώνεται σκυρόδεμα ως σκάφη (BTS) και το υπόλοιπο συμπληρώνεται μετά την τοποθέτηση των στρωτήρων.
- Τους διμερείς στρωτήρες (sleeper) από σκυρόδεμα B 355, των οποίων τα μέρη ενώνονται μεταξύ τους με οπλισμό, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερό το εύρος της γραμμής και οι οποίοι εγκιβωτίζονται εν μέρει στο σκυρόδεμα κατά την επί τόπου έγχυσή του.
- Τους ειδικούς ελατηριωτούς συνδέσμους (rail fastening system).
- Τη σιδηροτροχιά (rail), που είναι τουλάχιστον διατομής UIC 60.

Η κατασκευή του συστήματος Rheda 2000 δεν είναι απόλυτα τυποποιημένη. Εξαρτάται από τις ισχύουσες προδιαγραφές των κρατών που εφαρμόζεται. Για το σκοπό αυτό πριν από κάθε εφαρμογή της γίνεται ακριβής μελέτη, ανάλογα με τις επί τούτου συνθήκες, τη φύση του υπεδάφους αλλά και του είδους της κυκλοφορίας (επιβατική, εμπορική, μεικτή). Τέλος, η διατομή της διαφέρει αν εφαρμόζεται μέσα σε σήραγγες, πάνω σε γέφυρες, σε επιχώματα ή αλλού. ^[1]

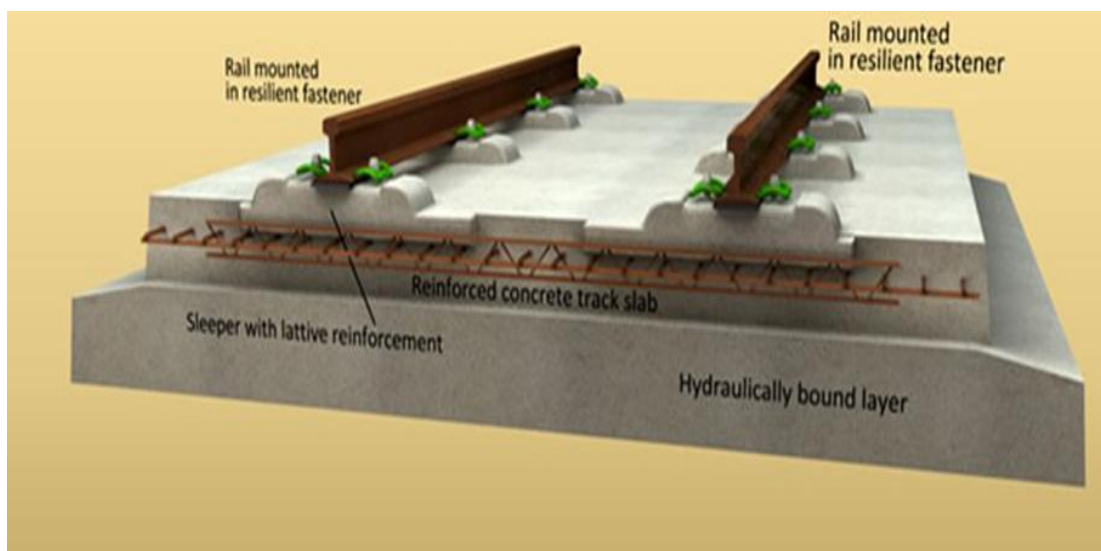


Εικόνα 3.1 Σύστημα σταθερής επιδομής Rheda 2000.

ΣΤΡΩΣΗ ΠΛΑΚΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η στρώση από σκυρόδεμα αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείου φορτίου – διανομής του συστήματος. Δεδομένου ότι είναι επί τόπου χύτευσης μπορεί να προσαρμοστεί χωριστά σε οποιοδήποτε τύπο και σε όλες τις συνθήκες. Η ελάχιστη δύναμη του συγκεκριμένου στρώματος πρέπει να είναι 30/37 MPa (κύβος/κύλινδρος) και το ελάχιστο πάχος της είναι της τάξεως των 16 cm ενώ ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να αυξηθεί.

Η φέρουσα στρώση σκυροδέματος, το οποίο εκχύνεται μετά την τοποθέτηση των διμερών στρωτήρων προβλέπεται οπλισμένη με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, με ποσοστό συνολικού οπλισμού $\rho_s \sim 0,85 \div 0,9\%$. Ο οπλισμός αυτός (όπως και στα άλλα συστήματα σταθερής επιδομής), ο οποίος τίθεται στο μέσο του πάχους της φέρουσας πλάκας έχει σκοπό να εξασφαλίσει ελεύθερη ρηγμάτωση στην πλάκα, με εύρη ρωγμών $\leq 0,5$ mm και απόσταση μεταξύ ρωγμών μικρότερη από 1,5 m περίπου. Η σκυροδέτηση πραγματοποιείται ως συνεχής (δηλαδή χωρίς άλλους αρμούς παρά μόνο αρμούς εργασίας) και ο οπλισμός πρέπει να εξασφαλίζει στατική συνέχεια κατά μήκος. ^{[2], [10]}



Σχήμα 3.4 Στρώση πλάκας σκυροδέματος. ^[16]

ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ B 355

Οι διμερείς αυτοί στρωτήρες παράγονται μαζικά και χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν από όλες τις εταιρείες παραγωγής στρωτήρων. Στη σταθερή επιδομή Rheda 2000 το σύστημα «στρωτήρας- σκυρόδεμα» αποτελεί μια ενιαία μονολιθική φέρουσα στρώση παρέχοντας έτσι ασφάλεια και αξιοπιστία.

Στο σύστημα Rheda 2000 χρησιμοποιούνται διμερείς στρωτήρες, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με οπλισμό τύπου filigran, δηλαδή τρισδιάστατης εσχάρας οπλισμών (δικτυοδοκός), οι οποίοι προεξέχουν από το κάτω πέλμα των δύο επιμέρους σωμάτων από σκυρόδεμα τα οποία συνθέτουν το διμερή στρωτήρα. Οι οπλισμοί αυτοί προεξέχουν και περί τα 7,5 cm στα πλάγια εκάστου επιμέρους σώματος (του διμερή στρωτήρα).

Τα δύο σώματα (του διμερή στρωτήρα) δεν είναι προεντεταμένα, αλλά κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλαρό οπλισμό, ο οποίος παρέχει σταθερότητα στην κατασκευή. Οι στρωτήρες εγκιβωτίζονται εν μέρει στο σκυρόδεμα κατά την επί τόπου έγχυσή του προσφέροντας έτσι μια μονολιθική δομή με το περιβάλλον σκυρόδεμα. [2], [10]

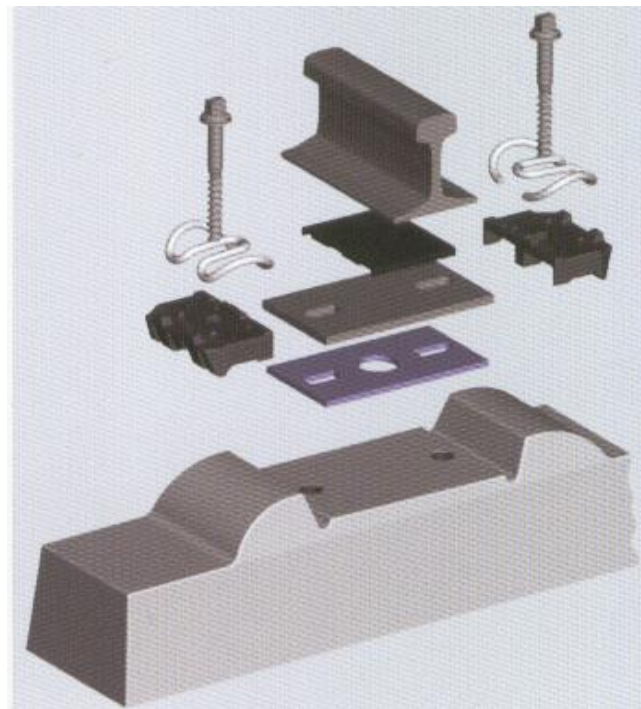


Εικόνα 3.2 Διμερείς στρωτήρες B355.

ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

Οι σιδηροτροχιές συγκρατούνται επί των στρωτήρων με σύνδεσμο τύπου IOARV 300-1 (Σχ. 3.5). Τα κύρια μέρη που αποτελούν το σύστημα πρόσδεσης των σιδηροτροχιών ενός τυπικού συνδέσμου είναι :

- 1) Ελατηριωτό αγκύριο SKL15 ή SKL15B σε περιοχές που απαιτείται μειωμένη δύναμη σύσφιξης.
- 2) Πλαστική υποδοχή κοχλιώσεως από ειδικό πλαστικό Sdü9a.
- 3) Ελικωτά Ss30.
- 4) Ελαστική πλάκα Zw692.
- 5) Μεταλλική πλάκα Grp21.
- 6) Μονωτικά πλακίδια διευθέτησης εύρους Wfp15a.
- 7) Ελαστικό υπόθεμα Zwρ104 με $c_{stat}=22,5 \text{ kN/mm}$ / $c_{dyn}=1,5 \times c_{stat}$.^[18]



Σχήμα 3.5 Σύνδεσμος Ioarv 300-1.^[14]

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000 ^[10]

Όπως προαναφέρθηκε η Rheda 2000 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 2000 στη νέα γραμμή μεταξύ Erfurt και Halle Leipzig με συνολικό μήκος 1000 m και στη συνέχεια εγκαταστάθηκε σε ένα περαιτέρω τμήμα της γραμμής με μήκος 3 km.

Για την κατασκευή της νέας γραμμής υψηλών ταχυτήτων μεταξύ της Κολωνίας και του αεροδρομίου της Φρανκφούρτης αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι διμερείς στρωτήρες που είναι βασισμένοι στη τεχνολογία Rheda 2000. Επιπλέον η Rheda 2000 εφαρμόστηκε και σε ένα τμήμα της γραμμής μεταξύ Νυρεμβέργης και Μονάχου με μήκος 75 km, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2006. Ένα από τα μεγαλύτερα έργα υποδομής σιδηροδρόμων στην Ευρώπη είναι η γραμμή υψηλών ταχυτήτων από το Άμστερνταμ, μέσω του Ρότερνταμ, στα ολλανδικά- βέλγικα σύνορα στο οποίο με εξαίρεση ένα σύντομο τμήμα ολόκληρη η γραμμή με συνολικό μήκος 88 km κατασκευάστηκε με Rheda 2000. Διμερείς στρωτήρες του συστήματος Rheda 2000 εγκαταστάθηκαν και σε μία σήραγγα στη γραμμή από τη Μαδρίτη στο Valladolid στην Ισπανία, ενώ στην ίδια αυτή γραμμή εφαρμόστηκε το σύστημα της Rheda 2000 στη σήραγγα στο San Pedro σε μήκος 12 km. Η γραμμή αυτή είναι σε λειτουργία από το Φεβρουάριο του 2008 με δυνατότητα ταχύτητας έως 350 km/h. Επιπλέον 15 km εγκαταστάθηκαν με Rheda 2000 σε μία σήραγγα στη γραμμή από τη Μαδρίτη στη Βαρκελώνη, η οποία δόθηκε σε κυκλοφορία το Δεκέμβριο του 2007.

Στην Ασία, η Rheda 2000 εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2004 στη νέα γραμμή υψηλών ταχυτήτων Taipei- Kaohsiung στην Ταιβάν. Ακόμα στην Ιαπωνία, οι απαιτητικές περιοχές κοντά στις γραμμές των τρένων κατασκευάστηκαν με το σύστημα Rheda 2000. Τέλος, στη Κίνα σχεδόν ολόκληρη η γραμμή υψηλών ταχυτήτων από το Wuhan στο Guangzhou στη νοτιανατολική Ασία με μήκος 1 km κατασκευάστηκε με το σύστημα Rheda 2000, η οποία εγκαινιάστηκε το 2009 και εφαρμόζονται ταχύτητες έως 350 km/h.

Στην Ελλάδα το σύστημα Rheda 2000 έχει εφαρμοστεί στη σήραγγα των Τεμπών καθώς και στη νέα γραμμή των ΗΣΑΠ.

3.4 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΘΕΣΗ ^[1]

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ

Η στρώση υποστρώματος επιδομής πρέπει να εκπληρώνει τουλάχιστον τις ακόλουθες προϋποθέσεις και να χαρακτηρίζεται από τις κάτωθι τιμές συμπίκνωσης και αντοχής:

- Κατηγορία εδάφους GW, GI, GE, SW, SI (κατά DIN 18196).
[χαλίκια ή αμμοχάλικα με καλή διαβάθμιση χωρίς (ή με λίγα) λεπτόκοκκα – άμμοι ή χαλικώδεις άμμοι με καλή διαβάθμιση χωρίς (ή με λίγα) λεπτόκοκκα]
- Βαθμός συμπίκνωσης DPr 1,00.
- Συντελεστής παραμόρφωσης EV2 $\geq 80 \text{ MN/m}^2$.
- Κλίση από τον άξονα γραμμής προς τα έξω 1:25.

Η σταθερή επιδομή σε επιχώματα αποτελείται από τις μη σταθεροποιημένες φέρουσες στρώσεις (ΜΣΦΣ) της υποδομής και τις σταθεροποιημένες στρώσεις της ανωδομής. Στην ολοκληρωμένη ΜΣΦΣ στρώνεται η στρώση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) με έναν κυλιόμενο ξυλότυπο. Με την κατασκευή αυλακώσεων σε τακτικά διαστήματα επιτυγχάνεται η κατευθυνόμενη ρηγμάτωση της ΚΘΑ.

Από πάνω κατασκευάζεται η χαρακτηριστική για τη μέθοδο αυτή σκάφη Rheda που αποτελείται από μια φέρουσα στρώση από σκυρόδεμα με πλευρικά τοιχώματα. Στη σκάφη αυτή τοποθετούνται οι στρωτήρες και οι σιδηροτροχιές είτε μεμονωμένα είτε σε προμονταρισμένες εσχάρες. Με τη σύνδεση των σιδηροτροχιών στους στρωτήρες δημιουργείται μια ατέρμονη εσχάρα. Μετά την οριζόντια και κάθετη τακτοποίηση της εσχάρας με τη ρύθμιση του άξονα, που υπάρχει σε κάθε δεύτερο στρωτήρα ακολουθεί η τελική σταθεροποίηση, που επιτυγχάνεται με την έγχυση σκυροδέματος στη σκάφη (σκυρόδεμα πλήρωσης). Μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος αυτού συγκολλούνται οι σιδηροτροχιές.

Η φέρουσα πλάκα σκυροδέματος είναι οπλισμένη με κεντρικό οριζόντιο και κάθετο οπλισμό. Ο οπλισμός αυτός πρέπει να είναι τέτοιος που σε περίπτωση ελεύθερης ρηγμάτωσης να επιτρέπει τη δημιουργία ρωγμών περιορισμένου μόνο πλάτους. Η πλάκα σκυροδέματος πρέπει να παρουσιάζει πλήρη συνάφεια με τη στρώση ΚΘΑ.

Για την αποστράγγιση της σταθερής επιδομής πρέπει να κατασκευαστεί στον κεντρικό άξονα της γραμμής ένα ανοιχτό κανάλι αποστράγγισης από σκυρόδεμα όπως επίσης και φρεάτια, καθώς και εγκάρσιοι και συγκεντρωτικοί αγωγοί, με τρόπο που να πληρούνται αποδεδειγμένα οι υδραυλικές απαιτήσεις.

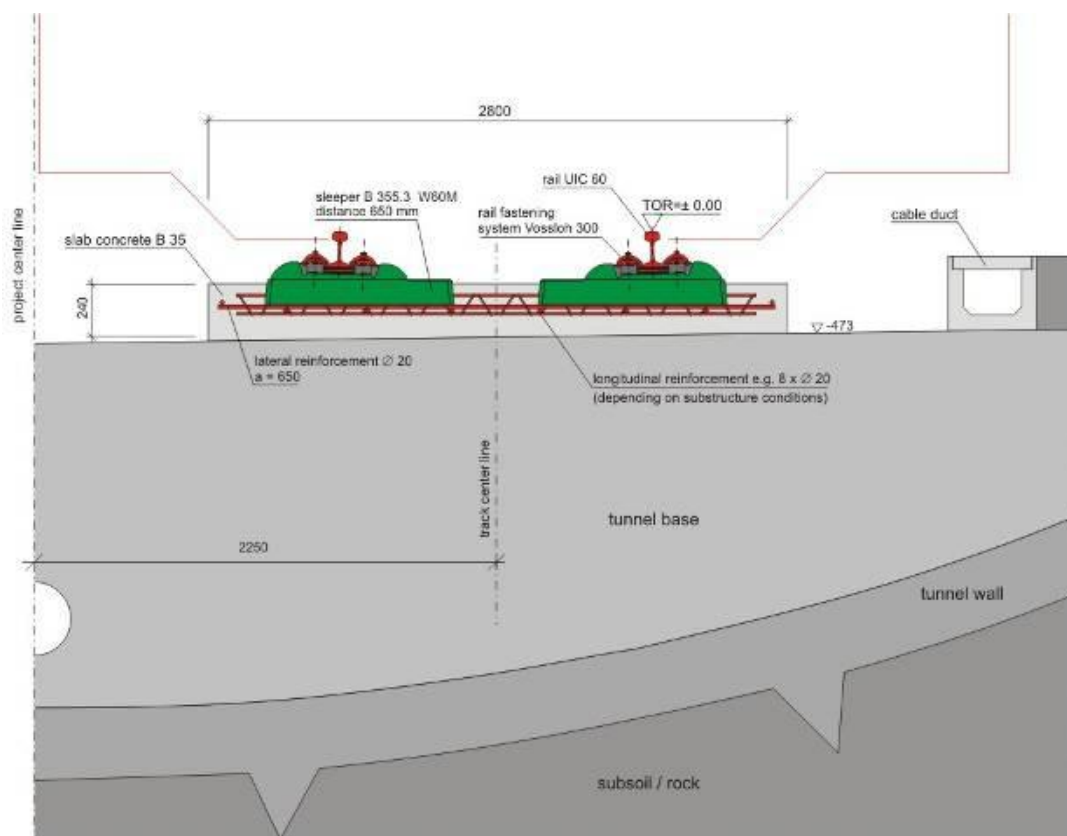
Για προστασία της στρώσης ΚΘΑ η σταθερή επιδομή πλαισιώνεται πλευρικά από σκύρα. Για την ερμάτωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μείγμα κόκκων 30/65 mm.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Ο ανεστραμμένος θόλος του δαπέδου της σήραγγας πρέπει να πληρωθεί και να διαμορφωθεί με σταθεροποιημένο υλικό μέχρι το κάτω όριο της φέρουσας στρώσης σκυροδέματος. Η πλήρωση αυτή μπορεί να γίνει είτε με κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο, είτε με σκυρόδεμα C 16/20. Οι απαιτούμενοι αρμοί του σκυροδέματος πλήρωσης θα πρέπει να κατασκευαστούν σε συμφωνία με τους κατασκευαστικούς αρμούς της σήραγγας. Πάνω στην πλήρωση δαπέδου στρώνεται η φέρουσα στρώση σκυροδέματος.

Οι γεωμετρικές και σχεδιαστικές παράμετροι και η κατασκευή της σταθερής επιδομής στη σήραγγα είναι ανάλογες με τα επιχώματα. Σε μία απόσταση περίπου 1000 m από κάθε είσοδο της σήραγγας (κυρίως σήραγγα) η φέρουσα στρώση σκυροδέματος στρώνεται με οπλισμό ενώ στο υπόλοιπο της σήραγγας δεν τοποθετείται οπλισμός. Στο τμήμα όπου δεν υπάρχει οπλισμός η κατευθυνόμενη δημιουργία ρωγμών επιτυγχάνεται με την κατασκευή σε τακτικά διαστήματα αρμών. Η απόσταση μεταξύ των αρμών επιλέγεται ανάλογα με την απόσταση των αρμών στο σκυρόδεμα πλήρωσης του δαπέδου και τους κατασκευαστικούς αρμούς της σήραγγας.

Η αποστράγγιση των σήραγγων επιτυγχάνεται με έναν διαμήκη αγωγό ο οποίος βρίσκεται στον άξονα της διπλής γραμμής. Τα νερά που μαζεύονται συγκεντρώνονται στην άκρη μεταξύ των γραμμών, και πάνω στην πλήρωση του δαπέδου, και σε τακτικά διαστήματα οδηγούνται με φρεάτια και αγωγούς στην διαμήκη αποστράγγιση της σήραγγας.



Σχήμα 3.6 RHEDA 2000 σε σήραγγες. ^[12]

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

Προετοιμασία των υφιστάμενων τεχνικών των γεφυρών:

Πριν την έναρξη των εργασιών κατασκευής θα υπάρχουν στις γέφυρες μια στεγάνωση από ασφαλτικό υλικό καθώς και μια στρώση από οπλισμένο σκυρόδεμα προστασίας. Πριν την κατασκευή της σταθερής επιδομής θα πρέπει να προηγηθεί η θραύση του σκυροδέματος προστασίας και η πλήρης απομάκρυνση της στεγάνωσης. Κατά τη διαδικασία αυτή θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για να μη προκληθεί βλάβη στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις αποστράγγισης των τεχνικών.

Μετά την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος θα πρέπει να στεγανοποιηθεί η ανωδομή με διπλή στρώση ασφαλτικής στεγάνωσης συμπεριλαμβανομένης της προεπίστρωσης και της τελικής επίστρωσης.

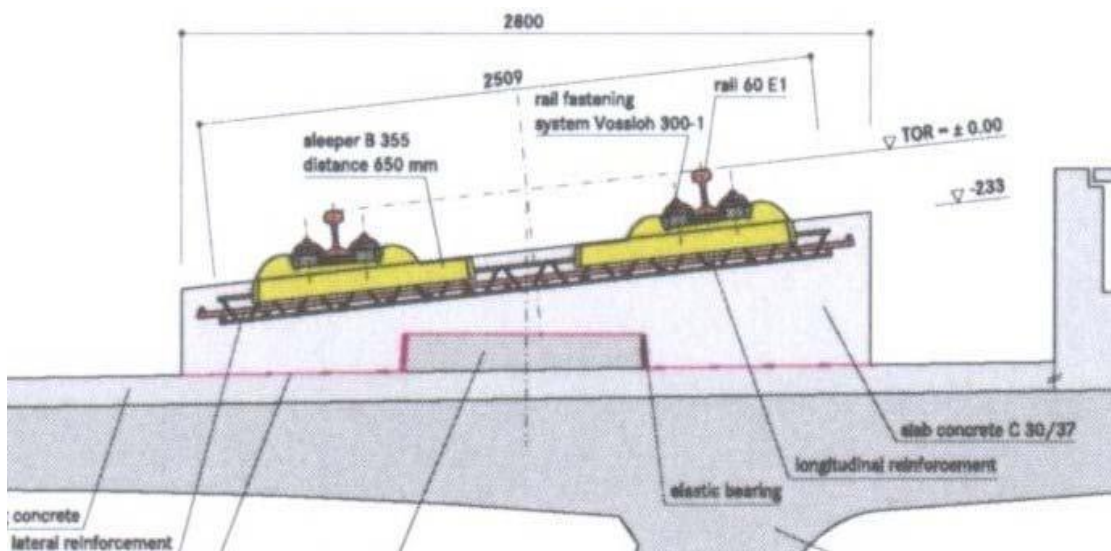
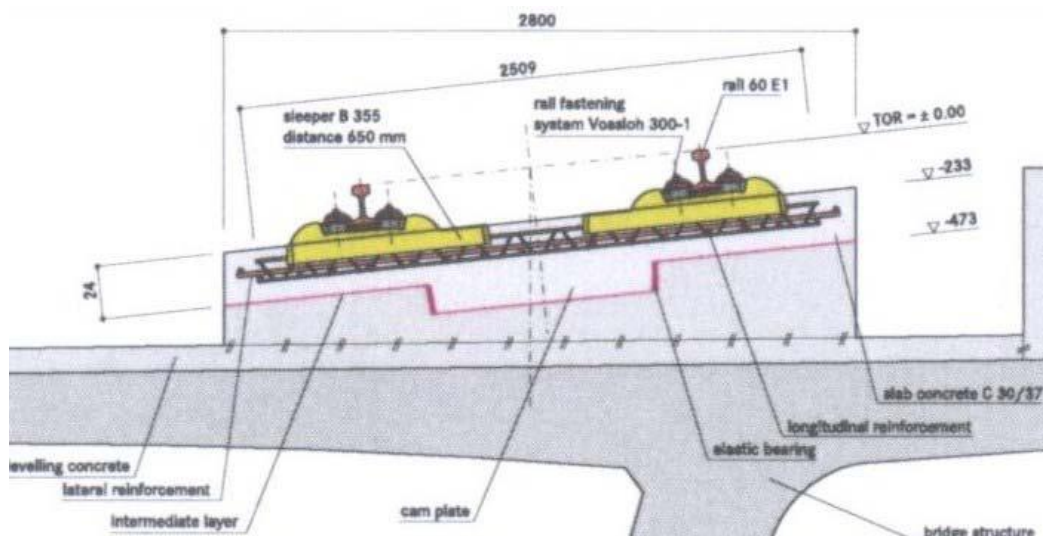
Η σταθερή επιδομή στις γέφυρες αποτελείται από μία οπλισμένη φέρουσα πλάκα στην οποία, στην περιοχή των γραμμών, θα κατασκευαστούν τα πλευρικά στηθαία της σκάφης όπου θα τοποθετηθεί η εσχάρα των σιδηροτροχιών. Η φέρουσα πλάκα και η σκάφη θα κατασκευαστούν μονολιθικά και θα διαμορφωθούν ανάλογα

με την εκάστοτε απαιτούμενη υπερύψωση. Οι σιδηροτροχιές, οι στρωτήρες και το σκυρόδεμα πλήρωσης θα γίνουν σύμφωνα με την παράγραφο «εφαρμογή σε επιχώματα». Η φέρουσα στρώση σκυροδέματος σε γέφυρες αποτελούμενη από την φέρουσα πλάκα και τη σκάφη θα πρέπει να διαθέτει πλέγμα οπλισμού διαστασιολογημένο σύμφωνα με τις κατασκευαστικές και στατικές απαιτήσεις. Επίσης πρέπει να συνδεθεί με το σκυρόδεμα πλήρωσης με τη βοήθεια ράβδων οπλισμού και συνδετήρων σε όλα τα διαστήματα μεταξύ στρωτήρων.

Η οπλισμένη φέρουσα στρώση, συμπεριλαμβανομένης της σκάφης θα κατασκευαστεί κατά τμήματα (μπλοκ) τα οποία θα χωρίζονται σε τακτικά διαστήματα με εγκάρσιους αρμούς. Οι αρμοί αυτοί επιτρέπουν παραμορφώσεις του φορέα χωρίς να επηρεάζεται από ή να επηρεάζει τη σταθερή επιδομή ενώ επιπρόσθετα εξυπηρετούν και την εγκάρσια αποστράγγιση του φορέα. Η στεγάνωση των εγκάρσιων αρμών θα γίνει με λωρίδες (υλικού στεγάνωσης) αρμών. Η αποστράγγιση των γεφυρών θα γίνεται ανάλογα με τις ήδη υφιστάμενες αποστραγγιστικές διατάξεις των τεχνικών στον άξονα της διπλής γραμμής ή/και πλευρικά μεταξύ σκάφης και πλευρικών τοιχείων. Μεταξύ φέρουσας στρώσης και στεγάνωσης του τεχνικού θα κατασκευαστεί μία ελαστική - πλαστική στρώση καθώς και μία στρώση ολίσθησης που θα εξασφαλίζουν τον κατασκευαστικό διαχωρισμό της σταθερής επιδομής από το φορέα καθώς και απρόσκοπτες μεταβολές μήκους συνεπεία των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων.

Η αγκύρωση της σταθερής επιδομής στον φορέα επιτυγχάνεται με δύο διατμητικές κλείδες (stopper) ανά μπλοκ. Για την κατασκευή των stopper θα εκσκαφτούν χειρονακτικά υποδοχές στο σκυρόδεμα κατασκευής των τεχνικών. Κατά τη διαδικασία αυτή θα πρέπει να διατηρηθεί ανέπαφος ο υφιστάμενος οπλισμός και να αποκλειστεί το ενδεχόμενο ζημιάς στους υφιστάμενους τένοντες προέντασης. Στη συνέχεια εισάγεται στις υποδοχές οπλισμένο σκυρόδεμα μέχρι και πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος κατασκευής, που παραλαμβάνει τα διαμήκη και εγκάρσια φορτία από την ανωδομή.

Σε περιπτώσεις γεφυρών όπου αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες κατασκευάζονται οδοντώσεις στο σκυρόδεμα, οι οποίες επικαλύπτονται με πολύ καλή μόνωση.



Σχήμα 3.7 Η Rheda 2000 σε γέφυρα. ^[1]

ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ- ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΜΕ ΕΡΜΑ

Οι μεταβάσεις σταθερής επιδομής – σκυρογραμμής θα κατασκευαστούν σε επιχώματα και σε ευθεία τμήματα της γραμμής ($R = \infty$).

Στις μεταβάσεις γίνεται κόλληση των σκύρων και τοποθέτηση δύο βοηθητικών σιδηροτροχιών (πάνω σε στρωτήρες με τέσσερις οπές για μεγαλύτερη ακαμψία των εσχάρων). Η κατασκευή αυτή επεκτείνεται σε μήκος 36 m μετά το πέρας της σταθερής επιδομής. Η φέρουσα στρώση σκυροδέματος και η στρώση ΚΘΑ συνδέονται στο τέλος των εργασιών, έτσι ώστε να μεταφέρονται αυτούσιες οι ασκούμενες δυνάμεις και να αποκλείονται διαφορικές κατά μήκος κινήσεις. Μεταξύ φέρουσας στρώσης από σκυρόδεμα και σκυροδέματος πλήρωσης τοποθετούνται

συνδετήρες. Το πάχος της στρώσης ΚΘΑ προσαρμόζεται με αυτό της σκυρογραμμής και επεκτείνεται για λίγο και κάτω από τα σκύρα (αυξημένο πάχος ΚΘΑ).



Εικόνα 3.3 Μετάβαση από σκυρογραμμή σε σταθερή επιδομή.

ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑ- ΕΠΙΧΩΜΑ

Στις μεταβάσεις από σήραγγες σε επιχώματα κατασκευάζεται στη σταθερή επιδομή ένας κατασκευαστικός αρμός. Και από τις δύο πλευρές του αρμού συνδέεται η φέρουσα στρώση από σκυρόδεμα με τη στρώση ΚΘΑ ή με την πλήρωση του δαπέδου με διατμητικά βλήτρα έτσι ώστε να μεταφέρονται αυτούσιες όλες οι ασκούμενες δυνάμεις. Επίσης μεταξύ της φέρουσας στρώσης και του σκυροδέματος πλήρωσης και από τις δύο πλευρές τοποθετούνται συνδετήρες, ενώ στο τέλος της σταθερής επιδομής θα κατασκευαστεί μία οπλισμένη διατμητική κλείδα (εγκάρσια δοκός επί του υποστρώματος - stopper).

Στην περιοχή μετάβασης η στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου συμπυκνώνεται μέχρι το δάπεδο θεμελίωσης της σήραγγας.

ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΓΕΦΥΡΑ- ΕΠΙΧΩΜΑ

Στις μεταβάσεις από γέφυρες σε επιχώματα κατασκευάζεται στη σταθερή επιδομή στο τέλος της ανωδομής της γέφυρας ένας ανοιχτός αρμός. Στις περιοχές μετάβασης οι σταθεροποιημένες φέρουσες στρώσεις της σταθερής επιδομής τοποθετούνται απευθείας πάνω στις ήδη υφιστάμενες πλάκες μεταβάσεως.

Η φέρουσα στρώση σκυροδέματος και η στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου περί το πέρας της μεταβατικής περιοχής συνδέονται διατμητικά μεταξύ τους έτσι ώστε να μεταφέρονται αυτούσιες οι ασκούμενες δυνάμεις και να αποκλείονται διαφορικές κατά μήκος κινήσεις. Μεταξύ φέρουσας στρώσης από σκυρόδεμα και σκυροδέματος πλήρωσης τοποθετούνται συνδετήρες, ενώ σε κάθε άκρη της σταθερής επιδομής κατασκευάζεται μία οπλισμένη διατμητική κλείδα (εγκάρσια δοκός επί του υποστρώματος - stopper).

Στην περιοχή μετάβασης η στρώση ΚΘΑ συμπυκνώνεται μέχρι το δάπεδο θεμελίωσης των πλακών μεταβάσεως.

3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000 ΣΤΟΝ ΗΣΑΠ

3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το επιφανειακό δίκτυο των ΗΣΑΠ μήκους περί τα 26 km διπλής γραμμής κατασκευάστηκε με κλασική σκυρογραμμή, κατά κανόνα σε επίχωμα και βρίσκεται σε λειτουργία 140 χρόνια. Η γραμμή διέρχεται από πλήθος γεφυρών πρόσφατης ή μη, κατασκευής.

Η υπάρχουσα γραμμή είναι διπλή, τύπου σκυρογραμμής. Το πάχος του έρματος φαίνεται να είναι της τάξεως των 30 cm (πάνω από την στρώση διαμόρφωσης) και οι στρωτήρες επί των οποίων προσδένονται οι σιδηροτροχιές είναι ξύλινοι AZOBE. Η σύνδεση σιδηροτροχιάς και στρωτήρα πραγματοποιείται με συνδέσμους τύπου Vossloh SKL 12.

Η στρώση διαμόρφωσης, επί επιχώματος κατά κανόνα, προϋπήρχε εδώ και 140 έτη και είχε υποστεί πέραν της αρχικής τεχνικής συμπύκνωσης και την εκ των πραγμάτων συμπύκνωση από την κίνηση των συρμών.



Εικόνα 3.4 Ο ηλεκτρικός σιδηρόδρομος σε τμήμα με σκυρογραμμή.

3.5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΩΝ ΗΣΑΠ

Η ανακαινισμένη γραμμή των ΗΣΑΠ κατασκευάστηκε, όπως προαναφέρθηκε, από το σύστημα σταθερής επιδομής Rheda 2000. Σε κάποια τμήματα όμως της γραμμής αποφασίστηκε η διατήρηση της κλασικής επιδομής. Τέτοια τμήματα είναι αυτά που παρουσιάζουν μεγαλύτερο κίνδυνο για καθιζήσεις, αφού η σταθερή επιδομή είναι πιο ευαίσθητη σε αυτές. Μετά από γεωτεχνικές μελέτες προέκυψε ότι το τμήμα της γραμμής μεταξύ του Πειραιά και της Καλλιθέας είναι ευαίσθητο σε διαφορικές καθιζήσεις και έτσι διατηρήθηκε η επιδομή με έρμα.

Το ίδιο αποφασίστηκε και στις κύριες αλλαγές για οικονομικούς όμως λόγους, αφού ήταν σχετικά καινούργιες και σύγχρονης τεχνολογίας. Στα τμήματα αυτά είναι εγκαταστημένοι ξύλινοι στρωτήρες και μεταξύ αυτών των τμημάτων εφαρμόστηκε σταθερή επιδομή.

Λόγω περιορισμών που επιβάλλονται από το σύστημα σηματοδότησης αποφασίστηκαν οι ακόλουθοι τύποι σταθερής επιδομής:

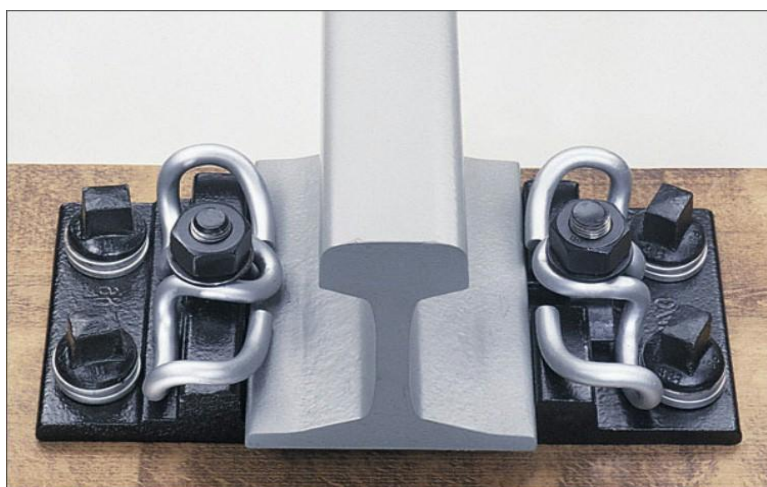
- Εκτός των περιοχών όπου υπάρχουν «εγκατεστημένοι ηλεκτρικοί αρμοί στο δίκτυο» και σε 10 m απόσταση από κάθε ηλεκτρικό αρμό, εφαρμόστηκε σταθερή επιδομή τύπου Rheda 2000, της οποίας η φέρουσα πλάκα είναι οπλισμένη στο μέσο επίπεδό της με διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς με ποσοστό οπλισμού $\rho \cong 0,85\%$.
- Εντός των περιοχών των ηλεκτρικών αρμών, σε απόσταση 10 m από αυτούς, δηλαδή συνολικά 20 m μήκος περίπου σταθερή επιδομή, η

φέρουσα πλάκα της σταθερής επιδομής θα κατασκευαστεί άοπλη, με εφαρμογή «αρμών συστολής» κάθε 3,9 m.

Λόγω μη υπάρξεως όλων των σχετικών δεδομένων για τα χαρακτηριστικά των γεφυρών, οι οποίες είχαν κατασκευαστεί με σκυρογραμμή ήταν πολύ δύσκολο να ελεγχθεί και να τεκμηριωθεί η συμπεριφορά τους, με υποδοχή σταθερής επιδομής, εφ' όσον οι υπάρχουσες γέφυρες είχαν σχεδιασθεί για να φορτιστούν με σκυρογραμμή (εύκαμπτου τύπου σε σχέση με σταθερή επιδομή). Για τους λόγους αυτούς, αποφασίστηκε στις γέφυρες να διατηρηθεί η τεχνολογία της σκυρογραμμής, με αλλαγή στρωτήρων από ξύλινους σε ολόσωμους προεντεταμένους.^[14]

Στα μεταβατικά τμήματα από σταθερή επιδομή σε σκυρογραμμή χρησιμοποιήθηκαν ολόσωμοι προεντεταμένοι στρωτήρες με έδραση τεσσάρων σιδηροτροχιών τύπου B320 και ολόσωμοι προεντεταμένοι στρωτήρες τύπου B320/1 κατάλληλοι για την έδραση της τρίτης ράβδου (ηλεκτροφόρος). Οι σύνδεσμοι για την έδραση των σιδηροτροχιών κυλίσσεως είναι Ioan 300-1, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 3.2, ενώ για τις σιδηροτροχιές στο μέσον του στρωτήρα ο σύνδεσμος είναι KS και αποτελείται από τα κατωτέρω υλικά^[18]:

- 4 Ελατηριωτά αγκύρια SKL12 / SKL 24.
- 4 Βλήτρα TH-Hs 32X55.
- 4 ροδέλες Uls6.
- 4 τρυφώνια Ss8.
- 4 ροδέλες Fe6.
- 2 πλάκες έδρασης Rph.
- 2 ελαστικά υποθέματα ZW.
- 2 μονωτικά ελαστικά πέλματα.



Εικόνα 3.5 Σύνδεσμος KS.

3.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RHEDA 2000 ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ^[14]

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΠΛΑΚΑΣ

Η περίπτωση αυτή εφαρμόζεται σε περιοχές μεταξύ δύο ηλεκτρικών αρμών μέχρι απόσταση 10 m από αυτούς.

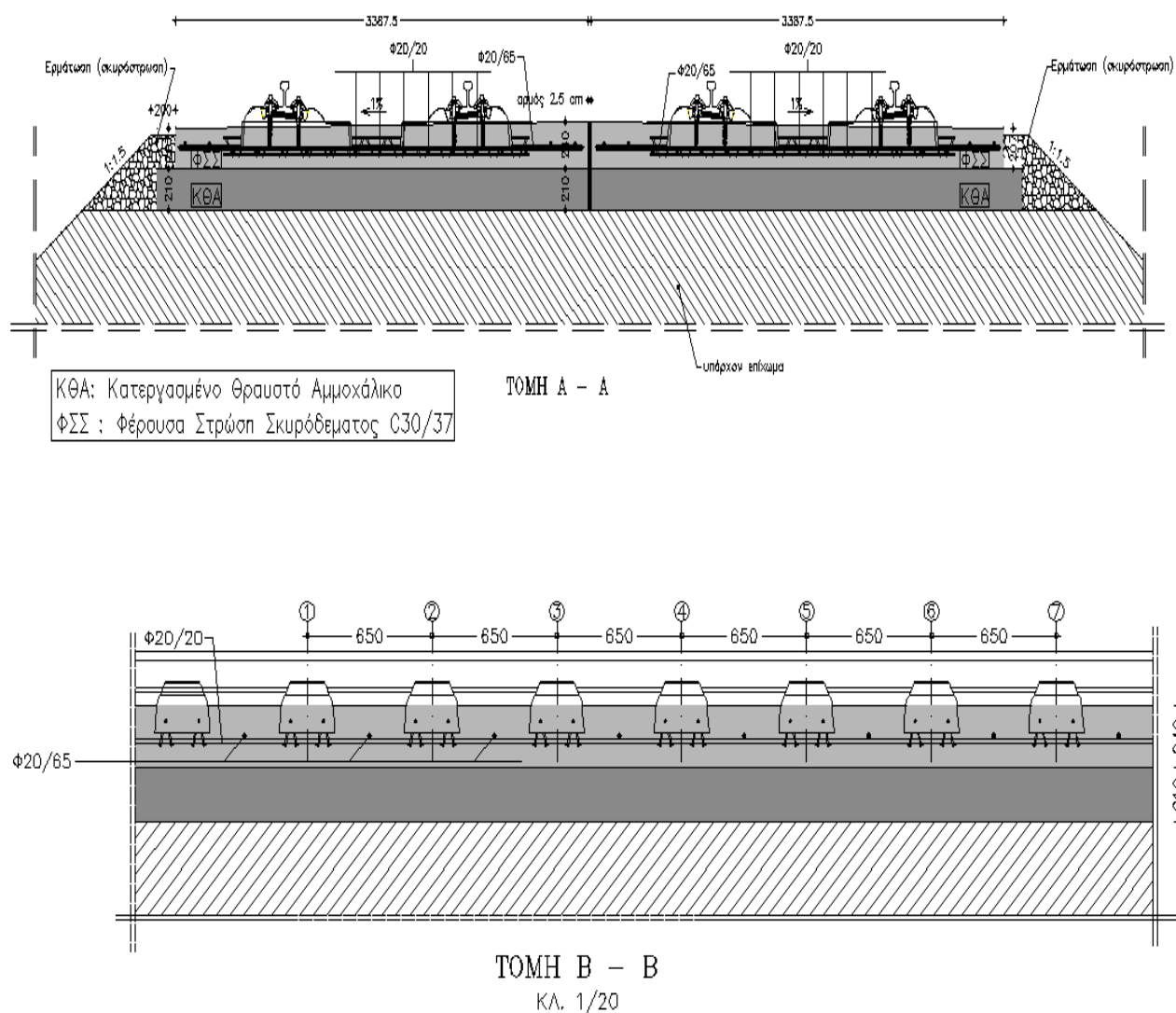
Για την υλοποίηση της σταθερής επιδομής επί της στρώσης διαμόρφωσης του επιχώματος, σκυροδετείται κάτω στρώση από κατεργασμένο με τσιμέντο θραυστό αμμοχάλικο (Κ.Θ.Α.), πάχους 210 mm, η οποία θα διαθέτει μέτρο ελαστικότητας E_c της τάξεως των 5 MPa έως 10 MPa. Εντός εύλογου χρονικού διαστήματος δημιουργούνται αρμοί συστολής ανά 3,90 m.

Μετά την ολοκλήρωση της σκλήρυνσης της στρώσης του Κ.Θ.Α., προβλέπεται επ' αυτής άνω στρώση σκυροδέματος 30/37 μέσου πάχους 223 mm με οπλισμούς στο μέσο επίπεδο της στρώσης, επί της οποίας στρώσεως θα είναι εγκιβωτισμένοι και οι στρωτήρες.

Για τον σκοπό αυτό τοποθετείται αρχικά εσχάρα οπλισμών, διαμήκων Φ20/20 και εγκάρσιων Φ20/65, (το σύνολο των οποίων αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_s = A_s/A_c \approx 0,85\%$), στερεωμένη κατάλληλα στο μέσο επίπεδο της πλάκας.

Ακολούθως τοποθετείται η εσχάρα γραμμής μετά στρωτήρων, ή μεμονωμένοι στρωτήρες (ανάλογα με την κατασκευαστική διαδικασία) οι οποίοι συγκρατούνται καταλλήλως στις πρέπουσες θέσεις ώστε μετά τη σκυροδέτηση να προεξέχει άνω το «προφίλ» του στρωτήρα επί του οποίου συγκρατούνται οι σιδηροτροχιές.

Αφού εξασφαλιστεί η θέση (υψομετρικά και οριζοντιογραφικά) των γραμμών σύμφωνα με την ερυθρά, ακολουθεί η σκυροδέτηση του σκυροδέματος με μέσο πάχος 223 mm και πάχος 240 mm και 207 mm στο μέσο και στο άκρο της εγκάρσιας διατομής αντίστοιχα, ώστε να δημιουργηθεί κλίση 1% για την απορροή στα πλάγια των ομβρίων.



Σχήμα 3.8 Διατομή εκτός ηλεκτρικών αρμών των ΗΣΑΠ. ^[14]

Επειδή το έργο κατασκευάζεται υπό «κυκλοφορία», το σώμα της σταθερής επιδομής σε εγκάρσια έννοια διαχωρίζεται σε δύο διακεκριμένες περιοχές πλάτους 3,4 m περίπου η κάθε μία (βλ. Σχ. 3.8), ανάλογα με τη θέση, έτσι ώστε να εκτελούνται και να ολοκληρώνονται τμήματα μονής γραμμής εύλογου μήκους και να δίνονται στην κυκλοφορία.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΟΠΛΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΠΛΑΚΑΣ

Η περίπτωση αυτή εφαρμόζεται κάθε φορά που συναντώνται 3 ηλεκτρικοί αρμοί, και εκεί η σταθερή επιδομή έχει μήκος περίπου 23 m και εφαρμόζεται η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

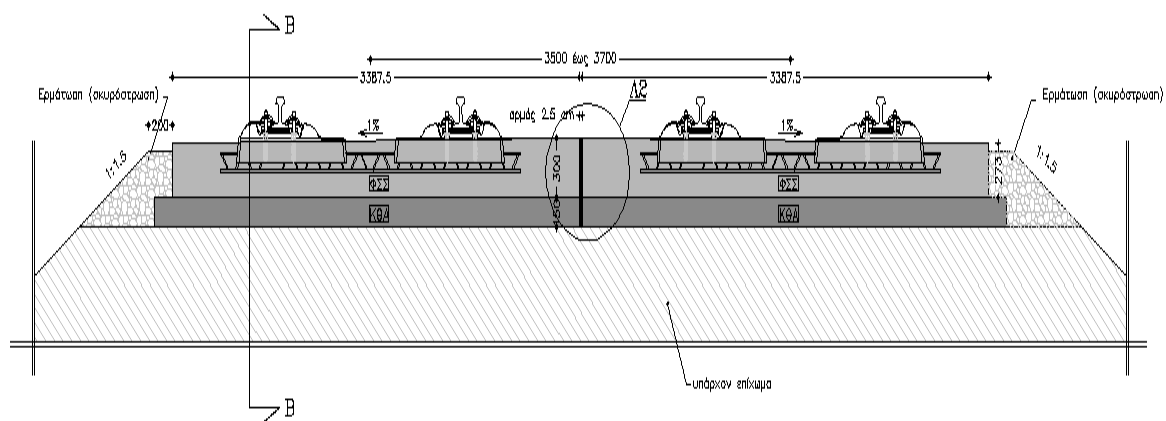
Επί της στρώσης διαμόρφωσης του υποστρώματος σκυροδετείται στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου πάχους 150 mm. Κατά τη σκλήρυνση της στρώσης αυτής και σε εύλογο χρόνο πραγματοποιούνται (με μηχανικά μέσα) εγκάρσιοι αρμοί συστολής ανά 3,9 m, σε βάθος περί το 1/3 του πάχους της στρώσης.

Μετά την ολοκλήρωση της σκλήρυνσης του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου τοποθετείται η εσχάρα γραμμής και στη συνέχεια προσυναρμολογημένοι στρωτήρες ή μεμονωμένοι στρωτήρες (ανάλογα με την κατασκευαστική διαδικασία) οι οποίοι συγκρατούνται στις πρέπουσες θέσεις, δηλαδή σε απόσταση τέτοια από το πάνω πέλμα της στρώσης του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου, ώστε να εξασφαλίζεται η θέση των γραμμών σύμφωνα με την ερυθρά.

Ακολουθεί η έγχυση του σκυροδέματος C30/37 της φέρουσας στρώσης, στην οποία εγκιβωτίζονται οι στρωτήρες. Κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης του σκυροδέματος πραγματοποιούνται στον πρέποντα χρόνο εγκάρσιοι αρμοί συστολής ανά 3,9 m. Οι αρμοί αυτοί πρέπει να είναι κατά περίπου 30 cm μετατοπισμένοι σε σχέση με τους αρμούς που είχαν προηγηθεί στη στρώση του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου ώστε να μη συμπίπτουν απόλυτα μεταξύ τους.

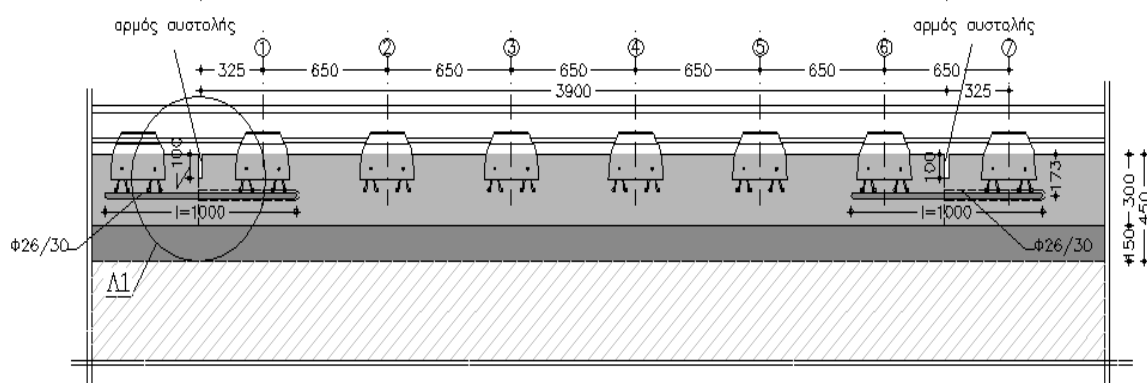
Σε κάθε περίπτωση, σε κάθε θέση αρμού συστολής, θα πρέπει στο μέσο επίπεδο της εγκάρσιας διατομής της φέρουσας άοπλης στρώσης από σκυρόδεμα, να προβλέπονται «βλήτρα» διατεταγμένα οριζοντίως $\Phi 26/30 \times 500$ MPa, συνολικού μήκους 100 cm, εκ των οποίων ράβδων και για κάθε ράβδο, τα 50 cm να βρίσκονται με πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα, ενώ τα υπόλοιπα 50 cm να έχουν «αδρανοποιηθεί» έναντι συνάφειας.

Επειδή το έργο κατασκευάζεται με «παράθυρα κυκλοφορίας» το σώμα της σταθερής επιδομής διαχωρίζεται εγκάρσια, μέσω αρμού απομόνωσης, σε δύο διακεκριμένες περιοχές πλάτους 3,4 m περίπου η κάθε μία (βλ. Σχ. 3.10), έτσι ώστε να εκτελούνται και να ολοκληρώνονται τμήματα μονής γραμμής εύλογου μήκους και να δίδονται στην κυκλοφορία.



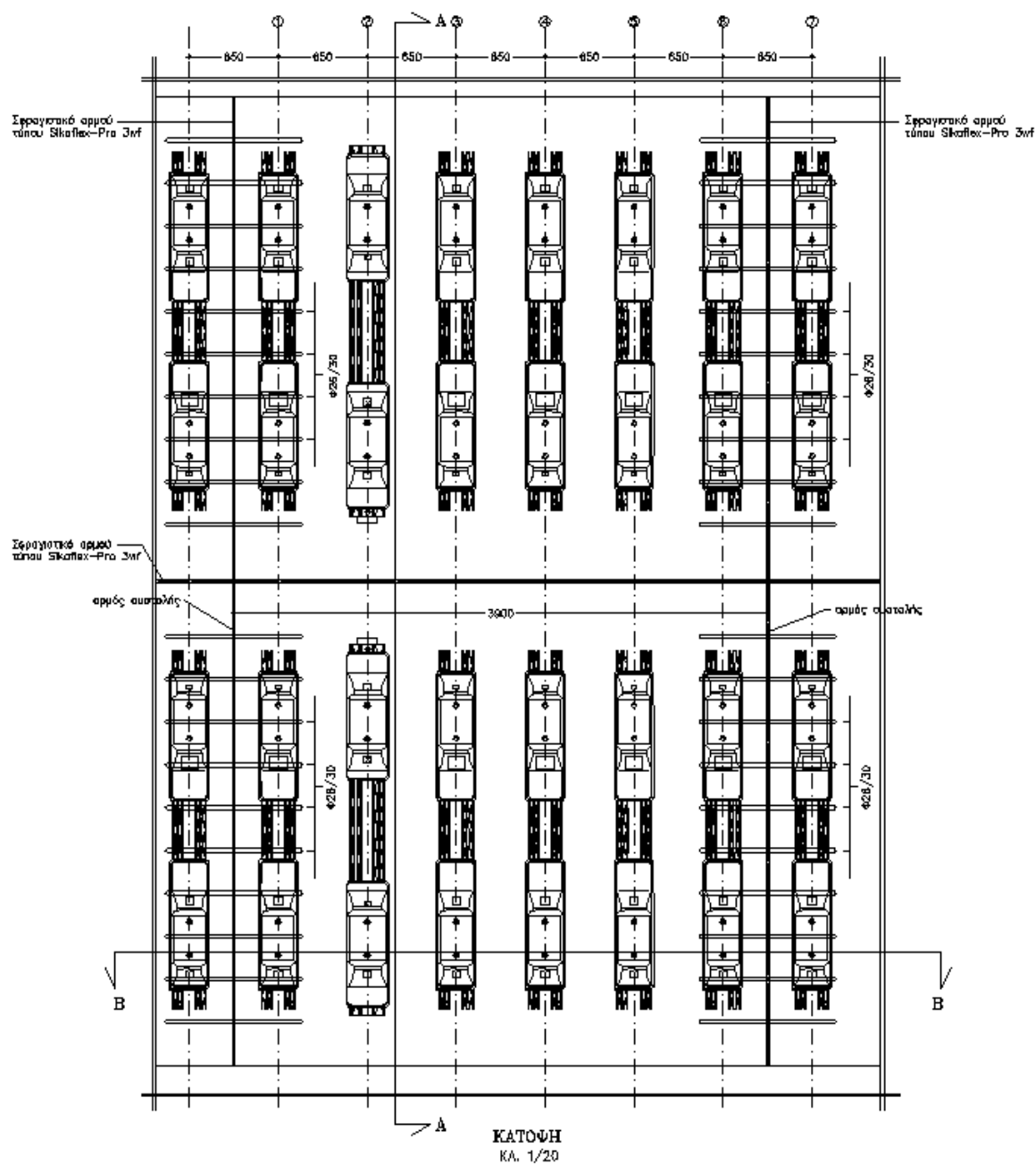
Κ9Α: Κατεργασμένο θραυστό Αμμοκάλκο
ΦΣΣ : Φέρουσα Στρώση Σκυρόδεματος C30/37

ΤΟΜΗ Α - Α
ΚΛ. 1/20



ΤΟΜΗ Β - Β
ΚΛ. 1/20

Σχήμα 3.10 Διατομή εντός ηλεκτρικών αρμών των ΗΣΑΠ. ^[14]



Σχήμα 3.11 Κάτοψη γραμμής εντός ηλεκτρικών αρμών. ^[14]

3.5.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πίνακας 3.1 Γενικά τεχνικά στοιχεία των ΗΣΑΠ.

ΤΜΗΜΑ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΕΠΙΔΟΜΗ		
	ΕΥΡΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΤΡΟΠΟΣ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ
ΚΥΡΙΑ ΓΡΑΜΜΗ	1435	Σταθερή επιδομή RHEDA 2000 οπλισμένη στις περιοχές χωρίς ηλεκτρικούς αρμούς και άοπλη στις περιοχές με ηλεκτρικούς αρμούς.	Συστήματα στερέωσης Ioanv 300 επί διμερών στρωτήρων B355.
ΠΕΙΡΑΙΑΣ – ΚΑΛΛΙΘΕΑ	1435	Έδραση σε έρμα.	Συστήματα στερέωσης επί ολόσωμων προεντεταμένων στρωτήρων.
ΑΛΛΑΓΕΣ	1435	Έδραση σε έρμα.	Συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων.
ΓΕΦΥΡΕΣ	1435	Έδραση σε έρμα.	Συστήματα στερέωσης επί ολόσωμων προεντεταμένων στρωτήρων.
ΜΕΤΑΒΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΣΕ ΣΚΥΡΟΓΡΑΜΜΗ	1435	Έδραση σε έρμα.	Συστήματα στερέωσης επί ολόσωμων προεντεταμένων στρωτήρων. Οι σύνδεσμοι για την έδραση των σιδηροτροχιών κυλίσεως είναι Ioanv 300 και για τις σιδηροτροχιές στο μέσον του στρωτήρα KS.

Συγκεντρωτικά μπορεί να ειπωθεί πως για την κύρια γραμμή του έργου χρησιμοποιήθηκε η σταθερή επιδομή Rheda 2000, με σύστημα στερέωσης τύπου Ioanv 300. Στο τμήμα αυτό η πλάκα σκυροδέματος είναι άοπλη εντός των ηλεκτρικών αρμών και σε απόσταση 10 m από αυτούς, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα είναι οπλισμένη. Οι διαφοροποιήσεις αναφορικά με το είδος της επιδομής ουσιαστικά επικεντρώνονται στα κάτωθι:

- Στο τμήμα Πειραιάς-Καλλιθέα διατηρήθηκε η κλασική επιδομή, λόγω αυξημένου κινδύνου για καθιζήσεις, και χρησιμοποιήθηκε σύστημα στερέωσης επί ολόσωμων προεντεταμένων στρωτήρων. Το ίδιο αποφασίστηκε και στα τμήματα

των γεφυρών, γιατί κρίθηκε δύσκολο να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους με σταθερή επιδομή.

- Στα τμήματα αλλαγών διατηρήθηκε η έδραση με έρμα με ξύλινους στρωτήρες για οικονομικούς λόγους.
- Στα μεταβατικά τμήματα χρησιμοποιήθηκε η επιδομή με έρμα με σύστημα στερέωσης επί ολόσωμων προεντεταμένων στρωτήρων.

Το σύστημα Rheda 2000 είναι ένα πολύ διαδεδομένο σύστημα σταθερής επιδομής και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές γραμμές υψηλών ταχυτήτων. Το είδος αυτό της επιδομής χαρακτηρίζεται από:

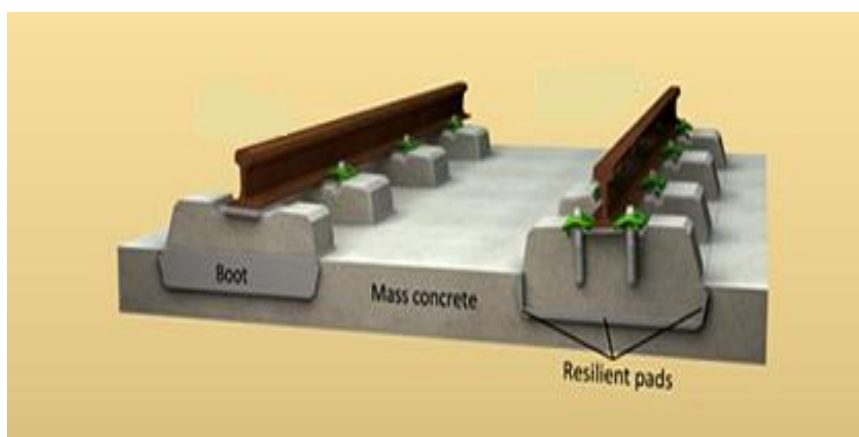
- Ακρίβεια στη γεωμετρία της γραμμής εξαιτίας των προκατασκευασμένων διμερών στρωτήρων.
- Υψηλή ποιότητα κατασκευής λόγω του συνδυασμού των προκατασκευασμένων υλικών από σκυρόδεμα και της στρώσης σκυροδέματος που είναι επί τόπου χύτευσης.
- Εύκολη αντικατάσταση σιδηροτροχιών και ελαστικών υποθεμάτων.
- Αξιοπιστία στον κατασκευαστικό χρόνο λόγω της απλότητας της κατασκευής και της πιθανότητας προσυναρμολογημένων τμημάτων.
- Ευελιξία στην κατασκευή, διαφοροποιήσεις αν εφαρμόζεται μέσα σε σήραγγες, πάνω σε γέφυρες ή επιχώματα.

4. Η ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ STEDEF

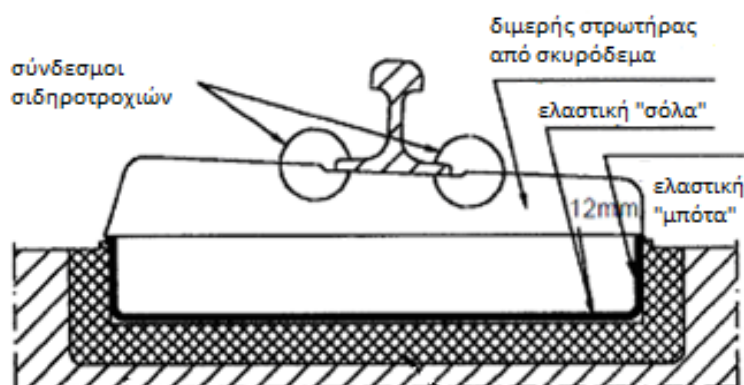
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ STEDEF

Το γαλλικό σύστημα σταθερής επιδομής STEDEF έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί σε σήραγγες και έχει εφαρμοσθεί και στην Ελλάδα στη γραμμή του μετρό της Αθήνας.

Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ελαστομερής βάση ("σόλα") κάτω από τους στρωτήρες, η οποία δίνει υψηλό βαθμό ευκαμψίας και διασφαλίζει υψηλή προστασία έναντι θορύβου και δονήσεων. Ο στρωτήρας και το ελαστικό αυτό υπόθεμα ("σόλα") τοποθετούνται εντός της ελαστικής "μπότας" και το όλο σύστημα σκυροδετείται μέχρι το ύψος της "μπότας".



Εικόνα 4.1 Σύστημα σταθερής επιδομής STEDEF. ^[16]



Σχήμα 4.1 Στρωτήρας με ελαστικό υπόθεμα στη βάση του. ^[16]

Το πρόβλημα αυτού του συστήματος έγκειται στη διάβρωση εξαιτίας του νερού. Το νερό σε πολλές περιπτώσεις εισέρχεται μεταξύ της βάσης του στρωτήρα και του ελαστομερούς και μεταξύ του ελαστομερούς και του σκυροδέματος που το περιβάλλει. Αυτό μπορεί να προκαλέσει την αποσταθεροποίηση της επιδομής καθώς οι στρωτήρες χαλαρώνουν.

Το σύστημα παραδοσιακά χρησιμοποιεί ελαστικούς συνδέσμους τύπου Nabla (Εικ. 4.2).



Εικόνα 4.2 Σύνδεσμος σταθερής επιδομής Nabla.

Η μέθοδος κατασκευής που χρησιμοποιείται είναι η “Top-down”. Στην αρχή η πλάκα-βάση οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετείται με την κατάλληλη διαμόρφωση για την τοποθέτηση των στρωτήρων. Σε δεύτερη φάση τοποθετούνται με τις κατάλληλες ανοχές οι στρωτήρες, οι οποίοι ενσωματώνονται στην κατασκευή.

Το πλεονέκτημα της κατασκευής είναι η σχετικά εύκολη αντικατάσταση πιθανώς φθαρμένων στρωτήρων. Η σιδηροτροχιά αποσυναρμολογείται τοπικά, οι στρωτήρες απομακρύνονται και στη θέση τους τοποθετούνται οι καινούργιοι. Ρυθμίσεις μπορούν να γίνουν τοποθετώντας στρώση ενέματος στη βάση των στρωτήρων. Σε γενικές γραμμές το σύστημα είναι απλό ως προς την κατασκευή και συντηρείται εύκολα. Οι παραπάνω λόγοι το καθιστούν ένα σύστημα σταθερής επιδομής χαμηλού ρίσκου.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ STEDEF ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

4.2.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στα τέλη του 1992 ξεκίνησε η κατασκευή των γραμμών 2 και 3 του μετρό της Αθήνας και τον Ιανουάριο του 2000 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο τμήμα του έργου στις γραμμές αυτές. Σήμερα, οι δύο γραμμές του Μετρό Αθήνας έχουν συνολικό μήκος 51,1 km (συμπεριλαμβανομένων των 20,7 km γραμμής του προαστιακού από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας προς το Αεροδρόμιο) και διαθέτουν 27 σύγχρονους σταθμούς (συν 4 σταθμούς σε κοινή χρήση με τον Προαστιακό). Καθημερινά περίπου 650.000 επιβάτες εξυπηρετούνται από τις γραμμές 2 και 3 του Μετρό, ενώ η γραμμή 1 των ΗΣΑΠ (μήκους 25,6 km με 23 σταθμούς) εξυπηρετεί 415.000 επιβάτες. Το Μετρό της Αθήνας αποτελώντας ένα από τα σημαντικότερα συγκοινωνιακά έργα και το πλέον προσφιλές δημόσιο μέσο μαζικής μεταφοράς στο Λεκανοπέδιο, συνεχίζει να επεκτείνεται με γοργούς ρυθμούς με στόχο τη λειτουργία περίπου 40 km υπόγειου δικτύου.



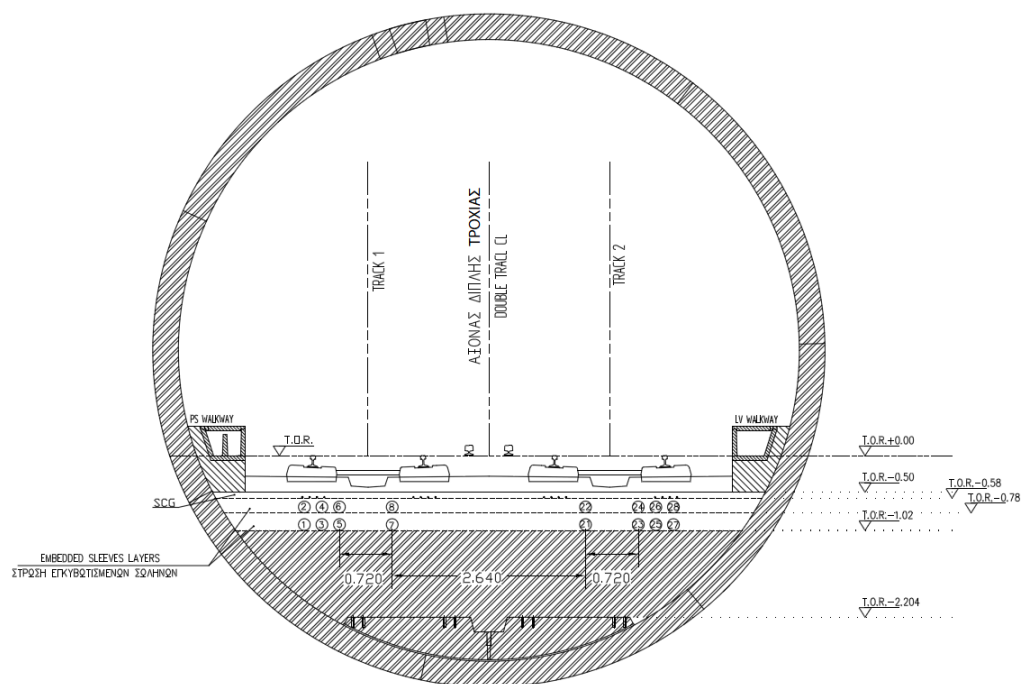
Εικόνα 4.3 Σταθερή επιδομή Stedef στο Αττικό Μετρό.

4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.2.2.1 ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΓΡΑΜΜΗ

Η σιδηροδρομική επιδομή στις σήραγγες σε όλο το μήκος της κύριας γραμμής κατασκευάστηκε με σταθερή επιδομή τύπου Stedef με κλίνη τροχιάς από σκυρόδεμα.

Η γραμμή έχει κανονικό εύρος (1435 mm) και αποτελείται από σιδηροτροχιές προφίλ UIC 54 (Σχ. 4.3), στερεωμένες σε διμερείς στρωτήρες - με μικροκυψελωτά πέλματα και ελαστικά περιβλήματα - ημιεγκιβωτισμένους στο σκυρόδεμα έδρασης (Σχ. 4.2).

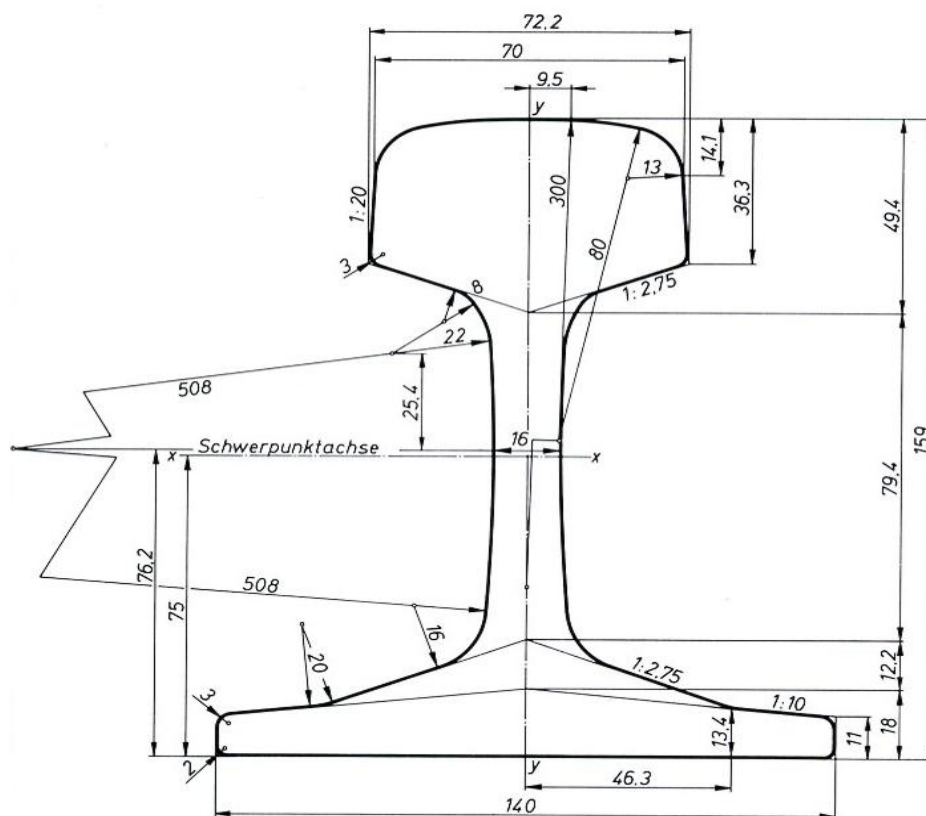


Σχήμα 4.2 Σύστημα επικαθήμενων στρωτήρων Stedef στο μετρό της Αθήνας. ^[16]

Το μικρό ύψος σιδηροτροχιών προφίλ UIC 54 παρέχει καλύτερη εγκάρσια ευστάθεια, βοηθά στη μείωση του συνολικού ύψους της σταθερής επιδομής και συντελεί στην εξοικονόμηση χώρου που είναι κρίσιμος παράγοντας ειδικότερα στις περιπτώσεις υπογείων σιδηροδρόμων. Θα πρέπει να αναφερθεί πως η χρήση

σιδηροτροχιών ελαφρών προφίλ συντελεί στη μείωση του ωφέλιμου φορτίου που ασκείται στο σύστημα έδρασης.

Schiene UIC 54



Technische Daten

Querschnittsfläche	F	=	69,34	cm ²
Gewicht	G	=	54,43	kg/m
Trägheitsmoment	J _x	=	2346,0	cm ⁴
Widerstandsmoment	W _{xK}	=	279,3	cm ³
Widerstandsmoment	W _{xP}	=	312,8	cm ³
Trägheitsmoment	J _y	=	417,5	cm ⁴
Widerstandsmoment	W _{yF}	=	59,6	cm ³
Technische Lieferbedingungen: UIC 860 V und SBB — Anhang v. 25. 2. 1971				

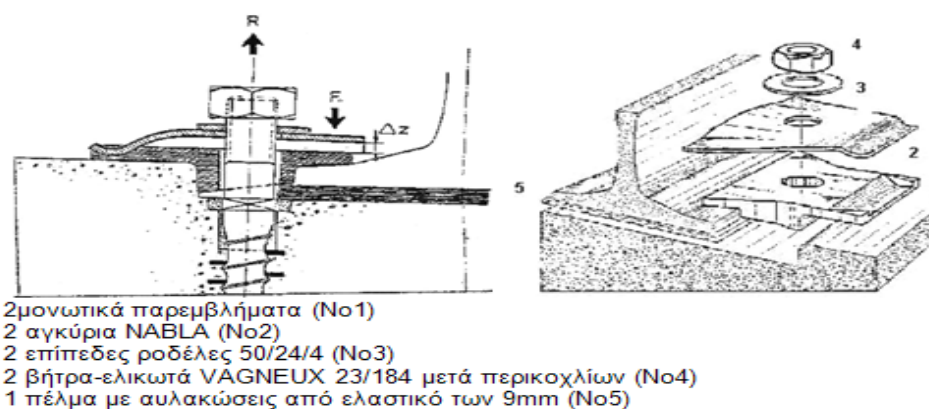
Zulässige Maßabweichungen

für Regel- und verschleißfeste Schienen-	
stahlgüten nach UIC 860 V	
Schienenhöhe	+0,5/ -0,5 mm
Fußbreite	+1,0/ -1,0 mm
Stegdicke	+1,0/ -0,5 mm
Kopfbreite	+0,5/ -0,5 mm
Laschenkammerhöhe	+0,5/ -0,5 mm
nichttolerierete Maße	+0,5/ -0,5 mm

Σχήμα 4.3 Διατομή σιδηροτροχιάς UIC 54 και τεχνικά χαρακτηριστικά της. ^[15]

Στους στρωτήρες είναι επίσης στερεωμένη η ηλεκτροφόρος ράβδος με τα προστατευτικά καλύμματα, μέσω μονωμένων στηριγμάτων. Κάτω από το σκυρόδεμα έδρασης υπάρχει πλέγμα συλλογής ρευμάτων διαφυγής, εγκιβωτισμένο στο σκυρόδεμα πλήρωσης πυθμένα. Στις δύο πλευρές της σήραγγας είναι κατασκευασμένα κανάλια καλωδίων από σκυρόδεμα, που με τα προκατασκευασμένα καλύμματά τους, αποτελούν τους πεζοδιαδρόμους στη σήραγγα. Το σύστημα παραδοσιακά χρησιμοποιεί συνδέσμους στήριξης σιδηροτροχιών τύπου Nabla.

Οι δύο τύποι συνδέσμων που χρησιμοποιούνται στο Αττικό Μετρό είναι οι σύνδεσμοι Nabla και οι σύνδεσμοι Skl 15.



Σχήμα 4.4 Σύνδεσμος Nabla. ^[16]

Στη σταθερή επιδομή για λόγους φθοράς των υλικών και άνεσης των επιβατών πρέπει να αποφεύγεται μια τελείως άκαμπτη συμπεριφορά της γραμμής. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις ενδιάμεσα ελαστικά υποθέματα. Στο Αττικό Μετρό το υπόθεμα είναι μια ελαστική "σόλα" (Εικ. 4.4), η οποία τοποθετείται κάτω από το μπετόν μπλοκ του στρωτήρα, όπου όλο μαζί, στρωτήρας και "σόλα", τοποθετούνται εντός της ελαστικής "μπότας" (Εικ. 4.5). Όλο αυτό το σύστημα σκυροδετείται μέχρι το ύψος της "μπότας".



Εικόνα 4.4 Ελαστική "σόλα".

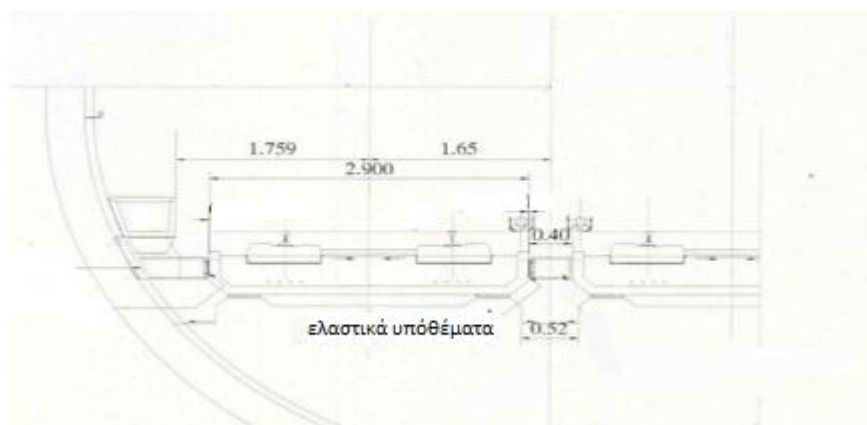


Εικόνα 4.5 Ελαστική "μπότα".

4.2.2.2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Σε περιοχές που η μελέτη θορύβου και δονήσεων έδειξε υπέρβαση των επιπέδων θορύβου τοποθετήθηκε πλωτή πλάκα. Αυτό έγινε κατά κύριο λόγο σε αλλαγές τροχιάς, αλλά και σε απλή γραμμή στις περιοχές του σταθμού Ακρόπολη και στο τμήμα Κεραμικός-Γκάζι. Το μήκος πλωτών πλακών που τοποθετήθηκαν σε αλλαγές και απλές γραμμές είναι γύρω στο 1,5 km γραμμής, δηλαδή 3 km τροχιοσειρών.

Χρησιμοποιήθηκε ασυνεχής πλωτή πλάκα με λωρίδες ελαστομερών. Το συνολικό μήκος της πλωτής πλάκας που κατασκευάστηκε ήταν 184,8 m. Το σύστημα περιλαμβάνει συνεχείς λωρίδες ελαστομερών (2 ανά γραμμή) που τοποθετήθηκαν στο σκυρόδεμα επένδυσης του πυθμένα της σήραγγας. Πάνω σε αυτά τα ελαστομερή τοποθετήθηκαν οι προκατασκευασμένες πλάκες τύπου U. Τα ελαστομερή έχουν διαστάσεις 0,30 m (πλάτος) και 0,035 m ύψος και είναι κατασκευασμένα από Sylomer (λαστιχένιου τύπου υλικό). Τα προκατασκευασμένα στοιχεία έχουν μήκος 1,39 m με αρμούς ανάμεσά τους της τάξης των 0,01 m. Οι στρωτήρες εδράζονται επί υποθεμάτων πάνω στην πλωτή πλάκα. (Σχ. 4.5 , Εικ. 4.6)

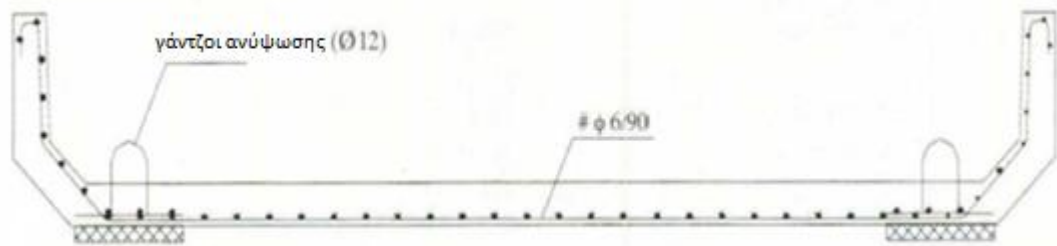


Σχήμα 4.5 Πλωτή πλάκα με συνεχείς λωρίδες ελαστομερών.^[16]



Εικόνα 4.6 Πλωτή πλάκα με συνεχείς λωρίδες ελαστομερών.

Οι λωρίδες ελαστομερών είναι συντηρήσιμες (δυνατότητα αντικατάστασής τους), κάτι το οποίο ήταν τεχνικά εφικτό εξαιτίας της επιλογής της χρήσης προκατασκευασμένων πλακών (οι οποίες και είναι δυνατόν να ανυψωθούν). Τα προκατασκευασμένα στοιχεία συνδέονταν μεταξύ τους κάθε 1,40 m μέσω ειδικών στεγανών συνδέσμων. Αυτού του είδους η συνδεσμολογία επιτρέπει την περιστροφή κατά μήκος της γραμμής και επίσης απαγορεύει τις κατακόρυφες μετακινήσεις. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία ήταν οπλισμένα με πλέγμα διαμέτρου 8 mm κάθε 100 mm και στις δύο κατευθύνσεις. Επίσης 4 γάντζοι τοποθετήθηκαν σε κάθε πλάκα έτσι ώστε μέσω αυτών να γίνεται η ανύψωση των προκατασκευασμένων στοιχείων (Σχ. 4.6).

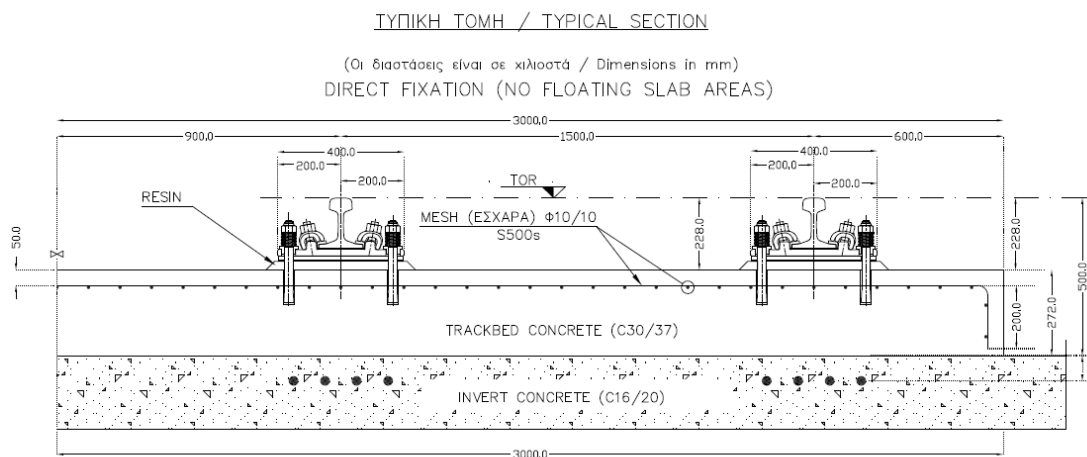


Σχήμα 4.6 Πλωτή πλάκα με συνεχείς λωρίδες ελαστομερών.^[16]

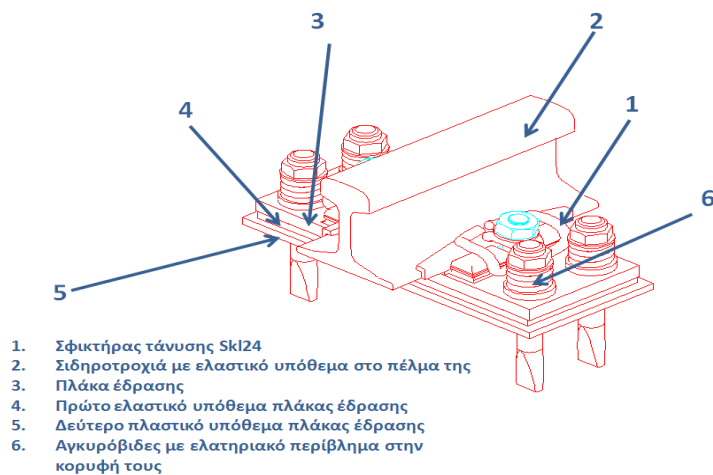
Η συντήρηση των ελαστομερών εκτελείται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα υδραυλικών γρύλων, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε προκαθορισμένες θέσεις κάθε 2,8 m. Ένας αριθμός γρύλων (περίπου 10) χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να ανυψώνουν την πλάκα κατά 6 mm και δημιουργώντας τον κατάλληλο χώρο για την ελευθέρωση, απομάκρυνση και τοποθέτηση νέων ελαστομερών. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην πλωτή πλάκα εξαιτίας αυτής της διαδικασίας συνυπολογίσθηκαν στη μελέτη. Με βάση τις προδιαγραφές η μέγιστη διαφορική μετατόπιση μεταξύ δύο γειτνιαζόντων στρωτήρων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 4 mm. Η επιλογή των υλικών (δυσκαμψία μάζας πλωτής πλάκας) έγινε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται τόσο η ηχητική μόνωση όσο και οι επιτρεπόμενες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Με βάση την ανάλυση της μελέτης προέκυψε κατακόρυφη διαφορική μετατόπιση της τάξης των 1,72 mm και ελαστική παραμόρφωση σιδηροτροχιάς (κατακόρυφη μετατόπιση) της τάξης των 3,5 mm.^{[16],[19]}

4.2.2.3 ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΛΛΑΓΩΝ

Στις γραμμές 2 και 3 συναντώνται συνολικά 47 αλλαγές/διακλαδώσεις γραμμών εκτός της περιοχής του αμαξοστασίου. Οι αλλαγές κύριας γραμμής στο βασικό έργο (στη γραμμή 3, μεταξύ Μοναστηράκι και Εθνική Άμυνα και στη γραμμή 2, μεταξύ Σεπόλια και Δάφνη) είναι με ξύλινους στρωτήρες με ελαστικά πέλματα και περιβλήματα εγκιβωτισμένους στο σκυρόδεμα. Οι υπόλοιποι σχηματισμοί υλοποιήθηκαν με το σύστημα άμεσης στερέωσης σε πλάκα σκυροδέματος (Σχ. 4.7). Το σύστημα άμεσης στερέωσης με συνδέσμους στήριξης τύπου Vossloh 336 (Σχ. 4.8) με το οποίο εγκαταστάθηκαν οι αλλαγές (στις επεκτάσεις) υλοποιήθηκε με τη μέθοδο «bottom up».^{[16],[19]}



Σχήμα 4.7 Απευθείας στήριξη σιδηροτροχιών σε πλάκα σκυροδέματος.^[16]



Σχήμα 4.8 Σύνδεσμοι απευθείας στερέωσης σιδηροτροχιών Vossloh 336.^[16]

Σε ιδιαίτερα "ευαίσθητα" σημεία (πχ. Νέο Μουσείο Ακροπόλεως), λήφθηκαν μέτρα μείωσης θορύβου και δονήσεων. Στις περιοχές αυτές, οι διακλαδώσεις/αλλαγές γραμμών και τα τμήματα απλής γραμμής κατασκευάστηκαν πάνω σε πλωτές πλάκες.^[19]

4.2.2.4 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΩΝ

Στις γραμμές του Αττικό Μετρό υπάρχουν 2 αμαξοστάσια (ένα βασικό στα Σεπόλια και ένα βοηθητικό στον Σταυρό). Η επιδομή των αμαξοστασίων χωρίζεται σε δύο βασικούς τύπους:

- Επιδομή με έρμα με στρωτήρες ξύλινους ή σκυροδέματος στις γραμμές και στις διακλαδώσεις των γραμμών.
- Επιδομή σε σκυρόδεμα στις περιοχές επισκευών και στις περιοχές απόθεσης των συρμών.^[19]

4.2.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Συγκεντρωτικά μπορεί να ειπωθεί ότι για την κύρια γραμμή του έργου χρησιμοποιήθηκε σταθερή επιδομή τύπου Stedef (σταθερή επιδομή με επικαθήμενους στρωτήρες). Οι διαφοροποιήσεις αναφορικά με το είδος της επιδομής ουσιαστικά επικεντρώνονται στα κάτωθι:

- Στις περιοχές των αλλαγών χρησιμοποιήθηκαν συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων σε κλίνη σκυροδέματος (βασική γραμμή), όπως και συστήματα απευθείας στερέωσης (bottom-up method) σε κλίνη σκυροδέματος στις επεκτάσεις του έργου. Στην περιοχή του αμαξοστασίου οι σχηματισμοί γραμμής κατασκευάστηκαν με συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων σε έρμα.
- Σε περιοχές που κρίθηκε σκόπιμο από τη μελέτη θορύβου και δονήσεων χρησιμοποιήθηκε σταθερή επιδομή με χρήση ασυνεχούς πλωτής πλάκας συνεχών λωρίδων ελαστομερών.

Στον πίνακα 4.1 δίνονται συγκεντρωτικά τα βασικά τεχνικά στοιχεία για την κύρια γραμμή, τα τμήματα αλλαγών και το αμαξοστάσιο όπως υλοποιήθηκαν στο μετρό της Αθήνας.

Πίνακας 4.1 Γενικά τεχνικά στοιχεία για το μετρό της Αθήνας.

ΤΜΗΜΑ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΕΠΙΔΟΜΗ			
	ΕΥΡΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΤΡΟΠΟΣ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ	ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΔΟΝΗΣΕΙΣ
ΚΥΡΙΑ ΓΡΑΜΜΗ	1435	Σταθερή επιδομή Stedef.	Συστήματα στήριξης σιδηροτροχιών σε διμερείς στρωτήρες με συνδέσμους Nabla. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική συστήματος πλωτής πλάκας όπου κρίθηκε σκόπιμο.	Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ασυνεχούς πλάκας με λωρίδες ελαστομερών στις περιοχές που κρίθηκε σκόπιμο.
ΑΛΛΑΓΕΣ	1435	Σταθερή επιδομή (Κύρια γραμμή). Έδραση σε έρμα (αμαξοστάσιο).	Συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων σε κλίνη σκυροδέματος (Βασική γραμμή). Συστήματα απευθείας στερέωσης σε κλίνη σκυροδέματος (Υπόλοιπες γραμμές εκτός της βασικής γραμμής, Vossloh 336 bottom-up method). Συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων στις περιπτώσεις έδρασης σε έρμα (Αμαξοστάσιο).	Χρησιμοποιήθηκε η έδραση των σχηματισμών γραμμής σε συστήματα ασυνεχούς πλάκας στις περιπτώσεις που κρίθηκε σκόπιμο κατά μήκος της κύριας γραμμής.
ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ	1435	Έδραση σε έρμα. Σταθερή επιδομή.	Συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα στερέωσης επί ξύλινων στρωτήρων στις περιπτώσεις έδρασης σε έρμα. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν συστήματα απευθείας στερέωσης στις περιπτώσεις σταθερής επιδομής.	Δεν χρησιμοποιήθηκαν συστήματα απομείωσης του θορύβου.

Η επιλογή της τεχνικής λύσης για χρήση του συστήματος Stedef σχετίζεται με την περίοδο της δημοπράτησης του έργου. Στις αρχές της δεκαετίας του 90 η χρήση συστημάτων με επικαθήμενους στρωτήρες ήταν η πιο διαδεδομένη τεχνική στα υπόγεια έργα καθώς χαρακτηρίζονταν από:

- Απλότητα και ταχύτητα κατασκευής.
- Ευκολία αντικατάστασης φθαρμένων στρωτήρων και ελαστομερών στη φάση λειτουργίας του έργου.
- Χαμηλού ρίσκου τόσο κατά τη φάση της κατασκευής όσο και κατά τη φάση της συντήρησης.

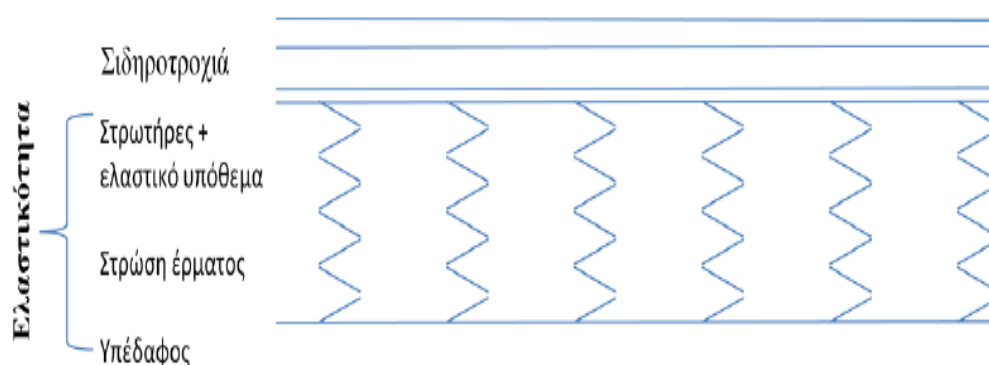
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί πως η τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων σταθερής επιδομής τα τελευταία χρόνια αλλάζει συνεχώς τα δεδομένα για το ποιά είναι η βέλτιστη λύση. Για παράδειγμα την τελευταία δεκαετία κερδίζει πρόσφορο έδαφος στο πεδίο του ανταγωνισμού η χρήση συστημάτων απευθείας στερέωσης με τη χρήση συνδέσμων πχ. Pandrol, Vossloh. Οι μέθοδοι απευθείας στερέωσης είναι ακόμα πιο απλές και γρήγορες στην κατασκευή τους, όπως επίσης πιο εύχρηστες και οικονομικές στη φάση συντήρησής τους.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών, οι οποίες προκαλούνται από την ελαστική έδραση της γραμμής σε σκυρογραμμή και από την επίδραση του τροχαίου υλικού, ο υπολογισμός της επιδομής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα:

- Η μάζα του φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μάζα του φορέα.
- Λόγω ατελειών στη γεωμετρία της γραμμής καθώς και στους άξονες των οχημάτων, η διασπορά των δυναμικών δυνάμεων είναι πολύ μεγάλη. Ως εκ τούτου, η δράση των δυνάμεων εκτιμάται δύσκολα.
- Η στρώση έρματος καθώς και το υπέδαφος, τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση των ελαστικών εδράσεων, μεταβάλλουν τις τιμές τους σε σχετικά σύντομα τμήματα. Συνέπεια τούτου είναι να λαμβάνονται οι μέσες τιμές των παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν.



Σχήμα 5.1 Ελαστική έδραση της γραμμής σε κατακόρυφο επίπεδο.

5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ^[3]

Η επιδομή αποτελεί ένα περίπλοκο σύστημα περισσότερων στρώσεων με τρεις κύριες συνιστώσες : τη σιδηροτροχιά, το στρωτήρα και τη στρώση έρματος.

Κατά τον υπολογισμό, η σιδηροτροχιά θεωρείται δοκός απείρου μήκους επί ελαστικών στηρίξεων. Οι προκύπτουσες τιμές των μεγεθών που υπολογίζονται δείχνουν μια πάρα πολύ καλή συμφωνία με τις τιμές που μετρήθηκαν στην πράξη, παρ' όλες τις απλοποιήσεις που λαμβάνονται στους υπολογισμούς.

Ανάλογα με την ποιότητα της στρώσης του έρματος και του υπεδάφους, καθώς και την ταχύτητα, η επιμέρους ελαστική παραμόρφωση κατανέμεται διαφορετικά. Σε υψηλές ταχύτητες αναλαμβάνει το έρμα περισσότερο από το 70% της ελαστικής παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση εξαρτάται από την κατάσταση του έρματος και τις εδαφικές συνθήκες. Με την πάροδο του χρόνου μπορεί να σχηματιστούν κάτω από μεμονωμένους στρωτήρες κενά (μέχρι 2 mm), έτσι ώστε η έδρασή τους στις θέσεις αυτές να είναι ανύπαρκτη, με συνέπεια τη μεγαλύτερη βύθιση του στρωτήρα κατά την διέλευση του φορτίου.

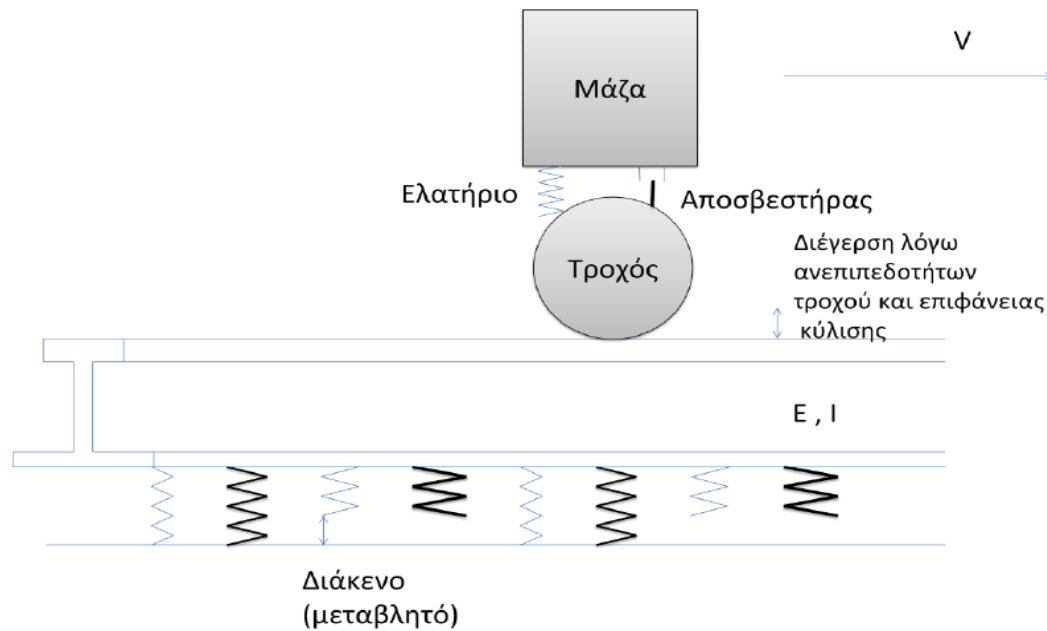
Η φέρουσα ικανότητα της επιδομής εξαρτάται από την επιτρεπόμενη καταπόνηση κάθε στοιχείου και τον τρόπο μετάδοσης της δύναμης από το ένα στο άλλο. Λαμβάνονται υπόψη:

- Η φέρουσα ικανότητα των σιδηροτροχιών σε σχέση με την κατακόρυφη και οριζόντια φόρτιση.
- Η καταπόνηση της σιδηροτροχιάς στη θέση επαφής του τροχού.
- Η μετάδοση των οριζόντιων δυνάμεων καθοδήγησης.
- Η μετάδοση των οριζόντιων κατά μήκος δυνάμεων.
- Η κατανομή της πίεσης μεταξύ σιδηροτροχιών, στρωτήρων, στρώσης έρματος και υπεδάφους.

Κατά μήκος η σιδηροτροχιά λειτουργεί ως δοκός απείρου μήκους. Το μέγεθος της καμπτικής καταπόνησης για δεδομένη φόρτιση εξαρτάται από:

- Τη διατομή της σιδηροτροχιάς.
- Την ελαστικότητα των συνδέσμων.
- Την επιφάνεια έδρασης των στρωτήρων στο έρμα.
- Την υποχωρητικότητα της στρώσης του έρματος.
- Την υποχωρητικότητα του υπεδάφους.

Το πραγματικό σύστημα της επιδομής λαμβάνοντας υπόψη τη διέγερση από το όχημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.2 Μοντέλο υπολογισμού επιδομής (πραγματική κατάσταση).

Όπου: V ταχύτητα οχήματος

m μάζα οχήματος

E μέτρο ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς (σταθερό) = μέτρο αντίστασης ενός στερεού στη μεταβολή του μήκους του

I ροπή αδρανείας της σιδηροτροχιάς (σταθερή)

c, k χαρακτηριστικές ελατηρίου (μεταβλητές)

b πλάτος του ιδανικού διαμήκους στρωτήρα

5.3 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ^[3]

Η σημαντικότερη και πιο συνοπτική μέθοδος για τον υπολογισμό της κατακόρυφης καταπόνησης στο μέσο του πέλματος της σιδηροτροχιάς είναι του Zimmermann. Βασίζεται στη μέθοδο του δείκτη αντίδρασης εδάφους, αντικαθιστώντας την ελαστική σημειακή στήριξη της σιδηροτροχιάς από μια συνεχή ελαστική στήριξη. Αυτό σημαίνει τη μετατροπή των εγκάρσιων στρωτήρων σε έναν

υποθετικό «διαμήκη στρωτήρα» με την παραδοχή της ελαστικής έδρασης της εσχάρας. Αυτή η παραδοχή ισχύει υπό προϋποθέσεις, διότι οι στρωτήρες δεν εδράζονται πλήρως στο έρμα και η σχέση έρματος-υπεδάφους χαρακτηρίζεται από προοδευτική καμπύλη. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός δίνει μόνο μέσες τιμές. Οι μέγιστες τιμές στην πράξη μπορούν να εκτιμηθούν μέσω μιας *in situ* υπολογισμένης σταθεράς, του δείκτη αντίδρασης C .

Με τη σταθερά αυτή περιγράφεται η υποχωρητικότητα όλων των στρώσεων κάτω από τους στρωτήρες. Είναι μια αναλογική σταθερά, η οποία εκφράζει με πόσα N/cm^2 επιτυγχάνεται βύθιση (κατακόρυφη υποχώρηση) του στρωτήρα κατά 1 cm ή η στρώση του έρματος και το υπέδαφος συμπιέζονται κατά 10 mm. Με την παραδοχή πλήρους ελαστικής βύθισης ισχύει ο νόμος του Hook:

$$y = \frac{P}{C} \quad \text{ή} \quad C = \frac{P}{y} \quad (5.1)$$

Όπου: y βύθιση του στρωτήρα στο έρμα (mm)

p πίεση στην επιφάνεια μεταξύ επιφάνειας έδρασης στρωτήρα και έρματος (N/mm^2)

C δείκτης αντίδρασης εδάφους (N/mm^3)

Σημαντικός παράγοντας για τη βύθιση των στρωτήρων είναι η πίεση στην επιφάνεια μεταξύ στρωτήρα και έρματος. Μέσω της αύξησης των επιμέρους επιφανειών έδρασης αμβλύνεται προς το έδαφος η αρχική μεγάλη πίεση στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς.

Για συνήθη επιδομή με έρμα δρα επί της άνω επιφάνειας του στρωτήρα μόνο το 30-40% της δύναμης Q του τροχού. Συνεπώς, λόγω της ικανότητας της σιδηροτροχιάς να κατανέμει το φορτίο επί αυτής, η οποία ικανότητα ενεργοποιείται μέσω της ελαστικότητας της στρώσης έρματος και του υπεδάφους, μειώνεται η δύναμη Q του τροχού κατά 70-60%. Συνήθως για τον υπολογισμό των τάσεων στις επιμέρους διεπιφάνειες χρησιμοποιείται το 50% του στατικού φορτίου του τροχού, εκτός από τη διεπιφάνεια τροχού σιδηροτροχιάς.

Οι τιμές του C εξαρτώνται γενικά από την ποιότητα του υπεδάφους, το είδος του στρωτήρα, καθώς και από την εποχή του έτους. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές του C ανάλογα με το υπέδαφος.

Πίνακας 5.1 Δείκτης αντίδρασης εδάφους σε σχέση με το υπέδαφος.

Δείκτης αντίδρασης εδάφους (μέσες τιμές)	Υπέδαφος
$C=0,02 \text{ N/mm}^3$	Πολύ κακό υπέδαφος
$C=0,05 \text{ N/mm}^3$	Κακό υπέδαφος
$C=0,10-0,20 \text{ N/mm}^3$	Καλό υπέδαφος
$C=0,30-0,60 \text{ N/mm}^3$	Άκαμπτο υπέδαφος

Ο δείκτης αντίδρασης εδάφους C μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη φόρτιση S του στρωτήρα και την αντίστοιχη βύθιση y , όπου ως τιμή εκκίνησης φορτίου είναι το μισό φορτίο του άξονα, λόγω της ιδιότητας της σιδηροτροχιάς να κατανέμει το φορτίο στους γειτονικούς στρωτήρες. Για να είναι οι μετρήσεις στατιστικά ασφαλείς, πρέπει να γίνουν σε 10-12 αντιπροσωπευτικές θέσεις στο υπό διερεύνηση τμήμα γραμμής:

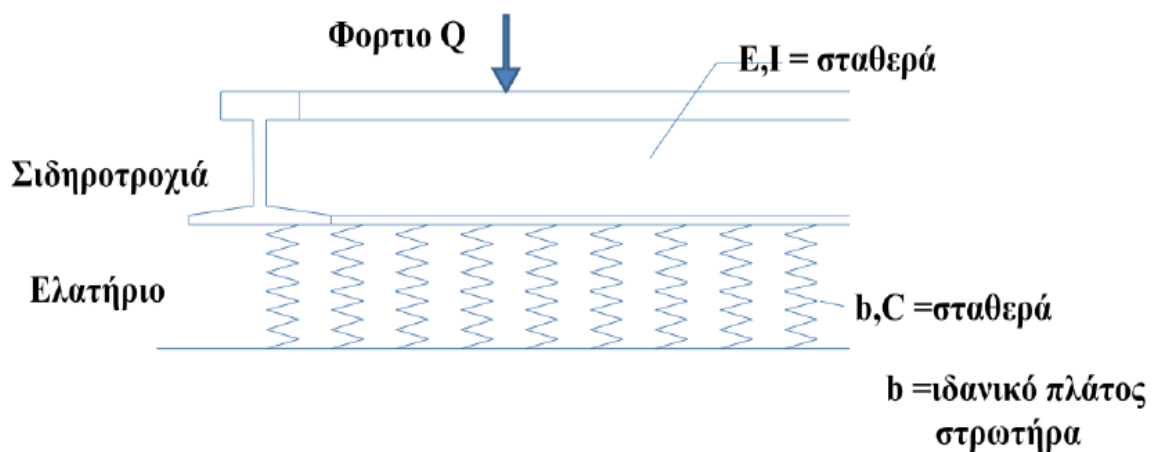
$$C = \frac{p}{y} = \frac{S_s}{a \cdot b \cdot y} \quad (\text{N/mm}^3) \quad (5.2)$$

όπου: S_s αντίδραση στρωτήρα (N)

a απόσταση μεταξύ των στρωτήρων (mm)

5.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΣΤΡΩΤΗΡΑ ^[3]

Η μέθοδος του Zimmermann βασίζεται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο επιδομής, όπως στο παρακάτω σχήμα.

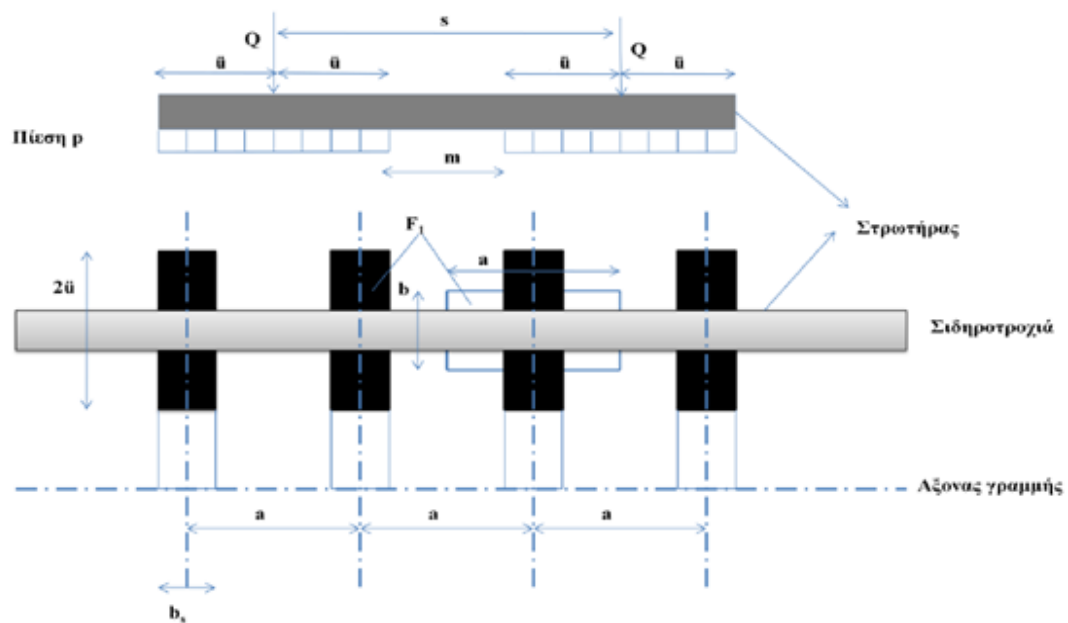


Σχήμα 5.3 Μοντέλο επιδομή Zimmermann.

Ο Zimmermann, βασιζόμενος στην έρευνα του Winkler και χρησιμοποιώντας τη διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής κάμψης, ανέπτυξε μια εξίσωση υπολογισμού της κατακόρυφης καταπόνησης στη μέση του πέλματος της σιδηροτροχιάς από κατακόρυφο φορτίο Q . Συγχρόνως με την εισαγωγή του δείκτη εδάφους C , γίνεται μετατροπή της επιδομής με εγκάρσιους στρωτήρες σε υποθετική επιδομή με κατά μήκος στρωτήρες, με την προϋπόθεση ότι ενεργός επιφάνεια μετάδοσης της πίεσης από το στρωτήρα στο έρμα παραμένει η ίδια. Η βασική ιδέα είναι η εξής:

Επειδή η κάμψη της σιδηροτροχιάς μεταξύ 2 στρωτήρων -σε σχέση με τη συνολική βύθιση εξαιτίας της υποχώρησης της στρώσης του έρματος- είναι ελάχιστη, μπορεί η εγκάρσια στήριξή της να αντικατασταθεί με μία κατά μήκος υποθετική στήριξη.

Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι ο εγκάρσιος στρωτήρας κατανέμει την πίεση ομοιόμορφα σε μήκος $2\bar{u}$ και τη μεταβιβάζει στο έρμα. Αντικαθιστώντας τον εγκάρσιο στρωτήρα πλάτους b_s και μήκους $2\bar{u}$ με ένα τεμάχιο στρωτήρα μήκους όσο η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων a και περιστρέφοντάς το στην κατεύθυνση του άξονα της γραμμής, δημιουργείται μια συνεχής κατά μήκος έδραση της σιδηροτροχιάς (Σχ. 5.4).



Σχήμα 5.4 Μετατροπή της επιδομής με εγκάρσιους στρωτήρες σε επιδομή με υποθετικούς κατά μήκος στρωτήρες.

Όπου:

s Απόσταση μεταξύ των μέσων στη κεφαλή των σιδηροτροχιών (κανονικό εύρος 1500 mm)

Q Φορτίο τροχού (=μισό φορτίο άξονα) (N)

a Απόσταση μεταξύ στρωτήρων (mm)

l Μήκος στρωτήρα (mm)

b_s Πλάτος στρωτήρα (mm)

b Πλάτος ιδανικού στρωτήρα (mm)

m Μεσαίο τμήμα στρωτήρα ελεύθερο έδρασης (mm) (δεν υπογομόνεται)

$\bar{u}$ Απόσταση άξονα σιδηροτροχιάς μέχρι την άκρη (μέτωπο) του στρωτήρα (mm)

$2\bar{u}$ Μήκους ενεργού κάτω επιφάνειας στρωτήρα (mm)

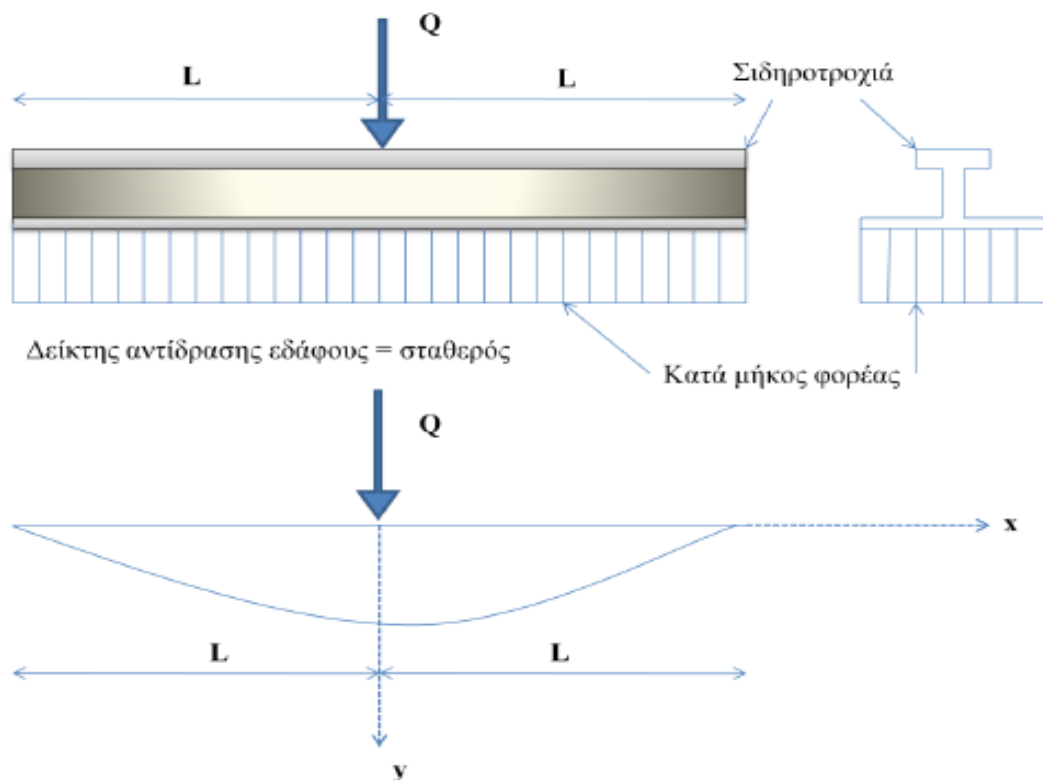
p Πίεση μεταξύ εσχάρας (κάτω επιφάνειας στρωτήρα) και έρματος (N/mm²)

$F_1 = 2 \cdot \bar{u} \cdot b_s$ Ενεργός επιφάνεια στρωτήρα ανά σιδηροτροχιά (mm²)

Από τα στατικά μεγέθη στον φορέα και από τη διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής προκύπτει το ελαστικό μήκος του κατά μήκος φορέα:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} \quad (5.3)$$

Το μήκος L εξαρτάται από τη διατομή της σιδηροτροχιάς, την ενεργό επιφάνεια έδρασης του στρωτήρα, την απόσταση μεταξύ των στρωτήρων και το δείκτη αντίδρασης εδάφους. Πρόκειται για το μήκος έδρασης μιας άκαμπτης σιδηροτροχιάς, επί του οποίου δρα ομοιόμορφα η υποθετική πίεση p δεξιά και αριστερά του φορτίου Q , και μάλιστα έτσι ώστε σε αυτήν την απλή στήριξη να προκύπτουν ίδιες καταπονήσεις όπως και στη στήριξη των εγκάρσιων στρωτήρων.



Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση του ελαστικού μήκους L .

Καθοριστικός στη θεωρία του κατά μήκος στρωτήρα είναι ο παράγοντας ξ ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$\xi = \frac{\chi}{L} \quad (5.4)$$

όπου: χ είναι η απόσταση από τη διερευνούμενη περιοχή σε mm.

Ο παράγοντας ξ υπεισέρχεται στον υπολογισμό των συντελεστών n (χαρακτηρίζει την επιρροή στην κάμψη της γραμμής σε δεδομένη απόσταση από τη

διερευνούμενη διατομή) και μ (χαρακτηρίζει την επιρροή στην καμπτική ροπή σε δεδομένη απόσταση από τη διερευνούμενη περιοχή) ως εξής:

$$n = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) \quad (5.5)$$

$$\mu = e^{-\xi} (\cos \xi - \sin \xi) \quad (5.6)$$

Οπότε η βύθιση και η κάμψη λόγω της επιρροής δίνονται από τους τύπους:

$$y_{\varepsilon\pi} = \frac{Q}{2 \cdot C \cdot b \cdot L} n \quad (5.7)$$

$$M_{\varepsilon\pi} = \frac{Q \cdot L}{4} \mu \quad (5.8)$$

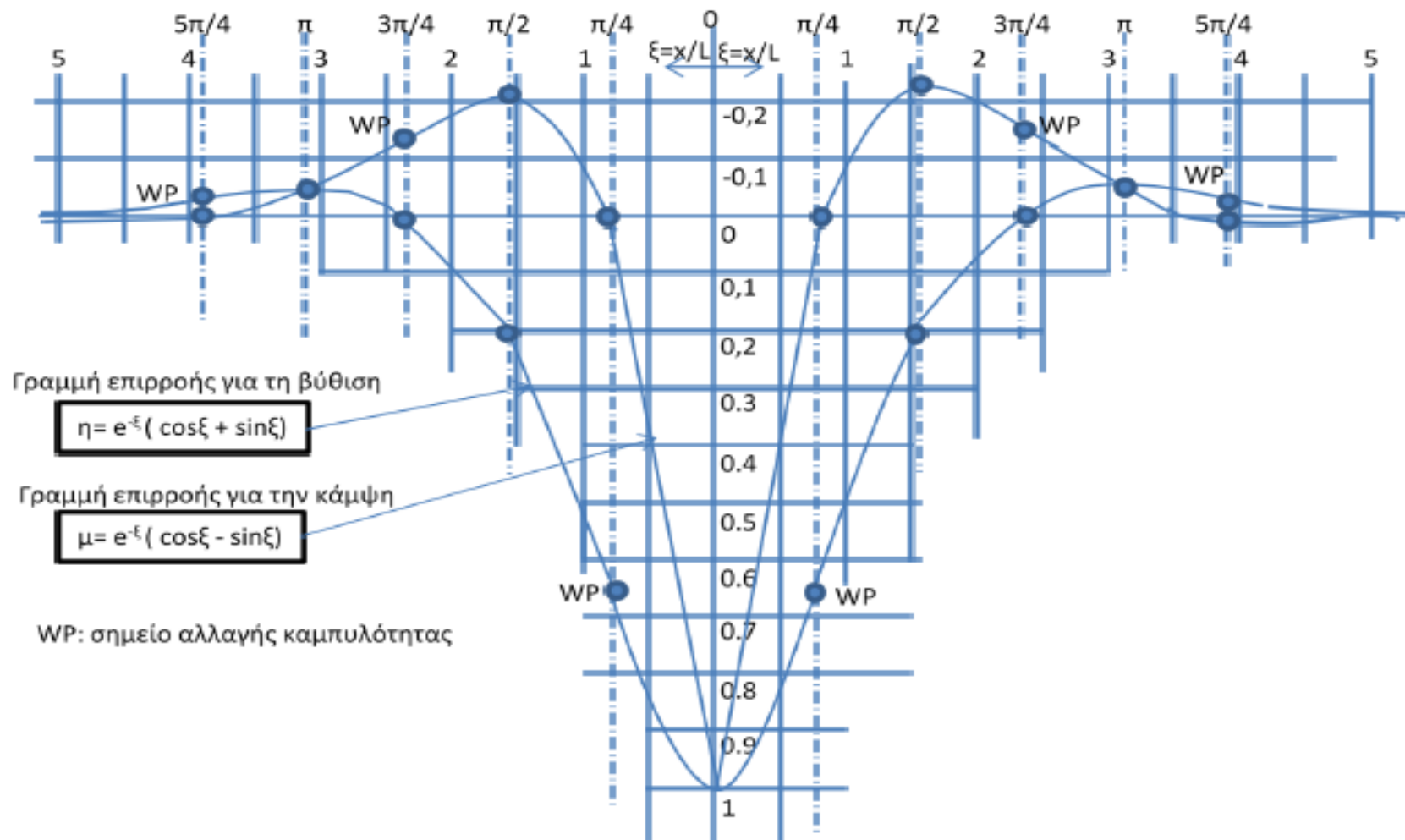
Προς ευχερέστερη χρήση οι τιμές n και μ απεικονίζονται σε γραμμές επιρροής ως συνάρτηση των παραπάνω εξισώσεων (Σχ. 5.6).

Η γραμμή κάμψης από το φορτίο ενός τροχού εκτείνεται στην πραγματικότητα σε περισσότερους στρωτήρες. Όταν οι τροχοί απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους (φορεία), αλληλεπικαλύπτονται οι γραμμές κάμψης και προκαλείται ομοιόμορφη βύθιση της σιδηροτροχιάς, με αποτέλεσμα τη μείωση κατά 5-10% της καμπτικής τάσης. Η αλληλοεπικάλυψη των περιοχών επιρροής όταν το φορτίο είναι ίδιο σε όλους τους τροχούς λαμβάνεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} 1 + \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} n_1 + \dots + \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} n_{v-1} \quad (5.9)$$

$$M = \frac{Q \cdot L}{4} 1 + \frac{Q \cdot L}{4} \mu_1 + \dots + \frac{Q \cdot L}{4} \mu_{v-1} \quad (5.10)$$

όπου v : ο αριθμός των φορείων



Σχήμα 5.6 Γραμμές επιρροής για τη βύθιση και την κάμψη.

5.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c - ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ C

Η σχέση του δείκτη συντελεστή ελατηρίου c με το δείκτη αντίδρασης εδάφους δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c = \frac{C \cdot F}{2} = \frac{S_s}{y} \quad (\text{N/mm}) \quad (5.11)$$

Όπου:

F συνολική ενεργός επιφάνεια έδρασης στρωτήρα (mm^2)

S_s δύναμη που δρα επί του συνδέσμου της σιδηροτροχιάς (αντίδραση στρωτήρα) (N)

y αντίστοιχη κάμψη / βύθιση εξαιτίας της S_s

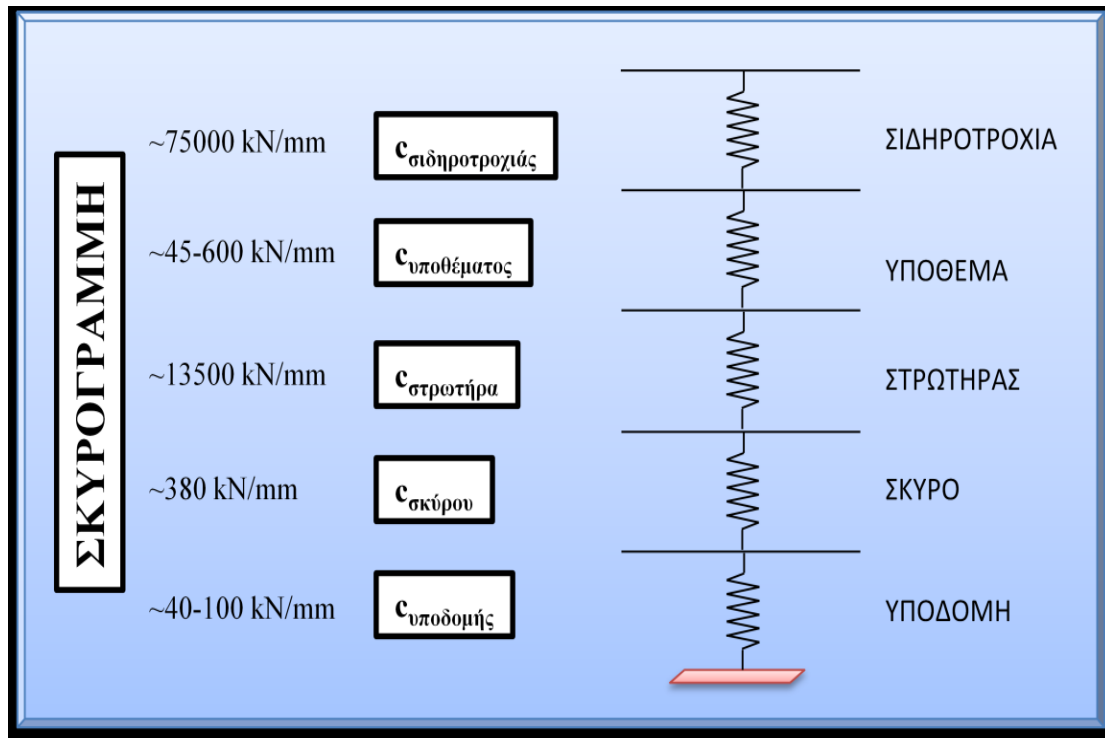
Ο συντελεστής ελατηρίου c επιτρέπει την άμεση σύγκριση των ακαμψιών διάφορων συστημάτων επιδομής. Στην περίπτωση συστημάτων επιδομής με περισσότερες ελαστικές στρώσεις ο συνολικός δείκτης ελατηρίου υπολογίζεται ως

εξής:
$$\frac{1}{c_{\text{συν}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots \quad (5.12)$$

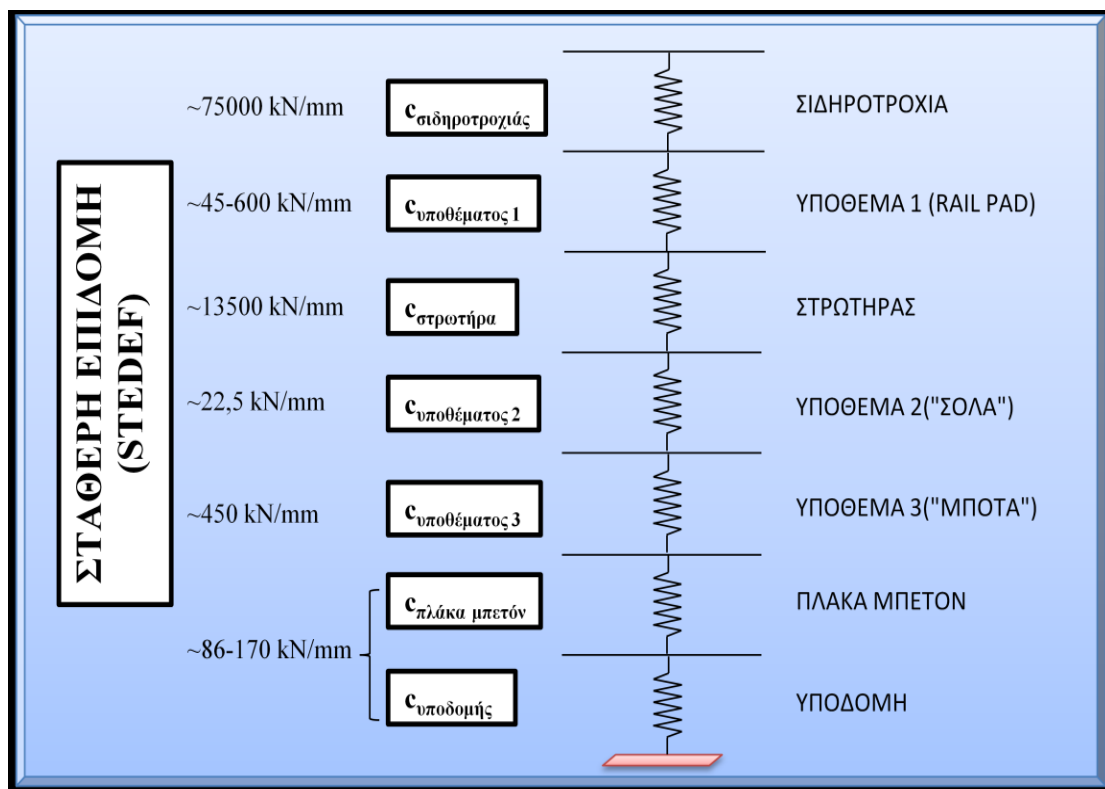
Η εμπειρία των γερμανικών σιδηροδρόμων έχει δείξει ότι ο δείκτης αντίδρασης εδάφους $C = 0,10 - 0,15 \text{ N/mm}^3$ εξασφαλίζει πολύ καλές συνθήκες ελαστικότητας, ακόμη και σε κυκλοφορία βαρέων εμπορικών συρμών. Στόχος είναι η προστασία του έρματος. Για αποφυγή υπερκαταπονήσεων των ενδιαμέσων ελαστικών υποθεμάτων, η τιμή του συντελεστή ελατηρίου c πρέπει να κυμαίνεται κάτω από 100 kN/mm .

Στη σταθερή επιδομή στόχος πρέπει να είναι ο συνολικός συντελεστής ελατηρίου c να κυμαίνεται μεταξύ $c = 20-25 \text{ kN/mm}$. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται παρόμοια συμπεριφορά παραμόρφωσης, όπως στη συνήθη επιδομή με έρμα με μέση αντοχή του υπεδάφους $C = 0,10 \text{ N/mm}^3$. [3]

Στα δύο σχήματα (Σχ. 5.7 και Σχ. 5.8) που ακολουθούν παρουσιάζονται η σκυρογραμμή καθώς και η σταθερή επιδομή Stedef σε σχέση με το συντελεστή ελατηρίου c των διάφορων στοιχείων της γραμμής. Οι τιμές των συντελεστών ελατηρίου του κάθε στοιχείου είναι οι χαρακτηριστικές που χρησιμοποιούνται από τη διεθνή βιβλιογραφία. [14]



Σχήμα 5.7 Συντελεστές ελατηρίου στη σκυρογραμμή. ^[15]



Σχήμα 5.8 Συντελεστές ελατηρίου στην επιδομή Stedef. ^[15]

5.6 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από n διαφορετικά υλικά. Κάθε επιμέρους υλικό έχει το δικό του συντελεστή ελαστικότητας c_i και υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων υπόκειται σε διαφορετικές βυθίσεις y_{ki} . Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής $c_{\text{συν}}$ τόσο ανυποχώρητη είναι η γραμμή.

Πίνακας 5.2 Συντελεστές ελαστικότητας στοιχείων γραμμής. ^[15]

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (t/mm)
Σιδηροτροχιά	5000-10000
Ξύλινος στρωτήρας	50-80
Στρωτήρας σκυροδέματος	1200-1500
Μεταλλικός στρωτήρας	500-1000
Έρμα	10-30
Ελαστικό υπόθεμα	10-20
Υποδομή ελώδης	0,5-1,5
Υποδομή αργιλώδης	1,5-2,0
Υποδομή χαλικώδης	2-8

Ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{c_{\text{συν}}} = \sum \frac{1}{c_i} \quad (5.13)$$

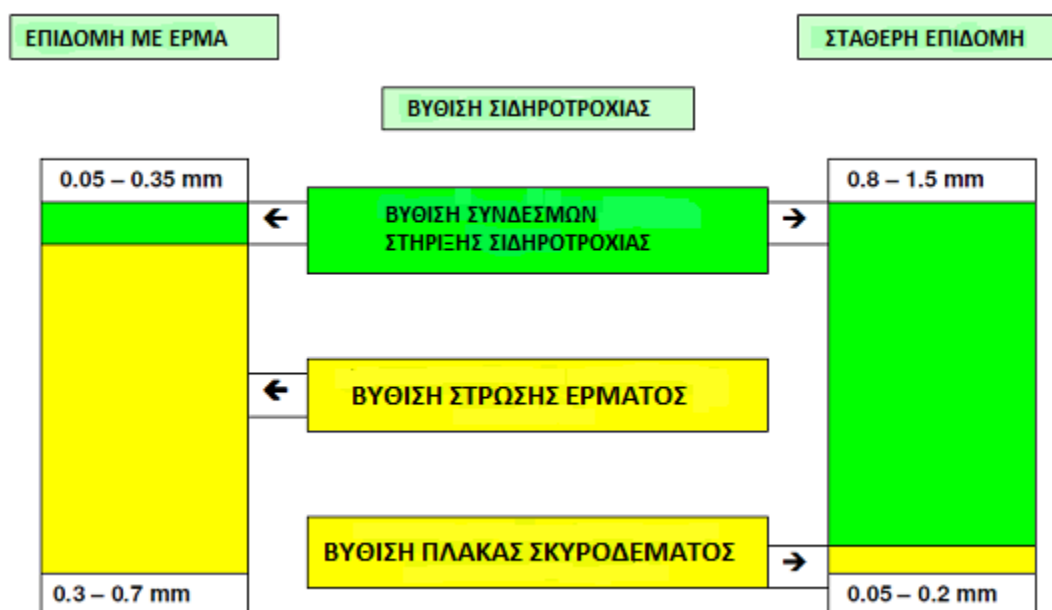
Ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας της επιδομής της γραμμής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το στοιχείο που έχει τον πιο μικρό συντελεστή ελαστικότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία της γραμμής. Σε γενικές γραμμές ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας γραμμής κυμαίνεται μεταξύ 1,5 t/mm και 10 t/mm με πιο συνήθη τιμή τα 3 t/mm.

Στην περίπτωση έδρασης σε έρμα ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας της επιδομής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το έρμα αφού αυτό παρουσιάζει συγκριτικά με τα άλλα στοιχεία της επιδομής τις μικρότερες τιμές.

Στην περίπτωση έδρασης σε σταθερή επιδομή τα πιο εύκαμπτα στοιχεία, τα οποία και επηρεάζουν τον συνολικό συντελεστή ελαστικότητας είναι τα ελαστικά υποθέματα.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.9 δίνονται οι βυθίσεις των δομικών στοιχείων και συνολικά της γραμμής σε περιπτώσεις έδρασης με και χωρίς έρμα. Φαίνεται λοιπόν πως στην περίπτωση έδρασης με έρμα οι κατακόρυφες μετακινήσεις των συνδέσμων είναι σαφώς μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των συστημάτων σταθερής επιδομής. Ειδικότερα, ενώ στους συνδέσμους στήριξης των εδράσεων με έρμα παρατηρείται βύθιση της τάξεως του 0,05 mm έως 0,35 mm στους αντίστοιχους συνδέσμους που χρησιμοποιούνται στα συστήματα σταθερής επιδομής οι μετατοπίσεις είναι σαφώς μεγαλύτερες (0,8 mm έως 1,5 mm). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ότι οι σύνδεσμοι στήριξης σταθερής επιδομής είναι σχεδιασμένοι με μεγαλύτερο μέτρο ευκαμψίας (πιο ελαστικοί), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απαραίτητη ανάληψη των εγκάρσιων φορτίων καθώς και του θορύβου/δονήσεων.

Αντιθέτως παρατηρείται πως η βύθιση της πλάκας σκυροδέματος της σταθερής επιδομής είναι της τάξεως των 0,05-0,2 mm που είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη του έρματος 0,3-0,7 mm. Η σταθερή επιδομή χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική κατακόρυφη συμπεριφορά με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιεί το κατά μήκος υψομετρικό σφάλμα.



Σχήμα 5.9 Βυθίσεις σταθερής επιδομής και επιδομής με έρμα. ^[12]

5.7 Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από n διαφορετικά υλικά (στρωτήρες, σιδηροτροχιά, ελαστικά υποθέματα). Κάθε επιμέρους υλικό έχει το δικό του συντελεστή ελατηρίου c_i ($i = 1, 2, \dots, n$) και υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων υπόκειται σε διαφορετικές καθιζήσεις y_{ki} ($i = 1, 2, \dots, n$).

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$y_{\kappa\sigma\upsilon\nu} = \sum_{i=1}^n y_{ki} \quad (5.14)$$

$$c_i = \frac{S_s}{y_{ki}} \quad (5.15)$$

$$c_{\sigma\upsilon\nu} = \frac{S_s}{y_{\kappa\sigma\upsilon\nu}} \quad (5.16)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις παίρνουμε την ακόλουθη σχέση της συνολικής βύθισης:

$$y_{\kappa\sigma\upsilon\nu} = \sum_{i=1}^n \frac{S_s}{c_i} = S_s \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} \quad (5.17)$$

Όπου: $y_{\kappa\sigma\upsilon\nu}$ η συνολική βύθιση της γραμμής (mm)

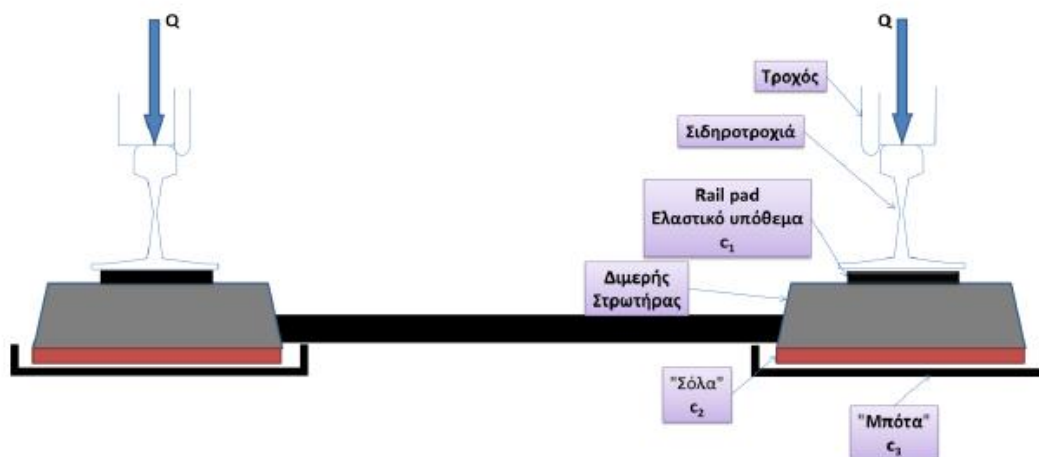
$c_{\sigma\upsilon\nu}$ συνολικός συντελεστής ελαστικότητας (N/mm)

S_s κατακόρυφη αντίδραση στο επίπεδο στρωτήρα – σιδηροτροχιάς (N)

Τελικά προκύπτει:

$$\frac{1}{c_{\sigma\upsilon\nu}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} \quad (5.18)$$

Ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας στη σταθερή επιδομή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα ελαστικά υποθέματα, αφού αυτά παίζουν το ρόλο του σκύρου. Τα ελαστικά υποθέματα της σταθερής επιδομής του Αττικού Μετρό που χρησιμοποιήθηκαν είναι η ελαστική πλάκα (rail pad), η ελαστική "σόλα" και η ελαστική "μπότα".



Σχήμα 5.10 Επιμέρους στοιχεία γραμμής διαφορετικών συντελεστών ελαστικότητας στη σταθερή επιδομή στο Αττικό Μετρό. ^[15]

Για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή ελαστικότητας της γραμμής στο Αττικό Μετρό μπορούμε να λάβουμε υπόψη μόνο τους συντελεστές ελαστικότητας των ελαστικών υποθεμάτων. Αυτό γιατί οι συντελεστές ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς καθώς και του στρωτήρα έχουν πολύ μεγάλες τιμές και η συμβολή τους στο $c_{\text{συν}}$ είναι πολύ μικρή και μπορεί να παραληφθεί. Οι συνήθεις τιμές του συντελεστή ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 75000 kN/mm και του στρωτήρα 13500 kN/mm.

Αντίστοιχα το ελαστικό υπόθεμα της σταθερής επιδομής Rheda 2000 που χρησιμοποιήθηκε στους ΗΣΑΠ ονομάζεται Zwρ 104 με συντελεστή ελατηρίου $c_{\text{stat}}=22,5$ kN/mm / $c_{\text{dyn}}=1,5 \times c_{\text{stat}}$ και τοποθετείται μεταξύ της σιδηροτροχιάς και του στρωτήρα. Για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή ελαστικότητας της γραμμής των ΗΣΑΠ θα λάβουμε υπόψη μόνο το συντελεστή ελαστικότητας του ελαστικού υποθέματος Zwρ 104, αφού οι συντελεστές ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς και του στρωτήρα επηρεάζουν πολύ λίγο και μπορούν να αγνοηθούν.

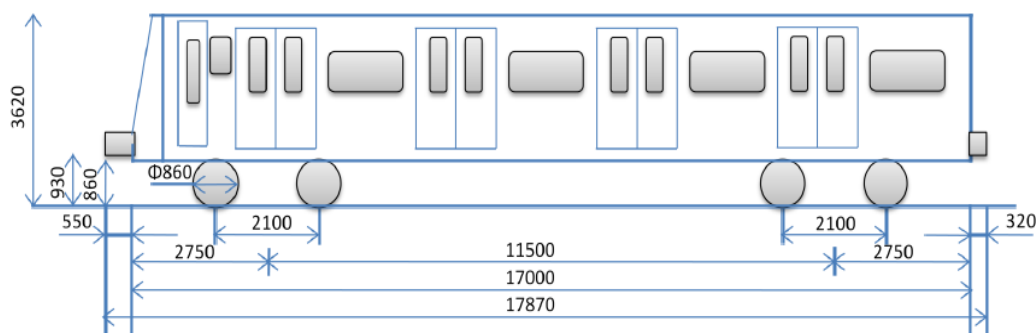
Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ελατηρίου $c_{\text{συν}}$ τόσο ανυποχώρητη (άκαμπτη) είναι η γραμμή. Όταν έχουμε στρωτήρες από σκυρόδεμα αυξάνεται η ακαμψία της γραμμής και μειώνονται οι βυθίσεις. Ακόμα όσο αυξάνεται η ταχύτητα των συρμών τόσο αυξάνεται και η ακαμψία καθώς μειώνεται ο χρόνος εφαρμογής των κατακόρυφων φορτίων.

5.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ RHEDA 2000 ΤΩΝ ΗΣΑΠ

Στην παράγραφο αυτή θα υπολογιστεί με τη μέθοδο Zimmermann η βύθιση της γραμμής στις θέσεις των στρωτήρων της επιδομής Rheda 2000 που χρησιμοποιήθηκε στη γραμμή των ΗΣΑΠ. Στη μέθοδο αυτή η σιδηροδρομική τροχιά προσομοιάζεται με δοκό απείρου μήκους, η οποία είναι ελεύθερα εδραζόμενη επί συνεχούς ελαστικού μέσου (θεωρεία Winkler), θεωρώντας ελατήρια στις θέσεις των στρωτήρων.

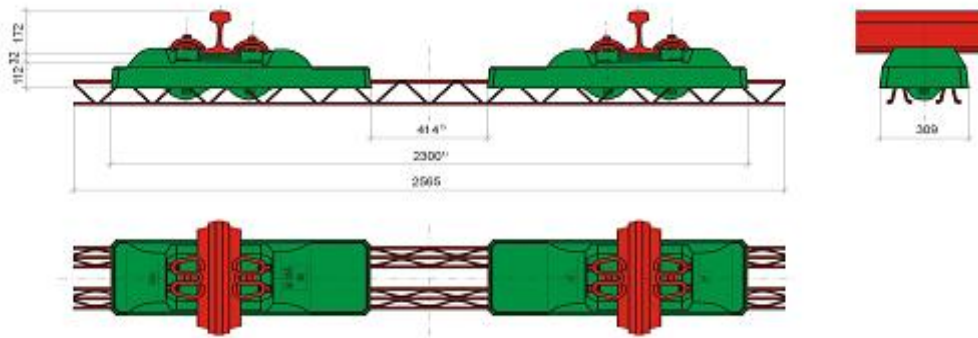
Για την επιδομή των ΗΣΑΠ έχουμε ως δεδομένα τα εξής στοιχεία:

- ❖ Η σιδηροτροχιά που έχει τοποθετηθεί είναι UIC 54 με ροπή αδράνειας $I = 23460000 \text{ mm}^4$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ N/mm}^2$.
- ❖ Το φορτίο του τροχού είναι 65 kN. Λαμβάνοντας μια προσαύξηση 20% λόγω κλίσεων στις καμπύλες προκύπτει φορτίο: $1,20 \cdot 65 = 78 \text{ kN}$.
- ❖ Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συρμών που κυκλοφορούν στις γραμμές των ΗΣΑΠ καθώς και στο Αττικό Μετρό φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο αριθμός των αξόνων είναι 4 και η απόσταση μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} άξονα καθώς και μεταξύ του 3^{ου} με του 4^{ου} είναι 2100 mm, ενώ η απόσταση μεταξύ του 2^{ου} και 3^{ου} είναι 9400 mm.



Σχήμα 5.11 Συρμός του ΗΣΑΠ.

- ❖ Ο στρωτήρας είναι διμερής με πλάτος $b_s = 309 \text{ mm}$ και μήκος 2300 mm. Το μεσαίο τμήμα του στρωτήρα το οποίο δεν φορτίζεται είναι $m = 414 \text{ mm}$. Άρα το ενεργό μήκος $2\bar{u}$ της κάτω επιφάνειας του στρωτήρα ισούται με: $(3200 - 414) / 2 = 943 \text{ mm}$



Σχήμα 5.12 Διατομή στρωτήρων. [16]

- ❖ Η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων είναι $\alpha = 650 \text{ mm}$.
- ❖ Το πλάτος b του ιδανικού στρωτήρα ισούται με $b = 2 \cdot \ddot{u} \cdot b_s / \alpha = 448 \text{ mm}$.
- ❖ ο σύνδεσμος εδράσεως των σιδηροτροχιών είναι Ιοαρν 300 με συντελεστή ελαστικότητας $c_{\text{stat}} = 22,5 \pm 2,5 \text{ kN/mm}$.

Για τους υπολογισμούς λαμβάνεται επί το δυσμενέστερο:

$$c_{\text{dyn}} = 1,6 \cdot c_{\text{stat,max}} = 1,6 \cdot 25 = 40 \text{ kN/mm}.$$

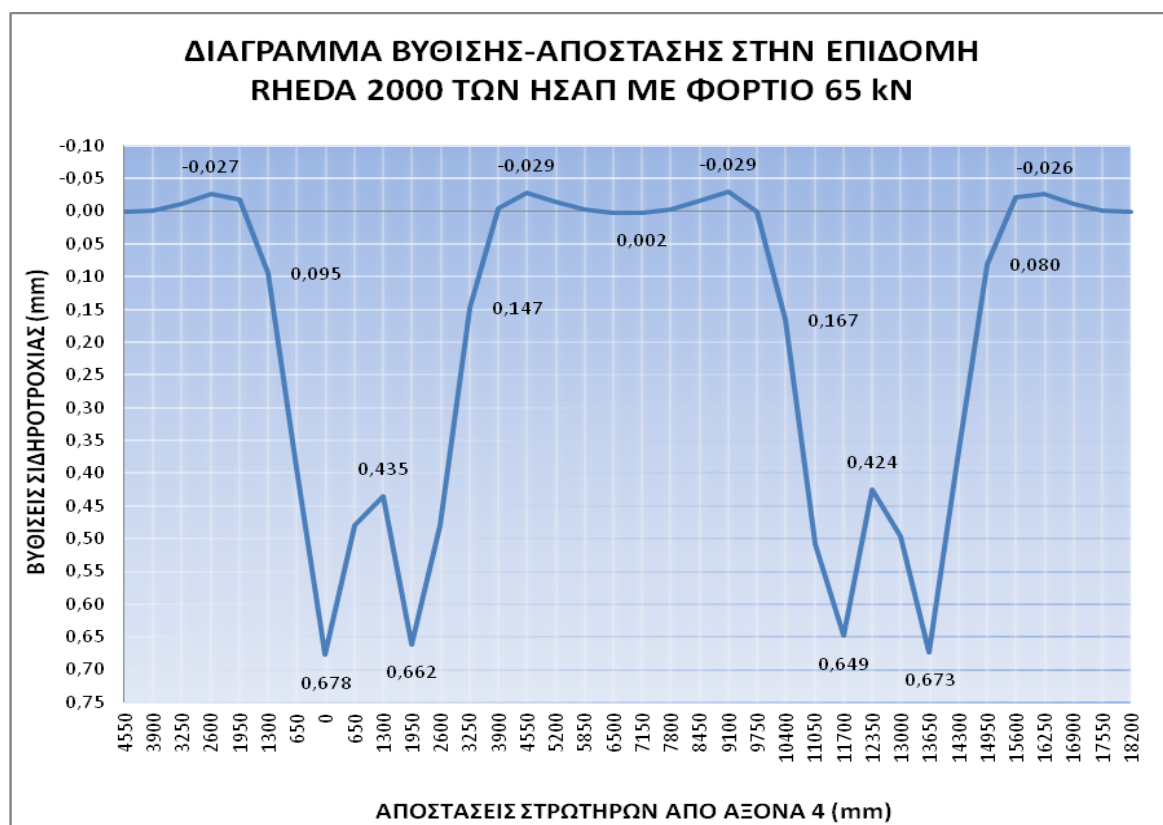
Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζουμε:

- Δείκτης αντίδρασης εδάφους: $C = c_{\text{dyn}} / (\alpha \cdot b) = 0,137 \text{ N/mm}^3$.
- Ελαστικό μήκος: $L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} = 753 \text{ mm}$.
- Συντελεστής n : $n = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi)$
- Βύθιση: $y = \frac{Q}{2 C b L} \Sigma n$.
- Αντίδραση στήριξης: $S_s = \alpha \cdot b \cdot C \cdot y$.

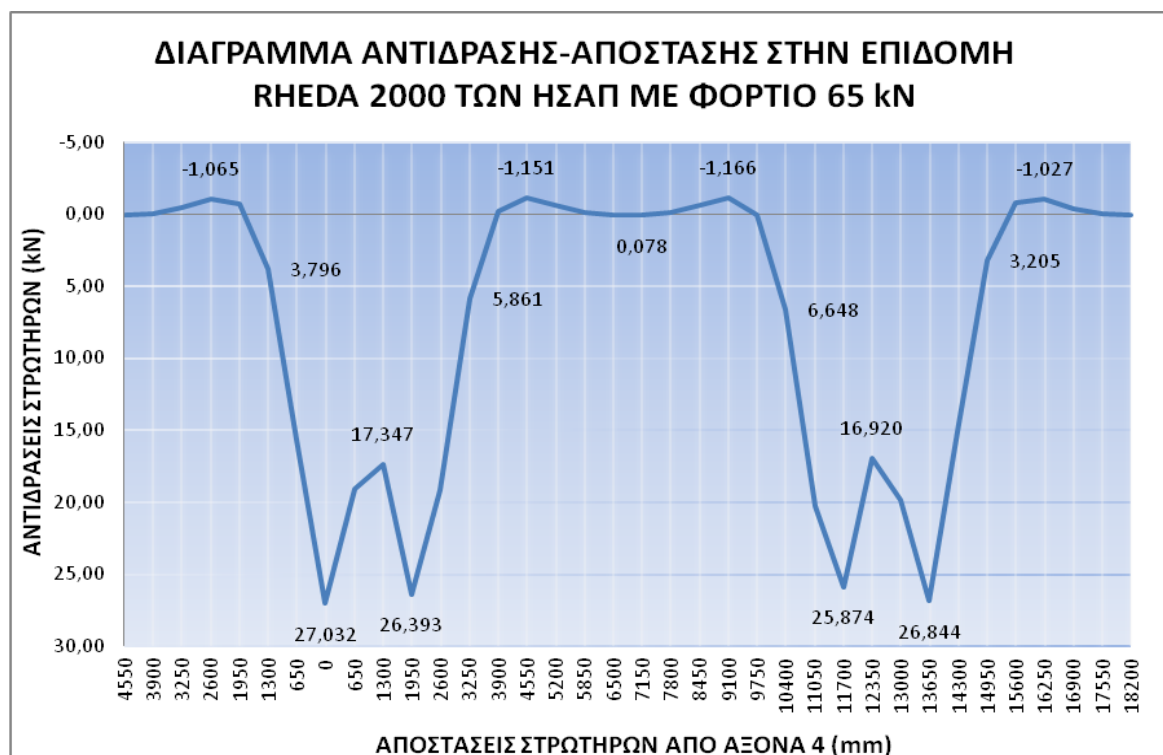
Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός της βύθισης στις στηρίξεις (στρωτήρες) αρχικά με φορτίο 65 kN και στη συνέχεια προσαυξημένο λόγω κλίσεων στις καμπύλες, δηλαδή με φορτίο 78 kN και ο υπολογισμός των αντιδράσεων των στηρίξεων. Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς μορφώνονται τα διαγράμματα βύθισης – απόστασης και αντίδρασης – απόστασης για φορτία 65 kN και 78 kN. Στα διαγράμματα αυτά, για λόγους ευκρίνειας, έχουν σημειωθεί οι πιο χαρακτηριστικές τιμές της βύθισης και της αντίδρασης των στρωτήρων αντίστοιχα.

Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α στο τέλος του τεύχους.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN



Διάγραμμα 5.1 Βύθισεις σιδηροτροχιάς στην επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 65 kN.



Διάγραμμα 5.2 Αντιδράσεις στρωτήρων στην επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 65 kN.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 78 kN



Διάγραμμα 5.3 Βύθισεις σιδηροτροχιάς στην επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 78 kN.



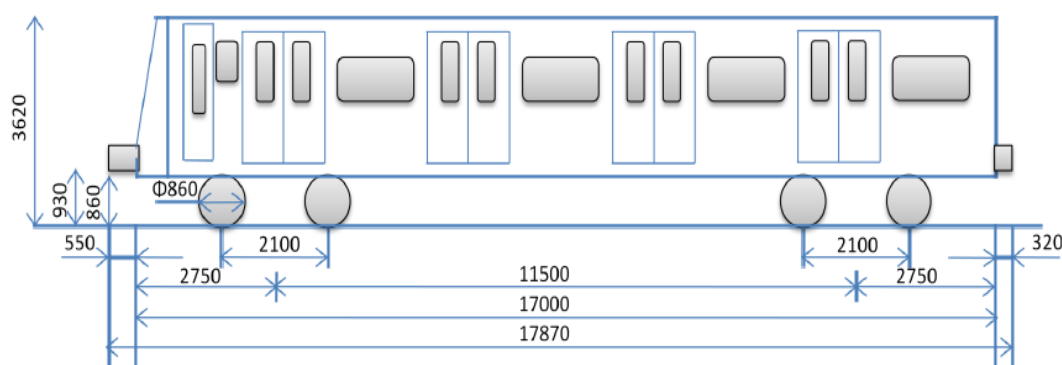
Διάγραμμα 5.4 Αντιδράσεις στρωτήρων στην επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 78 kN.

5.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ STEDEF ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

Στην παράγραφο αυτή θα υπολογιστεί με τη μέθοδο Zimmermann η βύθιση της γραμμής στις θέσεις των στρωτήρων της επιδομής Stedef που χρησιμοποιήθηκε στη γραμμή του μετρώ. Στη μέθοδο αυτή η σιδηροδρομική τροχιά προσομοιάζεται με δοκό απείρου μήκους, η οποία είναι ελεύθερα εδραζόμενη επί συνεχούς ελαστικού μέσου (θεωρεία Winkler), θεωρώντας ελατήρια στις θέσεις των στρωτήρων.

Για το μετρό έχουμε ως δεδομένα τα εξής στοιχεία:

- ❖ Η σιδηροτροχιά που έχει τοποθετηθεί είναι UIC 54 με ροπή αδράνειας $I = 23460000 \text{ mm}^4$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ N/mm}^2$.
- ❖ Το φορτίο του τροχού είναι 65 kN. Λαμβάνοντας μια προσαύξηση 20% λόγω κλίσεων στις καμπύλες προκύπτει φορτίο: $1,20 \cdot 65 = 78 \text{ kN}$.
- ❖ Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συρμών που κυκλοφορούν στο μετρό φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Ο αριθμός των αξόνων λοιπόν είναι 4 και η απόσταση μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} άξονα καθώς και μεταξύ του 3^{ου} με του 4^{ου} είναι 2100 mm, ενώ η απόσταση μεταξύ του 2^{ου} και 3^{ου} είναι 9400 mm.



Σχήμα 5.13 Συρμός του μετρώ.

- ❖ Ο στρωτήρας είναι διμερής με επιφάνεια ημιστρωτήρα ίδια με την επιφάνεια του ελαστικού υποθέματος που τοποθετείται κάτω από το στρωτήρα (ελαστική "σόλα") και είναι $F_1 = 660 \cdot 230 = 151800 \text{ mm}^2$.
- ❖ Η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων είναι $\alpha = 630 \text{ mm}$
- ❖ Το πλάτος b του ιδανικού στρωτήρα ισούται με $b = F_1 / \alpha = 241 \text{ mm}$.

- ❖ Οι συντελεστές ελατηρίου των ελαστικών υποθεμάτων σύμφωνα με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών είναι: Rail pad $c_1 = 104 \text{ kN/mm}$, ελαστική "σόλα" $c_2 = 24 \text{ kN/mm}$, ελαστική "μπότα" $c_3 = 527 \text{ kN/mm}$.^[15]

Άρα από τη σχέση $1/c_{\text{συν}} = 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 = 1/104 + 1/24 + 1/527$ προκύπτει συνολικός δείκτης ελατηρίου $c_{\text{συν}} = 18,8 \text{ kN/mm}$.

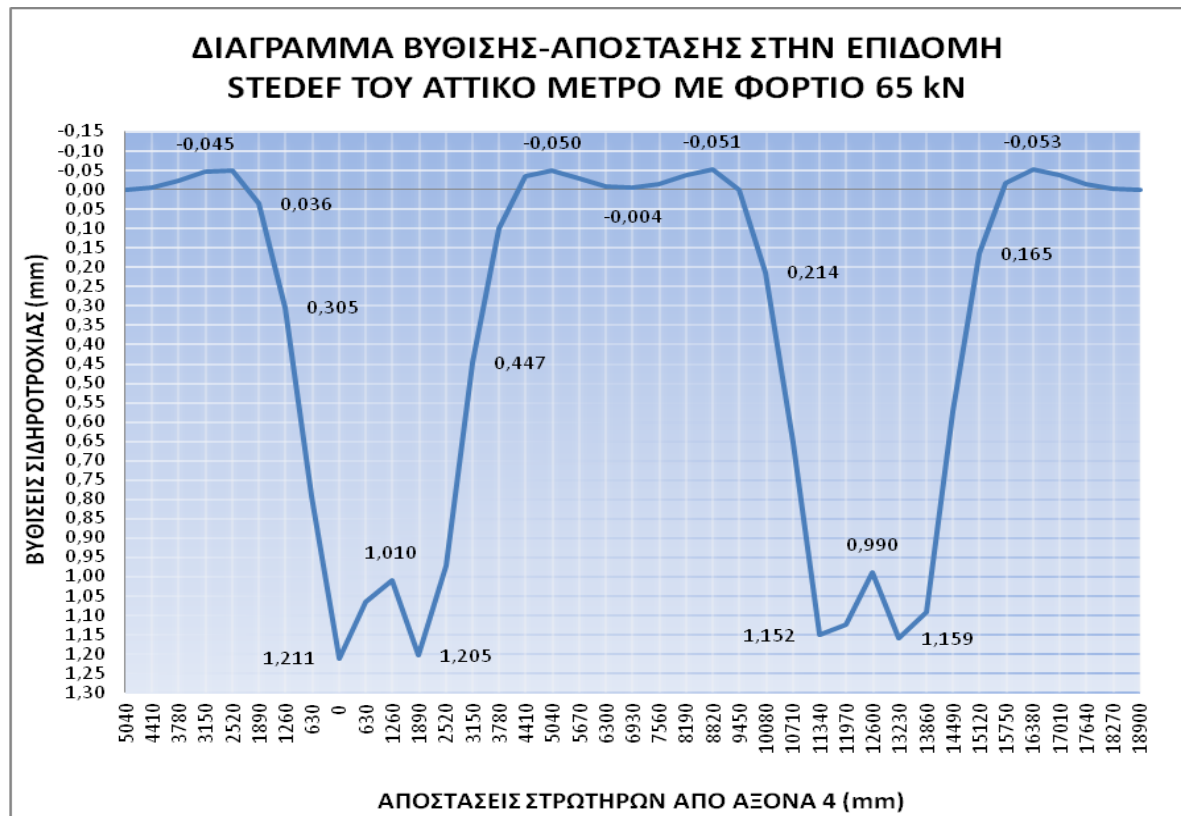
Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζουμε:

- Δείκτης αντίδρασης εδάφους: $C = c_{\text{συν}} / (\alpha * b) = 0,124 \text{ N/mm}^3$.
- Ελαστικό μήκος: $L = \sqrt[4]{\frac{4 * E * I}{b * C}} = 901 \text{ mm}$.
- Συντελεστής n : $n = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi)$.
- Βύθιση: $y = \frac{Q}{2 C b L} \Sigma n$.
- Αντίδραση στήριξης: $S_s = \alpha * b * C * y$.

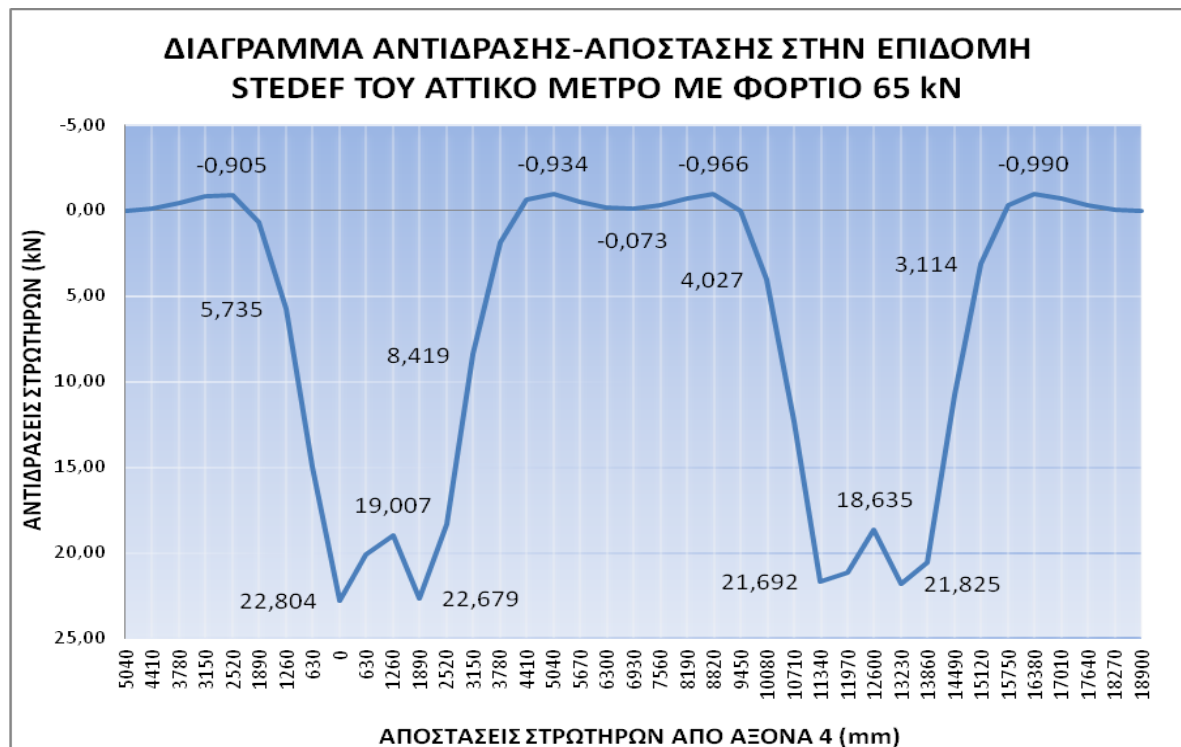
Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός της βύθισης στις στηρίξεις (στρωτήρες) αρχικά με φορτίο 65 kN και στη συνέχεια προσαυξημένο λόγω κλίσεων στις καμπύλες, δηλαδή με φορτίο 78 kN και ο υπολογισμός των αντιδράσεων των στηρίξεων. Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς μορφώνονται τα διαγράμματα βύθισης – απόστασης και αντίδρασης – απόστασης για φορτία 65 kN και 78 kN . Στα διαγράμματα αυτά, για λόγους ευκρίνειας, έχουν σημειωθεί οι πιο χαρακτηριστικές τιμές της βύθισης και της αντίδρασης των στρωτήρων αντίστοιχα.

Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β στο τέλος του τεύχους.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

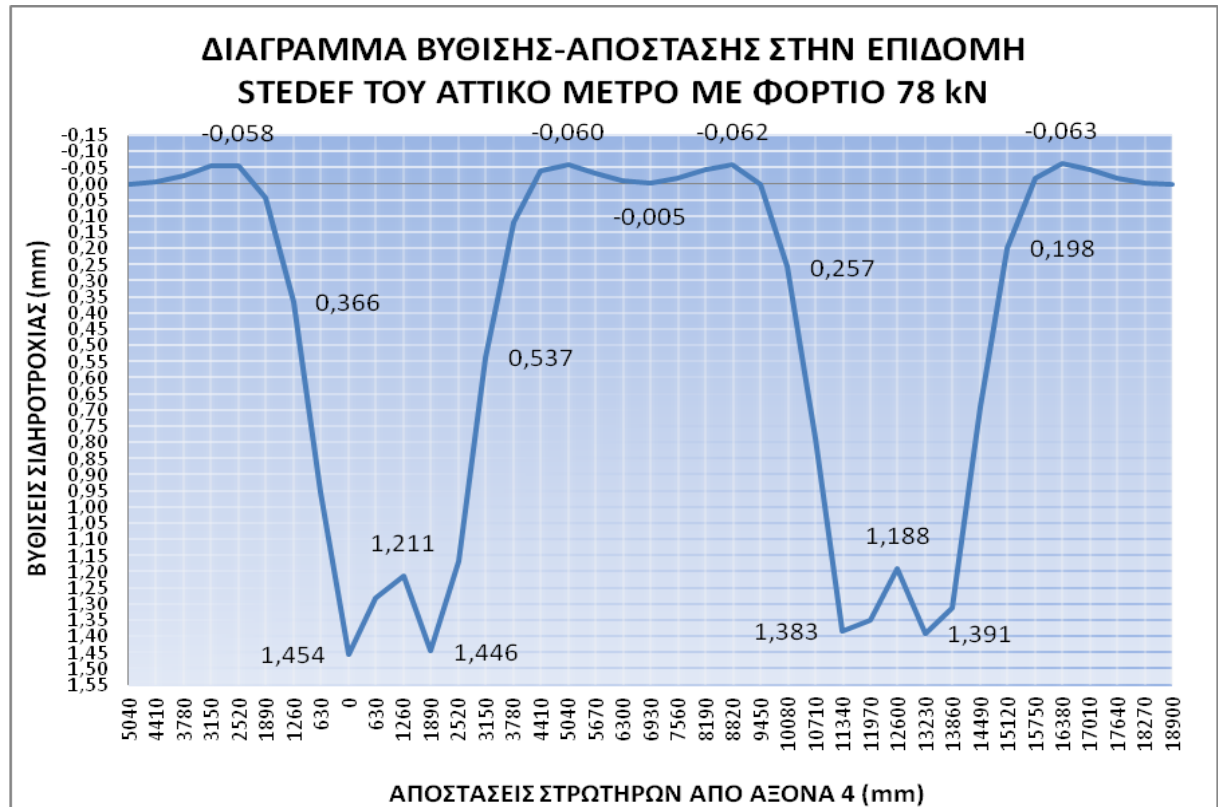


Διάγραμμα 5.5 Βύθισεις σιδηροτροχιάς στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 65 kN.

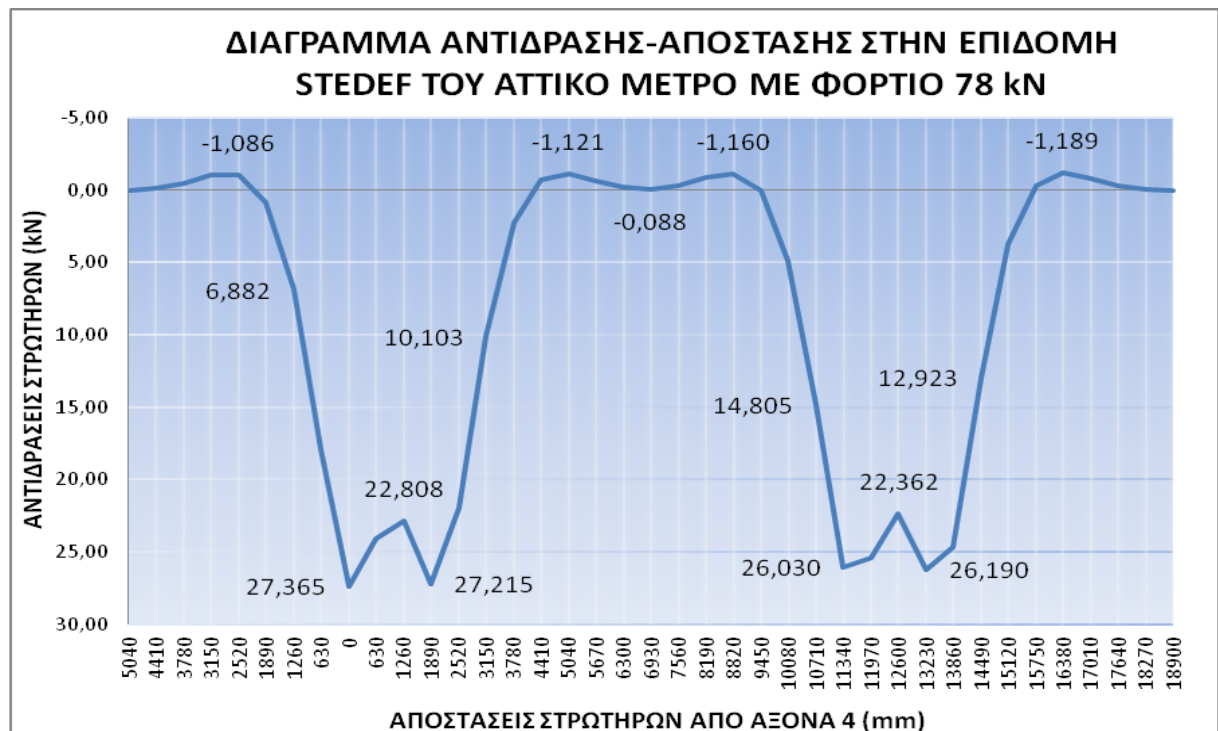


Διάγραμμα 5.6 Αντιδράσεις στρωτήρων στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 65 kN.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 78 kN



Διάγραμμα 5.7 Βύθισεις σιδηροτροχιάς στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 78 kN.



Διάγραμμα 5.8 Αντιδράσεις στρωτήρων στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 78 kN.

5.10 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΩΝ ΗΣΑΠ

1. Αν υποθέσουμε ότι ο δείκτης αντίδρασης εδάφους στη σταθερή επιδομή Rheda 2000 των ΗΣΑΠ είναι ίδιος με αυτόν της επιδομής Stedef του Αττικό Μετρό, δηλαδή $C=0,124 \text{ N/mm}^3$, τότε προκύπτει ελαστικό μήκος $L=772 \text{ mm}$ και συνολικός συντελεστής ελαστικότητας $c=36,1 \text{ kN/mm}$. Σύμφωνα με τη μέθοδο Zimmermann και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στις δύο προηγούμενες παραγράφους, η μέγιστη βύθιση και αντίδραση για φορτίο 65 kN παρατηρούνται κάτω από τον τέταρτο τροχό και έχουν τιμές οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 78 kN θα είναι 20% προσαυξημένες. Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα επίλυσης με δείκτη αντίδρασης εδάφους $C=0,124 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΔΟΜΗ	C (N/mm ³)	c (kN/mm)	Βύθιση (mm)	Αντίδραση στήριξης (kN)
ΗΣΑΠ	0,124	36,1	0,733	26,457
ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ	0,124	18,8	1,211	22,804

2. Αν υποθέσουμε ότι ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας είναι $c=18,8 \text{ kN/mm}$, ίσος δηλαδή με αυτόν της επιδομής Stedef, τότε προκύπτει δείκτης αντίδρασης εδάφους $C=0,065 \text{ N/mm}^3$ και ελαστικό μήκος $L=907 \text{ mm}$. Σύμφωνα με τη μέθοδο Zimmermann και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στις δύο προηγούμενες παραγράφους, η μέγιστη βύθιση και αντίδραση για φορτίο 65 kN παρατηρούνται κάτω από τον τέταρτο τροχό και έχουν τιμές οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 78 kN θα είναι 20% προσαυξημένες. Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα επίλυσης με συντελεστή ελαστικότητας $c=18,8 \text{ kN/mm}$.

ΕΠΙΔΟΜΗ	C (N/mm ³)	c (kN/mm)	Βύθιση (mm)	Αντίδραση στήριξης (kN)
ΗΣΑΠ	0,065	18,8	1,238	23,424
ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ	0,124	18,8	1,211	22,804

ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

1. Αν υποθέσουμε ότι ο δείκτης αντίδρασης εδάφους στη σταθερή επιδομή Stedef του Αττικό Μετρό είναι ίδιος με αυτόν της επιδομής Rheda 2000 των ΗΣΑΠ, δηλαδή $C=0,137 \text{ N/mm}^3$, τότε προκύπτει ελαστικό μήκος $L=879 \text{ mm}$ και συνολικός συντελεστής ελαστικότητας $c=20,8 \text{ kN/mm}$. Σύμφωνα με τη μέθοδο Zimmermann και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στις δύο προηγούμενες παραγράφους, η μέγιστη βύθιση και αντίδραση για φορτίο 65 kN παρατηρούνται κάτω από τον τέταρτο τροχό και έχουν τιμές οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 78 kN θα είναι 20% προσαυξημένες. Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα επίλυσης με δείκτη αντίδρασης εδάφους $C=0,137 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΔΟΜΗ	C (N/mm ³)	c (kN/mm)	Βύθιση (mm)	Αντίδραση στήριξης (kN)
ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ	0,137	20,8	1,115	23,194
ΗΣΑΠ	0,137	40	0,678	27,032

2. Αν υποθέσουμε ότι ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας είναι $c=40 \text{ kN/mm}$, ίσος δηλαδή με αυτόν της επιδομής Rheda 2000, τότε προκύπτει δείκτης αντίδρασης εδάφους $C=0,263 \text{ N/mm}^3$ και ελαστικό μήκος $L=749 \text{ mm}$. Σύμφωνα με τη μέθοδο Zimmermann και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στις δύο προηγούμενες παραγράφους, η μέγιστη βύθιση και αντίδραση για φορτίο 65 kN παρατηρούνται κάτω από τον τέταρτο τροχό και έχουν τιμές οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 78 kN θα είναι 20% προσαυξημένες. Η τιμή όμως αυτή του δείκτη αντίδρασης εδάφους δεν είναι αποδεκτή, αφού πρέπει να είναι μικρότερη από $0,20 \text{ N/mm}^3$, έτσι ώστε να αποφεύγεται μια τελείως άκαμπτη κατασκευή. Οι πίνακες με τους υπολογισμούς βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα επίλυσης με συντελεστή ελαστικότητας $c=40 \text{ kN/mm}$.

ΕΠΙΔΟΜΗ	C (N/mm ³)	c (kN/mm)	Βύθιση (mm)	Αντίδραση στήριξης (kN)
ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ	0,263	40	0,667	26,323
ΗΣΑΠ	0,137	40	0,678	27,032

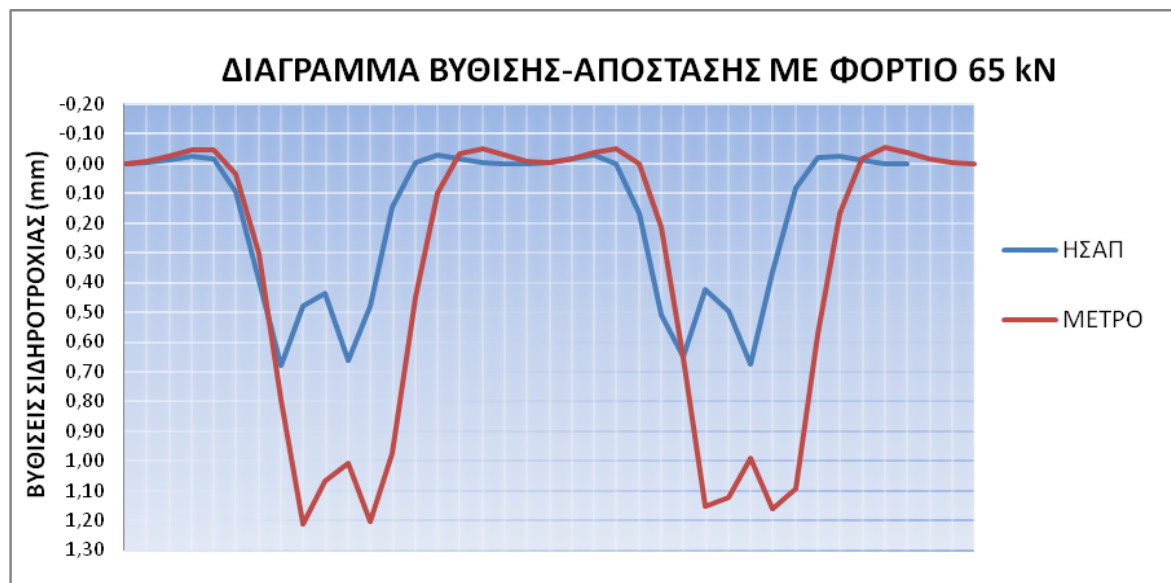
5.11 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τους υπολογισμούς και τα διαγράμματα τόσο της σταθερής επιδομής τύπου Rheda 2000 όσο και για τα αντίστοιχα της επιδομής τύπου Stedef που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (5.8, 5.9) μπορούμε να κάνουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις:

1. Το αρνητικό πρόσημο που πρόέκυψε μετά τον υπολογισμό των βυθίσεων σε κάποιες στηρίξεις δείχνει ότι στα σημεία αυτά πραγματοποιείται ανύψωση των στρωτήρων και όχι βύθιση. Ακόμα, το αρνητικό πρόσημο στις αντιδράσεις των στρωτήρων φανερώνει ότι η αντίδραση των στρωτήρων σε αυτές τις στηρίξεις έχει φορά προς τα πάνω.
2. Η μέγιστη βύθιση στη γραμμή των ΗΣΑΠ παρατηρείται κάτω από τον τέταρτο τροχό και έχει τιμή 0,678 mm για φορτίο τροχού 65 kN και 0,813 mm για φορτίο 78 kN, ενώ στη γραμμή του Αττικό Μετρό η μέγιστη βύθιση είναι 1,211 mm και 1,454 mm για τα ίδια φορτία αντίστοιχα και παρατηρείται και αυτή στο ίδιο σημείο. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η βύθιση στη γραμμή των ΗΣΑΠ είναι περίπου 79% μεγαλύτερη από αυτή του αττικού μετρό.
3. Η μέγιστη ανύψωση στην επιδομή Rheda 2000 των ΗΣΑΠ προκύπτει 0,029 mm για φορτίο 65 kN και 0,035 για φορτίο 78 kN, ενώ για την επιδομή Stedef του Αττικό Μετρό προκύπτει αντίστοιχα 0,050 mm και 0,060 mm. Η μέγιστη ανύψωση λοιπόν είναι περίπου 72% μεγαλύτερη στο Αττικό Μετρό από αυτή της γραμμής των ΗΣΑΠ.
4. Η ελάχιστη τιμή της βύθισης ανάμεσα στο τέταρτο και το τρίτο τροχό στην επιδομή Rheda 2000 είναι 0,435 mm για φορτίο 65 kN και 0,522 mm για φορτίο 78 kN, ενώ στην επιδομή Stedef είναι 1,010 mm και 1,211 mm αντίστοιχα. Η τιμή λοιπόν της γραμμής του μετρό είναι 132% μεγαλύτερη από αυτή των ΗΣΑΠ.
5. Η μέγιστη αντίδραση των στρωτήρων στην επιδομή τύπου Rheda 2000 εμφανίζεται κάτω από τον τέταρτο άξονα και είναι 27,032 kN για φορτίο 65 kN και 32,438 kN για φορτίο 78 kN, ενώ για την επιδομή τύπου Stedef είναι 22,804 kN και 27,365 kN αντίστοιχα. Με βάση αυτές τις τιμές προκύπτει ότι η μέγιστη αντίδραση των στρωτήρων είναι περίπου 19% μεγαλύτερη στη γραμμή των ΗΣΑΠ απ' ό τι στη γραμμή του Αττικό Μετρό.

6. Η ελάχιστη αντίδραση των στρωτήρων στην επιδομή των ΗΣΑΠ είναι -1,166 kN για φορτίο 65 kN και -1,399 kN για φορτίο 78 kN, ενώ στην επιδομή του Αττικό Μετρό με τα ίδια φορτία η ελάχιστη αντίδραση είναι -0,990 kN και -1,189 kN. Άρα, η ελάχιστη τιμή της βύθισης είναι περίπου 18% μεγαλύτερη στην επιδομή των ΗΣΑΠ από αυτή του μετρό.

7. Στο πρώτο από τα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται από κοινού και για τα δύο συστήματα οι βυθίσεις και στο δεύτερο οι αντιδράσεις των στρωτήρων.



Διάγραμμα 5.9 Βυθίσεις σιδηροτροχιάς με φορτίο 65 kN.



Διάγραμμα 5.10 Αντιδράσεις στρωτήρων με φορτίο 65 kN.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Στη σταθερή επιδομή τύπου Stedef του Αττικό Μετρό τα ελαστικά υποθέματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι: το ελαστικό υπόθεμα σιδηροτροχιάς (rail pad) με $c_1=104$ kN/mm, η ελαστική "σόλα" με $c_2=24$ kN/mm η οποία τοποθετείται κάτω από το μπετόν μπλοκ του στρωτήρα και η ελαστική "μπότα" με $c_3=527$ kN/mm. Αντίθετα, στη σταθερή επιδομή Rheda 2000 των ΗΣΑΠ χρησιμοποιήθηκε ο σύνδεσμος Ioarv 300 για τη στήριξη των σιδηροτροχιών το οποίο έχει ελαστικό υπόθεμα Zwp 104 με συντελεστή ελαστικότητας $c=40$ kN/mm και είναι τοποθετημένο ανάμεσα στη σιδηροτροχιά και το στρωτήρα.
2. Η τιμή του δείκτη αντίδρασης εδάφους στην επιδομή των ΗΣΑΠ προέκυψε $C=0,137$ N/mm³ και στην επιδομή του Αττικό Μετρό $C=0,124$ N/mm³, οι οποίες είναι αποδεκτές αφού όπως προαναφέρθηκε τιμές 0,10-0,15 εξασφαλίζουν πολύ καλές συνθήκες ελαστικότητας. Τιμή μεγαλύτερη από 0,20 N/mm³ τείνει προς άκαμπτη κατασκευή και πρέπει να αποφεύγεται για λόγους φθοράς και άνεσης των επιβατών.
3. Οι βυθίσεις στην επιδομή του Αττικό Μετρό είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται στην επιδομή των ΗΣΑΠ, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τις αντιδράσεις των στρωτήρων.
4. Από τους επιπλέον υπολογισμούς που έγιναν, όταν ο συντελεστής ελαστικότητας c ήταν ίδιος και στα δύο συστήματα επιδομής, δηλαδή είτε 18 kN/mm είτε 40 kN/mm, οι τιμές της βύθισης και των αντιδράσεων των στρωτήρων προέκυψαν περίπου ίσες. Αντίθετα, όταν ο δείκτης αντίδρασης εδάφους ήταν ίδιος και στα δύο συστήματα επιδομής, δηλαδή είτε $C=0,124$ N/mm³ είτε $C=0,137$ N/mm³, οι τιμές της βύθισης της επιδομής του Αττικό Μετρό προέκυψαν 65% μεγαλύτερες και των αντιδράσεων των στρωτήρων 17% μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της επιδομής των ΗΣΑΠ.

7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται ολοένα και μεγαλύτερη χρησιμοποίηση συστημάτων σταθερής επιδομής με απευθείας έδραση των σιδηροτροχιών στην πλάκα σκυροδέματος, αφού παρουσιάζει συνεχώς όλο και περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους σταθερής επιδομής με τη χρήση στρωτήρων. Η συνεχής βελτίωση των συνδέσμων σύνδεσης σιδηροτροχιών-πλάκας έδρασης, όπως επίσης η συνεχής εξέλιξη των υλικών που χρησιμοποιούνται ως υποθέματα έχει οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή συστημάτων απευθείας έδρασης των σιδηροτροχιών στο σκυρόδεμα. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρότερο κόστος κατασκευής (σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα σταθερής επιδομής), από ευκολία κατασκευαστικής υλοποίησης, και από ευκολία και μικρό κόστος εργασιών συντήρησης. Η τεχνική αυτή αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μετρό της Θεσσαλονίκης. Προτείνεται λοιπόν να γίνει διερεύνηση του συστήματος και σύγκριση με την επιδομή Stedef του μετρό της Αθήνας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υπολογισμός της σταθερής επιδομής των ΗΣΑΠ και του Αττικό Μετρό. Προτείνεται λοιπόν να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις της βύθισης σε σταθμούς των ΗΣΑΠ και του μετρό ώστε να διερευνηθεί αν υπάρχουν αποκλίσεις από τους θεωρητικούς υπολογισμούς που έγιναν σε αυτή την εργασία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας 5.7 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	18150	24,104	0,00000	16050	21,315	0,00000
Στήριξη 2	17500	23,240	0,00000	15400	20,452	0,00000
Στήριξη 3	16850	22,377	0,00000	14750	19,588	0,00000
Στήριξη 4	16200	21,514	0,00000	14100	18,725	0,00000
Στήριξη 5	15550	20,651	0,00000	13450	17,862	0,00000
Στήριξη 6	14900	19,788	0,00000	12800	16,999	0,00000
Στήριξη 7	14250	18,924	0,00000	12150	16,135	0,00000
Στήριξη 8	13600	18,061	0,00000	11500	15,272	0,00000
Στήριξη 9	12950	17,198	0,00000	10850	14,409	0,00000
Στήριξη 10	12300	16,335	0,00000	10200	13,546	0,00000
Στήριξη 11	11650	15,471	0,00000	9550	12,683	0,00000
Στήριξη 12	11000	14,608	0,00000	8900	11,819	0,00000
Στήριξη 13	10350	13,745	0,00000	8250	10,956	-0,00002
Στήριξη 14	9700	12,882	0,00000	7600	10,093	-0,00006
Στήριξη 15	9050	12,019	0,00000	6950	9,230	-0,00008
Στήριξη 16	8400	11,155	-0,00001	6300	8,367	0,00009
Στήριξη 17	7750	10,292	-0,00005	5650	7,503	0,00071
Στήριξη 18	7100	9,429	-0,00008	5000	6,640	0,00168
Στήριξη 19	6450	8,566	0,00002	4350	5,777	0,00121
Στήριξη 20	5800	7,703	0,00051	3700	4,914	-0,00573
Στήριξη 21	5150	6,839	0,00147	3050	4,050	-0,02444
Στήριξη 22	4500	5,976	0,00165	2400	3,187	-0,04313
Στήριξη 23	3850	5,113	-0,00320	1750	2,324	0,00445
Στήριξη 24	3200	4,250	-0,01914	1100	1,461	0,25611
Στήριξη 25	2550	3,386	-0,04102	450	0,598	0,76432
Στήριξη 26	1900	2,523	-0,01886	200	0,266	0,94112
Στήριξη 27	1250	1,660	0,17243	850	1,129	0,43067
Στήριξη 28	600	0,797	0,63743	1500	1,992	0,06871
Στήριξη 29	50	0,066	0,99578	2150	2,855	-0,03895
Στήριξη 30	700	0,930	0,55240	2800	3,718	-0,03358
Στήριξη 31	1350	1,793	0,12574	3450	4,582	-0,01148
Στήριξη 32	2000	2,656	-0,02933	4100	5,445	-0,00032
Στήριξη 33	2650	3,519	-0,03846	4750	6,308	0,00187
Στήριξη 34	3300	4,382	-0,01587	5400	7,171	0,00108
Στήριξη 35	3950	5,246	-0,00186	6050	8,035	0,00026
Στήριξη 36	4600	6,109	0,00180	6700	8,898	-0,00005

Πίνακας 5.8 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	η_i	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	η_i
Στήριξη 1	6650	8,831	-0,00004	4550	6,042	0,00174
Στήριξη 2	6000	7,968	0,00030	3900	5,179	-0,00249
Στήριξη 3	5350	7,105	0,00116	3250	4,316	-0,01747
Στήριξη 4	4700	6,242	0,00186	2600	3,453	-0,03983
Στήριξη 5	4050	5,378	-0,00078	1950	2,590	-0,02455
Στήριξη 6	3400	4,515	-0,01287	1300	1,726	0,14819
Στήριξη 7	2750	3,652	-0,03530	650	0,863	0,59472
Στήριξη 8	2100	2,789	-0,03646	0	0,000	1,00000
Στήριξη 9	1450	1,926	0,08605	650	0,863	0,59472
Στήριξη 10	800	1,062	0,47014	1300	1,726	0,14819
Στήριξη 11	150	0,199	0,96533	1950	2,590	-0,02455
Στήριξη 12	500	0,664	0,72266	2600	3,453	-0,03983
Στήριξη 13	1150	1,527	0,22639	3250	4,316	-0,01747
Στήριξη 14	1800	2,390	-0,00443	3900	5,179	-0,00249
Στήριξη 15	2450	3,254	-0,04271	4550	6,042	0,00174
Στήριξη 16	3100	4,117	-0,02263	5200	6,906	0,00140
Στήριξη 17	3750	4,980	-0,00481	5850	7,769	0,00046
Στήριξη 18	4400	5,843	0,00139	6500	8,632	0,00000
Στήριξη 19	5050	6,707	0,00162	7150	9,495	-0,00008
Στήριξη 20	5700	7,570	0,00064	7800	10,359	-0,00004
Στήριξη 21	6350	8,433	0,00006	8450	11,222	-0,00001
Στήριξη 22	7000	9,296	-0,00008	9100	12,085	0,00000
Στήριξη 23	7650	10,159	-0,00005	9750	12,948	0,00000
Στήριξη 24	8300	11,023	-0,00002	10400	13,811	0,00000
Στήριξη 25	8950	11,886	0,00000	11050	14,675	0,00000
Στήριξη 26	9600	12,749	0,00000	11700	15,538	0,00000
Στήριξη 27	10250	13,612	0,00000	12350	16,401	0,00000
Στήριξη 28	10900	14,475	0,00000	13000	17,264	0,00000
Στήριξη 29	11550	15,339	0,00000	13650	18,127	0,00000
Στήριξη 30	12200	16,202	0,00000	14300	18,991	0,00000
Στήριξη 31	12850	17,065	0,00000	14950	19,854	0,00000
Στήριξη 32	13500	17,928	0,00000	15600	20,717	0,00000
Στήριξη 33	14150	18,792	0,00000	16250	21,580	0,00000
Στήριξη 34	14800	19,655	0,00000	16900	22,444	0,00000
Στήριξη 35	15450	20,518	0,00000	17550	23,307	0,00000
Στήριξη 36	16100	21,381	0,00000	18200	24,170	0,00000

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

Πίνακας 5.9 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 65 kN.

Α/Α ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00170	0,001	0,048
Στήριξη 2	-0,00219	-0,002	-0,061
Στήριξη 3	-0,01631	-0,011	-0,458
Στήριξη 4	-0,03796	-0,027	-1,065
Στήριξη 5	-0,02533	-0,018	-0,711
Στήριξη 6	0,13532	0,095	3,796
Στήριξη 7	0,55941	0,393	15,694
Στήριξη 8	0,96354	0,678	27,032
Στήριξη 9	0,68077	0,479	19,099
Στήριξη 10	0,61834	0,435	17,347
Στήριξη 11	0,94078	0,662	26,393
Στήριξη 12	0,68283	0,480	19,156
Στήριξη 13	0,20890	0,147	5,861
Στήριξη 14	-0,00698	-0,005	-0,196
Στήριξη 15	-0,04105	-0,029	-1,151
Στήριξη 16	-0,02116	-0,015	-0,594
Στήριξη 17	-0,00369	-0,003	-0,104
Στήριξη 18	0,00299	0,002	0,084
Στήριξη 19	0,00276	0,002	0,078
Στήριξη 20	-0,00462	-0,003	-0,130
Στήριξη 21	-0,02291	-0,016	-0,643
Στήριξη 22	-0,04155	-0,029	-1,166
Στήριξη 23	0,00120	0,001	0,034
Στήριξη 24	0,23696	0,167	6,648
Στήριξη 25	0,72330	0,509	20,292
Στήριξη 26	0,92227	0,649	25,874
Στήριξη 27	0,60311	0,424	16,920
Στήριξη 28	0,70615	0,497	19,811
Στήριξη 29	0,95684	0,673	26,844
Στήριξη 30	0,51882	0,365	14,555
Στήριξη 31	0,11425	0,080	3,205
Στήριξη 32	-0,02966	-0,021	-0,832
Στήριξη 33	-0,03659	-0,026	-1,027
Στήριξη 34	-0,01479	-0,010	-0,415
Στήριξη 35	-0,00160	-0,001	-0,045
Στήριξη 36	0,00175	0,001	0,049

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 78 kN

Πίνακας 5.10 Υπολογισμοί στη σταθερή επιδομή των ΗΣΑΠ με φορτίο 78 kN.

Α/Α ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00170	0,001	0,057
Στήριξη 2	-0,00219	-0,002	-0,074
Στήριξη 3	-0,01631	-0,014	-0,549
Στήριξη 4	-0,03796	-0,032	-1,278
Στήριξη 5	-0,02533	-0,021	-0,853
Στήριξη 6	0,13532	0,114	4,556
Στήριξη 7	0,55941	0,472	18,833
Στήριξη 8	0,96354	0,813	32,438
Στήριξη 9	0,68077	0,574	22,918
Στήριξη 10	0,61834	0,522	20,817
Στήριξη 11	0,94078	0,794	31,672
Στήριξη 12	0,68283	0,576	22,988
Στήριξη 13	0,20890	0,176	7,033
Στήριξη 14	-0,00698	-0,006	-0,235
Στήριξη 15	-0,04105	-0,035	-1,382
Στήριξη 16	-0,02116	-0,018	-0,712
Στήριξη 17	-0,00369	-0,003	-0,124
Στήριξη 18	0,00299	0,003	0,101
Στήριξη 19	0,00276	0,002	0,093
Στήριξη 20	-0,00462	-0,004	-0,155
Στήριξη 21	-0,02291	-0,019	-0,771
Στήριξη 22	-0,04155	-0,035	-1,399
Στήριξη 23	0,00120	0,001	0,040
Στήριξη 24	0,23696	0,200	7,977
Στήριξη 25	0,72330	0,610	24,350
Στήριξη 26	0,92227	0,778	31,048
Στήριξη 27	0,60311	0,509	20,304
Στήριξη 28	0,70615	0,596	23,773
Στήριξη 29	0,95684	0,807	32,212
Στήριξη 30	0,51882	0,438	17,466
Στήριξη 31	0,11425	0,096	3,846
Στήριξη 32	-0,02966	-0,025	-0,998
Στήριξη 33	-0,03659	-0,031	-1,232
Στήριξη 34	-0,01479	-0,012	-0,498
Στήριξη 35	-0,00160	-0,001	-0,054
Στήριξη 36	0,00175	0,001	0,059

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας 5.11 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	18640	20,688	0,00000	16540	18,357	0,00000
Στήριξη 2	18010	19,989	0,00000	15910	17,658	0,00000
Στήριξη 3	17380	19,290	0,00000	15280	16,959	0,00000
Στήριξη 4	16750	18,590	0,00000	14650	16,260	0,00000
Στήριξη 5	16120	17,891	0,00000	14020	15,560	0,00000
Στήριξη 6	15490	17,192	0,00000	13390	14,861	0,00000
Στήριξη 7	14860	16,493	0,00000	12760	14,162	0,00000
Στήριξη 8	14230	15,794	0,00000	12130	13,463	0,00000
Στήριξη 9	13600	15,094	0,00000	11500	12,764	0,00000
Στήριξη 10	12970	14,395	0,00000	10870	12,064	0,00000
Στήριξη 11	12340	13,696	0,00000	10240	11,365	-0,00001
Στήριξη 12	11710	12,997	0,00000	9610	10,666	-0,00003
Στήριξη 13	11080	12,297	0,00000	8980	9,967	-0,00006
Στήριξη 14	10450	11,598	0,00000	8350	9,267	-0,00008
Στήριξη 15	9820	10,899	-0,00002	7720	8,568	0,00002
Στήριξη 16	9190	10,200	-0,00005	7090	7,869	0,00038
Στήριξη 17	8560	9,501	-0,00008	6460	7,170	0,00108
Στήριξη 18	7930	8,801	-0,00003	5830	6,471	0,00181
Στήριξη 19	7300	8,102	0,00022	5200	5,771	0,00119
Στήριξη 20	6670	7,403	0,00081	4570	5,072	-0,00366
Στήριξη 21	6040	6,704	0,00162	3940	4,373	-0,01609
Στήριξη 22	5410	6,004	0,00169	3310	3,674	-0,03475
Στήριξη 23	4780	5,305	-0,00134	2680	2,974	-0,04187
Στήριξη 24	4150	4,606	-0,01100	2050	2,275	0,01175
Στήριξη 25	3520	3,907	-0,02843	1420	1,576	0,20571
Στήριξη 26	2890	3,208	-0,04303	790	0,877	0,58601
Στήριξη 27	2260	2,508	-0,01745	160	0,178	0,97203
Στήριξη 28	1630	1,809	0,12051	470	0,522	0,81037
Στήριξη 29	1000	1,110	0,44180	1100	1,221	0,37823
Στήριξη 30	370	0,411	0,87284	1730	1,920	0,08757
Στήριξη 31	260	0,289	0,93160	2360	2,619	-0,02680
Στήριξη 32	890	0,988	0,51590	2990	3,319	-0,04201
Στήριξη 33	1520	1,687	0,16236	3620	4,018	-0,02534
Στήριξη 34	2150	2,386	-0,00391	4250	4,717	-0,00890
Στήριξη 35	2780	3,085	-0,04307	4880	5,416	-0,00051
Στήριξη 36	3410	3,785	-0,03180	5510	6,115	0,00181
Στήριξη 37	4040	4,484	-0,01355	6140	6,815	0,00150
Στήριξη 38	4670	5,183	-0,00246	6770	7,514	0,00070
Στήριξη 39	5300	5,882	0,00148	7400	8,213	0,00016

Πίνακας 5.12 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	7140	7,925	0,00034	5040	5,594	0,00050
Στήριξη 2	6510	7,225	0,00102	4410	4,895	-0,00601
Στήριξη 3	5880	6,526	0,00177	3780	4,195	-0,02054
Στήριξη 4	5250	5,827	0,00135	3150	3,496	-0,03895
Στήριξη 5	4620	5,128	-0,00303	2520	2,797	-0,03680
Στήριξη 6	3990	4,428	-0,01480	1890	2,098	0,04438
Στήριξη 7	3360	3,729	-0,03330	1260	1,398	0,28568
Στήριξη 8	2730	3,030	-0,04263	630	0,699	0,70022
Στήριξη 9	2100	2,331	0,00350	0	0,000	1,00000
Στήριξη 10	1470	1,632	0,18340	630	0,699	0,70022
Στήριξη 11	840	0,932	0,55071	1260	1,398	0,28568
Στήριξη 12	210	0,233	0,95363	1890	2,098	0,04438
Στήριξη 13	420	0,466	0,84246	2520	2,797	-0,03680
Στήριξη 14	1050	1,165	0,40951	3150	3,496	-0,03895
Στήριξη 15	1680	1,865	0,10344	3780	4,195	-0,02054
Στήριξη 16	2310	2,564	-0,02245	4410	4,895	-0,00601
Στήριξη 17	2940	3,263	-0,04263	5040	5,594	0,00050
Στήριξη 18	3570	3,962	-0,02688	5670	6,293	0,00187
Στήριξη 19	4200	4,661	-0,00992	6300	6,992	0,00130
Στήριξη 20	4830	5,361	-0,00091	6930	7,691	0,00052
Στήριξη 21	5460	6,060	0,00176	7560	8,391	0,00008
Στήριξη 22	6090	6,759	0,00156	8190	9,090	-0,00007
Στήριξη 23	6720	7,458	0,00075	8820	9,789	-0,00007
Στήριξη 24	7350	8,158	0,00019	9450	10,488	-0,00004
Στήριξη 25	7980	8,857	-0,00004	10080	11,188	-0,00001
Στήριξη 26	8610	9,556	-0,00008	10710	11,887	0,00000
Στήριξη 27	9240	10,255	-0,00005	11340	12,586	0,00000
Στήριξη 28	9870	10,954	-0,00002	11970	13,285	0,00000
Στήριξη 29	10500	11,654	0,00000	12600	13,984	0,00000
Στήριξη 30	11130	12,353	0,00000	13230	14,684	0,00000
Στήριξη 31	11760	13,052	0,00000	13860	15,383	0,00000
Στήριξη 32	12390	13,751	0,00000	14490	16,082	0,00000
Στήριξη 33	13020	14,451	0,00000	15120	16,781	0,00000
Στήριξη 34	13650	15,150	0,00000	15750	17,481	0,00000
Στήριξη 35	14280	15,849	0,00000	16380	18,180	0,00000
Στήριξη 36	14910	16,548	0,00000	17010	18,879	0,00000
Στήριξη 37	15540	17,248	0,00000	17640	19,578	0,00000
Στήριξη 38	16170	17,947	0,00000	18270	20,277	0,00000
Στήριξη 39	16800	18,646	0,00000	18900	20,977	0,00000

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

Πίνακας 5.13 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 65 kN.

A/A ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00084	0,001	0,019
Στήριξη 2	-0,00499	-0,006	-0,113
Στήριξη 3	-0,01877	-0,023	-0,427
Στήριξη 4	-0,03761	-0,045	-0,855
Στήριξη 5	-0,03983	-0,048	-0,905
Στήριξη 6	0,02958	0,036	0,672
Στήριξη 7	0,25238	0,305	5,735
Στήριξη 8	0,65758	0,794	14,943
Στήριξη 9	1,00350	1,211	22,804
Στήριξη 10	0,88362	1,067	20,080
Στήριξη 11	0,83638	1,010	19,007
Στήριξη 12	0,99798	1,205	22,679
Στήριξη 13	0,80560	0,972	18,307
Στήριξη 14	0,37048	0,447	8,419
Στήριξη 15	0,08290	0,100	1,884
Στήριξη 16	-0,02813	-0,034	-0,639
Στήριξη 17	-0,04112	-0,050	-0,934
Στήριξη 18	-0,02324	-0,028	-0,528
Στήριξη 19	-0,00722	-0,009	-0,164
Στήριξη 20	-0,00323	-0,004	-0,073
Στήριξη 21	-0,01264	-0,015	-0,287
Στήριξη 22	-0,03156	-0,038	-0,717
Στήριξη 23	-0,04253	-0,051	-0,966
Στήριξη 24	0,00091	0,001	0,021
Στήριξη 25	0,17723	0,214	4,027
Στήριξη 26	0,54290	0,655	12,337
Στήριξη 27	0,95454	1,152	21,692
Στήριξη 28	0,93086	1,124	21,154
Στήριξη 29	0,82002	0,990	18,635
Στήριξη 30	0,96041	1,159	21,825
Στήριξη 31	0,90480	1,092	20,561
Στήριξη 32	0,47389	0,572	10,769
Στήριξη 33	0,13702	0,165	3,114
Στήριξη 34	-0,01281	-0,015	-0,291
Στήριξη 35	-0,04358	-0,053	-0,990
Στήριξη 36	-0,02999	-0,036	-0,682
Στήριξη 37	-0,01205	-0,015	-0,274
Στήριξη 38	-0,00176	-0,002	-0,040
Στήριξη 39	0,00164	0,002	0,037

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ 78 kN

Πίνακας 5.14 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με φορτίο 78 kN.

Α/Α ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00084	0,001	0,023
Στήριξη 2	-0,00499	-0,007	-0,136
Στήριξη 3	-0,01877	-0,027	-0,512
Στήριξη 4	-0,03761	-0,054	-1,026
Στήριξη 5	-0,03983	-0,058	-1,086
Στήριξη 6	0,02958	0,043	0,807
Στήριξη 7	0,25238	0,366	6,882
Στήριξη 8	0,65758	0,952	17,932
Στήριξη 9	1,00350	1,454	27,365
Στήριξη 10	0,88362	1,280	24,096
Στήριξη 11	0,83638	1,211	22,808
Στήριξη 12	0,99798	1,446	27,215
Στήριξη 13	0,80560	1,167	21,969
Στήριξη 14	0,37048	0,537	10,103
Στήριξη 15	0,08290	0,120	2,261
Στήριξη 16	-0,02813	-0,041	-0,767
Στήριξη 17	-0,04112	-0,060	-1,121
Στήριξη 18	-0,02324	-0,034	-0,634
Στήριξη 19	-0,00722	-0,010	-0,197
Στήριξη 20	-0,00323	-0,005	-0,088
Στήριξη 21	-0,01264	-0,018	-0,345
Στήριξη 22	-0,03156	-0,046	-0,861
Στήριξη 23	-0,04253	-0,062	-1,160
Στήριξη 24	0,00091	0,001	0,025
Στήριξη 25	0,17723	0,257	4,833
Στήριξη 26	0,54290	0,786	14,805
Στήριξη 27	0,95454	1,383	26,030
Στήριξη 28	0,93086	1,348	25,384
Στήριξη 29	0,82002	1,188	22,362
Στήριξη 30	0,96041	1,391	26,190
Στήριξη 31	0,90480	1,311	24,674
Στήριξη 32	0,47389	0,686	12,923
Στήριξη 33	0,13702	0,198	3,737
Στήριξη 34	-0,01281	-0,019	-0,349
Στήριξη 35	-0,04358	-0,063	-1,189
Στήριξη 36	-0,02999	-0,043	-0,818
Στήριξη 37	-0,01205	-0,017	-0,329
Στήριξη 38	-0,00176	-0,003	-0,048
Στήριξη 39	0,00164	0,002	0,045

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΗΣΑΠ ΜΕ $C=0,124 \text{ N/mm}^3$ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

Πίνακας 5.15 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $C=0,124 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i
Στήριξη 1	18150	23,510	0,00000	16050	20,790	0,00000
Στήριξη 2	17500	22,668	0,00000	15400	19,948	0,00000
Στήριξη 3	16850	21,826	0,00000	14750	19,106	0,00000
Στήριξη 4	16200	20,984	0,00000	14100	18,264	0,00000
Στήριξη 5	15550	20,142	0,00000	13450	17,422	0,00000
Στήριξη 6	14900	19,301	0,00000	12800	16,580	0,00000
Στήριξη 7	14250	18,459	0,00000	12150	15,738	0,00000
Στήριξη 8	13600	17,617	0,00000	11500	14,896	0,00000
Στήριξη 9	12950	16,775	0,00000	10850	14,054	0,00000
Στήριξη 10	12300	15,933	0,00000	10200	13,212	0,00000
Στήριξη 11	11650	15,091	0,00000	9550	12,370	0,00000
Στήριξη 12	11000	14,249	0,00000	8900	11,528	0,00000
Στήριξη 13	10350	13,407	0,00000	8250	10,687	-0,00003
Στήριξη 14	9700	12,565	0,00000	7600	9,845	-0,00007
Στήριξη 15	9050	11,723	0,00000	6950	9,003	-0,00006
Στήριξη 16	8400	10,881	-0,00002	6300	8,161	0,00019
Στήριξη 17	7750	10,039	-0,00006	5650	7,319	0,00091
Στήριξη 18	7100	9,197	-0,00008	5000	6,477	0,00181
Στήριξη 19	6450	8,355	0,00009	4350	5,635	0,00069
Στήριξη 20	5800	7,513	0,00070	3700	4,793	-0,00760
Στήριξη 21	5150	6,671	0,00165	3050	3,951	-0,02720
Στήριξη 22	4500	5,829	0,00135	2400	3,109	-0,04317
Στήριξη 23	3850	4,987	-0,00472	1750	2,267	0,01308
Στήριξη 24	3200	4,145	-0,02187	1100	1,425	0,27296
Στήριξη 25	2550	3,303	-0,04220	450	0,583	0,77339
Στήριξη 26	1900	2,461	-0,01264	200	0,259	0,94373
Στήριξη 27	1250	1,619	0,18825	850	1,101	0,44703
Στήριξη 28	600	0,777	0,65008	1500	1,943	0,08136
Στήριξη 29	50	0,065	0,99598	2150	2,785	-0,03630
Στήριξη 30	700	0,907	0,56692	2800	3,627	-0,03593
Στήριξη 31	1350	1,749	0,14046	3450	4,469	-0,01388
Στήριξη 32	2000	2,591	-0,02463	4100	5,311	-0,00130
Στήριξη 33	2650	3,433	-0,04021	4750	6,153	0,00183
Στήριξη 34	3300	4,275	-0,01850	5400	6,995	0,00129
Στήριξη 35	3950	5,117	-0,00316	6050	7,837	0,00040
Στήριξη 36	4600	5,959	0,00162	6700	8,679	-0,00001

Πίνακας 5.16 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $C=0,124 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	6650	8,614	0,00001	4550	5,894	0,00150
Στήριξη 2	6000	7,772	0,00045	3900	5,052	-0,00390
Στήριξη 3	5350	6,930	0,00137	3250	4,210	-0,02016
Στήριξη 4	4700	6,088	0,00179	2600	3,368	-0,04132
Στήριξη 5	4050	5,246	-0,00186	1950	2,526	-0,01911
Στήριξη 6	3400	4,404	-0,01536	1300	1,684	0,16350
Στήριξη 7	2750	3,562	-0,03749	650	0,842	0,60836
Στήριξη 8	2100	2,720	-0,03316	0	0,000	1,00000
Στήριξη 9	1450	1,878	0,09943	650	0,842	0,60836
Στήριξη 10	800	1,036	0,48602	1300	1,684	0,16350
Στήριξη 11	150	0,194	0,96690	1950	2,526	-0,01911
Στήριξη 12	500	0,648	0,73300	2600	3,368	-0,04132
Στήριξη 13	1150	1,490	0,24299	3250	4,210	-0,02016
Στήριξη 14	1800	2,332	0,00338	3900	5,052	-0,00390
Στήριξη 15	2450	3,174	-0,04317	4550	5,894	0,00150
Στήριξη 16	3100	4,016	-0,02540	5200	6,736	0,00159
Στήριξη 17	3750	4,858	-0,00656	5850	7,578	0,00063
Στήριξη 18	4400	5,699	0,00095	6500	8,420	0,00007
Στήριξη 19	5050	6,541	0,00176	7150	9,262	-0,00008
Στήριξη 20	5700	7,383	0,00084	7800	10,104	-0,00006
Στήριξη 21	6350	8,225	0,00015	8450	10,946	-0,00002
Στήριξη 22	7000	9,067	-0,00007	9100	11,788	0,00000
Στήριξη 23	7650	9,909	-0,00007	9750	12,630	0,00000
Στήριξη 24	8300	10,751	-0,00003	10400	13,472	0,00000
Στήριξη 25	8950	11,593	0,00000	11050	14,313	0,00000
Στήριξη 26	9600	12,435	0,00000	11700	15,155	0,00000
Στήριξη 27	10250	13,277	0,00000	12350	15,997	0,00000
Στήριξη 28	10900	14,119	0,00000	13000	16,839	0,00000
Στήριξη 29	11550	14,961	0,00000	13650	17,681	0,00000
Στήριξη 30	12200	15,803	0,00000	14300	18,523	0,00000
Στήριξη 31	12850	16,645	0,00000	14950	19,365	0,00000
Στήριξη 32	13500	17,487	0,00000	15600	20,207	0,00000
Στήριξη 33	14150	18,329	0,00000	16250	21,049	0,00000
Στήριξη 34	14800	19,171	0,00000	16900	21,891	0,00000
Στήριξη 35	15450	20,013	0,00000	17550	22,733	0,00000
Στήριξη 36	16100	20,855	0,00000	18200	23,575	0,00000

Πίνακας 5.17 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $C=0,124 \text{ N/mm}^3$ και φορτίο 65 kN.

A/A ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00151	0,001	0,041
Στήριξη 2	-0,00345	-0,003	-0,094
Στήριξη 3	-0,01879	-0,014	-0,514
Στήριξη 4	-0,03953	-0,030	-1,082
Στήριξη 5	-0,02096	-0,016	-0,574
Στήριξη 6	0,14814	0,112	4,054
Στήριξη 7	0,57086	0,433	15,621
Στήριξη 8	0,96684	0,733	26,457
Στήριξη 9	0,70779	0,536	19,368
Στήριξη 10	0,64952	0,492	17,773
Στήριξη 11	0,94780	0,718	25,936
Στήριξη 12	0,69168	0,524	18,927
Στήριξη 13	0,22280	0,169	6,097
Στήριξη 14	-0,00059	0,000	-0,016
Στήριξη 15	-0,04173	-0,032	-1,142
Στήριξη 16	-0,02365	-0,018	-0,647
Στήριξη 17	-0,00508	-0,004	-0,139
Στήριξη 18	0,00275	0,002	0,075
Στήριξη 19	0,00247	0,002	0,068
Στήριξη 20	-0,00612	-0,005	-0,168
Στήριξη 21	-0,02542	-0,019	-0,695
Στήριξη 22	-0,04188	-0,032	-1,146
Στήριξη 23	0,00830	0,006	0,227
Στήριξη 24	0,25106	0,190	6,870
Στήριξη 25	0,73118	0,554	20,008
Στήριξη 26	0,93109	0,706	25,478
Στήριξη 27	0,63529	0,481	17,384
Στήριξη 28	0,73144	0,554	20,015
Στήριξη 29	0,95969	0,727	26,261
Στήριξη 30	0,53098	0,402	14,530
Στήριξη 31	0,12658	0,096	3,464
Στήριξη 32	-0,02593	-0,020	-0,710
Στήριξη 33	-0,03838	-0,029	-1,050
Στήριξη 34	-0,01721	-0,013	-0,471
Στήριξη 35	-0,00275	-0,002	-0,075
Στήριξη 36	0,00162	0,001	0,044

ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΗΣΑΠ ΜΕ $c=18,8 \text{ kN/mm}$ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN **Πίνακας 5.18** Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $c=18,8 \text{ kN/mm}$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	18150	20,011	0,00000	16050	17,696	0,00000
Στήριξη 2	17500	19,294	0,00000	15400	16,979	0,00000
Στήριξη 3	16850	18,578	0,00000	14750	16,262	0,00000
Στήριξη 4	16200	17,861	0,00000	14100	15,546	0,00000
Στήριξη 5	15550	17,144	0,00000	13450	14,829	0,00000
Στήριξη 6	14900	16,428	0,00000	12800	14,112	0,00000
Στήριξη 7	14250	15,711	0,00000	12150	13,396	0,00000
Στήριξη 8	13600	14,994	0,00000	11500	12,679	0,00000
Στήριξη 9	12950	14,278	0,00000	10850	11,963	0,00000
Στήριξη 10	12300	13,561	0,00000	10200	11,246	-0,00001
Στήριξη 11	11650	12,845	0,00000	9550	10,529	-0,00004
Στήριξη 12	11000	12,128	0,00000	8900	9,813	-0,00007
Στήριξη 13	10350	11,411	-0,00001	8250	9,096	-0,00007
Στήριξη 14	9700	10,695	-0,00003	7600	8,379	0,00008
Στήριξη 15	9050	9,978	-0,00006	6950	7,663	0,00055
Στήριξη 16	8400	9,261	-0,00008	6300	6,946	0,00135
Στήριξη 17	7750	8,545	0,00003	5650	6,229	0,00186
Στήριξη 18	7100	7,828	0,00041	5000	5,513	0,00008
Στήριξη 19	6450	7,111	0,00115	4350	4,796	-0,00754
Στήριξη 20	5800	6,395	0,00185	3700	4,079	-0,02365
Στήριξη 21	5150	5,678	0,00087	3050	3,363	-0,04139
Στήριξη 22	4500	4,961	-0,00506	2400	2,646	-0,02867
Στήριξη 23	3850	4,245	-0,01926	1750	1,929	0,08501
Στήριξη 24	3200	3,528	-0,03826	1100	1,213	0,38271
Στήριξη 25	2550	2,811	-0,03738	450	0,496	0,82531
Στήριξη 26	1900	2,095	0,04498	200	0,221	0,95813
Στήριξη 27	1250	1,378	0,29563	850	0,937	0,54764
Στήριξη 28	600	0,662	0,72423	1500	1,654	0,17480
Στήριξη 29	50	0,055	0,99707	2150	2,370	-0,00188
Στήριξη 30	700	0,772	0,65358	2800	3,087	-0,04308
Στήριξη 31	1350	1,488	0,24354	3450	3,804	-0,03128
Στήριξη 32	2000	2,205	0,02347	4100	4,520	-0,01276
Στήριξη 33	2650	2,922	-0,04080	4750	5,237	-0,00194
Στήριξη 34	3300	3,638	-0,03565	5400	5,954	0,00162
Στήριξη 35	3950	4,355	-0,01652	6050	6,670	0,00165
Στήριξη 36	4600	5,072	-0,00367	6700	7,387	0,00083

Πίνακας 5.19 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $c=18,8 \text{ kN/mm}$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	6650	7,332	0,00089	4550	5,017	-0,00434
Στήριξη 2	6000	6,615	0,00170	3900	4,300	-0,01787
Στήριξη 3	5350	5,899	0,00151	3250	3,583	-0,03700
Στήριξη 4	4700	5,182	-0,00247	2600	2,867	-0,03931
Στήριξη 5	4050	4,465	-0,01397	1950	2,150	0,03374
Στήριξη 6	3400	3,749	-0,03278	1300	1,433	0,26896
Στήριξη 7	2750	3,032	-0,04266	650	0,717	0,68905
Στήριξη 8	2100	2,315	0,00571	0	0,000	1,00000
Στήριξη 9	1450	1,599	0,19645	650	0,717	0,68905
Στήριξη 10	800	0,882	0,58267	1300	1,433	0,26896
Στήριξη 11	150	0,165	0,97554	1950	2,150	0,03374
Στήριξη 12	500	0,551	0,79266	2600	2,867	-0,03931
Στήριξη 13	1150	1,268	0,35255	3250	3,583	-0,03700
Στήριξη 14	1800	1,985	0,07058	3900	4,300	-0,01787
Στήριξη 15	2450	2,701	-0,03211	4550	5,017	-0,00434
Στήριξη 16	3100	3,418	-0,04048	5200	5,733	0,00107
Στήριξη 17	3750	4,135	-0,02216	5850	6,450	0,00182
Στήριξη 18	4400	4,851	-0,00666	6500	7,166	0,00109
Στήριξη 19	5050	5,568	0,00038	7150	7,883	0,00037
Στήριξη 20	5700	6,284	0,00187	7800	8,600	0,00001
Στήριξη 21	6350	7,001	0,00129	8450	9,316	-0,00008
Στήριξη 22	7000	7,718	0,00050	9100	10,033	-0,00006
Στήριξη 23	7650	8,434	0,00006	9750	10,750	-0,00003
Στήριξη 24	8300	9,151	-0,00007	10400	11,466	0,00000
Στήριξη 25	8950	9,868	-0,00007	11050	12,183	0,00000
Στήριξη 26	9600	10,584	-0,00003	11700	12,900	0,00000
Στήριξη 27	10250	11,301	-0,00001	12350	13,616	0,00000
Στήριξη 28	10900	12,018	0,00000	13000	14,333	0,00000
Στήριξη 29	11550	12,734	0,00000	13650	15,050	0,00000
Στήριξη 30	12200	13,451	0,00000	14300	15,766	0,00000
Στήριξη 31	12850	14,168	0,00000	14950	16,483	0,00000
Στήριξη 32	13500	14,884	0,00000	15600	17,200	0,00000
Στήριξη 33	14150	15,601	0,00000	16250	17,916	0,00000
Στήριξη 34	14800	16,318	0,00000	16900	18,633	0,00000
Στήριξη 35	15450	17,034	0,00000	17550	19,350	0,00000
Στήριξη 36	16100	17,751	0,00000	18200	20,066	0,00000

Πίνακας 5.20 Υπολογισμοί στην επιδομή των ΗΣΑΠ με $c=18,8 \text{ kN/mm}$ και φορτίο 65 kN .

Α/Α ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	-0,00344	-0,004	-0,080
Στήριξη 2	-0,01617	-0,020	-0,377
Στήριξη 3	-0,03548	-0,044	-0,826
Στήριξη 4	-0,04177	-0,051	-0,973
Στήριξη 5	0,01977	0,024	0,461
Στήριξη 6	0,23619	0,291	5,501
Στήριξη 7	0,64640	0,795	15,055
Στήριξη 8	1,00571	1,238	23,424
Στήριξη 9	0,88550	1,090	20,624
Στήριξη 10	0,85163	1,048	19,835
Στήριξη 11	1,00925	1,242	23,506
Στήριξη 12	0,75329	0,927	17,545
Στήριξη 13	0,31547	0,388	7,348
Στήριξη 14	0,05277	0,065	1,229
Στήριξη 15	-0,03596	-0,044	-0,837
Στήριξη 16	-0,03814	-0,047	-0,888
Στήριξη 17	-0,01845	-0,023	-0,430
Στήριξη 18	-0,00508	-0,006	-0,118
Στήριξη 19	-0,00565	-0,007	-0,132
Στήριξη 20	-0,01992	-0,025	-0,464
Στήριξη 21	-0,03932	-0,048	-0,916
Στήριξη 22	-0,03329	-0,041	-0,775
Στήριξη 23	0,06579	0,081	1,532
Στήριξη 24	0,34437	0,424	8,021
Στήριξη 25	0,78786	0,969	18,350
Στήριξη 26	1,00309	1,234	23,363
Στήριξη 27	0,84326	1,038	19,640
Στήριξη 28	0,89904	1,106	20,940
Στήριξη 29	0,99519	1,225	23,179
Στήριξη 30	0,61050	0,751	14,219
Στήριξη 31	0,21226	0,261	4,944
Στήριξη 32	0,01071	0,013	0,249
Στήριξη 33	-0,04274	-0,053	-0,995
Στήριξη 34	-0,03403	-0,042	-0,793
Στήριξη 35	-0,01487	-0,018	-0,346
Στήριξη 36	-0,00283	-0,003	-0,066

ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕ $C=0,137 \text{ N/mm}^3$
ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

Πίνακας 5.21 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $C=0,137 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	n_i
Στήριξη 1	18640	21,206	0,00000	16540	18,817	0,00000
Στήριξη 2	18010	20,489	0,00000	15910	18,100	0,00000
Στήριξη 3	17380	19,772	0,00000	15280	17,383	0,00000
Στήριξη 4	16750	19,056	0,00000	14650	16,667	0,00000
Στήριξη 5	16120	18,339	0,00000	14020	15,950	0,00000
Στήριξη 6	15490	17,622	0,00000	13390	15,233	0,00000
Στήριξη 7	14860	16,906	0,00000	12760	14,516	0,00000
Στήριξη 8	14230	16,189	0,00000	12130	13,800	0,00000
Στήριξη 9	13600	15,472	0,00000	11500	13,083	0,00000
Στήριξη 10	12970	14,755	0,00000	10870	12,366	0,00000
Στήριξη 11	12340	14,039	0,00000	10240	11,650	0,00000
Στήριξη 12	11710	13,322	0,00000	9610	10,933	-0,00002
Στήριξη 13	11080	12,605	0,00000	8980	10,216	-0,00005
Στήριξη 14	10450	11,889	0,00000	8350	9,499	-0,00008
Στήριξη 15	9820	11,172	-0,00001	7720	8,783	-0,00003
Στήριξη 16	9190	10,455	-0,00004	7090	8,066	0,00024
Στήριξη 17	8560	9,738	-0,00007	6460	7,349	0,00087
Στήριξη 18	7930	9,022	-0,00006	5830	6,633	0,00169
Στήριξη 19	7300	8,305	0,00011	5200	5,916	0,00155
Στήριξη 20	6670	7,588	0,00062	4570	5,199	-0,00230
Στήριξη 21	6040	6,871	0,00144	3940	4,482	-0,01359
Στήριξη 22	5410	6,155	0,00183	3310	3,766	-0,03232
Στήριξη 23	4780	5,438	-0,00037	2680	3,049	-0,04282
Στήριξη 24	4150	4,721	-0,00882	2050	2,332	0,00329
Στήριξη 25	3520	4,005	-0,02571	1420	1,615	0,18972
Στήριξη 26	2890	3,288	-0,04238	790	0,899	0,57200
Στήριξη 27	2260	2,571	-0,02306	160	0,182	0,97071
Στήριξη 28	1630	1,854	0,10649	470	0,535	0,80261
Στήριξη 29	1000	1,138	0,42552	1100	1,251	0,36146
Στήριξη 30	370	0,421	0,86736	1730	1,968	0,07476
Στήριξη 31	260	0,296	0,92849	2360	2,685	-0,03115
Στήριξη 32	890	1,013	0,50060	2990	3,402	-0,04077
Στήριξη 33	1520	1,729	0,14720	3620	4,118	-0,02259
Στήριξη 34	2150	2,446	-0,01098	4250	4,835	-0,00691
Στήριξη 35	2780	3,163	-0,04319	4880	5,552	0,00030
Στήριξη 36	3410	3,879	-0,02919	5510	6,268	0,00187
Στήριξη 37	4040	4,596	-0,01119	6140	6,985	0,00130
Στήριξη 38	4670	5,313	-0,00128	6770	7,702	0,00052
Στήριξη 39	5300	6,030	0,00173	7400	8,419	0,00007

Πίνακας 5.22 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $C=0,137 \text{ N/mm}^3$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i
Στήριξη 1	7140	8,123	0,00021	5040	5,734	0,00107
Στήριξη 2	6510	7,406	0,00081	4410	5,017	-0,00433
Στήριξη 3	5880	6,689	0,00163	3780	4,300	-0,01786
Στήριξη 4	5250	5,973	0,00165	3150	3,584	-0,03699
Στήριξη 5	4620	5,256	-0,00177	2520	2,867	-0,03932
Στήριξη 6	3990	4,539	-0,01236	1890	2,150	0,03369
Στήριξη 7	3360	3,823	-0,03076	1260	1,433	0,26889
Στήριξη 8	2730	3,106	-0,04316	630	0,717	0,68900
Στήριξη 9	2100	2,389	-0,00426	0	0,000	1,00000
Στήριξη 10	1470	1,672	0,16780	630	0,717	0,68900
Στήριξη 11	840	0,956	0,53600	1260	1,433	0,26889
Στήριξη 12	210	0,239	0,95147	1890	2,150	0,03369
Στήριξη 13	420	0,478	0,83585	2520	2,867	-0,03932
Στήριξη 14	1050	1,195	0,39294	3150	3,584	-0,03699
Στήριξη 15	1680	1,911	0,09002	3780	4,300	-0,01786
Στήριξη 16	2310	2,628	-0,02742	4410	5,017	-0,00433
Στήριξη 17	2940	3,345	-0,04166	5040	5,734	0,00107
Στήριξη 18	3570	4,061	-0,02414	5670	6,451	0,00182
Στήριξη 19	4200	4,778	-0,00784	6300	7,167	0,00109
Στήριξη 20	4830	5,495	-0,00002	6930	7,884	0,00037
Στήριξη 21	5460	6,212	0,00186	7560	8,601	0,00001
Στήριξη 22	6090	6,928	0,00137	8190	9,317	-0,00008
Στήριξη 23	6720	7,645	0,00057	8820	10,034	-0,00006
Στήριξη 24	7350	8,362	0,00009	9450	10,751	-0,00003
Στήριξη 25	7980	9,078	-0,00007	10080	11,468	0,00000
Στήριξη 26	8610	9,795	-0,00007	10710	12,184	0,00000
Στήριξη 27	9240	10,512	-0,00004	11340	12,901	0,00000
Στήριξη 28	9870	11,229	-0,00001	11970	13,618	0,00000
Στήριξη 29	10500	11,945	0,00000	12600	14,334	0,00000
Στήριξη 30	11130	12,662	0,00000	13230	15,051	0,00000
Στήριξη 31	11760	13,379	0,00000	13860	15,768	0,00000
Στήριξη 32	12390	14,096	0,00000	14490	16,485	0,00000
Στήριξη 33	13020	14,812	0,00000	15120	17,201	0,00000
Στήριξη 34	13650	15,529	0,00000	15750	17,918	0,00000
Στήριξη 35	14280	16,246	0,00000	16380	18,635	0,00000
Στήριξη 36	14910	16,962	0,00000	17010	19,352	0,00000
Στήριξη 37	15540	17,679	0,00000	17640	20,068	0,00000
Στήριξη 38	16170	18,396	0,00000	18270	20,785	0,00000
Στήριξη 39	16800	19,113	0,00000	18900	21,502	0,00000

Πίνακας 5.23 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $C=0,137 \text{ N/mm}^3$
και φορτίο 65 kN.

Α/Α ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00128	0,001	0,030
Στήριξη 2	-0,00352	-0,004	-0,082
Στήριξη 3	-0,01623	-0,018	-0,378
Στήριξη 4	-0,03534	-0,040	-0,823
Στήριξη 5	-0,04108	-0,046	-0,957
Στήριξη 6	0,02133	0,024	0,497
Στήριξη 7	0,23813	0,267	5,547
Στήριξη 8	0,64585	0,723	15,044
Στήριξη 9	0,99574	1,115	23,194
Στήριξη 10	0,85680	0,959	19,958
Στήριξη 11	0,80489	0,901	18,749
Στήριξη 12	0,98515	1,103	22,948
Στήριξη 13	0,79648	0,892	18,553
Στήριξη 14	0,35587	0,399	8,289
Στήριξη 15	0,07212	0,081	1,680
Στήριξη 16	-0,03155	-0,035	-0,735
Στήριξη 17	-0,03979	-0,045	-0,927
Στήριξη 18	-0,02069	-0,023	-0,482
Στήριξη 19	-0,00509	-0,006	-0,119
Στήριξη 20	-0,00133	-0,001	-0,031
Στήριξη 21	-0,01028	-0,012	-0,239
Στήριξη 22	-0,02919	-0,033	-0,680
Στήριξη 23	-0,04268	-0,048	-0,994
Στήριξη 24	-0,00547	-0,006	-0,127
Στήριξη 25	0,16394	0,184	3,819
Στήριξη 26	0,52956	0,593	12,335
Στήριξη 27	0,94761	1,061	22,073
Στήριξη 28	0,90910	1,018	21,176
Στήριξη 29	0,78697	0,881	18,331
Στήριξη 30	0,94213	1,055	21,945
Στήριξη 31	0,89735	1,005	20,902
Στήριξη 32	0,45983	0,515	10,711
Στήριξη 33	0,12461	0,140	2,903
Στήριξη 34	-0,01790	-0,020	-0,417
Στήριξη 35	-0,04290	-0,048	-0,999
Στήριξη 36	-0,02732	-0,031	-0,636
Στήριξη 37	-0,00989	-0,011	-0,230
Στήριξη 38	-0,00077	-0,001	-0,018
Στήριξη 39	0,00179	0,002	0,042

ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕ $c=40 \text{ kN/mm}$
ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ 65 kN

Πίνακας 5.24 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $c=40 \text{ kN/mm}$.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 1			ΑΞΟΝΑΣ 2		
	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i	$x_i \text{ (mm)}$	$\xi_i = x_i / L$	η_i
Στήριξη 1	18640	24,887	0,00000	16540	22,083	0,00000
Στήριξη 2	18010	24,045	0,00000	15910	21,242	0,00000
Στήριξη 3	17380	23,204	0,00000	15280	20,401	0,00000
Στήριξη 4	16750	22,363	0,00000	14650	19,559	0,00000
Στήριξη 5	16120	21,522	0,00000	14020	18,718	0,00000
Στήριξη 6	15490	20,681	0,00000	13390	17,877	0,00000
Στήριξη 7	14860	19,840	0,00000	12760	17,036	0,00000
Στήριξη 8	14230	18,999	0,00000	12130	16,195	0,00000
Στήριξη 9	13600	18,158	0,00000	11500	15,354	0,00000
Στήριξη 10	12970	17,316	0,00000	10870	14,513	0,00000
Στήριξη 11	12340	16,475	0,00000	10240	13,672	0,00000
Στήριξη 12	11710	15,634	0,00000	9610	12,830	0,00000
Στήριξη 13	11080	14,793	0,00000	8980	11,989	0,00000
Στήριξη 14	10450	13,952	0,00000	8350	11,148	-0,00001
Στήριξη 15	9820	13,111	0,00000	7720	10,307	-0,00005
Στήριξη 16	9190	12,270	0,00000	7090	9,466	-0,00008
Στήριξη 17	8560	11,429	-0,00001	6460	8,625	0,00000
Στήριξη 18	7930	10,587	-0,00003	5830	7,784	0,00044
Στήριξη 19	7300	9,746	-0,00007	5200	6,943	0,00135
Στήριξη 20	6670	8,905	-0,00005	4570	6,101	0,00180
Στήριξη 21	6040	8,064	0,00024	3940	5,260	-0,00173
Στήριξη 22	5410	7,223	0,00102	3310	4,419	-0,01501
Στήριξη 23	4780	6,382	0,00185	2680	3,578	-0,03712
Στήριξη 24	4150	5,541	0,00024	2050	2,737	-0,03404
Στήριξη 25	3520	4,700	-0,00921	1420	1,896	0,09436
Στήριξη 26	2890	3,858	-0,02977	790	1,055	0,47479
Στήριξη 27	2260	3,017	-0,04249	160	0,214	0,96052
Στήριξη 28	1630	2,176	0,02872	470	0,628	0,74569
Στήριξη 29	1000	1,335	0,31730	1100	1,469	0,25252
Στήριξη 30	370	0,494	0,82655	1730	2,310	0,00652
Στήριξη 31	260	0,347	0,90498	2360	3,151	-0,04321
Στήριξη 32	890	1,188	0,39648	2990	3,992	-0,02606
Στήριξη 33	1520	2,029	0,05967	3620	4,833	-0,00694
Στήριξη 34	2150	2,870	-0,03943	4250	5,674	0,00085
Στήριξη 35	2780	3,712	-0,03376	4880	6,515	0,00178
Στήριξη 36	3410	4,553	-0,01208	5510	7,356	0,00087
Στήριξη 37	4040	5,394	-0,00067	6140	8,198	0,00017
Στήριξη 38	4670	6,235	0,00186	6770	9,039	-0,00007
Στήριξη 39	5300	7,076	0,00120	7400	9,880	-0,00007

Πίνακας 5.25 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $c=40$ kN/mm.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ	ΑΞΟΝΑΣ 3			ΑΞΟΝΑΣ 4		
	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	η_i	x_i (mm)	$\xi_i = x_i / L$	η_i
Στήριξη 1	7140	9,533	-0,00008	5040	6,729	0,00159
Στήριξη 2	6510	8,692	-0,00001	4410	5,888	0,00149
Στήριξη 3	5880	7,850	0,00039	3780	5,047	-0,00396
Στήριξη 4	5250	7,009	0,00128	3150	4,206	-0,02028
Στήριξη 5	4620	6,168	0,00184	2520	3,364	-0,04137
Στήριξη 6	3990	5,327	-0,00117	1890	2,523	-0,01887
Στήριξη 7	3360	4,486	-0,01351	1260	1,682	0,16412
Στήριξη 8	2730	3,645	-0,03549	630	0,841	0,60890
Στήριξη 9	2100	2,804	-0,03708	0	0,000	1,00000
Στήριξη 10	1470	1,963	0,07619	630	0,841	0,60890
Στήριξη 11	840	1,121	0,43496	1260	1,682	0,16412
Στήριξη 12	210	0,280	0,93506	1890	2,523	-0,01887
Στήριξη 13	420	0,561	0,78692	2520	3,364	-0,04137
Στήριξη 14	1050	1,402	0,28401	3150	4,206	-0,02028
Στήριξη 15	1680	2,243	0,01696	3780	5,047	-0,00396
Στήριξη 16	2310	3,084	-0,04307	4410	5,888	0,00149
Στήριξη 17	2940	3,925	-0,02791	5040	6,729	0,00159
Στήριξη 18	3570	4,766	-0,00804	5670	7,570	0,00064
Στήριξη 19	4200	5,607	0,00057	6300	8,411	0,00007
Στήριξη 20	4830	6,449	0,00182	6930	9,252	-0,00008
Στήριξη 21	5460	7,290	0,00094	7560	10,093	-0,00006
Στήριξη 22	6090	8,131	0,00020	8190	10,935	-0,00002
Στήριξη 23	6720	8,972	-0,00006	8820	11,776	0,00000
Στήριξη 24	7350	9,813	-0,00007	9450	12,617	0,00000
Στήριξη 25	7980	10,654	-0,00003	10080	13,458	0,00000
Στήριξη 26	8610	11,495	0,00000	10710	14,299	0,00000
Στήριξη 27	9240	12,336	0,00000	11340	15,140	0,00000
Στήριξη 28	9870	13,178	0,00000	11970	15,981	0,00000
Στήριξη 29	10500	14,019	0,00000	12600	16,822	0,00000
Στήριξη 30	11130	14,860	0,00000	13230	17,664	0,00000
Στήριξη 31	11760	15,701	0,00000	13860	18,505	0,00000
Στήριξη 32	12390	16,542	0,00000	14490	19,346	0,00000
Στήριξη 33	13020	17,383	0,00000	15120	20,187	0,00000
Στήριξη 34	13650	18,224	0,00000	15750	21,028	0,00000
Στήριξη 35	14280	19,065	0,00000	16380	21,869	0,00000
Στήριξη 36	14910	19,907	0,00000	17010	22,710	0,00000
Στήριξη 37	15540	20,748	0,00000	17640	23,551	0,00000
Στήριξη 38	16170	21,589	0,00000	18270	24,393	0,00000
Στήριξη 39	16800	22,430	0,00000	18900	25,234	0,00000

Πίνακας 5.26 Υπολογισμοί στην επιδομή του Αττικό Μετρό με $c=40$ kN/mm και φορτίο 65 kN.

A/A ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΑ 4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	ΒΥΘΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ (mm)	ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ (kN)
Στήριξη 1	0,00151	0,001	0,041
Στήριξη 2	0,00148	0,001	0,040
Στήριξη 3	-0,00357	-0,002	-0,098
Στήριξη 4	-0,01900	-0,013	-0,519
Στήριξη 5	-0,03953	-0,027	-1,081
Στήριξη 6	-0,02004	-0,014	-0,548
Στήριξη 7	0,15061	0,104	4,117
Στήριξη 8	0,57341	0,397	15,675
Στήριξη 9	0,96292	0,667	26,323
Στήριξη 10	0,68509	0,474	18,728
Στήριξη 11	0,59908	0,415	16,377
Στήριξη 12	0,91619	0,634	25,045
Στήριξη 13	0,74556	0,516	20,381
Στήριξη 14	0,26373	0,183	7,209
Στήριξη 15	0,01295	0,009	0,354
Στήριξη 16	-0,04165	-0,029	-1,139
Στήριξη 17	-0,02632	-0,018	-0,720
Στήριξη 18	-0,00699	-0,005	-0,191
Στήριξη 19	0,00192	0,001	0,052
Στήριξη 20	0,00349	0,002	0,095
Στήριξη 21	-0,00060	0,000	-0,016
Στήριξη 22	-0,01381	-0,010	-0,377
Στήριξη 23	-0,03533	-0,024	-0,966
Στήριξη 24	-0,03387	-0,023	-0,926
Στήριξη 25	0,08512	0,059	2,327
Στήριξη 26	0,44501	0,308	12,165
Στήριξη 27	0,91803	0,636	25,096
Στήριξη 28	0,77441	0,536	21,170
Στήριξη 29	0,56982	0,395	15,577
Στήριξη 30	0,83307	0,577	22,773
Στήριξη 31	0,86177	0,597	23,558
Στήριξη 32	0,37043	0,257	10,126
Στήριξη 33	0,05272	0,037	1,441
Στήριξη 34	-0,03857	-0,027	-1,054
Στήριξη 35	-0,03198	-0,022	-0,874
Στήριξη 36	-0,01121	-0,008	-0,307
Στήριξη 37	-0,00050	0,000	-0,014
Στήριξη 38	0,00180	0,001	0,049
Στήριξη 39	0,00113	0,001	0,031

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Απόστολος Φώλας «Έδραση σιδηροδρομικής γραμμής σε πλάκα σκυροδέματος» ,Α.Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα διοίκησης και διαχείριση τεχνικών έργων. Θεσσαλονίκη 2008-2009.

<http://www.iforail-ose.gr>

2. Σ.Γ.Τσουκαντάς, Κ.Σ.Γιαννάκος, Τ.Δ.Τοπιντζής «Συστήματα σταθερής επιδομής RHEDA 2000 από δομοστατική άποψη. Η πλέον σύγχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας της επιδομής στα σιδηροδρομικά έργα», 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος ,ΤΕΕ,ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη 25-27 Οκτωβρίου 2006.

3. Λυμπέρης Κ. «Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές», Τόμος 1.

4. <http://www.britpave-bus-rail.org.uk/rail/why-build-slabtrack.html>

5. Coenraad Esveld, «Recent developments in slab track», European railway review,23/05/03.

http://www.esveld.com/Download/TUD/ERR_Slabtrack.pdf

6. Hubert Rhomberg, « Modern superstructures for railway high speed lines, Types, Characteristics and installation Technology».

<http://conference.europoint.eu/highspeed2009/hubetrhomberg>

7. David N.Bilow, «Slab track design and construction», ppt of Portland Cement Association.

<http://trbrail.com/pdfs/LTK/Session1TedSussman/Sess1Pres1SlabTrackDesignConstructionBilow.pdf>

8. Coenraad Esveld, «Modern Railway track», 2001 MRT Productions.

9. Rail one, «Railways», 2011, brochure.

<http://www.railone.com/en/main-nav/products/>

10. Rail one, «Rheda 2000 ballastless track system», 2011, brochure.

<http://www.railone.com/en/main-nav/products/>

- 11. Coenraad Esveld**, «Slab Track: A competitive solution», Technical University of Delft, Faculty of Civil Engineering, Section of roads and railways, 08/02/1999.
- 12. VOSSLOH**, « High speed in Europe-Slab track systems»,
<http://ict.illinois.edu/railroad/CEE/pdf/PPT's/Spring09/Steidl%202-27-09.pdf>
- 13.** <http://www.vossloh-fastening-systems.de/cms/en/products/>
- 14. Σ.Γ. Τσουκαντάς**, « Μελέτη Τσουκαντά για ανοικτή γραμμή στον ΗΣΑΠ».
- 15. Λάθυρη Βασιλική**, « Διερεύνηση δείκτη ακαμψίας σκυρογραμμής και γραμμής με σταθερή επιδομή τύπου Stedef », Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής υποδομής, Αθήνα, Μάρτιος 2012.
- 16. Σπυρίδων Ανδρέας**, « Σταθερή επιδομή συστημάτων μετρό. Επιλογή δομικών στοιχείων. Εφαρμογή στο μετρό της Αθήνας και Θεσσαλονίκης.», Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών, Συγκοινωνιακής υποδομής, Διαχείρισης Έργων και Ανάπτυξης, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2010.
- 17. Rajneesh Mathur & S.K.Neji**, « Development on foreign railways», Senior professional course P. Way-project, Indian Railway Institute of civil engineering, Pune, October 2005.
- 18. ΗΣΑΠ** «Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων-Τεχνικές προδιαγραφές».
- 19.** <http://www.ameto.gr>