ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διερεύνηση δείκτη ακαμψίας σκυρογραμμής και γραμμής με σταθερή επιδομή τύπου Stedef

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ Κ. ΛΑΘΥΡΗ

Επιβλέπων : Λυμπέρης Κωνσταντίνος

Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Μαρτίου 2012

(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)
.....	……..……	……..
Κανελλαΐδης Γ.	Λοΐζος Α.	Λυμπέρης Κ.
Καθηγητής	Καθηγητής	Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2012

(Υπογραφή)

……

ΛΑΘΥΡΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ελαστικής ιδιότητας του σκύρου σε μια κλασική σκυρογραμμή με ολόσωμους στρωτήρες B70, και αυτής του ελαστικού υποθέματος, "σόλα", σε μια γραμμή με σταθερή επιδομή τύπου STEDEF, όπως αυτή που έχει τοποθετηθεί στο ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Η ελαστική ιδιότητα της στρώσης του σκύρου χαρακτηρίζεται από τον Δείκτη Αντίδρασης Εδάφους C [N/mm^3] και σχετίζεται με τον δείκτη ακαμψίας c (συντελεστής ελατηρίου) [kN/mm].

Θεωρώντας γνωστή - από πλήθος δημοσιεύσεων – τη συμπεριφορά των ιδιοτήτων της κλασικής σκυρογραμμής, κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση της συμπεριφοράς των ελαστικών υλικών, μόνο της σταθερής επιδομής in situ. Προς τούτο έγινε συλλογή στοιχείων συμπεριφοράς της ελαστικής "σόλας", μέσω μετρήσεων βύθισης στρωτήρα στη γραμμή του Αττικό Μετρό κατά τη διέλευση των συρμών, με μέθοδο που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επιπλέον, για τη συμπλήρωση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, έγινε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. πειραματική εκτίμηση του δείκτη ακαμψίας των ελαστικών υλικών που τοποθετούνται στη συγκεκριμένη σταθερή επιδομή.

Λέξεις κλειδιά : σταθερή επιδομή, σκυρογραμμή, Δείκτης Αντίδρασης Εδάφους, δείκτης ακαμψίας (συντελεστής ελατηρίου), βύθιση, έρμα, ελαστικό υπόθεμα

ABSTRACT

The purpose of the present thesis is the examination of the elastic property of the ballast in a ballast track with B70 sleeper and the elastic pad's in the track which is constructed in Attiko Metro (STEDEF). The ballast's elastic property is characterized by the bedding module C [N/mm^3] and is connected with the stiffness coefficient (spring factor) [N/mm]

Considering known – from various publications – the behavior of ballast track's properties, it was only necessary to study the behavior of the elastic pads in slab track in situ. Therefore, the data collection for elastic pad's properties was made by measuring the deflection of the sleeper at Attiko Metro. The method we used for the deflection's measuring has been evolved in the present thesis. Moreover, for the completion of the data, we calculated the stiffness indicator of all the elastic pads that is used in STEDEF at the laboratory.

Key words : slab track, ballast track, bedding module, stiffness coefficient (spring factor), deflection, ballast, elastic pad

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....7
1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....11
2 ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 15
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 15
2.2 ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ 15
2.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 17
2.3.1 ΕΙΔΗ ΕΠΙΔΟΜΗΣ 17
2.3.1.1 ΚΛΑΣΙΚΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ 17
2.3.1.2 ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (SLAB TRACK).....18
2.3.1.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (STEDEF).....20
2.3.1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ……22
2.3.2 ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....23
2.3.2.1 ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ 23
2.3.2.2 ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ.....25
2.3.2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ 26
3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ.....29
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 29
3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ [3] 30
3.3 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ[3] 32
3.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΣΤΡΩΤΗΡΑ[3] 35
3.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c –ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ C.....42
3.5.1 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ……44
4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΟΡΓΑΝΟ PCD-300A ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ……47
4.1 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 47
4.2 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΣΤΟ ΣΥΝΤΑΓΜΑ 48

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ PCD-300A ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PCD-30A 51
4.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ 55
4.5 ΟΙ ΣΥΡΜΟΙ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ 58
4.5.1 ΦΟΡΤΙΟ ΤΡΟΧΟΥ 65
4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 67
4.6.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΣΤΟ ΣΥΝΤΑΓΜΑ 67
4.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 69
4.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ 80
4.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 82
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c 83
5.1 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΔΙΕΞΕΓΩΓΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ 83
5.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΔΟΚΙΜΩΝ 84
5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 86
5.3.1 RAIL PAD 87
5.3.2 ΕΛΑΣΤΙΚΗ "ΣΟΛΑ" 90
5.3.3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ "ΜΠΟΤΑ" 93
5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ $c_{ολικό}$ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ STEDEF ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 96
6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ($c_{ολικό}$) 97
6.1 ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (STEDEF) 97
6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΒΥΘΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ 102
6.3 ΣΚΥΡΟΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΣΤΡΩΤΉΡΑ B70 104
7 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ 109
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 111
9 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΟΜΕΝΕΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ 113

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....129
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....153
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....155
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....157

1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **[1]** αναφέρεται στην παράγραφο 4.373 ότι:

« Στην επιδομή χωρίς σκύρο, την λεγόμενη Σταθερή Επιδομή (Σ. Ε.), αντικαθίσταται η στρώση σκύρου από μία πλάκα Μπετόν. Στις συνήθεις κατασκευές Σταθερής Επιδομής διατηρείται το σύστημα του εγκάρσιου στρωτήρα με χρήση ολόσωμων ή διμερών στρωτήρων, οι οποίοι τοποθετούνται σε εσοχές της πλάκας μπετόν. Επειδή για λόγους φθοράς των υλικών και άνεσης των επιβατών πρέπει να αποφεύγεται μία τελείως άκαμπτη συμπεριφορά της γραμμής, τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις ενδιάμεσα ελαστικά υποθέματα.»

Συνήθως στην κατασκευή της σταθερής επιδομής με διμερείς στρωτήρες (Σ.Ε. τύπου STEDEF), το υπόθεμα είναι μία ελαστική "σόλα" (**Εικόνα 1.1**), η οποία τοποθετείται κάτω από το μπετόν μπλοκ του στρωτήρα, όπου όλο μαζί, στρωτήρας και "σόλα", τοποθετούνται εντός της ελαστικής "μπότας" (**Εικόνα 1.2**). όλο αυτό το σύστημα σκυροδετείται μέχρι το ύψος της "μπότας" (**Εικόνα 1.4**).

Επίσης αναφέρεται ότι «για τον υπολογισμό της σταθερής επιδομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Zimmermann, όπου μέχρι και την κάτω επιφάνεια του στρωτήρα ισχύει το ίδιο σκεπτικό», ήτοι:

«Η ελαστική ιδιότητα της σκυρόστρωσης, η οποία χαρακτηρίζεται από τον Δείκτη Αντίδρασης του Εδάφους (Δ.Α.Ε.) **C** [N/mm^3], αναλαμβάνεται στην περίπτωση του τύπου αυτού της Σταθερής Επιδομής από την ελαστική "σόλα"».

Στο **[2]** αναφέρεται ότι ως ελάχιστη τιμή του συνολικού δείκτη ακαμψίας για Μετρό λαμβάνεται 10 kN/mm. Στις προδιαγραφές επιδομής του Αττικό Μετρό η ελαστική "σόλα" λαμβάνεται με 370 daN/mm ήτοι 3,7 kN/mm, τιμή που θεωρείται πολύ χαμηλή. Αυτό δεν κατέστη εφικτό να διασταυρωθεί.

Οι παραπάνω αναφορές έδωσαν το έναυσμα για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας!

Έτσι, σκοπός της εργασίας έγινε:

«Η διερεύνηση της ελαστικής ιδιότητας του υλικού αυτού (ελαστική "σόλα") σε σχέση με την συμπεριφορά της κλασικής σκυρόστρωσης.»
Προς τούτο ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Περιγραφή γραμμής με σκύρο και της Σταθερής Επιδομής (**Κεφάλαιο 2.3**)
- Εμβάθυνση στην ελαστική συμπεριφορά του έρματος και των παραμέτρων που εκφράζουν ή περιγράφουν τη σκυρογραμμή (**Κεφάλαιο 3**)
- Μετρήσεις της βύθισης του στρωτήρα σε γραμμή όμοια με αυτή που περιγράφεται στην ερευνητική εργασία **[1]** του Πολυτεχνείου της Ζυρίχης ETH. Η όμοια αυτή γραμμή με Σταθερή Επιδομή απαντάται στο Αττικό Μετρό. Οι μετρήσεις γίνονται για να αποτιμηθεί το μέγεθος της υποχώρησης της ελαστικής "σόλας". (**Κεφάλαιο 4**)
- Εργαστηριακός έλεγχος “φόρτισης - υποχώρησης ” των υλικών: Rail pad (**Εικόνα 1.3**), ελαστικής "σόλας", ελαστικής "μπότας", προκειμένου να υπολογισθεί ο δείκτης ακαμψίας c [kN/mm] και ως εκ τούτου η ελαστική συμπεριφορά της γραμμής με Σταθερή Επιδομή. (**Κεφάλαιο 5**)

Εικόνα 1.1 : Ελαστική "σόλα"

Εικόνα 1.2 : Ελαστική "μπότα"

Εικόνα 1.3 : Rail pad (ελαστικό υπόθεμα κάτω από τη σιδηροτροχιά)

Εικόνα 1.4 : Σταθερή επιδομή στο Αττικό Μετρό

2

ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σιδηροδρομική γραμμή είναι μια αλληλουχία καθ' ύψος διαφόρων υλικών, που καθορίζουν την τελική της θέση και τις ιδιότητες, με τις οποίες «αντιδρά» στη «δράση» που δημιουργείται από την κίνηση ενός σιδηροδρομικού οχήματος. Η ελαστική της συμπεριφορά καθορίζει, εκτός των άλλων, και την προστασία της από συχνές φθορές τόσο των υλικών της όσο και των συρμών.

Το κάθε υλικό ή η κάθε στρώση που απαρτίζουν τη γραμμή μπορούν να προσομοιωθούν από ένα συνδυασμό «ελατηρίου με ελατηριακή σταθερά c_i »

Η σιδηροδρομική γραμμή περιλαμβάνει δύο επί μέρους κατασκευές:
α) Την υποδομή (στρώση διαμόρφωσης, βάση ή υπόβαση) και
β) Την επιδομή (σιδηροτροχιές, στρωτήρες, σύνδεσμοι, έρμα ή σταθερή επιδομή και μικρό υλικό)

2.2 ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ

Η υποδομή της γραμμής είναι το στρώμα του εδάφους πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η επιδομή της γραμμή 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, στην οποία καταλήγουν τα φορτία κυκλοφορίας

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

Για τον 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
- Στη σωστή συμπύκνωση του υλικού (Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές)
- Στη διαμόρφωση της κλίσης για καλύτερη αποστράγγιση και την κατασκευή ανάλογων τεχνικών έργων (τάφροι, στραγγιστήρια κ.λπ.)

2.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

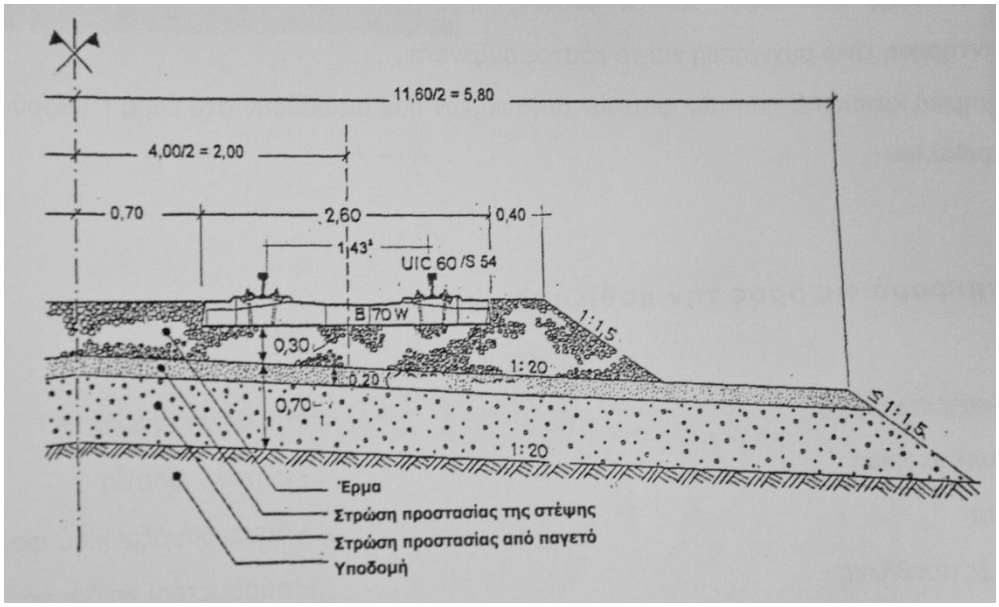
Η επιδομή της γραμμής αποτελείται από τα χαρακτηριστικά υλικά της που είναι οι σιδηροτροχιές, οι στρωτήρες, το έρμα και το μικρό υλικό. Σκοπός της επιδομής είναι η μεταβίβαση των δυνάμεων και των τάσεων, που προέρχονται από τη δράση των συρμών καθώς και από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, στην επιδομή.

2.3.1 ΕΙΔΗ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Υπάρχουν δύο είδη επιδομής:

- Η κλασική επιδομή με έρμα
- Η Σταθερή Επιδομή

2.3.1.1 ΚΛΑΣΙΚΗ ΕΠΙΔΟΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ



Σχήμα 2.1 : Κλασική επιδομή με έρμα

Η έδραση της κλασικής επιδομής αποτελείται από το έρμα, σαν ανώτερη στρώση ,(συνήθως σκύρα) και το υπόστρωμα του έρματος (κατάλληλα διαβαθμισμένο υλικό σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα).

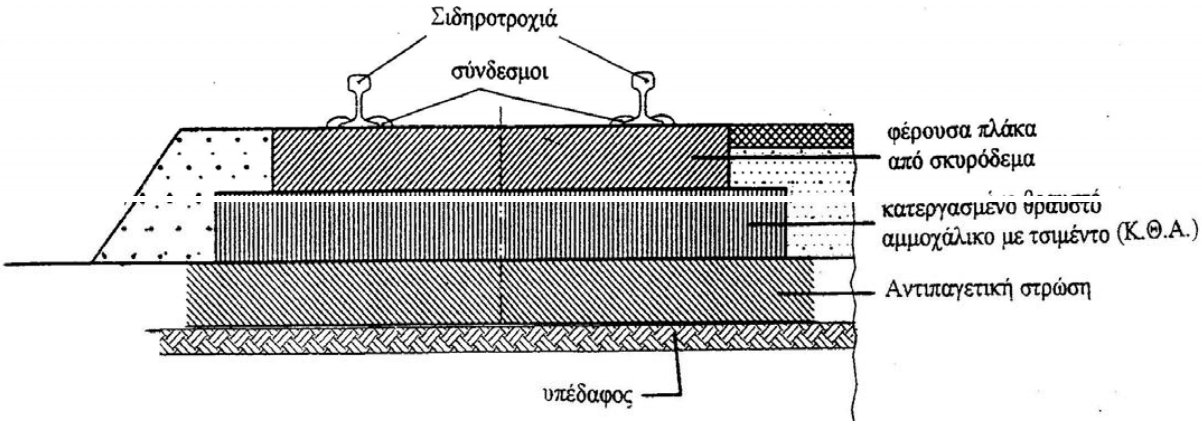
Η παρουσία του έρματος έχει σαν σκοπό:

- 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 υπογόμωσης 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 κύλισης

Η παρουσία του υποστρώματος του έρματος έχει σαν σκοπό:

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

2.3.1.2 ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (SLAB TRACK)



Σχήμα 2.2 : Σιδηροδρομική γραμμή, σύστημα σταθερής επιδομής

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

Υπό αυτές τις συνθήκες η διατήρηση της γεωμετρίας της γραμμής απαιτεί συχνότατες και δαπανηρότατες επεμβάσεις. Τα δε επιμέρους δομικά υλικά (στρωτήρες, σιδηροτροχιές, υλικά σύνδεσης κ.λπ.) υφίστανται ανεπίτρεπτες φθορές και χρήζουν αντικατάστασης πολύ νωρίτερα από τον αναμενόμενο χρόνο ζωής τους. Επιπλέον, στα συστήματα ΜΕΤΡΟ, η ύπαρξη στρώσης έρματος δυσχεραίνει τη συντήρηση της γραμμής με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους.

Οι αρνητικές αυτές εμπειρίες όλων των δικτύων οδήγησαν διεθνώς στην υιοθέτηση της σταθερής επιδομής. Με την κατασκευή της σταθερής επιδομής αίρονται ουσιαστικά τα περισσότερα μειονεκτήματα της σκυρογραμμής.

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 στη δοκιμαστική εφαρμογή στην αρχή και στη συνέχεια στην επέκτασή της στα διεθνή δίκτυα.

Σήμερα υπάρχουν αρκετά εγκεκριμένα συστήματα, περίπου δέκα (10) σε όλο τον κόσμο και άλλα τόσα που βρίσκονται στη διαδικασία έγκρισης.

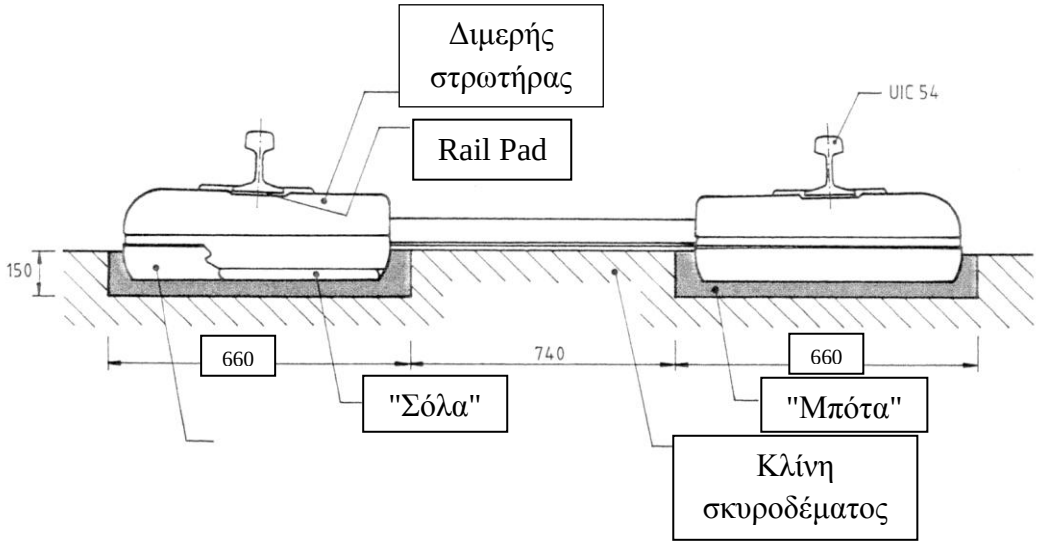
Τα πλέον γνωστά είναι:
RHEDA 2000, BERLIN, ZUBLIN, GETRAC, ATD, STEDEF, SONNEVILLE, WALO, EDILON, SHINKANSEN, IPA, OBB-PORR, ERS, BOEGL

Στην Ελλάδα έχουν τοποθετηθεί το σύστημα RHEDA 2000 (ΟΣΕ και ΗΣΑΠ) και το σύστημα STEDEF (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ).

2.3.1.3 Η ΕΠΙΔΟΜΗ ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (STEDEF)

Η Σιδηροδρομική Επιδομή στις σήραγγες του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, αποτελείται από το σύστημα STEDEF, ήτοι τροχιά ελαστικής στήριξης σε κλίνη σκυροδέματος.

Η γραμμή έχει κανονικό εύρος 1435mm, και αποτελείται από σιδηροτροχιές διατομής UIC 54, στερεωμένες σε διμερείς στρωτήρες - με μικροκυψελωτά πέλματα και ελαστικά περιβλήματα - ημιεγκιβωτισμένους στο σκυρόδεμα κλίνης τροχιάς. Στους στρωτήρες είναι επίσης στερεωμένη η ηλεκτροφόρος ράβδος με τα προστατευτικά της καλύμματα, μέσω μονωτικών στηριγμάτων. Κάτω από το σκυρόδεμα κλίνης τροχιάς 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.



Σχήμα 2.3 : Διατομή επιδομής του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (STEDEF)

Εικόνα 2.1 : Επιδομή του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

Οι αλλαγές/διακλαδώσεις τροχιών εγκαθίστανται πλέον, με σύστημα άμεσης στερέωσης σε πλάκα σκυροδέματος.

Επίσης, σε ιδιαίτερα "ευαίσθητα" σημεία (πχ. Νέο Μουσείο Ακροπόλεως), λαμβάνονται μέτρα μείωσης θορύβου και δονήσεων. Στις περιοχές αυτές, οι διακλαδώσεις/αλλαγές τροχιών και τμήματα απλής τροχιάς κατασκευάζονται πάνω σε πλωτές πλάκες.

Στις ανοιχτές περιοχές των Αμαξοστασίων, οι τροχιές και οι διακλαδώσεις τροχιών εδράζονται με στρωτήρες ξύλινους ή από σκυρόδεμα σε κλίνη τροχιάς από έρμα. [6]

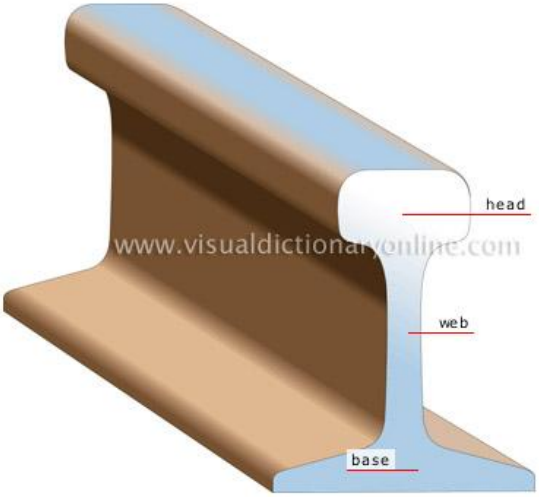
2.3.1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΕΡΜΑ		ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ	
Σχετικά μικρό κόστος κατασκευής	+	Σχετικά μεγάλο κόστος κατασκευής	-
Μεγάλο κόστος συντήρησης, μικρή διάρκεια ζωής (25-30 χρόνια)	-	Μικρό κόστος συντήρησης, μεγάλη διάρκεια ζωής (60 χρόνια)	+
Μικρή σχετικά εγκάρσια αντίσταση	-	Μεγάλη σχετικά εγκάρσια αντίσταση	+
Βαριά σχετικά κατασκευή	-	Ελαφριά σχετικά κατασκευή	+
Εύκολη διόρθωση σφαλμάτων γραμμής	+	Προβληματική η διόρθωση της γεωμετρίας της γραμμής	-
Μεγάλο συγκριτικά ύψος κατασκευής της επιδομής	-	Μικρό συγκριτικά ύψος κατασκευής της επιδομής (μείωση ύψους σήραγγας 0,90μ)	+
Μικρός χρόνος κατασκευής	+	Μεγάλος χρόνος κατασκευής (3πλάσιος – 5πλάσιος)	-
Ελαστικότητα	+	Μειωμένη ελαστικότητα	-
Τεχνική ευρέως διαδεδομένη και γνωστή	+	Νέα τεχνική συνεχώς εξελισσόμενη. Απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό	-
Καλή συμπεριφορά στις διαφορικές καθιζήσεις	+	Απαίτηση πολύ καλής ποιότητας υποδομής	-
Απορρόφηση θορύβου	+	Απαίτηση ειδικής προστασίας για ηχορύπανση (3dB μεγαλύτερη)	-
Δύσκολη πρόσβαση από τα οδικά οχήματα σε περίπτωση ανάγκης	-	Εύκολη πρόσβαση από τα οδικά οχήματα. Δυνατότητα κυκλοφορίας επί της επιδομής	+
Κατά τη διέλευση των συρμών με υψηλές ταχύτητες «στροβιλισμός» των σκύρων σε περίπτωση πτώσης στοιχείων από το όχημα στη γραμμή και φθορές στην επιδομής από το τροχαίο υλικό	-	Το πρόβλημα του «στροβιλισμού» δεν υφίσταται	+
Απαιτείται χημική καταπολέμηση φ. οργανισμών	-	Δεν απαιτείται χημική καταπολέμηση φυτικών	+

2.3.2 ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

2.3.2.1 ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ

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

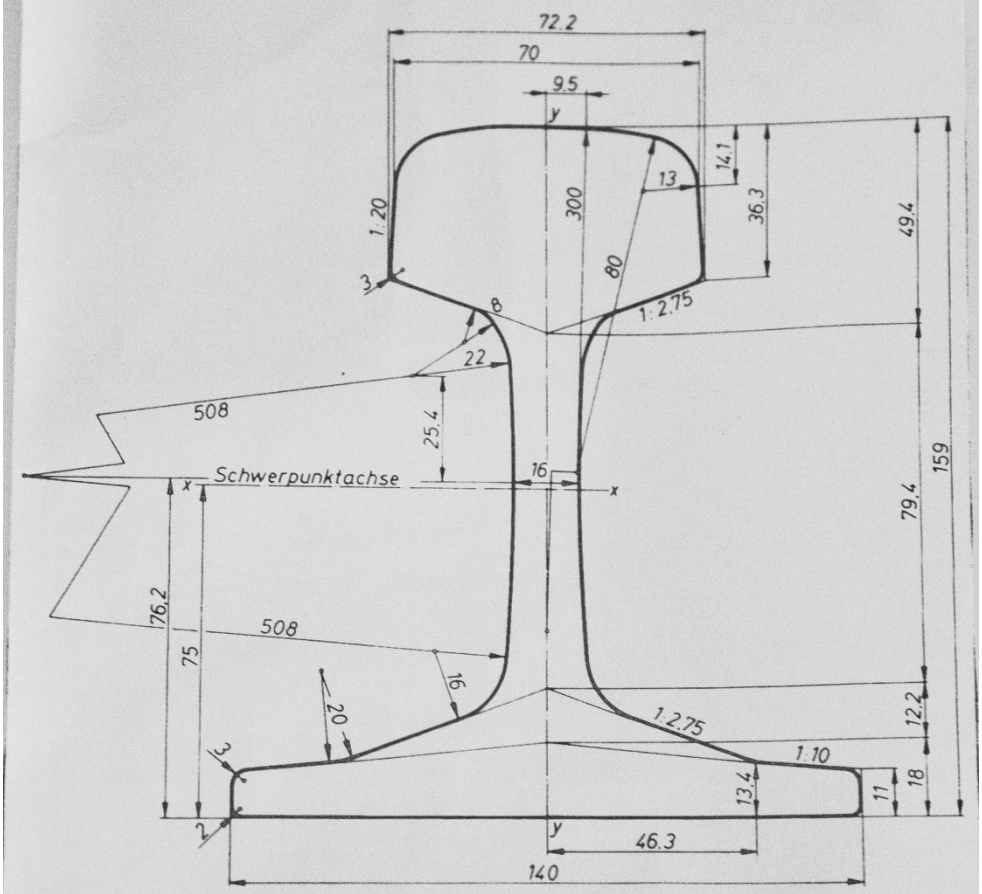


Εικόνα 2.1: Διατομή σιδηροτροχιάς (base: πέλμα, web: κορμός, head: κεφαλή)

Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι $2,1*10^5$ N/mm^2

Συγκεκριμένα στο Αττικό Μετρό έχει χρησιμοποιηθεί η σιδηροτροχιά UIC 54 τα χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Schiene UIC 54



Technische Daten

Querschnittsfläche	F	=	69,34	cm^2
Gewicht	G	=	54,43	kg/m
Trägheitsmoment	Jx	=	2346,0	cm^4
Widerstandsmoment	Wx_K	=	279,3	cm^3
Widerstandsmoment	Wx_F	=	312,8	cm^3
Trägheitsmoment	Jy	=	417,5	cm^4
Widerstandsmoment	Wy_F	=	59,6	cm^3

Technische Lieferbedingungen:
UIC 860 V und SBB — Anhang

Zulässige Maßabweichungen

für Regel- und verschleißfeste Schienenstahlgüten 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
nichttolerierte Maße	+0,5/ −0,5 mm

2.3.2.2 ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ

Είναι διαδοκίδες τοποθετημένες εγκάρσια ως προς τον άξονα της γραμμής, με σκοπό να εδράζονται οι σιδηροτροχιές, να διατηρούν την απόσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών σταθερή, να διανέμουν τις τάσεις στο έρμα, να μειώνουν τις ταλαντώσεις των σιδηροτροχιών και τέλος να μειώνουν το θόρυβο.[3]

Εικόνα 2.2 : Ολόσωμοι στρωτήρες από σκυρόδεμα (B70) σε σκυρογραμμή

Εικόνα 2.3 : Διμερείς στρωτήρες από σκυρόδεμα στο Αττικό Μετρό

Οι ολόσωμοι στρωτήρες B70 έχουν ενεργό επιφάνεια ανά σιδηροτροχιά F_1 =285.000 mm^2

Οι διμερείς στρωτήρες που είναι τοποθετημένοι στο Αττικό Μετρό έχουν ενεργό επιφάνεια ανά σιδηροτροχιά όση είναι η επιφάνεια του ελαστικού υποθέματος (πάτος) δηλαδή, F_1 = 151.800 mm^2.

2.3.2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

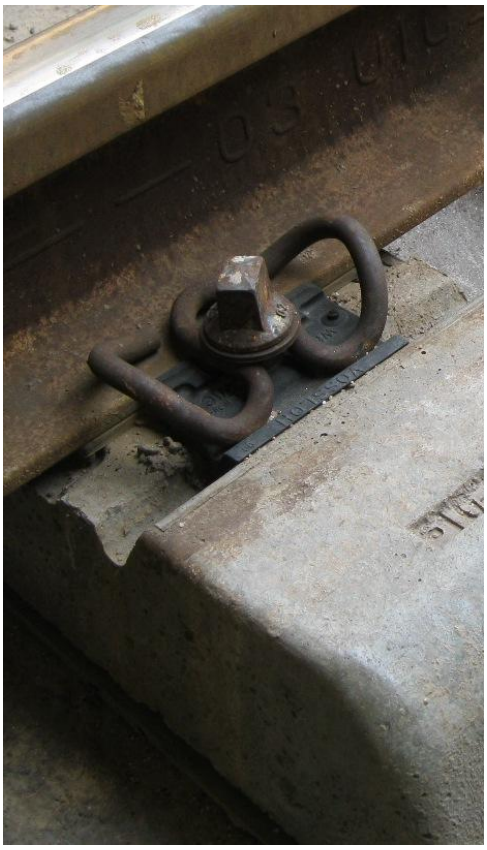
Σύνδεσμοι αποκαλούνται όλα εκείνα τα υλικά που έχουν σαν λειτουργίας τους τη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τον στρωτήρα.

- **Σύνδεσμοι για στρωτήρες από σκυρόδεμα**

Για τους στρωτήρες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται ελαστικοί σύνδεσμοι. Οι ελαστικοί σύνδεσμοι αποτελούν διπλά ελαστικό μέσο μεταξύ σιδηροτροχιάς και στρωτήρα, δηλαδή εμφανίζουν ελαστική αντίσταση στις σχετικές κινήσεις στην κατακόρυφη έννοια, την ίδια και προς τα πάνω και προς τα κάτω.

Οι δυο τύποι συνδέσμων που χρησιμοποιούνται στο Αττικό Μετρό είναι οι Nabla και Skl (**Εικόνα 2.4, 2.5**)

Εικόνα 2.4 : Σύνδεσμος Nabla



Εικόνα 2.5 : Σύνδεσμος Skl

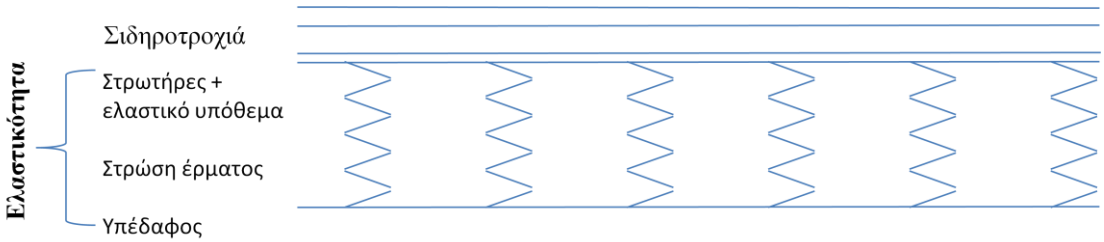
Κατά τον υπολογισμό in situ του συντελεστή ελατηρίου του υποθέματος (Rail Pad) πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το υπόθεμα υφίσταται παραμόρφωση λόγω της δύναμης σύσφιξης του συνδέσμου.[3] Για παράδειγμα, για σύνδεσμο Nabla η δύναμη σύσφιξης είναι τουλάχιστον (2*10) kN = 20 kN

3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της επιδομής χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω :

- Η μάζα του φορτίου είναι σε σχέση με τη φέρουσα μάζα πάρα πολύ μεγάλη.
- 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 μέσες τιμές των παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν.[3]



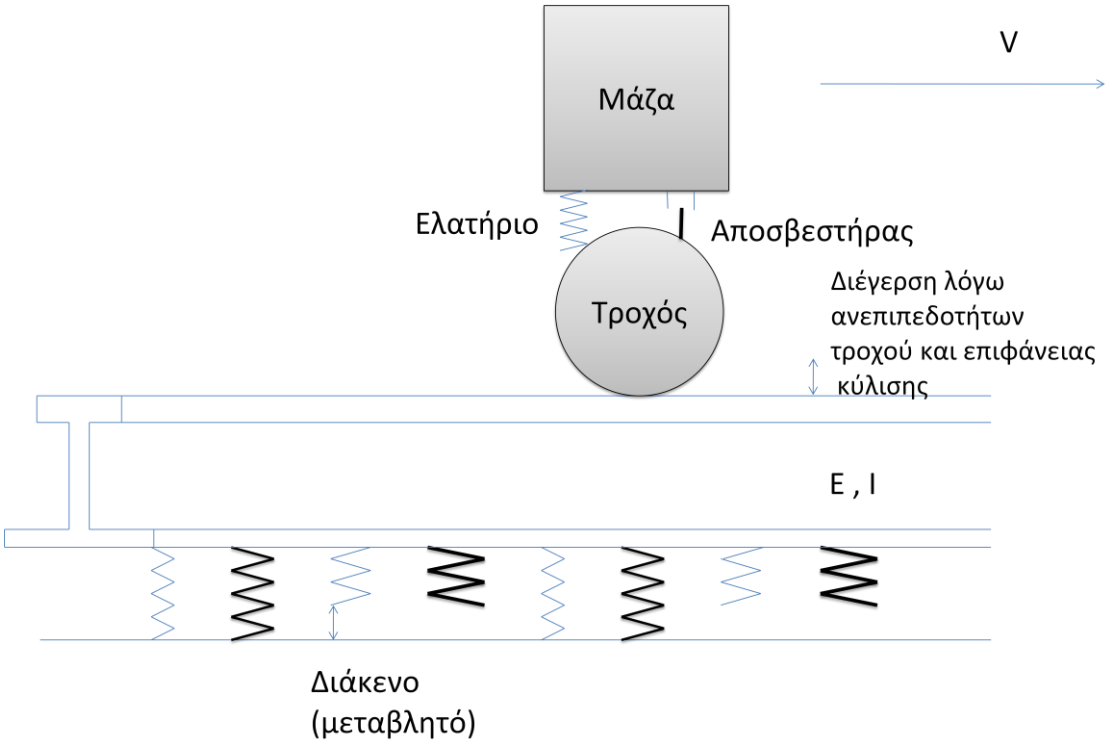
Σχήμα 3.1 : Ελαστική έδραση της γραμμής στο κατακόρυφο επίπεδο

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΜΗΣ [3]

Η επιδομή αποτελεί ένα σύστημα περισσοτέρων στρώσεων με τρεις κύριες συνιστώσες. Αυτές είναι: η σιδηροτροχιά, ο στρωτήρας και τέλος η στρώση του 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.

Το πραγματικό στατικό σύστημα της επιδομής, λαμβανομένης υπόψη της διέγερσης από το όχημα φαίνεται στο **Σχήμα 3.2**



Σχήμα 3.2 : Μοντέλο υπολογισμού επιδομής (πραγματική κατάσταση)

V ταχύτητα οχήματος

m μάζα οχήματος

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

I ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς (σταθερή)

c ,k χαρακτηριστικές ελατηρίου (μεταβλητές)

b πλάτος του ιδανικού στρωτήρα

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 σχηματισθούν 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 τη διέλευση φορτίου.

Η φέρουσα ικανότητα της επιδομής εξαρτάται από την επιτρεπόμενη καταπόνηση κάθε στοιχείου και τον τρόπο μετάδοσης της δύναμης από το ένα στο άλλο, όπως π.χ.

- Της φέρουσας ικανότητας των σιδηροτροχιών σε σχέση με την κατακόρυφη και οριζόντια φόρτιση
- Της καταπόνησης της σιδηροτροχιάς στη θέση επαφής του τροχού
- Της μετάδοσης των οριζοντίων δυνάμεων καθοδήγησης
- Της μετάδοσης των οριζοντίων κατά μήκος δυνάμεων
- Της κατανομής της πίεσης μεταξύ σιδηροτροχιών, στρωτήρων, στρώσης έρματος και υπεδάφους

Η σιδηροτροχιά ως φορέας υπόκειται καταρχήν στην καμπτική καταπόνηση από κατακόρυφο φορτίο. Στις τάσεις που προκύπτουν από αυτή την κατά μήκος κάμψη προστίθενται και οι εξής:

- Επιπλέον τάσεις από έκκεντρες κατακόρυφες δυνάμεις και οριζόντιες δυνάμεις καθοδήγησης
- Τάσεις στη θέση εφαρμογής της δύναμης
- Τάσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές και ίδιες τάσεις

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

3.3 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 από την Εδαφομηχανική, αντικαθιστώντας τη ελαστική σημειακή στήριξη της σιδηροτροχιάς από μια συνεχή ελαστική στήριξη. Αυτό σημαίνει τη μετατροπή των εγκάρσιων στρωτήρων σε ένα 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 επί τόπου υπολογισμένης σταθεράς, του δείκτη αντίδρασης εδάφους C.

Με τη σταθερά αυτή περιγράφεται η υποχωρητικότητα όλων των στρώσεων κάτω από τους στρωτήρες. Είναι μια αναλογική σταθερά, η οποία δείχνει **με πόσα N/cm^2 επιτυγχάνεται βύθιση (κατακόρυφη υποχώρηση) του στρωτήρα κατά 1 cm** ή η στρώση έρματος και το

υπέδαφος συμπιέζονται κατά 10 mm. Με την παραδοχή της πλήρους ελαστικής βύθισης **ισχύει ο νόμος του Hook:**

$$\boldsymbol{y = \frac{p}{C}\ ή\ C = \frac{p}{y}}$$

y: η βύθιση του στρωτήρα στο έρμα [mm]

p: η πίεση στην επιφάνεια μεταξύ επιφάνειας έδρασης στρωτήρα και έρματος [N/mm^2]

C: ο δείκτης αντίδρασης εδάφους [N/mm^3]

Αποφασιστικός παράγοντας για τη βύθιση των στρωτήρων είναι η πίεση στην επιφάνεια μεταξύ στρωτήρα και έρματος. Μέσω της αύξησης των επί μέρους 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 (μικρή έως πολύ καλή φέρουσα ικανότητα του εδάφους αντίστοιχα). 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 επιφάνειες χρησιμοποιείται το 50% του στατικού φορτίου του τροχού, εκτός από την επιφάνεια της κεφαλής της σιδηροτροχιάς.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος «συντελεστής βύθισης στρωτήρα D» που σημαίνει τη δύναμη με την οποία επιτυγχάνεται βύθιση 1 cm ανά έδραση στρωτήρα. Ο συντελεστής D έχει την έννοια του συντελεστή ελατηρίου c [kN/mm].

$$\boldsymbol{D = C * F_S\ \ [N/mm]}$$

$\boldsymbol{F_S}$ **:** η ενεργός επιφάνεια μετάδοσης πίεσης από το στρωτήρα [mm^2]

Οι τιμές του C εξαρτώνται γενικά από την ποιότητα του υπεδάφους, το είδος του στρωτήρα καθώς και από την εποχή του έτους. Στους

παρακάτω πίνακες δίνονται ενδεικτικά τιμές του C ανάλογα με το υπέδαφος και το είδος του στρωτήρα.

Δείκτης αντίδρασης εδάφους (μέσες τιμές)	**Υπέδαφος**
C = 0.02 N/mm^3	Πολύ κακό υπέδαφος
C = 0.05 N/mm^3	Κακό υπέδαφος
C = 0.10-0.20 N/mm^3	Καλό υπέδαφος
C = 0.30-0.60 N/mm^3	Άκαμπτο υπέδαφος

Ο δείκτης αντίδρασης εδάφους C μπορεί να υπολογισθεί:

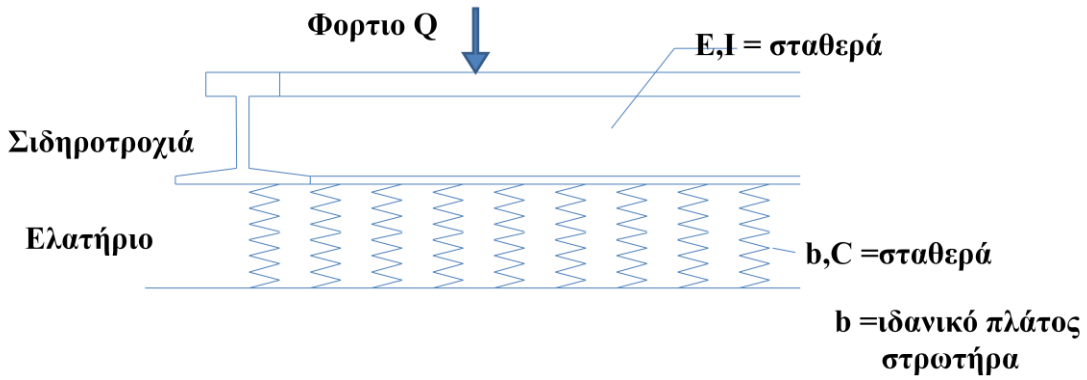
Με βάση τη φόρτιση S του στρωτήρα και την αντίστοιχη βύθιση y, όπου ως τιμή εκκίνησης φορτίου είναι το μισό φορτίο του άξονα, λόγω της ιδιότητας της σιδηροτροχιάς να κατανέμει το φορτίο στους γειτονικούς στρωτήρες. Για να είναι οι μετρήσεις στατικά ασφαλείς, πρέπει να γίνουν σε 10-12 αντιπροσωπευτικές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

$$\mathbf{C = \frac{p}{y} = \frac{S_S}{a \cdot b \cdot y} \quad [N/mm^3]}$$

Όπου: S_S η αντίδραση του στρωτήρα [N]
α η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων [mm]

3.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΣΤΡΩΤΗΡΑ[3]

Η μέθοδος του Zimmermann βασίζεται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο επιδομής, όπως στο σχήμα 2.3 :



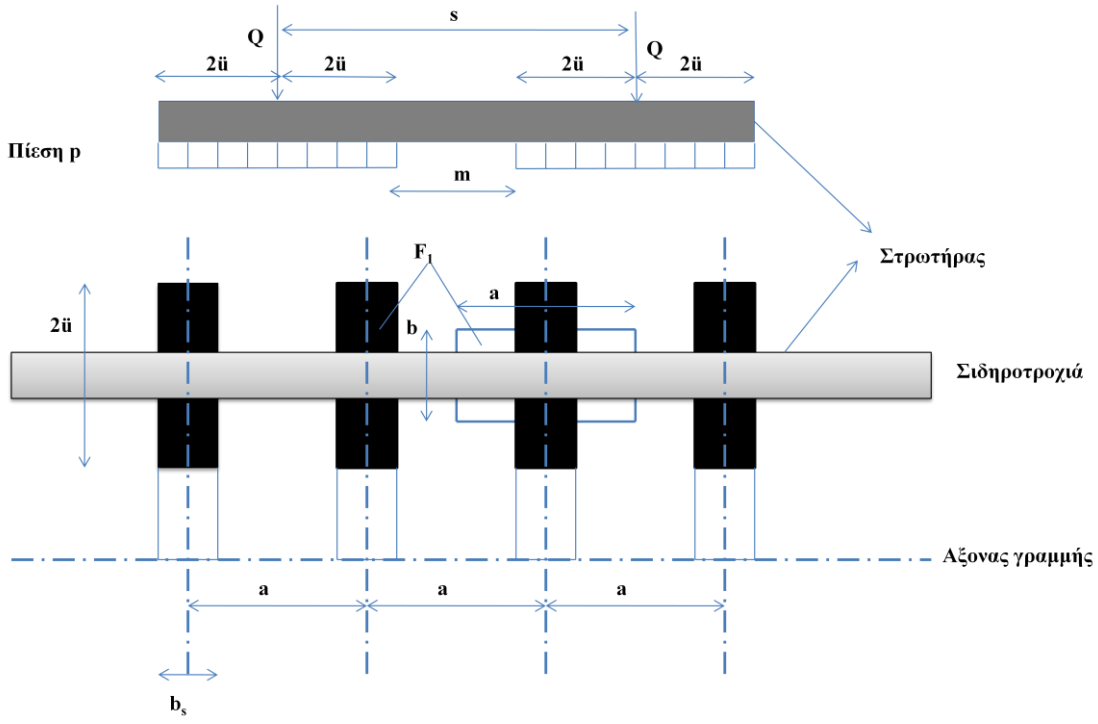
Σχήμα 3.3 :Μοντέλο επιδομής Zimmerman

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 η 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 στήριξη της να αντικατασταθεί με μια κατά μήκος υποθετική στήριξη.

Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι ο εγκάρσιος στρωτήρας κατανέμει την πίεση ομοιόμορφα σε μήκος 2ü και την μεταβιβάζει στο έρμα. Αντικαθιστώντας τον εγκάρσιο στρωτήρα πλάτους b_s 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 **(Σχήμα 3.4)**



Σχήμα 3.4 : Μετατροπή της επιδομής με εγκάρσιους στρωτήρες σε επιδομή με υποθετικούς κατά μήκος στρωτήρες

Όπου :

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

Q → Φορτίο τροχού (= μισό φορτίο άξονα) [N]

a → Απόσταση μεταξύ των στρωτήρων [mm]

l → Μήκος στρωτήρα [mm]

b_s → Πλάτος του στρωτήρα [mm]

b → Πλάτος ιδανικού στρωτήρα [mm]

m → Μεσαίο τμήμα στρωτήρα ελεύθερο έδρασης [mm] (δεν υπογομόνεται)

ü → Απόσταση άξονα σιδηροτροχιάς μέχρι την άκρη (μέτωπο) του στρωτήρα [mm]

2 ü → Μήκος ενεργού κάτω επιφάνειας στρωτήρα [mm]

p → Πίεση μεταξύ εσχάρας (κάτω επιφάνεια στρωτήρα) και έρματος [N/mm^2]

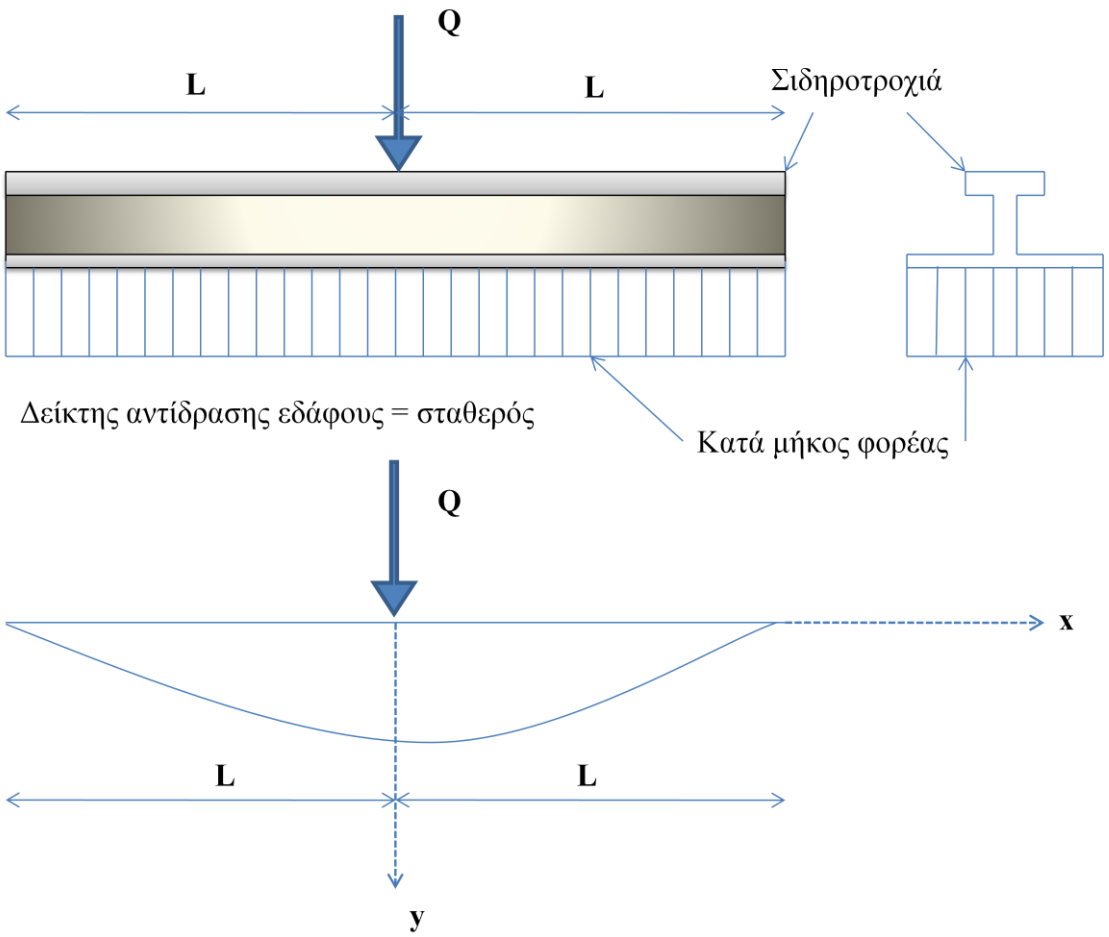
$F_1 = 2 * ü * b_s$ → Ενεργός επιφάνεια στρωτήρα ανά σιδηροτροχιά [mm^2]

Στην περίπτωση της Σταθερής Επιδομής (STEDEF), η ενεργός επιφάνεια του διμερή στρωτήρα είναι η επιφάνεια του ελαστικού υποθέματος (ελαστική "σόλα").

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

$$\mathbf{L} = \sqrt[4]{\frac{\mathbf{4 \cdot E \cdot I}}{\mathbf{b \cdot C}}}$$

Το ελαστικό 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 3.5 : Σχηματική απεικόνιση του ελαστικού μήκους L

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

$$\xi = \frac{x}{L}$$

Όπου : x είναι η απόσταση από τη διερευνούμενη περιοχή (mm)

Ο παράγοντας ξ υπεισέρχεται στον υπολογισμό των συντελεστών **η** (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 :

$$\eta = e^{-\xi}(\cos\xi + \sin\xi)$$

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

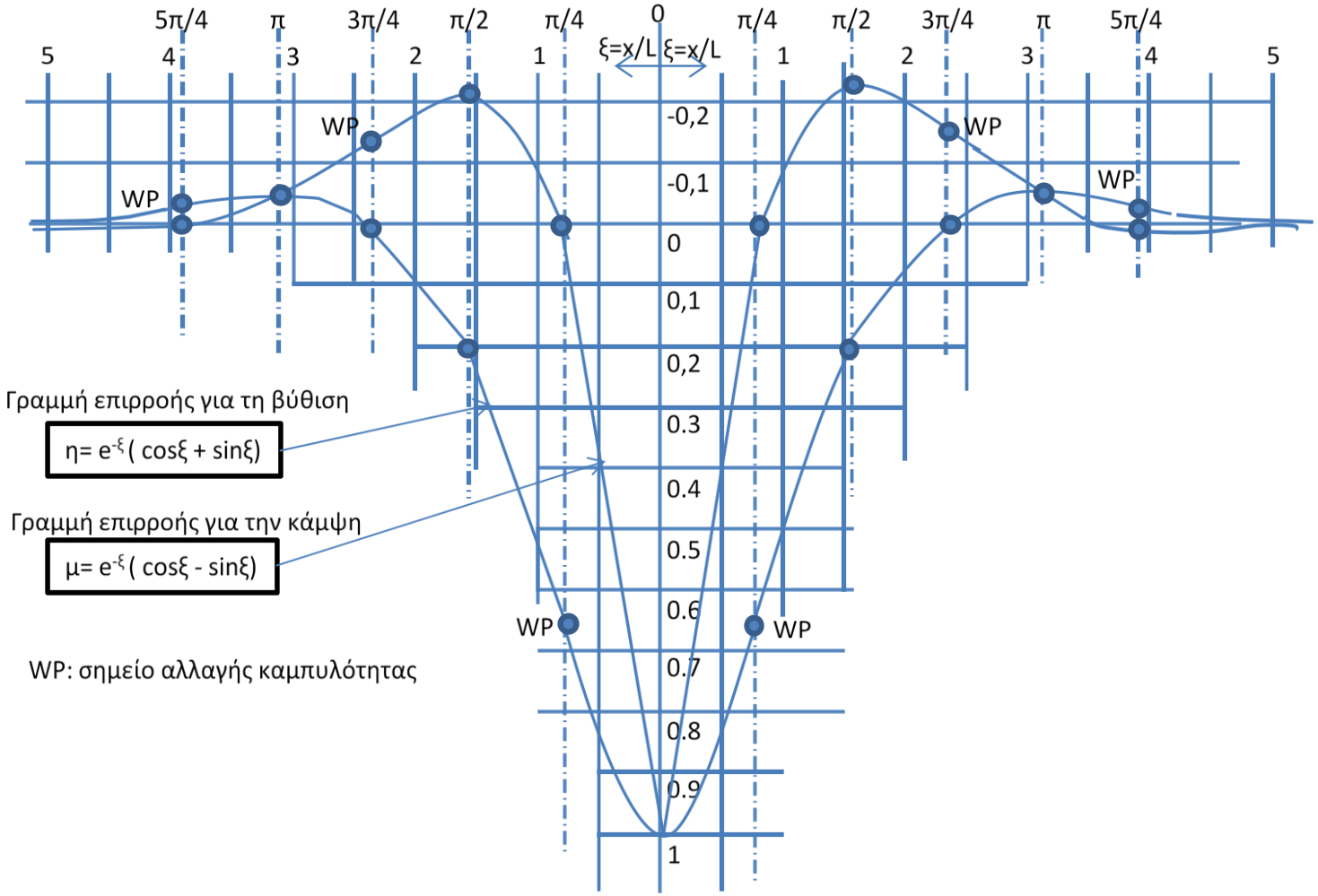
Οπότε η επιπλέον κάμψη λόγω της επιρροής δίνεται από τον τύπο:

$$y_{\varepsilon\pi} = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \cdot \eta$$

$$M_{\varepsilon\pi} = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot \mu$$

ξ	η	μ	ξ	η	μ
0,0	1,0000	1,0000	3,6	-0,03659	-0,01241
0,1	0,9907	0,8100	3,7	-0,03407	-0,00787
0,2	0,9651	0,6398	3,8	-0,03138	-0,00401
0,3	0,9267	0,4888	3,9	-0,02862	-0,00077
0,4	0,8784	0,3564	4,0	-0,02583	0,00189
0,5	0,8231	0,2415	4,1	-0,02309	0,00403
0,6	0,7628	0,1431	4,2	-0,02042	0,00572
0,7	0,6997	0,0599	4,3	-0,01787	0,00699
0,8	0,6354	-0,0093	4,4	-0,01546	0,00791
0,9	0,5712	-0,0657	4,5	-0,01320	0,00852
1,0	0,5083	-0,1108	4,6	-0,01112	0,00886
1,1	0,4476	-0,1457	4,7	-0,00921	0,00898
1,2	0,3899	-0,1716	4,8	-0,00748	0,00892
1,3	0,3355	-0,1897	4,9	-0,00593	0,00870
1,4	0,2849	-0,2011	5,0	-0,00455	0,00837
1,5	0,2384	-0,2068	5,1	-0,00334	0,00795
1,6	0,1959	-0,2077	5,2	-0,00229	0,00746
1,7	0,1576	-0,2047	5,3	-0,00139	0,00692
1,8	0,1234	-0,1985	5,4	-0,00062	0,00636
1,9	0,0932	-0,1899	5,5	0,00001	0,00578
2,0	0,0667	-0,1794	5,6	0,00053	0,00520
2,1	0,0439	-0,1675	5,7	0,00095	0,00464
2,2	0,0244	-0,1548	5,8	0,00127	0,00409
2,3	0,0080	-0,1416	5,9	0,00152	0,00356
2,4	-0,0056	-0,1282	6,0	0,00169	0,00307
2,5	-0,0166	-0,1149	6,1	0,00180	0,00261
2,6	-0,0254	-0,1019	6,2	0,00185	0,00219
2,7	-0,0320	-0,0895	6,3	0,00187	0,00181
2,8	-0,0369	-0,0777	6,4	0,00184	0,00146
2,9	-0,0403	-0,0666	6,5	0,00179	0,00114
3,0	-0,0423	-0,0563	6,6	0,00172	0,00087
3,1	-0,04314	-0,04688	6,7	0,00162	0,00063
3,2	-0,04307	-0,03831	6,8	0,00152	0,00042
3,3	-0,04224	-0,03060	6,9	0,00141	0,00024
3,4	-0,04079	-0,02374	7,0	0,00129	0,00009
3,5	-0,03887	-0,01769			

Σχήμα 3.6 : Τιμές η και μ σε απόσταση x από τη θέση επιβολής φορτίου



Σχήμα 3.7 : Γραμμές επιρροής για τη βύθιση και την κάμψη

3.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c –ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ C

Ο συντελεστής ελατηρίου c επιτρέπει την άμεση σύγκριση των ακαμψιών διαφόρων συστημάτων.[3] Στην **§3.3** έγινε αναφορά στον συντελεστή βύθισης στρωτήρα D. Η έννοια του D είναι ταυτόσημη με το δείκτη ακαμψίας ή συντελεστή ελατηρίου c που χρησιμοποιείται ευρέως στη γερμανική βιβλιογραφία.

$$\boldsymbol{c = \frac{C \cdot F}{2} = \frac{S_s}{y}} \quad [\boldsymbol{N/mm}]$$

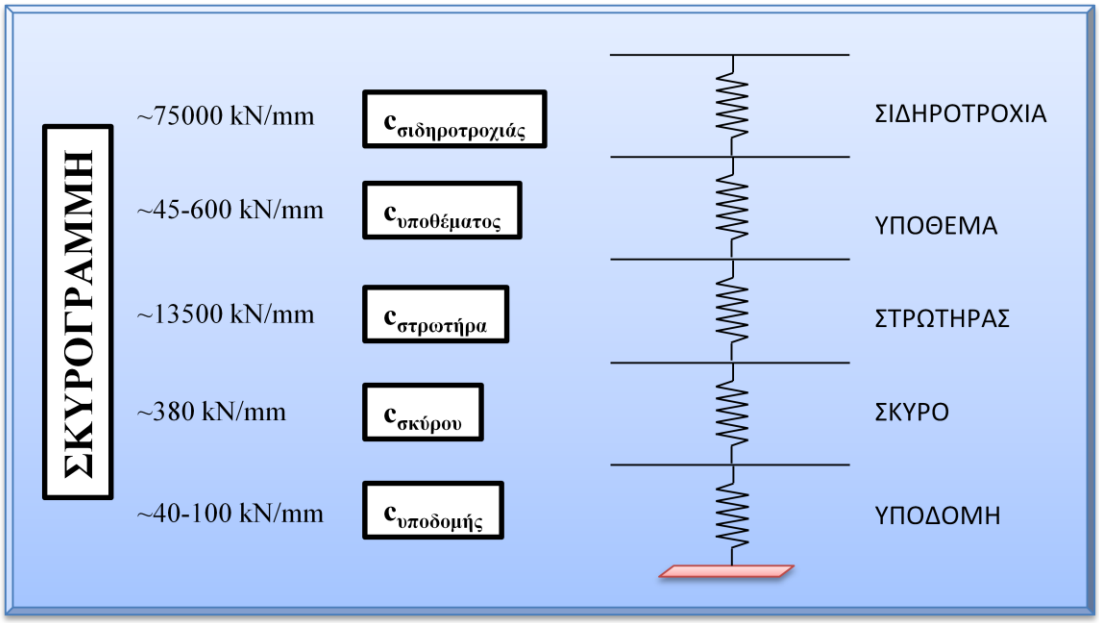
Όπου :

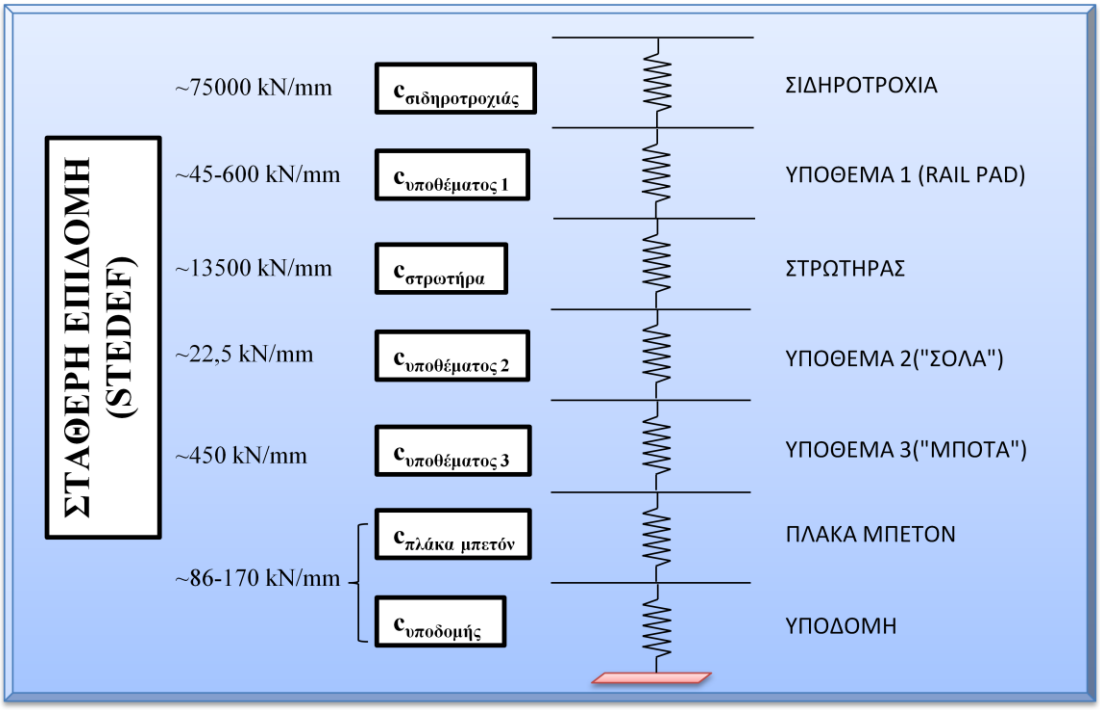
F συνολική ενεργός επιφάνεια έδρασης στρωτήρα [mm^2]

S_s δύναμη που δρα επί της θέσης στήριξης (αντίδραση στρωτήρα) [N]

y αντίστοιχη κάμψη / βύθιση εξαιτίας της S_s [mm]

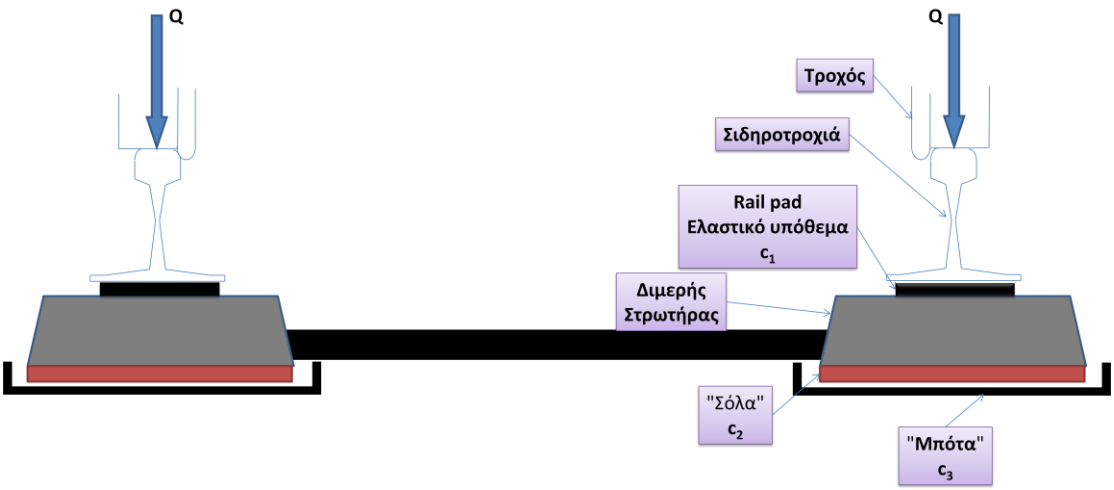
Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η σκυρογραμμή καθώς και η Σταθερή Επιδομή σε σχέση με τον συντελεστή ελατηρίου c των διάφορων στοιχείων της γραμμής. Οι τιμές του συντελεστή ελατηρίου για κάθε στοιχείο είναι οι τυπικές που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία.


ΣΚΥΡΟΓΡΑΜΜΗ
~75000 kN/mm
$c_{σιδηροτροχιάς}$
ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ
~45-600 kN/mm
$c_{υποθέματος}$
ΥΠΟΘΕΜΑ
~13500 kN/mm
$c_{στρωτήρα}$
ΣΤΡΩΤΗΡΑΣ
~380 kN/mm
$c_{σκύρου}$
ΣΚΥΡΟ
~40-100 kN/mm
$c_{υποδομής}$
ΥΠΟΔΟΜΗ


ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (STEDEF)
~75000 kN/mm
$c_{σιδηροτροχιάς}$
ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ
~45-600 kN/mm
$c_{υποθέματος\ 1}$
ΥΠΟΘΕΜΑ 1 (RAIL PAD)
~13500 kN/mm
$c_{στρωτήρα}$
ΣΤΡΩΤΗΡΑΣ
~22,5 kN/mm
$c_{υποθέματος\ 2}$
ΥΠΟΘΕΜΑ 2("ΣΟΛΑ")
~450 kN/mm
$c_{υποθέματος\ 3}$
ΥΠΟΘΕΜΑ 3("ΜΠΟΤΑ")
~86-170 kN/mm
$c_{πλάκα\ μπετόν}$
ΠΛΑΚΑ ΜΠΕΤΟΝ
$c_{υποδομής}$
ΥΠΟΔΟΜΗ

3.5.1 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από «n» διαφορετικά υλικά (σιδηροτροχιά, στρωτήρες, ελαστικά υποθέματα). Κάθε επί μέρους υλικό έχει το δικό του συντελεστή ελατηρίου c_i (i = 1,n) και υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων υπόκειται σε διαφορετικές βυθίσεις $y_{κi}$ (i = 1,n) (**Σχήμα 3.8**).



Σχήμα 3.8 : Επιμέρους στοιχεία i γραμμής, διαφορετικών συντελεστών ελαστικότητας στη διατομή της Σταθερής Επιδομής στο ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$y_{κσυν} = \sum_{i=1}^{n} y_{κi} \quad (\mathbf{3.1})$$

$$c_i = \frac{S_s}{y_{κi}} \quad (\mathbf{3.2})$$

$$c_{συν} = \frac{S_s}{y_{συνi}} \quad (\mathbf{3.3})$$

Συνδυάζοντας αυτές τις σχέσεις παίρνουμε την ακόλουθη:

$$y_{κσυν} = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_s}{c_i} = S_s \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_i} \quad (\mathbf{3.4})$$

Όπου $y_{κσυν}$: συνολική βύθιση της γραμμής (σε mm)

$c_{συν}$: συνολικός συντελεστής ελαστικότητας της γραμμής (σε N/mm)

S_s : κατακόρυφη αντίδραση στο επίπεδο στρωτήρα - σιδηροτροχιάς (N)

Τελικά προκύπτει:

$$\frac{1}{c_{συν}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_i} \qquad (\mathbf{3.5})$$

Για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή ελαστικότητας ($c_{συν}$) της γραμμής μπορούμε να λάβουμε υπόψη μόνο τους συντελεστές ελαστικότητας των υποθεμάτων (rail pad, "σόλα", "μπότα"). Αυτό γιατί οι συντελεστές ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς καθώς και του στρωτήρα έχουν πολύ μεγάλες τιμές και η συμβολή τους στον $c_{συν}$ είναι τόσο μικρή που μπορεί να παραληφθεί.

Οι συνήθεις τιμές των συντελεστών ελαστικότητας είναι :

Στοιχεία γραμμής	**Συντελεστής ελαστικότητας (kN/mm)**
Σιδηροτροχιά	~75000
Στρωτήρας σκυροδέματος	~13500

Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής $c_{συν}$ τόσο ανυποχώρητη (άκαμπτη) είναι η γραμμή. Όταν έχουμε στρωτήρες από σκυρόδεμα (όπως στις μετρήσεις μας στο ΜΕΤΡΟ) 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.

Ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας της επιδομής της γραμμής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα ελαστικά υποθέματα αφού, αυτά παίζουν το ρόλο του σκύρου.

4

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΟΡΓΑΝΟ PCD-300A ΣΤΟ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

4.1 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σκοπός των μετρήσεων με το όργανο PCD-300A ήταν η μέτρηση της βύθισης του στρωτήρα κατά τη διάρκεια διέλευσης συρμών στο Αττικό Μετρό. Για την πραγματοποίηση αυτού του στόχου έγιναν δύο επισκέψεις στη γραμμή του Αττικό Μετρό.

Η πρώτη δοκιμαστική μέτρηση έγινε στην έξοδο των συρμών του Μετρό προς το αμαξοστάσιο (Σεπόλια) την 1^{η} Ιουνίου 2011(**Εικόνα 4.1**). Το σημείο παρουσίαζε το πλεονέκτημα της άνεσης χώρου τόσο για την εγκατάσταση των οργάνων όσο και για την ασφαλή παραμονή μας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Κατά τη διάρκεια αυτής της μέτρησης έγινε ο έλεγχος του μηχανήματος καθώς και ο προσδιορισμός κάποιων σταθερών του προγράμματος PCD-30A (βλ. **§4.2**).

Η δεύτερη (τελική) μέτρηση έγινε στο σταθμό του Μετρό στο Σύνταγμα στις 20 Ιουνίου 2011.

Εικόνα 4.1 : Δοκιμαστικές μετρήσεις στα Σεπόλια

4.2 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΣΤΟ ΣΥΝΤΑΓΜΑ

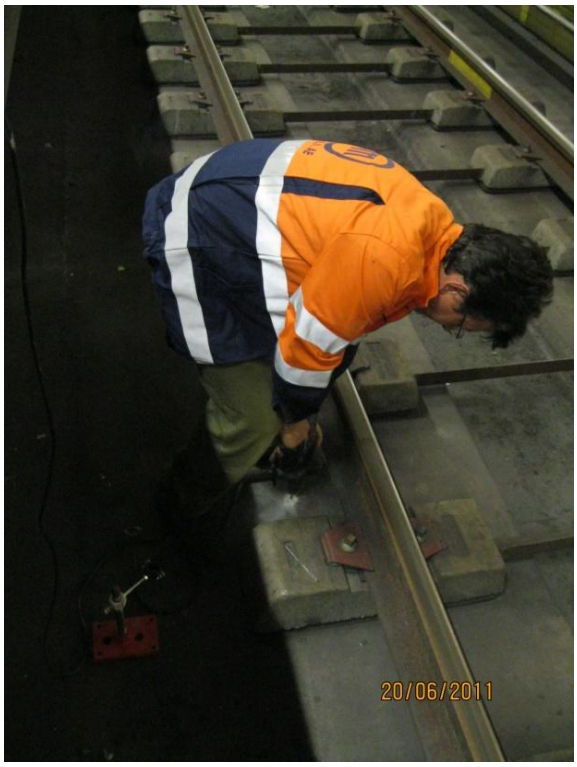
Οι μετρήσεις έγιναν στο σταθμό του μετρό στο Σύνταγμα στις 20 Ιουνίου 2011. Κατά την εγκατάσταση του μηκυνσιόμετρου καθώς και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ακολουθήθηκαν κάποιες διαδικασίες για την ασφάλεια τόσο των εργαζομένων όσο και τη δικιά μας.

Για την αποφυγή σοβαρού ατυχήματος η εγκατάσταση του οργάνου στη γραμμή του μετρό ήταν απαραίτητο να γίνει πριν την έναρξη κυκλοφορίας των οχημάτων. Έτσι, έπρεπε να ολοκληρώσουμε την οποιαδήποτε εργασία μας στη γραμμή τουλάχιστον μισή ώρα πριν την διέλευση του πρώτου συρμού από το σημείο μετρήσεων. Γι’ αυτό το λόγο η προσέλευσή μας στην αποβάθρα έγινε στις 3π.μ. καθώς η έναρξη της βάρδιας είναι στις 5π.μ.

Εικόνα 4. 2 : Ηλεκτροφόρος ράβδος

Πρέπει σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι οι εργαζόμενοι του μετρό ήταν σε συνεχή επικοινωνία με τον κέντρο ελέγχου ακόμα και κατά τη διάρκεια προσέγγισης μας στο σημείο μετρήσεων. Πριν αρχίσει η τοποθέτηση του μηκυνσιόμετρου τοποθετήθηκε το όργανο της **Εικόνας 4.2** ώστε να μονωθεί η ηλεκτροφόρος ράβδος.

Στη συνέχεια, και αφού τοποθετήθηκε το μηκυνσιόμετρο στο στρωτήρα **(Εικόνα 4.3)** έγινε η εγκατάσταση του PCD 300A. Παραμείναμε σε ασφαλή χώρο, τόσο πριν αρχίσει η κυκλοφορία των οχημάτων, όσο και κατά τη διάρκεια **(Εικόνα 4.4)**. Η παραμονή μας σε αυτό το χώρο ήταν απαραίτητη καθώς δεν έπρεπε να ήμαστε ορατοί από τους οδηγούς των συρμών. Ήταν όλα έτοιμα για να αρχίσουν οι μετρήσεις.



Εικόνα 4.3 : Τοποθέτηση μηκυνσιόμετρου

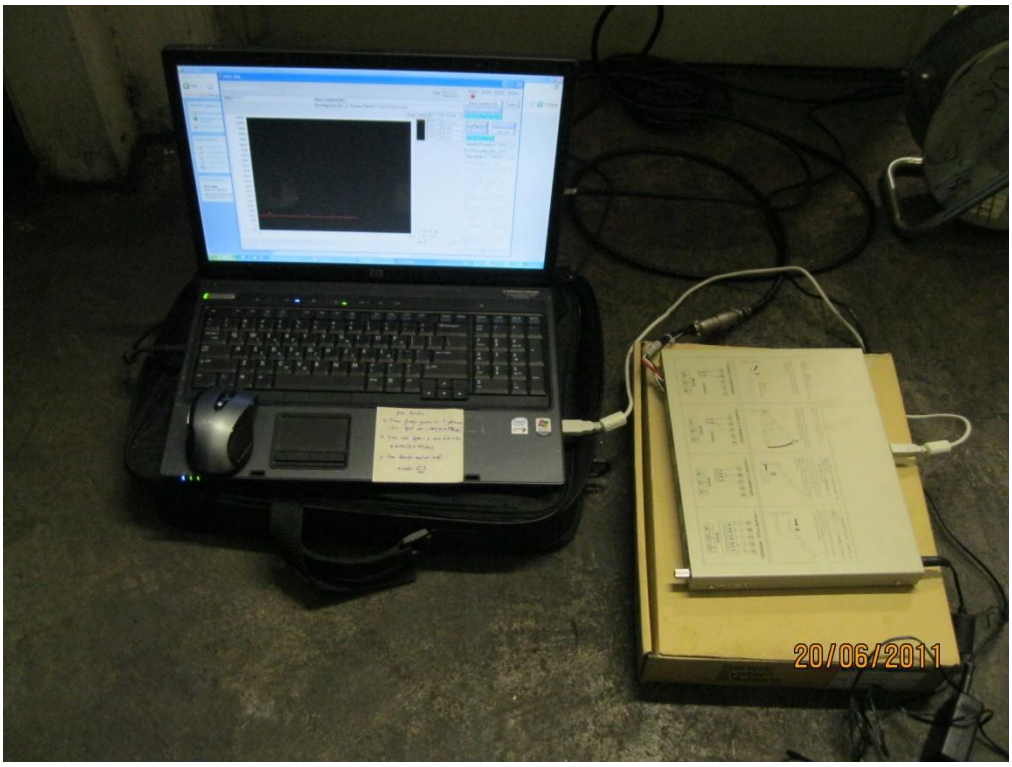
Εικόνα 4.4 : Χώρος παραμονής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (5.00π.μ.)

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ PCD-300A ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PCD-30A

Το όργανο PCD-300A αποτελείται από:

- Τη βελόνα - μηκυνσιόμετρο **(Εικόνα 4.5)**
- Τον επεξεργαστή που συνδέεται στον υπολογιστή **(Εικόνα 4.6)**
- Τα καλώδια σύνδεσης των οργάνων

Εικόνα 4.5: Βελόνα – μηκυνσιόμετρο



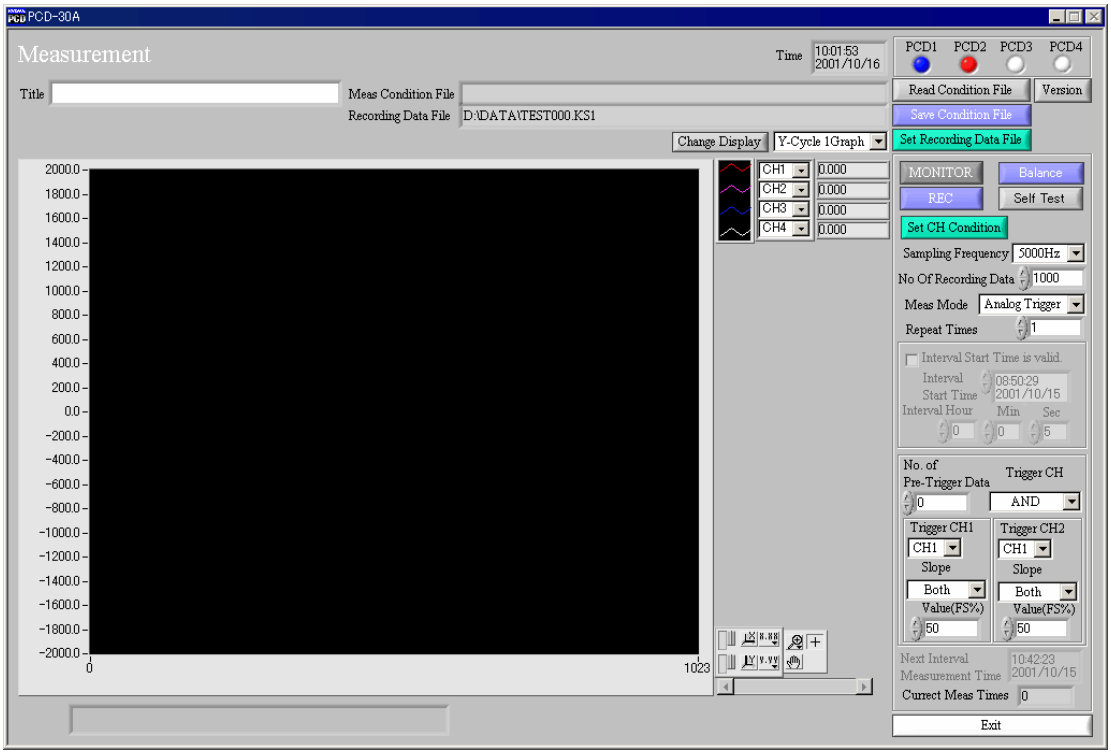
Εικόνα 4.6: Επεξεργαστής PCD-300A

Αρχικά συνδέεται το μηκυνσιόμετρο με τον επεξεργαστή, ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με καλώδιο USB με τον υπολογιστή, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.6**. Στον υπολογιστή που χρησιμοποιήσαμε, είχαμε ήδη εγκαταστήσει το λογισμικό αναγνώρισης του μηχανήματος (PCD-30A).

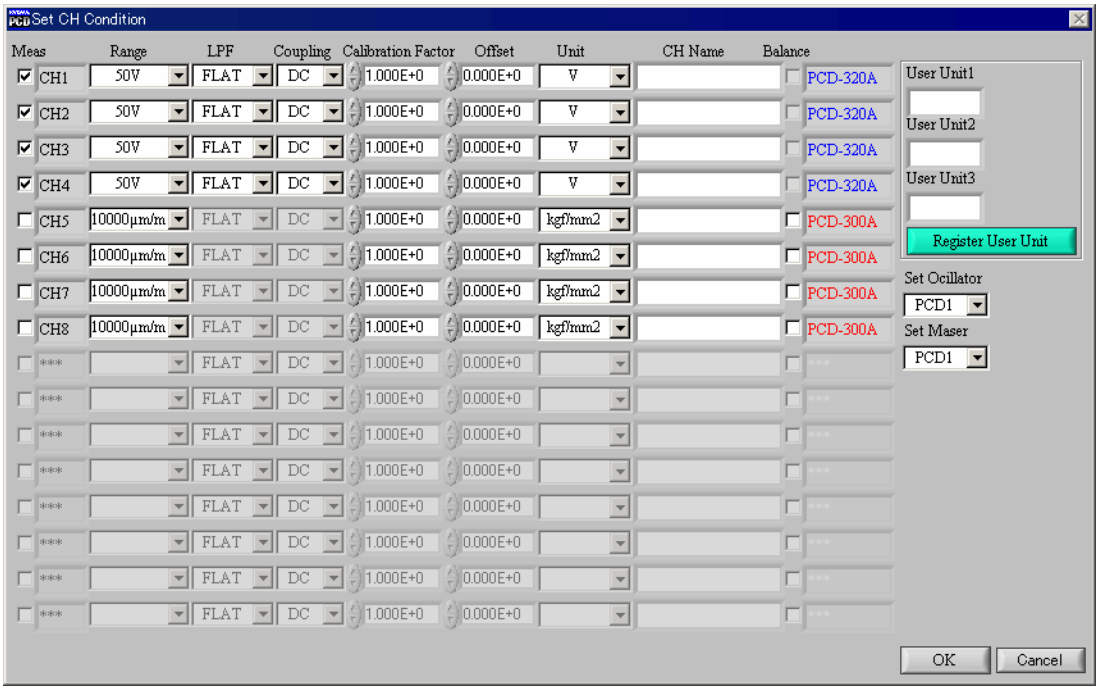
Το πρόγραμμα PCD-30A μας επιτρέπει να βλέπουμε σε διαγραμματική μορφή τις βυθίσεις και τις ανυψώσεις τις οποίες θα καταγράψει το μηκυνσιόμετρο κατά τη διέλευση των συρμών **(Εικόνα 4.7)**. Πριν κάνουμε όμως οποιαδήποτε ενεργεία, ορίζουμε τις διάφορες σταθερές που χρειάζονται για να έχουμε σωστές και αξιόπιστες μετρήσεις. Οι σταθερές αυτές καθορίζουν το χρόνο διάρκειας της μέτρησης, τη μονάδα μέτρησης καθώς και τη μορφή των διαγραμμάτων.

Η πρώτη ενέργεια που πρέπει να κάνουμε είναι να καθορίσουμε τη συχνότητα, «Sampling Frequency», καθώς και των αριθμό των δεδομένων που θα πάρουμε από τη μέτρηση, «No Of Recording Data». Στις μετρήσεις που κάναμε η συχνότητα ορίστηκε στα 100Hz ενώ ο αριθμός των δεδομένων καταγραφής στα 4000 **(Εικόνα 4.9)**. Μετά επιλέγουμε τον τύπο του γραφήματος που θέλουμε να εμφανίζεται στην

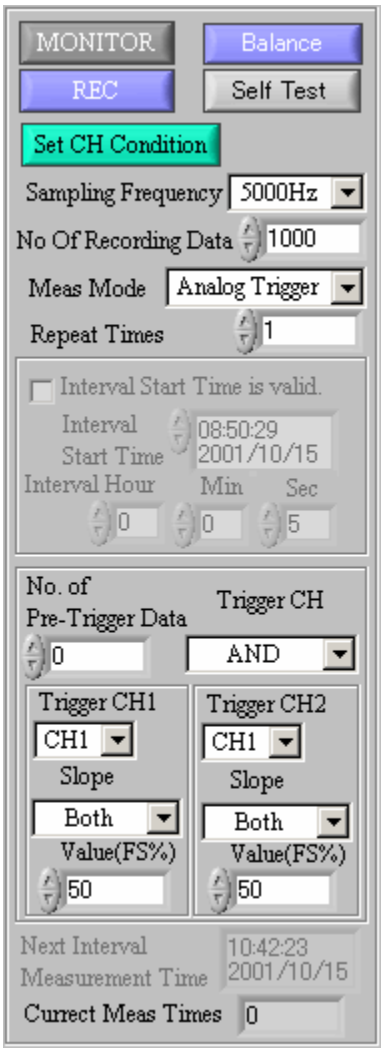
οθόνη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Y-Cycle 1Graph). Στη συνέχεια κάνουμε «κλικ» στην επιλογή «Set CH Condition» της αρχικής οθόνης και εμφανίζεται το παράθυρο επιλογής της **Εικόνας 4.8**. Από εκεί δίνουμε την τιμή του εύρους, «Range» (10000 μm/m) καθώς και της μονάδας, «Unit» (mm).



Εικόνα 4.7: PCD-30A



Εικόνα 4.8: Παράθυρο επιλογής «Set CH Condition»



Εικόνα 4.9: Δεξί τμήμα της αρχικής οθόνης του PCD-30A

Πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις το μηχάνημα είναι απαραίτητο να παραμείνει ανοιχτό για μισή ώρα. Για να ξεκινήσει η προβολή των δεδομένων στην οθόνη του υπολογιστή πατάμε το κουμπί «MONITOR», ενώ για να ξεκινήσει η καταγραφή των δεδομένων πατάμε το κουμπί «REC». Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύεται σε ένα φάκελο τον οποίο έχουμε ανοίξει από την επιλογή «Set Recording Data File»

4.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Η μέτρηση της βύθισης θα γίνει με τη βοήθεια του οργάνου PCD-300A που έχει περιγράφει στην προηγούμενη παράγραφο. Ιδιαίτερα προβλημάτισε η εύρεση του τρόπου που θα τοποθετούσαμε το μηκυνσιόμετρο πάνω στη σιδηροτροχιά ώστε να πάρουμε σωστές μετρήσεις. Μετά από σκέψη και με τη σημαντική βοήθεια του κυρίου Τερεζάκη κατασκευάστηκε η πειραματική διάταξη της **Εικόνας 4.10**. Η κατασκευή κοχλιώθηκε στο σκυρόδεμα του δαπέδου.

Εικόνα 4.10: Κατασκευή τοποθέτησης μηκυνσιομέτρου

Αρχικά σκοπός μας ήταν να τοποθετήσουμε το όργανο σε σημείο τέτοιο ώστε να καταγράφεται η βύθιση της σιδηροτροχιάς κατά τη διέλευση των συρμών. Έτσι, στις δοκιμαστικές μετρήσεις, που έγιναν στην έξοδο των συρμών του Μετρό προς το αμαξοστάσιο (Σεπόλια), όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.11** που ακολουθεί, το μηκυνσιόμετρο τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο στρωτήρες.

Εικόνα 4.11: Τοποθέτηση μηκυνσιομέτρου 1 (δοκιμαστικές μετρήσεις)

Όμως, κατά τη διέλευση του πρώτου συρμού πάνω από το εν λόγω σημείο, διαπιστώσαμε ότι υπάρχει κίνδυνος επαφής συρμού – οργάνου. Για να αποφύγουμε κάποιο πιθανό ατύχημα σκεφτήκαμε να βάλουμε το μηκυνσιόμετρο στην κάτω πλευρά του πέλματος της σιδηροτροχιάς **(Εικόνα 4.12)**. Με αυτό τον τρόπο θα ήμασταν απολύτως ασφαλείς. Με τη διάταξη αυτή του οργάνου όμως, οι μετρήσεις που θα παίρναμε θα ήταν «ανάποδες». Δηλαδή οι βυθίσεις θα ήταν στην πραγματικότητα ανυψώσεις και το αντίθετο.

Στις 20 Ιουνίου ακολούθησαν οι τελικές μετρήσεις στο σταθμό του μετρό στο Σύνταγμα. Εκεί, αντιμετωπίσαμε άλλο ένα πρόβλημα. Η απόσταση μεταξύ του κάτω τμήματος του πέλματος της σιδηροτροχιάς και του σκυροδέματος του δαπέδου, δεν ήταν αρκετή ώστε να χωρέσει το μηκυνσιόμετρο. Έτσι τελικά τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του στρωτήρα. **(Εικόνα 4.13)**

Με την τοποθέτηση του οργάνου σε αυτή τη θέση θα παίρναμε τις τιμές της βύθισης του στρωτήρα στο έρμα. Στην περίπτωσή μας το ρόλο του έρματος παίζουν τα ελαστικά υποθέματα ("σόλα" και "μπότα").

Εικόνα 4.12: Τοποθέτηση μηκυνσιομέτρου 2 (δοκιμαστικές μετρήσεις)

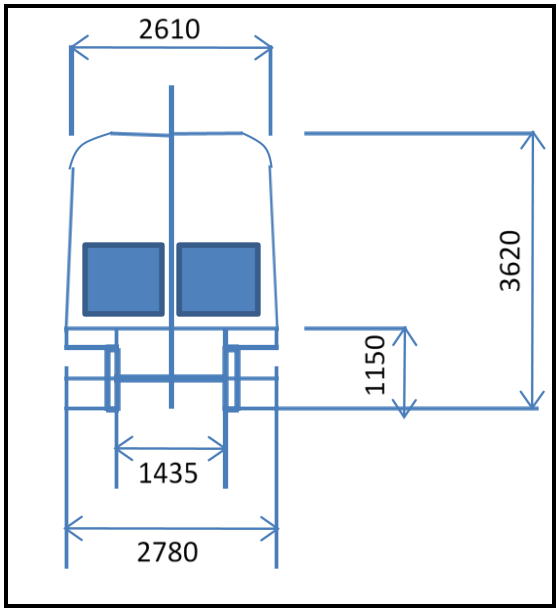
Εικόνα 4.13: Τοποθέτηση μηκυνσιομέτρου (τελικές μετρήσεις στο Σύνταγμα)

4.5 ΟΙ ΣΥΡΜΟΙ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

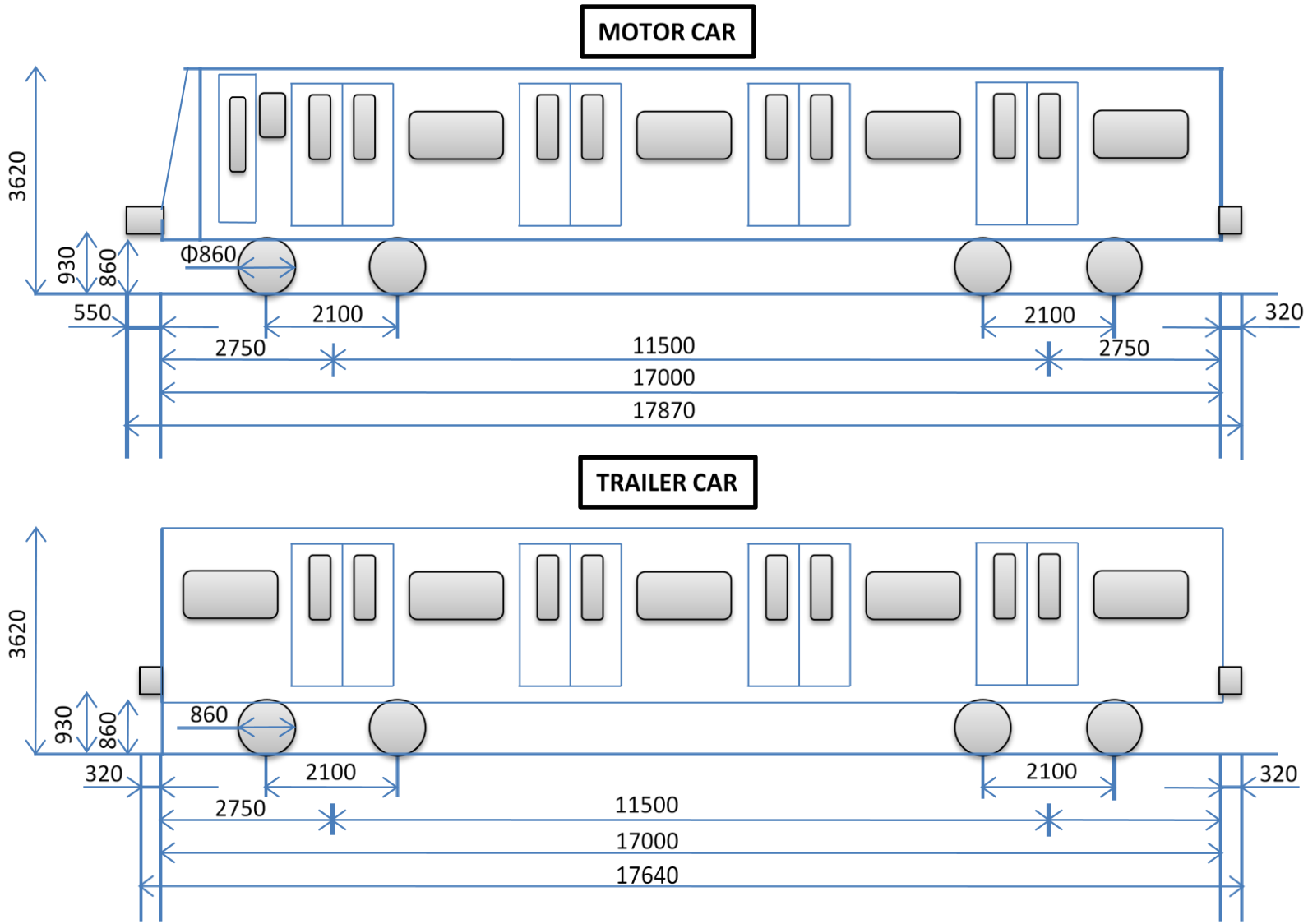
Στο Αττικό Μετρό κινούνται δύο τύποι συρμών. Οι συρμοί 1^{ης} γενιάς και οι συρμοί 2^{ης} γενιάς.

- **ΣΥΡΜΟΙ 1^{ης} ΓΕΝΙΑΣ**

Οι συρμοί 1^{ης} γενιάς έχουν συνολικό μήκος 106750 mm. Αποτελούνται από έξι βαγόνια εκ των οποίων τα τέσσερα είναι κινητήρια οχήματα. Ο συρμός δηλαδή έχει τη μορφή: motor car –trailer car – motor car – motor car – trailer car – motor car. Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 2100 mm, ενώ όλο το βαγόνι έχει μήκος 17000 mm (**Σχήμα 4.2).** Το όχημα έχει ύψος 3620 mm και πλάτος 2780 mm (στο κάτω μέρος) και 2610 mm (στην οροφή). Τέλος η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 1435 mm (**Σχήμα 4.1**)



Σχήμα 4.1 : Πρόσοψη συρμών 1^{ης} γενιάς (Κλίμακα 1:100)



Σχήμα 4.2 : Συρμοί της γενιάς (Κλίμακα 1:100)

Ακολουθούν γενικές πληροφορίες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συρμών 1ης γενιάς όπως αναφέρονται στη σελίδα του Αττικό Μετρό στο ίντερνετ [6]:

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

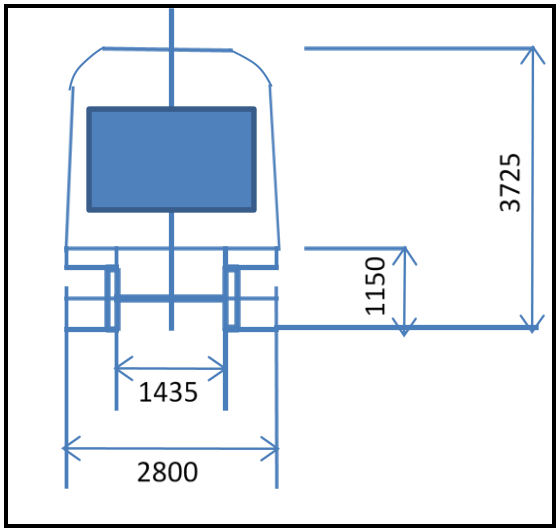
Αριθμός Συρμών	28 (Γραμμές 2 και 3)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Χωρητικότητα Συρμού	224 Καθίσματα 806 όρθιοι (5 Επιβάτες / τ.μ.) 1030 Επιβάτες / Συρμό

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

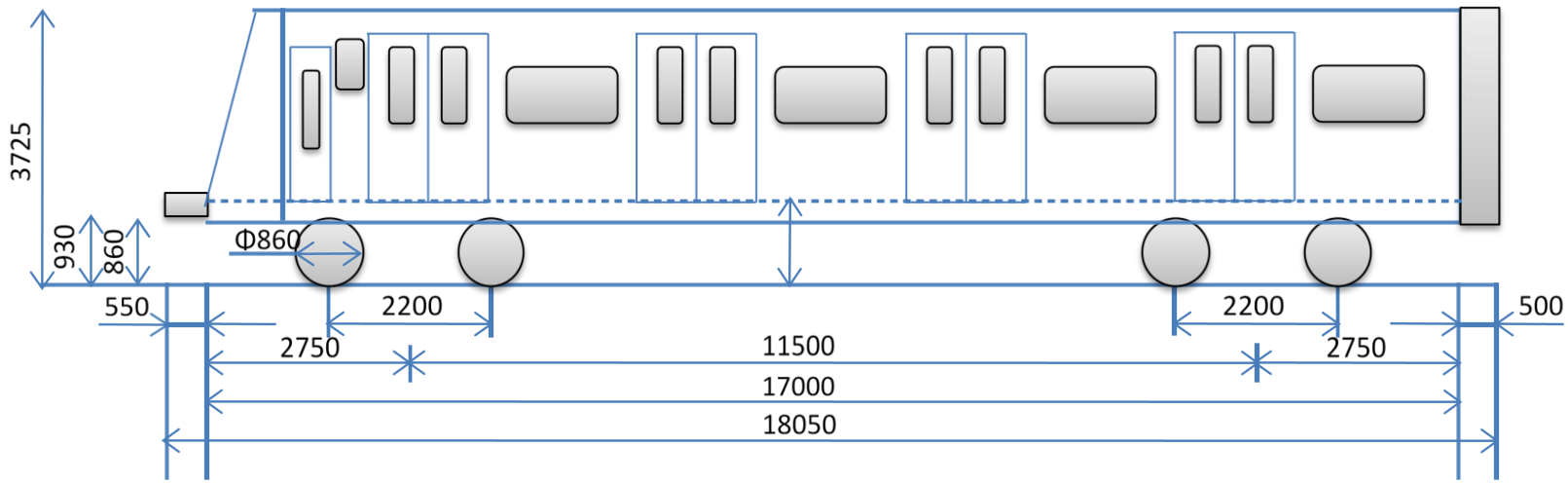
Διαμόρφωση Συρμού	Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων πλάτη με πλάτη Ιθυντήριο Όχημα - Κινητήριο Όχημα - Κινητήριο Όχημα.
Μήκος συρμού	106μ.
Πλάτος Οχήματος	2800χιλ.
Ύψος Οχήματος	3600χιλ.
Εσωτερικό Ύψος Οροφής Οχήματος	2180χιλ.
Βάρος Συρμού	178 τόνοι κενός 245 τόνοι με πλήρες φορτίο
Εύρος Τροχιάς	1435χιλ.
Τάση Λειτουργίας	750 VDC
Κινητήρες Έλξης	4 - 153kw DC Κινητήρες Έλξης ανά κινητήριο όχημα
Μέγιστη ταχύτητα	80χλμ. / ώρα

- **ΣΥΡΜΟΙ 2ης ΓΕΝΙΑΣ**

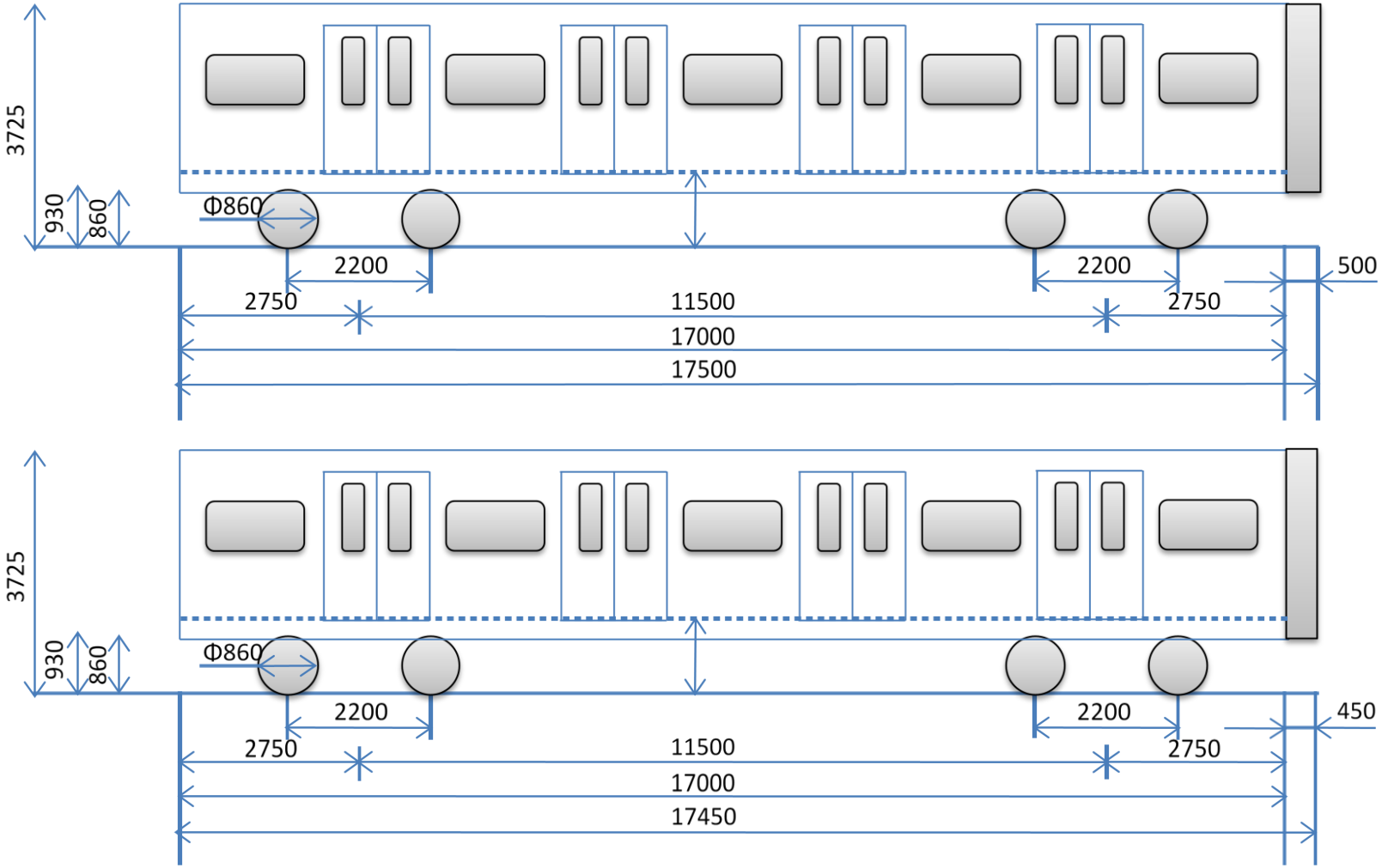
Οι συρμοί 2ης γενιάς έχουν συνολικό μήκος 106000 mm. Αποτελούνται από δύο φορεία των τριών βαγονιών. Ο συρμός δηλαδή έχει τη μορφή: DM – TC – MC – MC – TC - DM . Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 2200 mm, ενώ όλο το βαγόνι έχει μήκος 17000 mm **(Σχήμα 4.4 , 4.5).** Το όχημα έχει ύψος 3725 mm και πλάτος 2800 mm. Ενώ η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 1435 mm (**Σχήμα 4.3**)



Σχήμα 4.3 : Πρόσοψη συρμών 2ης γενιάς (Κλίμακα 1:100)



Σχήμα 4.4 : Συρμός 2ης γενιάς – DM- (Κλίμακα 1:100)



Σχήμα 4.5 : Σύρμος 2ης γενιάς της Sofia - TC, MC - (Κλίμακα 1:1000)

Ακολουθούν γενικές πληροφορίες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συρμών 2ης γενιάς όπως αναφέρονται στη σελίδα του Αττικό Μετρό στο ίντερνετ [6]:

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Αριθμός Συρμών	21 (7 Συρμοί DC/AC και 14 Συρμοί DC)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Χωρητικότητα Συρμών DC	196 Καθίσματα 866 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1062 Επιβάτες/Συρμό
Χωρητικότητα Συρμών DC-AC	158 Καθίσματα 868 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1026 Επιβάτες/Συρμό

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Διαμόρφωση Συρμού	Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων κατοπτρικά Κινητήριο/Ιθυντήριο Όχημα - Ρυμουλκούμενο Όχημα - Κινητήριο Όχημα
Μήκος συρμού	106μ.
Πλάτος Οχήματος	2800χιλ.
Ύψος Οχήματος	3690χιλ.
Εσωτερικό Ύψος Οροφής Οχήματος	2100χιλ. έως 2200χιλ.
Βάρος Συρμού DC/AC	202 τόνοι κενός 275 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Βάρος Συρμού DC	182 τόνοι κενός 255 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Εύρος Τροχιάς	1435χιλ.

Πέδηση	Ανάκτησης ενέργειας/Δυναμική/Πνευματική
Μέση Επιτάχυνση	1.00μ. / δευτερόλεπτο2
Μέση Επιβράδυνση	1,1μ./δευτ.2 (Υπό Κανονικές Συνθήκες) 1,20μ./δευτ.2 (Σε Συνθήκες Έκτακτης Ανάγκης)
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC/AC	120χλμ. / ώρα
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC	80χλμ. / ώρα

4.5.1 ΦΟΡΤΙΟ ΤΡΟΧΟΥ

Συρμοί 1ης γενιάς :

178 t ή 1746,18 kN (κενός) και 245t ή 2403,45 kN(με πλήρες φορτίο) άρα το φορτίο που αναλογεί στο κάθε τροχό είναι :

Για κενό συρμό :

Q = 1746,18kN/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 36.38 kN /τροχό

Για συρμό με πλήρες φορτίο :

Q = 2403,45/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 50 kN /τροχό

Άρα μια μέση τιμή του φορτίου ανά τροχό για τους συρμούς 1ης γενιάς είναι **Q = 43.22 kN**

Συρμοί 2ης γενιάς :

182 t ή 1785,42 kN (κενός) και 255t ή 2501.55 kN(με πλήρες φορτίο) άρα το φορτίο που αναλογεί στο κάθε τροχό είναι :

Για κενό συρμό :

Q = 1785,42kN/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 37.19 kN /τροχό

Για συρμό με πλήρες φορτίο :

Q = 2501,55/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 52,11 kN /τροχό

Άρα μια μέση τιμή του φορτίου ανά τροχό για τους συρμούς 2^{ης} γενιάς είναι **Q = 44.65 kN**

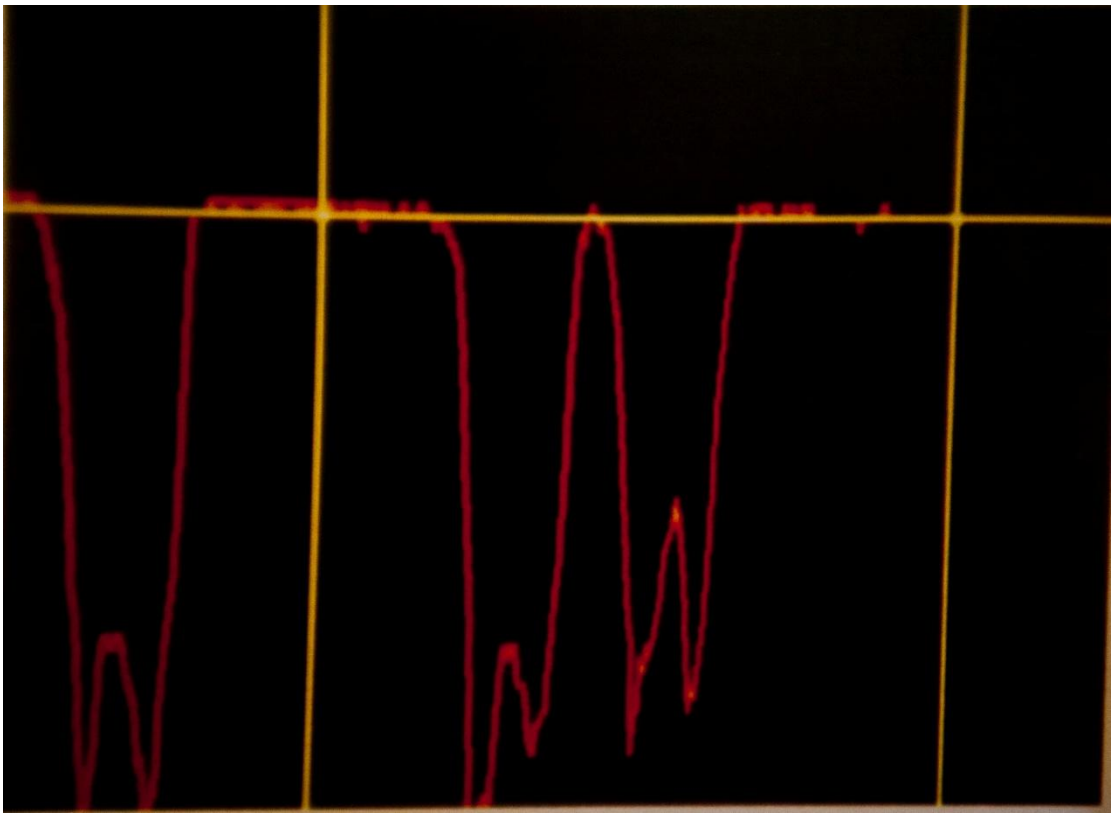
Επομένως, θα γίνει υπολογισμός των βυθίσεων για ένα μέσο φορτίο **Q=41 kN**

4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.6.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΣΤΟ ΣΥΝΤΑΓΜΑ

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο σταθμό του μετρό στο Σύνταγμα, που έγιναν στις 20 Ιουνίου 2011, πήραμε αποτελέσματα για τη διέλευση έντεκα συρμών. Από αυτούς, οι έξι ήταν 1^{ης} γενιάς ενώ οι υπόλοιποι πέντε ήταν 2^{ης} γενιάς. (Τα χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται στην παράγραφο **4.5**)

Όπως αναφέραμε και στην πρώτη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου, για κάθε διερχόμενο συρμό επιλέξαμε να καταγραφούν 4000 τιμές βύθισης. Οι καταγεγραμμένες τιμές παρουσιάζονταν διαγραμματικά στην οθόνη του υπολογιστή (**Εικόνα 4.14**).



Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο κατά τη διέλευση του συρμού

Εκτός όμως από το διάγραμμα αυτό, τα δεδομένα καταγράφονταν ταυτόχρονα σε ένα αρχείο CSV (Comma Separated Values). Το αρχείο αυτό έχει τη μορφή της **Εικόνας 4.15**. Όπως βλέπουμε, πριν από την καταγραφή των αποτελεσμάτων δίνονται οι σταθερές που ορίσαμε αρχικά («Sampling Rate», «Range», «Unit»), καθώς και η ημερομηνία και ώρα μέτρησης.

```
ID No.,"PCD-300A"
Title,"Vicky 1"
Test Date,"06/20/2011","04:59:03"
Meas CH Nos,1
Sampling Rate(Hz),100
Data/CH,2616
Meas Time,26.160
CH No.,1
Range,"10000μm/m"
Lowpass Filter,"***"
Coupling,"***"
Coefficient,1.0000
Offset,0.0000
Unit,"mm"
CH Name,""
1,1005.0
2,1005.0
3,1005.0
4,1000.0
5,1005.0
6,1005.0
7,1000.0
8,1000.0
9,1005.0
10,1005.0
11,1005.0
```

Εικόνα 4.15: Τμήμα αρχείου CSV καταγραφής αποτελεσμάτων μέτρησης

4.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθήσαμε τα εξής βήματα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που πήραμε από το PCD-300A:

❖ **Βήμα 1^{ο}**

Η μετατροπή των αρχείων CSV σε αρχεία Excel. Έτσι, και για τις έντεκα μετρήσεις πήραμε από ένα φύλλο εργασίας του Excel με δύο στήλες. Στην πρώτη στήλη ήταν ο αύξων αριθμός των καταγεγραμμένων τιμών και στη δεύτερη ήταν οι τιμές που κατέγραψε το PCD-300A κατά τη διέλευση των συρμών (βυθίσεις και ανυψώσεις). Τμήμα του αποτελεί ο **Πίνακας 4.1**.

A/A	Βυθίσεις
1	1005,00
2	1005,00
3	1005,00
4	1005,00
5	1005,00
6	1005,00
. . .	. . .
351	880,00
352	870,00
353	860,00
354	850,00
355	830,00
356	820,00
357	810,00
358	800,00
. . .	. . .

Πίνακας 4.1: Τμήμα πίνακα Excel 1^{ης} μέτρησης (1^{ο} βήμα επεξεργασίας)

❖ **Βήμα 2^{ο}**

Πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι η βελόνα του μηκυνσιομέτρου, πριν αρχίσουν οι διελεύσεις των συρμών, ήταν λίγο συμπιεσμένη. Γι' αυτό το λόγο η αρχική τιμή της βύθισης δεν είναι μηδενική. Επομένως το δεύτερο βήμα ήταν να αφαιρέσουμε την αρχική αυτή τιμή (**Πίνακας 4.2**)

Α/Α	**Βυθίσεις**	**Σχετική τιμή βύθισης**
1	1005,00	0
2	1005,00	0
3	1005,00	0
4	1005,00	0
5	1005,00	0
6	1005,00	0
. . .	. . .	. . .
351	880,00	-125,00
352	870,00	-135,00
353	860,00	-145,00
354	850,00	-155,00
355	830,00	-175,00
356	820,00	-185,00
357	810,00	-195,00
358	800,00	-205,00
. . .	. . .	. . .

Πίνακας 4.2: Τμήμα πίνακα Excel 1^{ης} μέτρησης (2^{ο} βήμα επεξεργασίας)

❖ Βήμα 3^{ο}

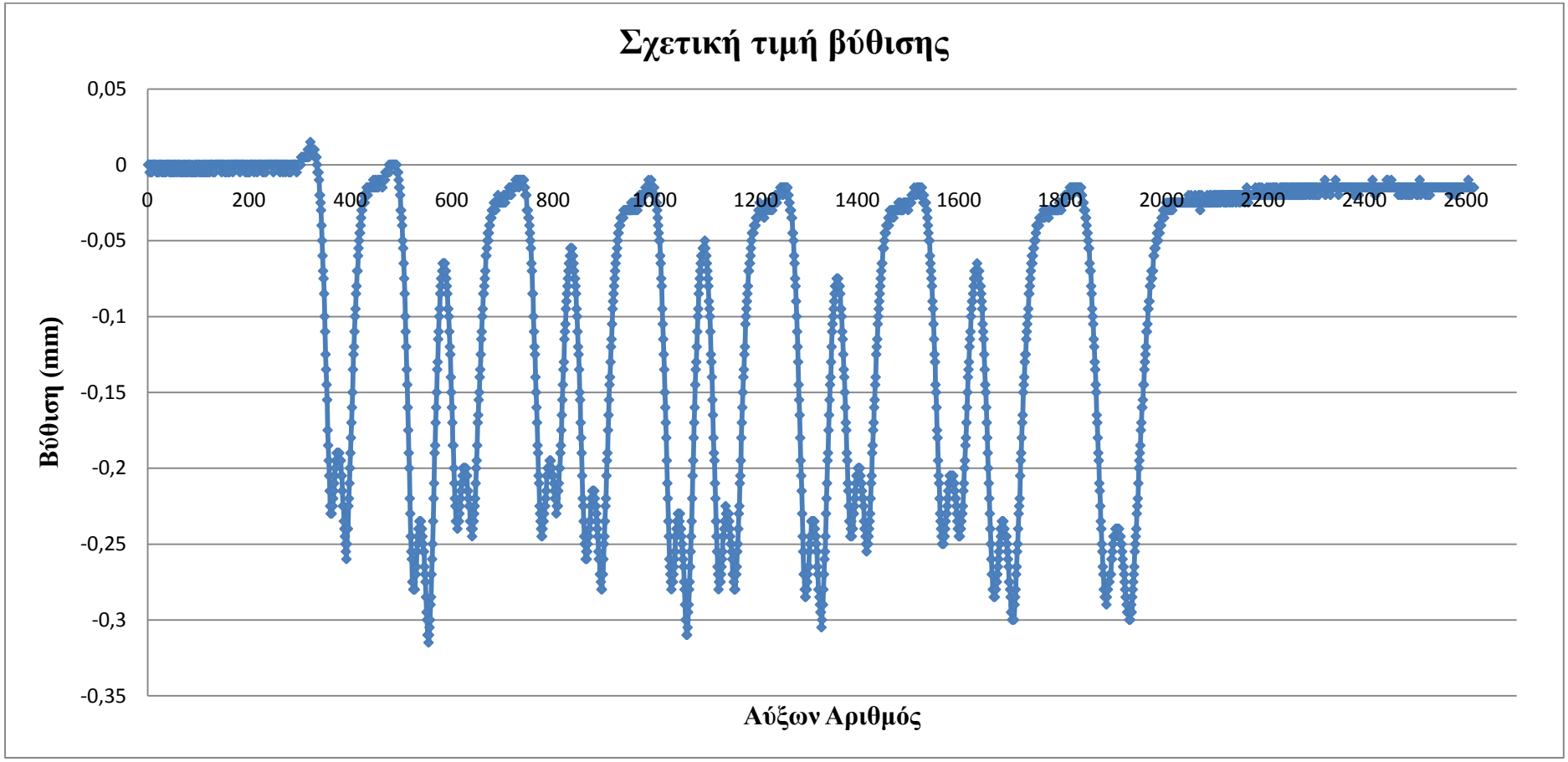
Σε αυτό το σημείο διαιρέσαμε τις τιμές της τρίτης στήλης του προηγούμενου πίνακα με 1000 ώστε οι τιμές να μετατραπούν σε mm.

Α/Α	Βυθίσεις	Σχετική τιμή βύθισης	Σχετική τιμή βύθισης (mm)
1	1005,00	0	0
2	1005,00	0	0
3	1005,00	0	0
4	1005,00	0	0
5	1005,00	0	0
6	1005,00	0	0
. . .	. . .	. . .	. . .
351	880,00	-125,00	-0,125
352	870,00	-135,00	-0,135
353	860,00	-145,00	-0,145
354	850,00	-155,00	-0,155
355	830,00	-175,00	-0,175
356	820,00	-185,00	-0,185
357	810,00	-195,00	-0,195
358	800,00	-205,00	-0,205
. . .	. . .	. . .	. . .

Πίνακας 4.3: Τμήμα πίνακα Excel 1^{ης} μέτρησης (3^{ο} βήμα επεξεργασίας)

❖ Βήμα 4^{ο}

Στη συνέχεια μορφώνουμε τα διαγράμματα του προηγούμενου πίνακα για όλες τις μετρήσεις όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



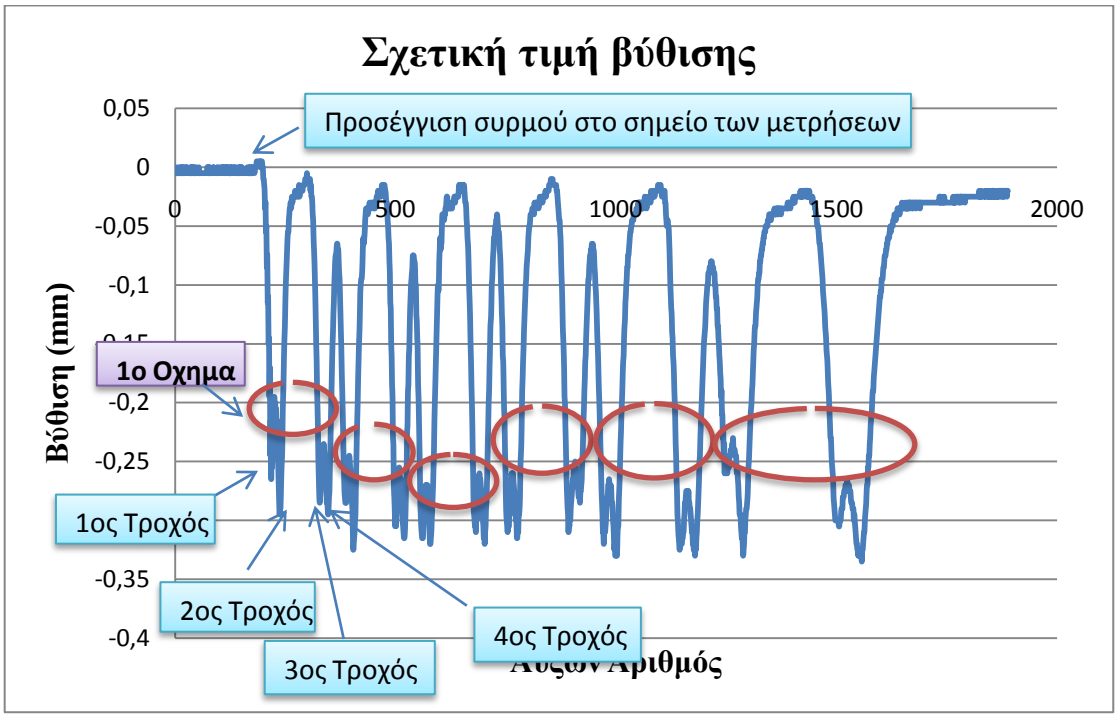
Διάγραμμα 4.1 : 1η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς

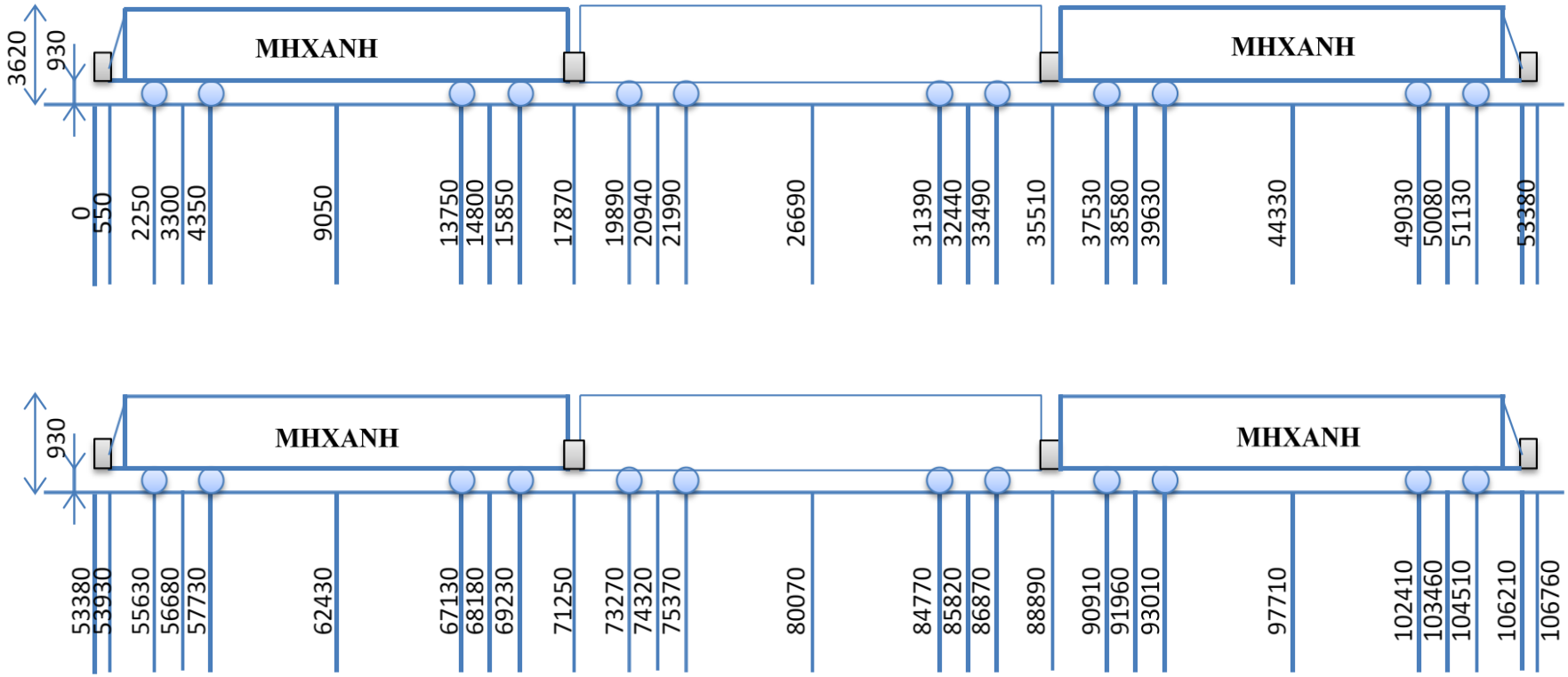
Τα υπόλοιπα διαγράμματα των μετρήσεων βρίσκονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** στο τέλος του τεύχους.

❖ **Βήμα 5^{ο}**

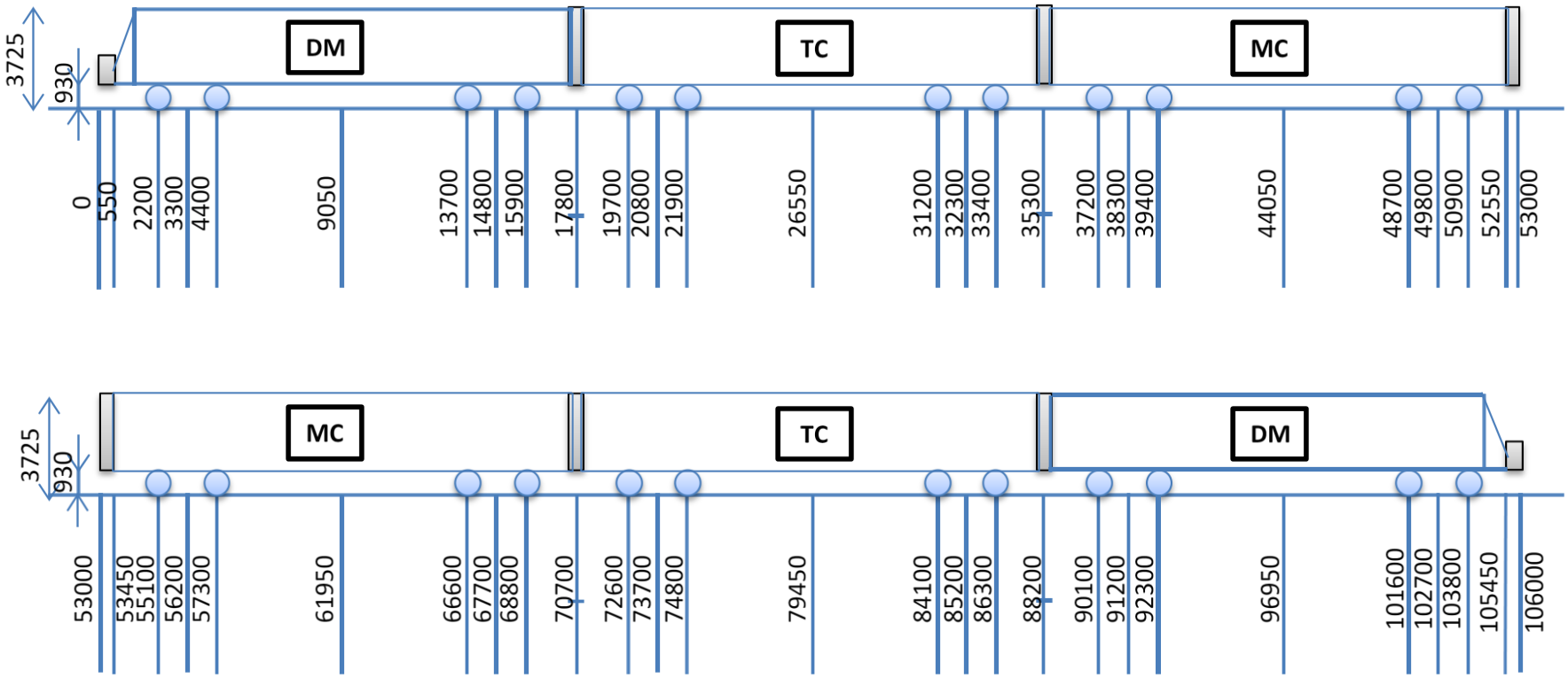
Στο τελευταίο βήμα της επεξεργασίας των δεδομένων πρέπει ο άξονας των x των προηγούμενων διαγραμμάτων (Αύξων Αριθμός) να αντικατασταθεί με άξονα που να έχει ως μονάδα μέτρησης το μήκος του κάθε συρμού σε μέτρα.

Λόγω της μορφής των προηγούμενων διαγραμμάτων και γνωρίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ των τροχών των οχημάτων (**Σχήματα 4.6, 4.**7) μπορούμε με ευκολία να μορφώσουμε τα διαγράμματα του μήκους του συρμού (άξονας x) και της βύθισης (άξονας y). Παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο από τα διαγράμματα αυτά στις επόμενες σελίδες ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β** στο τέλος του τεύχους.





Σχήμα 4.6 : Συρμοί 1ης γενιάς (Κλίμακα 1:250)

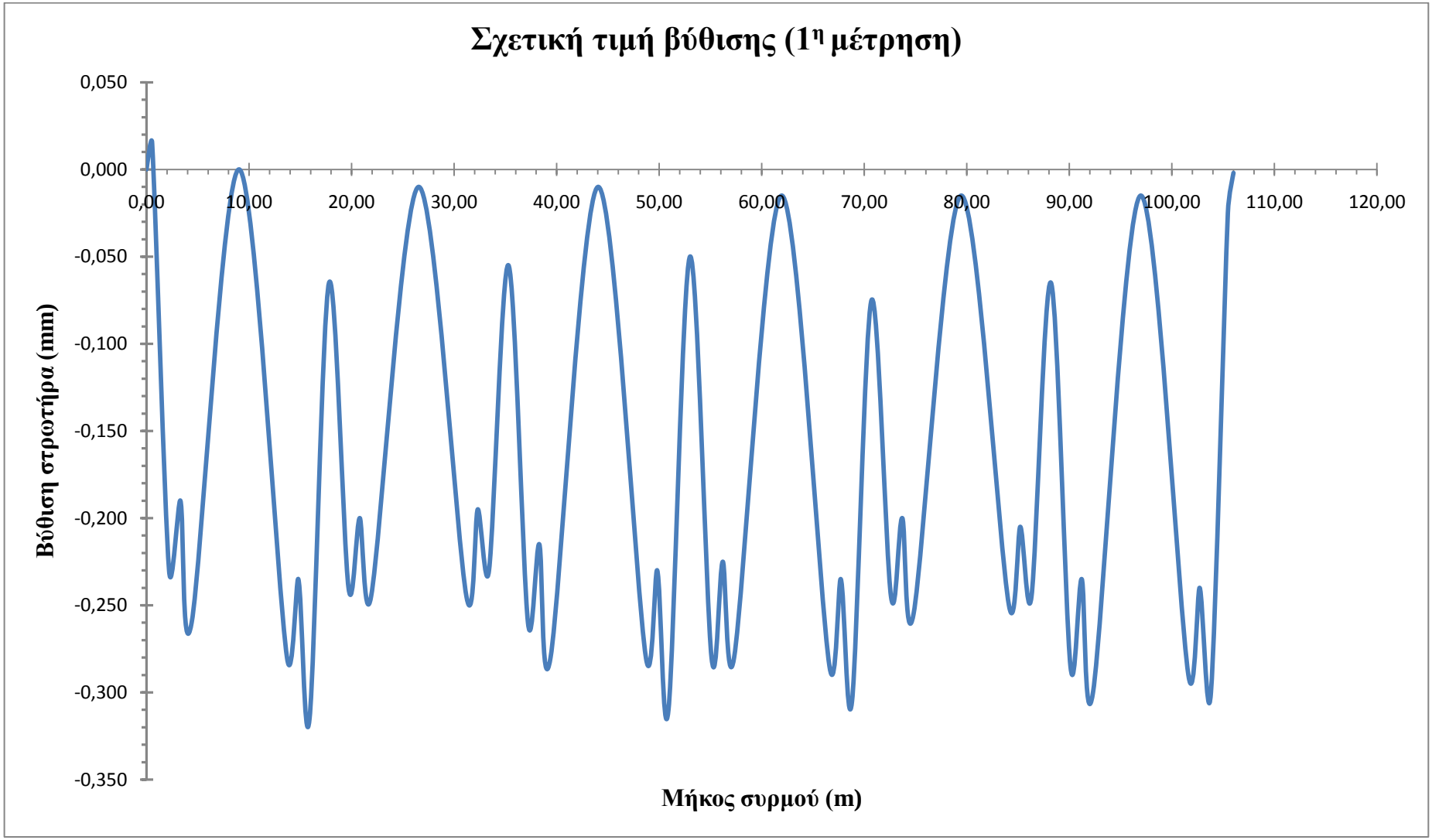


Σχήμα 4.7 : Συρμοί 2ης γενιάς (Κλίμακα 1:250)

Πίνακας 4.4
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 1η
Συρμός : 2ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 4:59:03
Πληρότητα : Άδειο

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,015
2200	2,20	-0,230
3300	3,30	-0,190
4400	4,40	-0,260
9050	9,05	0,000
13700	13,70	-0,280
14800	14,80	-0,235
15900	15,90	-0,315
17800	17,80	-0,065
19700	19,70	-0,240
20800	20,80	-0,200
21900	21,90	-0,245
26550	26,55	-0,010
31200	31,20	-0,245
32300	32,30	-0,195
33400	33,40	-0,230
35300	35,30	-0,055
37200	37,20	-0,260
38300	38,30	-0,215
39400	39,40	-0,280
44050	44,05	-0,010
48700	48,70	-0,280
49800	49,80	-0,230
50900	50,90	-0,310
53000	53,00	-0,05

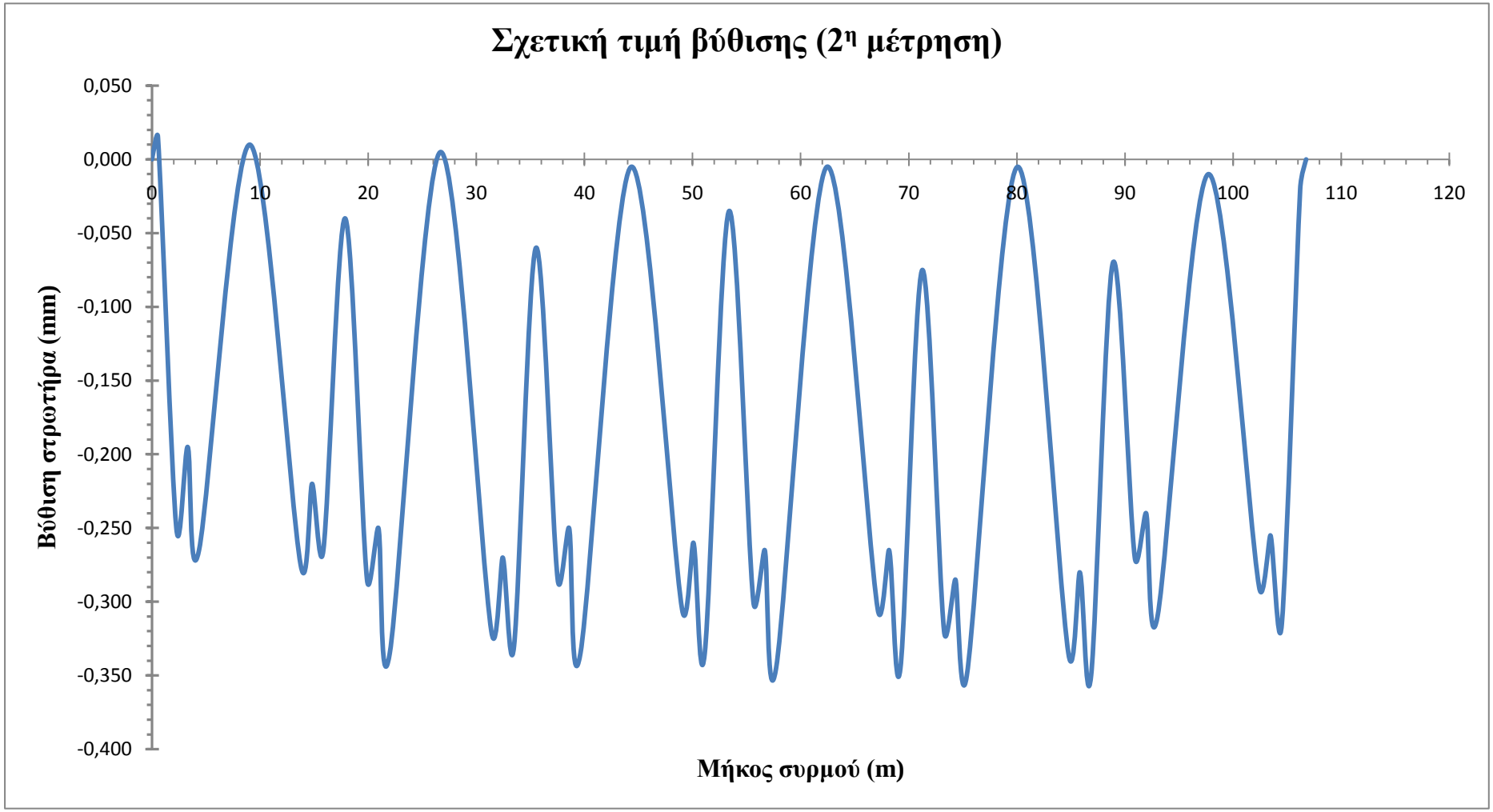
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,280
56200	56,20	-0,225
57300	57,30	-0,280
61950	61,95	-0,015
66600	66,60	-0,285
67700	67,70	-0,235
68800	68,80	-0,305
70700	70,70	-0,075
72600	72,60	-0,245
73700	73,70	-0,200
74800	74,80	-0,255
79450	79,45	-0,015
84100	84,10	-0,250
85200	85,20	-0,205
86300	86,30	-0,245
88200	88,20	-0,065
90100	90,10	-0,285
91200	91,20	-0,235
92300	92,30	-0,300
96950	96,95	-0,015
101600	101,60	-0,290
102700	102,70	-0,240
103800	103,80	-0,300
105450	105,45	-0,025
106000	106,00	-0,002


Σχετική τιμή βύθισης (1η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.5
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : $2^{η}$
Συρμός : $1^{ης}$ γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:23:59
Πληρότητα : 80%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,250
3300	3,3	-0,195
4350	4,35	-0,265
9050	9,05	0,010
13750	13,75	-0,275
14800	14,8	-0,220
15850	15,85	-0,265
17870	17,87	-0,040
19890	19,89	-0,285
20940	20,94	-0,250
21990	21,99	-0,335
26690	26,69	0,005
31390	31,39	-0,320
32440	32,44	-0,270
33490	33,49	-0,330
35510	35,51	-0,060
37530	37,53	-0,285
38580	38,58	-0,250
39630	39,63	-0,335
44330	44,33	-0,005
49030	49,03	-0,305
50080	50,08	-0,260
51130	51,13	-0,335
53380	53,38	-0,035

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,300
56680	56,68	-0,265
57730	57,73	-0,345
62430	62,43	-0,005
67130	67,13	-0,305
68180	68,18	-0,265
69230	69,23	-0,345
71250	71,25	-0,075
73270	73,27	-0,320
74320	74,32	-0,285
75370	75,37	-0,350
80070	80,07	-0,005
84770	84,77	-0,335
85820	85,82	-0,280
86870	86,87	-0,350
88890	88,89	-0,070
90910	90,91	-0,270
91960	91,96	-0,240
93010	93,01	-0,310
97710	97,71	-0,010
102410	102,41	-0,290
103460	103,46	-0,255
104510	104,51	-0,315
106210	106,21	-0,020
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (2η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

4.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ

Στον **Πίνακα 4.15** υπολογίζεται η μέση τιμή της βύθισης του στρωτήρα τη στιγμή που διέρχεται ο τροχός πάνω από το μηκυνσιόμετρο.

Συγκεκριμένα εξάγουμε τα κάτωθι αποτελέσματα:

$1^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,271 mm (Συρμός $2^{ης}$ γενιάς)

$2^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,309 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

$3^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,295 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

$4^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,295 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

$5^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,294 mm (Συρμός $2^{ης}$ γενιάς)

$6^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,282 mm (Συρμός $2^{ης}$ γενιάς)

$7^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,305 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

$8^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,271 mm (Συρμός $2^{ης}$ γενιάς)

$9^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,289 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

$10^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,300 mm (Συρμός $2^{ης}$ γενιάς)

$11^{η}$ μέτρηση : Μέση βύθιση = 0,308 mm (Συρμός $1^{ης}$ γενιάς)

Επομένως η μέση τιμή όλων των μετρήσεων είναι :

$1^{ης}$ Γενιάς συρμοί : $\mathbf{y_{\mu} = 0,300}$ **mm**

$2^{ης}$ Γενιάς συρμοί : $\mathbf{y_{\mu} = 0,284}$ **mm**

Άρα η συνολική μέση τιμή είναι : y_{μ} = 0,292 mm ή αλλιώς $\mathbf{y_{\mu} = 0,3}$ **mm**

ΜΕΤΡΗ-ΣΗ \ ΤΡΟΧΟΣ	1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η	9η	10η	11η
1ος	0,230	0,250	0,255	0,245	0,250	0,290	0,245	0,275	0,230	0,255	0,265
2ος	0,260	0,265	0,280	0,265	0,260	0,290	0,275	0,255	0,250	0,285	0,295
3ος	0,280	0,275	0,280	0,270	0,305	0,270	0,280	0,270	0,260	0,340	0,285
4ος	0,315	0,265	0,295	0,280	0,310	0,290	0,300	0,275	0,270	0,360	0,295
5ος	0,240	0,285	0,305	0,255	0,270	0,260	0,290	0,250	0,265	0,285	0,285
6ος	0,245	0,335	0,310	0,320	0,280	0,265	0,330	0,250	0,285	0,295	0,325
7ος	0,245	0,320	0,300	0,275	0,255	0,245	0,310	0,240	0,280	0,280	0,305
8ος	0,230	0,330	0,330	0,325	0,255	0,250	0,325	0,220	0,295	0,265	0,315
9ος	0,260	0,285	0,310	0,300	0,295	0,290	0,295	0,285	0,310	0,290	0,315
10ος	0,280	0,335	0,325	0,310	0,295	0,295	0,330	0,285	0,315	0,305	0,320
11ος	0,280	0,305	0,310	0,295	0,295	0,285	0,305	0,270	0,295	0,300	0,310
12ος	0,310	0,335	0,330	0,315	0,290	0,290	0,320	0,265	0,305	0,315	0,320
13ος	0,280	0,300	0,295	0,300	0,305	0,300	0,300	0,300	0,295	0,300	0,310
14ος	0,280	0,345	0,315	0,325	0,310	0,310	0,335	0,275	0,300	0,295	0,315
15ος	0,285	0,305	0,290	0,260	0,310	0,290	0,295	0,280	0,315	0,305	0,310
16ος	0,305	0,345	0,310	0,320	0,330	0,300	0,325	0,275	0,300	0,315	0,285
17ος	0,245	0,320	0,315	0,310	0,295	0,275	0,320	0,275	0,310	0,275	0,320
18ος	0,255	0,350	0,200	0,320	0,300	0,270	0,345	0,265	0,325	0,290	0,330
19ος	0,250	0,335	0,310	0,310	0,280	0,250	0,300	0,250	0,300	0,285	0,325
20ος	0,245	0,350	0,310	0,335	0,275	0,260	0,315	0,250	0,315	0,280	0,330
21ος	0,285	0,270	0,245	0,250	0,325	0,300	0,255	0,295	0,265	0,315	0,260
22ος	0,300	0,310	0,270	0,295	0,330	0,290	0,295	0,300	0,280	0,330	0,330
23ος	0,290	0,290	0,285	0,275	0,310	0,295	0,290	0,305	0,275	0,315	0,305
24ος	0,300	0,315	0,300	0,330	0,335	0,315	0,330	0,300	0,300	0,320	0,335
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (mm)	**0,271**	**0,309**	**0,295**	**0,295**	**0,294**	**0,282**	**0,305**	**0,271**	**0,289**	**0,300**	**0,308**

Πίνακας 4.15: Υπολογισμός μέσης τιμής της βύθισης

4.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν καταρχήν ότι ο συντελεστής ελατηρίου της ελαστικής "σόλας" κυμαίνεται σε τιμές πάνω από 15 kN/mm.

Επειδή, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, οι τιμές αυτές δε συμφωνούν με την τιμή που δίνεται από το Αττικό Μετρό αποφασίστηκε να γίνει εργαστηριακός έλεγχος των τιμών του rail pad, της ελαστικής "σόλας" και της "μπότας".

Ο έλεγχος έγινε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κουρκουλή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο που ακολουθεί.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ c

Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός του συντελεστή ελατηρίου c όλων των ελαστικών μέσων που παρεμβάλλονται στην επιδομή του Αττικό Μετρό.

Τα υλικά αυτά είναι : το ελαστικό υπόθεμα που τοποθετείται κάτω από τη σιδηροτροχιά (**Rail Pad**), το ελαστικό υπόθεμα που τοποθετείται κάτω από το στρωτήρα (**"Σόλα"**) και το υλικό που βρίσκεται κάτω από τον πάτο (**"Μπότα"**).

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. με την σημαντική βοήθεια του κ. Κουρκουλή.

5.1 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΔΙΕΞΕΓΩΓΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μηχάνημα το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τη διεξαγωγή των δοκιμών είναι το Electro-mechanical loading frame INSTRON 1125, 50kN και φαίνεται στην **Εικόνα 5.1**.

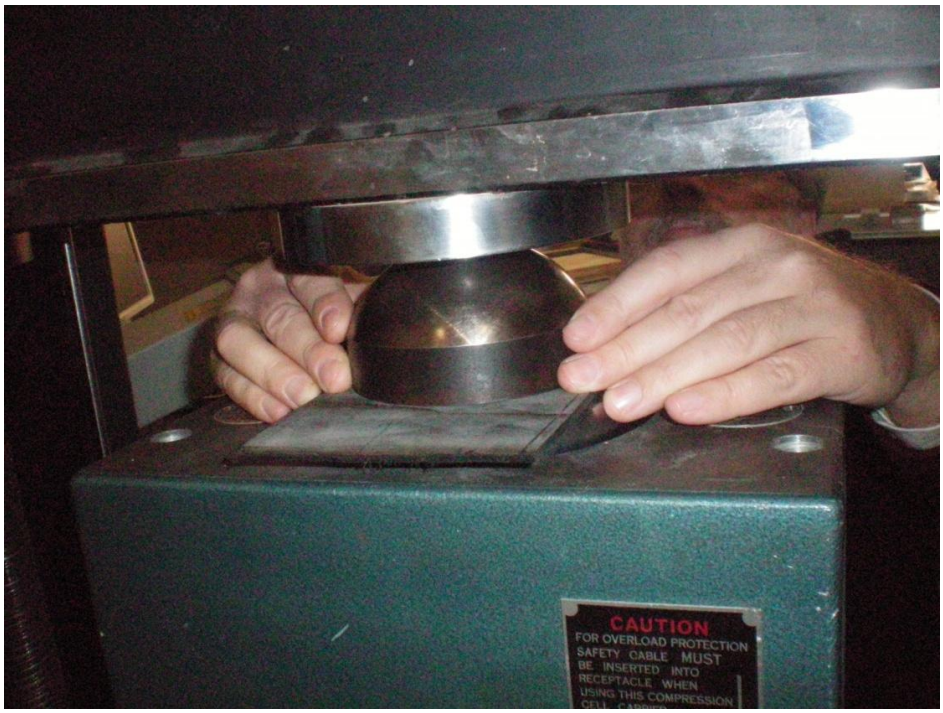
Το μηχάνημα αποτελείται από: την κινητή πλάκα που επιβάλλει το φορτίο, την ηλεκτρονική διάταξη που μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε το φορτίο που θέλουμε, σε κάθε δοκιμή, να επιβάλλει η κινητή πλάκα (Data acquisition and store electronic device).

Εικόνα 5.1: Electro-mechanical loading frame INSTRON 1125, 50kN

5.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή του ελατηρίου όλων των προαναφερθέντων υλικών τοποθετήσαμε στο μηχάνημα τα δοκίμια, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 5.1**.

Για να εξασφαλίσουμε ότι το φορτίο θα είναι συνεχώς κατακόρυφο τοποθετήσαμε, πάνω από τα προς εξέταση δοκίμια, ημισφαιρική κεφαλή διαμέτρου 101 mm (**Εικόνα 5.2**). Στη συνέχεια θέσαμε σε κίνηση την πλάκα επιβολής του φορτίου μέχρι να ακουμπήσει οριακά την ημισφαιρική κεφαλή. Σε αυτό το σημείο τοποθετήσαμε το μηκυνσιόμετρο της **Εικόνας 5.3** στο πάνω μέρος της κινητής πλάκας, ώστε για κάθε διαφορετική τιμή επιβαλλόμενου φορτίου να διαβάζουμε την τιμή της βύθισης του δοκιμίου. Η ταχύτητα φόρτισης ήταν 0,5cm/min.



Εικόνα 5.2: Ημισφαιρική κεφαλή διαμέτρου 101 mm

Εικόνα 5.3: Μηκυνσιόμετρο

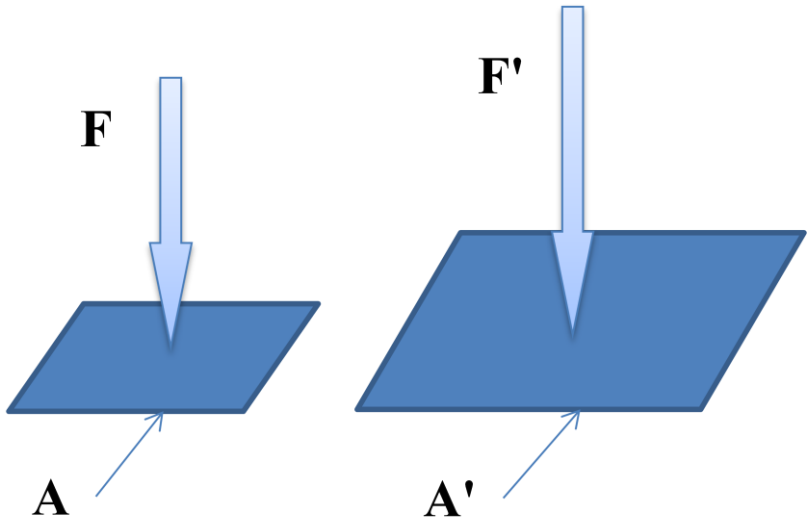
5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως είναι γνωστό από τη μηχανική η τάση δίνεται από τον τύπο :

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{F}{A}}$$

Όπου F : το φορτίο που επιβάλλουμε στο δοκίμιο

A : το εμβαδόν του δοκιμίου



Στις δοκιμές μετρήσαμε τη βύθιση που προκαλεί ένα φορτίο F στο δοκίμιο με εμβαδό A. Για να βρούμε τη δύναμη που προκαλεί την ίδια βύθιση στα προς εξέταση υλικά με εμβαδόν A' σκεφτόμαστε ως εξής:

Θα πρέπει να ισχύει: σ = σ'

$$\frac{F}{A} = \frac{F'}{A'}$$

$$F' = \frac{F}{A} \cdot A'$$

$$\boldsymbol{F' = \sigma \cdot A'}$$

Έτσι για κάθε υλικό (Rail Pad, "σόλα", "μπότα") μπορούμε να κάνουμε τα διαγράμματα βύθισης – δύναμης και έτσι να πάρουμε τον ζητούμενο συντελεστή ελατηρίου c.

5.3.1 RAIL PAD

Το rail pad που βρίσκεται κάτω από τη σιδηροτροχιά έχει διαστάσεις 150 mm * 175 mm. Άρα το εμβαδόν είναι : **A'= 26.250 mm^2**

Η ημισφαιρική κεφαλή έχει εμβαδόν : A = (π*d^2) /4 =(π*101^2)/4 ή **A=8.011,85 mm^2**

Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα του πειράματος :

1^η στήλη : Αύξων αριθμός μέτρησης

2^η στήλη : Επιβαλλόμενο φορτίο μέτρησης F σε kN

3^η στήλη : Μετρημένη από το μηκυνσιόμετρο βύθιση *10^{-5}m

4^η στήλη : Επιβαλλόμενο φορτίο μέτρησης F σε N

5^η στήλη : Μετρημένη από το μηκυνσιόμετρο βύθιση σε mm

6^η στήλη : Τάση δοκιμίου = Φορτίο * Εμβ. κεφαλής ή σ = F * A (N/mm^2)

7^η στήλη : Φορτίο Rail pad = Τάση δοκιμίου * Εμβ. Rail pad ή F'=σ*A' (N)

8^η στήλη : Φορτίο Rail pad F' σε kN

A/A	F (kN)	ΒΥΘΙΣΗ (*10^{-5}m)	F (N)	ΒΥΘΙΣΗ (mm)	σ = F/ A (N/mm^2)	F' = σ * A' (N)	F' (kN)
1	0,00	0,00	0	0,000	0,000	0,00	0,0
2	2,40	14,00	2400	0,140	0,300	7863,36	7,9
3	3,80	21,00	3800	0,210	0,474	12450,31	12,5
4	4,90	25,00	4900	0,250	0,612	16054,35	16,1
5	7,80	35,00	7800	0,350	0,974	25555,91	25,6
6	10,70	44,50	10700	0,445	1,336	35057,46	35,1
7	13,00	52,00	13000	0,520	1,623	42593,18	42,6
8	15,20	59,50	15200	0,595	1,897	49801,25	49,8
9	18,40	69,00	18400	0,690	2,297	60285,73	60,3
10	20,60	75,50	20600	0,755	2,571	67493,80	67,5
11	23,20	82,00	23200	0,820	2,896	76012,44	76,0
12	25,90	89,00	25900	0,890	3,233	84858,71	84,9
13	27,90	94,00	27900	0,940	3,482	91411,51	91,4
14	29,20	97,00	29200	0,970	3,645	95670,83	95,7
15	30,90	101,00	30900	1,010	3,857	101240,70	101,2

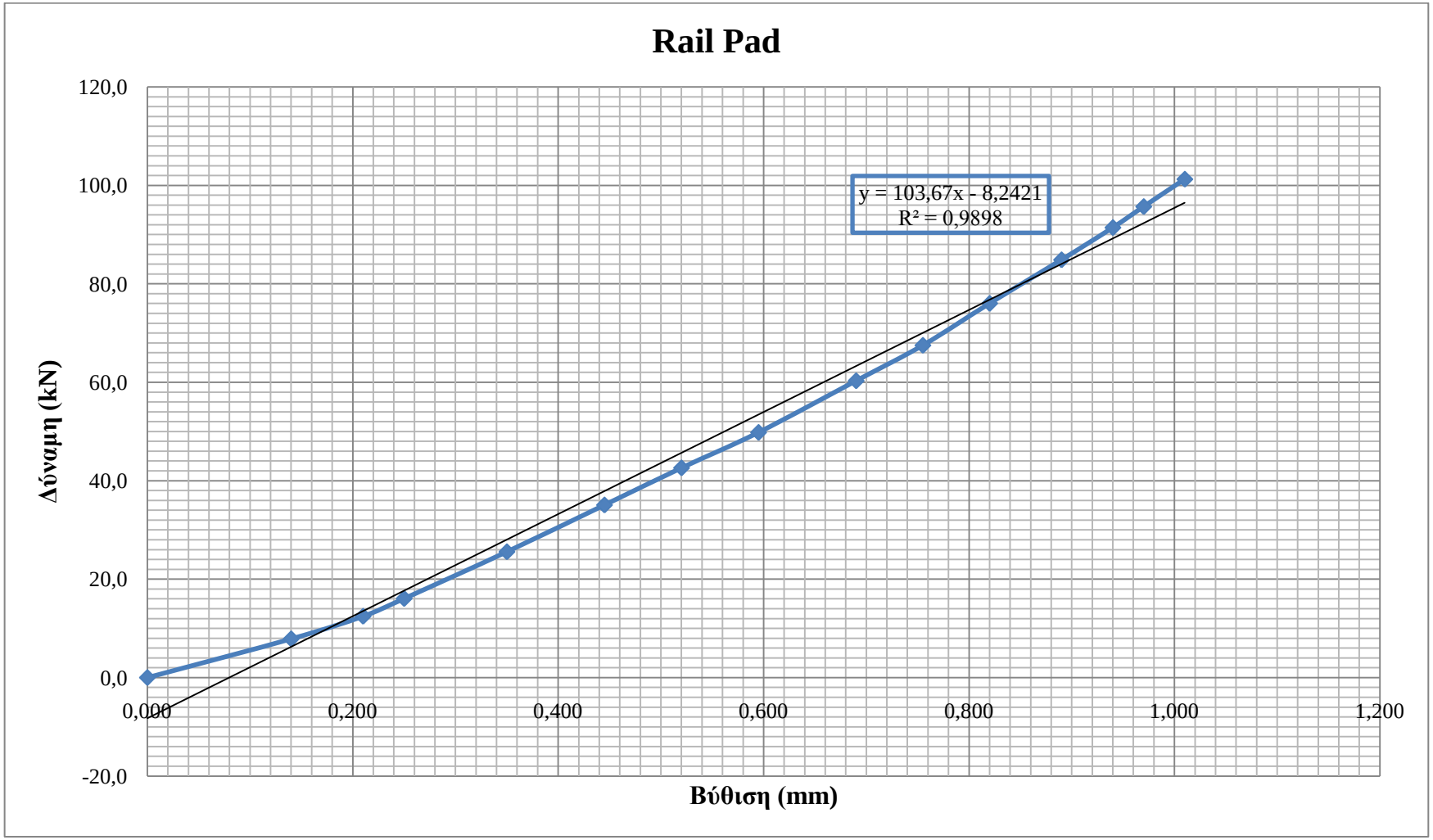
Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα δοκιμών για το Rail pad

Επομένως ο συντελεστής ελατηρίου για τον Rail pad είναι 103.67 kN/mm (τιμή της κλίσης του διαγράμματος : dF/dx) αφού με γραμμική παλινδρόμηση προέκυψε η ακόλουθη συνάρτηση :

$y = 103.67\ x - 8.2421$ με $R^2 = 0{,}9898$ (συντελεστής συσχέτισης)

Στους υπολογισμούς εφ' εξής θα χρησιμοποιείται η τιμή :

$c_{\text{Rail pad}}$ = 104 kN/mm



Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για το Rail pad

5.3.2 ΕΛΑΣΤΙΚΗ "ΣΟΛΑ"

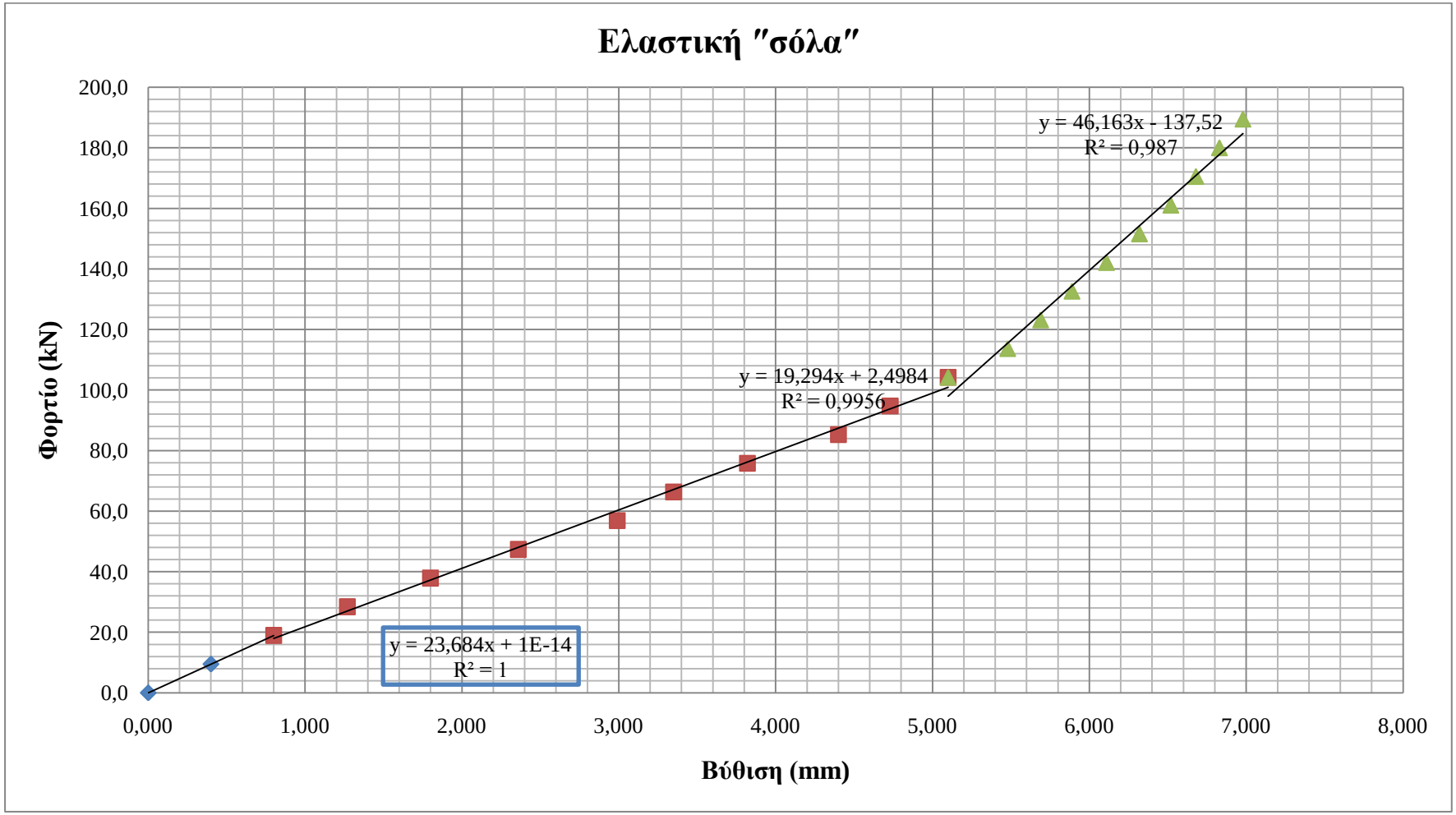
Η ελαστική "σόλα" που βρίσκεται κάτω από το στρωτήρα έχει διαστάσεις: 660 mm * 230 mm. Άρα το εμβαδόν είναι : **A'= 151.800 mm^2**

Η ημισφαιρική κεφαλή έχει εμβαδόν : A = (π*d^2) /4 =(π*101^2)/4 ή **A=8.011,85 mm^2**

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών έγιναν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως για το rail pad.

A/A	F (kN)	ΒΥΘΙΣΗ (*10^{-5}m)	F (N)	ΒΥΘΙΣΗ (mm)	σ = F/ A (N/mm^2)	F' = σ * A' (N)	F' (kN)
1	0,00	0,00	0	0,000	0,000	0,00	0,0
2	0,50	40,00	500	0,400	0,062	9473,47	9,5
3	1,00	80,00	1000	0,800	0,125	18946,94	18,9
4	1,50	127,00	1500	1,270	0,187	28420,41	28,4
5	2,00	180,00	2000	1,800	0,250	37893,89	37,9
6	2,50	236,00	2500	2,360	0,312	47367,36	47,4
7	3,00	299,00	3000	2,990	0,374	56840,83	56,8
8	3,50	335,00	3500	3,350	0,437	66314,30	66,3
9	4,00	382,00	4000	3,820	0,499	75787,77	75,8
10	4,50	440,00	4500	4,400	0,562	85261,24	85,3
11	5,00	473,00	5000	4,730	0,624	94734,71	94,7
12	5,50	510,00	5500	5,100	0,686	104208,19	104,2
13	6,00	548,00	6000	5,480	0,749	113681,66	113,7
14	6,50	569,00	6500	5,690	0,811	123155,13	123,2
15	7,00	589,00	7000	5,890	0,874	132628,60	132,6
16	7,50	611,00	7500	6,110	0,936	142102,07	142,1
17	8,00	632,00	8000	6,320	0,999	151575,54	151,6
18	8,50	652,00	8500	6,520	1,061	161049,01	161,0
19	9,00	668,00	9000	6,680	1,123	170522,48	170,5
20	9,50	683,00	9500	6,830	1,186	179995,96	180,0
21	10,00	698,00	10000	6,980	1,248	189469,43	189,5

Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα δοκιμών για τον πάτο



Διάγραμμα 5.2 : Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης για την ελαστική "σόλα"

Από τη μορφή του διαγράμματος κάνουμε την παρατήρηση ότι η συμπεριφορά του υλικού διαφοροποιείται ανάλογα με το φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο.

Στην περίπτωσή μας το φορτίο δεν υπερβαίνει τα 20kN, έτσι ο συντελεστής ελατηρίου για την ελαστική "σόλα" καθορίζεται από το πρώτο τμήμα του διαγράμματος.

Επομένως, ο συντελεστής ελατηρίου για την ελαστική "σόλα" είναι 23,684 kN/mm (τιμή της κλίσης του διαγράμματος : dF/dx) αφού με γραμμική παλινδρόμηση προέκυψε η ακόλουθη συνάρτηση :

$y = 23{,}684\ x + 4*10^{-15}$ με $R^2 = 1$ (συντελεστής συσχέτισης)

Στους υπολογισμούς εφ' εξής θα χρησιμοποιείται η τιμή :

$\mathbf{c_{\text{ελαστικής "σόλας"}} = 24\ kN/mm}$

5.3.3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ "ΜΠΟΤΑ"

Η ελαστική "μπότα" που βρίσκεται κάτω από την ελαστική "σόλα" έχει διαστάσεις: 660 mm * 230 mm. Άρα το εμβαδόν είναι :

A'= 151.800 mm^2

Η ημισφαιρική κεφαλή έχει εμβαδόν : A = (π*d^2) /4 =(π*101^2)/4 ή **A=8.011,85 mm^2**

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών έγιναν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως για το rail pad.

A/A	F (kN)	ΒΥΘΙΣΗ (*10^{-5}m)	F (N)	ΒΥΘΙΣΗ (mm)	σ = F/ A (N/mm^2)	F' = σ * A' (N)	F' (kN)
1	0,00	0,00	0	0,000	0,000	0,00	0,000
2	2,80	19,00	2800	0,190	0,349	53051,44	53,051
3	5,20	29,00	5200	0,290	0,649	98524,10	98,524
4	7,60	38,00	7600	0,380	0,949	143996,76	143,997
5	10,50	48,00	10500	0,480	1,311	198942,90	198,943
6	12,60	55,00	12600	0,550	1,573	238731,48	238,731
7	14,60	63,00	14600	0,630	1,822	276625,36	276,625
8	17,30	71,00	17300	0,710	2,159	327782,11	327,782
9	20,50	81,50	20500	0,815	2,559	388412,33	388,412
10	22,60	89,00	22600	0,890	2,821	428200,91	428,201
11	25,10	96,00	25100	0,960	3,133	475568,26	475,568
12	27,60	104,50	27600	1,045	3,445	522935,62	522,936
13	29,00	111,00	29000	1,110	3,620	549461,34	549,461
14	30,70	118,00	30700	1,180	3,832	581671,14	581,671

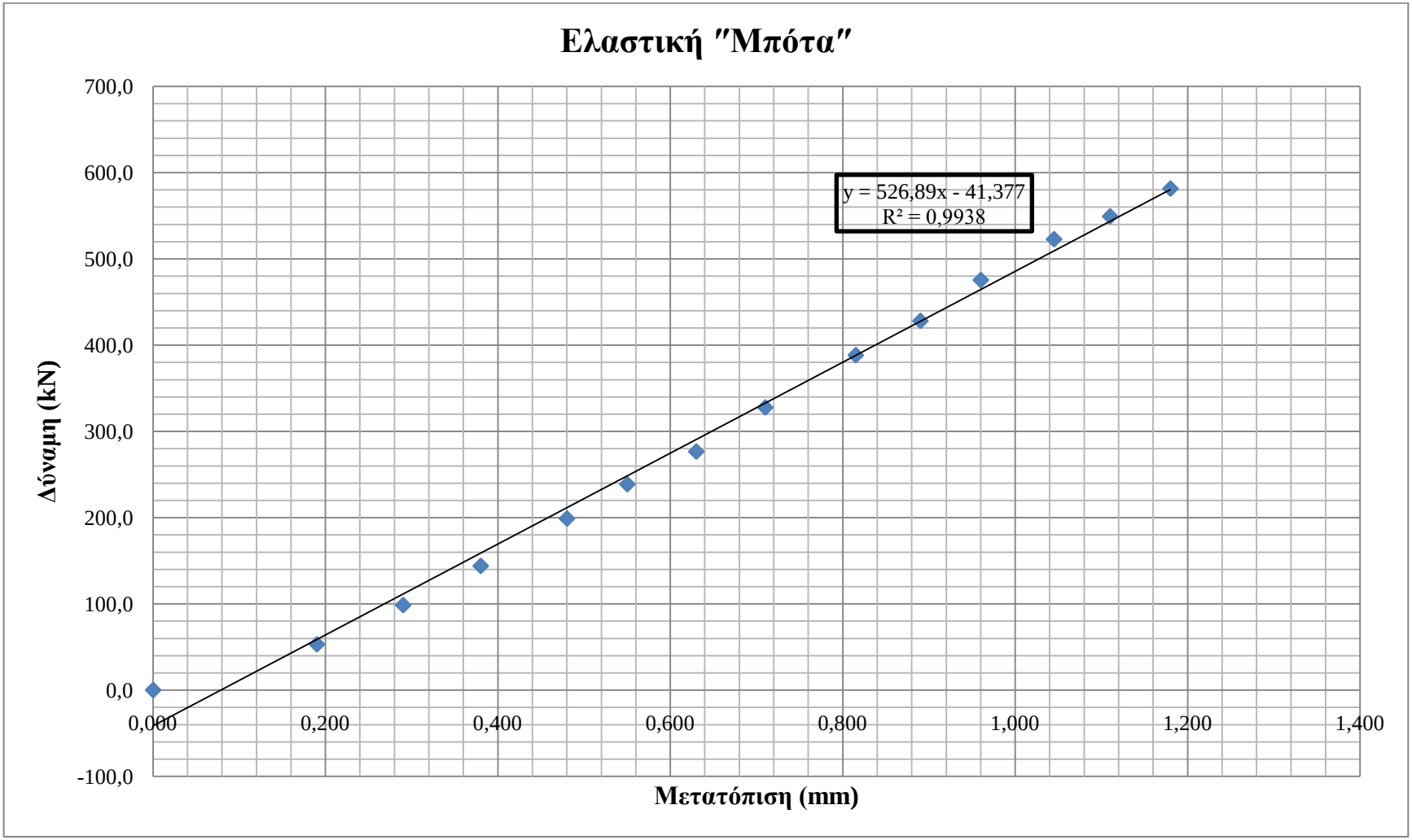
Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα δοκιμών για την ελαστική "μπότα"

Επομένως ο συντελεστής ελατηρίου για την ελαστική "μπότα" είναι 526,89 kN/mm (τιμή της κλίσης του διαγράμματος : dF/dx) αφού με γραμμική παλινδρόμηση προέκυψε η ακόλουθη συνάρτηση :

$y = 526,89\ x - 41,377$ με $R^2 = 0,9938$ (συντελεστής συσχέτισης)

Στους υπολογισμούς εφ' εξής θα χρησιμοποιείται η τιμή :

$\mathbf{c_{\text{ελαστικής "μπότας"}} = 527\ kN/mm}$



Διάγραμμα 5.3 : Διάγραμμα δύναμης – βύθισης για την ελαστική "μπότα"

5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ $c_{\text{ολικό}}$ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ STEDEF ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Όπως έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 3 ο συνολικός συντελεστής ελατηρίου υπολογίζεται ως εξής :

$$\frac{1}{c_{\text{ολικό}}} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{\mathrm{c_i}}$$

$$\frac{1}{c_{\text{ολικό}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}$$

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που παρατέθηκαν παραπάνω πήραμε τα εξής αποτελέσματα :

$c_{\text{Rail pad}} = c_1 = 104$ kN/mm

$c_{\text{ελαστικής "σόλας"}} = c_2 = 24$ kN/mm

$c_{\text{ελαστικής "μπότας"}} = c_3 = 527$ kN/mm

Άρα ο συνολικός δείκτης ελατηρίου υπολογίζεται:

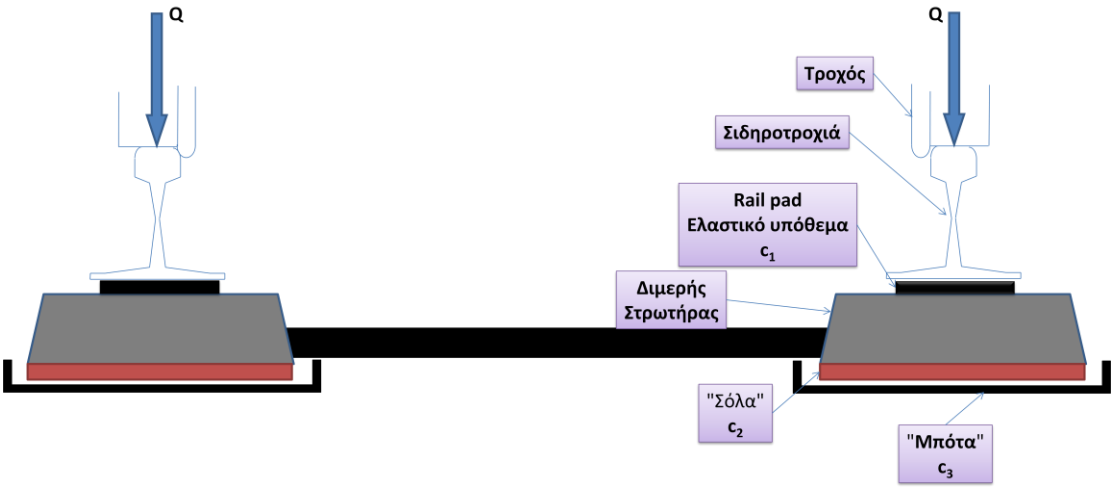
$$\frac{1}{c_{\text{ολικό}}} = \frac{1}{104} + \frac{1}{24} + \frac{1}{527}$$

$$c_{\text{ολικό}} = 18{,}8 \text{ kN/mm}$$

6

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ($c_{ολικό}$)

6.1 ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (STEDEF)



Σχήμα 6.1 : Επιμέρους στοιχεία i γραμμής, διαφορετικών συντελεστών ελαστικότητας

Για τον υπολογισμό του Ολικού Συντελεστή Ελατηρίου $c_{ολικό}$ θα στηριχθούμε στη θεωρία του κατά μήκος στρωτήρα (Zimmermann) που έχει αναλυθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.

Για το Αττικό Μετρό έχουμε ως δεδομένα τα εξής στοιχεία:

- Όπως έχουμε αναφέρει στην παράγραφο **4.5** το βάρος των συρμών είναι:

Συρμοί 1ης γενιάς :

178 t ή 1746,18 kN (κενός) και 245t ή 2403,45 kN(με πλήρες φορτίο) άρα το φορτίο που αναλογεί στο κάθε τροχό είναι :

Για κενό συρμό :

Q = 1746,18kN/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 36.38 kN /τροχό

Για συρμό με πλήρες φορτίο :

Q = 2403,45/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 50 kN /τροχό

Άρα μια μέση τιμή του φορτίου ανά τροχό για τους συρμούς 1ης γενιάς είναι **Q = 43.22 kN**

Συρμοί 2ης γενιάς :

182 t ή 1785,42 kN (κενός) και 255t ή 2501.55 kN(με πλήρες φορτίο) άρα το φορτίο που αναλογεί στο κάθε τροχό είναι :

Για κενό συρμό :

Q = 1785,42kN/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 37.19 kN /τροχό

Για συρμό με πλήρες φορτίο :

Q = 2501,55/ 6 (οχήματα)/ 8 (τροχοί ανά όχημα)

Q = 52,11 kN /τροχό

Άρα μια μέση τιμή του φορτίου ανά τροχό για τους συρμούς 2ης γενιάς είναι **Q = 44.65 kN**

Επομένως, θα γίνει υπολογισμός των βυθίσεων για ένα μέσο φορτίο **Q=41 kN**

- Η σιδηροτροχιά που έχει τοποθετηθεί είναι η **UIC 54** με ροπή αδράνειας **I =23460000 mm^4** και μέτρο ελαστικότητας **E = 210000 N/mm^2**.

- 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 *230) mm^2 ή **F_1 = 151800 mm^2**. (F_1 είναι η ενεργός επιφάνεια του στρωτήρα ανά σιδηροτροχιά)
- Η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων είναι **a = 630 mm**
- Το rail pad έχει συντελεστή ελατηρίου **c_1 = 104 kN/mm** όπως προέκυψε από τις δοκιμές στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών.
- Η ελαστική " σόλα" έχει συντελεστή ελατηρίου **c_2 = 24 kN/mm** όπως προέκυψε από τις δοκιμές στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών
- Η ελαστική "μπότα" έχει συντελεστή ελατηρίου **c_3 = 527 kN/mm** όπως προέκυψε από τις δοκιμές στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών.
- Για τα οχήματα που κινούνται στο Μετρό η απόσταση μεταξύ των αξόνων είναι **x = 2100 mm**.

Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζουμε :

1) Το πλάτος του ιδανικού στρωτήρα :

$$\boldsymbol{b = \frac{F_1}{a}\ (mm)}$$

2) Το ελαστικό μήκος του κατά μήκος φορέα :

$$\mathbf{L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}}}\ \boldsymbol{(mm)}$$

3) Τον παράγοντα ξ υπολογισμένος σε ακτίνια :

$$\boldsymbol{\xi = \frac{x}{L}\ (\alpha\kappa\tau\acute{\iota}\nu\iota\alpha)}$$

Όπου x είναι η απόσταση μεταξύ δύο αξόνων.

4) Τον συντελεστή **η** που χαρακτηρίζει την επιρροή της γραμμής κάμψης σε δεδομένη απόσταση από τη διερευνούμενη περιοχή (εδώ x είναι η απόσταση μεταξύ δύο αξόνων):

$$\boldsymbol{\eta = e^{-\xi} \cdot (\cos\xi + \sin\xi)}$$

5) Τον συντελεστή **μ** που χαρακτηρίζει την επιρροή της καμπτικής ροπής:

$$\boldsymbol{\mu = e^{-\xi} \cdot (\cos\xi - \sin\xi)}$$

6) Τη μέγιστη βύθιση της σιδηροτροχιάς :

$$\boldsymbol{y = \frac{Q}{2 \cdot C \cdot b \cdot L} \cdot (\eta + 1)\ \ (mm)}$$

7) Τη μέγιστη πίεση στη διεπιφάνεια στρωτήρα – πάτου :

$$\boldsymbol{p_{max} = C \cdot y \qquad (N/mm^2)}$$

8) Τη δύναμη αντίδρασης του στρωτήρα S_s :

$$\boldsymbol{S_s = b \cdot C \cdot y \cdot a\ (N)}$$

9) Το ποσοστό % του φορτίου του τροχού Q που δρα επί του συνδέσμου της σιδηροτροχιάς (αντίδραση στρωτήρα) S_s :

$$\boldsymbol{\frac{S_s}{Q} \cdot 100}$$

10) Το συνολικό συντελεστή ελατηρίου :

$$\boldsymbol{c_{\text{ολικό}} = C \cdot F_1\ (kN/mm)}$$

11) Το συντελεστή ελατηρίου του ελαστικού υποθέματος που τοποθετείται κάτω από το στρωτήρα (πάτου) c_2

$$\frac{1}{c_{\text{συν}}} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{c_i}$$

$$\frac{1}{c_{\text{συν}}} = \frac{1}{c_{\text{Rail Pad}}} + \frac{1}{c_{\text{"Σόλας"}}} + \frac{1}{c_{\text{"Μπότας"}}}$$

$$\frac{1}{c_{\text{"Σόλας"}}} = \frac{1}{c_{\text{συν}}} - \frac{1}{c_{\text{Rail pad}}} - \frac{1}{c_{\text{"Μπότας"}}}$$

Ακολουθεί ο πίνακας των παραπάνω υπολογισμών.

STEDEF												
C (N/mm^3)	b (mm)	L (mm)	ξ (ακτίνια)	n	μ	y σιδ/χιάς (mm)	p max (N/mm^2)	Ss (N)	Ss (kN)	(S_s/Q)*100	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{Σόλας}$
0,02	240,95	1422,0	1,477	0,24881	-0,20592	3,74	0,075	11341,8	11,3	27,7	3,04	3,15
0,03	240,95	1285,0	1,634	0,18232	-0,20708	2,61	0,078	11883,4	11,9	29,0	4,55	4,81
0,04	240,95	1195,8	1,756	0,13792	-0,20158	2,02	0,081	12290	12,3	30,0	6,07	6,53
0,05	240,95	1130,9	1,857	0,10573	-0,19388	1,66	0,083	12627,5	12,6	30,8	7,59	8,32
0,06	240,95	1080,5	1,944	0,08122	-0,18551	1,42	0,085	12923,4	12,9	31,5	9,11	10,17
0,066	240,95	1055,1	1,990	0,06912	-0,18046	1,31	0,086	13087	13,1	31,9	10,02	11,33
0,07	240,95	1039,7	2,020	0,06192	-0,17711	1,24	0,087	13191,4	13,2	32,2	10,63	12,11
0,08	240,95	1005,5	2,088	0,04635	-0,16895	1,11	0,089	13439,2	13,4	32,8	12,14	14,12
0,09	240,95	976,4	2,151	0,03356	-0,16114	1,00	0,090	13671,7	13,7	33,3	13,66	16,21
0,10	240,95	951,0	2,208	0,02291	-0,15371	0,92	0,092	13891,9	13,9	33,9	15,18	18,39
0,11	240,95	928,6	2,262	0,01393	-0,14669	0,84	0,093	14102	14,1	34,4	16,70	20,67
0,12	240,95	908,6	2,311	0,00630	-0,14006	0,79	0,094	14303,7	14,3	34,9	18,22	23,05
0,124	240,95	901,2	2,330	0,00357	-0,13751	0,76	0,095	14382,2	14,4	35,1	18,82	24,03
0,13	240,95	890,6	2,358	-0,00024	-0,13380	0,73	0,096	14498	14,5	35,4	19,73	25,54
0,14	240,95	874,3	2,402	-0,00587	-0,12790	0,69	0,097	14685,9	14,7	35,8	21,25	28,14
0,15	240,95	859,3	2,444	-0,01075	-0,12232	0,65	0,098	14868,1	14,9	36,3	22,77	30,86
0,16	240,95	845,5	2,484	-0,01499	-0,11705	0,62	0,099	15045,1	15,0	36,7	24,29	33,72
0,17	240,95	832,8	2,522	-0,01870	-0,11207	0,59	0,100	15217,4	15,2	37,1	25,81	36,71
0,18	240,95	821,0	2,558	-0,02194	-0,10735	0,56	0,101	15385,4	15,4	37,5	27,32	39,86
0,19	240,95	810,0	2,593	-0,02479	-0,10287	0,54	0,102	15549,4	15,5	37,9	28,84	43,18
0,20	240,95	799,7	2,626	-0,02728	-0,09863	0,52	0,103	15709,7	15,7	38,3	30,36	46,67

Πίνακας 6.1 : Θεωρητικός υπολογισμός $c_{ολικό}$ για την επιδομή του Αττικό Μετρό

6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ

Στην ενότητα **5.4** υπολογίσαμε πειραματικά το συνολικό συντελεστή ελατηρίου και βρέθηκε ίσος με 18,8 kN/mm. Για την τιμή αυτή του $c_{ολικό}$ στον **Πίνακα 6.1** υπολογίστηκε ότι, σύμφωνα με τη θεωρία του Zimmermann, η συνολική βύθιση της σιδηροτροχιάς είναι 0,76mm (**$y_{ολικό\ (θεωρητικό)}$ = 0.76 mm**)και η δύναμη που δρα επί του συνδέσμου της σιδηροτροχιάς (αντίδραση στρωτήρα) είναι 14,4kN.

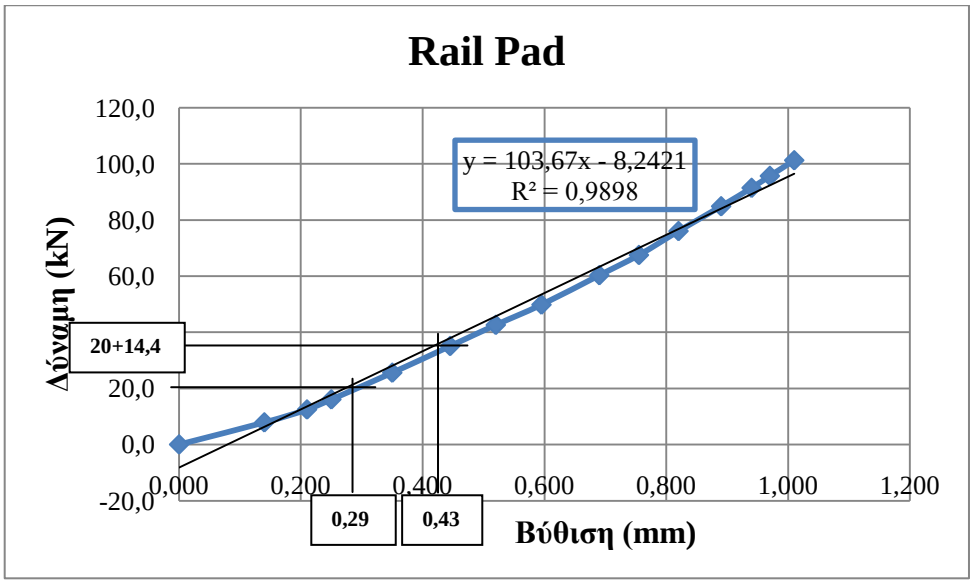
Σε αυτό το σημείο θα υπολογίσουμε αν η συνολική βύθιση της σιδηροτροχιάς με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η ίδια.

Πρέπει να τονιστεί ότι στο θεωρητικό υπολογισμό της βύθισης της σιδηροτροχιάς δε λαμβάνεται υπόψη η δύναμη σύσφιξης του συνδέσμου. Το ελαστικό υπόθεμα που τοποθετείται κάτω από τη σιδηροτροχιά (rail pad) υφίσταται όμως επιπλέον παραμόρφωση λόγω της δύναμης σύσφιξης του συνδέσμου.

Στην περίπτωσή μας για το σύνδεσμο τύπου Nabla, που είναι τοποθετημένος στο σημείο των μετρήσεων, η δύναμη σύσφιξης είναι τουλάχιστον 2*10 =20kN. Επομένως, από το διάγραμμα βύθισης-φορτίου (πειραματικά αποτελέσματα) για το rail pad θα υπολογίσουμε τη βύθιση του υποθέματος για συνολικό φορτίο 20+14,4 =34,4 kN.

Από το παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε ότι για φορτίο 20kN η βύθιση του rail pad είναι 0,29 mm. Δηλαδή, το rail pad βυθίζεται κατά 0,29 mm μόνο από τη δύναμη σύσφιξης του συνδέσμου.

Για επιπλέον φορτίο 14,4kN, όσο είναι η δύναμη που δρα επί του συνδέσμου, δηλαδή για συνολικό φορτίο 20+14,4 =34,4 kN, η βύθιση είναι 0,43.



Έτσι, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η συνολική βύθιση της σιδηροτροχιάς είναι:

$y_{\text{ολικό}}$ = 0.43 mm + 0.3 mm ή $\mathbf{y_{\text{ολικό (πειραματικό)}}}$ **= 0.73 mm**

Όπου, 0,43 mm είναι η βύθιση του rail pad όπως υπολογίστηκε με την παραπάνω διαδικασία και 0,3 mm είναι η όπως μετρήθηκε στο Αττικό Μετρό με το όργανο PCD-300A.

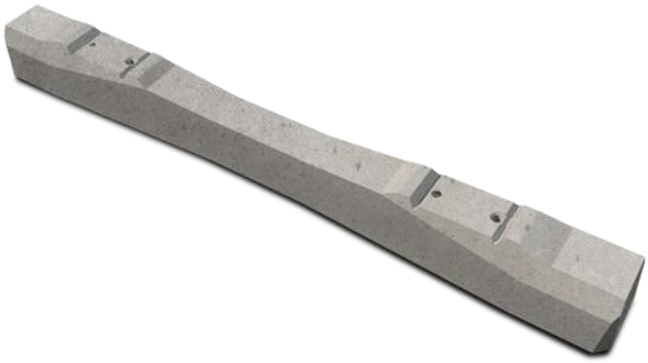
Κάνοντας σύγκριση της θεωρητικής και της πειραματικής συνολικής βύθισης της σιδηροτροχιάς παρατηρούμε ότι υπάρχει μια απόκλιση της τάξεως του 5% ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές.

Η απόκλιση αυτή ανάμεσα στις δύο τιμές μπορεί να δικαιολογηθεί ποικιλοτρόπως :

- Η διαφορά είναι αποτέλεσμα του πειραματικού υπολογισμού της βύθισης.
- Μετά από 11 χρόνια λειτουργίας του Μετρό τα ελαστικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν στην επιδομή της γραμμής (rail pad, ελαστική "σόλα", ελαστική "μπότα") υπάρχει περίπτωση να έχουν αναλάβει μια μόνιμη βύθιση.

6.3 ΣΚΥΡΟΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΣΤΡΩΤΉΡΑ Β70

Ο στρωτήρας Β70 έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Θα υπολογίσουμε με την ίδια μέθοδο το Συνολικό Συντελεστή Ελατηρίου ($c_{ολικό}$)καθώς και το συντελεστή ελατηρίου του έρματος ($c_{ballast}$) (Zimmermann) αλλά αυτή τη φορά υποθέτουμε ότι ο Β70 εδράζεται σε στρώση έρματος και έχει το ίδιο ελαστικό υπόθεμα κάτω από τη σιδηροτροχιά (rail pad) με συντελεστή ελατηρίου **c_1 = 104 kN/mm.**

Για την περίπτωση αυτή έχουμε ως δεδομένα τα εξής στοιχεία:

- Το φορτίο του τροχού Q είναι 41 kN (**Q =41 kN**).
- Η σιδηροτροχιά που έχει τοποθετηθεί είναι η **UIC 54** με ροπή αδράνειας **I =23460000 mm^4** και μέτρο ελαστικότητας **E = 210000 N/mm^2**.
- Ο στρωτήρας είναι ο Β70 με ενεργό επιφάνεια ανά σιδηροτροχιά F_1 = 285000 mm^2.
- Η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων είναι **a = 630 mm**
- Για τα οχήματα που κινούνται στο Μετρό η απόσταση μεταξύ των αξόνων είναι **x = 2100 mm**.

Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζουμε :

1) Το πλάτος του ιδανικού στρωτήρα :

$$\boldsymbol{b = \frac{F_1}{a}\ (mm)}$$

2) Το ελαστικό μήκος του κατά μήκος φορέα :

$$\mathbf{L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}}}\ \ (\boldsymbol{mm})$$

3) Τον παράγοντα ξ υπολογισμένος σε ακτίνια :

$$\boldsymbol{\xi = \frac{x}{L}\ \ (\alpha\kappa\tau\acute{\iota}\nu\iota\alpha)}$$

Όπου x είναι η απόσταση μεταξύ δύο αξόνων.

4) Τον συντελεστή **η** που χαρακτηρίζει την επιρροή της γραμμής κάμψης σε δεδομένη απόσταση από τη διερευνούμενη περιοχή (εδώ x είναι η απόσταση μεταξύ δύο αξόνων):

$$\boldsymbol{\eta = e^{-\xi} \cdot (\cos\xi + \sin\xi)}$$

5) Τον συντελεστή **μ** που χαρακτηρίζει την επιρροή της καμπτικής ροπής:

$$\boldsymbol{\mu = e^{-\xi} \cdot (\cos\xi - \sin\xi)}$$

6) Τη μέγιστη βύθιση της σιδηροτροχιάς :

$$\boldsymbol{y = \frac{Q}{2 \cdot C \cdot b \cdot L} \cdot (\eta + 1)\ \ (mm)}$$

7) Τη μέγιστη πίεση στη διεπιφάνεια στρωτήρα – πάτου :

$$\boldsymbol{p_{max} = C \cdot y \qquad (N/mm^2)}$$

8) Τη δύναμη αντίδρασης του στρωτήρα S_s :

$$\boldsymbol{S_s = b \cdot C \cdot y \cdot a\ (N)}$$

9) Το ποσοστό % του φορτίου Q που δρα επί του συνδέσμου της σιδηροτροχιάς (αντίδραση στρωτήρα) S_s :

$$\boldsymbol{\frac{S_s}{Q} \cdot 100}$$

10) Το συνολικό συντελεστή ελατηρίου :

$$c_{\text{ολικό}} = C \cdot F_1 \ (kN/mm)$$

11) Υπολογισμός του $c_{ballast}$

$$\frac{1}{c_{\text{ολικό}}} = \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{c_i}$$

$$\frac{1}{c_{\text{ολικό}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$$

Όπου $c_1 = c_{Rail\ pad} = 103{,}67$ kN/mm

$c_2 = c_{ballast}$

Άρα :

$$\frac{1}{c_2} = \frac{1}{c_{\text{ολικό}}} - \frac{1}{c_1}$$

Ακολουθεί ο πίνακας των υπολογισμών.

ΣΚΥΡΟΓΡΑΜΜΗ												
C (N/mm^3)	b (mm)	L (mm)	ξ (ακτίνια)	n	μ	y σιδ/χιάς (mm)	p max (N/mm^2)	Ss (N)	Ss (kN)	$(S_s/Q)*100$	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{σκύρου}$ (kN/mm)
0,02	452,4	1214,8	1,729	0,14742	-0,20322	2,14	0,043	12198,3	12,2	29,8	5,70	6,03
0,03	452,4	1097,7	1,913	0,08952	-0,18861	1,50	0,045	12818,5	12,8	31,3	8,55	9,32
0,04	452,4	1021,6	2,056	0,05358	-0,17291	1,17	0,047	13319,9	13,3	32,5	11,40	12,80
0,05	452,4	966,1	2,174	0,02921	-0,15821	0,97	0,048	13758,3	13,8	33,6	14,25	16,51
0,06	452,4	923,1	2,275	0,01179	-0,14490	0,83	0,050	14156,2	14,2	34,5	17,10	20,46
0,066	452,4	901,3	2,330	0,00362	-0,13757	0,76	0,050	14380,6	14,4	35,1	18,81	22,96
0,07	452,4	888,2	2,364	-0,00109	-0,13294	0,73	0,051	14525,1	14,5	35,4	19,95	24,69
0,08	452,4	859,0	2,445	-0,01084	-0,12221	0,65	0,052	14871,6	14,9	36,3	22,80	29,20
0,09	452,4	834,1	2,518	-0,01834	-0,11256	0,59	0,053	15199,9	15,2	37,1	25,65	34,05
0,10	452,4	812,4	2,585	-0,02418	-0,10386	0,54	0,054	15512,8	15,5	37,8	28,50	39,26
0,11	452,4	793,3	2,647	-0,02875	-0,09598	0,50	0,055	15812,4	15,8	38,6	31,35	44,88
0,12	452,4	776,2	2,705	-0,03235	-0,08882	0,47	0,056	16100,3	16,1	39,3	34,20	50,96
0,124	452,4	769,9	2,728	-0,03356	-0,08614	0,46	0,057	16212,5	16,2	39,5	35,34	53,53
0,13	452,4	760,8	2,760	-0,03518	-0,08229	0,44	0,057	16377,7	16,4	39,9	37,05	57,55
0,14	452,4	746,9	2,812	-0,03739	-0,07633	0,42	0,058	16645,6	16,6	40,6	39,90	64,74
0,15	452,4	734,1	2,861	-0,03912	-0,07085	0,40	0,059	16904,8	16,9	41,2	42,75	72,59
0,16	452,4	722,3	2,907	-0,04045	-0,06582	0,38	0,060	17156,1	17,2	41,8	45,60	81,21
0,17	452,4	711,5	2,952	-0,04145	-0,06119	0,36	0,061	17399,9	17,4	42,4	48,45	90,71
0,18	452,4	701,4	2,994	-0,04218	-0,05690	0,34	0,062	17636,9	17,6	43,0	51,30	101,24
0,19	452,4	692,0	3,035	-0,04269	-0,05293	0,33	0,063	17867,4	17,9	43,6	54,15	112,97
0,20	452,4	683,2	3,074	-0,04301	-0,04925	0,32	0,063	18091,9	18,1	44,1	57,00	126,13

Πίνακας 6.2 : Θεωρητικός υπολογισμός $c_{ολικό}$ για σκυρογραμμή με στρωτήρα B70

7 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τους πίνακες του θεωρητικού υπολογισμού του συνολικού συντελεστή ελατηρίου τόσο για επιδομή τύπου Stedef όσο και για σκυρογραμμή που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (**Πίνακες 6.1, 6.2**) κάνουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις :

1. Για $c_{ολικό}$ = 18,8 kN/mm στη σταθερή επιδομή (Stedef) αντιστοιχεί Δείκτης Αντίδρασης Εδάφους C=0.124 N/mm^3 ενώ για τον ίδιο συνολικό Συντελεστή Ελατηρίου στη σκυρογραμμή αντιστοιχεί Δ.Α.Ε. C=0.066 N/mm^3

$c_{ολικό}$ (kN/mm)	C $_{Stedef}$ (N/mm^3)	$C_{Σκυρογραμμής}$ (N/mm^3)
18.6	0.124	0.066

2. Για **Δ.Α.Ε. C=0.124 N/mm^3** στη **σταθερή επιδομή (Stedef)** αντιστοιχεί συνολικός συντελεστής ελατηρίου $c_{ολικό}$=18.82 kN/mm, $c_{"Σόλας"}$ = 24,03 kN/mm, βύθιση σιδηροτροχιάς $y_{σιδ/χιάς}$ =0,76mm, αντίδραση στρωτήρα S_s=14.4kN και το ποσοστό της δύναμης που δρα επί του στρωτήρα είναι 35%.
   Για **Δ.Α.Ε. C=0.123 N/mm^3** στη **σκυρογραμμή** αντιστοιχεί συνολικός συντελεστής ελατηρίου $c_{ολικό}$=35,34 kN/mm, $c_{Σκύρου}$ = 53,53 kN/mm, βύθιση σιδηροτροχιάς $y_{σιδ/χιάς}$ =0,46mm, αντίδραση στρωτήρα S_s=16,2kN και το ποσοστό της δύναμης που δρα επί του στρωτήρα είναι 39,5%.

Σταθερή επιδομή (Stedef) :

C (N/mm^3)	$y_{σιδ/χιάς}$ (mm)	S_s (kN)	$(S_s/Q)*100$	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{"Σόλας"}$ (kN/mm)
0.124	0.76	14.4	35.0	18.82	24.03

Σκυρογραμμή :

C (N/mm^3)	$y_{σιδ/χιάς}$ (mm)	S_s (kN)	$(S_s/Q)*100$	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{σκύρου}$ (kN/mm)
0.124	0.46	16.2	39.5	35.34	53.53

3. Για **Δ.Α.Ε. C=0.066 N/mm^3** στη **σταθερή επιδομή (Stedef)** αντιστοιχεί συνολικός συντελεστής ελατηρίου $c_{ολικό}$=10,02kN/mm, $c_{"Σόλας"}$ = 11,33 kN/mm, βύθιση σιδηροτροχιάς $y_{σιδ/χιάς}$ =1,31mm, αντίδραση στρωτήρα S_s=13,1kN και το ποσοστό της δύναμης που δρα επί του στρωτήρα είναι 31,9%.
   Για **Δ.Α.Ε. C=0.066 N/mm^3** στη **σκυρογραμμή** αντιστοιχεί συνολικός συντελεστής ελατηρίου $c_{ολικό}$=18,81 kN/mm, $c_{Σκύρου}$ = 22,96 kN/mm, βύθιση σιδηροτροχιάς $y_{σιδ/χιάς}$ =0,77mm, αντίδραση στρωτήρα S_s=14,4kN και το ποσοστό της δύναμης που δρα επί του στρωτήρα είναι 35,1%.

Σταθερή επιδομή (Stedef) :

C (N/mm^3)	$y_{σιδ/χιάς}$ (mm)	S_s (kN)	$(S_s/Q)*100$	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{"Σόλας"}$ (kN/mm)
0.066	1.31	13.1	31.9	10.02	11.33

Σκυρογραμμή :

C (N/mm^3)	$y_{σιδ/χιάς}$ (mm)	S_s (kN)	$(S_s/Q)*100$	$c_{ολικό}$ (kN/mm)	$c_{σκύρου}$ (kN/mm)
0.066	0.77	14.4	35.1	18.81	22.96

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ-ΤΑ

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι :

1. Ο συνολικός δείκτης ακαμψίας $c_{ολικό}$ είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος των 10 kN/mm, τιμή που σύμφωνα με το **[2]** είναι η κατώτατη τιμή του συνολικού δείκτη ακαμψίας για το Μετρό.

2. Από καμία μέτρηση ή πειραματικό έλεγχο δεν προέκυψε δείκτης ακαμψίας ελαστικού υποθέματος (ελαστικής "σόλας") της τάξεως των 3,7 kN/mm. Αντίθετα η τιμή του εν λόγω δείκτη είναι πολύ μεγαλύτερη.

3. Ο δείκτης ακαμψίας της ελαστικής "μπότας" με τιμή 527 kN/mm, επηρεάζει ελάχιστα τη συνολική ακαμψία της Σταθερής Επιδομής.

4. Αν υποθέτουμε ότι ο Δείκτης Αντίδρασης Εδάφους (Δ.Α.Ε.) για την σκυρογραμμή έχει την τιμή $C_{Σκυρογραμμής}$=0.12 N/mm^3 (καλό υπέδαφος) σε αυτή την τιμή αντιστοιχεί συντελεστής ελατηρίου για το σκύρο $c_{Σκύρου}$= 53,53 kN/mm.

Αν υποθέσουμε ίδιο συντελεστή ελατηρίου για την ελαστική "σόλα" στη Σταθερή Επιδομή τύπου Stedef ($c_{"Σόλας"}$=53.53 kN/mm) ο Δείκτης Αντίδρασης Εδάφους που προκύπτει είναι C_{Stedef} =0.22N/mm^3. Δηλαδή θα αντιστοιχούσε σε άκαμπτη γραμμή.

Σκυρογραμμή:

C (N/mm^3)	$c_{Σκύρου}$ (kN/mm)
0.12	53.53

Stedef :

C (N/mm^3)	$c_{"Σόλας"}$ (kN/mm)
0.22	53.53

Όπως έχουμε αναφέρει στο Κεφάλαιο 1 πρέπει να αποφεύγεται μια τελείως άκαμπτη συμπεριφορά της γραμμής (C>0.20 N/mm^3) για λόγους φθοράς των υλικών καθώς επίσης για λόγους άνεσης των επιβατών. Γι' αυτό το λόγο ο δείκτης ακαμψίας της ελαστικής "σόλας" στην Σταθερή Επιδομή τύπου Stedef είναι πολύ μικρότερος του δείκτη ακαμψίας του σκύρου στην κλασική επιδομή με έρμα.

9

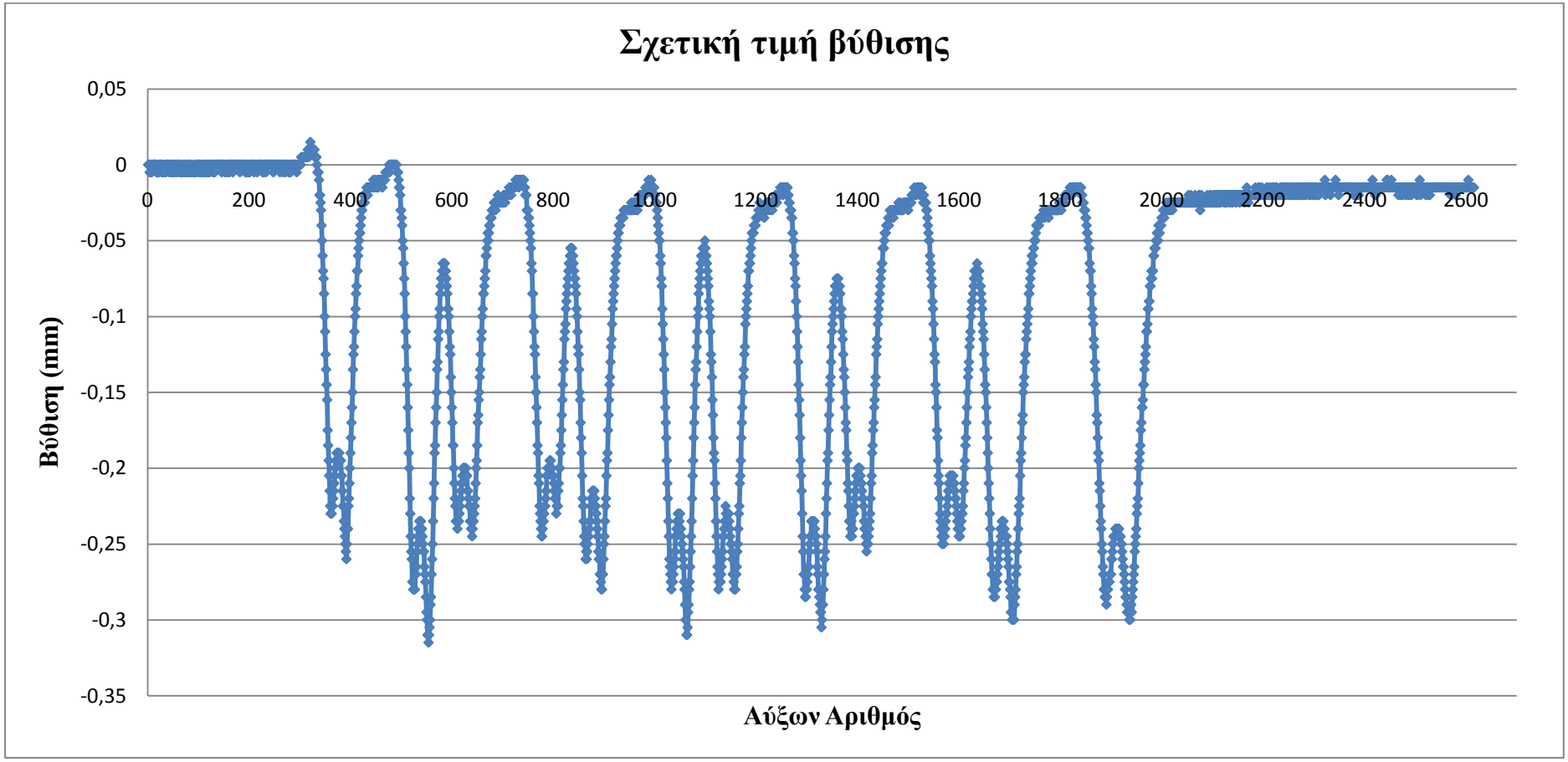
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΟΜΕΝΕΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν μετρήσεις της βύθισης του διμερή στρωτήρα στην επιδομή του Αττικό Μετρό (Σταθερή Επιδομή τύπου Stedef) σε ένα μόνο σημείο. Για να είναι όμως οι μετρήσεις στατιστικά ασφαλείς πρέπει να γίνουν σε 10-12 αντιπροσωπευτικές θέσεις στο υπό διερεύνηση τμήμα της γραμμής.

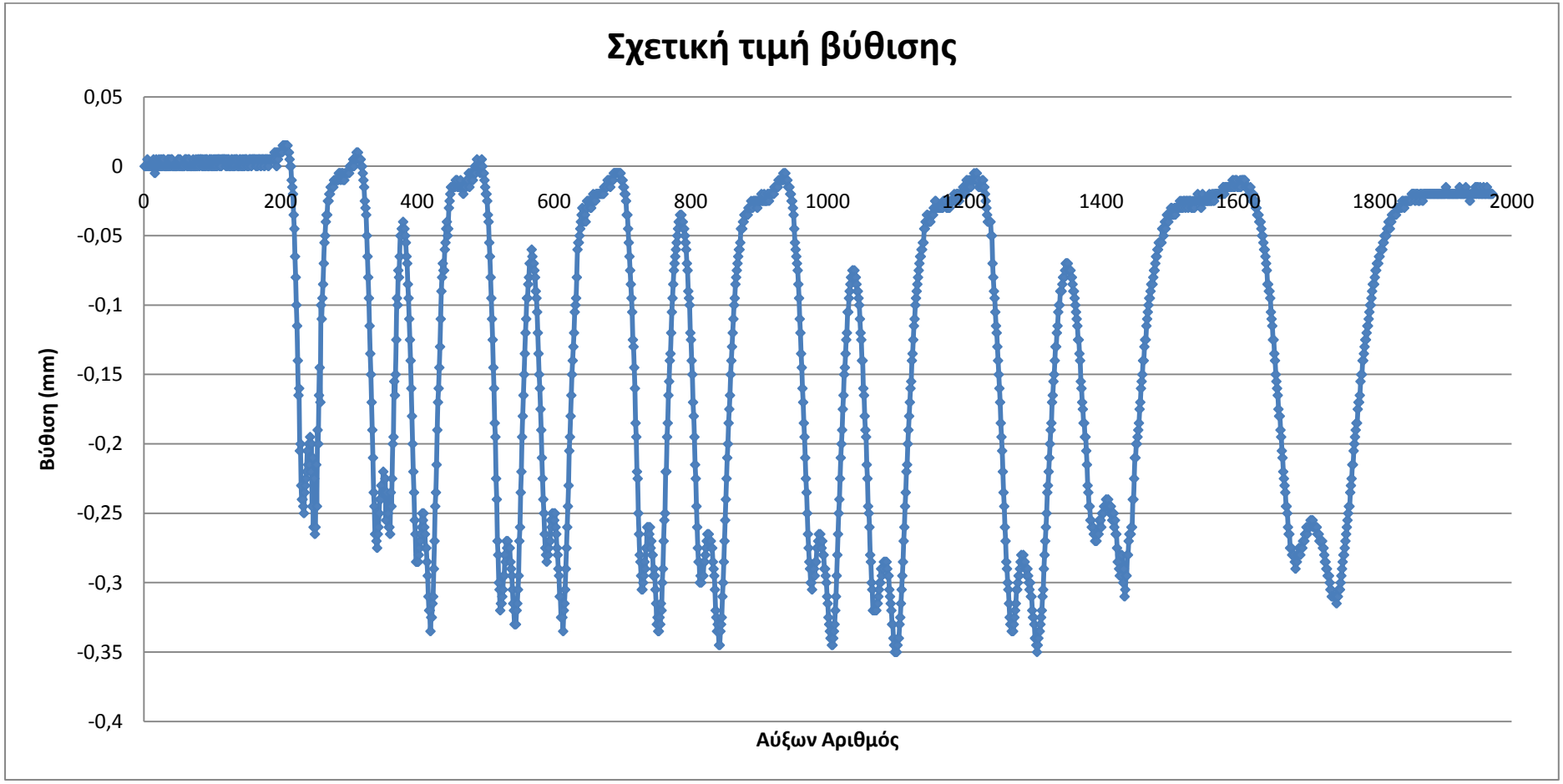
Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η διεξαγωγή ενός τόσο μεγάλου αριθμού μετρήσεων ήταν αδύνατη. Προτείνεται λοιπόν να γίνουν μετρήσεις και σε άλλα σημεία της γραμμής ώστε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν να είναι στατιστικά ασφαλή. Επίσης, για τη στατιστική ασφάλεια των αποτελεσμάτων προτείνεται, οι μετρήσεις να γίνουν για διέλευση μεγάλου αριθμού συρμών.

Τέλος, δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση της συνολικής βύθισης της σιδηροτροχιάς με το όργανο μέτρησης (PCD-300A). Αυτό γιατί κατά την τοποθέτηση του οργάνου, στη θέση μετρήσεων, δεν υπήρχε αρκετή απόσταση για την τοποθέτηση του μηκυνσιόμετρου και υπήρχε σοβαρός κίνδυνος ατυχήματος και καταστροφής του οργάνου. Έτσι, προτείνεται τελικά η μέτρηση της συνολικής βύθισης της σιδηροτροχιάς για τον προσδιορισμό του Δείκτη Αντίδρασης Εδάφους.

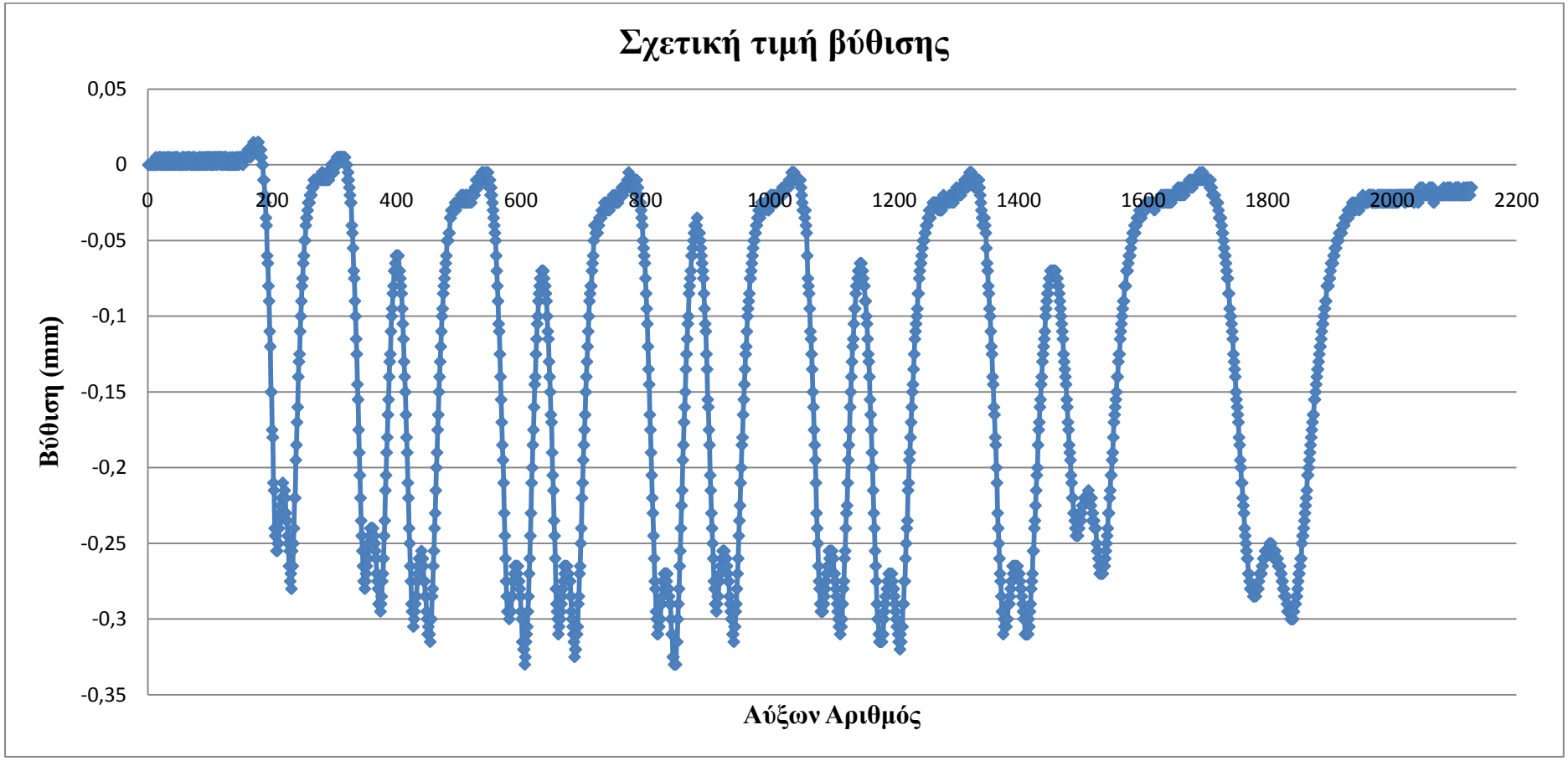
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



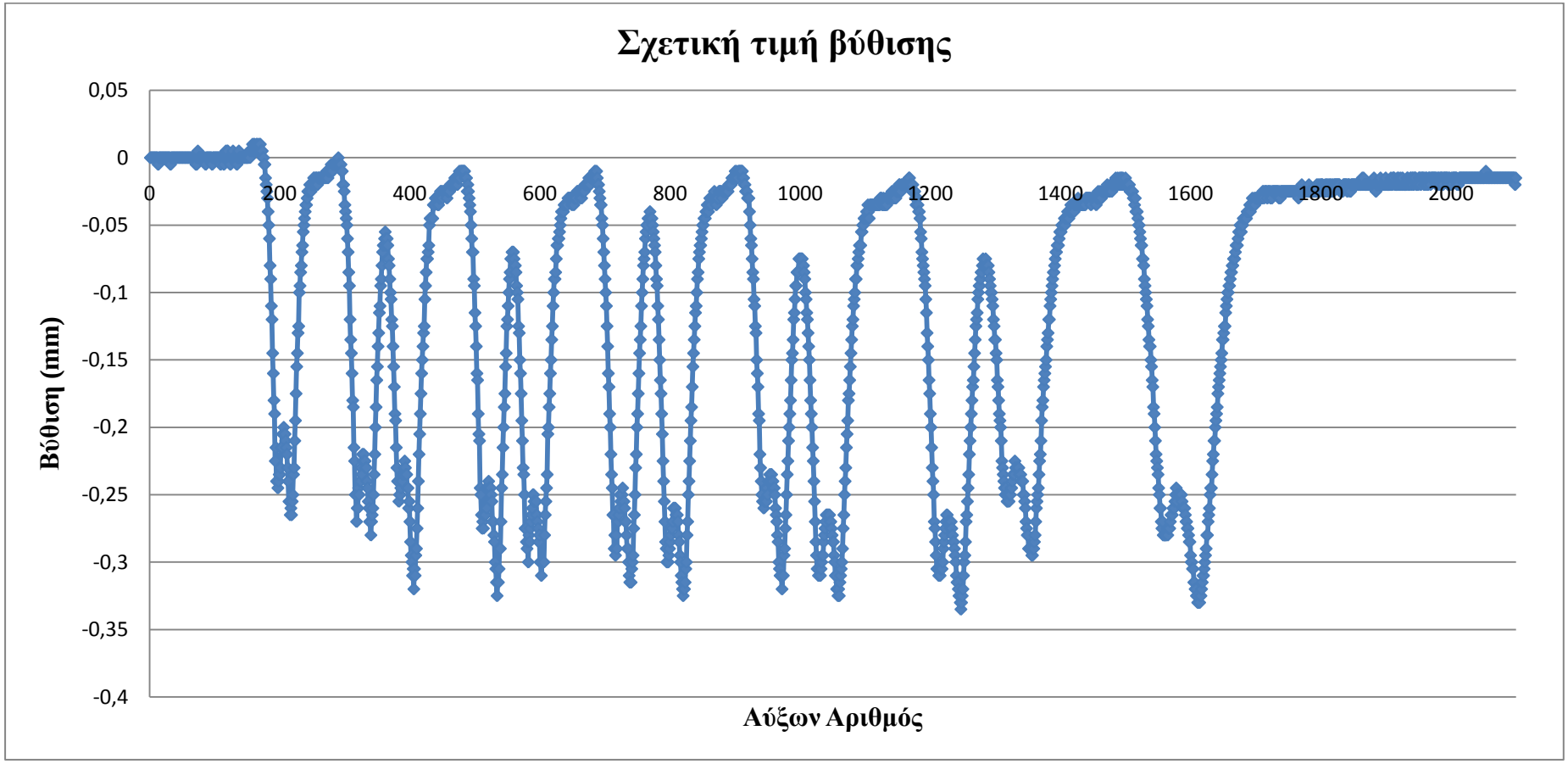
Διάγραμμα 4.1 : 1η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς



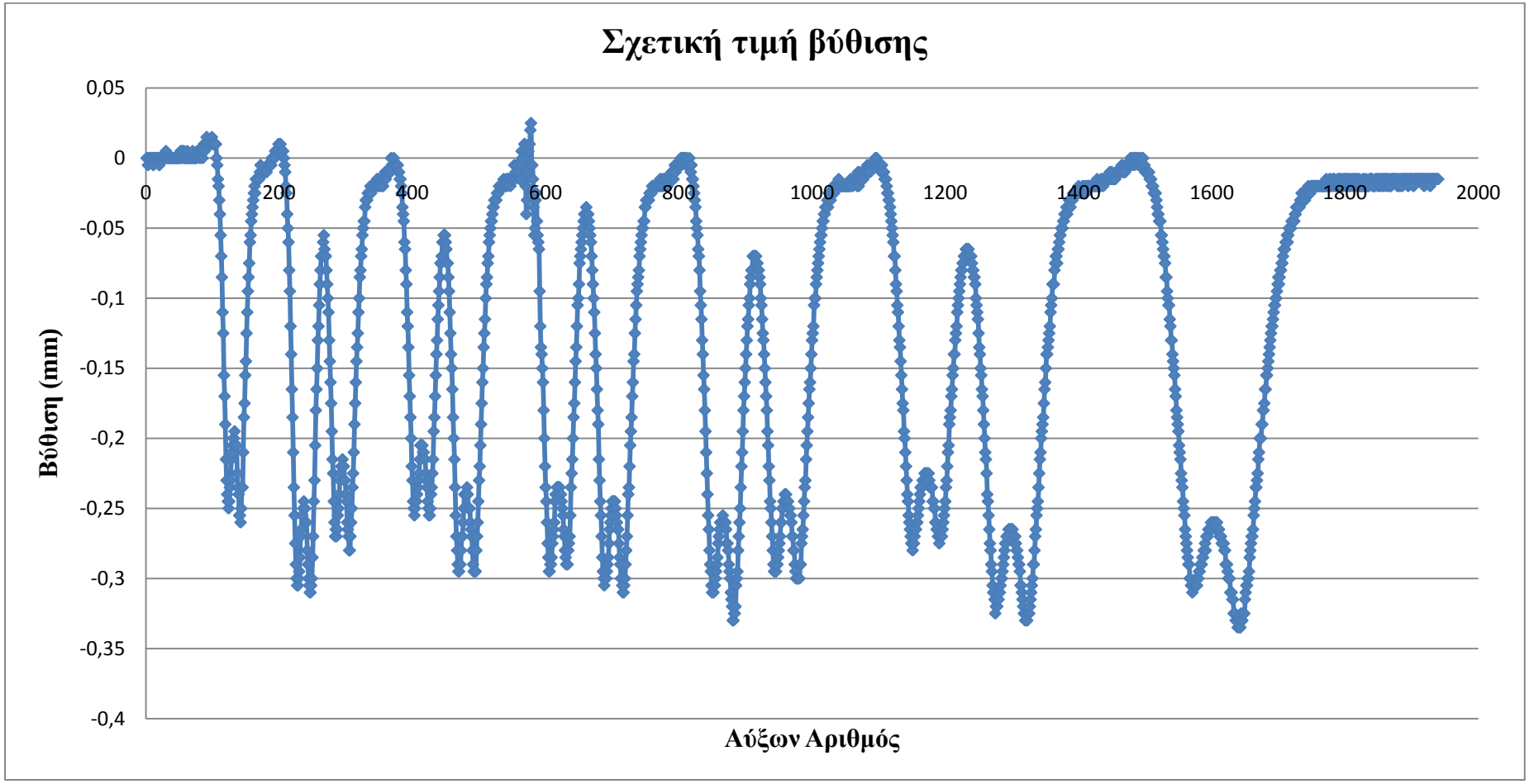
Διάγραμμα 4.2 : 2η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς



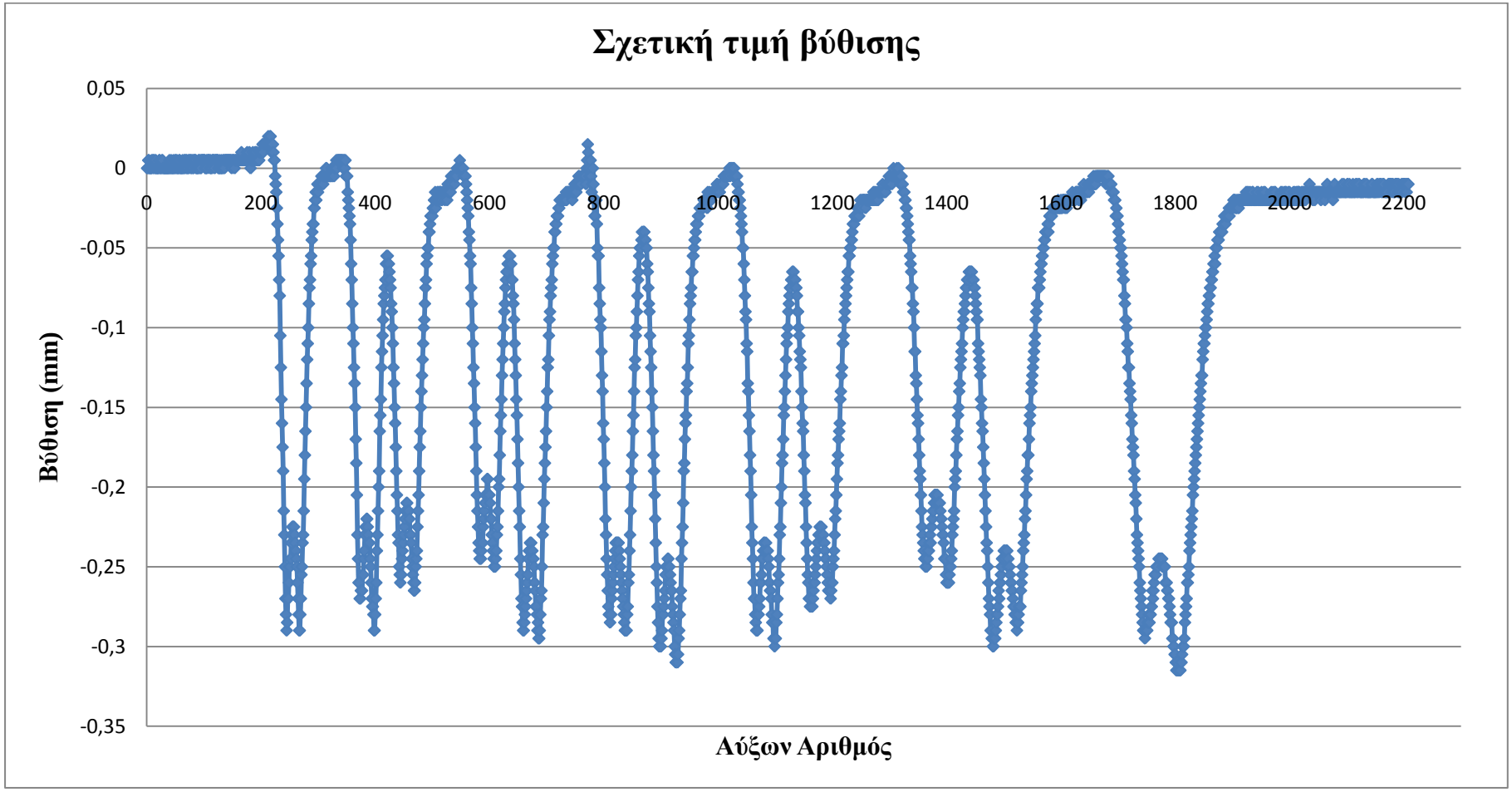
Διάγραμμα 4.3 : 3η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς



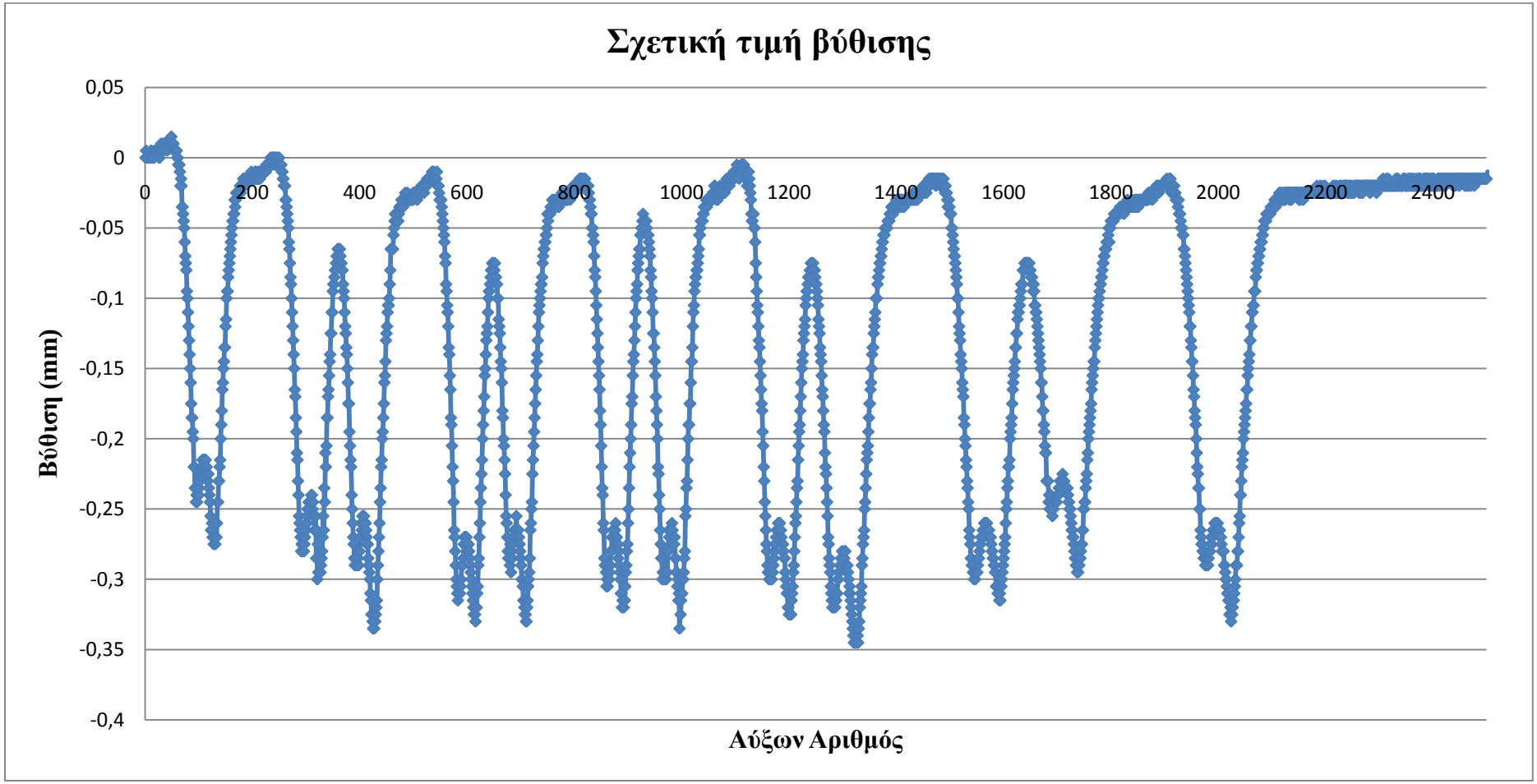
Διάγραμμα 4.4 : 4η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς



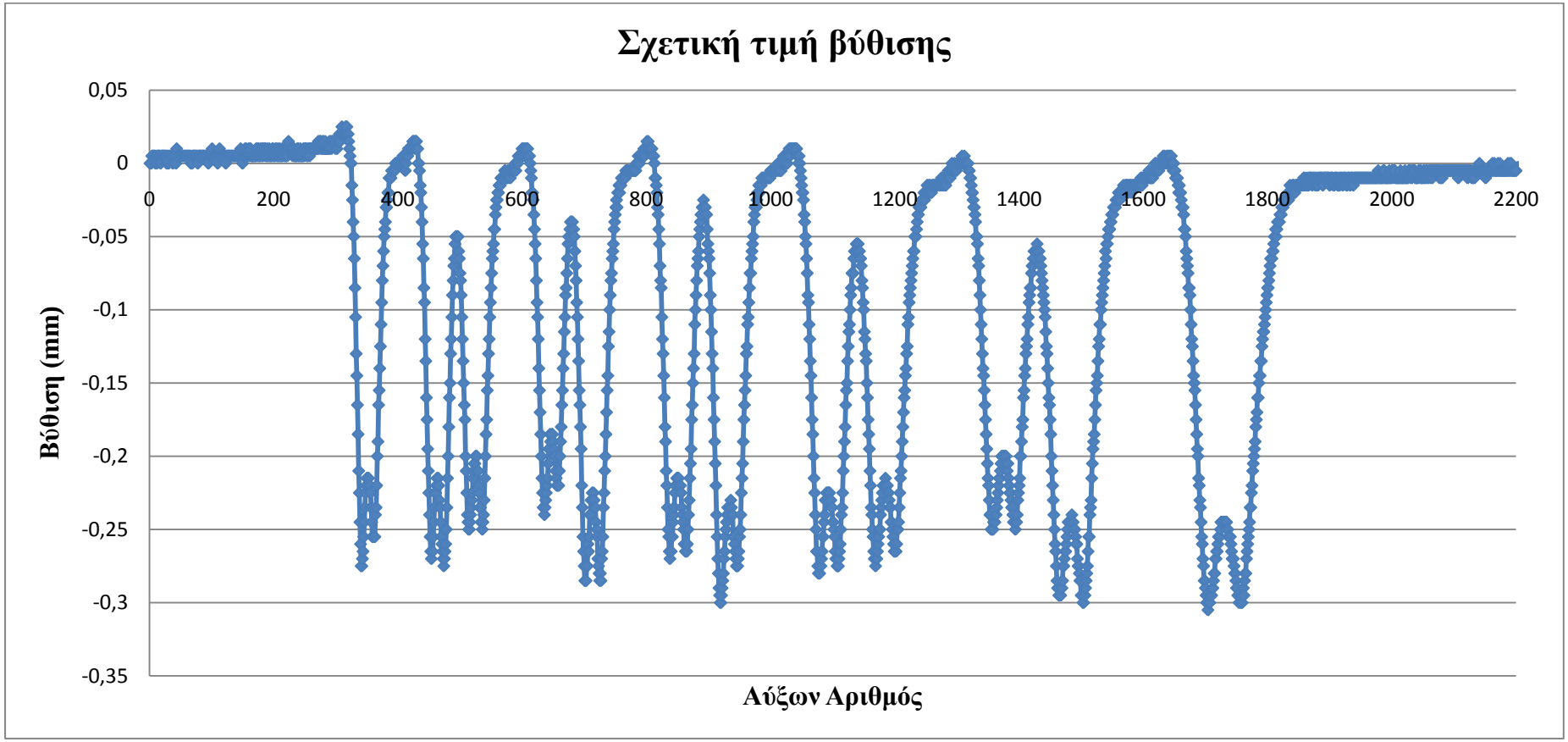
Διάγραμμα 4.5 : 5η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς



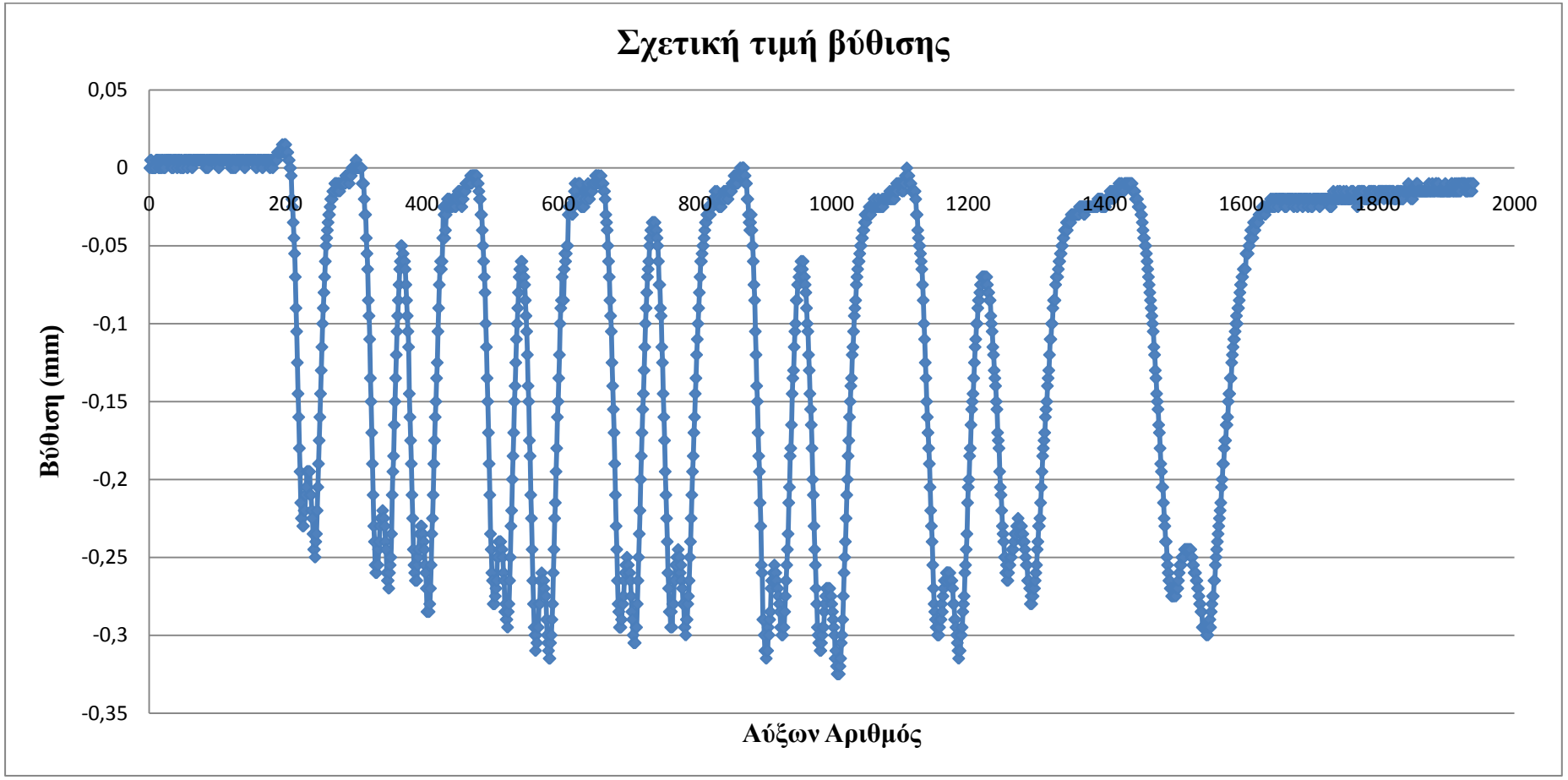
Διάγραμμα 4.6 : 6η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς



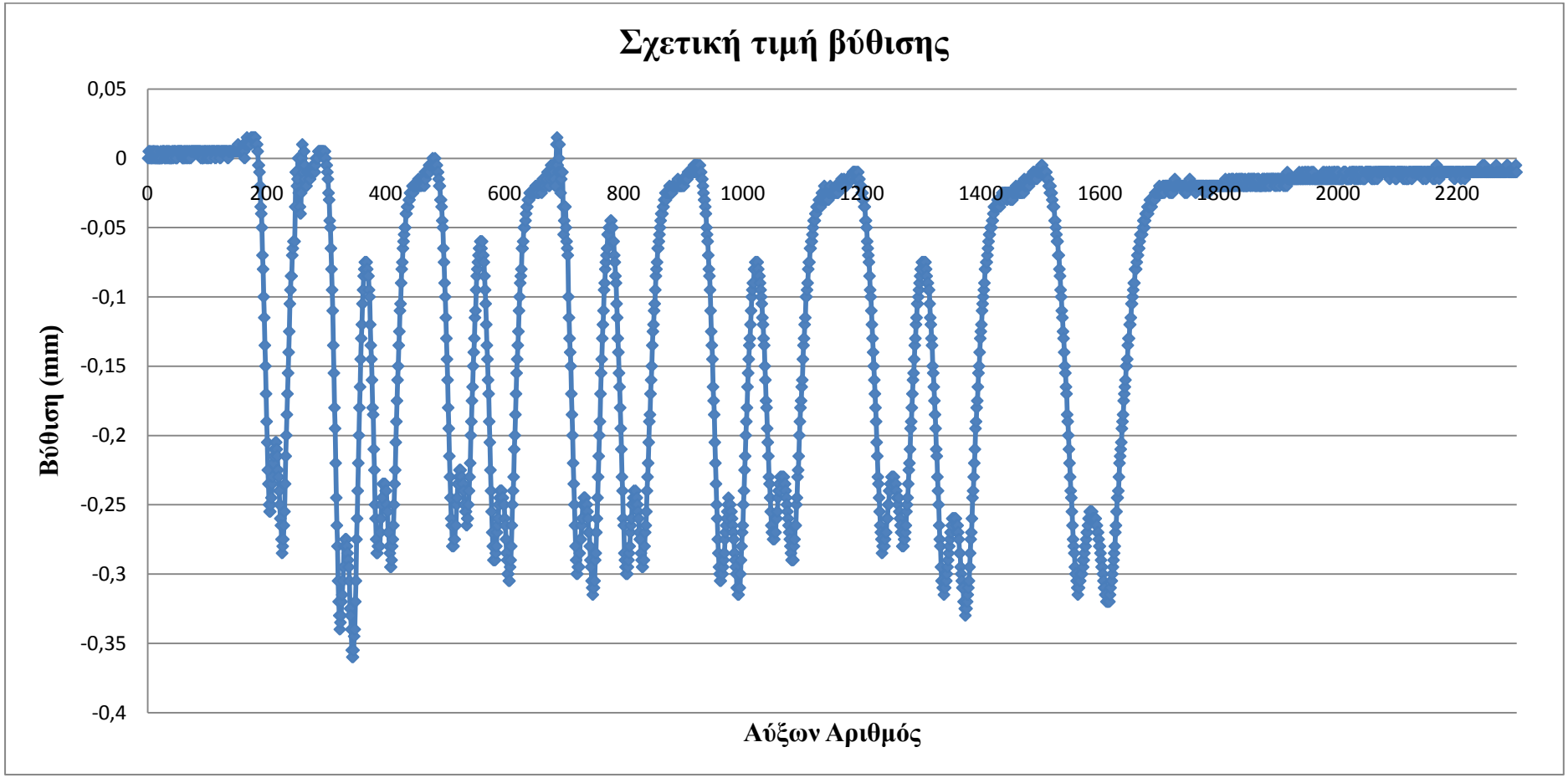
Διάγραμμα 4.7 : 7η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς



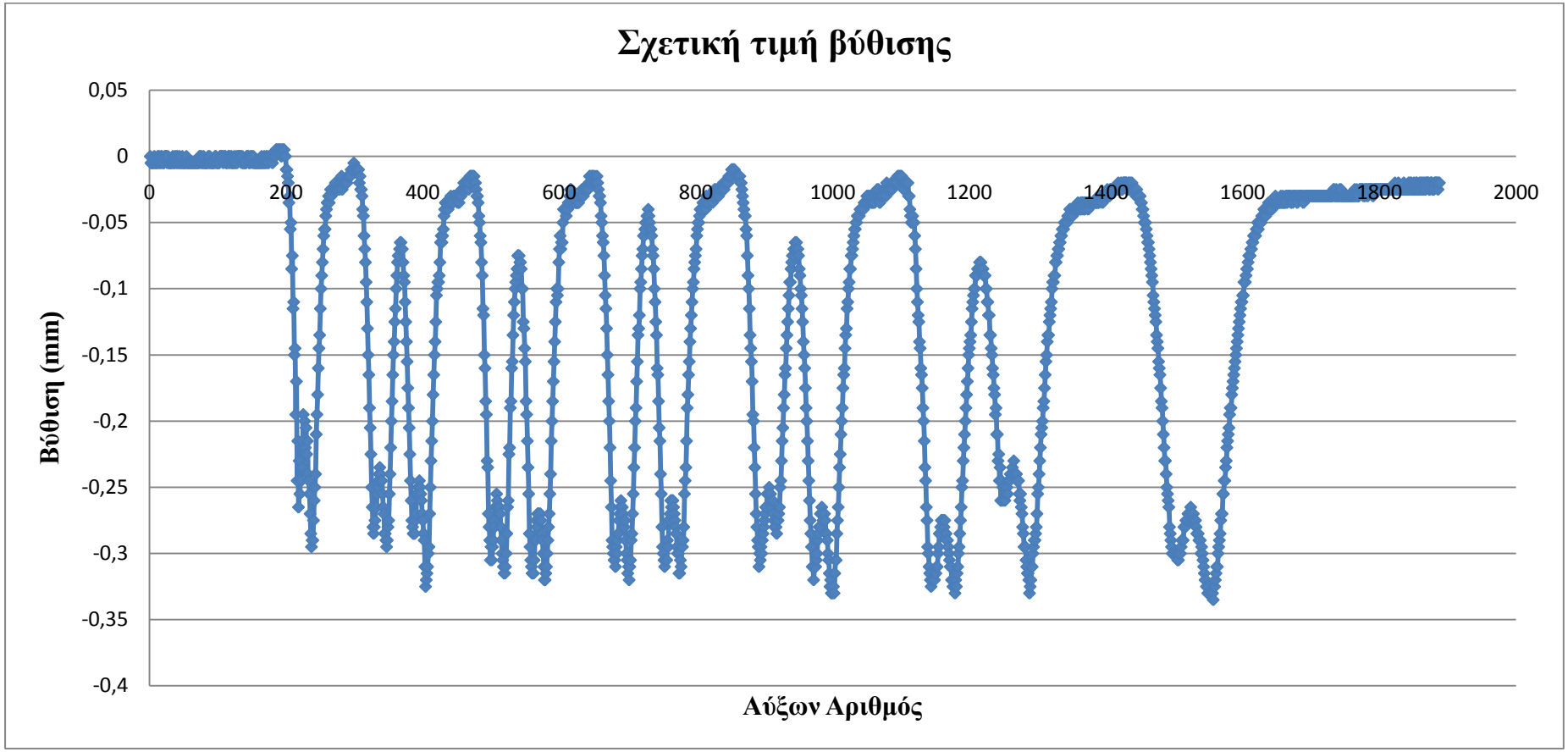
Διάγραμμα 4.8 : 8η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς



Διάγραμμα 4.9 : 9η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς



Διάγραμμα 4.10 : 10η μέτρηση – Συρμός 2ης γενιάς



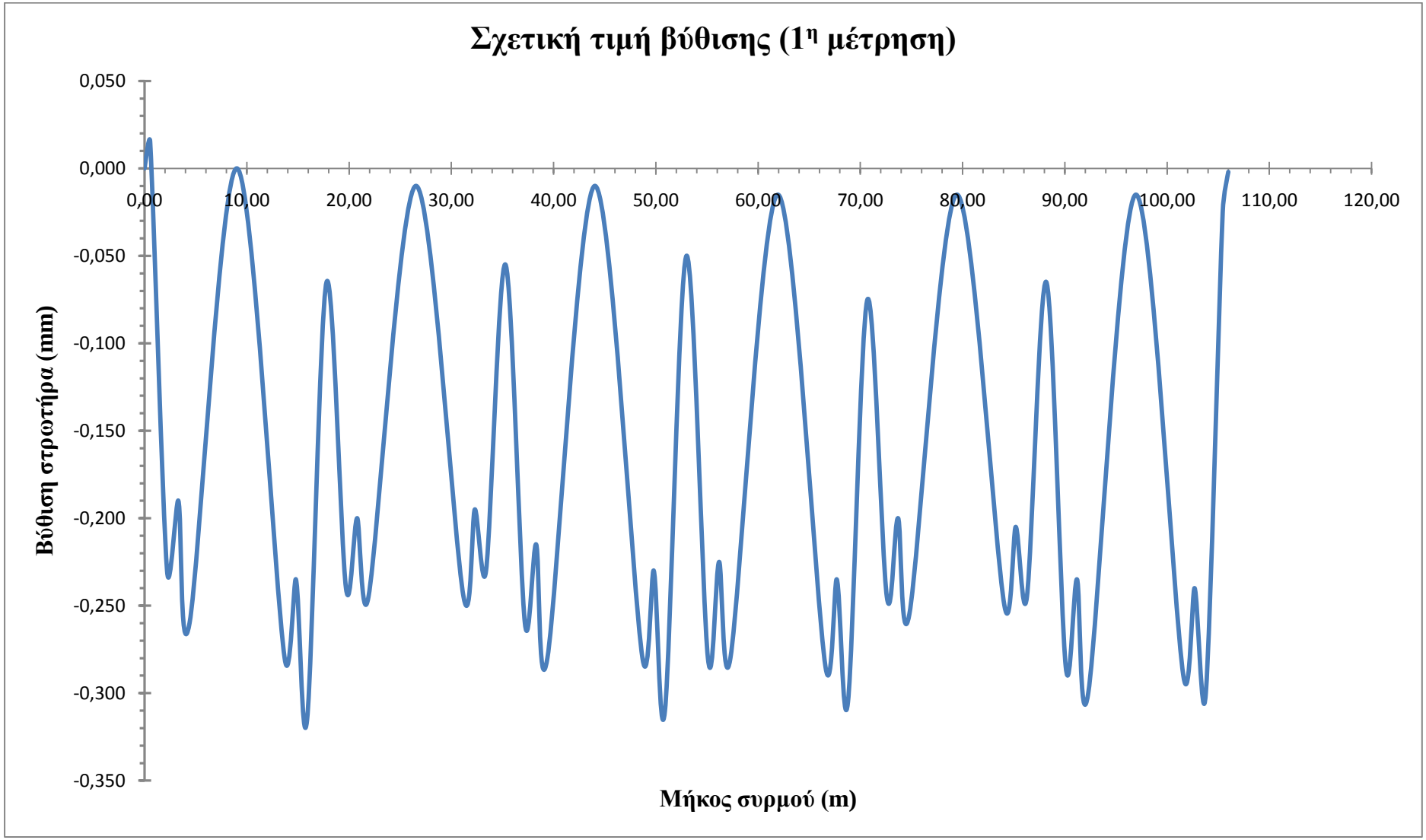
Διάγραμμα 4.11 : 11η μέτρηση – Συρμός 1ης γενιάς

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας 4.4
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 1η
Συρμός : 2ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 4:59:03
Πληρότητα : Άδειο

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,015
2200	2,20	-0,230
3300	3,30	-0,190
4400	4,40	-0,260
9050	9,05	0,000
13700	13,70	-0,280
14800	14,80	-0,235
15900	15,90	-0,315
17800	17,80	-0,065
19700	19,70	-0,240
20800	20,80	-0,200
21900	21,90	-0,245
26550	26,55	-0,010
31200	31,20	-0,245
32300	32,30	-0,195
33400	33,40	-0,230
35300	35,30	-0,055
37200	37,20	-0,260
38300	38,30	-0,215
39400	39,40	-0,280
44050	44,05	-0,010
48700	48,70	-0,280
49800	49,80	-0,230
50900	50,90	-0,310
53000	53,00	-0,05

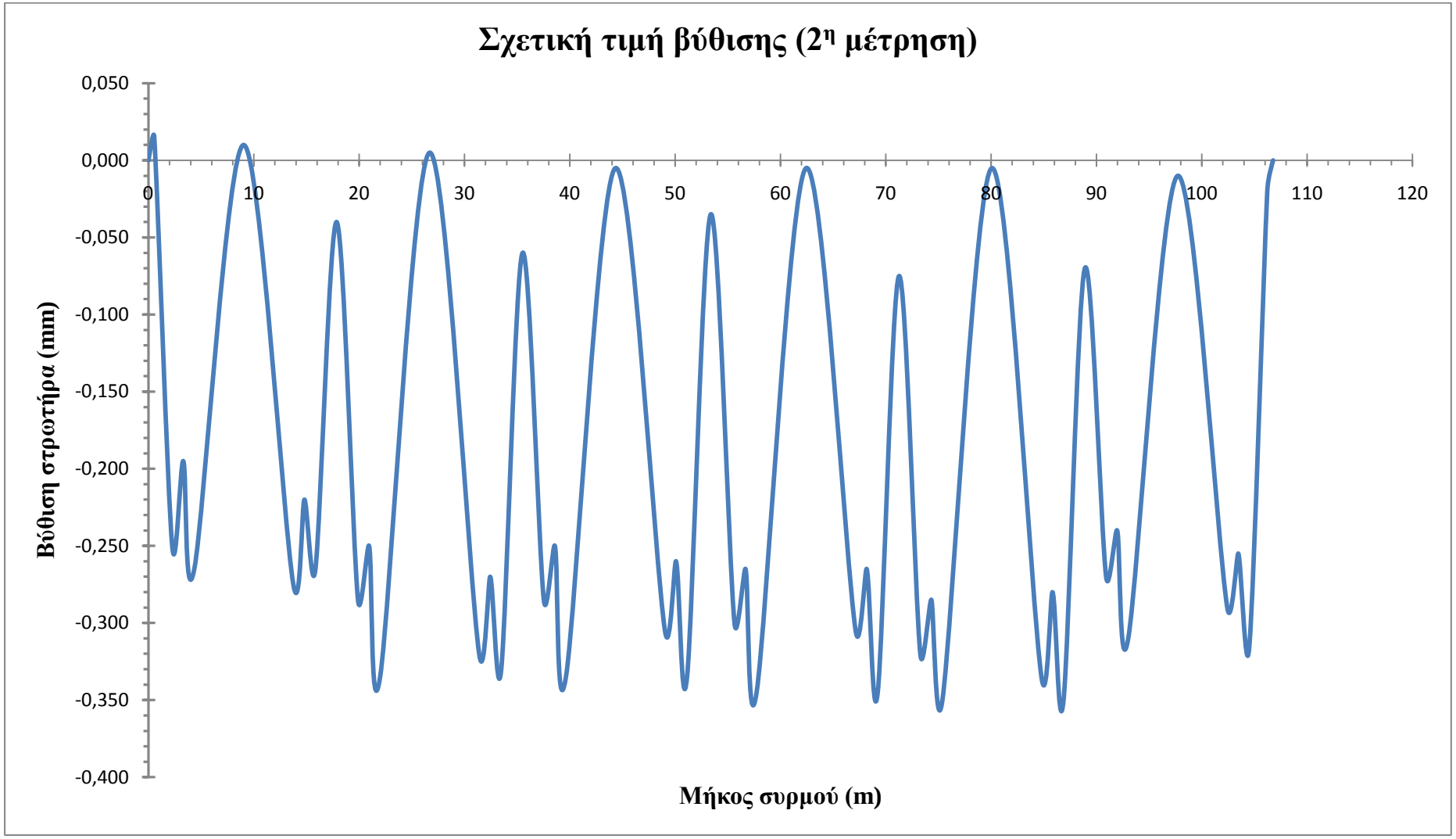
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,280
56200	56,20	-0,225
57300	57,30	-0,280
61950	61,95	-0,015
66600	66,60	-0,285
67700	67,70	-0,235
68800	68,80	-0,305
70700	70,70	-0,075
72600	72,60	-0,245
73700	73,70	-0,200
74800	74,80	-0,255
79450	79,45	-0,015
84100	84,10	-0,250
85200	85,20	-0,205
86300	86,30	-0,245
88200	88,20	-0,065
90100	90,10	-0,285
91200	91,20	-0,235
92300	92,30	-0,300
96950	96,95	-0,015
101600	101,60	-0,290
102700	102,70	-0,240
103800	103,80	-0,300
105450	105,45	-0,025
106000	106,00	-0,002


Σχετική τιμή βύθισης (1η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.5
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 2η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:23:59
Πληρότητα : 80%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,250
3300	3,3	-0,195
4350	4,35	-0,265
9050	9,05	0,010
13750	13,75	-0,275
14800	14,8	-0,220
15850	15,85	-0,265
17870	17,87	-0,040
19890	19,89	-0,285
20940	20,94	-0,250
21990	21,99	-0,335
26690	26,69	0,005
31390	31,39	-0,320
32440	32,44	-0,270
33490	33,49	-0,330
35510	35,51	-0,060
37530	37,53	-0,285
38580	38,58	-0,250
39630	39,63	-0,335
44330	44,33	-0,005
49030	49,03	-0,305
50080	50,08	-0,260
51130	51,13	-0,335
53380	53,38	-0,035

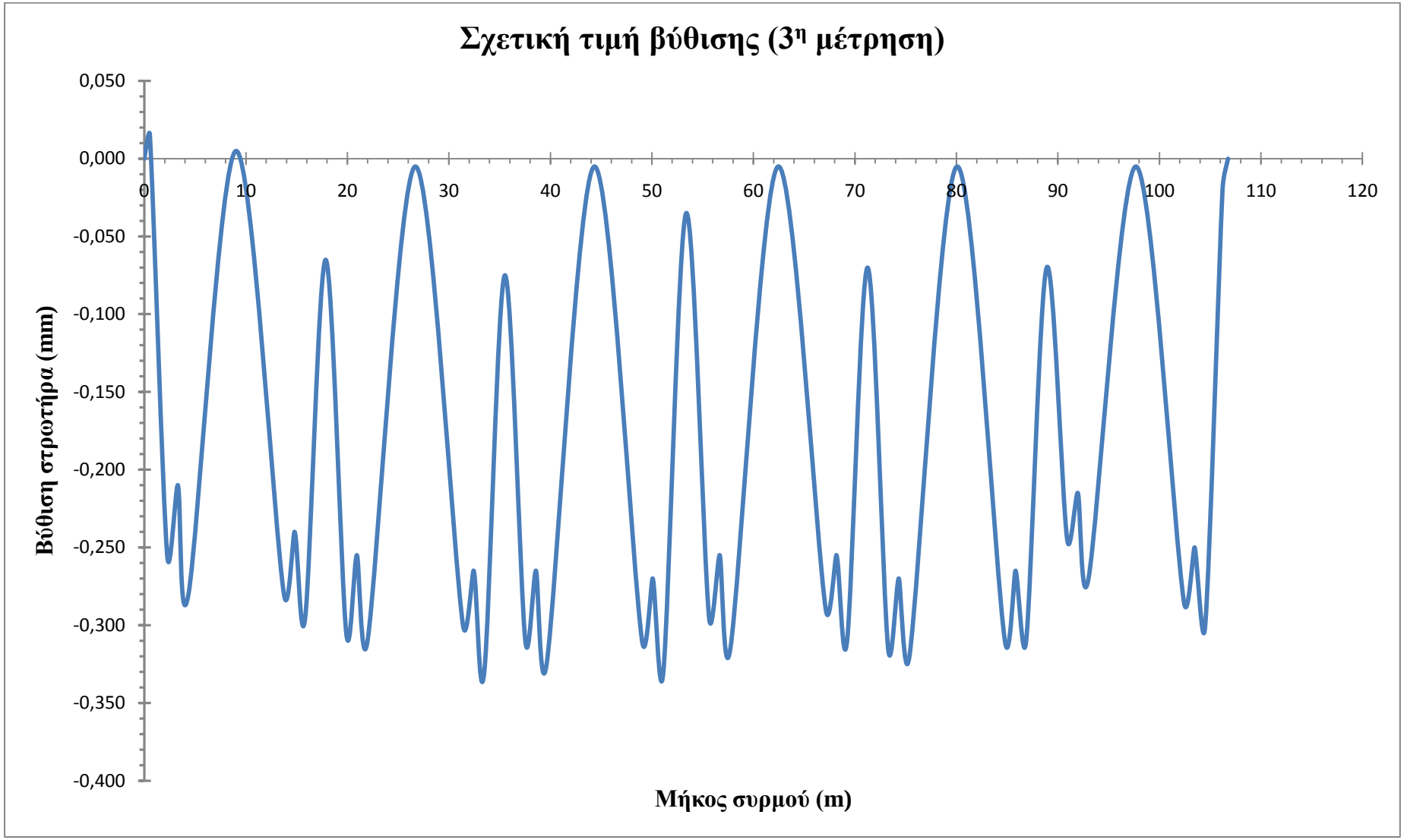
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,300
56680	56,68	-0,265
57730	57,73	-0,345
62430	62,43	-0,005
67130	67,13	-0,305
68180	68,18	-0,265
69230	69,23	-0,345
71250	71,25	-0,075
73270	73,27	-0,320
74320	74,32	-0,285
75370	75,37	-0,350
80070	80,07	-0,005
84770	84,77	-0,335
85820	85,82	-0,280
86870	86,87	-0,350
88890	88,89	-0,070
90910	90,91	-0,270
91960	91,96	-0,240
93010	93,01	-0,310
97710	97,71	-0,010
102410	102,41	-0,290
103460	103,46	-0,255
104510	104,51	-0,315
106210	106,21	-0,020
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (2η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.6
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 3η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:28:38
Πληρότητα : 90%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,255
3300	3,3	-0,210
4350	4,35	-0,280
9050	9,05	0,005
13750	13,75	-0,280
14800	14,8	-0,240
15850	15,85	-0,295
17870	17,87	-0,065
19890	19,89	-0,305
20940	20,94	-0,255
21990	21,99	-0,310
26690	26,69	-0,005
31390	31,39	-0,300
32440	32,44	-0,265
33490	33,49	-0,330
35510	35,51	-0,075
37530	37,53	-0,310
38580	38,58	-0,265
39630	39,63	-0,325
44330	44,33	-0,005
49030	49,03	-0,310
50080	50,08	-0,270
51130	51,13	-0,330
53380	53,38	-0,035

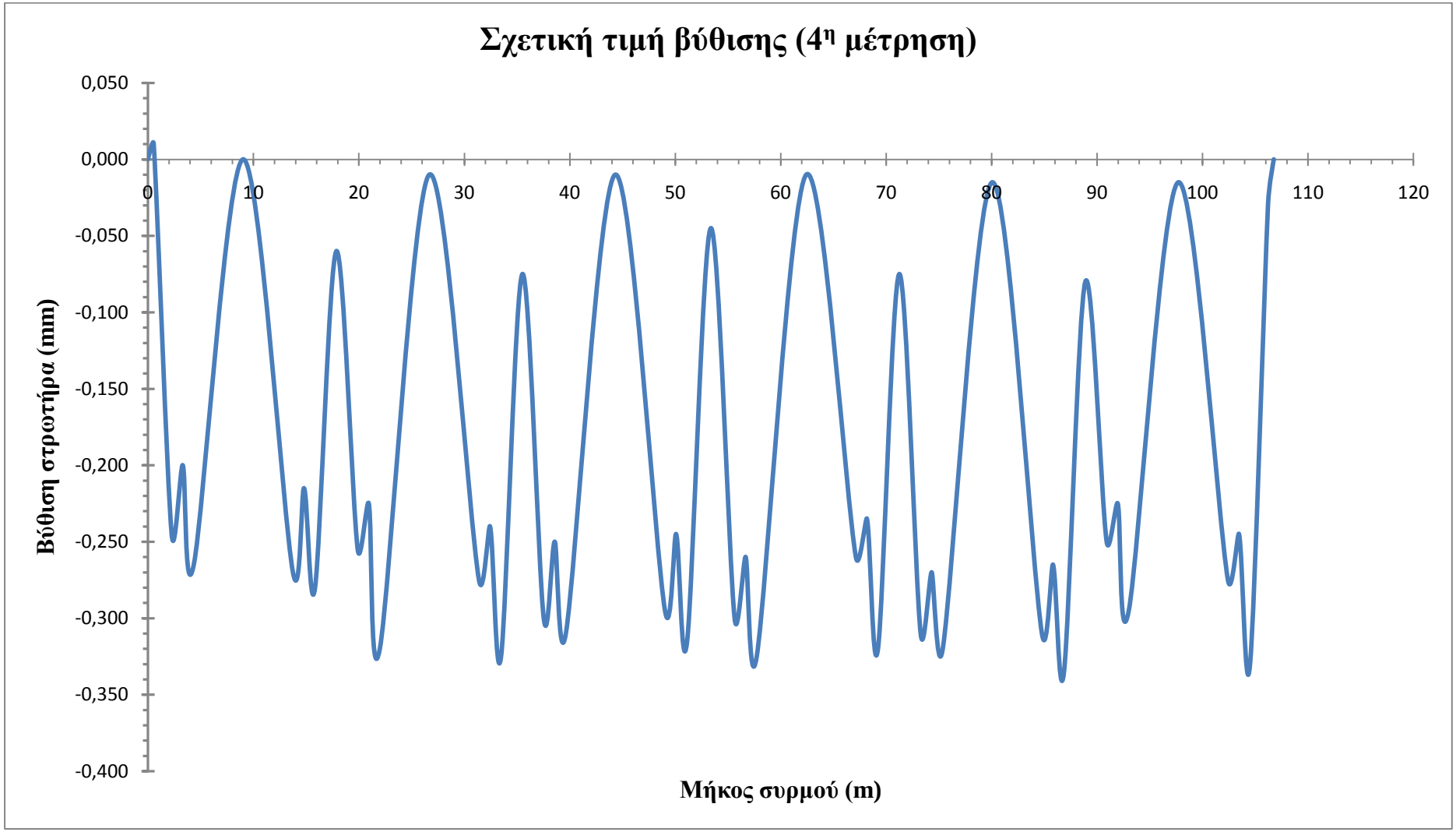
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,295
56680	56,68	-0,255
57730	57,73	-0,315
62430	62,43	-0,005
67130	67,13	-0,290
68180	68,18	-0,255
69230	69,23	-0,310
71250	71,25	-0,070
73270	73,27	-0,315
74320	74,32	-0,270
75370	75,37	-0,320
80070	80,07	-0,005
84770	84,77	-0,310
85820	85,82	-0,265
86870	86,87	-0,310
88890	88,89	-0,070
90910	90,91	-0,245
91960	91,96	-0,215
93010	93,01	-0,270
97710	97,71	-0,005
102410	102,41	-0,285
103460	103,46	-0,250
104510	104,51	-0,300
106210	106,21	-0,020
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (3η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.7
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 4η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:34:11
Πληρότητα : 30%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,010
2250	2,25	-0,245
3300	3,3	-0,200
4350	4,35	-0,265
9050	9,05	0,000
13750	13,75	-0,270
14800	14,8	-0,215
15850	15,85	-0,280
17870	17,87	-0,060
19890	19,89	-0,255
20940	20,94	-0,225
21990	21,99	-0,320
26690	26,69	-0,010
31390	31,39	-0,275
32440	32,44	-0,240
33490	33,49	-0,325
35510	35,51	-0,075
37530	37,53	-0,300
38580	38,58	-0,250
39630	39,63	-0,310
44330	44,33	-0,010
49030	49,03	-0,295
50080	50,08	-0,245
51130	51,13	-0,315
53380	53,38	-0,045

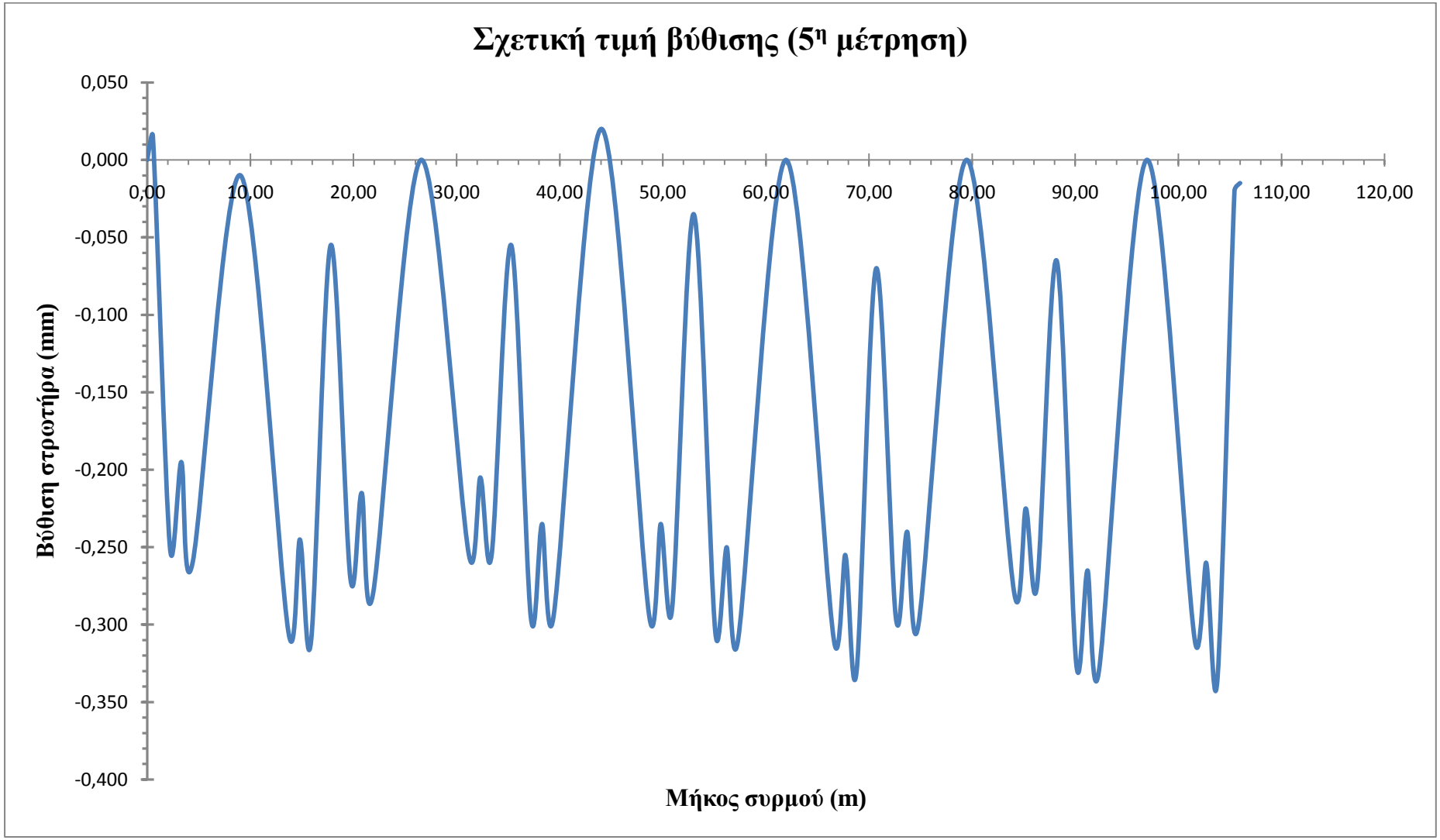
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,300
56680	56,68	-0,260
57730	57,73	-0,325
62430	62,43	-0,010
67130	67,13	-0,260
68180	68,18	-0,235
69230	69,23	-0,320
71250	71,25	-0,075
73270	73,27	-0,310
74320	74,32	-0,270
75370	75,37	-0,320
80070	80,07	-0,015
84770	84,77	-0,310
85820	85,82	-0,265
86870	86,87	-0,335
88890	88,89	-0,080
90910	90,91	-0,250
91960	91,96	-0,225
93010	93,01	-0,295
97710	97,71	-0,015
102410	102,41	-0,275
103460	103,46	-0,245
104510	104,51	-0,330
106210	106,21	-0,030
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (4η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.8
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 5η
Συρμός : 2ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:39:29
Πληρότητα : 70%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,015
2200	2,20	-0,250
3300	3,30	-0,195
4400	4,40	-0,260
9050	9,05	-0,010
13700	13,70	-0,305
14800	14,80	-0,245
15900	15,90	-0,310
17800	17,80	-0,055
19700	19,70	-0,270
20800	20,80	-0,215
21900	21,90	-0,280
26550	26,55	0,000
31200	31,20	-0,255
32300	32,30	-0,205
33400	33,40	-0,255
35300	35,30	-0,055
37200	37,20	-0,295
38300	38,30	-0,235
39400	39,40	-0,295
44050	44,05	0,020
48700	48,70	-0,295
49800	49,80	-0,235
50900	50,90	-0,290
53000	53,00	-0,035

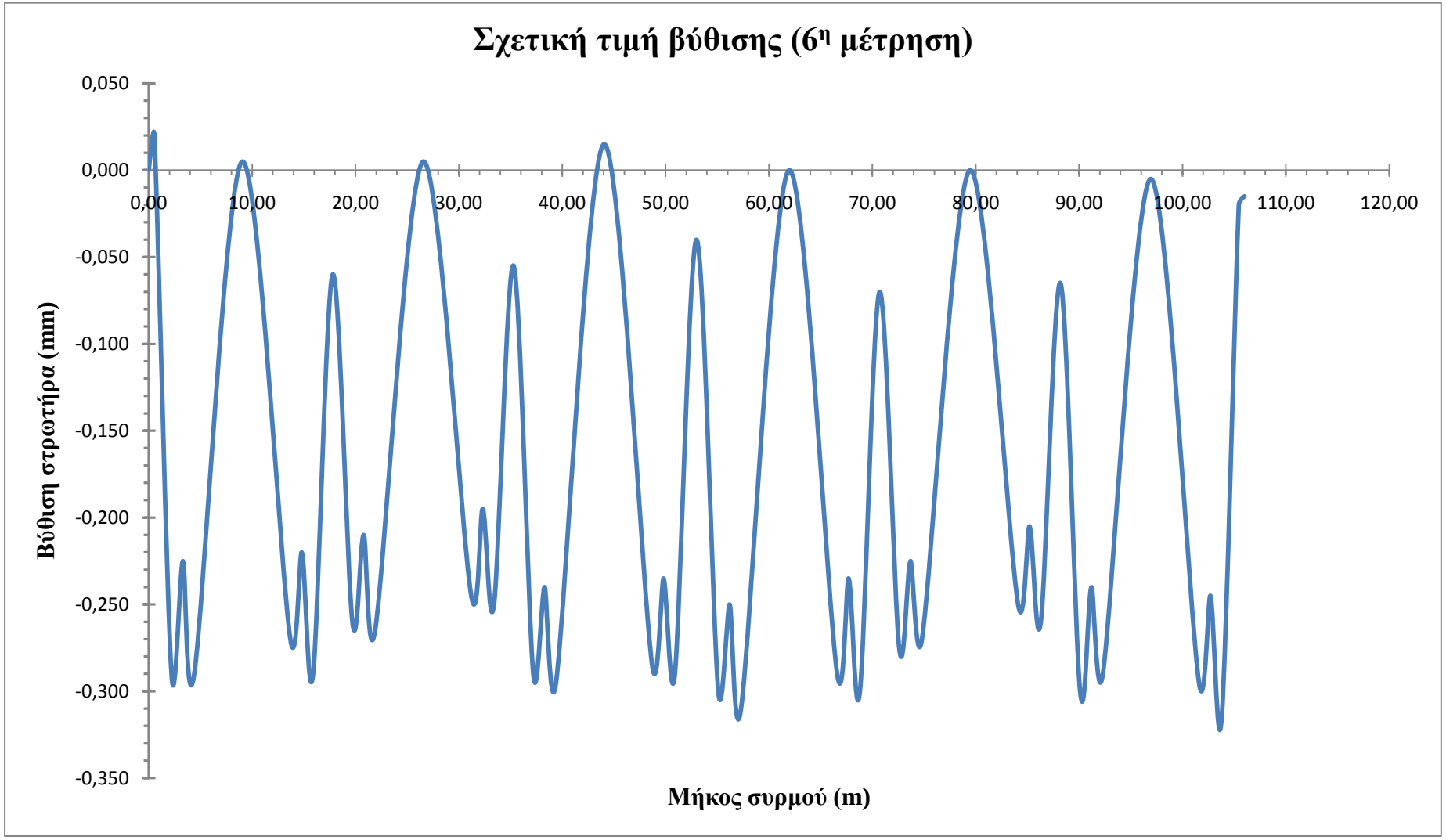
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,305
56200	56,20	-0,250
57300	57,30	-0,310
61950	61,95	0,000
66600	66,60	-0,310
67700	67,70	-0,255
68800	68,80	-0,330
70700	70,70	-0,070
72600	72,60	-0,295
73700	73,70	-0,240
74800	74,80	-0,300
79450	79,45	0,000
84100	84,10	-0,280
85200	85,20	-0,225
86300	86,30	-0,275
88200	88,20	-0,065
90100	90,10	-0,325
91200	91,20	-0,265
92300	92,30	-0,330
96950	96,95	0,000
101600	101,60	-0,310
102700	102,70	-0,260
103800	103,80	-0,335
105450	105,45	-0,020
106000	106,00	-0,015


Σχετική τιμή βύθισης (5η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.9
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 6η
Συρμός : 2ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:44:24
Πληρότητα : 40%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,020
2200	2,20	-0,290
3300	3,30	-0,225
4400	4,40	-0,290
9050	9,05	0,005
13700	13,70	-0,270
14800	14,80	-0,220
15900	15,90	-0,290
17800	17,80	-0,060
19700	19,70	-0,260
20800	20,80	-0,210
21900	21,90	-0,265
26550	26,55	0,005
31200	31,20	-0,245
32300	32,30	-0,195
33400	33,40	-0,250
35300	35,30	-0,055
37200	37,20	-0,290
38300	38,30	-0,240
39400	39,40	-0,295
44050	44,05	0,015
48700	48,70	-0,285
49800	49,80	-0,235
50900	50,90	-0,290
53000	53,00	-0,040

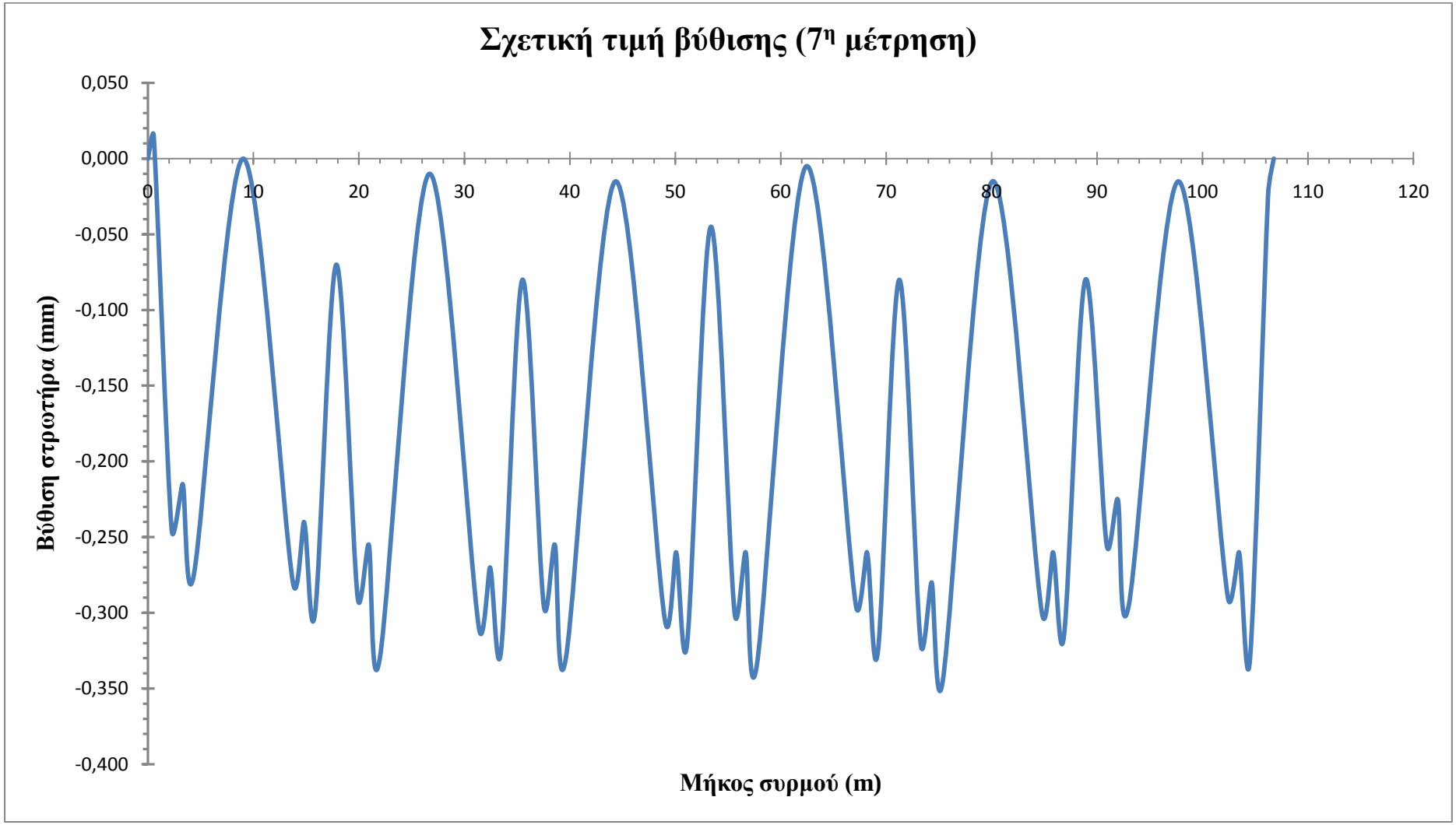
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,300
56200	56,20	-0,250
57300	57,30	-0,310
61950	61,95	0,000
66600	66,60	-0,290
67700	67,70	-0,235
68800	68,80	-0,300
70700	70,70	-0,070
72600	72,60	-0,275
73700	73,70	-0,225
74800	74,80	-0,270
79450	79,45	0,000
84100	84,10	-0,250
85200	85,20	-0,205
86300	86,30	-0,260
88200	88,20	-0,065
90100	90,10	-0,300
91200	91,20	-0,240
92300	92,30	-0,290
96950	96,95	-0,005
101600	101,60	-0,295
102700	102,70	-0,245
103800	103,80	-0,315
105450	105,45	-0,020
106000	106,00	-0,015


Σχετική τιμή βύθισης (6η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.10
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 7η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:48:46
Πληρότητα : 30%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,245
3300	3,3	-0,215
4350	4,35	-0,275
9050	9,05	0,000
13750	13,75	-0,280
14800	14,8	-0,240
15850	15,85	-0,300
17870	17,87	-0,070
19890	19,89	-0,290
20940	20,94	-0,255
21990	21,99	-0,330
26690	26,69	-0,010
31390	31,39	-0,310
32440	32,44	-0,270
33490	33,49	-0,325
35510	35,51	-0,080
37530	37,53	-0,295
38580	38,58	-0,255
39630	39,63	-0,330
44330	44,33	-0,015
49030	49,03	-0,305
50080	50,08	-0,260
51130	51,13	-0,320
53380	53,38	-0,045

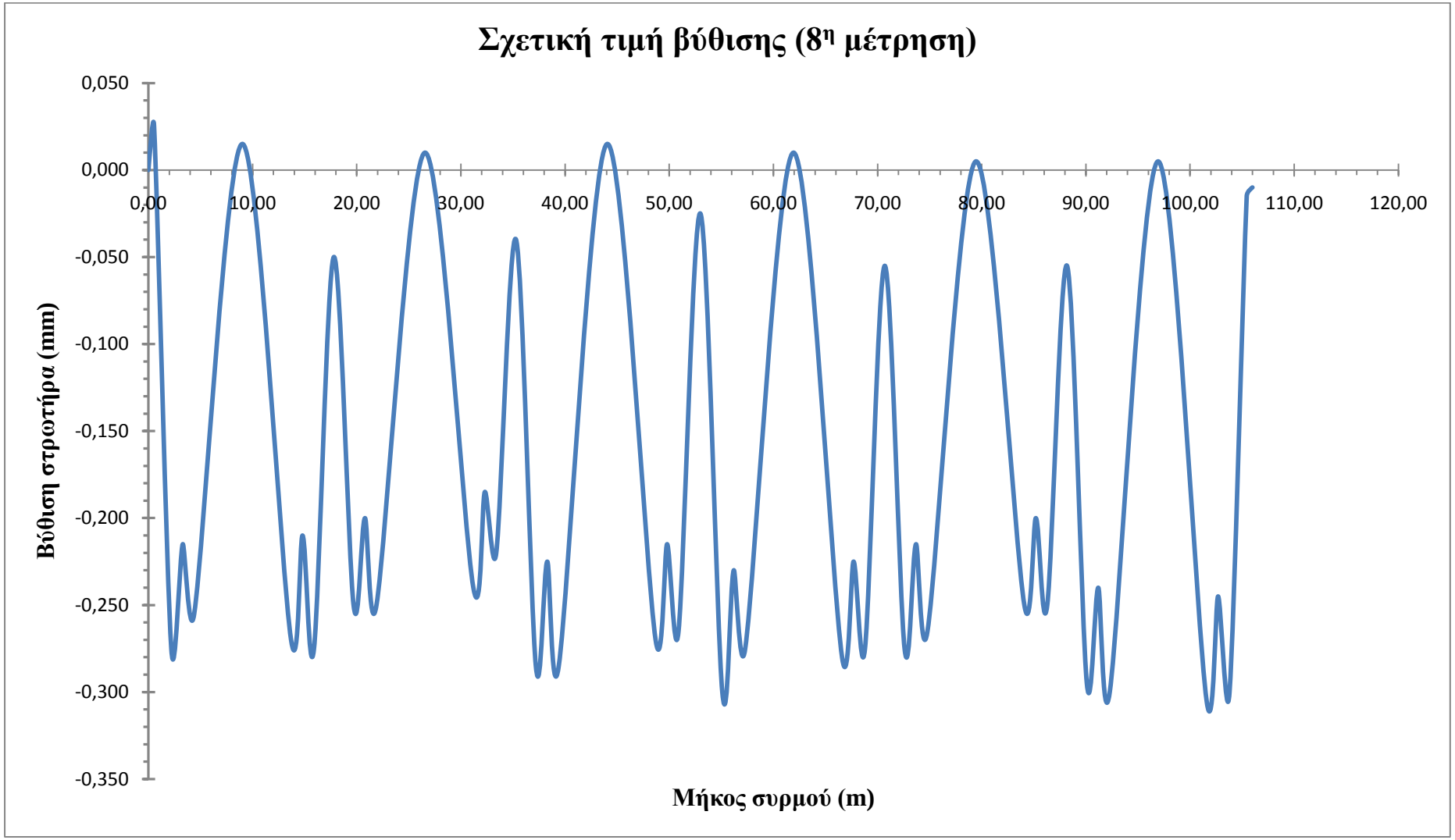
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,300
56680	56,68	-0,260
57730	57,73	-0,335
62430	62,43	-0,005
67130	67,13	-0,295
68180	68,18	-0,260
69230	69,23	-0,325
71250	71,25	-0,080
73270	73,27	-0,320
74320	74,32	-0,280
75370	75,37	-0,345
80070	80,07	-0,015
84770	84,77	-0,300
85820	85,82	-0,260
86870	86,87	-0,315
88890	88,89	-0,080
90910	90,91	-0,255
91960	91,96	-0,225
93010	93,01	-0,295
97710	97,71	-0,015
102410	102,41	-0,290
103460	103,46	-0,260
104510	104,51	-0,330
106210	106,21	-0,025
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (7η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.11
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 8η
Συρμός : 2ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:53:49
Πληρότητα : 40%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,025
2200	2,20	-0,275
3300	3,30	-0,215
4400	4,40	-0,255
9050	9,05	0,015
13700	13,70	-0,270
14800	14,80	-0,210
15900	15,90	-0,275
17800	17,80	-0,050
19700	19,70	-0,250
20800	20,80	-0,200
21900	21,90	-0,250
26550	26,55	0,010
31200	31,20	-0,240
32300	32,30	-0,185
33400	33,40	-0,220
35300	35,30	-0,040
37200	37,20	-0,285
38300	38,30	-0,225
39400	39,40	-0,285
44050	44,05	0,015
48700	48,70	-0,270
49800	49,80	-0,215
50900	50,90	-0,265
53000	53,00	-0,025

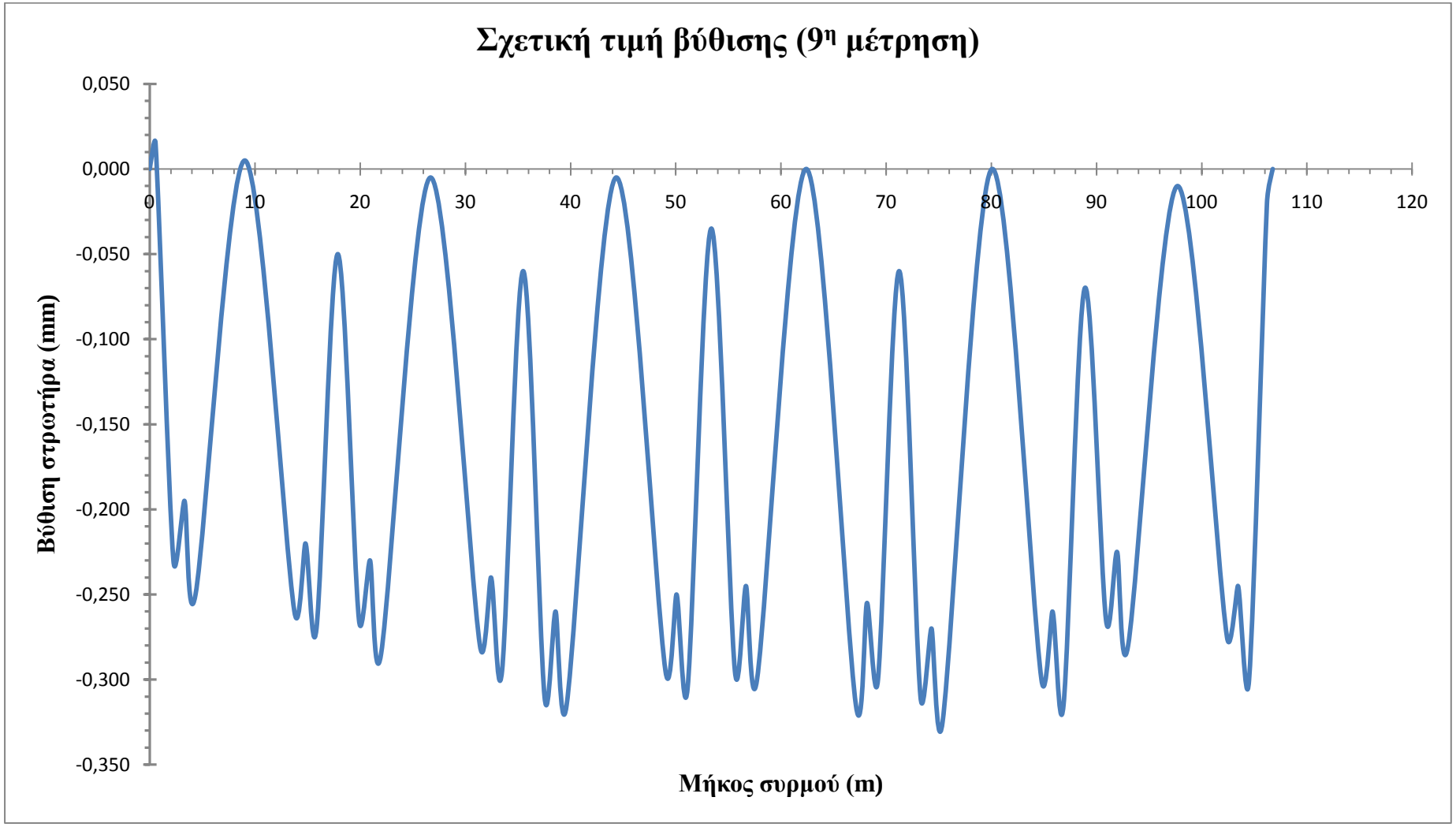
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,300
56200	56,20	-0,230
57300	57,30	-0,275
61950	61,95	0,010
66600	66,60	-0,280
67700	67,70	-0,225
68800	68,80	-0,275
70700	70,70	-0,055
72600	72,60	-0,275
73700	73,70	-0,215
74800	74,80	-0,265
79450	79,45	0,005
84100	84,10	-0,250
85200	85,20	-0,200
86300	86,30	-0,250
88200	88,20	-0,055
90100	90,10	-0,295
91200	91,20	-0,240
92300	92,30	-0,300
96950	96,95	0,005
101600	101,60	-0,305
102700	102,70	-0,245
103800	103,80	-0,300
105450	105,45	-0,015
106000	106,00	-0,010


Σχετική τιμή βύθισης (8η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.12
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 9η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 5:58:32
Πληρότητα : 35%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,230
3300	3,3	-0,195
4350	4,35	-0,250
9050	9,05	0,005
13750	13,75	-0,260
14800	14,8	-0,220
15850	15,85	-0,270
17870	17,87	-0,050
19890	19,89	-0,265
20940	20,94	-0,230
21990	21,99	-0,285
26690	26,69	-0,005
31390	31,39	-0,280
32440	32,44	-0,240
33490	33,49	-0,295
35510	35,51	-0,060
37530	37,53	-0,310
38580	38,58	-0,260
39630	39,63	-0,315
44330	44,33	-0,005
49030	49,03	-0,295
50080	50,08	-0,250
51130	51,13	-0,305
53380	53,38	-0,035

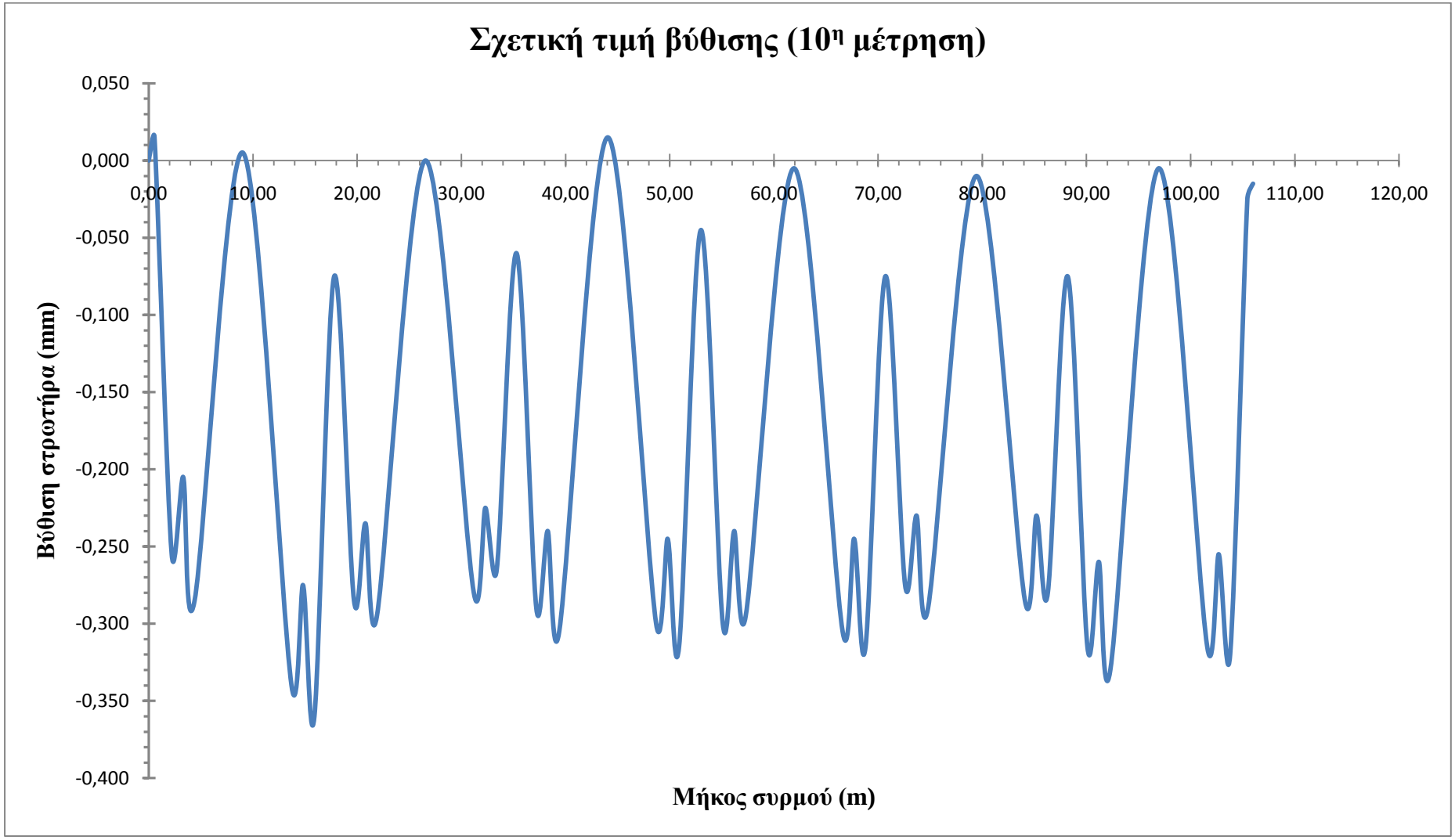
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,295
56680	56,68	-0,245
57730	57,73	-0,300
62430	62,43	0,000
67130	67,13	-0,315
68180	68,18	-0,255
69230	69,23	-0,300
71250	71,25	-0,060
73270	73,27	-0,310
74320	74,32	-0,270
75370	75,37	-0,325
80070	80,07	0,000
84770	84,77	-0,300
85820	85,82	-0,260
86870	86,87	-0,315
88890	88,89	-0,070
90910	90,91	-0,265
91960	91,96	-0,225
93010	93,01	-0,280
97710	97,71	-0,010
102410	102,41	-0,275
103460	103,46	-0,245
104510	104,51	-0,300
106210	106,21	-0,020
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (9η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.13
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : $10^{η}$
Συρμός : $2^{ης}$ γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 6:04:47
Πληρότητα : 70%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0,00	0,000
550	0,55	0,015
2200	2,20	-0,255
3300	3,30	-0,205
4400	4,40	-0,285
9050	9,05	0,005
13700	13,70	-0,340
14800	14,80	-0,275
15900	15,90	-0,360
17800	17,80	-0,075
19700	19,70	-0,285
20800	20,80	-0,235
21900	21,90	-0,295
26550	26,55	0,000
31200	31,20	-0,280
32300	32,30	-0,225
33400	33,40	-0,265
35300	35,30	-0,060
37200	37,20	-0,290
38300	38,30	-0,240
39400	39,40	-0,305
44050	44,05	0,015
48700	48,70	-0,300
49800	49,80	-0,245
50900	50,90	-0,315
53000	53,00	-0,045

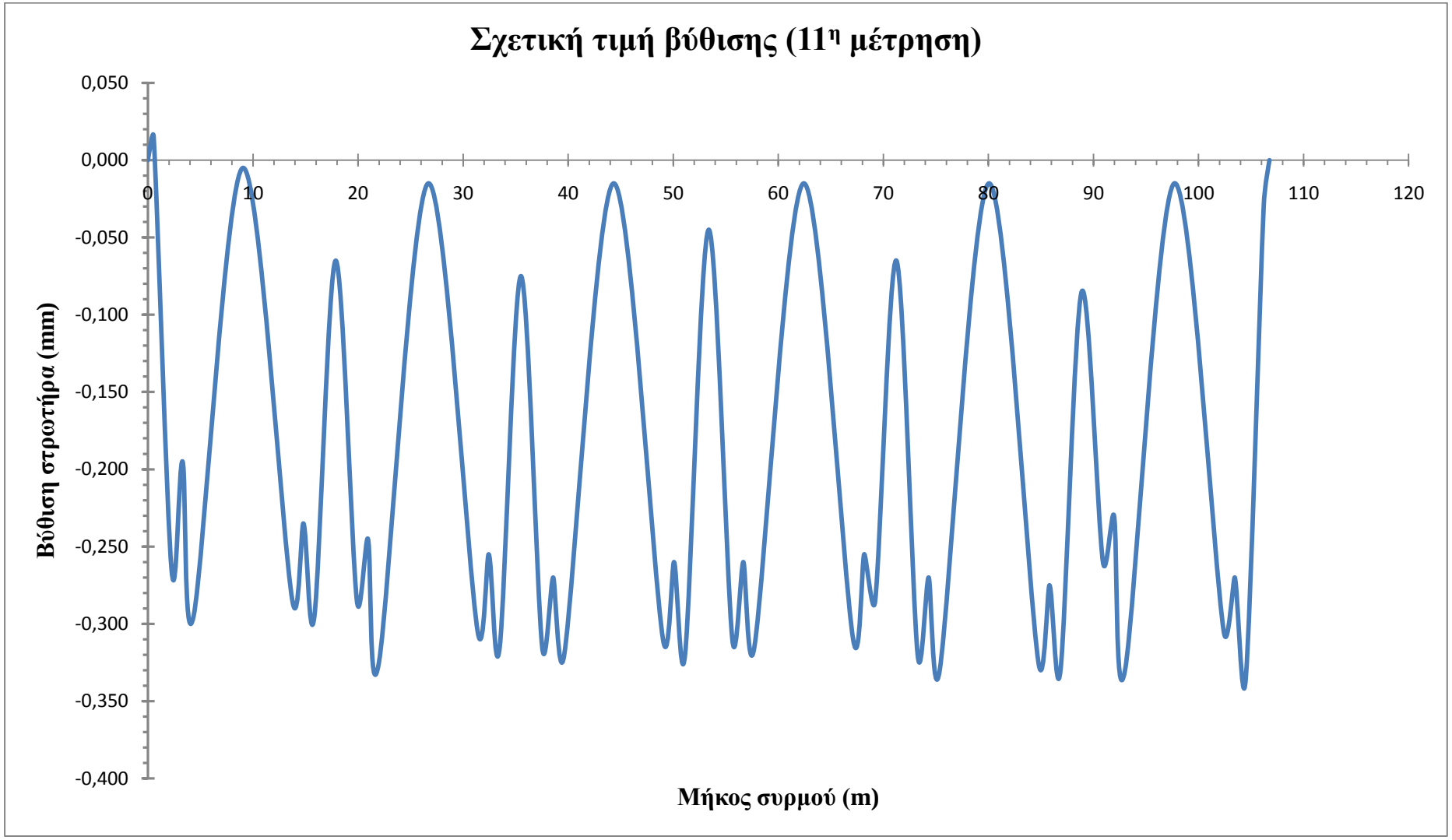
Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55100	55,10	-0,300
56200	56,20	-0,240
57300	57,30	-0,295
61950	61,95	-0,005
66600	66,60	-0,305
67700	67,70	-0,245
68800	68,80	-0,315
70700	70,70	-0,075
72600	72,60	-0,275
73700	73,70	-0,230
74800	74,80	-0,290
79450	79,45	-0,010
84100	84,10	-0,285
85200	85,20	-0,230
86300	86,30	-0,280
88200	88,20	-0,075
90100	90,10	-0,315
91200	91,20	-0,260
92300	92,30	-0,330
96950	96,95	-0,005
101600	101,60	-0,315
102700	102,70	-0,255
103800	103,80	-0,320
105450	105,45	-0,025
106000	106,00	-0,015


Σχετική τιμή βύθισης (10η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
60,00
70,00
80,00
90,00
100,00
110,00
120,00
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

Πίνακας 4.14
Μεταβολή της βύθισης y σε συνάρτηση με το μήκος του συρμού
Ημερομηνία : 20 – 06 -2011
Μέτρηση : 11η
Συρμός : 1ης γενιάς
Χρόνος έναρξης μέτρησης : 6:09:16
Πληρότητα : 20%

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
0	0	0,000
550	0,55	0,015
2250	2,25	-0,265
3300	3,3	-0,195
4350	4,35	-0,295
9050	9,05	-0,005
13750	13,75	-0,285
14800	14,8	-0,235
15850	15,85	-0,295
17870	17,87	-0,065
19890	19,89	-0,285
20940	20,94	-0,245
21990	21,99	-0,325
26690	26,69	-0,015
31390	31,39	-0,305
32440	32,44	-0,255
33490	33,49	-0,315
35510	35,51	-0,075
37530	37,53	-0,315
38580	38,58	-0,270
39630	39,63	-0,320
44330	44,33	-0,015
49030	49,03	-0,310
50080	50,08	-0,260
51130	51,13	-0,320
53380	53,38	-0,045

Μήκος συρμού (mm)	Μήκος συρμού (m)	Βύθιση (mm)
55630	55,63	-0,310
56680	56,68	-0,260
57730	57,73	-0,315
62430	62,43	-0,015
67130	67,13	-0,310
68180	68,18	-0,255
69230	69,23	-0,285
71250	71,25	-0,065
73270	73,27	-0,320
74320	74,32	-0,270
75370	75,37	-0,330
80070	80,07	-0,015
84770	84,77	-0,325
85820	85,82	-0,275
86870	86,87	-0,330
88890	88,89	-0,085
90910	90,91	-0,260
91960	91,96	-0,230
93010	93,01	-0,330
97710	97,71	-0,015
102410	102,41	-0,305
103460	103,46	-0,270
104510	104,51	-0,335
106210	106,21	-0,030
106760	106,76	0,000


Σχετική τιμή βύθισης (11η μέτρηση)
0,050
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
-0,350
-0,400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Βύθιση στρωτήρα (mm)
Μήκος συρμού (m)

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Q Φορτίο τροχού

b Πλάτος ιδανικού στρωτήρα

L Ελαστικό μήκος του κατά μήκος φορέα

x Απόσταση μεταξύ των αξόνων

$\mathbf{S_s}$ Δύναμη αντίδρασης στρωτήρα

$\mathbf{c_{ολικό}}$ Συνολικός συντελεστής ελατηρίου

$\mathbf{c_{"Σόλας"}}$ Συντελεστής ελατηρίου ελαστικής "σόλας" στη Σταθερή Επιδομή

$\mathbf{c_{"Μπότας"}}$ Συντελεστής ελατηρίου ελαστικής "μπότας" στη Σταθερή Επιδομή

$\mathbf{c_{Rail\ Pad}}$ Συντελεστής ελατηρίου Rail Pad στη Σταθερή Επιδομή και στην κλασική Επιδομή με έρμα

$\mathbf{c_{Σκύρου}}$ Συντελεστής ελατηρίου σκύρου στην κλασική Επιδομή με έρμα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] (1994, Juni). *Schriftenreihe des IVT Nr. 100/2, Zürich* .

[2] Leykauf G., Mattner L. (1990). Elastisches Verformungsverhalten des Eisenbahnoberbaus. *Eisenbahningenieur 41* , σσ. 111-119.

[3] Λυμπέρης, Κ. (2005). *Εφαρμοσμένη Σιδηροδρομική.*

[4] Προφυλλίδης, Β. (1993). *Σιδηροδρομική Τόμος Πρωτος.*

[5] Πυργίδης, Χ. (2009). *Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

[6] www.ametro.gr

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες για τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στους :

- Κύριο Λυμπέρη Κ., Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π.
- Κύριο Τερεζάκη Π., Διευθυντή Υποδομής του Αττικό Μετρό καθώς και όλη την ομάδα του στο Μετρό.
- Κύριο Κουρκουλή Σ., Επ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.
- Κυρία Γιαλαμά Τ., Υποψήφια Διδάκτωρ