



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ
ΤΡΟΧΟΥ - ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ
ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΕΠ' ΑΥΤΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΙΑΛΑΜΑ ΤΑΤΙΑΝΑ-ΙΩΑΝΝΑ

ΔΠΛ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Α.Π.Θ.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΥΜΠΕΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΡΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επ. Καθηγητή κ. Κ. Λυμπέρη, μέντορα και δάσκαλο, για την ανεκτίμητη ευκαιρία που μου έδωσε όταν δέχθηκε να αναλάβει την επίβλεψη της διδακτορικής μου διατριβής. Τον ευχαριστώ κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την υποστήριξη και την προθυμία του να συνδράμει στην προσπάθειά μου, για τη συνεχή επιστημονική και ερευνητική καθοδήγηση, καθώς και για την ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Ελπίζω να φάνηκα αντάξια των προσδοκιών του. Θερμές ευχαριστίες στα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής Καθηγητή κ. Α. Σταθόπουλο και Καθηγητή κ. Γ. Κανελλαΐδη, στον Αν. Καθηγητή κ. Α. Μπαλλή και στον Αν. Καθηγητή κ. Μ. Καρλαύτη για την καθοδήγηση και δημιουργική κριτική της εργασίας μου, καθώς και για την πολύπλευρη υποστήριξή τους.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Αν. Καθηγητή κ. Σ. Κουρκουλή για την προθυμία του να υποστηρίξει την ερευνητική μου προσπάθεια προσφέροντάς μου τη δυνατότητα εκπόνησης του πειράματος στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε., καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά του στα θέματα Μηχανικής.

Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Χ. Πυργίδη που μέσω της διδασκαλίας του ενίσχυσε την αγάπη μου για τον σιδηρόδρομο και μου έδωσε την ώθηση να εντρυφήσω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Αναγνωστόπουλο, Διευθυντή Εργοστασίων ΟΣΕ, τον κ. Χ. Παντίδο, Προϊστάμενο Εργοστασίου ΟΣΕ Πειραιά και τον κ. Γ. Σκούρα, Διευθυντή Έλξης και Αποκλεισμού των ΗΣΑΠ, οι οποίοι συνέδραμαν στην προσπάθεια υλοποίησης του πειράματος. Κυρίως, το προσωπικό του μηχανουργείου των ΗΣΑΠ και ιδιαίτερα τον κ. Γ. Μπρέκη. Ξεχωριστή αναφορά θα ήθελα να κάνω στον κ. Π. Κοντογιάννη, του οποίου η προσφορά στα στάδια του σχεδιασμού, της κατασκευής, της μεταφοράς και της συναρμολόγησης-αποσυναρμολόγησης της πειραματικής διάταξης υπήρξε πολύτιμη.

Για τη συμβολή τους στη διεξαγωγή του πειράματος ευχαριστώ επίσης τον κ. Α. Δημοσθένους, τον κ. Σ. Κουταλιανό, τον κ. Θ. Τζαβάρα, τον κ. Κεπατσόγλου, τον κ. Η. Σταύρακα, την κ. Ι. Δακανάλη και ιδιαίτερα την κ. Ε. Πάσιου για την επιπλέον βοήθειά της στην επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Δ. Βενετσάνο, τον κ. Γ. Αλοΐζο και τον κ. Δ. Αβτζή για τη συμβολή τους στα διάφορα στάδια της έρευνας και της συγγραφής, καθώς και την κ. Ε. Θεοφανίδου για τη βοήθειά της στα διαδικαστικά θέματα που σχετίζονται με την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου για τη στήριξη, την κατανόηση, την υπομονή και την ουσιαστική συμπαράσταση σε αυτή τη χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω βαθιά ευγνωμοσύνη στη μητέρα μου, η οποία μου καλλιέργησε την ανάγκη για συνεχή αναζήτηση της γνώσης. Για όλα όσα μου έχει προσφέρει και κυρίως για τη δυνατότητα να εκπληρώνω τους στόχους μου και να πραγματοποιώ τα όνειρά μου, δεν θα μπορούσα να αφιερώσω σε κάποιον άλλο αυτή τη διδακτορική διατριβή, παρά σ' εκείνη.

**ΤΙΤΛΟΣ:ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΡΟΧΟΥ-ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΕΠ' ΑΥΤΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΥΜΠΕΡΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Heinrich Hertz και σύμφωνα με τη θεωρία του η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων έχει τη μορφή έλλειψης. Ωστόσο, νεότερες έρευνες έδειξαν ότι η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς δεν είναι ελλειπτική. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία μαθηματική μέθοδος για τον προσδιορισμό της μορφής και του μεγέθους της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής. Η μέθοδος βασίζεται στα γεωμετρικά και αριθμητικά στοιχεία των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς, καθώς και στη διείσδυση των δύο σωμάτων στη θέση επαφής. Η εφαρμογή της έγινε στο σύνηθες ζεύγος τροχού διατομής S1002-σιδηροτροχιάς διατομής 60E1(UIC60), για διάφορες τιμές εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα ως προς την κατεύθυνση κίνησης. Προκειμένου να επιβεβαιωθούν πειραματικά οι θεωρητικά υπολογιζόμενες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τιμές διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς υπό τη δράση στατικού φορτίου, διεξήχθη πείραμα σε φυσική κλίμακα στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. Τέλος, υπολογίσθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις επί της επιφάνειας επαφής.

Λέξεις κλειδιά: επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς, σημεία επαφής, γεωμετρία επαφής, επιφάνεια επαφής, διείσδυση, τάσεις επαφής.

**TITLE: INVESTIGATION OF THE WHEEL-RAIL INTERFACE AND THE
DEVELOPING CONTACT STRESSES**

SUPERVISOR: KONSTANTINOS LIBERIS

ABSTRACT

The wheel-rail contact problem was first mentioned by Heinrich Hertz and his theory led to an elliptical contact surface between the two bodies. However, according to recent researches the wheel-rail contact surface is not elliptical. In this dissertation a mathematical method for determining the shape and the size of the non-elliptical contact surface is proposed. The method is based on the geometric and mathematic characteristics of the wheel-rail profiles, as well as on the penetration of the two bodies at the contact point. The method was applied to the usual pair of an S1002 wheel profile and a 60E1(UIC60) rail profile and was performed for several values of lateral displacement of the wheelset axis relative to the direction of motion. In order to confirm experimentally the theoretically calculated penetration values found in the international literature, referring to a wheel-rail pair under static load, an experiment in real scale was carried out at the Laboratory for Testing and Materials of School of Applied Mathematical and Physical Science of NTUA. Finally, the developing stresses at the wheel-rail contact surface were calculated.

Key words: wheel-rail contact, points of contact, contact geometry, contact surface, penetration, contact stresses.

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γεωμετρία της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά την κύλιση του σιδηροδρομικού οχήματος απασχόλησαν τους ερευνητές σχεδόν ταυτόχρονα με την εμφάνιση του σιδηρόδρομου. Ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα πολλοί μηχανικοί και ερευνητές ασχολήθηκαν με το θέμα της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Σύμφωνα με νεότερες έρευνες η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς δεν είναι ελλειπτική όπως αρχικά είχε υποθέσει ο Hertz. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία μαθηματική μέθοδος για τον προσδιορισμό, ως προς τη μορφή και το μέγεθος, της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Η μέθοδος βασίζεται στα γεωμετρικά και αριθμητικά στοιχεία των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς, καθώς και στη διείσδυση των δύο σωμάτων στη θέση επαφής.

Μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς επέρχεται ελαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια επαφής τους. Αν θεωρηθεί το σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς σε τομή, υπάρχει μία συγκεκριμένη θέση στην οποία αφενός δεν υπάρχει ακόμα ελαστική επαφή, αφετέρου, υπάρχει ένα κοινό σημείο επαφής μεταξύ τους. Σ' αυτό το σημείο, τα εφαπτομενικά επίπεδα των δύο μη-παραμορφωμένων σωμάτων συμπίπτουν. Σε μία απολύτως γεωμετρική επίλυση του προβλήματος, η θέση του σημείου επαφής εξαρτάται από τη σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, τις διατομές τους, καθώς και τη γωνία στροφής (παρέκκλισης) του τροχοφόρου άξονα ως προς τον κατακόρυφο άξονα της γραμμής, η οποία στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή δεν λήφθηκε υπόψη.

Αρχικά υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς για την απεικόνισή της στο καρτεσιανό επίπεδο. Η κεφαλή των ευρέως χρησιμοποιούμενων σιδηροτροχιών τύπου Vignole αποτελείται από τόξα κύκλων τριών διαφορετικών ακτίνων. Ο υπολογισμός βασίζεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς, στη χρήση πολικών συντεταγμένων και στη θεωρία των κωνικών τομών, ώστε να προκύψουν οι καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων και των άκρων των αντίστοιχων κυκλικών τόξων που απαρτίζουν την κεφαλή. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά δεδομένα που αφορούν σε σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60), αλλά η μέθοδος μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να γενικευθεί για οποιαδήποτε σιδηροτροχιά παρόμοιας διατομής (προφίλ).

Ακολουθεί ο υπολογισμός των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς για την περίπτωση κεντρωμένου τροχοφόρου άξονα στη γραμμή, καθώς και για εγκάρσια μετατόπιση αυτού κατά 5mm εκατέρωθεν αυτής της θέσης, με βήμα 1mm. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε τροχό διατομής S1002, κύριας ακτίνας κύλισης 420mm και σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60), τοποθετημένης με κλίση 1:40 ως προς την κατακόρυφο. Το σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς τοποθετήθηκε στη συνήθους εύρους γραμμή των 1435mm. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού της θέσης των σημείων επαφής συμφωνούν με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στη συνέχεια, για κάθε σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, υπολογίζεται η επιφάνεια επαφής που δημιουργείται γύρω από το σημείο επαφής με δεδομένη την τιμή της διείσδυσης των δύο σωμάτων. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η μέγιστη τιμή διείσδυσης κυμαίνεται στην περιοχή των 0.10mm (± 0.02 mm) και προκύπτει θεωρητικά. Ως εκ τούτου ο υπολογισμός της επιφάνειας επαφής έγινε σε κάθε θέση εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα για τιμές διείσδυσης από 0.01mm έως 0.10mm με βήμα 0.01mm. Με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή προσδιορίζεται η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης που περιγράφει το περίγραμμα της επιφάνειας επαφής και εξ' αυτής υπολογίζεται το ακριβές της μέγεθος.

Προκειμένου όμως να επιβεβαιωθούν πειραματικά οι θεωρητικά υπολογιζόμενες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τιμές διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς και να υπολογισθεί η ακριβής τιμή της διείσδυσης για διάφορες τιμές φόρτισης και για διάφορες σχετικές θέσεις μεταξύ των δύο σωμάτων πραγματοποιήθηκε πείραμα σε φυσική κλίμακα, με στατική αξονική καταπόνηση σιδηροδρομικού τροχού επί τμήματος σιδηροτροχιάς σε πλάκα έδρασης. Το πείραμα διεξήχθη στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. του Ε.Μ.Π. Στην πραγματοποίηση του πειράματος συνέδραμαν οι ακόλουθοι σιδηροδρομικοί οργανισμοί:

- ΟΣΕ: Ο τροχός που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία διατέθηκε για το χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση του πειράματος.
- ΗΣΑΠ: Η διάταξη στήριξης-φόρτισης του συστήματος άξονας-τροχός κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο που βρίσκεται στο εργοστάσιο των ΗΣΑΠ. Εκτός αυτής της κατασκευής από τους ΗΣΑΠ διατέθηκε και τμήμα τροχοφόρου άξονα.

Ο τροχός και η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκαν εντός μηχανικής πρέσσας δοκιμών και με κάμερες υψηλής ευκρίνειας (μετρητικό σύστημα Q-400) αποτυπώθηκαν χρωματικά οι μικρομετακινήσεις των δύο σωμάτων. Ο τροχός υποστηρίχθηκε μέσω της ειδικής διάταξης που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για το εν λόγω πείραμα. Η διαδικασία φόρτισης επαναλήφθηκε για διάφορες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά και για μέγιστη τιμή φορτίου 100kN, που είναι το μέγιστο φορτίο τροχού. Η λήψη των στοιχείων των καμερών έγινε με βήμα 10kN μέσω του ειδικού λογισμικού ISTRΑ 4D. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν βελομέτρα σε χαρακτηριστικές θέσεις της πειραματικής διάταξης, ώστε να παρακολουθείται η κίνησή του.

Ακολούθησε η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, ήτοι: των αποτελεσμάτων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας, των στοιχείων των βελομέτρων και των μετρήσεων του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας. Η επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας έγινε με το λογισμικό ISTRΑ 4D. Για την επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων χρησιμοποιήθηκαν οι ψηφιακές φωτογραφίες των ενδείξεών τους. Οι μετρήσεις του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας ελήφθησαν από την κάρτα μνήμης της συσκευής. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους, όπου ήταν εφικτό, προκειμένου να επαληθευθεί η ορθότητα των μετρήσεων και συνδυάστηκαν έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος αλληλεπίδρασης τροχού και σιδηροτροχιάς, υπό την επιβολή στατικού φορτίου στις διάφορες μεταξύ τους θέσεις.

Ακολούθως, με κατάλληλους υπολογισμούς, προέκυψαν για κάθε θέση και κάθε φορτίο οι τιμές της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς με βάση τα εξαγόμενα πειραματικά αποτελέσματα. Οι πειραματικές τιμές της διείσδυσης ανά θέση και φορτίο συγκρίθηκαν με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές της διεθνούς βιβλιογραφίας, οι οποίες προκύπτουν στην περίπτωση στατικής φόρτισης και για κωνική διατομή τροχού. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενων τιμών δεν ξεπερνά το 5% και εμφανίζεται για τιμές φορτίου έως 30kN, γεγονός που δικαιολογείται δεδομένης της ασταθούς συμπεριφοράς του τροχού στα πρώτα στάδια της φόρτισης, όπως περιγράφεται αναλυτικά σε αντίστοιχο κεφάλαιο της διατριβής.

Στο τέλος της διατριβής υπολογίζονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Θεωρώντας ότι το φορτίο δρα κατακόρυφα στο σημείο επαφής και η επιφάνεια που δημιουργείται είναι παράλληλη προς το

οριζόντιο επίπεδο, οι υπολογισμοί αφορούν στις ορθές τάσεις. Τα αποτελέσματα για κάθε σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς συγκρίθηκαν με τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην περίπτωση ελλειπτικής επιφάνειας επαφής, καθώς αυτές που προκύπτουν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων NON-HERTZ. Οι υπολογισθείσες τιμές της μέγιστης ορθής τάσης συμπίπτουν με τις προκύπτουσες από την εφαρμογή της θεωρίας της ελλειπτικής επιφάνειας κατά Hertz, καθώς σχεδόν σε όλες τις σχετικές θέσεις μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς η διαφορά τους δεν υπερβαίνει το 4%. Σε σχέση με τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων, στις περισσότερες σχετικές θέσεις μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς η απόκλιση μεταξύ των τιμών των μέγιστων ορθών τάσεων φθάνει οριακά το 8%.

Συμβολή της διδακτορικής διατριβής

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτάθηκε μία μέθοδος υπολογισμού της μορφής και του μεγέθους της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς, η οποία βασίζεται κατ'εξοχήν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις μαθηματικές εκφράσεις των διατομών των δύο σωμάτων, καθώς και στη μεταξύ τους διεύθυνση στο σημείο επαφής.

Οι τιμές της διεύθυνσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς προέκυψαν ύστερα από διεξαγωγή πειράματος, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν θεωρητικές σχέσεις για τον υπολογισμό της. Το πείραμα διεξήχθη μεν για ένα μόνο ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς, γεγονός που καθιστά το δείγμα μικρό, αλλά η διαδικασία φόρτισης διεξήχθη για έξι σχετικές θέσεις μεταξύ των δύο σωμάτων και ως εκ τούτου τα εξογόμενα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή.

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί και να γενικευθεί για ζεύγη τροχού-σιδηροτροχιάς διαφόρων διατομών. Επίσης μπορεί να υλοποιηθεί με απλά λογισμικά λογιστικά φύλλα, ώστε να αποφευχθεί ενδεχομένως το υψηλό κόστος αγοράς ειδικών λογισμικών πακέτων. Οι προκύπτουσες μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν το περίγραμμα των επιφανειών επαφής μπορούν να εισαχθούν σε μοντέλα προσομοίωσης. Η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι αποδεκτή σε σύγκριση με άλλων πιο πολύπλοκων και χρονοβόρων μεθόδων υπολογισμού. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στάδιο προμελέτης για μία αρχική, ταχεία εκτίμηση της πραγματικής μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής και των αναπτυσσόμενων τάσεων επ'αυτής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΚΕΦ.1	Εισαγωγή	1
ΚΕΦ.2	Ορισμός, συνιστώσες και ιστορική εξέλιξη του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφορών.....	6
2.1	Ορισμός της έννοιας του σιδηροδρόμου	6
2.2	Συνιστώσες του σιδηροδρομικού συστήματος.....	6
2.3	Ιστορική εξέλιξη του σιδηροδρομικού συστήματος	8
2.4	16ος - 17ος - 18ος αιώνας	9
2.5	19ος - 20ος - 21ος αιώνας	10
2.6	Η εξέλιξη στον ελλαδικό χώρο	12
ΚΕΦ.3	Περιγραφή του συστήματος και της θεωρίας κύλισης	16
3.1	Μεταβίβαση φορτίων κυκλοφορίας	16
3.2	Ο σιδηροδρομικός τροχός	17
3.3	Η σιδηροτροχιά	20
3.4	Η κυματοειδής κίνηση.....	22
3.5	Η ισοδύναμη κωνικότητα.....	25
ΚΕΦ.4	Ερευνητικά πορίσματα σχετικά με την επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς	27
4.1	19ος αιώνας: Από τον Stephenson στον Boedeker	27
4.2	20ος αιώνας: Από τον Carter στον Kalker	33
4.3	Σύγχρονες προσεγγίσεις και υπολογιστικές μέθοδοι	38

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΚΕΦ.5	Απεικόνιση σιδηροτροχιάς σε καρτεσιανό επίπεδο	41
5.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιάς διατομής 60E1 (UIC60)	41
5.2	Ορισμός συστήματος συντεταγμένων και χαρακτηριστικών σημείων	42

5.3	Υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων.....	43
ΚΕΦ.6	Προσδιορισμός σημειακής επαφής μεταξύ τροχού – σιδηροτροχιάς.....	50
6.1	Περιγραφή μεθόδου υπολογισμού σημειακής επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς.....	50
6.2	Μαθηματική περιγραφή της διατομής του τροχού S1002 και ορισμός συστήματος συντεταγμένων.....	54
6.3	Τοποθέτηση της σιδηροτροχιάς ως προς την αρχή του συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων.....	56
6.4	Εντοπισμός και απεικόνιση σημείων επαφής.....	60
ΚΕΦ.7	Προσδιορισμός επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς.....	68
7.1	Περιγραφή μεθόδου υπολογισμού.....	68
7.2	Εφαρμογή της μεθόδου σε ζεύγος.....	71
7.3	Αριθμητικά αποτελέσματα για το ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς: S1002-60E1 (1:40).....	73
ΜΕΡΟΣ Γ΄		
ΚΕΦ.8	Πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της διείδυσης μεταξύ τροχού - σιδηροτροχιάς.....	83
8.1	Εμπλεκόμενοι φορείς και εργαστήρια.....	84
8.2	Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης σε προκαταρκτικό στάδιο.....	87
8.3	Τελικός σχεδιασμός και κατασκευή πειραματικής διάταξης.....	90
8.4	Μεταφορά, συναρμολόγηση και ανύψωση των τεμαχίων της πειραματικής διάταξης.....	113
8.5	Προετοιμασία διεξαγωγής πειράματος.....	128
8.6	Διεξαγωγή πειράματος.....	136
ΚΕΦ.9	Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων.....	142
9.1	Επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400.....	142

9.2	Επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων.....	158
9.3	Επεξεργασία των στοιχείων του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας	163
ΜΕΡΟΣ Δ΄		
ΚΕΦ.10	Αποτελέσματα	166
10.1	Υπολογισμός διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς	166
10.2	Υπολογισμός αναπτυσσόμενων τάσεων στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς	173
ΚΕΦ.11	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	184
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....		186
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1		190
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2		197
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3		201
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4		223
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5		243

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σύστημα σιδηροδρομικού άξονα – σιδηροτροχιάς	6
Σχήμα 2.2: Τυπική σιδηροδρομική γραμμή – Οδός μεταφοράς	7
Σχήμα 3.1: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού οχήματος	16
Σχήμα 3.2: Κατανομή φορτίων κυκλοφορίας	17
Σχήμα 3.3: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού τροχού	18
Σχήμα 3.4: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού άξονα	18
Σχήμα 3.5: Διατομή τροχού 1:40/1:20 και τροχού DB II Γερμανικών Σιδηοδρόμων	19
Σχήμα 3.6: Σιδηροτροχιές ανεστραμμένου U και σιδηροτροχιά με λαιμό	21
Σχήμα 3.7: Σιδηροτροχιά τύπου Vignole	21
Σχήμα 3.8: Σιδηροτροχιές τύπου Vignole, διατομής S49, UIC54 και UIC60	22
Σχήμα 3.9: Διατομή τροχού, σιδηροτροχιάς	22
Σχήμα 3.10: Απόσταση ίχνους και εύρος γραμμής	23
Σχήμα 3.11: Οφιοειδής κίνηση σιδηροδρομικού άξονα κατά Klingel	23
Σχήμα 3.12: Ακτίνες κύλισης r_1, r_2 σιδηροδρομικού άξονα για εγκάρσια μετατόπιση του άξονα κατά Δy	25
Σχήμα 4.1: Μοντέλο μηχανικής επαφής Redtenbacher	29
Σχήμα 4.2: Ακτίνες καμπυλότητας τροχού/σιδηροτροχιάς – θεωρία Hertz	30
Σχήμα 4.3: Ημιτονοειδής κίνηση ενός μεμονωμένου σιδηροδρομικού άξονα με κωνική διατομή τροχών	31
Σχήμα 4.4: Μη γραμμική ασταθής κυματοειδής κίνηση του μπροστινού άξονα σε διαξονικό φορείο	33
Σχήμα 4.5: Εφαπτομενική κατανομή των τάσεων στην περιοχή επαφής που προκύπτει κατά την κύλιση κυλίνδρου επί επιπέδου	34
Σχήμα 4.6: Δύναμη ερπυσμού για δισδιάστατη επαφή	34
Σχήμα 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιάς διατομής 60E1 (UIC60)	41
Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικά σημεία σιδηροτροχιάς 60E1 (UIC60)	43
Σχήμα 5.3: Υπολογισμός συντεταγμένων T300,80 και T'300,80	44
Σχήμα 5.4: Υπολογισμός συντεταγμένων K80 και K'80	45
Σχήμα 5.5: Υπολογισμός K13 ως κοινό σημείο τομής κύκλων	46
Σχήμα 5.6: Υπολογισμός συντεταγμένων του T80,13 συναρτήσει των K80 και K13	47
Σχήμα 6.1: Σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα	51
Σχήμα 6.2: Βήματα υπολογισμού σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς	53
Σχήμα 6.3: Διατομή τροχού S1002	54
Σχήμα 6.4: Αρχή συστήματος συντεταγμένων	56
Σχήμα 6.5: Δεσμευτικά γεωμετρικά σημεία	57
Σχήμα 6.6: Θέση σιδηροτροχιάς ως προς το οριζόμενο σύστημα συντεταγμένων	57
Σχήμα 6.7: Σχετική θέση τροχού-σιδηροτροχιάς σύμφωνα με το πρόγραμμα NON-HERTZ	58
Σχήμα 6.8: Γωνία στροφής φ τροχοφόρου άξονα λόγω διαφοράς ακτίνων κύλισης	63

Σχήμα 6.9: Η γεωμετρία της σιδηροτροχιάς 60E1 (SolidWorks Simulation)	64
Σχήμα 6.10: Η γεωμετρία του τροχού S1002 (SolidWorks Simulation)	64
Σχήμα 6.11: Συναρμολόγημα στην αρχική θέση-τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή	65
Σχήμα 6.12: Δήλωση συνθήκης διαρκούς επαφής μεταξύ αριστερού τροχού και συνεργαζόμενης τροχιάς	65
Σχήμα 6.13: Συναρμολόγημα στην τελική θέση ($y=8\text{mm}$)	66
Σχήμα 7.1: Σημείο επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και εγκάρσια διάσταση επιφάνειας επαφής	69
Σχήμα 7.2: Απεικόνιση συνθήκης υπολογισμού της εγκάρσιας διάστασης της επιφάνειας επαφής	70
Σχήμα 7.3: Υπολογισμός περιγράμματος επιφάνειας επαφής στη διαμήκη διεύθυνση	70
Σχήμα 8.1: Κάτοψη πλάκας στερέωσης δοκιμίου (βάση πρέσσας) με προσαρτημένη την προτεινόμενη διάταξη στήριξης-φόρτισης	89
Σχήμα 8.2: Τομή πλάκας στερέωσης δοκιμίου (βάση πρέσσας) με προσαρτημένη την προτεινόμενη διάταξη στήριξης-φόρτισης (θέση AA')	89
Σχήμα 8.3: Τεμάχια πειραματικής διάταξης	90
Σχήμα 8.4: Απεικόνιση τροχού	91
Σχήμα 8.5: Απεικόνιση τροχοφόρου άξονα	91
Σχήμα 8.6: Απεικόνιση διάταξης προσάρτισης τροχοφόρου άξονα	92
Σχήμα 8.7: Απεικόνιση πλαϊνού σφικτήρα τροχοφόρου άξονα	93
Σχήμα 8.8: Τεμάχια φορέα φόρτισης	94
Σχήμα 8.9: Απεικόνιση τεμαχίου υποδοχής τροχοφόρου άξονα	94
Σχήμα 8.10: Απεικόνιση πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	95
Σχήμα 8.11: Απεικόνιση επάνω πλάκας φορέα φόρτισης	95
Σχήμα 8.12: Απεικόνιση μεσαίου ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	96
Σχήμα 8.13: Απεικόνιση δεξιού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	97
Σχήμα 8.14: Απεικόνιση έδρανου	97
Σχήμα 8.15: Απεικόνιση αριστερού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	98
Σχήμα 8.16: Απεικόνιση φορέα φόρτισης σε κάτοψη, πλάγια όψη και τομή	99
Σχήμα 8.17: Τεμάχια φορέα στήριξης	100
Σχήμα 8.18: Απεικόνιση προέκτασης φορέα στήριξης	101
Σχήμα 8.19: Απεικόνιση προσθήκης φορέα στήριξης	102
Σχήμα 8.20: Απεικόνιση κολόνας φορέα στήριξης	102
Σχήμα 8.21: Απεικόνιση βάσης φορέα στήριξης	102
Σχήμα 8.22: Απεικόνιση πλάκας στερέωσης δοκιμίου και διαθέσιμων οπών	104
Σχήμα 8.23: Σύστημα συντεταγμένων θεωρητικών υπολογισμών	128
Σχήμα 9.1: Σημεία επαφής τροχού-σιδ/χιάς στις τελικές πειραματικές θέσεις	157
Σχήμα 10.1: Στροφή τροχού ως προς τον κατακόρυφο άξονα	167
Σχήμα 10.2: Όμοια τρίγωνα ως προς το κέντρο στροφής	167
Σχήμα 10.3: Υπολογισμός h στροφής	168

Σχήμα 10.4: Κατακόρυφη τομή της συσκευής βραζιλιανής δοκιμής και πραγματική (κυκλική) κατανομή του φορτίου κατά μήκος του μήκους επαφής	173
Σχήμα 10.5: Αντιπαράθεση της πραγματικής (κυκλικής) κατανομής του φορτίου και της ισοδύναμης παραβολικής	174
Σχήμα 10.6: Σχηματική απεικόνιση των τύπων φόρτισης του δίσκου	174
Σχήμα 10.7: Σχηματική απεικόνιση των ορθών τάσεων και των εφαπτομενικών τάσεων λόγω τριβής κατά μήκος του τόξου επαφής	175
Σχήμα 10.8: Επαφή δύο στερεών σύμφωνα με τον Hertz (γενική περίπτωση)	176
Σχήμα 10.9: Ακτίνες καμπυλότητας στα επίπεδα καμπυλότητας x και y	177
Σχήμα 10.10: Υπολογισμός καμπυλότητας τροχού στον άξονα y	178
Σχήμα 10.11: Ακτίνες καμπυλότητας τροχού-σιδηροτροχιάς στα επίπεδα καμπυλότητας x και y	178

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Δυτικό άκρο Διόλκου (Κορινθιακός κόλπος)	8
Εικόνα 2.2: Χερσαία μεταφορά με χρήση ζώων	9
Εικόνα 2.3: Ιππήλατα οχήματα μεταφοράς φορτίου	9
Εικόνα 2.4: Σιδηροδρομική γραμμή Stockton-Darlington	11
Εικόνα 2.5: Γέφυρα διαδρομής Αθήνα-Λάρισα	13
Εικόνα 2.6: Σταθμός Ανατολικών Σιδηροδρόμων Θεσ/νίκης	13
Εικόνα 2.7: Εταιρεία ΣΠΑΠ και σιδηροδρομικό δίκτυο	14
Εικόνα 2.8: Η αμαξοστοιχία Simplon Orient Express (Αθήνα-Παρίσι) διασχίζει τη γέφυρα του Γοργοποτάμου	14
Εικόνα 2.9: Η αμαξοστοιχία Intercity στη γέφυρα του Μπράλου	15
Εικόνα 8.1: Πρέσσα Instron Model 1126	84
Εικόνα 8.2: Πλάκα στερέωσης δοκιμίου	85
Εικόνα 8.3: Τροχός ORE S1002	85
Εικόνα 8.4: Σιδηροτροχιά διατομής UIC60 και πλάκα έδρασης κλίσης 1:40	87
Εικόνα 8.5: Χειροκίνητο παλετοφόρο οριζόντιας μεταφοράς	87
Εικόνα 8.6: Τορνάρισμα εξωτερικής διαμέτρου του τροχοφόρου άξονα	92
Εικόνα 8.7: Τροχός, τροχοφόρος άξονας, «δαχτυλίδι» και φορέας φόρτισης	92
Εικόνα 8.8: Τροχοφόρος άξονας, πλαϊνοί σφικτήρες και φορέας φόρτισης	93
Εικόνα 8.9: Τροχοφόρος άξονας και τεμάχια υποδοχής αυτού	95
Εικόνα 8.10: Τρόχισμα συγκολλήσεων επάνω πλάκας φορέα φόρτισης	96
Εικόνα 8.11: Συγκόλληση μεσαίου ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	96
Εικόνα 8.12: Συγκόλληση δεξιού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης	97
Εικόνα 8.13: Φορέας φόρτισης με ενισχυτικά και έδρανο	98
Εικόνα 8.14: Πλαϊνή πλάκα φόρτισης με αριστερό και δεξί ενισχυτικό	99
Εικόνα 8.15: Φορέας φόρτισης και τροχοφόρος άξονας με πλαϊνό σφικτήρα	99
Εικόνα 8.16: Φορέας φόρτισης (επάνω και πλαϊνή πλάκα με ενισχυτικά και έδρανο)	100
Εικόνα 8.17: Φορέας στήριξης	101
Εικόνα 8.18: Κατασκευή προέκτασης φορέα στήριξης	101
Εικόνα 8.19: Κατασκευή βάσης φορέα στήριξης	103
Εικόνα 8.20: Επάλλειψη τεμαχίων με αστάρι	103
Εικόνα 8.21: Μέτρηση της διαμέτρου των οπών της πλάκας στερέωσης δοκιμίου	104
Εικόνα 8.22: Μέτρηση αποστάσεων μεταξύ των οπών της πλάκας στερέωσης δοκιμίου	104
Εικόνα 8.23: Μέτρηση διαμέτρου κοχλία	105
Εικόνα 8.24: Κατασκευή σφικτήρα πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς	105
Εικόνα 8.25: Σφικτήρας πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς	106
Εικόνα 8.26: Τοποθέτηση σφικτήρα πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς	106
Εικόνα 8.27: Μεταλλικά τεμάχια ρύθμισης ύψους σφικτήρων	106

Εικόνα 8.28: Κοχλίες και κλειδιά τύπου Άλλεν	107
Εικόνα 8.29: Βλήτρα με κρίκο (μάπες) και ιμάντας	107
Εικόνα 8.30: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού	108
Εικόνα 8.31α: Προετοιμασία ανύψωσης τροχού-άξονα-φορέα φόρτισης	108
Εικόνα 8.31β: Τοποθέτηση πειραματικής διάταξης στην πρέσσα	108
Εικόνα 8.32: Απομάκρυνση πειραματικής διάταξης από την πρέσσα	109
Εικόνα 8.33: Γυαλόχαρτα	109
Εικόνα 8.34: Λείανση πλάκας στερέωσης δοκιμίων	109
Εικόνα 8.35: Αφαίρεση οξειδωσης της επιφάνειας κύλισης	110
Εικόνα 8.36: Επάλειψη επιφάνειας κύλισης με γράσο	110
Εικόνα 8.37: Υδραυλικοί γρύλοι ανύψωσης	111
Εικόνα 8.38: Τοπογραφικά όργανα (θεοδόλιχος-ταχύμετρο)	111
Εικόνα 8.39: Αυτοκόλλητη μαγνητική ταινία	112
Εικόνα 8.40: Φορητός γερανός δαπέδου	112
Εικόνα 8.41: Παλάγκο γερανογέφυρας	114
Εικόνα 8.42: Φορτοεκφόρτωση τροχού	114
Εικόνα 8.43: Παλέτα μεταφοράς τροχού	115
Εικόνα 8.44: Μεταφορά τροχού στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος	115
Εικόνα 8.45: Διαχείριση τροχού στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος	116
Εικόνα 8.46: Εκφόρτωση φορέα φόρτισης	116
Εικόνα 8.47: Μεταφορά φορέα φόρτισης και ορθοστατών	116
Εικόνα 8.48: Διαχείριση φορέα φόρτισης στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος	117
Εικόνα 8.49: Τοποθέτηση τροχού εντός του φορέα φόρτισης	117
Εικόνα 8.50: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού	118
Εικόνα 8.51: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού	118
Εικόνα 8.52: Τοποθέτηση σφικτήρων τροχοφόρου άξονα	119
Εικόνα 8.53: Καθαρισμός οπών επάνω πλάκας φορέα φόρτισης με σπειροτόμο	119
Εικόνα 8.54: Καθαρισμός οπών επάνω πλάκας φορέα φόρτισης με αέρα	119
Εικόνα 8.55: Τοποθέτηση ιμάντα ανύψωσης στον φορέα φόρτισης	120
Εικόνα 8.56: Ανύψωση συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης	120
Εικόνα 8.57: Μεταφορά συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης	121
Εικόνα 8.58: Τοποθέτηση πρώτου ορθοστάτη στο έδρανο του φορέα φόρτισης	121
Εικόνα 8.59: Στερέωση πρώτου ορθοστάτη στην πλάκα στερέωση δοκιμίων	122
Εικόνα 8.60: Προσωρινή στερέωση δεύτερου ορθοστάτη και αλλαγή θέσης γερανού	122
Εικόνα 8.61: Στροφή του συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης	123
Εικόνα 8.62: Οριστική στερέωση δεύτερου ορθοστάτη	123
Εικόνα 8.63: Τοποθέτηση σιδηροτροχιάς-πλάκας έδρασης	124

Εικόνα 8.64: Τοποθέτηση γρύλου κάτω από το τεμάχιο υποδοχής του τροχοφόρου άξονα του φορέα φόρτισης	124
Εικόνα 8.65: Ανύψωση φορέα φόρτισης για τοποθέτηση σιδηροτροχιάς	125
Εικόνα 8.66: Επί τόπου διορθωτική επέμβαση στον φορέα στήριξης	125
Εικόνα 8.67: Επί τόπου διορθωτική επέμβαση στον φορέα στήριξης	126
Εικόνα 8.68: Πειραματική διάταξη εντός της πρέσσας	126
Εικόνα 8.69: Διάταξη ανύψωσης τροχού με γρύλους ανύψωσης	127
Εικόνα 8.70: Θέση γρύλων ανύψωσης και κοιλοδοκών	127
Εικόνα 8.71: Αποτύπωση κεφαλής σιδηροτροχιάς και χαρακτηριστικών σημείων	128
Εικόνα 8.72: Τοποθέτηση αυτοκόλλητης μαγνητικής ταινίας επί του τροχού	129
Εικόνα 8.73: Αρχικός καθορισμός θέσης τροχού-σιδηροτροχιάς	130
Εικόνα 8.74: Τελικός καθορισμός θέσης τροχού-σιδηροτροχιάς	130
Εικόνα 8.75: Βαφή δοκιμίων με σπρέι ψεκασμού	133
Εικόνα 8.76: Δημιουργία στιγμάτων στις υπό διερεύνηση επιφάνειες	132
Εικόνα 8.77: Κάμερες υψηλής ευκρίνειας CCD	133
Εικόνα 8.78: Βαθμονομημένο σύστημα καμερών-προβολέων	133
Εικόνα 8.79: Η/Υ καταγραφής και αποθήκευσης πειραματικών μετρήσεων	134
Εικόνα 8.80: Σύνδεση καμερών με φορητό Η/Υ	134
Εικόνα 8.81: Καταγραφέας δεδομένων πρέσσας	135
Εικόνα 8.82: Άποψη χώρου διεξαγωγής του πειράματος	135
Εικόνα 8.83: Κονσόλα χειρισμού πρέσσας	136
Εικόνα 8.84: Οθόνη κονσόλα χειρισμού πρέσσας	136
Εικόνα 8.85: Αποτύπωση της υπό διερεύνηση περιοχής σε ψηφιακές εικόνες	137
Εικόνα 8.86: Θέσεις βελομέτρων	138
Εικόνα 8.87: Λεπτομέρεια τοποθέτησης βελομέτρων	138
Εικόνα 8.88: Λήψη των ενδείξεων των βελομέτρων	139
Εικόνα 8.89: Σφαιρική άρθρωση μεταξύ εμβόλου φόρτισης και φορέα φόρτισης	140
Εικόνα 8.90: Εύρεση κέντρου επάνω πλάκας φορέα φόρτισης	140
Εικόνα 8.91: Τοποθέτηση πλάκας μεταξύ εμβόλου φόρτισης και σφαιρικής άρθρωσης	140
Εικόνα 8.92: Τελική διάταξη επιβολής φορτίου	141
Εικόνα 8.93: Φύλλα καρμπόν μεταξύ των δοκιμίων για λήψη αποτυπώματος	141
Εικόνα 8.94: Αποτύπωμα μεταξύ των δοκιμίων σε φύλλο καρμπόν	141
Εικόνα 9.1: Επιλογή υποφακέλου με μετρητικά δεδομένα της κάθε θέσης	143
Εικόνα 9.2: έναρξη διαδικασίας επεξεργασίας δεδομένων	143
Εικόνα 9.3: Ορισμός παραμέτρων βαθμονόμησης καμερών	144
Εικόνα 9.4: Εικόνες δοκιμίων από τις δύο κάμερες	144
Εικόνα 9.5: Ορισμός της εικόνας σε κατάσταση προφόρτισης ως εικόνας αναφοράς	145
Εικόνα 9.6: Καθορισμός υπό διερεύνηση περιοχών με χρήση πολυγωνικής γραμμής	145

Εικόνα 9.7: Ορισμός των υπό παρακολούθηση στιγμάτων επί των δοκιμίων	145
Εικόνα 9.8: Εντοπισμός υπό παρακολούθηση στιγμάτων στις δύο κάμερες	146
Εικόνα 9.9: Καθορισμός συστήματος συντεταγμένων	146
Εικόνα 9.10: Καθορισμός άξονα x	147
Εικόνα 9.11: Ορισμός πολυγωνικών γραμμών στα άκρα των επιφανειών διερεύνησης	153
Εικόνα 9.12: Τοποθέτηση βελομέτρων	158
Εικόνα 9.13: Ενδείξεις βελομέτρων στη θέση ‘Position 4’	159

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 6.1: Απεικόνιση δεξιού τροχού διατομής S1002	55
Διάγραμμα 6.2: Απεικόνιση αριστερού τροχού διατομής S1002	55
Διάγραμμα 6.3: Απεικόνιση κεφαλής δεξιάς σιδηροτροχιάς διατομής 60E1, 1:40	59
Διάγραμμα 6.4: Απεικόνιση κεφαλής αριστερής σιδηροτροχιάς διατομής 60E1, 1:40	59
Διάγραμμα 6.5: Απεικόνιση τροχού S1002-σιδηροτροχιάς 60E1 (1:40), δεξιά	59
Διάγραμμα 6.6: Απεικόνιση τροχού S1002-σιδηροτροχιάς 60E1 (1:40), αριστερά	60
Διάγραμμα 6.7: Απεικόνιση σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (δεξιά)	61
Διάγραμμα 6.8: Απεικόνιση σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (αριστερά)	61
Διάγραμμα 6.9: Σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς συναρτήσει της εγκάρσια μετατόπισης σύμφωνα με το πρόγραμμα NON-HERTZ	62
Διάγραμμα 6.10: Διαφορά ακτίνων κύλισης συναρτήσει της εγκάρσιας μετατόπισης	63
Διάγραμμα 6.11: Οριζόντια μετατόπιση του κεντροειδούς του συναρμολογήματος	66
Διάγραμμα 6.12: Γωνία στροφής του τροχοφόρου άξονα στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του συναρμολογήματος και ως προς την εγκάρσια διεύθυνση	66
Διάγραμμα 7.1: Εύρος α σημείων όπου $dz_{ri}-dz_{wi} = 0.03\text{mm}$	71
Διάγραμμα 7.2: Βέλη κάμψης περιφερειών εκατέρωθεν του σημείου επαφής σε μήκος α	72
Διάγραμμα 7.3: Γραμμή τάσης και μαθηματική έκφραση αυτής	72
Διάγραμμα 7.4: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +5 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	77
Διάγραμμα 7.5: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +4 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	77
Διάγραμμα 7.6: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +3 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	77
Διάγραμμα 7.7: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +2 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	78
Διάγραμμα 7.8: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +1 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	78
Διάγραμμα 7.9: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = 0 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	78
Διάγραμμα 7.10: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -1 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς	79

Διάγραμμα 7.11: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -2$ mm, συναρτήσει της διεύθυνσης τροχού-σιδ/χιάς	79
Διάγραμμα 7.12: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -3$ mm, συναρτήσει της διεύθυνσης τροχού-σιδ/χιάς	79
Διάγραμμα 7.13: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -4$ mm, συναρτήσει της διεύθυνσης τροχού-σιδ/χιάς	80
Διάγραμμα 7.14: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -5$ mm, συναρτήσει της διεύθυνσης τροχού-σιδ/χιάς	80
Διάγραμμα 7.15: Επιφάνειες επαφής συναρτήσει της διεύθυνσης στις υπό διερεύνηση θέσεις (κάτοψη κεφαλής δεξιάς σιδηροτροχιάς)	81
Διάγραμμα 7.16: Επιφάνειες επαφής στα αντίστοιχα σημεία επαφής (S1002-60E1, 1:40)	82
Διάγραμμα 9.1: Μετατόπιση του τροχού κατά y συναρτήσει της φόρτισης	155
Διάγραμμα 9.2: Μετατόπιση του τροχού κατά z συναρτήσει της φόρτισης	156
Διάγραμμα 9.3: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση ‘Position 1’	161
Διάγραμμα 9.4: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση ‘Position 2’	161
Διάγραμμα 9.5: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση ‘Position 3’	161
Διάγραμμα 9.6: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση ‘Position 4’	162
Διάγραμμα 9.7: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση ‘Position 5’	162
Διάγραμμα 9.8: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 1’	164
Διάγραμμα 9.9: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 2’	164
Διάγραμμα 9.10: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 3’	164
Διάγραμμα 9.11: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 4’	165
Διάγραμμα 9.12: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 5’	165
Διάγραμμα 10.1: Τιμές διεύθυνσης συναρτήσει της τιμής φορτίου	170
Διάγραμμα 10.2: Τιμές διεύθυνσης στις σχετικές θέσεις τροχού-σιδηροτροχιάς ανά φορτίο	170
Διάγραμμα 10.3: Σύγκριση θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενης διεύθυνσης ανά θέση και φορτίο	172
Διάγραμμα 10.4: Σύγκριση θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενης διεύθυνσης (μέση τιμή)	172

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1: Καρτεσιανές συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων σιδηροτροχιάς	48
Πίνακας 6.1: Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων σιδηροτροχιάς	58
Πίνακας 6.2: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (δεξιά)	60
Πίνακας 6.3: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (αριστερά)	61
Πίνακας 6.4: Υπολογισμός διαφοράς ακτίνων κύλισης και ισοδύναμης κωνικότητας	62
Πίνακας 7.1: Μέγεθος και μαθηματική έκφραση επιφάνειας επαφής για τις διάφορες θέσεις του τροχοφόρου άξονα, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδηροτροχιάς	73
Πίνακας 9.1: Απεικόνιση μετακινήσεων κατά x, y και z με χρωματοκλίμακα στη θέση 'Position 4'	147
Πίνακας 9.2: Μετατοπίσεις τροχού-σιδηροτροχιάς κατά x,y,z ανά θέση και φορτίο	154
Πίνακας 9.3: Τέλικη εγκάρσια θέση τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά	156
Πίνακας 9.4: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδ/χιάς (πειραματικές θέσεις)	157
Πίνακας 9.5: Μετατοπίσεις βελομέτρων ανά θέση και φορτίο	160
Πίνακας 9.6: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρητικού συστήματος καμερών και βελομέτρων	163
Πίνακας 10.1: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 1'	168
Πίνακας 10.2: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 2'	168
Πίνακας 10.3: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 3'	169
Πίνακας 10.4: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 4'	169
Πίνακας 10.5: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 5'	169
Πίνακας 10.6: Τιμές διείδυσης ανά θέση και φορτίο	170
Πίνακας 10.7: Θεωρητικές τιμές διείδυσης ανά φορτίο	171
Πίνακας 10.8: Ισοδύναμη καμπυλότητα στα σημεία επαφής (τιμές σε mm)	179
Πίνακας 10.9: Μέγιστη ορθή τάση και ποιοτική απεικόνιση κατανομής	180
Πίνακας 10.10: Συγκριτική παράθεση τιμών μέγιστης ορθής τάσης	182

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΚΕΦ.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της εργασίας

Η γεωμετρία της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά την κύλιση του σιδηροδρομικού οχήματος απασχόλησαν τους ερευνητές σχεδόν ταυτόχρονα με την εμφάνιση του σιδηρόδρομου. Ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα πολλοί μηχανικοί και ερευνητές ασχολήθηκαν με το θέμα της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Σύμφωνα με νεότερες έρευνες η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς δεν είναι ελλειπτική όπως αρχικά είχε υποθέσει ο Heinrich Hertz.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία μαθηματική μέθοδος για τον προσδιορισμό, ως προς τη μορφή και το μέγεθος, της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Η μέθοδος βασίζεται στα γεωμετρικά και αριθμητικά στοιχεία των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς, καθώς και στη διεύθυνση των δύο σωμάτων στη θέση επαφής.

Η μέθοδος εφαρμόζεται στο σύνθετες ζεύγος τροχού διατομής S1002-σιδηροτροχιάς διατομής 60E1(UIC60) τοποθετημένης με κλίση 1:40 ως προς την κατακόρυφο, για διάφορες τιμές εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα ως προς την κατεύθυνση κίνησης. Επίσης προσδιορίζεται η διεύθυνση μεταξύ των δύο σωμάτων ύστερα από τη διεξαγωγή πειράματος σε φυσική κλίμακα, με στατική αξονική καταπόνηση σιδηροδρομικού τροχού επί τμήματος σιδηροτροχιάς σε πλάκα έδρασης. Τέλος υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια επαφής.

Μεθοδολογία της εργασίας

Αρχικά υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς για την απεικόνισή της στο καρτεσιανό επίπεδο. Η κεφαλή των ευρέως χρησιμοποιούμενων σιδηροτροχιών τύπου Vignole αποτελείται από τόξα κύκλων τριών διαφορετικών ακτίνων. Ο υπολογισμός βασίζεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς, στη χρήση πολικών συντεταγμένων και στη θεωρία των κωνικών τομών, ώστε να προκύψουν οι καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων και των άκρων των αντίστοιχων κυκλικών τόξων που απαρτίζουν την

κεφαλή. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά δεδομένα που αφορούν σε σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60).

Ακολουθεί ο υπολογισμός των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Αν θεωρηθεί το σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς σε τομή, υπάρχει μία συγκεκριμένη θέση στην οποία αφενός δεν υπάρχει ακόμα ελαστική επαφή, αφετέρου, υπάρχει ένα κοινό σημείο επαφής μεταξύ τους. Σ' αυτό το σημείο, τα επαπτομενικά επίπεδα των δύο μη-παραμορφωμένων σωμάτων συμπίπτουν. Σε μία απολύτως γεωμετρική επίλυση του προβλήματος, η θέση του σημείου επαφής εξαρτάται από τη σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, τις διατομές τους, καθώς και τη γωνία στροφής (παρέκκλισης) του τροχοφόρου άξονα ως προς τον κατακόρυφο άξονα της γραμμής, η οποία στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή δεν λήφθηκε υπόψη.

Ο υπολογισμός των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς έγινε για την περίπτωση κεντρωμένου τροχοφόρου άξονα στη γραμμή, καθώς και για εγκάρσια μετατόπιση αυτού κατά 5mm εκατέρωθεν αυτής της θέσης, με βήμα 1mm. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τροχό διατομής S1002, κύριας ακτίνας κύλισης 420mm και σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60), τοποθετημένης με κλίση 1:40 ως προς την κατακόρυφο. Το σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς τοποθετήθηκε στη συνήθους εύρους γραμμή των 1435mm.

Στη συνέχεια, για κάθε σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, υπολογίζεται η επιφάνεια επαφής που δημιουργείται γύρω από το σημείο επαφής με δεδομένη την τιμή της διείδυσης των δύο σωμάτων. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η μέγιστη τιμή διείδυσης κυμαίνεται στην περιοχή των 0.10mm (± 0.02 mm) και προκύπτει θεωρητικά. Ως εκ τούτου ο υπολογισμός της επιφάνειας επαφής έγινε σε κάθε θέση εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα για τιμές διείδυσης από 0.01mm έως 0.10mm με βήμα 0.01mm. Με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή προσδιορίζεται η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης που περιγράφει το περίγραμμα της επιφάνειας επαφής και εξ' αυτής υπολογίζεται το ακριβές της μέγεθος.

Προκειμένου όμως να επιβεβαιωθούν πειραματικά οι θεωρητικά υπολογιζόμενες, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τιμές διείδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς και να υπολογισθεί η ακριβής τιμή της διείδυσης για διάφορες τιμές φόρτισης και για διάφορες σχετικές θέσεις μεταξύ των δύο σωμάτων πραγματοποιήθηκε πείραμα σε

φυσική κλίμακα, με στατική αξονική καταπόνηση σιδηροδρομικού τροχού επί τμήματος σιδηροτροχιάς σε πλάκα έδρασης.

Το πείραμα διεξήχθη στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. του Ε.Μ.Π. Στην πραγματοποίηση του πειράματος συνέδραμαν οι ακόλουθοι σιδηροδρομικοί οργανισμοί:

- ΟΣΕ: Ο τροχός που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία διατέθηκε για το χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση του πειράματος.
- ΗΣΑΠ: Η διάταξη στήριξης-φόρτισης του συστήματος άξονας-τροχός κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο που βρίσκεται στο εργοστάσιο των ΗΣΑΠ. Εκτός αυτής της κατασκευής από τους ΗΣΑΠ διατέθηκε και τμήμα τροχοφόρου άξονα.

Ο τροχός και η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκαν εντός μηχανικής πρέσσας δοκιμών και με κάμερες υψηλής ευκρίνειας (μετρητικό σύστημα Q-400) αποτυπώθηκαν χρωματικά οι μικρομετακινήσεις των δύο σωμάτων. Ο τροχός υποστηρίχθηκε μέσω της ειδικής διάταξης που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για το εν λόγω πείραμα. Η διαδικασία φόρτισης επαναλήφθηκε για διάφορες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά και για μέγιστη τιμή φορτίου 100kN, που είναι το μέγιστο φορτίο τροχού. Η λήψη των στοιχείων των καμερών έγινε με βήμα 10kN μέσω του ειδικού λογισμικού ISTRΑ 4D. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν βελομέτρα σε χαρακτηριστικές θέσεις της πειραματικής διάταξης, ώστε να παρακολουθείται η κίνησή του.

Ακολούθησε η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, ήτοι: των αποτελεσμάτων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας, των στοιχείων των βελομέτρων και των μετρήσεων του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας. Η επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας έγινε με το λογισμικό ISTRΑ 4D. Για την επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων χρησιμοποιήθηκαν οι ψηφιακές φωτογραφίες των ενδείξεών τους. Οι μετρήσεις του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας ελήφθησαν από την κάρτα μνήμης της συσκευής. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους, όπου ήταν εφικτό, προκειμένου να επαληθευθεί η ορθότητα των μετρήσεων και συνδυάστηκαν έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος αλληλεπίδρασης τροχού και σιδηροτροχιάς, υπό την επιβολή στατικού φορτίου στις διάφορες μεταξύ τους θέσεις.

Ακολουθώς, με κατάλληλους υπολογισμούς, προέκυψαν για κάθε θέση και κάθε φορτίο οι τιμές της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς με βάση τα εξαγόμενα πειραματικά αποτελέσματα. Οι πειραματικές τιμές της διείσδυσης ανά θέση και φορτίο συγκρίθηκαν με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές της διεθνούς βιβλιογραφίας, οι οποίες προκύπτουν στην περίπτωση στατικής φόρτισης και για κωνική διατομή τροχού. Στο τέλος της διατριβής υπολογίζονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Θεωρώντας ότι το φορτίο δρα κατακόρυφα στο σημείο επαφής και η επιφάνεια που δημιουργείται είναι παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο, οι υπολογισμοί αφορούν στις ορθές τάσεις. Τα αποτελέσματα για κάθε σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς συγκρίθηκαν με τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στην περίπτωση ελλειπτικής επιφάνειας επαφής, καθώς αυτές που προκύπτουν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων NON-HERTZ.

Δομή της εργασίας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από τέσσερα μέρη:

- Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά σε γενικές έννοιες του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφορών. Παρουσιάζεται η εξέλιξη του συστήματος ανά τους αιώνες και γίνεται ειδική αναφορά στον ελλαδικό χώρο. Περιγράφονται επίσης η θεωρία κύλισης, καθώς και τα χαρακτηριστικά του σιδηροδρομικού τροχού και της σιδηροτροχιάς, ώστε να αποσαφηνισθούν έννοιες που χρησιμοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια. Αναφέρονται, τέλος, τα κυριότερα ερευνητικά πορίσματα που σχετίζονται με το θέμα της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς από τον 19^ο αιώνα μέχρι σήμερα.
- Στο δεύτερο μέρος περιγράφεται η προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής. Στο 5^ο κεφάλαιο επεξηγείται ο τρόπος απεικόνισης της σιδηροτροχιάς στο καρτεσιανό επίπεδο, ήτοι περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των καρτεσιανών της συντεταγμένων, δεδομένων των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών. Στο 6^ο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα κατά 5mm (με βήμα 1mm) εκατέρωθεν της αρχικής θέσης ισορροπίας του (τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή). Εν συνεχεία στο 7^ο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος προσδιορισμού της επιφάνειας επαφής στις σχετικές θέσεις μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Η

μέθοδος θεωρεί τη διείσδυση της σιδηροτροχιάς στον τροχό δεδομένη και ο υπολογισμός για κάθε θέση επαναλαμβάνεται για εύρος τιμών διείσδυσης από 0.01mm-0.10mm με βήμα 0.01mm.

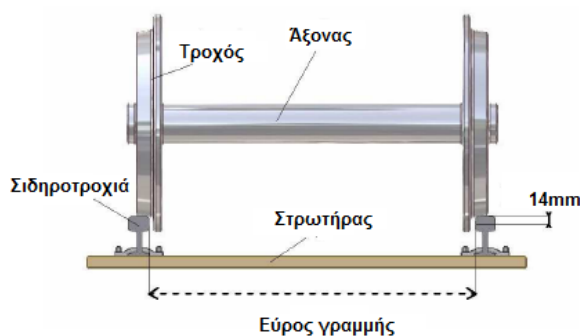
- Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η θεωρητικά υπολογιζόμενη της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς διεξήχθη πείραμα στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. Στο τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια του σχεδιασμού, της οργάνωσης και της υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας (Κεφάλαιο 8) καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 9).
- Στο τέταρτο μέρος της διδακτορικής διατριβής παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της ερευνητικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα στο 10^ο κεφάλαιο περιγράφεται ο υπολογισμός των τιμών της πειραματικά μετρηθείσας διείσδυσης και ο υπολογισμός των μέγιστων ορθών τάσεων στην επιφάνεια επαφής. Τέλος, στο 11^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦ.2 Ορισμός, συνιστώσες και ιστορική εξέλιξη του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφορών

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες που αφορούν στο σιδηροδρομικό σύστημα μεταφορών. Δίδεται η έννοια του σιδηρόδρομου και γίνεται μια σύντομη αναφορά στις συνιστώσες που απαρτίζουν το εν λόγω σύστημα μεταφορών. Γίνεται επίσης αναφορά στην ιστορική εξέλιξη του συστήματος ανά τους αιώνες, με ιδιαίτερη αναφορά στον ελλαδικό χώρο.

2.1 Ορισμός της έννοιας του σιδηρόδρομου

Ο σιδηρόδρομος είναι το χερσαίο σύστημα μαζικής μεταφοράς, στο οποίο οχήματα με ειδικά διαμορφωμένους τροχούς κινούνται επί αποκλειστικού διαδρόμου κυκλοφορίας, που ορίζεται από δύο παράλληλες μεταξύ τους σιδηροτροχιές (Σχ.2.1).



Σχήμα 2.1: Σύστημα σιδηροδρομικού άξονα – σιδηροτροχιάς

Ο σιδηρόδρομος παραμένει η πιο συμφέρουσα οικονομικά μέθοδος χερσαίας μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων. Η υπεροχή του σε σχέση με τα υπόλοιπα χερσαία μέσα μαζικής μεταφοράς έγκειται στην απαίτηση λιγότερης κατανάλωσης ενέργειας για το ίδιο μεταφορικό έργο, στη μεγάλη μεταφορική του ικανότητα και στη δυνατότητα ανάπτυξης υψηλών ταχυτήτων. Πέραν αυτών όμως αποτελεί το πλέον φιλικό προς το περιβάλλον μέσο μαζικής μεταφοράς, παρέχει δυνατότητα αυτοματισμού της κίνησής του και παραμένει ασφαλές και άνετο ανεξάρτητα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες.

2.2 Συνιστώσες του σιδηροδρομικού συστήματος

Οι δύο βασικές συνιστώσες που ορίζουν τον σιδηρόδρομο ως μέσο μεταφοράς είναι το τροχαίο υλικό και η σιδηροδρομική υποδομή [1].

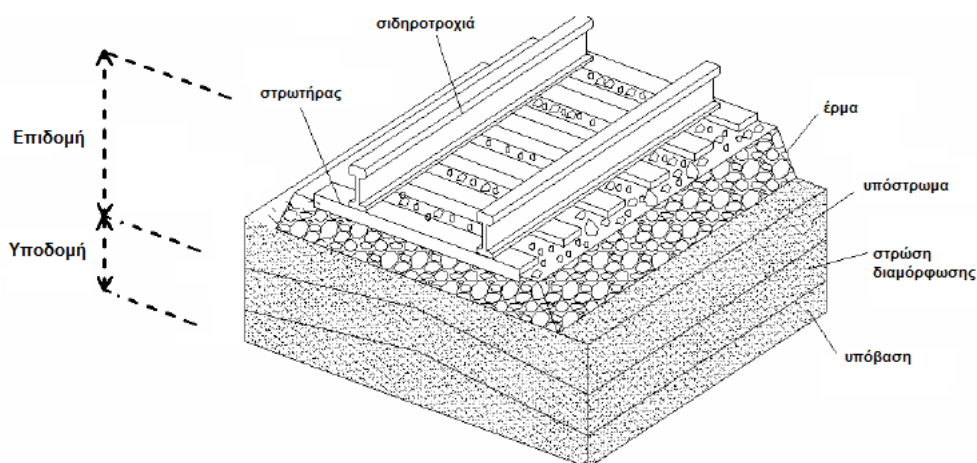
Με τον όρο τροχαίο υλικό νοούνται όλα τα οχήματα τα οποία κινούνται μέσω τροχών ειδικής διατομής επί σιδηροτροχιών και αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα το

αμάξωμα, τα φορεία και τους άξονες. Το τροχαίο υλικό μπορεί να διακριθεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων (ανάλογα με τη χρήση).
- Έλκον και ελκόμενο (ανάλογα με τη διάθεση ή μη αυτόνομης κίνησης).
- Ηλεκτροκίνητο και ντηζελοκίνητο (ανάλογα με την πηγή ενέργειας).

Με τον όρο σιδηροδρομική υποδομή νοούνται αφενός η οδός μεταφοράς (ή απλώς σιδηροδρομική γραμμή) και αφετέρου το σύνολο των τεχνικών έργων και εγκαταστάσεων που απαιτούνται για την ομαλή και εύρυθμη λειτουργία και ρύθμιση της κυκλοφορίας του τροχαίου υλικού [1]. Η σιδηροδρομική υποδομή θα πρέπει να εξασφαλίζει στον επιβάτη τη συντομότερη δυνατή μετακίνησή του με άνεση και ασφάλεια και στον σιδηροδρομικό οργανισμό τη βέλτιστη σχέση κόστους λειτουργίας και κέρδους.

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από υλικά κατάλληλων μέτρων ελαστικότητας, ώστε να μεταβιβάζονται τα στατικά και δυναμικά φορτία των κυκλοφορούντων οχημάτων στο έδαφος θεμελίωσης. Απαρτίζεται από δύο μέρη, την επιδομή (σιδηροτροχιές, σύνδεσμοι, στρωτήρες, ελαστικά υποθέματα, έρμα, υπόστρωμα) και την υποδομή (στρώση διαμόρφωσης, υπόβαση). Σιδηροτροχιές, στρωτήρες και μικρό υλικό (σύνδεσμοι και υλικά σύνδεσης) αποτελούν την εσχάρα γραμμής [1, 2, 3]. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται μια τυπική τομή της σιδηροδρομικής γραμμής και τα κυριότερα υλικά από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 2.2: Τυπική σιδηροδρομική γραμμή – Οδός μεταφοράς

Στα τεχνικά έργα περιλαμβάνονται οι σήραγγες, οι γέφυρες, τα έργα αντιστήριξης των εδαφών, οι ανισόπεδες διαβάσεις, τα αποχετευτικά και αποστραγγιστικά έργα, οι οχετοί κλπ. Στις εγκαταστάσεις συγκαταλέγονται οι εγκαταστάσεις γραμμής, δηλαδή οι

ισόπεδες διαβάσεις, οι εγκαταστάσεις σηματοδότησης και ηλεκτροκίνησης, οι εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών και οι εγκαταστάσεις λειτουργίας, δηλαδή οι σταθμοί, τα αμαξοστάσια, τα κτίρια διοίκησης κλπ [1, 2].

2.3 Ιστορική εξέλιξη του σιδηροδρομικού συστήματος

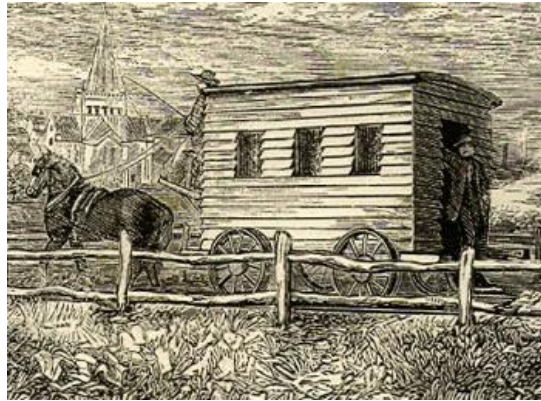
Ο ακριβής χρόνος «γέννησης» του σιδηρόδρομου δεν είναι δυνατόν να καθορισθεί με ακρίβεια [1]. Η φιλοσοφία πάντως που διέπει την τεχνική λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος (κύλιση οχήματος επί διαδρόμου σταθερής διατομής) συναντάται στην αρχαία Ελλάδα. Η Διόλκος ήταν πλακόστρωτος δρόμος, μήκους περίπου 6km, μέσω του οποίου μεταφέρονταν τα πλοία από τον Κορινθιακό στο Σαρωνικό κόλπο και αντίστροφα (Εικ. 2.1). Το πλάτος της οδού κυμαίνονταν από 3.5m έως 5.0m και στο μέσο της υπήρχαν δύο παράλληλες αυλακώσεις, οι οποίες είναι βέβαιο πως δεν οφείλονται στη φθορά από την τριβή που προκαλούσε η μεταφορά των πλοίων, αλλά αποτελούσαν μέρος της κατασκευής. Η λειτουργία της Διόλκου διήρκησε για πάνω από 1300 χρόνια, από τον 6^ο π.Χ. αιώνα μέχρι, περίπου, το 900 μ.Χ.



Εικόνα 2.1: Δυτικό άκρο Διόλκου (Κορινθιακός κόλπος)

Στη νεότερη ιστορία, είναι γνωστή για πάνω από 400 χρόνια η ύπαρξη ενός συστήματος μεταφοράς, που αποτελείται από ένα όχημα κινούμενο επί προκατασκευασμένου διαδρόμου, η οποία του παρέχει καθοδήγηση και υποστήριξη [4, 5]. Πριν την ανακάλυψη του σιδηρόδρομου οι δια ξηράς μεταφορές πραγματοποιούνταν επί χιλιετίες με τη χρήση της μυϊκής δύναμης ανθρώπων ή ζώων (Εικ. 2.2). Έτσι, οι χερσαίες

μεταφορές εμφάνιζαν μειονεκτήματα, τα οποία φαίνονταν αδύνατο να υπερνικηθούν, όπως η περιορισμένη ταχύτητα και η έλλειψη ασφάλειας και άνεσης. Από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όμως, και τη χρήση της κινητήριας δύναμης του ατμού, άνοιξε ένα νέο κεφάλαιο στην ιστορία των χερσαίων μεταφορών [6].

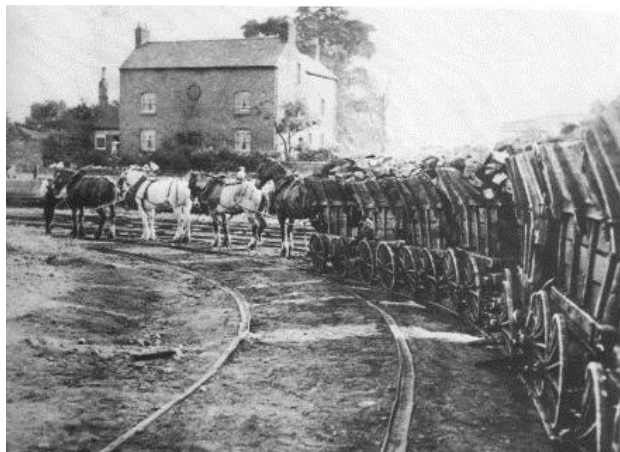


Εικόνα 2.2: Χερσαία μεταφορά με χρήση ζώων

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους κυριότερους «σταθμούς» της πολυετούς ιστορίας του σιδηρόδρομου ανά τον κόσμο, από τον 16^ο αιώνα μέχρι σήμερα. Ειδική αναφορά γίνεται στην εξέλιξή του στον ελλαδικό χώρο.

2.4 16ος - 17ος - 18ος αιώνας

Η χρήση ιπήλατων οχημάτων που κινούνται επί ξύλινων δοκών συγκεκριμένης διατομής στους κοινώς ονομαζόμενους «καρόδρομους» (Εικ. 2.3) εμφανίστηκε στη Γερμανία το 1550 και εξαπλώθηκε γρήγορα σε όλη την Ευρώπη.



Εικόνα 2.3: Ιπήλατα οχήματα μεταφοράς φορτίου

Την ίδια εποχή εμφανίζεται και η πρώτη εικόνα σιδηροτροχιάς σε γκραβούρα από ξύλο που βρέθηκε στη Βασιλεία της Ελβετίας [2, 3]. Στις αρχές του 17^{ου} αιώνα η τεχνική χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο ορυχεία της Αγγλίας για τη μεταφορά κάρβουνου με άμαξες. Οι τροχοί λόγω του βάρους των σχημάτιζαν αυλάκια στους χωμάτινους

δρόμους. Οι πρώτες τροχιές δημιουργήθηκαν από πέτρα, ενώ στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν από ξύλινες δοκούς (μαδέρια) ως τροχιές [2]. Οι τροχοί αντίστοιχα διαμορφώθηκαν με δύο όνυχες εκατέρωθεν σε σχήμα τροχαλίας, έτσι ώστε το εσωτερικό μέρος τους να εφάπτεται στην επιφάνεια κύλισης των ξυλοτροχιών.

Το 1740 έγινε επένδυση των ξυλοτροχιών με μεταλλικές πλάκες και το 1776 κατασκευάστηκε στο Sheffield η πρώτη οδός με τροχιές εξ' ολοκλήρου σιδερένιες τετράγωνης διατομής. Το 1789 κατασκευάστηκε άλλη οδός με σιδηροτροχιές διατομής ορθής γωνίας, επί των οποίων κυλούσαν τροχοί με νύχι μόνο στην εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς. Ο κατασκευαστής Benjamin Curr όρισε την απόσταση σε 5 πόδια, ώστε οι εσωτερικές παρειές των σιδηροτροχιών να απέχουν 4 πόδια και 8,5 ίντσες, απόσταση που ισοδυναμεί με 1435mm και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα ως «κανονικό εύρος» στα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα [4, 5].

Οι προαναφερόμενοι «οδοί επί τροχιών» σε συνδυασμό με την ατμάμαξα, η οποία εμφανίστηκε περίπου το 18^ο αιώνα πιθανόν από τον Γάλλο Nicolas Cugnot [1], αποτελούν τον πρόδρομο του σιδηρόδρομου με τη σημερινή του μορφή.

2.5 19ος - 20ος - 21ος αιώνας

Το 1800 ο Άγγλος μηχανικός Richard Trevithic κατασκεύασε την πρώτη ατμάμαξα και πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας πατεντάροντας την κατασκευή του. Τέσσερα χρόνια αργότερα η ατμάμαξά του κινούνταν επί σιδηροτροχιών σε μήκος 15km μεταφέροντας 14t (5 βαγόνια με 5t ορυκτών και 10 επιβάτες) στα ορυχεία του Μέρθαϊρ της νότιας Ουαλίας [1].

Το 1814 ο George Stephenson κατασκευάζει την πρώτη του ατμομηχανή και λίγα χρόνια αργότερα πείθει του υπεύθυνους του σιδηρόδρομου Stockton-Darlington να την εισάγουν στη γραμμή τους. Το 1823 η εταιρεία πήρε τη νομική αδειοδότηση για τη μεταφορά επιβατών. Τελικά, στις 27 Σεπτεμβρίου 1825 ο George Stephenson οδηγεί μια ατμάμαξα (την οποία ονόμασε Locomotion) μεταξύ Stockton και Shildon, σε ένα τμήμα 34km της γραμμής Stockton-Darlington (Εικ. 2.4), μεταφέροντας φορτίο 80t (6 βαγόνια ορυκτών και 600 επιβάτες), με ταχύτητα 39km/h. Για το λόγο αυτό η 27^η Σεπτεμβρίου θεωρείται η ημέρα «γέννησης» του σιδηρόδρομου [1, 4, 5].



Εικόνα 2.4: Σιδηροδρομική γραμμή Stockton-Darlington

Την ίδια περίοδο στην πόλη του Manchester και στο λιμάνι του Liverpool άρχισε η βιομηχανική επανάσταση. Εν τω μεταξύ η τεχνική του Stephenson βρισκόταν σε συνεχή εξέλιξη και τελικά στις 15 Σεπτεμβρίου εγκαινιάστηκε η σιδηροδρομική σύνδεση μεταξύ των δύο πόλεων. Η μεταφορά με σιδηρόδρομο άρχισε να εξαπλώνεται σε όλη την Ευρώπη, και χώρες όπως το Βέλγιο, η Γερμανία, η Γαλλία, η Ολλανδία και η Ιταλία απέκτησαν τον πρώτο τους σιδηρόδρομο μέχρι το 1850 [5].

Στις Η.Π.Α. ο πρώτο σιδηρόδρομος αρχίζει επίσημα τη λειτουργία του το 1830 μεταξύ Βαλτιμόρης-Οχάιο και ακολουθεί το 1836 ο Καναδάς. Η ανάπτυξη του σιδηροδρόμου σε αυτές τις χώρες, λόγω της αχανούς τους έκτασης, συνέβαλε καθοριστικά τόσο στην οικονομική, όσο και στην πολιτική και κοινωνική τους ενοποίηση. Το ίδιο συνέβη επίσης στην Κίνα και στη Ρωσία, όπου από την απαρχή της εμφάνισής του (1876 και 1917 αντίστοιχα) μέχρι και σήμερα ο σιδηρόδρομος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την εμφάνιση του αεροπλάνου και, κυρίως, του αυτοκινήτου η κατάσταση ανετράπη για τις σιδηροδρομικές μεταφορές. Η ραγδαία τεχνική τελειοποίηση του αυτοκινήτου περιόρισε σε τέτοιο βαθμό τη χρήση του σιδηροδρόμου, ώστε να τεθεί θέμα σκοπιμότητας ύπαρξής του. Ωστόσο, στις εμπορευματικές μεταφορές και για μεγάλες αποστάσεις και όγκο φορτίου, ο σιδηρόδρομος παρέμεινε κυρίαρχο μέσο μεταφοράς. Στην Ευρώπη, δε, διαδραμάτισε πρωτεύοντα ρόλο κατά τη διάρκεια των δύο Παγκοσμίων Πολέμων. Η εισαγωγή της νητσελοκίνησης το 1938 και της ηλεκτροκίνησης μετά τη δεκαετία του '70 και η κυκλοφορία συρμών υψηλών ταχυτήτων, ανέτρεψαν τη μειονεκτική του θέση και το κατέστησαν και πάλι ανταγωνιστικό μέσο μεταφοράς έναντι των υπολοίπων. Αξίζει να σημειώσουμε τη δρομολόγηση του πρώτου συρμού υψηλών ταχυτήτων στην Ιαπωνία μεταξύ Τόκιο-Οσάκα με ταχύτητα 210km/h το 1964 και στην Ευρώπη, τη δρομολόγηση του TGV ταχύτητας 260km/h το 1981 και 300km/h το 1989. Σήμερα οι ταχύτητες αυτές

εφαρμόζονται και σε άλλες χώρες όπως η Γερμανία, η Ιαπωνία, η Ισπανία, η Κορέα, η Ιταλία, αλλά και στα περισσότερα σιδηροδρομικά ανεπτυγμένα κράτη αγγίζουν τα 300km/h. Το παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας με συμβατικό σιδηρόδρομο (574,8km/h) κατέχει η Γαλλία [2].

Στη συνεχή ανάπτυξη του σιδηρόδρομου συνέβαλε επίσης όλα αυτά τα χρόνια, και κυρίως από το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα και έπειτα, η αλματώδης εξέλιξη της μεταλλουργίας. Από το 1850 και έπειτα, η μικρής κλίμακας παραγωγή χυτοσιδήρου μετατράπηκε σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή χάλυβα. Η ανάπτυξη άλλων διαδικασιών μείωσαν δραστικά το περιεχόμενο του μετάλλου σε θείο και φώσφορο. Από το 1960 και μετά εισήχθη η δευτερεύουσα μεταλλουργική διαδικασία, επιτρέποντας την περαιτέρω μείωση των ρυπαντών και εισάγοντας τη μείωση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο και τη λεπτή κοκκοποίηση με χρήση πρόσθετων βαναδίου και αργίλου. Η σε βάθος γνώση της σύστασης και της επιρροής κάθε πρόσθετου στην κόπωση και στη θραύση, σε συνδυασμό με τις σύγχρονες τεχνικές της ανάλυσης των υλικών και των μεθόδων των δοκιμών, έχουν αυξήσει την ποιότητα σιδηροδρομικών τροχών και σιδηροτροχιών σε πολύ υψηλό επίπεδο [5].

2.6 Η εξέλιξη στον ελλαδικό χώρο

Η αρχή της ιστορίας του ελληνικού σιδηρόδρομου είναι σχεδόν ταυτόσημη με την ίδρυση του ελληνικού κράτους. Ακολουθούν οι σημαντικότεροι χρονολογικοί σταθμοί της ανάπτυξης, υλοποίησης και λειτουργίας τους ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου [1, 3, 6].

- 1835 Ο Γάλλος Φραγκίσκος Φεράλδη προτείνει την κατασκευή σιδηροδρομικής γραμμής για τη σύνδεση της Αθήνας με τον Πειραιά.
- 1855 Η κυβέρνηση Μαυροκορδάτου καταθέτει το πρώτο νομοσχέδιο για την κατασκευή σιδηρόδρομου στην Αθήνα και στον Πειραιά.
- 1869 Λειτουργεί το πρώτο σιδηροδρομικό δίκτυο στη διαδρομή Αθήνα-Πειραιάς, που ανήκει στην «Εταιρεία του απ' Αθηνών εις Πειραιά σιδηροδρόμου».
- 1873 Ολοκληρώνεται η γραμμή Θεσσαλονίκης-Σκοπίων στην κατεχόμενη από την οθωμανική αυτοκρατορία περιοχή, από την εταιρεία «Αυτοκρατορικοί Σιδηρόδρομοι της Ευρωπαϊκής Τουρκίας».
- 1874 Ολοκληρώνεται από την ίδια εταιρεία η γραμμή Αλεξανδρούπολης-Πυθίου.

1882 Η βουλή εξετάζει λεπτομερειακά την κατασκευή νέων σιδηροδρομικών διαδρομών μεγάλων αποστάσεων και επί κυβέρνησης Τρικούπη λαμβάνεται η απόφαση για κατασκευή μετρικής γραμμής (πλάτος μεταξύ σιδηροτροχιών 1,0m) λόγω μικρότερου κόστους σε σχέση με τη διεθνή γραμμή (πλάτος μεταξύ σιδηροτροχιών 1,44m).

1886 Ολοκληρώνεται το δίκτυο προς Βόλο, Λάρισα και Καλαμπάκα (Εικ. 2.5).



Εικόνα 2.5: Γέφυρα διαδρομής Αθήνα-Λάρισα

1888 Ολοκληρώνονται οι ενδοβαλκανικές συνδέσεις της Θεσσαλονίκης και της Αλεξανδρούπολης, ώστε και επιτυγχάνεται η ένωσή τους με τα μεγάλα αστικά κέντρα της δυτικής Ευρώπης.

1894 Ολοκληρώνεται η σιδηροδρομική σύνδεση Θεσσαλονίκης-Μοναστηρίου, η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Deutsche Bank (Εικ. 2.6).



Εικόνα 2.6: Σταθμός Ανατολικών Σιδηροδρόμων Θεσ/νίκης

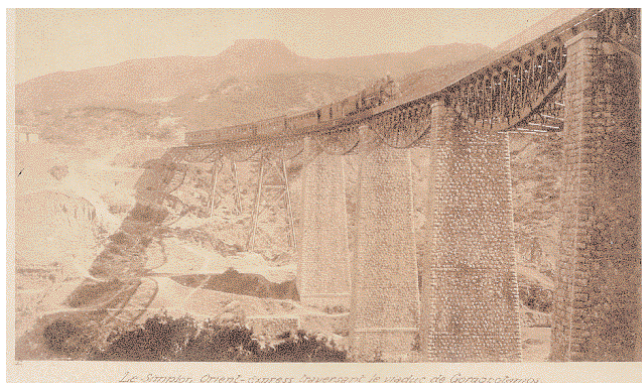
1896 Ολοκληρώνεται η σύνδεση της Θεσσαλονίκης με την ανατολική Μακεδονία και Θράκη μέσω της σύνδεσης με τη γραμμή Αλεξανδρούπολης-Πυθίου και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται απευθείας σύνδεση της Θεσσαλονίκης με την Κωνσταντινούπολη.

1904 Ολοκληρώνονται οι γραμμές του δικτύου που ενώνουν την Αττική με την Πελοπόννησο, οι οποίες διέρχονται από τη γέφυρα του Ισθμού και εν συνεχεία ακολουθούσαν την κυκλική διαδρομή Κόρινθος-Αίγιο-Πάτρα-Πύργος-Καλαμάτα-Τρίπολη-Άργος-Κόρινθος (Εικ. 2.7). Η κατασκευή ξεκίνησε το 1882 και οι διαδρομές παραδίδονται στην κυκλοφορία τμηματικά.



Εικόνα 2.7: Εταιρεία ΣΠΑΠ και σιδηροδρομικό δίκτυο

- 1904 Εγκαινιάζεται το τμήμα γραμμής από τον Πειραιά μέχρι τη Θήβα και τη Χαλκίδα.
- 1909 Ολοκληρώνεται η γραμμή Πειραιάς-Θήβα-Λειβαδιά-Λιανοκλάδι-Λάρισα-Παραπούλι (τα τότε ελληνικά σύνορα).
- 1918 Ολοκληρώνεται η κατασκευή της γραμμής Παραπούλι-Κατερίνη-Πλατύ.
- 1918 Επιτυγχάνεται η σιδηροδρομική σύνδεση μεταξύ βόρειας και νότιας ελληνικής επικράτειας.
- 1920 Ιδρύεται η εταιρεία «Σιδηροδρόμων Ελληνικού Κράτους» και την 1^η Ιουλίου του ίδιου έτους αρχίζει η κυκλοφορία της ταχείας Αθήνα-Παρίσι (Εικ. 2.8).



Εικόνα 2.8: Η αμαξοστοιχία Simplon Orient Express (Αθήνα-Παρίσι) διασχίζει τη γέφυρα του Γοργοποτάμου

- 1937 Αρχίζει η κατασκευή του νέου επιβατικού σταθμού Θεσσαλονίκης, ο οποίος ολοκληρώνεται μετά από 30 χρόνια.
- 1952 Αρχίζει η λειτουργία 114 συστημάτων αυτόματης φύλαξης ισόπεδων διαβάσεων.
- 1954 Ολοκληρώνεται η επέκταση της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φλώρινας προς Αμύνταιο και Κοζάνη και ενώνεται με τη γραμμή Καλαμπάκας-Κοζάνης.
- 1964 Ολοκληρώνεται η γραμμή Σιδηροκάστρου-Κούλας για τη σύνδεση των σιδηροδρομικών δικτύων μεταξύ Ελλάδας-Βουλγαρίας και των πέραν αυτής κρατών (Ρουμανία, Ρωσία κλπ.).
- 1971 Ιδρύεται ο Οργανισμός Σιδηροδρόμων Ελλάδος, στον οποίο προσαρτώνται όλα τα επί μέρους σιδηροδρομικά δίκτυα (Σιδηρόδρομοι Πύργου-Κατακόλου, Βορειοδυτικής Ελλάδας και Αττικής, οι οποίοι είχαν ήδη ενσωματωθεί με τους Σιδηρόδρομους Πειραιώς-Αθηνών-Πελοποννήσου και Σιδηρόδρομοι Θεσσαλίας, οι οποίοι είχαν ήδη ενσωματωθεί με του Σιδηρόδρομους Ελληνικού Κράτους).
- 1989 Εισάγονται στο δρομολόγιο Αθήνας-Θεσσαλονίκης νέοι συρμοί υψηλής ταχύτητας (Intercity) (Εικ. 2.9).



Εικόνα 2.9: Η αμαξοστοιχία Intercity στη γέφυρα του Μπράλου

- 2007 Ολοκληρώνεται η γραμμή κανονικού εύρους μεταξύ Αθήνας-Κορίνθου και Κορίνθου-Κιάτου.

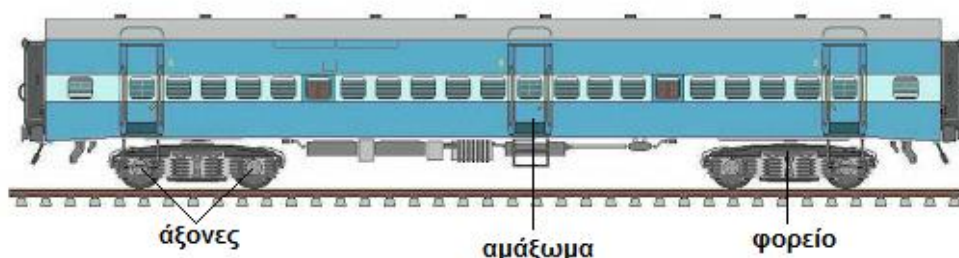
Οι ελληνικοί σιδηρόδρομοι χαρακτηρίζονται από μεγάλα και διαρκώς ογκούμενα ελλείμματα. Οι προσπάθειες εκσυγχρονισμού τους άρχισαν στη δεκαετία του '70. Ωστόσο ο εκσυγχρονισμός τους, όπως άλλωστε μαρτυρεί και η σημερινή κατάσταση, δεν προχώρησε με γρήγορους ρυθμούς [3].

ΚΕΦ.3 Περιγραφή του συστήματος και της θεωρίας κύλισης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κίνηση του σιδηροδρομικού τροχοφόρου άξονα επί της σιδηροδρομικής γραμμής. Σε μια σύντομη εισαγωγή γίνεται αναφορά στη μεταβίβαση των φορτίων κυκλοφορίας από το όχημα στην υπόβαση. Ο σιδηροδρομικός τροχός και η σιδηροτροχιά παρουσιάζονται ξεχωριστά σε ειδικά υποκεφάλαια, προκειμένου να διευκρινιστούν έννοιες που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια της διδακτορικής διατριβής και αφορούν στη μεταξύ τους επιφάνεια επαφής (εφεξής διεπιφάνεια). Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η οφιοειδής κίνηση του σιδηροδρομικού άξονα και εξηγούνται βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος.

3.1 Μεταβίβαση φορτίων κυκλοφορίας

Το σιδηροδρομικό σύστημα μεταφοράς αποτελείται από το σιδηροδρομικό όχημα και τη σιδηροδρομική γραμμή. Κάθε σιδηροδρομικό όχημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το αμάξωμα, τα φορεία και τους άξονες (Σχ. 3.1). Το πλαίσιο των φορείων συνδέεται με τους άξονες μέσω της πρωτεύουσας ανάρτησης και το αμάξωμα με τα φορεία μέσω της δευτερεύουσας ανάρτησης. Ο συμβατικός σιδηροδρομικός άξονας αποτελείται από δύο τροχούς άκαμπτα συνδεδεμένους μέσω μιας κυλινδρικής ράβδου (σώμα άξονα) [2].



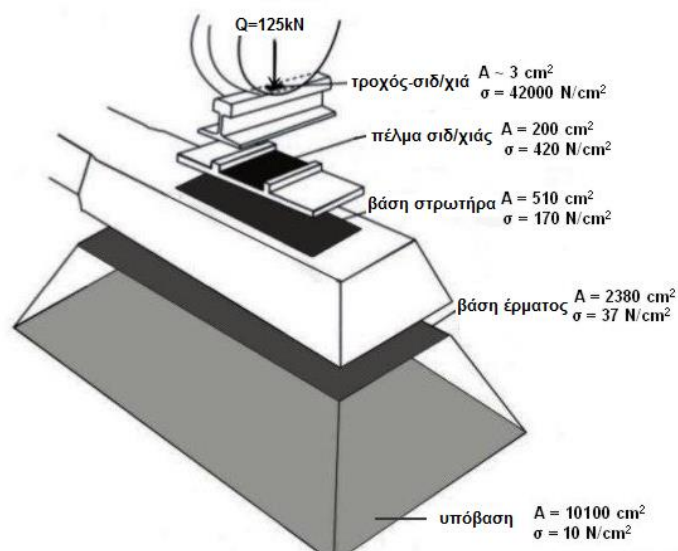
Σχήμα 3.1: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού οχήματος

Η σιδηροδρομική γραμμή, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελείται από την επιδομή (σιδηροτροχίες, σύνδεσμοι, στρωτήρες, ελαστικά υποθέματα, έρμα, υπόστρωμα) και την υποδομή (στρώση διαμόρφωσης, υπόβαση) (Σχ. 1.2).

Η κοινή περιοχή επαφής των δύο αυτών, ανεξάρτητων κατά τ' άλλα, «τεχνικών μονάδων» (οχήματος και γραμμής) είναι η διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς. Η μορφή του τροχού και της σιδηροτροχιάς παίζουν σημαντικό ρόλο στη μορφή και το μέγεθος της διεπιφάνειας, καθώς επίσης στις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους, στις τάσεις και στις φθορές. Γι' αυτόν τον λόγο γίνεται ειδική μνεία στα ακόλουθα

υποκεφάλαια στην περιγραφή και τον ρόλο τόσο του σιδηροδρομικού τροχού, όσο και της σιδηροτροχιάς.

Κατά την κύλιση του σιδηροδρομικού οχήματος, τα φορτία κυκλοφορίας μεταβιβάζονται μέσω των τροχών στις σιδηροτροχιές και εν συνεχεία στους στρωτήρες, στο έρμα και στην υπόβαση. Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς και λόγω της ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων αποσβένεται σταδιακά μέχρι την υπόβαση από 1.000 έως 5.000 φορές (Σχ. 3.2) [3].



Σχήμα 3.2: Κατανομή φορτίων κυκλοφορίας

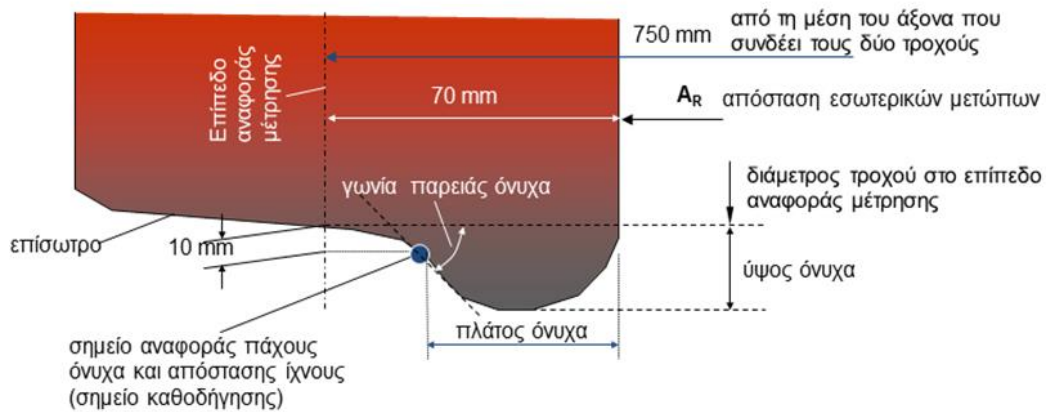
3.2 Ο σιδηροδρομικός τροχός

Ο σιδηροδρομικός τροχός, μέρος του σιδηροδρομικού άξονα, είναι θεμελιώδους σημασίας για την κύλιση του οχήματος. Ο λόγος για τον οποίο οι σιδηροδρομικοί μηχανικοί επέμειναν ιδιαίτερα στην εξέλιξη του τροχού ήταν γιατί συνειδητοποίησαν νωρίς τον κύριο ρόλο που θα έπαιζε η τελειοποίησή του στην επιτυχία του σιδηρόδρομου. Οι τροχοί οφείλουν να υποστηρίζουν το αμάξωμα και το φορτίο του, να κατευθύνουν το τρένο στη γραμμή, να αποτρέπουν τον κίνδυνο ολίσθησης στις καμπύλες και να ανθίστανται στις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την πέδηση.

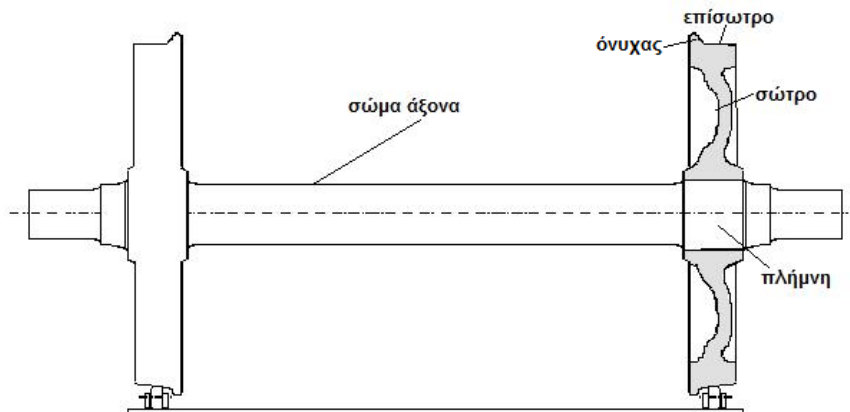
Ο σιδηροδρομικός τροχός αποτελείται από:

- Το επίστρο, δηλαδή το εξωτερικό τμήμα των τροχών με το οποίο επιτελείται η κύλιση.
- Το σώτρο, δηλαδή το κυρίως σώμα των τροχών.
- Τον όνυχα, ο οποίος βρίσκεται στην παρειά του τροχού εσωτερικά προς τη γραμμή.

Τα κύρια μέρη του σιδηροδρομικού τροχού και του σιδηροδρομικού άξονα φαίνονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού τροχού



Σχήμα 3.4: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού άξονα

Οι πρώτοι σιδηροδρομικοί τροχοί διαμορφώθηκαν με βάση του κοινούς ξύλινους τροχούς, στην περίμετρο των οποίων στερεωνόταν ένα ελαστικό. Οι Ευρωπαίοι χρησιμοποίησαν για αρκετά χρόνια τον ελαστικό τροχό, παρόλο που σύντομα αντικατέστησαν τις ξύλινες ακτίνες του με ανθεκτικότερα υλικά. Στην Αμερική ο ξύλινος τροχός αντικαταστάθηκε νωρίτερα από τον ολόσωμο μεταλλικό, η χρήση του οποίου γενικεύθηκε γύρω στο 1840. Η ανακάλυψη των κωνικών τροχών αποδίδεται στον Αμερικανό μηχανικό από τη Βαλτιμόρη James Wright το 1829.

Η τεχνική αυτή, τεχνολογικά εξελιγμένη βεβαίως, εφαρμόζεται μέχρι και σήμερα. Η επιφάνεια κύλισης των τροχών, και ειδικότερα των επισώτρων, κατασκευάζεται κολουροκωνική. Η διατομή δηλαδή της εγκάρσιας τομής των τροχών δεν είναι, όπως στα ελαστικά των οδικών οχημάτων ορθογωνική, αλλά εμφανίζει ελαφρά κωνικότητα, συνήθως μεταβλητή από 1:20 έως 1:40. Η γωνία άξονα περιστροφής και επαπτομένης

ερευνητική εμπειρία από τις παρατηρηθείσες φθορές προγενέστερων μορφών. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, τόσο στα θεωρητικό όσο και στο πειραματικό τμήμα της, χρησιμοποιήθηκε τροχός τύπου UIC-ORE S1002, που είναι και ο συνηθέστερος στα διεθνή δίκτυα. Αναλυτικά τα στοιχεία που αφορούν στη διατομή του παρουσιάζονται σε ακόλουθο κεφάλαιο.

3.3 Η σιδηροτροχιά

Η σιδηροτροχιά μπορεί να θεωρηθεί το σπουδαιότερο στοιχείο της γραμμής, καθώς αποτελεί το ανώτερο στοιχείο της επιδομής, που έρχεται σε άμεση επαφή με τον σιδηροδρομικό τροχό. Ο ρόλος της συνοψίζεται στα παρακάτω [1, 2, 3, 4]:

- Παραλαβή των φορτίων κυκλοφορίας και κατανομή τους στους στρωτήρες.
- Πλευρική καθοδήγηση των τροχών.
- Παροχή επίπεδης επιφάνειας κύλισης.
- Λειτουργία ηλεκτρικού αγωγού σε ηλεκτροφόρες γραμμές.
- Φορέας ρεύματος σηματοδότησης.

Η σιδηροτροχιά οφείλει να έχει [1]:

- Ικανοποιητικό πλάτος της επιφάνειας κύλισης και τέτοια διαμόρφωση, ώστε οι πιέσεις να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.
- Ποσότητα υλικού τέτοια, ώστε να εξασφαλίζει μεγάλη ενεργό διάρκεια ζωής.
- Επάρκεια της φέρουσας ικανότητας και ακαμψίας.
- Πλάτος πέλματος τέτοιο, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή έδραση και μικρή πίεση επί του στρωτήρα.
- Πάχος πέλματος που να προσδίδει επαρκή ακαμψία.
- Ροπή αντίστασης όσο το δυνατό μεγαλύτερη έναντι κατακόρυφων δυνάμεων.
- Ροπή αντίστασης όσο το δυνατό μεγαλύτερη έναντι οριζόντιων δυνάμεων για επαρκή πλευρική ακαμψία.
- Σταθερότητα έναντι ανατροπής.
- Κέντρο βάρους στο μισό ύψος της επιφάνειας διατομής.
- Την περιοχή υποδοχής του αμφιδέτη διαμορφωμένη στη μορφή του αμφιδέτη.
- Στρογγυλεμένες τις γωνιακές της θέσεις για την ευχερέστερη κατανομή των τάσεων στη διατομή της σιδηροτροχιάς.

Ο τύπος σιδηροτροχιάς που χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά από τα συμβατικά σιδηροδρομικά δίκτυα είναι η σιδηροτροχιά με πέλμα, η οποία εισήχθη στην Ευρώπη

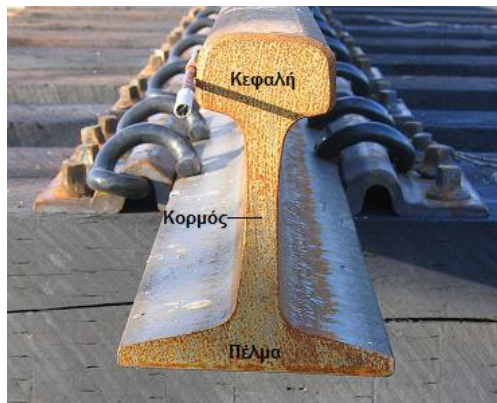
το 1836 από τον Βρετανό Vignole και για τον λόγο αυτό φέρει το όνομά του. Εκτός αυτής όμως υπάρχουν δύο ακόμα είδη σιδηροτροχιών που συναντάμε στα διεθνή δίκτυα, με περιορισμένη χρήση: οι σιδηροτροχιές με λαιμό (χρήση κυρίως σε γραμμές τραμ και λιμενικά έργα) και οι σιδηροτροχιές αντεστραμμένου U (χρήση για την κίνηση πυλώνων) (Σχ. 3.6) [2].



Σχήμα 3.6: Σιδηροτροχιές ανεστραμμένου U και σιδηροτροχιά με λαιμό

Η σιδηροτροχιά τύπου Vignole αποτελείται από τρία τμήματα (Σχ. 3.7):

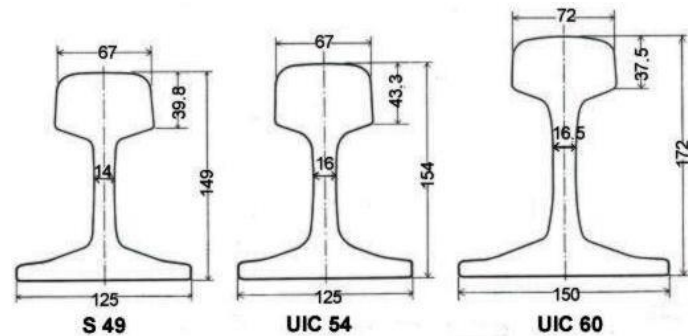
- Την κεφαλή, το σχήμα της οποίας πρέπει να εξασφαλίζει την επιθυμητή επαφή με το επίσωτρο του τροχού.
- Τον κορμό, το πάχος του οποίου καθορίζεται από τις απαιτήσεις ακαμψίας έναντι λυγισμού και κάμψης.
- Το πέλμα, το πλάτος του οποίου πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να παρέχεται σταθερότητα της διατομής, κατανομή των φορτίων στους στρωτήρες και η απαραίτητη ροπή αδράνειας στην εγκάρσια κατεύθυνση.



Σχήμα 3.7: Σιδηροτροχιά τύπου Vignole

Οι σιδηροτροχιές τύπου Vignole που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη είναι οι: S 49, 54 E1(UIC 54) και 60 E1(UIC 60) που φαίνονται στο Σχήμα 3.8. Οι αριθμοί στις

ονομασίες τους αναφέρονται στη μάζα τους σε kg ανά μέτρο μήκους. Οι σιδηροτροχιές τοποθετούνται συνήθως με κλίση 1:20 έως 1:40 ως προς την κατακόρυφο, ώστε να βελτιώνεται η εγκάρσια ευστάθεια των οχημάτων και να καθίσταται ομαλότερη η κύλιση των συρμών.

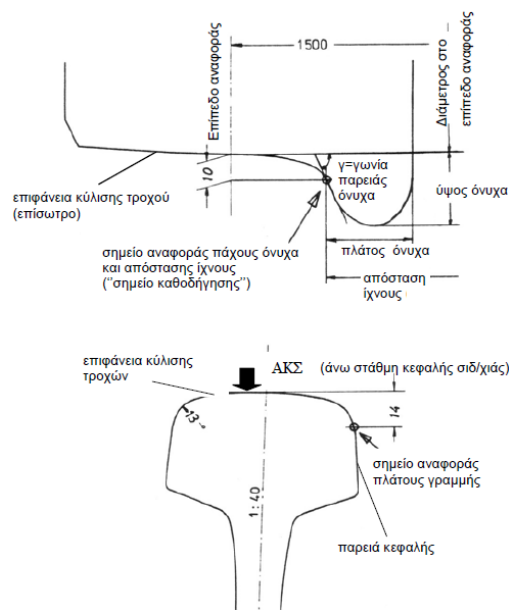


Σχήμα 3.8: Σιδηροτροχιές τύπου Vignole, διατομής S49, UIC54 και UIC60

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πειραματικό τμήμα της, χρησιμοποιήθηκε σιδηροτροχιά τύπου 60 E1(UIC 60). Αναλυτικά τα στοιχεία που αφορούν στη διατομή της παρουσιάζονται σε ακόλουθο κεφάλαιο.

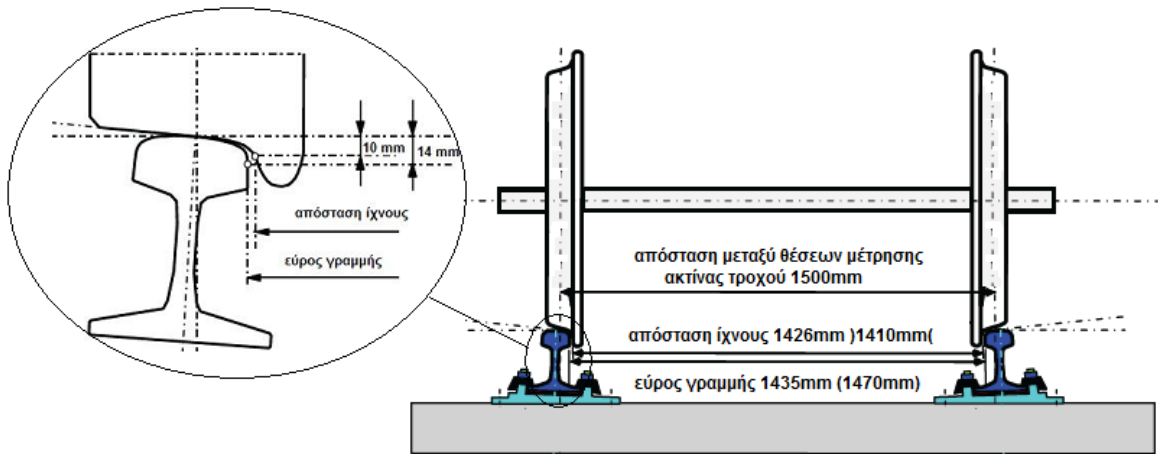
3.4 Η κυματοειδής κίνηση

Ο τροχός κυλιέται επί της Άνω Στάθμης Κεφαλής Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) με την περιμετρική επιφάνειά του (επίσωτρο) και στις καμπύλες οδηγείται από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών μέσω του όνυχα (Σχ. 3.9). Επομένως, τροχός και κεφαλή σιδηροτροχιάς πρέπει να εναρμονίζονται ως προς τη μορφή τους στην περιοχή επαφής [1].



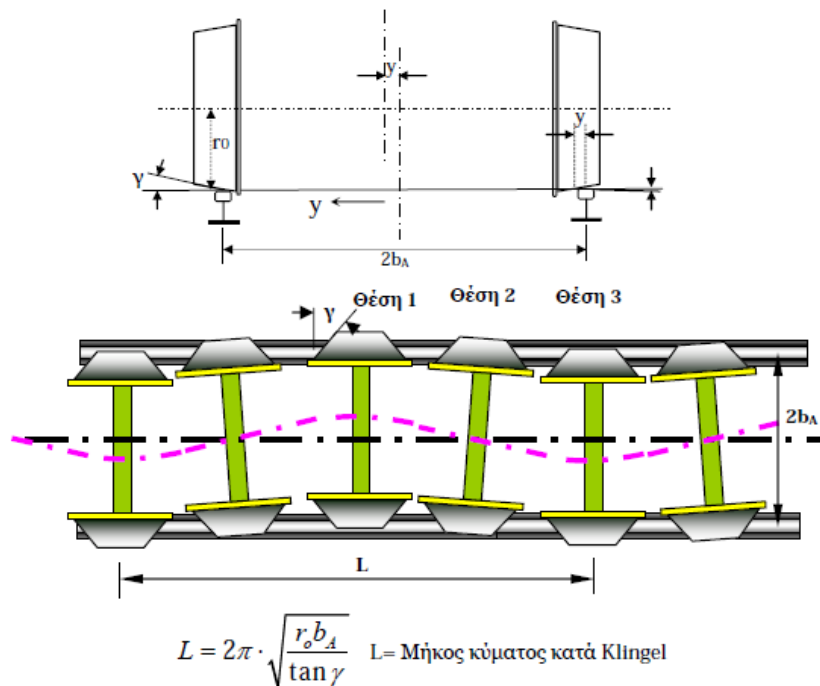
Σχήμα 3.9: Διατομή τροχού, σιδηροτροχιάς [1]

Οι όνυχες των τροχών διαμορφώνονται έτσι, ώστε να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο ως κενό μεταξύ του όνυχα και της εσωτερικής παρειάς της σιδηροτροχιάς (Σχ. 3.10). Ωστόσο, δυνάμεις ποικίλων προελεύσεων ωθούν περιστασιακά το όχημα και άρα τους άξονες και τους τροχούς προς την μία ή την άλλη πλευρά, φέρνοντας έτσι σε “επαφή” όνυχα και σιδηροτροχιά του ενός τροχού. Τούτο προκαλεί διαφοροποίηση των ακτίνων κύλισης των τροχών επί της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Αποτέλεσμα τούτου είναι η διαφοροποίηση του διαστήματος που διανύουν οι δύο τροχοί.



Σχήμα 3.10: Απόσταση ίχνους και εύρος γραμμής

Στην περίπτωση κολουροκωνικής επιφάνειας κύλισης του τροχού το φαινόμενο εξελίσσεται όπως περιγράφεται παρακάτω (Σχ. 3.11) [1].



Σχήμα 3.11: Οφιοειδής κίνηση σιδηροδρομικού άξονα κατά Klingel [1]

Όταν ένας άξονας δε βρίσκεται ακριβώς στη μέση των σιδηροτροχιών αλλά ελαφρά μετατοπισμένος π.χ. προς τα αριστερά (θέση 1), τότε ο αριστερός τροχός κυλίνει με τη μεγαλύτερη ακτίνα από ότι ο δεξιός τροχός. Επειδή και οι δύο τροχοί είναι συνδεδεμένοι σταθερά με τον άξονα έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Επομένως ο αριστερός τροχός διανύει μεγαλύτερη απόσταση από ότι ο δεξιός, δηλαδή ο αριστερός τροχός «προπορεύεται» του δεξιού και ο άξονας παίρνει μια πλάγια θέση ως προς τον άξονα της γραμμής (θέση 2). Στη συνέχεια κινείται προς το μέσο της γραμμής. Κινούμενος ο άξονας προς τα δεξιά, τα σημεία επαφής του τροχού με τη σιδηροτροχιά μετατοπίζονται επί της επιφάνειας κύλισης προς τα αριστερά. Έτσι η ακτίνα κύλισης του αριστερού τροχού μειώνεται, ενώ του δεξιού αυξάνεται. Στη θέση συνάντησης του μέσου του άξονα με τον άξονα της γραμμής οι δύο τροχοί κινούνται με ίσες ακτίνες, οπότε ο άξονας κινείται ευθύγραμμα, όμως λόγω της πλάγιας θέσης του προς την δεξιά σιδηροτροχιά. Η αύξηση της ακτίνας κύλισης του δεξιού έναντι του αριστερού τροχού συνεχίζεται, με αποτέλεσμα ο δεξιός τροχός τώρα να είναι αυτός που διανύει μεγαλύτερη απόσταση από τον αριστερό, επομένως ο δεξιός τροχός «προπορεύεται» και κάποια στιγμή ο άξονας παίρνει θέση εγκάρσια ως προς τον άξονα της γραμμής (θέση 3) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται τώρα, όμως προς την αριστερή σιδηροτροχιά κ.ο.κ.

Υπενθυμίζεται ότι η προϋπόθεση για την παραπάνω διαδικασία είναι να υφίσταται μόνο κύλιση χωρίς ολίσθηση και οι τροχοί να έχουν κολουροκωνική επιφάνεια. Με αυτές τις προϋποθέσεις η διαγραφόμενη καμπύλη πλησιάζει την ημιτονοειδή και για το λόγο αυτό ονομάζεται συχνά «ημιτονοειδής κίνηση του συρμού». Στην πραγματικότητα όμως, λόγω της κυρτότητας της κωνικής διατομής και των δυνάμεων ανάρτησης τόσο του φορείου όσο και του αμαξώματος, αποκλίνει η διαγραφόμενη πορεία από αυτή της ημιτονοειδούς, όπως άλλωστε έχει διαπιστωθεί και από μετρήσεις των Γερμανικών Σιδηροδρόμων στην πράξη. Για το λόγο αυτό οι ονομασίες «κυματοειδής» ή «οφιοειδής» προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα [1].

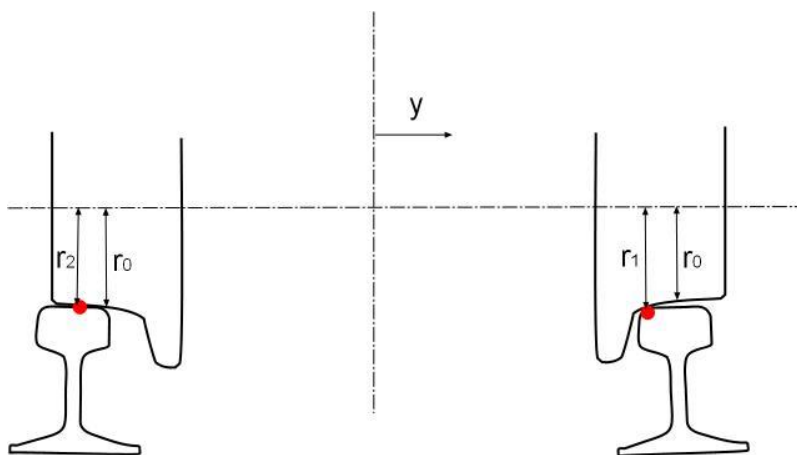
Στις πολύ μικρές ταχύτητες ο μηχανισμός που περιγράφηκε παραπάνω εξασφαλίζει την ευστάθεια των οχημάτων. Στις μεγάλες όμως ταχύτητες δημιουργούνται ταλαντώσεις και η κίνηση γίνεται ασταθής. Στην περίπτωση αυτή η ευστάθεια εξασφαλίζεται από την πρωτεύουσα ανάρτηση, η οποία περιορίζει το εύρος των ταλαντώσεων. Στην περίπτωση που οι εγκάρσιες μετατοπίσεις του τροχού υπερβούν το προβλεπόμενο

διάκενο μεταξύ εσωτερικής παρειάς σιδηροτροχιάς-εξωτερικής παρειάς όνυχα, η διατήρηση της κύλισης των τροχών επί των σιδηροτροχιών εξασφαλίζεται από την παρουσία των ονύχων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται και η καθοδήγηση των σιδηροδρομικών οχημάτων στις καμπύλες, όπως ήδη αναφέρθηκε [2].

3.5 Η ισοδύναμη κωνικότητα

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται στο δελτίο 519/12-04-05 της Διεθνούς Ένωσης Σιδηροδρόμων (UIC): «Ισοδύναμη κωνικότητα γ_e ενός δεδομένου σιδηροδρομικού άξονα είναι η εφαπτόμενη της κωνικότητας γ_0 ενός υποθετικού σιδηροδρομικού άξονα με τροχούς κωνικούς (εγκάρσια διατομή τριγωνική), του οποίου η εγκάρσια μετακίνηση y έχει το ίδιο κινηματικό μήκος κύματος L με το δεδομένο άξονα κατά την κίνησή του σε ευθυγραμμία και σε καμπύλα οριζοντιογραφικά τμήματα μεγάλης ακτίνας [2].

Η ισοδύναμη κωνικότητα είναι αδιάστατο μέγεθος. Ουσιαστικά εκφράζει τη διαφορά ακτινών κύλισης r_1 και r_2 των δύο τροχών ενός συγκεκριμένου σιδηροδρομικού άξονα για δεδομένη εγκάρσια μετακίνηση “ y ” του άξονα επί συγκεκριμένης επιδομής (Σχ. 3.12) [2].



Σχήμα 3.12: Ακτίνες κύλισης r_1, r_2 σιδηροδρομικού άξονα για εγκάρσια μετατόπιση του άξονα κατά Δy . Η τιμή της εξαρτάται από το εύρος γραμμής, την κλίση των σιδηροτροχιών ως προς τους στρωτήρες, την απόσταση των εξωτερικών παρειών των ονύχων των δύο τροχών του ίδιου άξονα, το διάκενο όνυχα τροχού – σιδηροτροχιάς, την εγκάρσια διατομή της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς και την εγκάρσια διατομή της επιφάνειας κύλισης του επισώτρου του τροχού (διατομή τροχού). Εξαρτάται δηλαδή τόσο από τα γεωμετρικά στοιχεία της γραμμής όσο και από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού, με αποτέλεσμα να συγκαταλέγεται στις παραμέτρους «διεπαφών» [2].

Η ισοδύναμη κωνικότητα αποτελεί ένα μετρήσιμο μέγεθος της επιρροής της αλληλεπίδρασης τροχού-σιδηροτροχιάς και της ποιότητας κύλισης. Οι οριακές τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας καθορίζονται με ακρίβεια στο δελτίο UIC518 της Διεθνούς Ένωσης Σιδηροδρόμων (UIC CODE 518[2003]), γενικά όμως θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,5 προκειμένου να παρέχει την απαραίτητη ευστάθεια στο όχημα και μεγαλύτερη από 0,1 για να εξασφαλίσει την ανάπτυξη των απαιτούμενων δυνάμεων επαναφοράς. Για συμβατικούς σιδηρόδρομικούς τροχοφόρους άξονες είναι της τάξης του 0.2-0.3 [4].

ΚΕΦ.4 Ερευνητικά πορίσματα σχετικά με την επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς

Τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά την επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς απασχόλησαν τους ερευνητές σχεδόν ταυτόχρονα με την εμφάνιση του σιδηρόδρομου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός μεν, παρατηρήθηκε αστάθεια κατά την κύλιση των σιδηροδρομικών οχημάτων, αφετέρου δε, εμφανίστηκαν φαινόμενα φθοράς σε τροχούς και σιδηροτροχιές. Ήδη από το 1821 ο «πατέρας του σιδηρόδρομου» George Stephenson παρατήρησε το φαινόμενο που σήμερα ονομάζεται «οφιοειδής κίνηση», ενώ ο πρώτος που ασχολήθηκε με τη μηχανική της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς ήταν ο Ferdinand Redtenbacher στα μέσα του 19^{ου} αιώνα.

Από τότε μέχρι και τα μέσα του 20^{ου} αιώνα πολλοί μηχανικοί, καθηγητές πολυτεχνικών σχολών και ερευνητές, όπως οι Hertz, Klingel, Boedecker, Carter, Fromm, Rocard, Matsudaira, de Pater, καθώς και οι πρόσφατοι Johnson, Wickens και Kalker, ασχολήθηκαν με τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς και με τις επιπτώσεις αυτών. Τα πορίσματα των ερευνών τους, οι επιλύσεις που πρότειναν, τα μοντέλα που χρησιμοποίησαν και οι θεωρίες που ανέπτυξαν αποτελούν τις βάσεις των σύγχρονων ερευνών και τις «ρίζες» της σημερινής εξέλιξης σ' αυτόν τον τομέα της μηχανικής.

4.1 19ος αιώνας: Από τον Stephenson στον Boedecker

Η ιστορία της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς ξεκινάει πριν από 150 χρόνια. Πρώτος ο Redtenbacher το 1855 ασχολήθηκε με το θέμα αυτό, λόγω των φθορών που παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες τροχών και σιδηροτροχιών. Την εποχή εκείνη δεν είχε διατυπωθεί ακόμα η θεωρία της επαφής, η οποία δημοσιεύθηκε από τον Hertz 27 χρόνια αργότερα. Το φαινόμενο της οφιοειδούς κίνησης, το οποίο πρώτα παρατηρήθηκε από τον Stephenson σχεδόν 200 χρόνια πριν με την εμφάνιση του σιδηρόδρομου, διατυπώθηκε μαθηματικά για πρώτη φορά από τον Klingel το 1883. Η θεωρία του επεκτάθηκε από τον Boedecker το 1887.

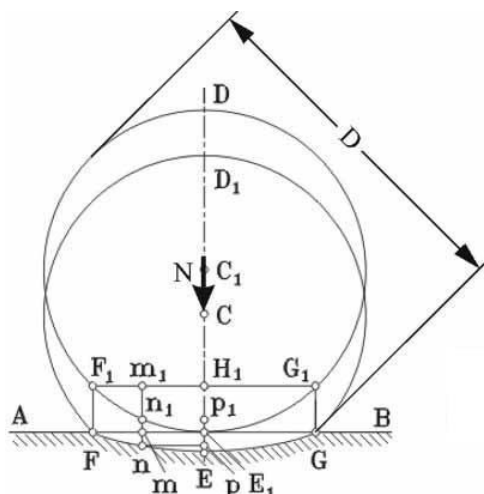
1821 Η κωνικότητα των τροχών διαπιστώθηκε για πρώτη φορά από το Βρετανό George Stephenson (1781-1848), ο οποίος κατασκεύασε την πρώτη σιδηροδρομική γραμμή στον κόσμο και κατέκτησε το ρεκόρ ταχύτητας με 39km/h γι' αυτό ονομάζεται «Πατέρας του Σιδηρόδρομου». Το φαινόμενο που σήμερα ονομάζεται 'κινηματική ταλάντωση' εκφράστηκε από αυτόν το 1821 ως εξής:

«Θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η μορφή των άκρων των σιδηροδρομικών τροχών είναι κωνική, και μάλιστα η εξωτερική διάμετρος είναι κατά 3/16 της ίντσας μικρότερη από την εσωτερική. Έτσι, από μία μικρή ανωμαλία στην κύλιση, οι τροχοί μπορεί να μετατοπισθούν λίγο προς τα δεξιά ή αριστερά. Όταν συμβεί αυτό, ο δεξιός τροχός κυλίζει με μεγαλύτερη διάμετρο από τον αριστερό και κατ' επέκταση αυτός που έπεται καθυστερεί σε σχέση με τον προπορευόμενο. Ταυτόχρονα, κινούμενος μπροστά ο αριστερός τροχός σταδιακά αρχίζει να κυλίζει με μεγαλύτερη διάμετρο, ενώ ο δεξιός με μικρότερη. Σ' αυτήν την περίπτωση ο δεξιός τροχός καθυστερεί σε σχέση με τον αριστερό, αλλά τον ξαναφθάνει κυλίνοντας όπως περιγράφηκε παραπάνω. Κερδίζοντας και χάνοντας έδαφος διαδοχικά, οι τροχοί εκτελούν τελικά μια κυματοειδή κίνηση επί των σιδηροτροχιών.» [7].

1855 Οι τάσεις μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς απασχόλησαν για πρώτη φορά τον μηχανικό Ferdinand Redtenbacher (1809-1869). Μόλις στα 24 του χρόνια έγινε καθηγητής στη Ζυρίχη και το 1841 απέκτησε την έδρα των μηχανολόγων μηχανικών στην Πολυτεχνική Σχολή της Καρλσρούης. Με κίνητρο τα φαινόμενα φθοράς που παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες τροχών και σιδηροτροχιών, το 1855 στο βιβλίο του “*Die Gesetze des Lokomotiv Baues*” (*The Laws of Construction of Locomotives*) [8] παρουσιάζεται μια προσπάθεια υπολογισμού των απαιτούμενων διαστάσεων των τροχών και εξετάζονται τα προβλήματα της μηχανικής επαφής. Με δεδομένη την ύπαρξη μιας οριακής τιμής για τις ορθές τάσεις η οποία ήταν άγνωστη, χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυσή του ένα αξονικό φορτίο (N_{ref}) και μία ακτίνα τροχού (R_{ref}) αναφοράς, που αντιστοιχούσαν σε όχημα και σιδηροτροχιά χωρίς φθορές. Το τελικό μοντέλο ήταν κύλινδρος επί επιπέδου και αφορούσε στο δισδιάστατο πρόβλημα επαφής. Θεωρώντας δύο άκαμπτα σώματα με μία ελαστική έδραση μεταξύ τους και κατανομή του κατακόρυφου φορτίου N σε μία εγκάρσια απόσταση b (Σχ. 4.1) κατέληξε στη σχέση:

$$\frac{N^2}{b^2 R} = \frac{N_{ref}^2}{b_{ref}^2 R_{ref}} = \sigma \alpha \theta \quad (4.1)$$

Έτσι, για κάθε φορτίο N μπορούσε να υπολογιστεί η ακτίνα R .

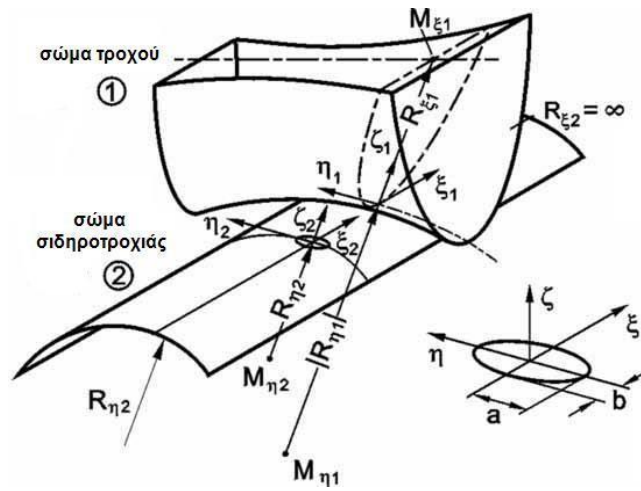


Σχήμα 4.1: Μοντέλο μηχανικής επαφής Redtenbacher [5]

Σήμερα είναι γνωστό ότι το μοντέλο έδρασης που χρησιμοποιήθηκε από τον Redtenbacher δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων επαφής. Παρόλα αυτά, επειδή οι επιφάνειες τόσο του επισώτρου των τροχών όσο και των σιδηροτροχιών εμφανίζουν τραχύτητα, η υπόθεση της ελαστικής έδρασης δεν είναι τελείως άστοχη. Στην πραγματικότητα η αληθινή επίλυση βρίσκεται μεταξύ της επίλυσης του Redtenbacher και του Hertz [9].

1880 Ο Heinrich Hertz (1857-1894) έγινε γνωστός για την έρευνά του στην περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [10]. Στον τομέα της μηχανικής συνέβαλε κυρίως με τη δημοσίευση δύο άρθρων του που είχαν σαν θέμα τη μηχανική της επαφής [11,12]. Μεταξύ Οκτωβρίου και Δεκεμβρίου 1880 ο Hertz ασχολήθηκε με τα προβλήματα που προκύπτουν από την επαφή. Τα αποτελέσματα της έρευνάς του παρουσιάστηκαν σε μια διάλεξη τον Ιανουάριο του 1881 αν και το πρώτο άρθρο του δημοσιεύτηκε το 1882 λόγω των ενστάσεων του Kirchhoff ως κριτικού της εργασίας του, που εν τέλει αποδείχθηκαν λανθασμένες [10]. Σ' αυτό το άρθρο αναφερόταν για πρώτη φορά το πρόβλημα της επαφής μεταξύ τροχού - σιδηροτροχιάς και η θεωρία του Hertz βρήκε σύντομα εφαρμογή στη σιδηροδρομική μηχανική. Η επίλυσή του βασίστηκε στις ακόλουθες υποθέσεις: ύπαρξη πλήρους γραμμικότητας (π.χ. γραμμικές εξισώσεις κίνησης), μηδενική τριβή, ισοτροπία και ομοιογένεια υλικών, θεώρηση των δύο "σωμάτων" ως ημιχώροι και των επιφανειών τους ως πολυώνυμα δευτέρου βαθμού. Επομένως, στην περίπτωση που τα επίπεδα των κύριων ακτίνων καμπυλότητας συμπίπτουν, απαιτούνται δύο εξισώσεις ακτίνων καμπυλότητας για να περιγραφεί η

επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων (Σχ. 4.2). Στο Σχ. 4.2 με R_{ξ_1} συμβολίζεται η ακτίνα κύλισης του τροχού, με R_{η_1} η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας κύλισης του τροχού, με R_{η_2} η ακτίνα καμπυλότητας της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και το $R_{\xi_2} = \infty$. Τα (ξ_1, η_1, ζ_1) και (ξ_2, η_2, ζ_2) είναι τα συστήματα αξόνων τροχού και σιδηροτροχιάς αντίστοιχα. Κατά την επαφή των δύο σωμάτων, τα δύο συστήματα αξόνων (ξ_1, η_1, ζ_1) και (ξ_2, η_2, ζ_2) συμπίπτουν.



Σχήμα 4.2: Ακτίνες καμπυλότητας τροχού/σιδηροτροχιάς – θεωρία Hertz [10]

Στην ειδική περίπτωση της επαφής μεταξύ δύο σφαιρών ή μιας σφαίρας και ενός επιπέδου, η αναλυτική επίλυση δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{2E} NR \right]^{1/3} \quad (4.2)$$

$$\delta = \frac{c^2}{R} \quad (4.3)$$

$$p_o = \frac{3}{2\pi c^2} N \quad (4.4)$$

όπου c [m] η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής, ν ο συντελεστής Poisson, E ο συντελεστής Young και p_o [N/m²] η μέγιστη τιμή πίεσης. Με αντικατάσταση της εξίσωσης (4.2) στην εξίσωση (4.4) προκύπτει:

$$\frac{N}{R^2} = \frac{2\pi^3 p_o^3}{3} \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right)^2 \quad (4.5)$$

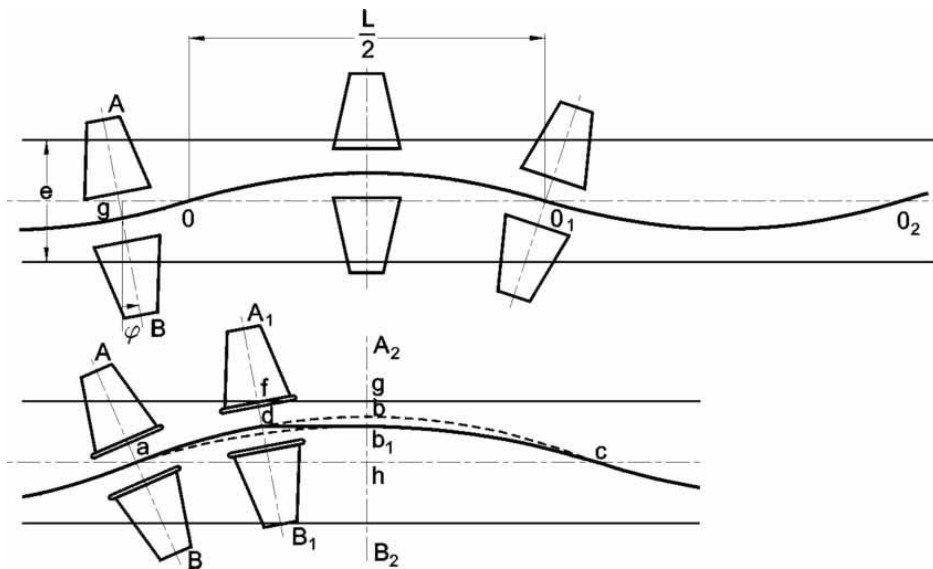
1883 Ο Johann Klingel (1819-1888) φοίτησε στην Πολυτεχνική Σχολή της Καρλσρούης. Το 1838 που κατασκευαζόταν η σιδηροδρομική γραμμή μεταξύ

Καρλσρούης και Χάιντελμπεργκ εικάζεται ότι εργαζόταν εκεί ως εκπαιδευόμενος. Το 1844 έγινε σιδηροδρομικός μηχανικός στο Μπάντεν και το 1883 συνταξιοδοτήθηκε. Την ίδια χρονιά δημοσιεύθηκε το μοναδικό του άρθρο με τίτλο “Über den Lauf von Eisenbahnwagen auf gerader Bahn” (The running of railway vehicles on straight track) [13], που είναι παγκοσμίως γνωστό στην επιστημονική κοινότητα των σιδηροδρομικών μηχανικών.

Το θέμα του ήταν η κυματοειδής συμπεριφορά που παρουσιάζεται κατά την κύλιση ένας μεμονωμένου σιδηροδρομικού άξονα. Το μήκος κύματος αυτής της ημιτονοειδούς κίνησης ορίστηκε για πρώτη φορά από τον Klingel ως:

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{re}{\gamma}} \quad (4.6)$$

όπου r [m] η ακτίνα κύλισης, $2e$ [m] η απόσταση μεταξύ των τροχών και γ η κωνικότητα (Σχ. 4.3).



Σχήμα 4.3: Ημιτονοειδής κίνηση ενός μεμονωμένου σιδηροδρομικού άξονα με κωνική διατομή τροχών [10]

Το μήκος κύματος L , που είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα V , αντιστοιχεί σε συχνότητα $f = V/L$ γνωστή ως συχνότητα του Klingel. Φαίνεται λοιπόν, ότι η αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται και την αύξηση της συχνότητας της κινηματικής ταλάντωσης.

Στην εξίσωση (4.6) μπορεί να δοθεί και άλλη ερμηνεία. Με γνωστό το μήκος κύματος L , η αποκαλούμενη ισοδύναμη κωνικότητα εκφράζεται ως εξής:

$$\gamma_{equiv} = \left[\frac{2\pi}{L} \right]^2 e_o r_o \quad (4.7)$$

Δεν είναι γνωστό ποιος χρησιμοποίησε πρώτος με αυτήν τη μορφή την εξίσωση (4.6), εικάζεται όμως ότι είναι ο Carl Theodor Müller (1903-1970), ένας ιδιοφυής μηχανικός των Γερμανικών Σιδηροδρόμων. Σήμερα η ισοδύναμη κωνικότητα ενός δεδομένου σιδηροδρομικού άξονα ορίζεται, σύμφωνα με το δελτίο 519/12-04-05 της Διεθνούς Ένωσης Σιδηροδρόμων (UIC), ως η εφαπτομένη της κωνικότητας ενός υποθετικού σιδηροδρομικού τροχοφόρου άξονα με τροχούς κωνικούς, του οποίου η εγκάρσια μετακίνηση y έχει το ίδιο κινηματικό μήκος κύματος L με τον δεδομένο τροχοφόρο άξονα κατά την κίνησή του σε ευθυγραμμία και σε καμπύλα οριζοντιογραφικά τμήματα μεγάλης ακτίνας [2].

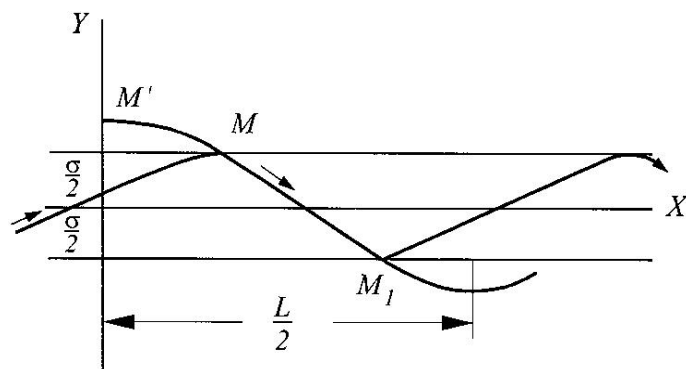
1885 Ο Christoph Boedecker (1845-1937) ακολούθησε τα βήματα του Klingel και επέκτεινε τη θεωρία του. Σπούδασε στην Τεχνική Ακαδημία του Βερολίνου και το 1876 ξεκίνησε να εργάζεται στους βερολινέζικους σιδηρόδρομους. Οι διαλέξεις του μεταξύ 1880 και 1886 στο Technische Hochschule του Βερολίνου αποτέλεσαν τη βάση του βιβλίου του [14], το οποίο όταν εκδόθηκε ο ίδιος εργαζόταν στους σιδηροδρόμους του Ανόβερου.

Χρησιμοποιώντας ως μοντέλο ένα διαξονικό όχημα με άκαμπτη πρωτεύουσα ανάρτηση, άκαμπτο πλαίσιο και τροχούς κωνικούς κατέληξε στο συμπέρασμα πως όταν πρόκειται για ένα διαξονικό όχημα το οποίο εκτελεί κυματοειδή κίνηση, οι σχέσεις της απλής κινηματικής παύουν να εφαρμόζονται, διότι εμφανίζονται πάντα σχετικές κινήσεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς και γι' αυτό πρέπει να συνυπολογίζονται οι εγκάρσιες δυνάμεις. Για να μπορέσουν να συμπεριληφθούν οι δυνάμεις αυτές εισήχθη στους υπολογισμούς του ο νόμος του Coulomb και, αγνοώντας τις επιρροή της αδράνειας, οι εξισώσεις κίνησης μετασχηματίστηκαν ως εξής:

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{re}{\gamma} \left(1 + \frac{b^2}{e^2}\right)}, \quad (4.8)$$

όπου επιπρόσθετα από τους όρους της εξίσωσης (4.6) υπεισέρχεται το $2b$ [m] που εκφράζει την απόσταση μεταξύ των αξόνων του φορείου.

Η κίνηση που προκύπτει όταν ο εξωτερικός τροχός του μπροστινού άξονα προσπίπτει στη σιδηροτροχιά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Μη γραμμική ασταθής κυματοειδής κίνηση του μπροστινού άξονα σε διαξονικό φορείο [15]

4.2 20ος αιώνας: Από τον Carter στον Kalker

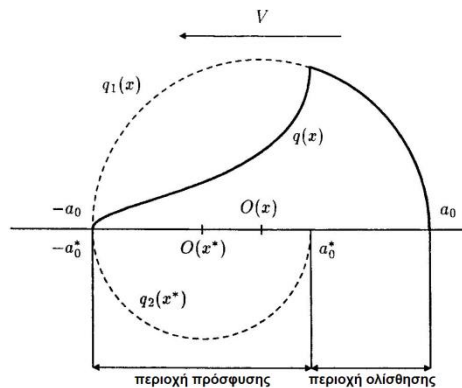
Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα δημοσιεύθηκαν τα αποτελέσματα της ερευνητικής δραστηριότητας του Carter σχετικά με την επίδραση των δυνάμεων ερπυσμού στην κύλιση ενός διαξονικού σιδηροδρομικού οχήματος. Λίγο μετά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα οι δημοσιεύσεις των σύγχρονών μας Johnson και Kalker αποτελούν μέχρι σήμερα σημείο αναφοράς των ερευνητικών δραστηριοτήτων και των μαθηματικών επιλύσεων [16].

1916-1928 Το θέμα των ηλεκτρικών μηχανών έλξης απασχόλησε πρώτο τον Frederick William Carter (1870-1952), ο οποίος ως υπεύθυνος του τμήματος της ηλεκτρικής έλξης στην εταιρεία General Electrics σε Αμερική και Αγγλία, εξέδωσε το 1922 το βιβλίο του “Railway Electric Traction” [17]. Νωρίτερα, το 1916, παρουσιάστηκε στο Ινστιτούτο Πολιτικής Μηχανικής του Λονδίνου το άρθρο του με θέμα “The electric locomotive” [18], στο οποίο αναφέρθηκε το πρόβλημα της ευστάθειας των μηχανών έλξης.

Οι υποθέσεις του ήταν περίπου ίδιες με αυτές στο βιβλίο του Boedeker. Οι βασικές διαφορές ήταν ότι συνυπολογίζονταν οι δυνάμεις αδράνειας και αντί για το νόμο του Coulomb χρησιμοποιούνταν γραμμικές εξισώσεις για να υπολογισθούν οι δυνάμεις ολίσθησης. Εν τούτοις τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ήταν όμοια με του Boedeker, δηλαδή ένα διαξονικό όχημα με άκαμπτο πλαίσιο και χωρίς έλξη εμφανίζει πάντοτε αστάθεια στην κύλιση. Επιπλέον αποδείχθη ότι η ευστάθεια μπορεί να επιτευχθεί με χρήση κατάλληλης δευτερεύουσας ανάρτησης.

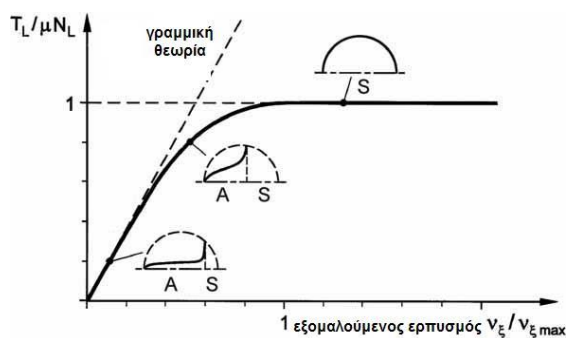
Το 1926 στη δημοσίευση του άρθρου του σχετικά με τη μηχανική της επαφής, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των ερευνών του σχετικά με τη γραμμική σχέση μεταξύ ερπυσμού και δύναμης ολίσθησης [19]. Χρησιμοποιήθηκε ένα

δισδιάστατο μοντέλο ενός κυλίνδρου απείρου μήκους, ο οποίος κυλίνει επάνω σε επίπεδο. Και τα δύο σώματα θεωρήθηκαν ελαστικοί ημι-χώροι και έγινε χρήση των θεωρητικών αποτελεσμάτων του Love. Το συμπέρασμα ήταν ότι στην μπροστινή αιχμή υπάρχει πάντα μία περιοχή πρόσφυσης ενώ στο τέλος εμφανίζεται πλήρης ολίσθηση και η επαπτομενική κατανομή της τάσης προκύπτει από τη διαφορά των δύο κύκλων (Σχ. 4.5).



Σχήμα 4.5: Εφαπτομενική κατανομή των τάσεων στην περιοχή επαφής που προκύπτει κατά την κύλιση κυλίνδρου επί επιπέδου [15]

Έτσι, δόθηκε μία αναλυτική επίλυση για τη δύναμη ερπυσμού (Σχ. 4.6). Όπως παρατηρήθηκε από τον ίδιο, για τιμές ερπυσμού μικρότερες της μονάδας η επίλυση είναι παραβολή, ενώ για μεγαλύτερες τιμές η δύναμη ερπυσμού παραμένει σταθερή.



Σχήμα 4.6: Δύναμη ερπυσμού για δισδιάστατη επαφή [16]

Η έρευνά του συνεχίσθηκε σχετικά με το θέμα της ευστάθειας και το 1928 δημοσιεύθηκε ένα άρθρο που αφορούσε αποκλειστικά το θέμα αυτό [20].

1926-1941 Την ίδια περίοδο με τον Carter το θέμα του ερπυσμού απασχολούσε έναν ακόμα μηχανικό στο Βερολίνο, τον Hans Fromm (1892-1952). Χρησιμοποιώντας επίσης το νόμο τριβής του Coulomb, θεώρησε στο μοντέλο του τα σώματα ως κυλίνδρους και όχι ημι-χώρους. Το 1926 παρουσιάστηκε η διδακτορική του

διατριβή με θέμα “Berechnung des Schlupfes beim Rollen deformierbarer Scheiben” (Creep analysis of rolling elastic disc) [21]. Από το 1931 μαζί με τους Becker και Maruhn άρχισαν να εξετάζουν το φαινόμενο εμφάνισης ξαφνικών δονήσεων στο σύστημα οδήγησης, το οποίο εμφανίσθηκε στα πρώτα στάδια της τεχνολογίας του αυτοκινήτου [22]. Η έρευνά του συνεχίσθηκε μέχρι το 1941 καθώς το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στο σύστημα προσγείωσης των αεροπλάνων [23]. Την ίδια περίοδο η έρευνά του επεκτάθηκε επίσης, στη θεωρία των υλικών [24].

1935 Το 1935 στη Γαλλία δημοσιεύθηκε το άρθρο του Yves-André Rocard (1903-1992) με τίτλο “La Stabilité de route des Locomotives”, το οποίο αποτελούνταν από δύο μέρη το δεύτερο εκ των οποίων σε συνεργασία με τον Julién [25, 26]. Σε κανένα από τα άρθρα των συγγραφέων δε γινόταν αναφορά στα άρθρα του Carter [18, 19, 20], άρα εικάζεται ότι μπορεί να μην τους ήταν γνωστά. Το πρώτο μέρος της εργασίας του Rocard αναφερόταν στην ευστάθεια ενός μεμονωμένου φορείου και προτεινόταν λύσεις έναντι της αστάθειας. Όπως και στο μοντέλο του Carter, το πλαίσιο και η πρωτεύουσα ανάρτηση θεωρήθηκαν πλήρως άκαμπτες. Οι εξισώσεις κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επίσης όμοιες με αυτές που διατυπώθηκαν από τον Carter. Η έρευνα του Rocard επεκτάθηκε στην περίπτωση φορείου αμελητέας μάζας ελαστικά συνδεδεμένου με σασί, όπου αποδείχθη ότι μπορεί να επιτευχθεί σταθεροποίηση του φορείου εάν επιλεγεί ανάρτηση με κατάλληλη ελαστικότητα. Τέλος, προκειμένου να επιτευχθεί η ευστάθεια, προτάθηκε η χρήση τροχών διαφορετικής κωνικότητας μεταξύ του μπροστινού και πίσω άξονα.

1952 Ο Tadashi Matsudaira σπούδασε στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο και μετά το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου εργάστηκε στο εργαστήριο των Ιαπωνικών Σιδηροδρόμων. Η έρευνά του επικεντρώθηκε κυρίως στα δυναμικά φαινόμενα που εμφανίζονται στα σιδηροδρομικά οχήματα. Το άρθρο του που δημοσιεύθηκε το 1952 [27] με θέμα την ανάλυση της γραμμικής ευστάθειας, βραβεύθηκε πέντε χρόνια αργότερα. Παρόλα αυτά, επειδή ήταν γραμμένο στα ιαπωνικά δεν μπόρεσε να αξιοποιηθεί από τους Ευρωπαίους ερευνητές. Το 1960 μεταφράστηκε και δημοσιεύτηκε η περίληψή του από τον ORE (Office of Research and Experiment (ORE) of the International Unions of Railways (UIC))

[28], το πλήρες κείμενο όμως δεν μεταφράστηκε ποτέ, ώστε να δημοσιευθεί σε κάποιο τεχνικό περιοδικό. Το έναυσμα της έρευνάς του ήταν η προσπάθεια των Ιαπωνικών Σιδηροδρόμων να αυξήσουν τις ταχύτητές τους.

Ο Matsudaira ερεύνησε την κυματοειδή κίνηση ενός διαξονικού οχήματος. Η προσέγγισή του ήταν παρόμοια με αυτή που χρησιμοποίησαν ο Carter [20] και ο Rocard [25], το μοντέλο του όμως διέφερε σε δύο βασικά σημεία. Αφενός θεωρήθηκε ότι η ανάρτηση έχει εγκάρσια και διαμήκη ακαμψία σε αντίθεση με τη θεώρηση των Carter και Rocard για άκαμπτο πλαίσιο. Αφετέρου, προκειμένου να προσεγγισθούν οι φθαρμένες διατομές τροχών και σιδηροτροχιών, εισήχθησαν τα κυκλικά τόξα. Η χρήση των κυκλικών διατομών περιορίστηκε εντούτοις, στον προσδιορισμό της ισοδύναμης κωνικότητας. Η δυναμική συμπεριφορά του διαξονικού φορείου περιγράφηκε με εξισώσεις κίνησης 6^{ου} βαθμού. Η κρίσιμη ταχύτητα και η συχνότητα της κυματοειδούς κίνησης του διαξονικού οχήματος προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τα κριτήρια ευστάθειας Routh-Hurwitz και κάνοντας κάποιες απλοποιήσεις. Το πιο σημαντικό του εύρημα ήταν η ύπαρξη δύο κυματοειδών κινήσεων οι οποίες ονομάστηκαν πρωτεύουσα και δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα κυματοειδής κίνηση εμφανιζόταν σε οχήματα που κινούνταν με χαμηλές ταχύτητες και παρουσίαζαν μεγάλες εγκάρσιες μετακινήσεις του αμαξώματος. Η δευτερεύουσα κυματοειδής κίνηση παρατηρείτο σε πιο υψηλές ταχύτητες και προκαλούσε εντονότερες κινήσεις στους άξονες.

1956-1964 Ο de Pater ήταν ο πρώτος ερευνητής από τον οποίο έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η μη-γραμμική οφιοειδής κίνηση. Εισήχθη, έστω και προσεγγιστικά, η μη-γραμμικότητα στην ανάλυση της ευστάθειας, καθώς ούτως ή άλλως οι γεωμετρικές και φυσικές σχέσεις της μηχανικής επαφής είναι στην πλειοψηφία τους μη-γραμμικές. Η ερευνητικές του εργασίες [29, 30] χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στη διατριβή του Bommel το 1964 [31]. Σήμερα παρουσιάζουν ενδιαφέρον κυρίως από θεωρητική άποψη.

1958 Το τρισδιάστατο πρόβλημα της επαφής κατά την κύλιση απασχόλησε πρώτο τον ερευνητή Kenneth Johnson (1924-). Τα δύο άρθρα του δημοσιεύτηκαν το 1958 [32, 33] και παρουσιάζουν ιδιαίτερο θεωρητικό ενδιαφέρον. Στο πρώτο εξετάζεται η επιρροή της ροπής περιστροφής (spin) κατά την κύλιση ενώ στο

δεύτερο λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς η εγκάρσια και διαμήκης αντίσταση ολίσθησης. Το μειονέκτημα και των δύο άρθρων ήταν ότι αναφέρονταν αποκλειστικά σε περιπτώσεις που οι επιφάνειες επαφής είναι κυκλικές.

1965 Ο Alan Wickens, λόγω του γνωστικού του υπόβαθρου στην αεροναυτική, διέθετε ιδιαίτερη εξοικείωση με τα θέματα της ευστάθειας. Στα πρώτα του άρθρα [34, 35, 36] γίνονταν αναφορές μόνο στους Matsudaira [28] και Kovalev [37], που σημαίνει ότι προφανώς του ήταν άγνωστες οι ερευνητικές εργασίες των Carter και Rocard στον τομέα της ευστάθειας των μηχανών έλξης. Σύμφωνα με τον Wickens επαναπροσδιορίστηκαν οι εξισώσεις κίνησης συνυπολογίζοντας την επιρροή παραγόντων όπως π.χ. η ακαμψία, που παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση ύπαρξης φθαρμένων τροχών και υγρασίας. Μην αγνοώντας λοιπόν, την επιρροή διαφόρων παραγόντων τέθηκαν με την έρευνά του οι βάσεις για τον καλύτερο σχεδιασμό των φορείων. Με τις πολυπαραμετρικές του διερευνήσεις απεδείχθη ότι επιλέγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους μπορούν να αποφευχθούν φαινόμενα όπως π.χ. η αστάθεια του αμαξώματος.

1967 Η γραμμική θεωρία του Joost Kalker (1933-2006) χρησιμοποιείται σήμερα από τους περισσότερους ερευνητές που μελετούν τη δυναμική συμπεριφορά των σιδηροδρομικών οχημάτων. Τόσο στη διατριβή του [38] όσο και στη μετέπειτα ερευνητική δραστηριότητα του Kalker χρησιμοποιήθηκαν όσο το δυνατόν λιγότερες υποθέσεις. Έτσι, στους υπολογισμούς του λαμβάνονται υπόψη η διαμήκης και εγκάρσια αντίσταση ολίσθησης καθώς και η ροπή περιστροφής (spin). Στη διδακτορική του διατριβή χρησιμοποιήθηκε η ελλειπτική επιφάνεια επαφής μεταξύ τροχού - σιδηροτροχιάς με διαμέτρους $2a$ και $2b$. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν πλήρως γραμμικό και έχει ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{Bmatrix} = Gab \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & \sqrt{ab}C_{23} \\ 0 & -\sqrt{ab}C_{23} & abC_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ \varphi_z \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

όπου

F_x, F_y, M_z = δυνάμεις ολίσθησης και ροπή του spin

v_x, v_y, φ_z = μειωμένες ολισθήσεις (διαμήκης, εγκάρσια) και αντίστοιχο spin

C_{ik} = οι συντελεστές ολίσθησης του Kalker

Στο βιβλίο του Kalker “Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact”, που κυκλοφόρησε το 1990 [39], παρουσιάστηκε μια σύνοψη των ερευνών του στη μηχανική της επαφής και κυρίως στις αριθμητικές μεθόδους που τη διέπουν.

4.3 Σύγχρονες προσεγγίσεις και υπολογιστικές μέθοδοι

Η επαφή μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς έγκειται στο συνδυασμό του προβλήματος της γεωμετρίας της επαφής και του τρόπου αλληλεπίδρασης των δύο σωμάτων λόγω της ελαστικότητάς τους. Το θέμα της γεωμετρίας συνήθως αντιμετωπίζεται με την επίλυση μιας σειράς αλγεβρικών εξισώσεων. Το θέμα του μηχανισμού της επαφής είναι πιο σύνθετο. Οι νέες έρευνες αποδεικνύουν ότι οι υποθέσεις του Hertz περί ελλειπτικής επιφάνειας επαφής στην περίπτωση του τροχού και της σιδηροτροχιάς δεν οδηγούν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι οι ακτίνες καμπυλότητας αλλάζουν σημαντικά κατά μήκος των διατομών τους.

Ως εκ τούτου οι νέες μέθοδοι που αναπτύσσονται βασίζονται μεν στη θεωρία του Hertz, προσεγγίζουν όμως το θέμα του υπολογισμού της επιφάνειας επαφής είτε με τη χρήση ισοδύναμων ελλείψεων για να προσομοιώσουν την πραγματική επιφάνεια, είτε με χρήση της λεγόμενης ελαστικής διείσδυσης, η οποία είναι συνάρτηση του στατικού κατακόρυφου φορτίου και της μορφής της διατομής του τροχού.

1984 Το 1984 η επιφάνειας επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς προσδιορίστηκε από τους Knothe και Le-The με τη χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου σε ισοδύναμο φορέα. Η επιφάνεια επαφής χωρίζεται σε λωρίδες. Για να μειωθεί ο αριθμός των αγνώστων και ταυτόχρονα να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της επαφής, γίνεται η υπόθεση μιας ελλειπτικής κατανομής των τάσεων κατά μήκος κάθε λωρίδας και αναγνωρίζεται η δυνατότητα της ύπαρξης ανεξάρτητων γειτονικών λωρίδων [40].

1991 Το 1991 ο Elkins παρουσίασε την state-of-the-art μελέτη του σχετικά με την πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση στον υπολογισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας επαφής [41].

1993 Το 1993 ερευνάται από τους Pascal και Sauvage η δυνατότητα περιγραφής της επαφής δύο σημείων χρησιμοποιώντας είτε δύο ξεχωριστές ελλείψεις είτε μία ισοδύναμη. Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων συγκρίθηκαν με τα

αποτελέσματα του Kalker, όπου διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση της χρήσης των δύο ελλείψεων υπήρχε αρκετά ικανοποιητική συμφωνία με τον κώδικα CONTACT (Kalker, 1990) [5], σε αντίθεση με τη χρήση μεμονωμένης έλλειψης, όπου υπήρχε σαφής διαφοροποίηση [42].

- 1996 Το 1996 προτάθηκε από τους Kik και Piotrowski μία μη-επαναληπτική προσέγγιση εκτίμησης της επιφάνειας επαφής, η οποία προσδιορίζεται από την περιοχή αλληλοδιείσδυσης των σωμάτων, που λαμβάνει υπόψη την ελαστική παραμόρφωση που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Boussinesq [43]. Αντίστοιχη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε, την ίδια χρονιά, από τους Linder και Brauchli [44], με διαφορά τον τρόπο υπολογισμού του βάθους αλληλοδιείσδυσης. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μια προσαρμοσμένη εφαρμογή του αλγόριθμου FASTSIM (Kalker, 1990) [5] για τον υπολογισμό των εφαπτομενικών δυνάμεων.
- 1999 Το 1999 παρουσιάζεται από τον Harder ο υπολογισμός της επιφάνειας επαφής στην περίπτωση που η ακτίνα κεφαλής της σιδηροτροχιάς μεταβάλλεται. Σύμφωνα με την επίλυσή του θεωρείται ισοδύναμη έλλειψη, η οποία ορίζεται από δύο καμπυλότητες [45]. Μία παρόμοια προσέγγιση αναφέρεται και από τους Alonso και Giménez το 2005 [46].
- 2005-2008 Προκειμένου να μελετήσουν τη μη ελλειπτική επιφάνεια επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς οι Ayasse και Chollet [47] πρότειναν μία μέθοδο που βασίζεται στην αλληλοδιείσδυση των διατομών των δύο σωμάτων. Λίγα χρόνια αργότερα οι Piotrowski και Kik [48] παρουσίασαν ένα απλοποιημένο μοντέλο για τα προβλήματα επαφής που εμφανίζονται στη μη-ελλειπτική επιφάνεια επαφής. Στην επίλυση που προτείνουν η κατανομή της ορθής πίεσης θεωρήθηκε ημι-ελλειπτική ως προς την κατεύθυνση κύλισης και η επιφάνεια επαφής υπολογίσθηκε με βάση τη διείσδυση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τα μοντέλα επαφής και την επιρροή τους στη δυναμική του οχήματος και ιδιαίτερα στην περίπτωση επαφής πολλών σημείων έγινε από τους Piotrowski και Chollet [49]. Οι Pombo και Ambrosio [50] πρότειναν μία υπολογιστική μέθοδο πρόβλεψης της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς εισάγοντας στους υπολογισμούς οι διατομές με διανυσματική τρισδιάστατη μορφή.

Ωστόσο, όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και απαιτούν αναπόφευκτα υψηλό υπολογιστικό κόστος, τη στιγμή που το ζητούμενο είναι η μείωση του χρόνου και του κόστους υπολογισμού σε συνδυασμό με τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επιπλέον η ελαστική διείσδυση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της επιφάνειας επαφής των δύο σωμάτων προκύπτει θεωρητικά με χρήση κατάλληλων σχέσεων υπολογισμού, ως συνάρτηση του στατικού φορτίου και ενός ελαστικού συντελεστή που εξαρτάται από τη μορφή της διατομής του τροχού και την κύρια ακτίνα κύλισης [51].

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΚΕΦ.5 Απεικόνιση σιδηροτροχιάς σε καρτεσιανό επίπεδο

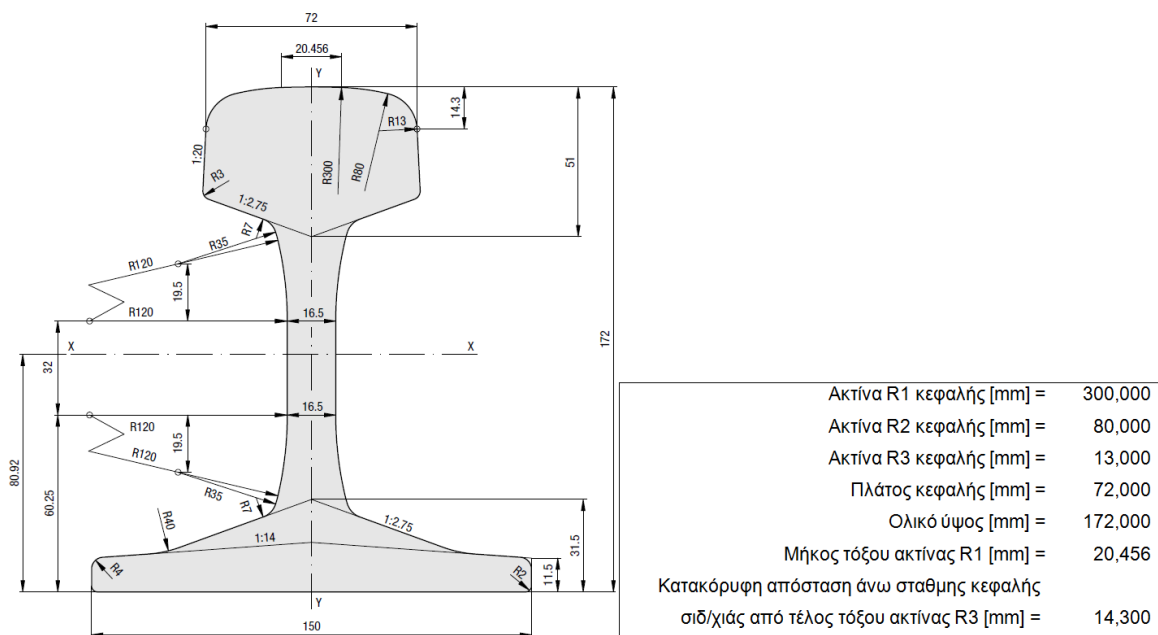
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς για απεικόνιση αυτής στο καρτεσιανό επίπεδο. Η κεφαλή των ευρέως χρησιμοποιούμενων σιδηροτροχιών τύπου Vignole αποτελείται από τόξα κύκλων τριών διαφορετικών ακτινών.

Με βάση την επίλυση που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων και των άκρων των αντίστοιχων κυκλικών τόξων που απαρτίζουν την κεφαλή. Ο υπολογισμός βασίζεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς, στη χρήση πολικών συντεταγμένων και στη θεωρία των κωνικών τομών.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά δεδομένα που αφορούν σε σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60), αλλά η μέθοδος μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να γενικευθεί για οποιαδήποτε σιδηροτροχιά παρόμοιας διατομής.

5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιάς διατομής 60E1(UIC60)

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η διατομή της σιδηροτροχιάς 60E1(UIC60) και παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της [52].



Σχήμα 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιάς διατομής 60E1(UIC60)

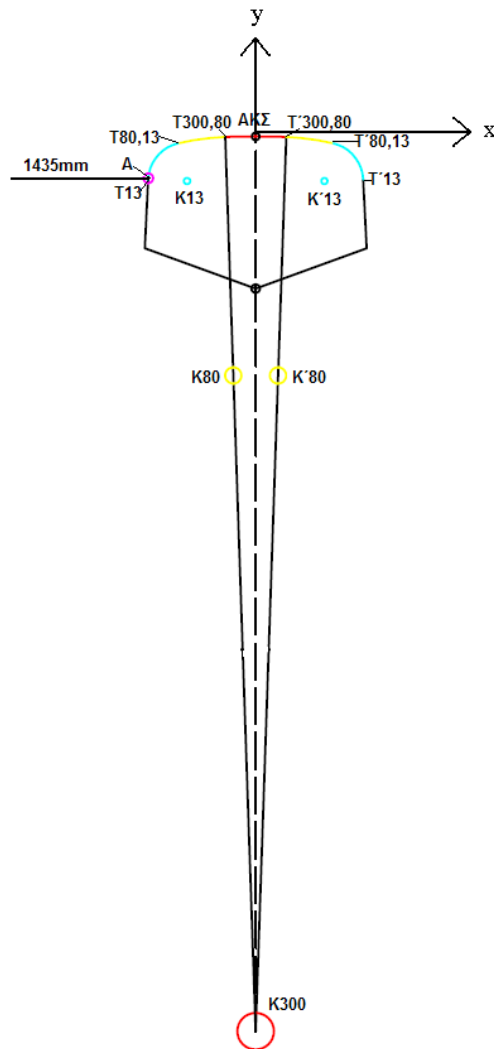
Η κεφαλή της σιδηροτροχιάς διατομής 60E1 (UIC60) αποτελείται από τα τόξα τριών κύκλων με ακτίνες $R_1=300\text{mm}$ (εφεξής R300), $R_2=80\text{mm}$ (εφεξής R80) και $R_3=13\text{mm}$ (εφεξής R13). Από τα κατασκευαστικά στοιχεία της σιδηροτροχιάς φαίνεται ότι το μήκος τόξου του κύκλου με ακτίνα R300 ισούται με 20.456mm και το συνολικό πλάτος της κεφαλής ισούται με 72mm. Επίσης η κατακόρυφη απόσταση της άνω στάθμης κεφαλής σιδηροτροχιάς (εφεξής ΑΚΣ) από το τέλος του τόξου του κύκλου ακτίνας R13 είναι 14.3mm.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το σημείο στο οποίο μετράται το εύρος γραμμής απέχει κατακόρυφη απόσταση 14mm από το ΑΚΣ, επομένως δεν συμπίπτει με το τέλος του τόξου του κύκλου ακτίνας R13. Δεδομένου ότι η στροφή της σιδηροτροχιάς για την επίτευξη της κλίσης 1:40 γίνεται ως προς αυτό το σημείο (και όχι ως προς τη μέση του πέλματός της) για να επιτευχθεί η απόσταση των 1435mm που αντιστοιχεί στο εύρος της γραμμής, υπολογίσθηκαν και οι καρτεσιανές συντεταγμένες του εν λόγω σημείου.

5.2 Ορισμός συστήματος συντεταγμένων και χαρακτηριστικών σημείων

Ως αρχή O (0,0) του συστήματος συντεταγμένων Oxy ορίζεται αυθαίρετα το σημείο ΑΚΣ. Θεωρούνται επίσης (Σχ. 5.2):

- K300, K80, K13 τα κέντρα των κύκλων με ακτίνες $R_1=300\text{mm}$, $R_2=80\text{mm}$ και $R_3=13\text{mm}$.
- T13 και T'13 το τέλος του τόξου του κύκλου ακτίνας $R_3=13\text{mm}$ εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας της σιδηροτροχιάς.
- T80,13 και T'80,13 το τέλος του τόξου του κύκλου ακτίνας $R_2=80\text{mm}$ εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας της σιδηροτροχιάς.
- T300,80 και T'300,80 το τέλος του τόξου του κύκλου ακτίνας $R_1=300\text{mm}$ εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας της σιδηροτροχιάς.
- A, το σημείο μέτρησης του εύρους γραμμής (14mm κατακόρυφη απόσταση από το ΑΚΣ).



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικά σημεία σιδηροτροχιάς 60E1(UIC60)

Με βάση τα κατασκευαστικά στοιχεία της σιδηροτροχιάς και δεδομένου ότι οι συντεταγμένες του ΑΚΣ είναι $(x,y)=(0,0)$ εφόσον θεωρήθηκε αρχή του συστήματος συντεταγμένων Oxy προκύπτει ότι:

- $K300: (x_{K300}, y_{K300}) = (0, -300)$
- $T13: (x_{T13}, y_{T13}) = (-36, -14.3)$
- $T'13: (x_{T'13}, y_{T'13}) = (36, -14.3)$

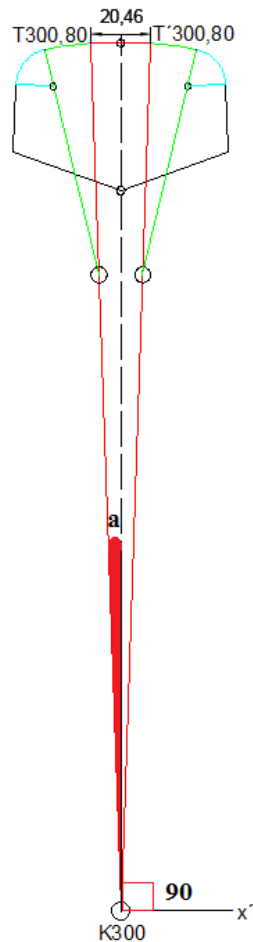
5.3 Υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων

Ο υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων $T300,80$, $T'300,80$, $K80$ και $K'80$ γίνεται με καταρχήν υπολογισμό των πολικών τους συντεταγμένων και εν συνεχεία μετατροπή τους σε καρτεσιανές. Υπενθυμίζεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις, η θέση ενός σημείου ή η γεωμετρία ενός τεμαχίου είναι δύσκολο να περιγραφούν με

χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων. Για παράδειγμα, η περιγραφή των άκρων ενός τόξου κύκλου στο επίπεδο, χρειάζεται τριγωνομετρικές σχέσεις. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται το πολικό σύστημα συντεταγμένων.

Έτσι, στην περίπτωση του σημείου T300,80 θεωρείται ως πόλος το σημείο K300, ως πολικός άξονας η οριζόντια ημιευθεία K300-x', ως κατευθυνόμενη απόσταση το μήκος K300-T300,80 (R300) και ως κατευθυνόμενη γωνία η θετική γωνία που διαγράφεται ξεκινώντας από τον πολικό άξονα έως την ημιευθεία K300-T300,80 ($90^\circ+a$) (Σχ. 5.3).

Αντίστοιχα για το σημείο T'300,80 πόλος και πολικός άξονας είναι όμοιοι με του σημείου T300,80, ως κατευθυνόμενη απόσταση θεωρείται το μήκος K300-T'300,80 (R300) και ως κατευθυνόμενη γωνία η θετική γωνία που διαγράφεται ξεκινώντας από τον πολικό άξονα έως την ημιευθεία K300-T'300,80 ($90^\circ-a$) (Σχ. 5.3).



Σχήμα 5.3: Υπολογισμός συντεταγμένων T300,80 και T'300,80

$$\sin a = \frac{20.46/2}{300} = 0.034 \rightarrow a = 0.0341 \text{ rad} \rightarrow 1.95378273^\circ$$

Για το σημείο T300,80 κατευθυνόμενη γωνία: $\alpha = 90^\circ + 1.95378273^\circ = 91.95378273^\circ$

με $\cos \alpha = -0.0341$ και $\sin \alpha = 0.9994$.

Για το σημείο $T'_{300,80}$ κατευθυνόμενη γωνία: $\alpha' = 90^\circ - 1.95378273^\circ = 88.04621727^\circ$

με $\cos \alpha' = 0.0341$ και $\sin \alpha' = 0.9994$.

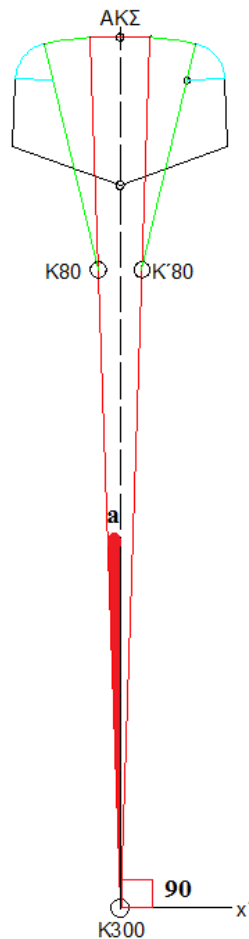
$$x_{T'_{300,80}} = x_{K300} + 300 * \cos \alpha = 0 + 300 * (-0.0341) = -10.228000$$

$$y_{T'_{300,80}} = y_{K300} + 300 * \sin \alpha = -300 + 300 * 0.9994 = -0.174404$$

$$x_{T'_{300,80}} = x_{K300} + 300 * \cos \alpha' = 0 + 300 * 0.0341 = 10.228000$$

$$y_{T'_{300,80}} = y_{K300} + 300 * \sin \alpha' = -300 + 300 * 0.9994 = -0.174404$$

Οι συντεταγμένες των κέντρων K80 και K'80 των κύκλων με ακτίνα R80 προκύπτουν θεωρώντας ως πόλο το σημείο K300, ως πολικό άξονα την οριζόντια ημιευθεία K300-x', ως κατευθυνόμενη απόσταση το μήκος R300-R80 = 300-80 = 220mm και ως κατευθυνόμενη γωνία τη θετική γωνία που διαγράφεται ξεκινώντας από τον πολικό άξονα έως την ημιευθεία K300-K80 ($90^\circ + \alpha$) και K300-K'80 ($90^\circ - \alpha$) αντίστοιχα (Σχ. 5.4).



Σχήμα 5.4: Υπολογισμός συντεταγμένων K80 και K'80

$$x_{K80} = x_{K300} + 220 * \cos \alpha = 0 + 220 * (-0.0341) = -7.5005333$$

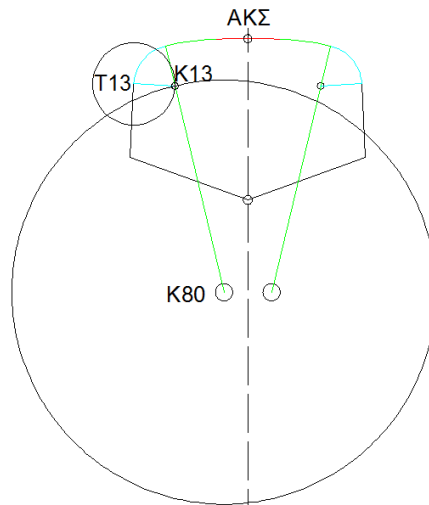
$$y_{K80} = y_{K300} + 220 * \sin \alpha = -300 + 220 * 0.9994 = -80.1278963$$

$$x_{K'80} = x_{K300} + 220 * \cos \alpha' = 0 + 220 * 0.0341 = 7.5005333$$

$$y_{K'80} = y_{K300} + 220 * \sin \alpha' = -300 + 220 * 0.9994 = -80.1278963$$

Το κέντρο K13 του κύκλου με ακτίνα R13 προκύπτει από την τομή των δύο ακόλουθων κύκλων (Σχ. 5.5):

- Κύκλος 1 με κέντρο K80, συντεταγμένες $(x_1, y_1) = (-7.5005333, -80.1278963)$ και ακτίνα $R_1 = 80 - 13 = 67mm$.
- Κύκλος 2 με κέντρο T13, συντεταγμένες $(x_2, y_2) = (-36.0, -14.3)$ και ακτίνα $R_2 = 13mm$.



Σχήμα 5.5: Υπολογισμός K13 ως κοινό σημείο τομής κύκλων

Έστω (x, y) οι συντεταγμένες του σημείου K13. Ως κοινό σημείο των δύο κύκλων θα πρέπει να ικανοποιεί τις εξισώσεις που τους περιγράφουν ήτοι:

$$(x - x_1)^2 - (y - y_1)^2 = R_1^2 \quad (5.1)$$

$$(x - x_2)^2 - (y - y_2)^2 = R_2^2 \quad (5.2)$$

όπου x_1, y_1, x_2, y_2 οι συντεταγμένες των κέντρων των τεμνόμενων κύκλων και R_1, R_2 οι ακτίνες τους.

Με ανάπτυξη των σχέσεων (5.1) και (5.2) προκύπτει:

$$x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 = R_1^2 \quad (5.3)$$

$$x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 = R_2^2 \quad (5.4)$$

Αφαιρώντας τις σχέσεις (5.3) και (5.4) κατά μέλη προκύπτει:

$$(x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y = \frac{R_1^2 - R_2^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{2} \quad (5.5)$$

και η επίλυση μετατρέπεται σε γραμμική ως προς έναν άγνωστο.

$$y = \frac{R_1^2 - R_2^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{2(y_2 - y_1)} - \frac{(x_2 - x_1)}{(y_2 - y_1)}x \quad (5.6)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (5.6) σε μία εκ των (5.1) και (5.2) προκύπτει μια δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς x από την οποία προκύπτουν οι τετμημένες των δύο σημείων επαφής των κύκλων, ένα εκ των οποίων είναι το K13.

$$(5.6) \rightarrow y = 0.43294x - 4.98457$$

$$(5.2) \rightarrow (x+36)^2 + (0.43294x + 9.3154)^2 = 169 \Rightarrow 1.187436x^2 + 80.06603x + 1213.777 = 0$$

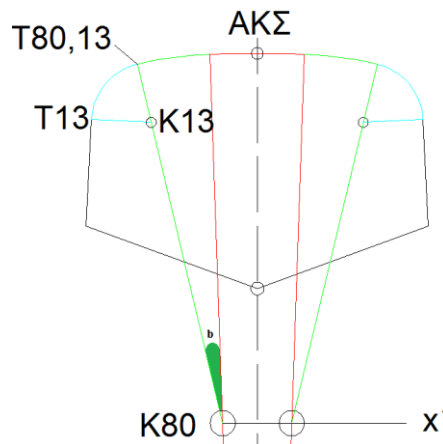
$$\text{Άρα } \begin{matrix} x = -23.0162, y = -14.9492 \\ x = -44.4114, y = -24.2120 \end{matrix} \text{ άρα εκ κατασκευής (πλάτος κεφαλής 72mm)}$$

προφανώς οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου με ακτίνα R13 είναι:

$$K13: (x_{K13}, y_{K13}) = (-23.0162, -14.9492) \text{ και λόγω συμμετρίας}$$

$$K'13: (x_{K'13}, y_{K'13}) = (23.0162, -14.9492).$$

Εφόσον είναι γνωστές οι συντεταγμένες του κέντρου K13 μπορούν να υπολογισθούν και οι πολικές συντεταγμένες του σημείου T80,13. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ως πόλος το σημείο K80, ως πολικός άξονας η οριζόντια ημιευθεία K80-x', ως κατευθυνόμενη απόσταση το μήκος K80-T80,13 (R80) και ως κατευθυνόμενη γωνία η θετική γωνία που διαγράφεται ξεκινώντας από τον πολικό άξονα έως την ημιευθεία K80-T80,13 ($90^\circ + b$) (Σχ. 5.6).



Σχήμα 5.6: Υπολογισμός συντεταγμένων του T80,13 συναρτήσει των K80 και K13

$$\tan b = \frac{x_{K13} - x_{K80}}{y_{K13} - y_{K80}} = 0.238048129 \rightarrow b = 0.2336986 \text{ rad} \rightarrow 13.389958^\circ$$

Για το σημείο T80,13 κατευθυνόμενη γωνία: $\beta = 90^\circ + 13.389958^\circ = 103.389958^\circ$

με $\cos \beta = -0.23157741$ και $\sin \beta = 0.97281648$.

Για το σημείο T'80,13 κατευθυνόμενη γωνία: $\beta' = 90^\circ - 13.389958^\circ = 76.6100418^\circ$

με $\cos \beta' = 0.23157741$ και $\sin \beta' = 0.97281648$.

$$x_{T80,13} = x_{K80} + 80 * \cos \beta = -7.5005333 + 80 * (-0.23157741) = -26.0267261$$

$$y_{T80,13} = y_{K80} + 80 * \sin \alpha = -80.1278963 + 80 * 0.97281648 = -2.3025779$$

$$x_{T'80,13} = x_{K80} + 80 * \cos \beta' = 7.5005333 + 80 * 0.23157741 = 26.0267261$$

$$y_{T'80,13} = y_{K80} + 80 * \sin \beta' = -80.1278963 + 80 * 0.97281648 = -2.3025779$$

Τέλος το σημείο A στο οποίο μετράται το εύρος της γραμμής βρίσκεται σε κατακόρυφη απόσταση 14mm από το ΑΚΣ επομένως $y_A = -14mm$ και ταυτόχρονα είναι σημείο του κύκλου ακτίνας R13, επομένως πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση που τον περιγράφει:

$$(x_A - x_{K13})^2 - (y_A - y_{K13})^2 = R_{13}^2 \rightarrow x_A = \sqrt{R_{13}^2 - (y_A - y_{K13})^2} + x_{K13} \quad (5.7)$$

Με επίλυση της σχέσης (5.7) προκύπτει και η τετμημένη του σημείου A, $x_A = -35.98152092mm$.

Οι υπολογισθείσες καρτεσιανές συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς στο υπόψη σύστημα συντεταγμένων, με τη σειρά που υπολογίσθηκαν συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πιν. 5.1).

Πίνακας 5.1: Καρτεσιανές συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων σιδηροτροχιάς

Σημείο	Τετμημένη x	Τεταγμένη y
ΑΚΣ	0.0000000	0.0000000
K300	0.0000000	-300.0000000
T13	-36.0000000	-14.3000000
T'13	36.0000000	-14.3000000
T300,80	-10.2280000	-0.1744040
T'300,80	10.2280000	-0.1744040
K80	-7.5005333	-80.1278963
K'80	7.5005333	-80.1278963
K13	-23.0162000	-14.9492000
K'13	23.0162000	-14.9492000

Σημείο	Τετμημένη x	Τεταγμένη y
T80,13	-26.0267261	-2.3025779
T'80,13	26.0267261	-2.3025779
A	-35.9815209	-14.0000000

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η παραπάνω διαδικασία μπορεί να αυτοματοποιηθεί με τη βοήθεια υπολογιστικών φύλλων έτσι ώστε εισάγοντας τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς (ακτίνες κύκλων κεφαλής, πλάτος κεφαλής, ολικό ύψος, μήκος μεσαίου κυκλικού τόξου, κατακόρυφη απόσταση ΑΚΣ από τέλος ακραίου κυκλικού τόξου) να προκύπτουν αυτόματα οι καρτεσιανές συντεταγμένες των χαρακτηριστικών της σημείων.

ΚΕΦ.6 Προσδιορισμός σημειακής επαφής μεταξύ τροχού – σιδηροτροχιάς

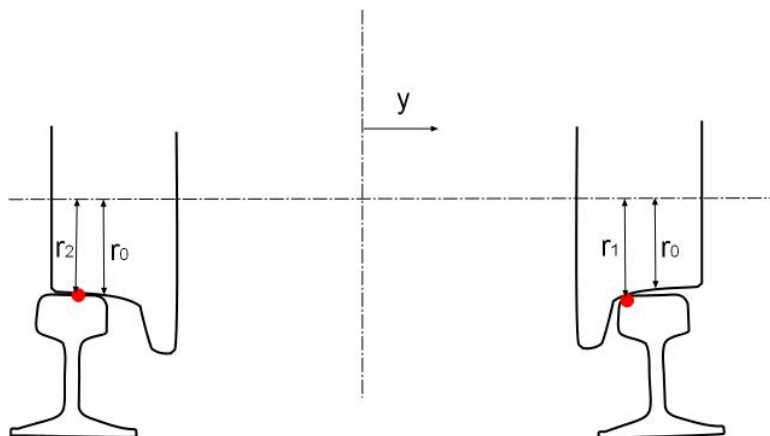
Η ελαστική παραμόρφωση τροχού-σιδηροτροχιάς επέρχεται στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων. Η θέση, το μέγεθος και το σχήμα της πραγματικής επιφάνειας επαφής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, οι δυνάμεις επαφής, η ταχύτητα του σιδηροδρομικού οχήματος κλπ. Σε μια απολύτως γεωμετρική επίλυση του προβλήματος της επαφής οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες παραμέτρους μπορούν να αγνοηθούν. Για τον υπολογισμό της επιφάνειας επαφής απαιτείται καταρχήν ο προσδιορισμός του σημείου επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς.

Αν θεωρήσουμε ένα ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς κατά μήκος ενός κατακόρυφου άξονα, υπάρχει μία συγκεκριμένη θέση στην οποία αφενός μεν δεν υπάρχει ακόμα ελαστική επαφή, αφετέρου δε υπάρχει ένα κοινό σημείο επαφής μεταξύ τους. Σ' αυτό το σημείο, τα επαπτομενικά επίπεδα των δύο μη-παραμορφωμένων σωμάτων συμπίπτουν. Η θέση του εξαρτάται από τη σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, τις διατομές τους, καθώς και τη γωνία στροφής (παρέκκλισης) του τροχοφόρου άξονα ως προς τον κατακόρυφο άξονα της γραμμής, η οποία στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή δε λήφθηκε υπόψη.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς για την περίπτωση κεντρωμένου τροχοφόρου άξονα στη γραμμή, καθώς και για εγκάρσια μετατόπιση αυτού κατά 5mm εκατέρωθεν αυτής της θέσης, με βήμα 1mm. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε τροχό διατομής S1002, κύριας ακτίνας κύλισης 420mm και σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60), με κλίση 1:40. Το σύστημα τροχού-σιδηροτροχιάς τοποθετήθηκε στο σύνηθες εύρος γραμμής των 1435mm.

6.1 Περιγραφή μεθόδου υπολογισμού σημειακής επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς

Η μέθοδος υπολογισμού των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς βασίσθηκε στην εύρεση της ελάχιστης κατακόρυφης απόστασης μεταξύ της διατομής του τροχού και της διατομής της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, για δεδομένη εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα κατά y (mm) (Σχ. 6.1).



Σχήμα 6.1: Σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα
 Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι η προαναφερθείσα πρόταση υπολογισμού των σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς αναφέρεται και από την SNCF, χωρίς να γίνεται περαιτέρω ανάλυση του ακριβούς τρόπου υπολογισμού αυτών [53].

$$\min(z_S - z_R) = f(y_S) \quad (6.1)$$

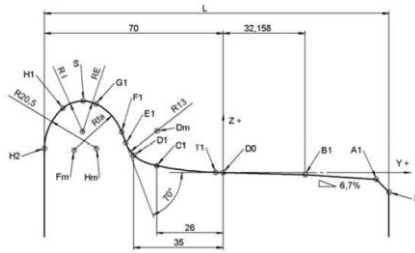
Δεδομένου ότι οι διατομές του επισώτρου του τροχού και της κεφαλής της σιδηροτροχιάς είναι μεταβλητές κατά το μήκος τους, τα σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς είναι διαφορετικά για διαφορετική εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα από τη θέση της αρχικής ισορροπίας (τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή).

Η διαδικασία υπολογισμού των σημείων επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς έχει ως εξής (Σχ. 6.2):

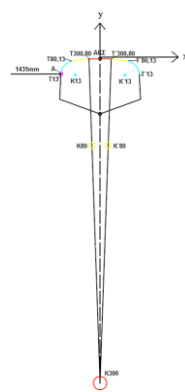
- Υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες της διατομής του όνυχα: Με χρήση των εξισώσεων που περιγράφουν τις πολυωνυμικές και κυκλικές καμπύλες της διατομής του όνυχα υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων που τον ορίζουν (βήμα 0.5mm).
- Καθορίζεται το σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων: Ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων καθορίζεται το σημείο του δεξιού τροχού, στο οποίο μετريέται η κύρια ακτίνα κύλισης του τροχού.
- Υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες της κεφαλής της σιδηροτροχιάς: Ο υπολογισμός βασίζεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της διατομής της σιδηροτροχιάς, στη χρήση πολικών συντεταγμένων και στη θεωρία των κωνικών τομών (Κεφ. 5).

- Τοποθετείται η σιδηροτροχιά στο υπόψη σύστημα συντεταγμένων: Η άνω στάθμη κεφαλής σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) τοποθετείται στο υπόψη σύστημα συντεταγμένων με βάση τα δεσμευτικά γεωμετρικά σημεία του συστήματος (σημείο μέτρησης εύρους γραμμής, απόσταση μεταξύ των επισώτρων στα οποία μετριέται η κύρια ακτίνα κύλισης, κατασκευαστικά στοιχεία σιδηροτροχιάς). Επιπλέον ορίζεται ένα κατακόρυφο σχεδιαστικό περιθώριο μεταξύ των δύο διατομών.
- Επαναυπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς, δεδομένου ότι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων έχει διαφοροποιηθεί σε σχέση με αυτή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.
- Στη συνέχεια το σύστημα στρέφεται ως προς το σημείο μέτρησης του εύρους γραμμής κατά γωνία κατάλληλη σε σχέση με την κλίση της σιδηροτροχιάς ως προς την κατακόρυφο (στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή 1:40) και οι συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς επαναυπολογίζονται.
- Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων της κεφαλής της σιδηροτροχιάς (βήμα 0.5mm).
- Υπολογίζονται οι κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ των δύο διατομών ανά 0.5mm, ώστε να ευρεθεί η μικρότερη εξ' αυτών.
- Ο υπολογισμός των κατακόρυφων αποστάσεων μεταξύ των δύο διατομών επαναλαμβάνεται για κάθε θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς.
- Τέλος, απεικονίζονται τα ζεύγη των σημείων επαφής για τις υπόψη θέσεις.

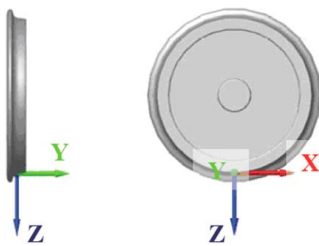
1) Υπολογισμός καρτεσιανών συντεταγμένων όνυχα και επιώτρου με βάση τις εξισώσεις που περιγράφουν το προφίλ του τροχού.



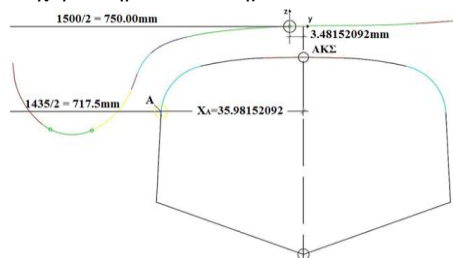
2) Γεωμετρικός υπολογισμός καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων της σιδηροτροχιάς.



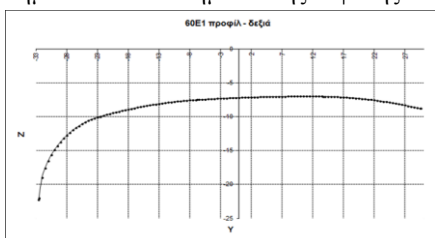
3) Καθορισμός συστήματος συντεταγμένων (σημείο μέτρησης κύριας ακτίνας τροχού).



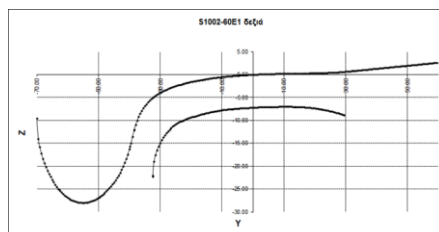
4) Τοποθέτηση της σιδηροτροχιάς στο υπόψη σύστημα συντεταγμένων και εκ νέου υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων.



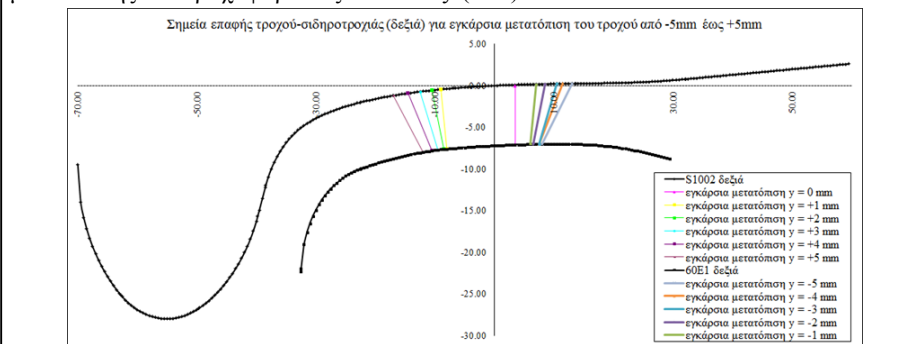
5) Στροφή σιδηροτροχιάς για επίτευξη της επιθυμητής κλίσης (1:40) και εκ νέου υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων των χαρακτηριστικών της σημείων και των σημείων της κεφαλής.



6) Υπολογισμός κατακόρυφων αποστάσεων μεταξύ προφίλ τροχού και σιδηροτροχιάς για εύρεση της μικρότερης εξ' αυτών και προσδιορισμό των σημείων επαφής.



7) Απεικόνιση σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς για εκάστοτε τιμή της εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα κατά y (mm).

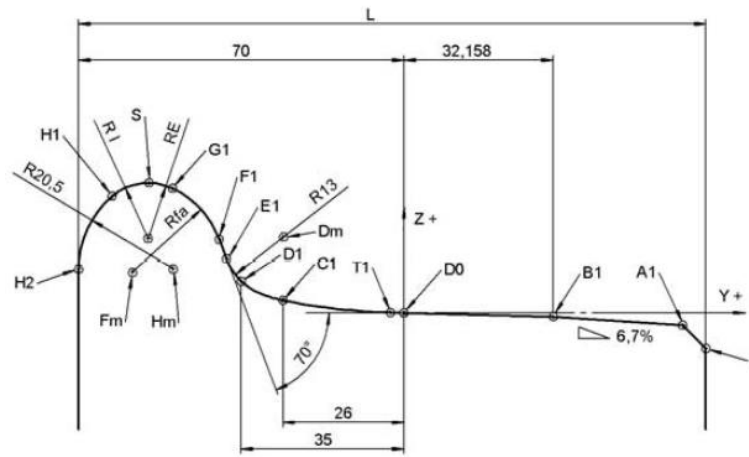


Σχήμα 6.2: Βήματα υπολογισμού σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς

Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε στο σύνηθες ζεύγος διατομών τροχού-σιδηροτροχιάς, S1002-60E1 (UIC60), με κλίση της σιδηροτροχιάς 1:40 ως προς την κατακόρυφο και περιγράφεται στα ακόλουθα υποκεφάλαια. Οι τιμές της εγκάρσιας μετατόπισης y του άξονα, για κάθε μία από τις οποίες υπολογίσθηκαν τα σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς κυμαίνονται από 0mm (άξονας κεντρωμένος στη γραμμή) έως 5mm εκατέρωθεν της αρχικής θέσης, με βήμα 1mm.

6.2 Μαθηματική περιγραφή της διατομής του τροχού S1002 και ορισμός συστήματος συντεταγμένων

Η διατομή του τροχού S1002 (Σχ. 6.3) περιγράφεται μαθηματικά με ευθύγραμμα τμήματα, κυκλικές καμπύλες 2^{ου} βαθμού και πολυωνυμικές έως και 8^{ου} βαθμού.



Σχήμα 6.3: Διατομή τροχού S1002 [54, 55]

Περιοχή A1-B1:

$$32.15796 < y < 60 \quad \left| z = 1.364323640 - 0.066666667y \right. \quad (6.2)$$

Περιοχή B1-C1:

$$-26 < y < 32.15796 \quad \left| \begin{aligned} z = & 0 - 3.358537058 * 10^{-2} y + 1.565681624 * 10^{-3} y^2 - 2.810427944 * 10^{-5} y^3 \\ & + 5.844240864 * 10^{-5} y^4 - 1.562379023 * 10^{-8} y^5 + 5.309217349 * 10^{-15} y^6 \\ & - 5.957839843 * 10^{-12} y^7 + 2.646656573 * 10^{-13} y^8 \end{aligned} \right. \quad (6.3)$$

Περιοχή C1-D1:

$$-35 < y < -26 \quad \left| \begin{aligned} z = & -4.320221063 * 10^3 - 1.038384026 * 10^3 y - 1.065501873 * 10^2 y^2 \\ & - 6.051367875 * 10^0 y^3 - 2.054332446 * 10^{-1} y^4 - 4.169739389 * 10^{-3} y^5 \\ & - 4.687195829 * 10^{-5} y^6 - 2.252755540 * 10^{-7} y^7 \end{aligned} \right. \quad (6.4)$$

Περιοχή D1-E1:

$$-38.426669071 < y < -35 \quad \left| z = +16.446 - \sqrt{13^2 - (y + 26.210665)^2} \right. \quad (6.5)$$

Περιοχή E1-F1:

$$-39.764473993 < y < -38.426669071 \quad \left| z = -93.576667419 - 2.747477419y \right. \quad (6.6)$$

Περιοχή F1-G1:

$$-49.662510381 < y < -39.764473993 \quad \left| \begin{array}{l} z = 8.834924130 + \sqrt{20^2 - (y + 58.558326413)^2} \end{array} \right. \quad (6.7)$$

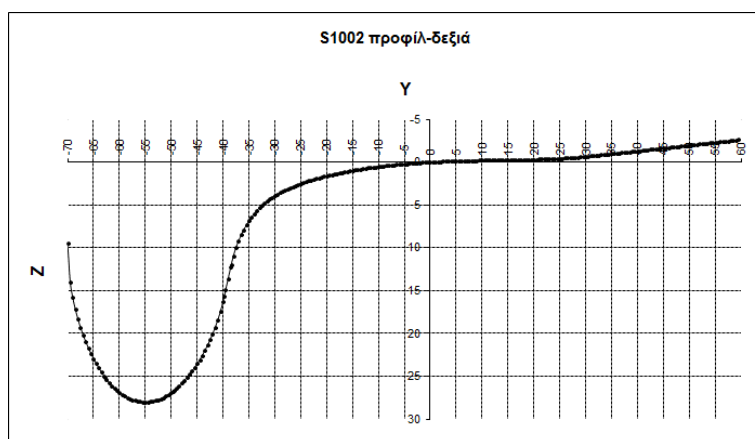
Περιοχή G1-H1:

$$-62.764705882 < y < -49.662510381 \quad \left| \begin{array}{l} z = 16 + \sqrt{12^2 - (y + 55)^2} \end{array} \right. \quad (6.8)$$

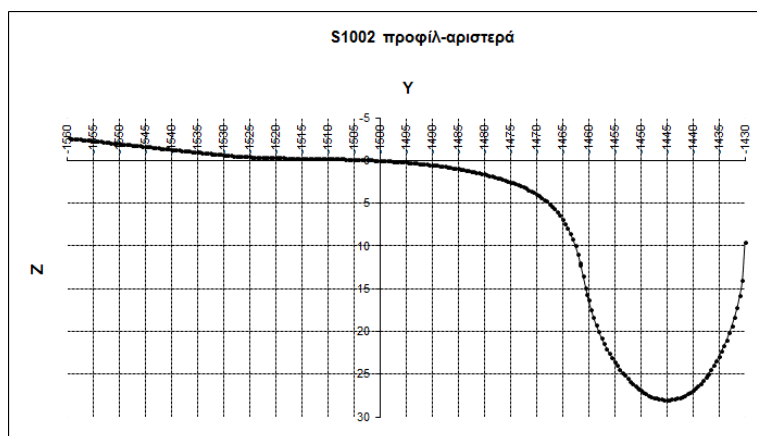
Περιοχή H1-H2:

$$-70 < y < -62.764705882 \quad \left| \begin{array}{l} z = 9.519259302 + \sqrt{20.5^2 - (y + 49.5)^2} \end{array} \right. \quad (6.9)$$

Οι συντεταγμένες των σημείων της διατομής όνυχα-επισώτρου του τροχού παραθέτονται αναλυτικά στο Παράρτημα 1. Δεδομένου ότι η έρευνα γίνεται σε επίπεδο κλάσματος του χιλιοστού, οι υπολογισμοί έγιναν με επτά δεκαδικά ψηφία. Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζονται οι διατομές του δεξιού και αριστερού τροχού.

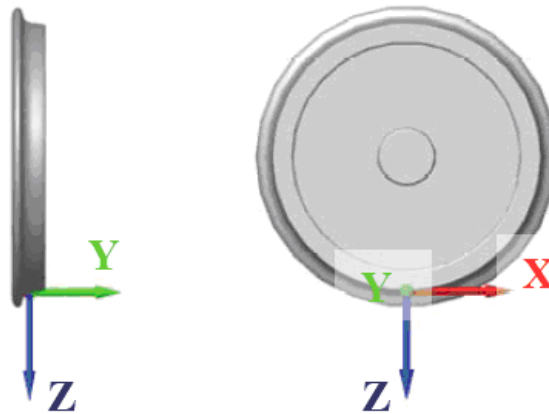


Διάγραμμα 6.1: Απεικόνιση δεξιού τροχού διατομής S1002



Διάγραμμα 6.2: Απεικόνιση αριστερού τροχού διατομής S1002

Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων ορίζεται στο σημείο με συντεταγμένες ($y=0$, $z=0$) του δεξιού τροχού (σημείο 141 [54]) (βλ. Παράρτημα 1) (Σχ. 6.4).

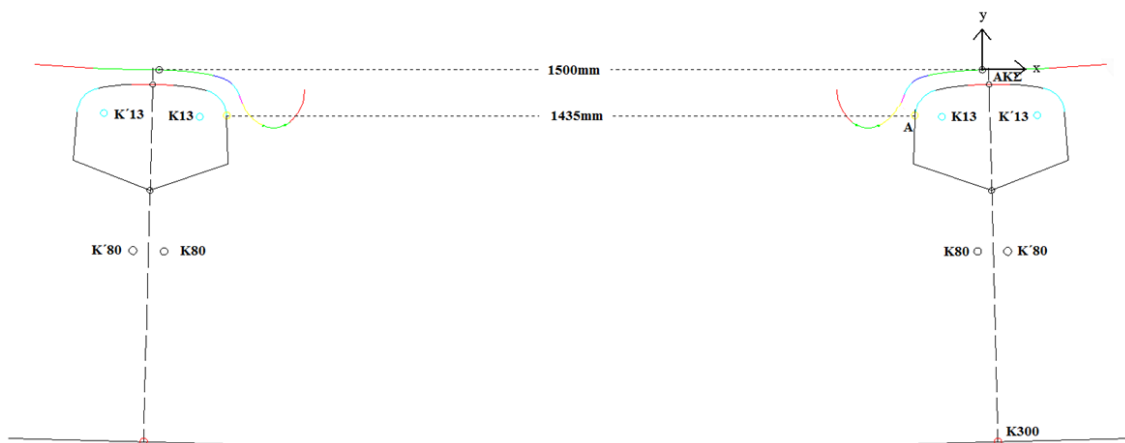


Σχήμα 6.4: Αρχή συστήματος συντεταγμένων

6.3 Τοποθέτηση της σιδηροτροχιάς ως προς την αρχή του συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων

Προκειμένου να υπολογισθεί η θέση στην οποία πρέπει να τοποθετηθεί κατ' αρχήν η δεξιά και στη συνέχεια η αριστερή σιδηροτροχιά ως προς το καθοριζόμενο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εκ κατασκευής δεσμευτικά γεωμετρικά σημεία (Σχ. 6.5):

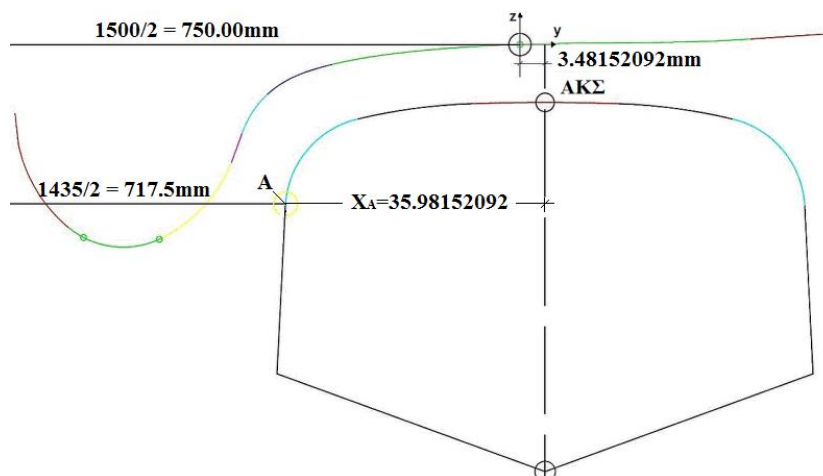
- Άνω στάθμη κεφαλής σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ): επί του κατακόρυφου άξονα της σιδηροτροχιάς στο μέσον της κεφαλής.
- Σημείο μέτρησης του εύρους γραμμής (Α): 14mm κάτω από το ΑΚΣ. Δεδομένου ότι το εύρος γραμμής είναι σταθερό 1435mm, η στροφή των σιδηροτροχιών κατά 1:40 ως προς την κατακόρυφο γίνεται γύρω από τα σημείο αυτό.
- Απόσταση μεταξύ των σημείων των επισώτρων στα οποία μετράται η ακτίνα των τροχών: 1500mm.
- Κέντρα των κύκλων (K , K') και άκρα των τόξων των κύκλων (T , T') της κεφαλής της σιδηροτροχιάς (Σχ. 5.2): η θέση τους στο καρτεσιανό επίπεδο προκύπτει βάσει των υπολογισμών του Κεφαλαίου 5.



Σχήμα 6.5: Δεσμευτικά γεωμετρικά σημεία

Με βάση τα παραπάνω προσδιορίστηκε η θέση που πρέπει να τοποθετηθεί το σημείο ΑΚΣ της σιδηροτροχιάς στο οριζόμενο σύστημα συντεταγμένων ως εξής (Σχ. 6.6):

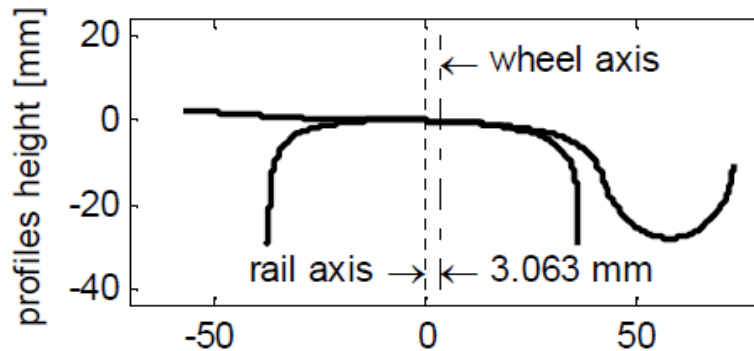
- Θεωρείται η περίπτωση που το κέντρο του τροχοφόρου άξονα συμπίπτει με το κέντρο της γραμμής (τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή).
- Το κέντρο του τροχοφόρου άξονα απέχει 750mm από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων και το νοητό κέντρο του εύρους της γραμμής απέχει 717.5mm από το σημείο Α, στο οποίο μετρείται.
- Με βάση τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 5 το σημείο Α απέχει από τον άξονα συμμετρίας της σιδηροτροχιάς οριζόντια απόσταση $x_A=35.98152092\text{mm}$.
- Ως εκ τούτου ο άξονας συμμετρίας της σιδηροτροχιάς απέχει οριζόντια απόσταση 3,48152092mm από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Επιπροσθέτως ορίστηκε κατακόρυφο σχεδιαστικό περιθώριο 8.00mm μεταξύ της αρχής του συστήματος συντεταγμένων και του ΑΚΣ.



Σχήμα 6.6: Θέση σιδηροτροχιάς ως προς το οριζόμενο σύστημα συντεταγμένων

Με στροφή της σιδηροτροχιάς ως προς το σημείο Α για επίτευξη της κλίσης 1:40, η υπολογιζόμενη απόσταση των 3.482mm γίνεται 3.120mm και το κατακόρυφο σχεδιαστικό περιθώριο των 8.000mm γίνεται 7.105mm.

Σύμφωνα με τους αριθμητικούς υπολογισμούς με χρήση του προγράμματος NON-HERTZ του Cretu [56], για το ίδιο ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς και στην ίδια κλίση η αντίστοιχη απόσταση των 3,120mm είναι 3,063mm (Σχ. 6.7).



Σχήμα 6.7: Σχετική θέση τροχού-σιδηροτροχιάς σύμφωνα με το πρόγραμμα NON-HERTZ [57]

Με βάση τα παραπάνω υπολογίσθηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως οι συντεταγμένες του σημείου ΑΚΣ και των κέντρων των κύκλων της κεφαλής, για σιδηροτροχιά σε κατακόρυφη θέση και με κλίση 1:40.

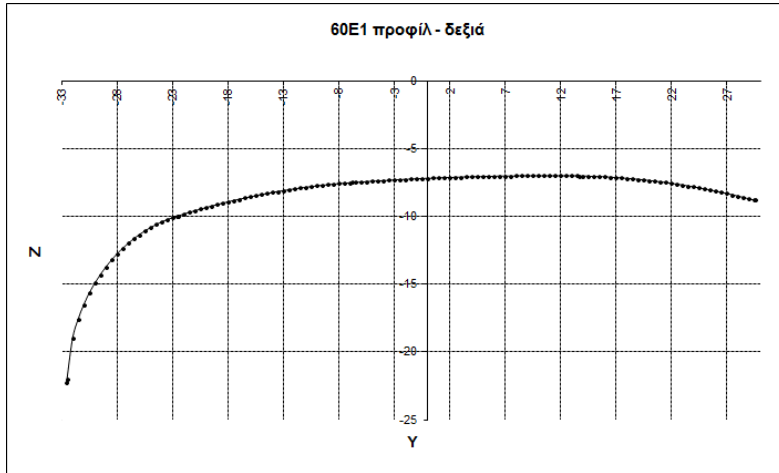
Πίνακας 6.1: Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων σιδηροτροχιάς

Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων για δεξιά σιδ/χιά κατακόρυφη			Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων για δεξιά σιδ/χιά με κλίση 1:40		
	y	z		y	z
ΑΚΣ	3.4815209	-8.0000000	ΑΚΣ	3.1203913	-7.1051159
K13	-19.5346988	-22.9491921	K13	-19.5150262	-22.6248643
K80	-4.0190124	-88.1278963	K80	-2.3752275	-87.3954387
K80'	10.9820542	-88.1278963	K80'	12.6211535	-87.0205292
K300	3.4815209	-308.0000000	K300	10.6180486	-307.0114098
K13'	26.4977407	-22.9491921	K13'	26.5030349	-21.4744128

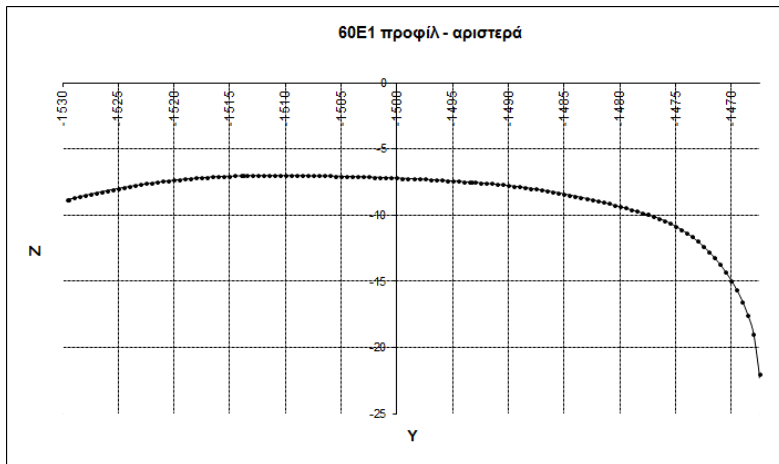
Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων για αριστερή σιδ/χιά κατακόρυφη			Συντεταγμένες χαρακτηριστικών σημείων για αριστερή σιδ/χιά με κλίση 1:40		
	y	z		y	z
ΑΚΣ	-1503.4815209	-8.0000000	ΑΚΣ	-1503.120391	-7.105116
K13	-1480.4653012	-22.9491921	K13	-1480.484974	-22.624864
K80	-1495.9809876	-88.1278963	K80	-1497.624772	-87.395439
K80'	-1510.9820542	-88.1278963	K80'	-1512.621153	-87.020529
K300	-1503.4815209	-308.0000000	K300	-1510.618049	-307.011410
K13'	-1526.4977407	-22.9491921	K13'	-1526.503035	-21.474413

Οι συντεταγμένες των σημείων της διατομής της κεφαλής της σιδηροτροχιάς παραθέτονται αναλυτικά στο Παράρτημα 2. Δεδομένου ότι η έρευνα γίνεται σε επίπεδο κλάσματος του χιλιοστού, οι υπολογισμοί έγιναν με επτά δεκαδικά ψηφία. Στα

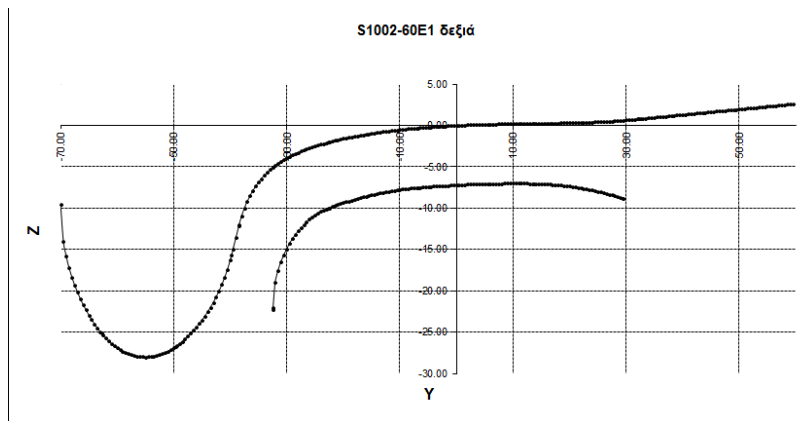
ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζονται οι διατομές των κεφαλών της δεξιάς και αριστερής σιδηροτροχιάς με κλίση 1:40, καθώς και τα υπό διερεύνηση ζεύγη τροχού-σιδηροτροχιάς.



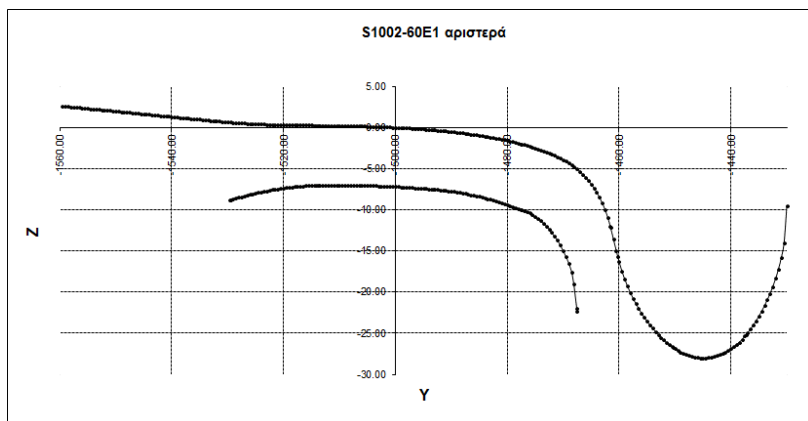
Διάγραμμα 6.3: Απεικόνιση κεφαλής δεξιάς σιδηροτροχιάς διατομής 60E1, 1:40



Διάγραμμα 6.4: Απεικόνιση κεφαλής αριστερής σιδηροτροχιάς διατομής 60E1, 1:40



Διάγραμμα 6.5: Απεικόνιση τροχού S1002-σιδηροτροχιάς 60E1(1:40), δεξιά



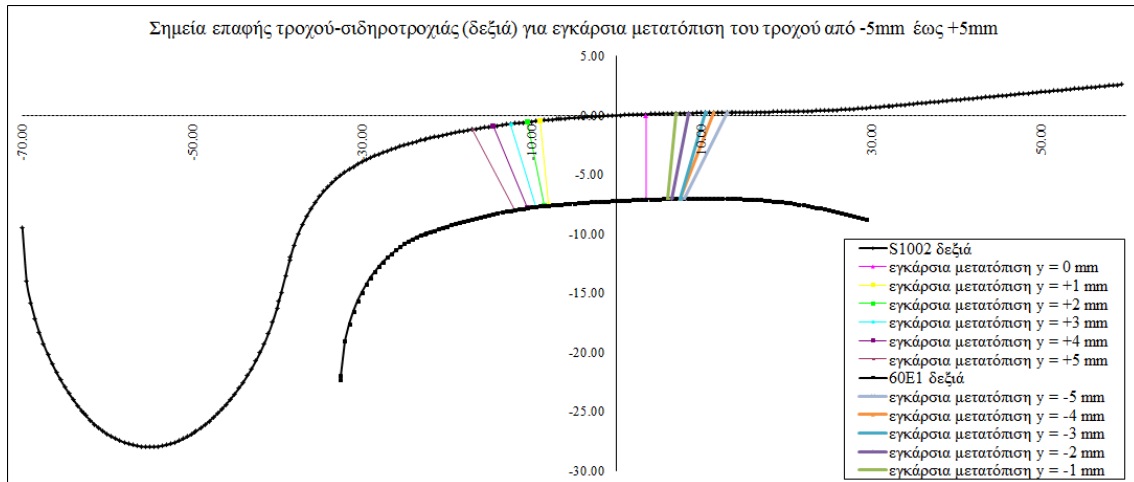
Διάγραμμα 6.6: Απεικόνιση τροχού S1002-σιδηροτροχιάς 60E1(1:40), αριστερά

6.4 Εντοπισμός και απεικόνιση σημείων επαφής

Με χρήση κατάλληλων συναρτήσεων του προγράμματος επεξεργασίας λογιστικών φύλλων Excel έγινε αυτόματη εύρεση της ελάχιστης απόστασης για τιμές εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα κατά y από -5mm έως $+5\text{mm}$. Κατόπιν αντιστοιγήθηκαν οι ελάχιστες αποστάσεις με τις συντεταγμένες των σημείων του τροχού και της σιδηροτροχιάς στα οποία εμφανίσθηκαν. Η απεικόνιση και οι συντεταγμένες τους φαίνονται στα διαγράμματα και στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 6.2: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (δεξιά)

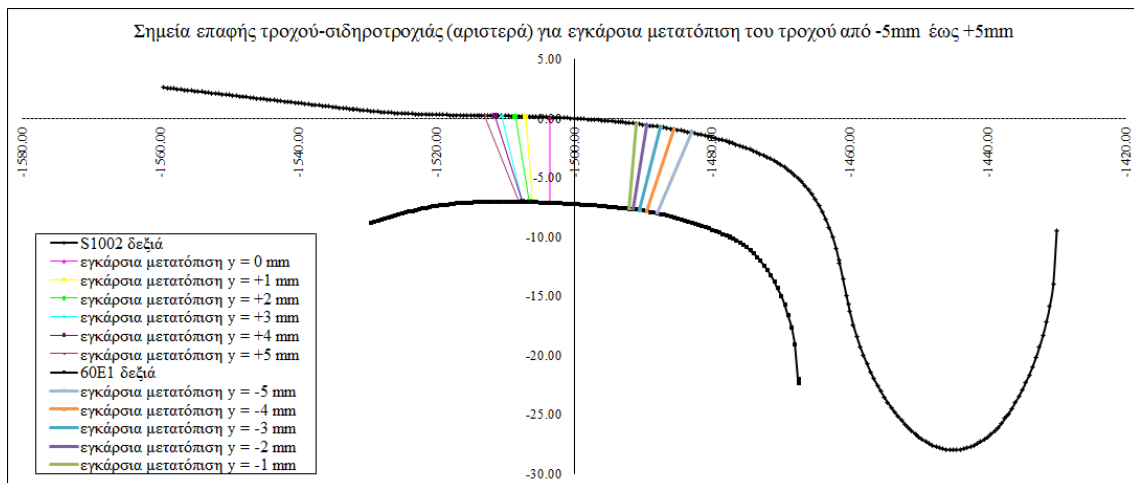
Εγκάρσια μετατόπιση [mm]	Συντεταγμένες τροχού		Συντεταγμένες σιδ/χιάς	
	y	z	y	z
-5.00000	13.00000	0.23804	8.00000	-7.02283
-4.00000	11.50000	0.22411	7.50000	-7.02761
-3.00000	10.50000	0.21389	7.50000	-7.02761
-2.00000	8.50000	0.19001	6.50000	-7.03968
-1.00000	7.00000	0.16814	6.00000	-7.04696
0.00000	3.50000	0.09957	3.50000	-7.09587
1.00000	-9.00000	-0.45092	-8.00000	-7.59342
2.00000	-10.50000	-0.56062	-8.50000	-7.63024
3.00000	-12.50000	-0.72598	-9.50000	-7.71334
4.00000	-14.50000	-0.91577	-10.50000	-7.80908
5.00000	-17.00000	-1.19287	-12.00000	-7.97653



Διάγραμμα 6.7: Απεικόνιση σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (δεξιά)

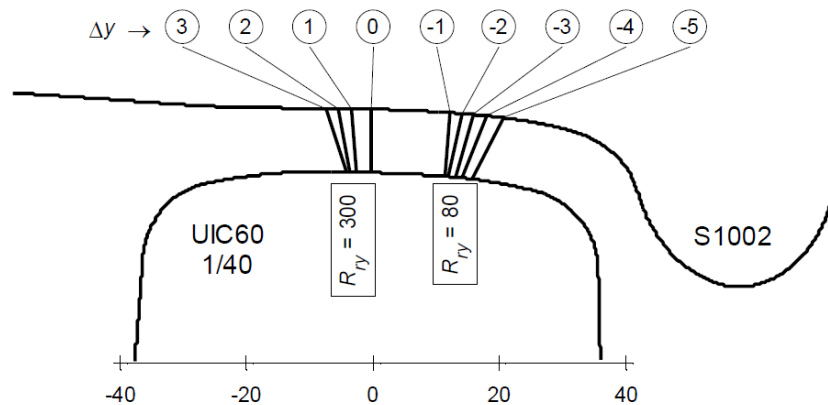
Πίνακας 6.3: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (αριστερά)

Εγκάρσια μετατόπιση [mm]	Συντεταγμένες τροχού		Συντεταγμένες σιδ/χιάς	
	y	z	y	z
-5.00000	-1483.00000	-1.19287	-1488.00000	-7.97653
-4.00000	-1485.50000	-0.91577	-1489.50000	-7.80908
-3.00000	-1487.50000	-0.72598	-1490.50000	-7.71334
-2.00000	-1489.50000	-0.56062	-1491.50000	-7.63024
-1.00000	-1491.00000	-0.45092	-1492.00000	-7.59342
0.00000	-1503.50000	0.09957	-1503.50000	-7.09587
1.00000	-1507.00000	0.16814	-1506.00000	-7.04696
2.00000	-1508.50000	0.19001	-1506.50000	-7.03968
3.00000	-1510.50000	0.21389	-1507.50000	-7.02761
4.00000	-1511.50000	0.22411	-1507.50000	-7.02761
5.00000	-1513.00000	0.23804	-1508.00000	-7.02283



Διάγραμμα 6.8: Απεικόνιση σημείων επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (αριστερά)

Στο Διάγραμμα 6.9 παρατίθενται τα σημεία επαφής όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα NON-HERTZ του Cretu [56], για το ίδιο ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς (κλίση 1:40).

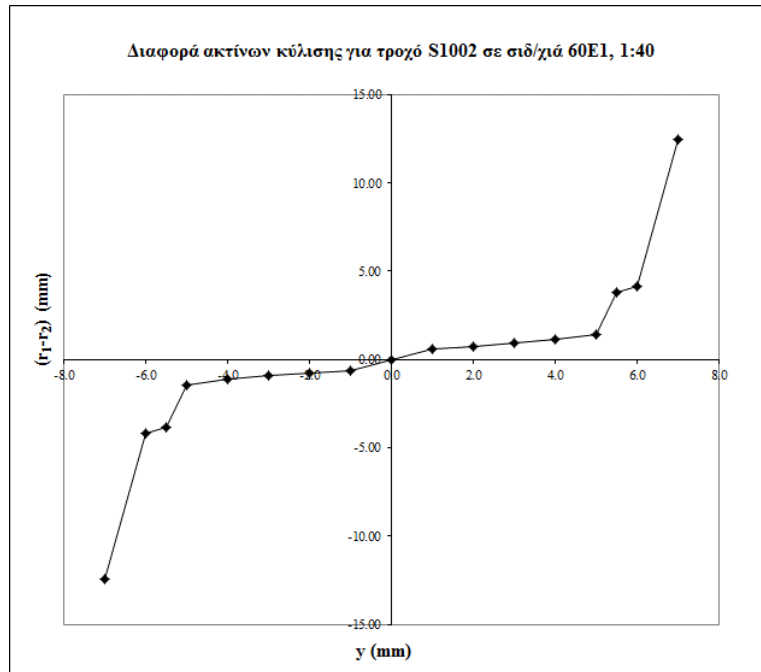


Διάγραμμα 6.9: Σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς συναρτήσει της εγκάρσια μετατόπισης σύμφωνα με το πρόγραμμα NON-HERTZ [57]

Υπολογίσθηκε επίσης το διάγραμμα διαφοράς ακτίνων κύλισης (Δr) ως προς την εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα κατά y .

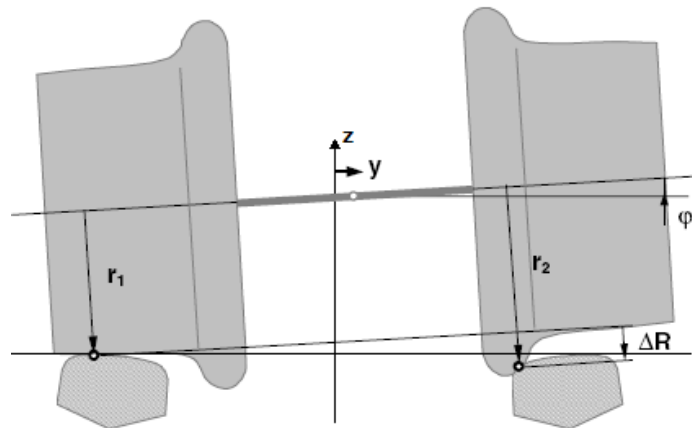
Πίνακας 6.4: Υπολογισμός διαφοράς ακτίνων κύλισης και ισοδύναμης κωνικότητας

y [mm]	$r_{\text{αριστερά}}$	$r_{\text{δεξιά}}$	Δr
-7.000	-12.201	0.256	-12.457
-6.000	-3.922	0.247	-4.168
-5.500	-3.576	0.242	-3.819
-5.000	-1.193	0.238	-1.431
-4.000	-0.916	0.224	-1.140
-3.000	-0.726	0.214	-0.940
-2.000	-0.561	0.190	-0.751
-1.000	-0.451	0.168	-0.619
0.000	0.100	0.100	0.000
1.000	0.168	-0.451	0.619
2.000	0.190	-0.561	0.751
3.000	0.214	-0.726	0.940
4.000	0.224	-0.916	1.140
5.000	0.238	-1.193	1.431
5.500	0.242	-3.576	3.819
6.000	0.247	-3.922	4.168
7.000	0.256	-12.201	12.457



Διάγραμμα 6.10: Διαφορά ακτίνων κύλισης συναρτήσει της εγκάρσιας μετατόπισης

Σημειώνεται επίσης ότι η γωνία στροφής φ του τροχοφόρου άξονα λόγω της διαφοράς ακτίνων κύλισης (Σχ. 6.8) θεωρήθηκε αμελητέα, διότι όπως προέκυψε από την απεικόνιση του προβλήματος σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD καθώς και από τη προσομοίωσή του με το εμπορικό λογισμικό Solidworks Simulation Premium 2010, είναι της τάξης του $0,4^\circ$ για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα κατά 8mm.

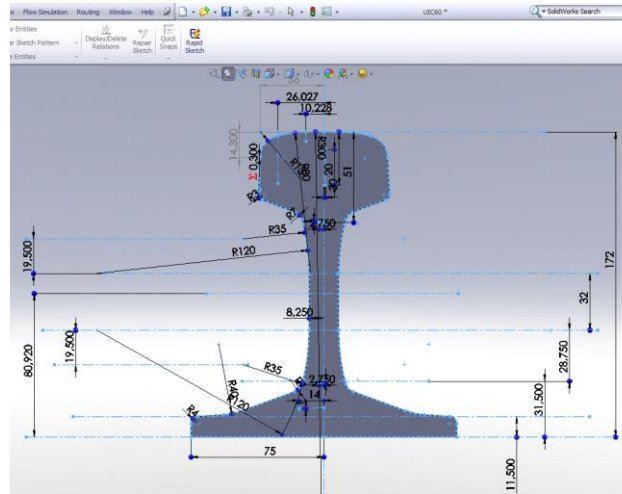


Σχήμα 6.8: Γωνία στροφής φ τροχοφόρου άξονα λόγω διαφοράς ακτίνων κύλισης

Περιγραφή μοντέλου

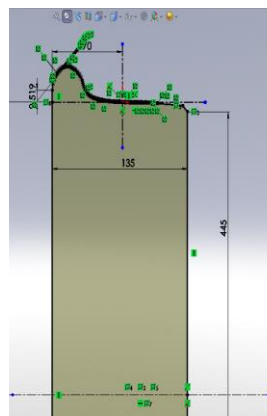
Το μοντέλο τροχοφόρου άξονα-τροχών-σιδηροτροχιών δημιουργήθηκε στο εμπορικό λογισμικό SolidWorks Simulation Premium 2010 και χρησιμοποιώντας βιβλιογραφικά διαστασιολογικά στοιχεία. Ειδικότερα, η τροχιά κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις γεωμετρικές οντότητες, οι οποίες περιγράφονται στη βιβλιογραφική παραπομπή [58]. Η

συνέχεια του περιγράμματος της τροχιάς εξασφαλίστηκε με την επιβολή συνθηκών συνέχειας πρώτης παραγώγου στα σημεία τομής των προαναφερθέντων οντοτήτων (Σχ. 6.9).



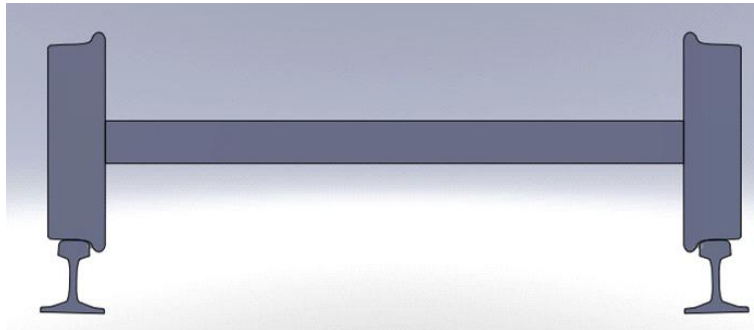
Σχήμα 6.9: Η γεωμετρία της σιδηροτροχιάς 60E1 (SolidWorks Simulation)

Ο τροχός κατασκευάστηκε σύμφωνα με τη βιβλιογραφική παραπομπή [54]. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά συντάχθηκε κώδικας στο περιβάλλον Matlab, με τον οποίο, βάσει των εξισώσεων της εν λόγω βιβλιογραφίας, δημιουργείται ικανός αριθμός σημείων επί της περιμέτρου του τροχού. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών αποθηκεύονται σε αρχείο μορφής ASCII. Ακριβώς επειδή ο κώδικας στηρίζεται στις αναλυτικές εξισώσεις περιγραφής του συνόρου, το πλήθος των σημείων καθώς και το πλήθος των σημαντικών ψηφίων των εκάστοτε τιμών αποτελούν επιλογή του χρήστη. Στη συνέχεια, το προαναφερθέν αρχείο ASCII εισάγεται στο εμπορικό λογισμικό SolidWorks Simulation Premium 2010 και μετατρέπεται σε μία καμπύλη spline (Σχ. 6.10).

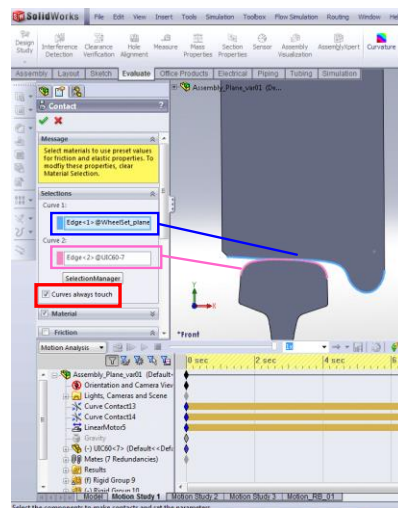


Σχήμα 6.10: Η γεωμετρία του τροχού S1002 (SolidWorks Simulation)

Το συναρμολόγημα «τροχοφόρος άξονας - σιδηροτροχιές – τροχοί» σχηματίζεται διατηρώντας τις απαιτούμενες γεωμετρικές αποστάσεις και γωνίες [απόσταση μεταξύ σημείων A (θέση μέτρησης εύρους γραμμής): 1435mm και κλίση σιδηροτροχιών: 1.432deg (κλίση 1:40)]. Πιο συγκεκριμένα, οι σιδηροτροχιές ακινητοποιούνται, ενώ το συναρμολόγημα τροχοφόρος άξονας-τροχοί, αρχικά, τοποθετείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, δηλαδή συμμετρικά ως προς τις σιδηροτροχιές και εφαπτομενικά σε αυτές.

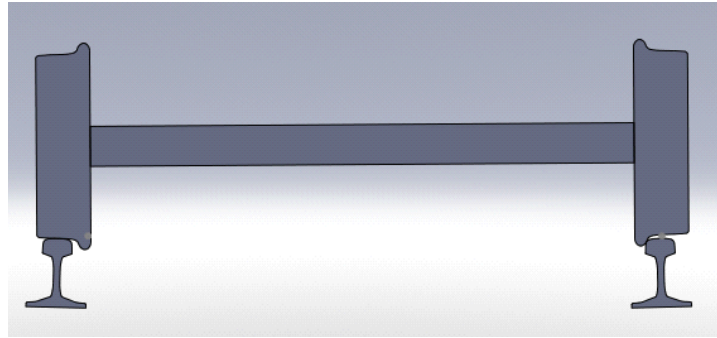


Σχήμα 6.11: Συναρμολόγημα στην αρχική θέση-τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της δυνατότητας Motion Analysis, η οποία είναι ενσωματωμένη στο εμπορικό λογισμικό SolidWorks Simulation Premium 2010, επιβλήθηκε οριζόντια σιγμοειδής μετατόπιση του προαναφερθέντος άξονα κατά 8mm. Επίσης, ακριβώς επειδή δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή η θέση επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς, επεβλήθησαν οριακές συνθήκες επαφής τύπου 'curves always touch', επιλογή η οποία εξασφαλίζει ότι καθ' όλη τη διάρκεια της μετακίνησης του συναρμολογήματος τροχοφόρου άξονα-τροχών, οι τροχοί θα βρίσκονται συνέχεια σε επαφή με τις συνεργαζόμενες τροχιές (Σχ. 6.12). Η ίδια συνθήκη επιβλήθηκε τόσο στο αριστερό όσο και στο δεξιό ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς.



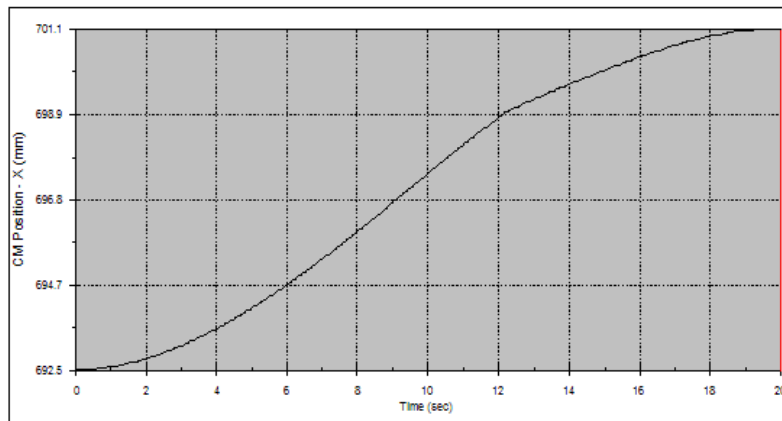
Σχήμα 6.12: Δήλωση συνθήκης διαρκούς επαφής μεταξύ αριστερού τροχού και συνεργαζόμενης τροχιάς

Η τελική θέση του συναρμολογήματος ($y = 8mm$) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.13.

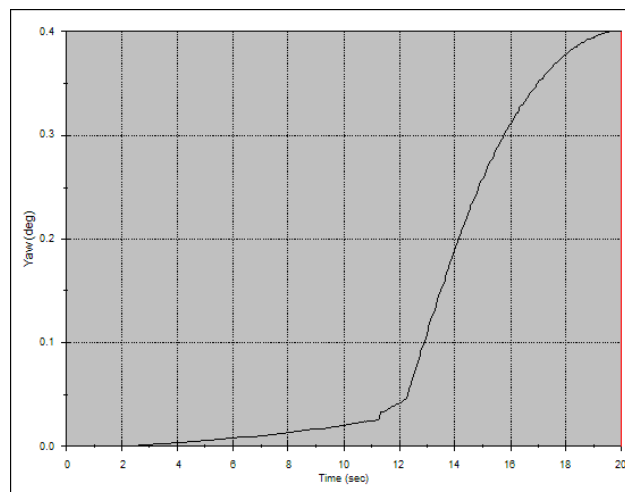


Σχήμα 6.13: Συναρμολόγημα στην τελική θέση ($y = 8mm$)

Στη Διάγραμμα 6.11 απεικονίζεται η εγκάρσια μετατόπιση y του κεντροειδούς του εξεταζόμενου συναρμολογήματος συναρτήσει του χρόνου, ενώ στο Διάγραμμα 6.12 απεικονίζεται η γωνία στροφής (yaw angle) του άξονα στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του συναρμολογήματος και ως προς την εγκάρσια (μετατρόχιο) διεύθυνση, συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 6.11: Οριζόντια μετατόπιση του κεντροειδούς του συναρμολογήματος



Διάγραμμα 6.12: Γωνία στροφής του τροχοφόρου άξονα στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του

συναρμολογήματος και ως προς την εγκάρσια διεύθυνση

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6.13, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη τιμή της γωνίας στροφής φ του άξονα του συναρμολογήματος τροχοφόρου άξονα-σιδηροτροχιών εμφανίζεται για τη μέγιστη μετατόπιση y του κεντροειδούς του εν λόγω συναρμολογήματος. Ειδικότερα, για $y = 8mm$, προέκυψε $\varphi = 0.4 deg$.
- Η γωνία στροφής του άξονα του συναρμολογήματος τροχοφόρου άξονα-σιδηροτροχιών εμφανίζει δύο άλματα (ασυνέχειες), στοιχείο το οποίο υποδεικνύει ότι η επαφή μεταξύ τροχών και συνεργαζόμενων σιδηροτροχιών εμφανίζει ασυνέχεια.

ΚΕΦ.7 Προσδιορισμός επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς

Στον παρόν κεφάλαιο προτείνεται μία μαθηματική μέθοδος αριθμητικού υπολογισμού της μορφής και του εμβαδού της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Ο υπολογισμός βασίστηκε στα σημεία επαφής που είχαν ήδη προσδιορισθεί στο προηγούμενο στάδιο της ερευνητικής εργασίας (Κεφ. 6). Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο σύννηθες ζεύγος, τροχός διατομής S1002 - σιδηροτροχιά διατομής 60E1(UIC60). Οι υπολογισμοί έγιναν για τροχοφόρο άξονα κεντρωμένο στη γραμμή και για μετατόπισή του εγκάρσια προς την κατεύθυνση κίνησης κατά 5mm εκατέρωθεν της θέσης αυτής με βήμα 1mm. Η μέθοδος βασίζεται στις διάφορες τιμές διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η διείσδυση μπορεί να υπολογισθεί θεωρητικά συναρτήσει του στατικού φορτίου και της μορφής της διατομής του τροχού [51, 59]. Στο παρόν στάδιο της διδακτορικής διατριβής ο υπολογισμός της επιφάνειας επαφής έγινε σε κάθε θέση εγκάρσιας μετατόπισης για τιμές διείσδυσης από 0.01mm έως 0.1mm με βήμα 0.01mm, που αντιστοιχούν στην τάξη μεγέθους των τιμών που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Με τη μέθοδο που αναπτύσσεται παρακάτω, προσδιορίζεται η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης που περιγράφει το περίγραμμα της επιφάνειας επαφής και εξ' αυτής υπολογίζεται το ακριβές της μέγεθος. Επιπλέον, είναι εύκολα εφικτή η γενίκευση της μεθόδου που περιγράφεται, καθώς η όλη διαδικασία μπορεί να εφαρμοσθεί για κάθε ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς, εύρος γραμμής, κύρια ακτίνα κύλισης τροχού και κλίση σιδηροτροχιάς.

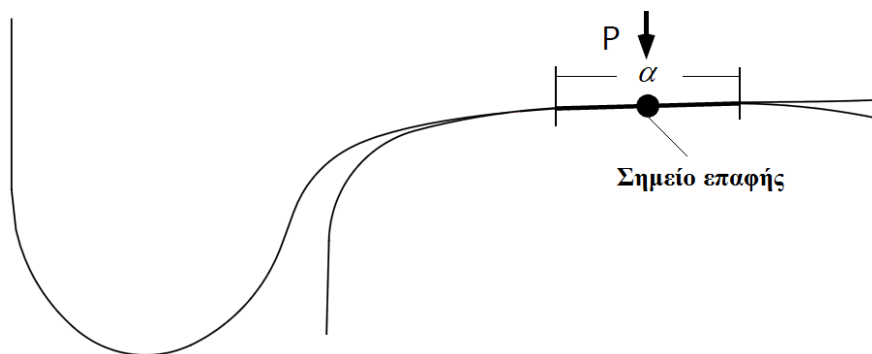
7.1 Περιγραφή μεθόδου υπολογισμού επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς

Στο σημείο ή στα σημεία που ο τροχός αγγίζει τη σιδηροτροχιά (Κεφ. 6) δημιουργείται μια επιφάνεια επαφής. Το μέγεθος και το σχήμα της μπορεί να υπολογισθεί από την κατακόρυφη δύναμη, την τοπική γεωμετρία του τροχού και της σιδηροτροχιάς και τις ιδιότητες του υλικού. Ο κύριος στόχος του προσδιορισμού της επιφάνειας επαφής είναι να καθορισθεί το μέγεθος των τάσεων και των παραμορφώσεων που εμφανίζονται όταν τα δύο σώματα έρθουν σε επαφή. Στο σημείο επαφής θα υπάρξει μια μικρή περιοχή όπου οι εξωτερικά εφαρμοσμένες δυνάμεις μεταδίδονται μέσω κατακόρυφων, εφαπτομενικών και διατμητικών τάσεων [5].

Οι βασικές παραδοχές που γίνονται στη μηχανική της επαφής είναι οι ακόλουθες [5]:

- Τα υλικά είναι ελαστικά, ισότροπα, ομοιογενή και η τάνυσή τους είναι πολύ μικρή.
- Οι φορείς παραμορφώνονται σαν ημιχώροι απείρου μήκους. Αυτό προϋποθέτει ότι η επιφάνεια επαφής είναι σημαντικά μικρότερη από τις γενικές διαστάσεις των φορέων. Ως αποτέλεσμα, οι διάφορες θεωρίες που αναπτύσσονται έχουν, κατά κύριο λόγο, εφαρμογή σε περιπτώσεις που οι δύο φορείς αρχικά εφάπτονται σημειακά, οι επιφάνειες τους όμως δεν εφαρμόζουν χωρίς την επιβολή φορτίου.
- Οι κλίσεις των επιφανειών επαφής είναι τόσο μικρές, που όλες οι πιέσεις θεωρείται ότι δρουν κατακόρυφα.

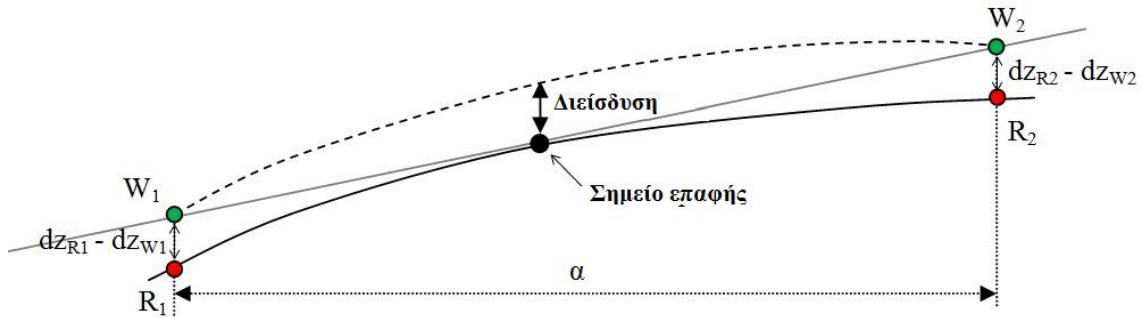
Προκειμένου να υπολογισθεί η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα, θεωρήθηκε ότι στο σημείο επαφής υπάρχει διείσδυση της σιδηροτροχιάς στον τροχό και ως εκ τούτου εκατέρωθεν του σημείου επαφής η σιδηροτροχιά πιέζει τον τροχό σε ένα μήκος α παράλληλα στην εφαπτομένη της διεπιφάνειας (Σχ. 7.1).



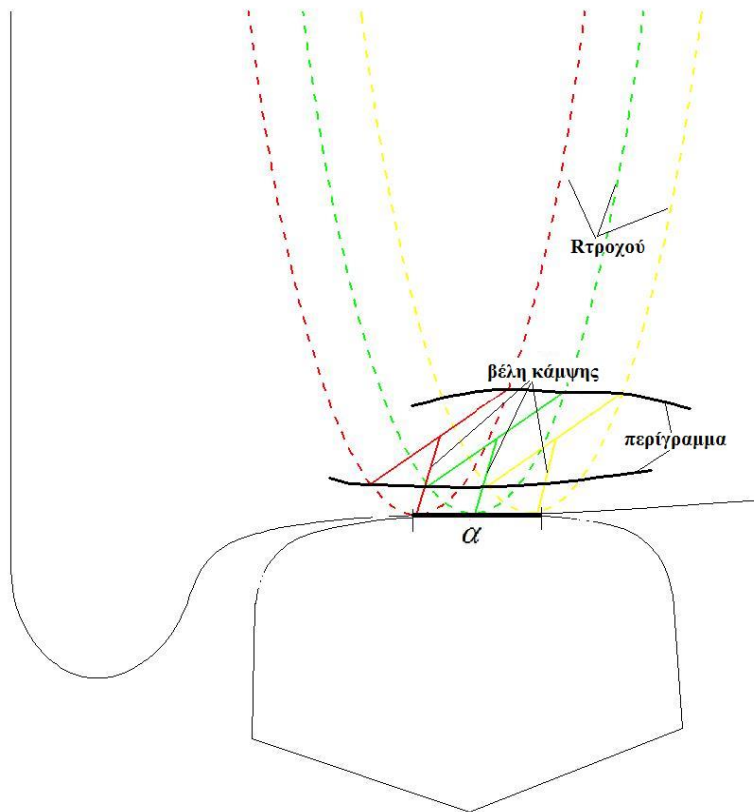
Σχήμα 7.1: Σημείο επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και εγκάρσια διάσταση επιφάνειας επαφής
 Το μήκος αυτό οριοθετεί την εγκάρσια διάσταση της επιφάνειας επαφής και υπολογίζεται θεωρώντας ότι στο σημείο επαφής εμφανίζεται διείσδυση δεδομένης τιμής. Αναλυτικότερα (Σχ. 7.2):

- υπολογίζονται οι διαφορές dz_R μεταξύ σημείου επαφής επί της σιδηροτροχιάς και των εκατέρωθεν αυτού σημείων $dz_R = z_{Rcontact} - z_{Ri}$,
- υπολογίζονται οι διαφορές dz_W μεταξύ του σημείου επαφής επί του τροχού και των εκατέρωθεν αυτού σημείων $dz_W = z_{Wcontact} - z_{Wi}$,
- υπολογίζεται σε κάθε θέση i η διαφορά $dz_{Ri} - dz_{Wi}$,

- το μήκος α προκύπτει ως απόσταση των σημείων, στα οποία η διαφορά $dz_{Ri} - dz_{Wi}$ παίρνει την ίδια τιμή με την τιμή της διείσδυσης στο σημείο επαφής.



Σχήμα 7.2: Απεικόνιση συνθήκης υπολογισμού της εγκάρσιας διάστασης της επιφάνειας επαφής. Στη συνέχεια σε κάθε σημείο που βρίσκεται εντός του τμήματος α , υπολογίζεται η τιμή της ακτίνας του τροχού και το βέλος κάμψης της περιφέρειας του τροχού. Έτσι προκύπτει το περίγραμμα της ημι-επιφάνειας επαφής στη διαμήκη κατεύθυνση x (κατεύθυνση κίνησης) (Σχ. 7.3).



Σχήμα 7.3: Υπολογισμός περιγράμματος επιφάνειας επαφής στη διαμήκη διεύθυνση. Το περίγραμμα της ημι-επιφάνειας εκφράζεται με γραμμή τάσης πολυωνυμικής μορφής, και η συνάρτηση επιλύεται προκειμένου να προκύψουν τα όρια του

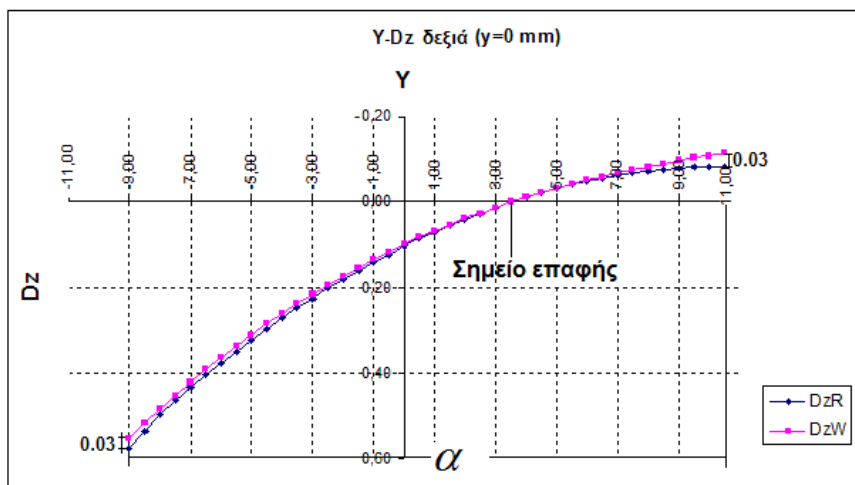
ολοκληρώματος που θα οδηγήσει στην εύρεση του εμβαδού της ημι-επιφάνειας, και κατόπιν του ολικού εμβαδού.

Τα αποτελέσματα για το σύνηθες ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς, S1002-60E1 παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο. Σημειώνεται, επίσης, ότι θεωρήθηκε τροχός με κύρια ακτίνα κύλισης 420mm και σιδηροτροχιά με κλίση 1:40 ως προς την κατακόρυφο. Λόγω συμμετρίας οι υπολογισμοί έγιναν μόνο για το δεξί ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς.

7.2 Εφαρμογή της μεθόδου σε ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς: S1002-60E1 (1:40)

Σύμφωνα με την προηγηθείσα ανάλυση προκειμένου να υπολογισθεί η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς για εγκάρσια μετατόπιση του τροχοφόρου άξονα από $y = -5mm$ έως $y = +5mm$ με βήμα $1mm$, θεωρήθηκε ότι εκατέρωθεν του σημείου επαφής ο τροχός πιέζει τη σιδηροτροχιά σε ένα μήκος α παράλληλα στην εφαπτομένη της διεπιφάνειας.

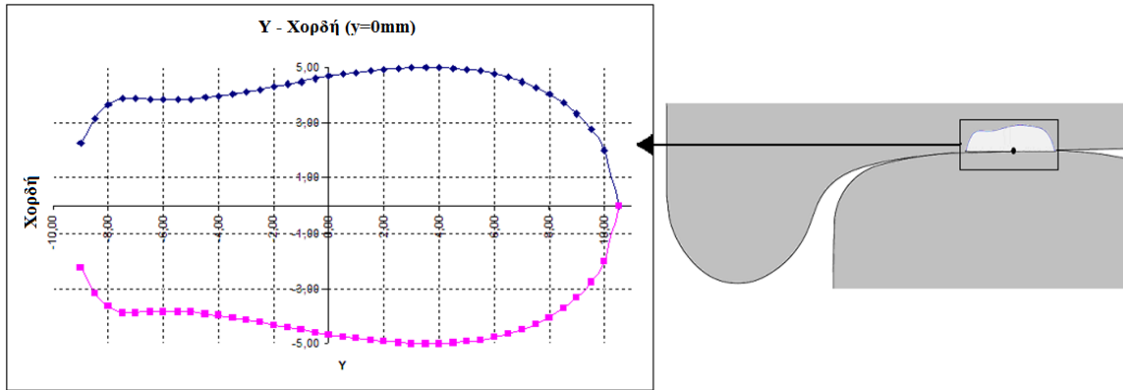
Στην περίπτωση τροχοφόρου άξονα κεντρωμένου στη γραμμή ($y = 0mm$), οι υπολογισμοί των διαφορών dz_R και dz_W σε συσχέτισμό με την προεπιλεγμένη τιμή των $0.030mm$ για τη διείσδυση ($dz_{Ri} - dz_{Wi}$), οδήγησαν στην εύρεση των σημείων ($y_1 = -9mm$ και $y_2 = 10.5mm$ για τη δεξιά σιδηροτροχιά) που οριοθετούν την εγκάρσια διάσταση της επιφάνειας επαφής (Διάγραμμα 7.1).



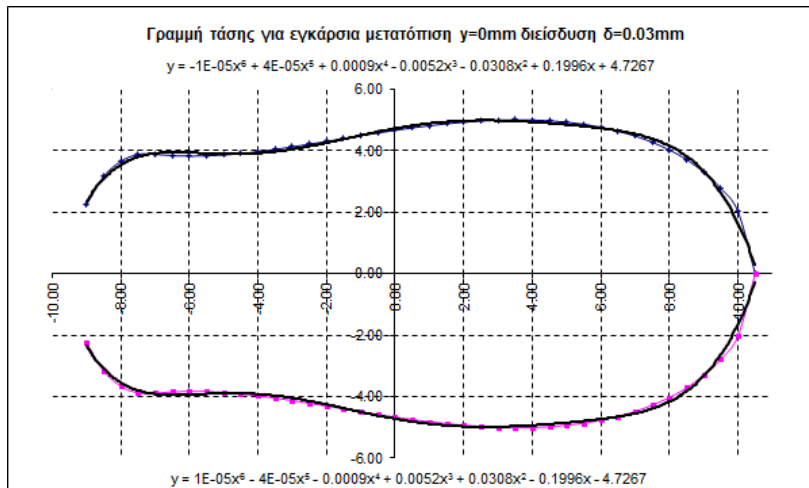
Διάγραμμα 7.1: Εύρος α σημείων όπου $dz_{Ri} - dz_{Wi} = 0.030mm$

Επομένως προέκυψε το μήκος $\alpha = 19.5mm$ ως απόσταση μεταξύ των σημείων, στα οποία η διαφορά $dz_{Ri} - dz_{Wi}$ παίρνει την τιμή $0.030mm$.

Με υπόθεση κύριας ακτίνας κύλισης τροχού $420.00mm$ υπολογίζονται τα βέλη κάμψης των ακτίνων του τροχού για το εύρος των σημείων που προαναφέρθηκε. Στο Διάγραμμα 7.2 φαίνεται η απεικόνιση αυτών.



Διάγραμμα 7.2: Βέλη κάμψης περιφερειών εκατέρωθεν του σημείου επαφής σε μήκος a
 Ακολουθεί η προσθήκη γραμμής τάσης στο παραπάνω διάγραμμα και η μαθηματική έκφραση αυτής με πολυώνυμο τέτοιου βαθμού ώστε να προσεγγίζεται με τον βέλτιστο τρόπο (Διάγραμμα 7.3).



Διάγραμμα 7.3: Γραμμή τάσης και μαθηματική έκφραση αυτής

Από την επίλυση του πολυωνύμου προκύπτουν τα ακριβή όρια της συνάρτησης και το εμβαδόν της ημι-επιφάνειας επαφής υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\int_{-9.95858}^{10.5157} \left(4.7267 + 0.1996x - 0.0308x^2 - 0.0052x^3 + 0.0009x^4 + \frac{x^5}{25000} - \frac{x^6}{100000} \right) dx = 81.8238mm^2 \quad (7.1)$$

Άρα το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας επαφής ισούται με:

$$E_{y=0} = 2 * 81.8238 = 163.6476 \text{ mm}^2 \quad (7.2)$$

7.3 Αριθμητικά αποτελέσματα για το ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς: S1002-60E1 (1:40)

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω επαναλήφθηκε για όλες τις υπό διερεύνηση θέσεις και τιμές διείδυσης. Έτσι, προέκυψε το ακριβές μέγεθος της επιφάνειας επαφής και η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το περίγραμμα της ημι-επιφάνειας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες και διαγράμματα.

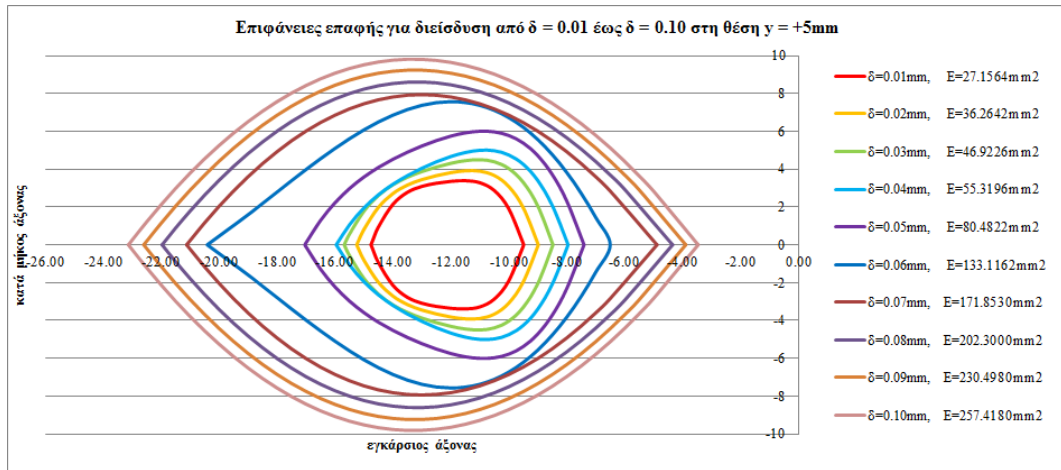
Πίνακας 7.1: Μέγεθος και μαθηματική έκφραση επιφάνειας επαφής για τις διάφορες θέσεις του τροχοφόρου άξονα, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδηροτροχιάς

y (mm)	δ(mm)	Επιφάνεια επαφής (mm ²)	Μαθηματική έκφραση του περιγράμματος της ημι-επιφάνειας επαφής
-5.00	0.01	36.3636	$y = -0.0232x^4 + 0.7027x^3 - 8.0355x^2 + 41.251x - 76.95$
	0.02	47.0502	$y = -0.0139x^4 + 0.4132x^3 - 4.6685x^2 + 23.839x - 42.552$
	0.03	84.3418	$y = -0.0059x^4 + 0.1689x^3 - 1.8563x^2 + 9.432x - 13.572$
	0.04	108.9044	$y = -0.0041x^4 + 0.1152x^3 - 1.2476x^2 + 6.3578x - 7.0782$
	0.05	133.7060	$y = -0.0029x^4 + 0.079x^3 - 0.8396x^2 + 4.32x - 2.5985$
	0.06	165.5026	$y = -0.0022x^4 + 0.0582x^3 - 0.6023x^2 + 3.0887x + 0.6049$
	0.07	170.2160	$y = -0.0021x^4 + 0.0554x^3 - 0.5705x^2 + 2.95x + 0.7926$
	0.08	199.5184	$y = -0.0016x^4 + 0.0389x^3 - 0.3807x^2 + 1.9867x + 3.4795$
	0.09	251.8980	$y = -0.0012x^4 + 0.0273x^3 - 0.2492x^2 + 1.3377x + 5.6102$
	0.10	253.0420	$y = -0.0012x^4 + 0.0274x^3 - 0.2501x^2 + 1.3404x + 5.6092$
-4.00	0.01	41.8276	$y = -0.0173x^4 + 0.5069x^3 - 5.6056x^2 + 27.928x - 49.603$
	0.02	54.5668	$y = -0.0108x^4 + 0.3111x^3 - 3.3988x^2 + 16.859x - 28.158$
	0.03	88.8030	$y = -0.0052x^4 + 0.1453x^3 - 1.5496x^2 + 7.6187x - 9.5091$
	0.04	107.2542	$y = -0.0033x^4 + 0.0875x^3 - 0.9093x^2 + 4.5309x - 3.4231$
	0.05	136.5578	$y = -0.0025x^4 + 0.0657x^3 - 0.6726x^2 + 3.3547x - 0.5397$
	0.06	159.5248	$y = -0.0019x^4 + 0.0466x^3 - 0.4586x^2 + 2.2914x + 2.1787$
	0.07	206.8420	$y = -0.0013x^4 + 0.0297x^3 - 0.2744x^2 + 1.4352x + 4.4538$
	0.08	206.3820	$y = -0.0013x^4 + 0.0297x^3 - 0.2747x^2 + 1.4361x + 4.4533$
	0.09	249.2260	$y = -0.001x^4 + 0.0222x^3 - 0.198x^2 + 1.0894x + 5.6915$
	0.10	313.8240	$y = -0.0007x^4 + 0.014x^3 - 0.1138x^2 + 0.7282x + 7.2593$

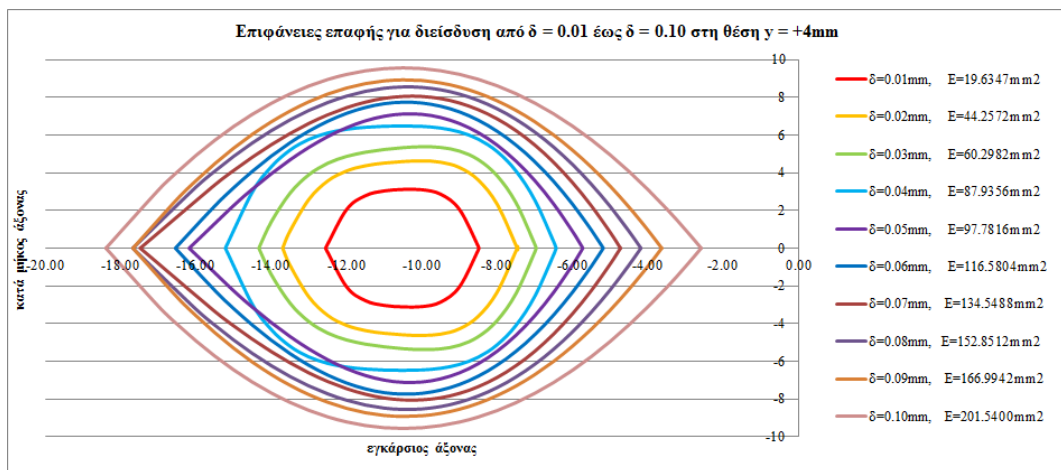
y (mm)	δ (mm)	Επιφάνεια επαφής (mm ²)	Μαθηματική έκφραση του περιγράμματος της ημι-επιφάνειας επαφής
-3.00	0.01	32.1512	$y = -0.0175x^4 + 0.4833x^3 - 5.0639x^2 + 23.95x - 40.212$
	0.02	62.2062	$y = -0.0073x^4 + 0.196x^3 - 2.0033x^2 + 9.3918x - 13.015$
	0.03	100.2956	$y = -0.0034x^4 + 0.0867x^3 - 0.8528x^2 + 4.0061x - 2.4126$
	0.04	117.0242	$y = -0.0023x^4 + 0.0549x^3 - 0.5258x^2 + 2.539x + 0.5953$
	0.05	142.4560	$y = -0.0017x^4 + 0.0388x^3 - 0.3624x^2 + 1.8002x + 2.4604$
	0.06	183.7500	$y = -0.0012x^4 + 0.0262x^3 - 0.2336x^2 + 1.2188x + 4.1521$
	0.07	223.2440	$y = -0.0009x^4 + 0.0175x^3 - 0.1438x^2 + 0.8212x + 5.6182$
	0.08	228.5240	$y = -0.0009x^4 + 0.018x^3 - 0.1478x^2 + 0.8297x + 5.6235$
	0.09	300.0820	$y = -0.0006x^4 + 0.011x^3 - 0.08x^2 + 0.5652x + 6.895$
	0.10	336.3600	$y = -0.0005x^4 + 0.0066x^3 - 0.0397x^2 + 0.4233x + 8.057$
-2.00	0.01	33.2712	$y = -0.0139x^4 + 0.3464x^3 - 3.2799x^2 + 14.09x - 20.346$
	0.02	77.4396	$y = -0.0038x^4 + 0.0875x^3 - 0.7815x^2 + 3.3547x - 1.4806$
	0.03	115.0690	$y = -0.0018x^4 + 0.0365x^3 - 0.3062x^2 + 1.4112x + 2.5467$
	0.04	139.4268	$y = -0.0013x^4 + 0.0245x^3 - 0.199x^2 + 0.9892x + 3.7289$
	0.05	165.8738	$y = -0.001x^4 + 0.0174x^3 - 0.1362x^2 + 0.7384x + 4.687$
	0.06	206.2300	$y = -0.0007x^4 + 0.0106x^3 - 0.0771x^2 + 0.5258x + 5.6518$
	0.07	251.5320	$y = -0.0005x^4 + 0.0056x^3 - 0.0364x^2 + 0.4003x + 6.5866$
	0.08	252.7540	$y = -0.0005x^4 + 0.0057x^3 - 0.0368x^2 + 0.3995x + 6.5901$
	0.09	339.2060	$y = -0.0003x^4 + 0.0027x^3 - 0.0137x^2 + 0.3352x + 7.5514$
	0.10	397.6800	$y = -0.0003x^4 + 0.0021x^3 - 0.004x^2 + 0.2711x + 8.6189$
-1.00	0.01	59.2542	$y = -0.004x^4 + 0.075x^3 - 0.5453x^2 + 1.9934x + 0.4056$
	0.02	90.8980	$y = -0.0018x^4 + 0.0288x^3 - 0.1933x^2 + 0.8125x + 2.8347$
	0.03	136.4236	$y = -0.0009x^4 + 0.0114x^3 - 0.0688x^2 + 0.422x + 4.2985$
	0.04	161.7044	$y = -0.0006x^4 + 0.0052x^3 - 0.0309x^2 + 0.3432x + 4.8672$
	0.05	209.7140	$y = -0.0003x^4 + 0.0014x^3 - 0.0123x^2 + 0.3227x + 5.4147$
	0.06	233.7060	$y = -0.0003x^4 + 0.0004x^3 - 0.0054x^2 + 0.2936x + 6.0156$
	0.07	284.0100	$y = -0.0003x^4 + 0.0011x^3 - 0.0008x^2 + 0.221x + 6.7719$
	0.08	330.7100	$y = -0.0003x^4 + 0.001x^3 + 0.0028x^2 + 0.1829x + 7.5983$
	0.09	386.8640	$y = -0.0003x^4 + 0.0011x^3 + 0.006x^2 + 0.1476x + 8.4966$
	0.10	464.2420	$y = -0.0003x^4 + 0.0018x^3 + 0.0104x^2 + 0.0838x + 9.4515$

y (mm)	δ (mm)	Επιφάνεια επαφής (mm ²)	Μαθηματική έκφραση του περιγράμματος της ημι-επιφάνειας επαφής
0.00	0.01	55.2936	$y = -9E-05x^6 + 0.001x^5 - 0.0015x^4 - 0.0107x^3 - 0.0254x^2 + 0.3623x + 2.3391$
	0.02	141.5466	$y = -1E-05x^6 + 3E-05x^5 + 0.0012x^4 - 0.0049x^3 - 0.0396x^2 + 0.233x + 3.8096$
	0.03	163.6476	$y = -1E-05x^6 + 4E-05x^5 + 0.0009x^4 - 0.0052x^3 - 0.0308x^2 + 0.1996x + 4.7267$
	0.04	219.8020	$y = -7E-06x^6 + 4E-05x^5 + 0.0007x^4 - 0.0051x^3 - 0.0245x^2 + 0.1765x + 5.6616$
	0.05	275.5880	$y = -6E-06x^6 + 5E-05x^5 + 0.0006x^4 - 0.0056x^3 - 0.0211x^2 + 0.1727x + 6.6284$
	0.06	284.3580	$y = -5E-06x^6 + 4E-05x^5 + 0.0004x^4 - 0.0046x^3 - 0.0178x^2 + 0.1509x + 7.1192$
	0.07	340.4840	$y = -4E-06x^6 + 4E-05x^5 + 0.0004x^4 - 0.0046x^3 - 0.0164x^2 + 0.1474x + 7.6234$
	0.08	372.0900	$y = -4E-06x^6 + 4E-05x^5 + 0.0004x^4 - 0.0046x^3 - 0.0166x^2 + 0.1459x + 8.2475$
	0.09	413.9440	$y = -3E-06x^6 + 3E-05x^5 + 0.0003x^4 - 0.0036x^3 - 0.0162x^2 + 0.1182x + 8.9768$
	0.10	442.9100	$y = -3E-06x^6 + 2E-05x^5 + 0.0003x^4 - 0.0031x^3 - 0.0173x^2 + 0.1036x + 9.7968$
1.00	0.01	19.4869	$y = -0.0454x^4 - 1.256x^3 - 13.24x^2 - 63.611x - 115.67$
	0.02	50.0054	$y = 9E-05x^5 - 0.0045x^4 - 0.1078x^3 - 0.7684x^2 - 2.6999x - 1.9815$
	0.03	96.4434	$y = 0.0001x^5 - 0.0002x^4 - 0.0157x^3 - 0.0452x^2 - 0.175x + 2.6257$
	0.04	151.5746	$y = 4E-05x^5 - 0.0006x^4 - 0.0089x^3 + 0.0086x^2 - 0.0501x + 4.0785$
	0.05	202.5580	$y = 3E-05x^5 - 0.0005x^4 - 0.0066x^3 + 0.0189x^2 - 0.0374x + 4.9463$
	0.06	230.1880	$y = 2E-05x^5 - 0.0005x^4 - 0.0041x^3 + 0.023x^2 - 0.0635x + 5.5899$
	0.07	270.2200	$y = 1E-05x^5 - 0.0005x^4 - 0.0033x^3 + 0.0247x^2 - 0.0652x + 6.2842$
	0.08	327.6280	$y = 1E-05x^5 - 0.0004x^4 - 0.0026x^3 + 0.0257x^2 - 0.0683x + 7.0255$
	0.08	341.0300	$y = 8E-06x^5 - 0.0004x^4 - 0.0017x^3 + 0.0242x^2 - 0.0848x + 7.4338$
	0.10	420.7260	$y = 7E-06x^5 - 0.0003x^4 - 0.0011x^3 + 0.0235x^2 - 0.0921x + 8.2586$
2.00	0.01	16.4116	$y = 0.0009x^5 - 0.0972x^4 - 3.9696x^3 - 53.873x^2 - 317.43x - 693.46$
	0.02	36.9708	$y = -0.0309x^4 - 1.0164x^3 - 12.785x^2 - 73.061x - 155.85$
	0.03	52.7766	$y = -0.017x^4 - 0.5164x^3 - 6.0196x^2 - 32.423x - 63.996$
	0.04	75.9970	$y = -0.005x^4 - 0.132x^3 - 1.4065x^2 - 7.7648x - 13.553$
	0.05	108.9916	$y = -0.0028x^4 - 0.0616x^3 - 0.5298x^2 - 2.7918x - 2.0107$
	0.06	132.6888	$y = -0.0019x^4 - 0.0341x^3 - 0.2229x^2 - 1.2131x + 1.8074$
	0.07	164.1428	$y = -0.0014x^4 - 0.0204x^3 - 0.0867x^2 - 0.5958x + 3.5711$
	0.08	211.0180	$y = -0.0009x^4 - 0.0106x^3 - 0.0195x^2 - 0.3744x + 4.6982$
	0.09	252.3900	$y = -0.0007x^4 - 0.0069x^3 + 0.0039x^2 - 0.2971x + 5.4743$
	0.10	287.2340	$y = -0.0006x^4 - 0.0044x^3 + 0.0169x^2 - 0.2603x + 6.2732$

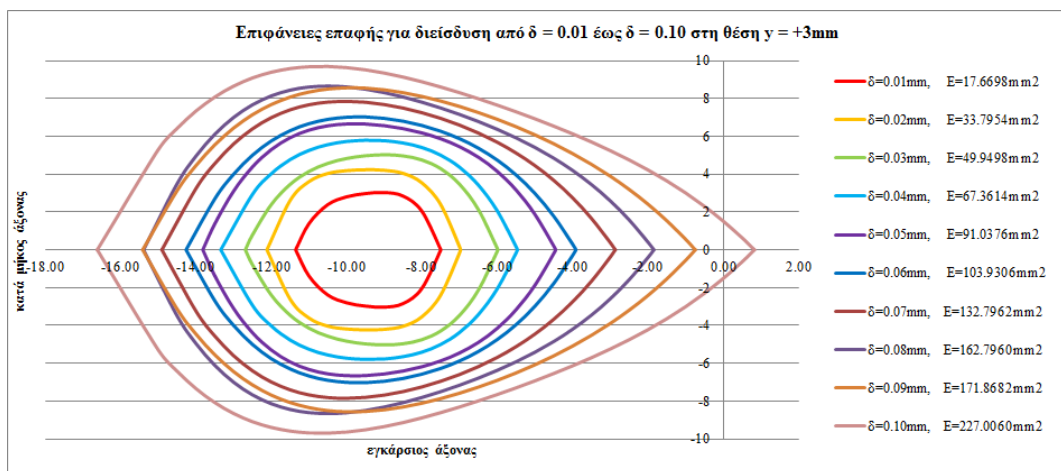
y (mm)	δ (mm)	Επιφάνεια επαφής (mm ²)	Μαθηματική έκφραση του περιγράμματος της ημι-επιφάνειας επαφής
3.00	0.01	17.6698	$y = -0.161x^4 - 6.1245x^3 - 87.567x^2 - 557.48x - 1329.8$
	0.02	33.7954	$y = -0.0802x^4 - 3.0665x^3 - 44.079x^2 - 282.27x - 675.11$
	0.03	49.9498	$y = -0.0232x^4 - 0.8784x^3 - 12.654x^2 - 81.968x - 195.85$
	0.04	67.3614	$y = -0.0128x^4 - 0.4817x^3 - 6.9731x^2 - 45.926x - 109.92$
	0.05	91.0376	$y = -0.0072x^4 - 0.2537x^3 - 3.4905x^2 - 22.416x - 50.155$
	0.06	103.9306	$y = -0.0039x^4 - 0.1344x^3 - 1.8875x^2 - 12.911x - 28.748$
	0.07	132.7962	$y = -0.0024x^4 - 0.0759x^3 - 1.0105x^2 - 7.0546x - 13.543$
	0.08	162.7960	$y = -0.002x^4 - 0.0583x^3 - 0.7017x^2 - 4.7132x - 6.6451$
	0.09	171.8682	$y = -0.0011x^4 - 0.0275x^3 - 0.328x^2 - 2.6678x - 1.8102$
	0.10	227.0060	$y = -0.0008x^4 - 0.0182x^3 - 0.1871x^2 - 1.6634x + 1.5144$
4.00	0.01	19.6347	$y = -0.1463x^4 - 6.1756x^3 - 97.899x^2 - 690.67x - 1826.3$
	0.02	44.2572	$y = -0.04x^4 - 1.7078x^3 - 27.428x^2 - 196.23x - 522.67$
	0.03	60.2982	$y = -0.0227x^4 - 0.9798x^3 - 15.94x^2 - 115.63x - 309.72$
	0.04	87.9356	$y = -0.0139x^4 - 0.6043x^3 - 9.9196x^2 - 72.804x - 194.92$
	0.05	97.7816	$y = -0.0125x^3 - 0.6676x^2 - 9.7835x - 36.477$
	0.06	116.5804	$y = -0.0067x^3 - 0.4568x^2 - 7.3366x - 26.686$
	0.07	134.5488	$y = -0.0085x^3 - 0.4778x^2 - 7.1205x - 23.878$
	0.08	152.8512	$y = -0.0046x^3 - 0.3376x^2 - 5.5221x - 17.534$
	0.09	166.9942	$y = -0.0015x^3 - 0.2289x^2 - 4.2914x - 12.633$
	0.10	201.5400	$y = 3E-05x^3 - 0.1522x^2 - 3.204x - 7.2635$
5.00	0.01	27.1564	$y = -0.0549x^4 - 2.6873x^3 - 49.423x^2 - 404.56x - 1239.7$
	0.02	36.2642	$y = -0.029x^4 - 1.4355x^3 - 26.736x^2 - 221.71x - 685.92$
	0.03	46.9226	$y = -0.0179x^4 - 0.8929x^3 - 16.784x^2 - 140.46x - 436.07$
	0.04	55.3196	$y = -0.0097x^4 - 0.4947x^3 - 9.5627x^2 - 82.338x - 260.06$
	0.05	80.4822	$y = -0.0057x^4 - 0.2988x^3 - 5.9584x^2 - 52.904x - 169.22$
	0.06	133.1162	$y = -0.0105x^3 - 0.5723x^2 - 9.1904x - 38.447$
	0.07	171.8530	$y = -0.1206x^2 - 3.136x - 12.445$
	0.08	202.3000	$y = -0.111x^2 - 2.9209x - 10.603$
	0.09	230.4980	$y = -0.1057x^2 - 2.8003x - 9.3038$
	0.10	257.4180	$y = -0.1016x^2 - 2.7019x - 8.144$



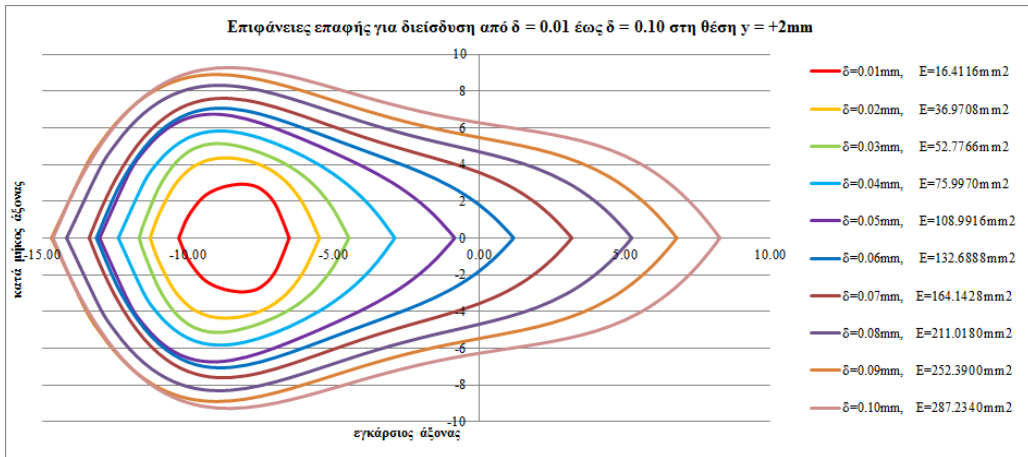
Διάγραμμα 7.4: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +5$ mm, συναρτήσε της διείσδυσης τροχού-σιδ/χιάς



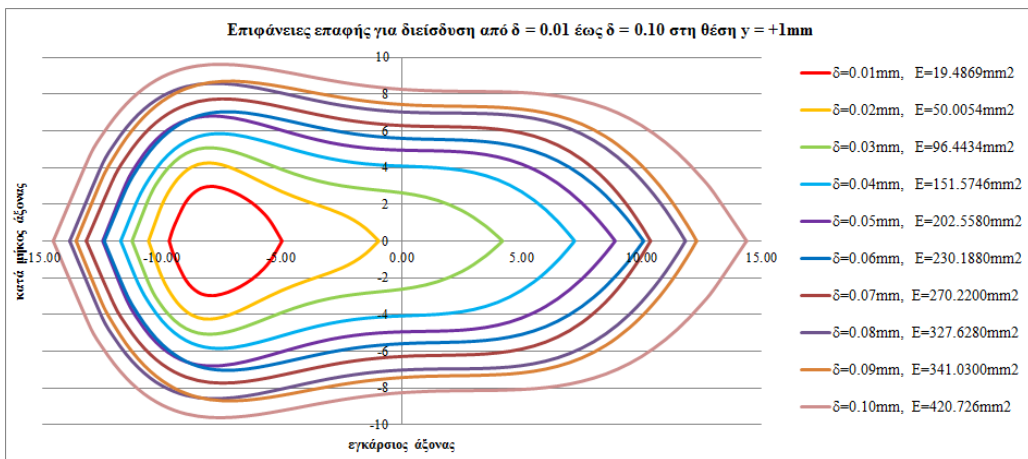
Διάγραμμα 7.5: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +4$ mm, συναρτήσε της διείσδυσης τροχού-σιδ/χιάς



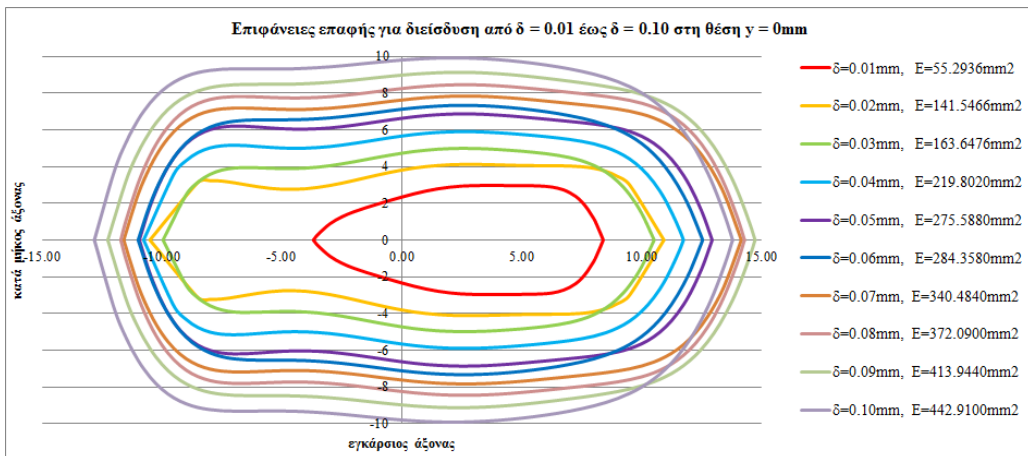
Διάγραμμα 7.6: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +3$ mm, συναρτήσε της διείσδυσης τροχού-σιδ/χιάς



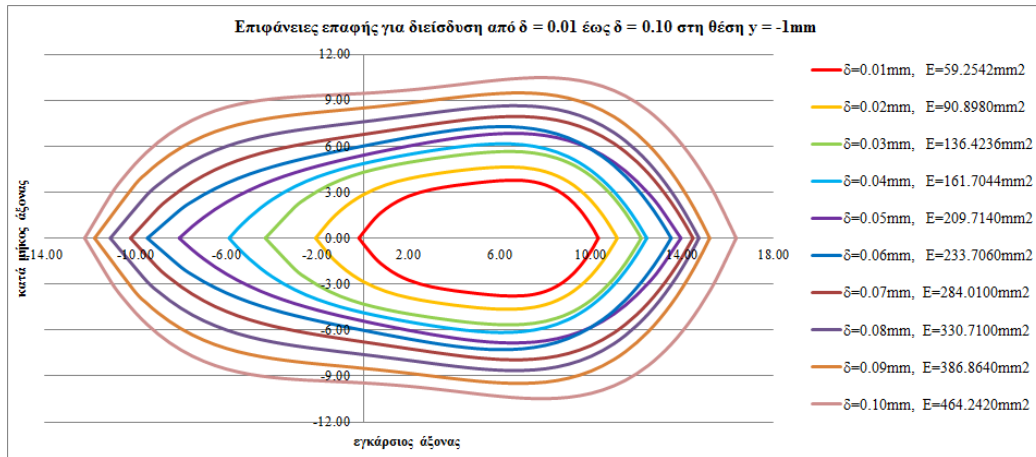
Διάγραμμα 7.7: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +2 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



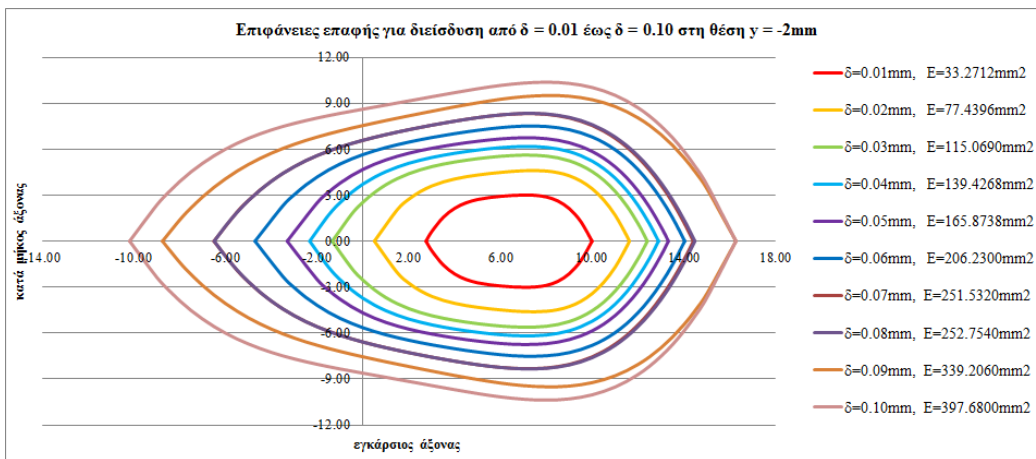
Διάγραμμα 7.8: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = +1 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



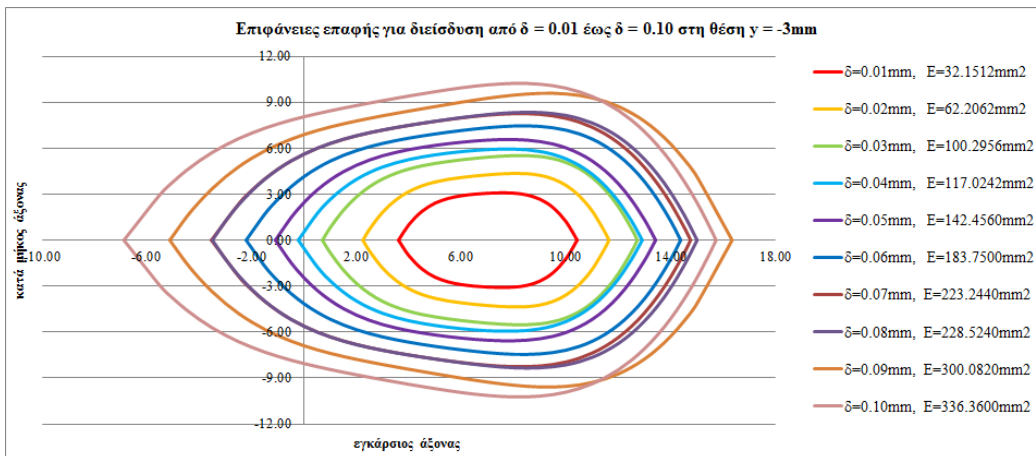
Διάγραμμα 7.9: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = 0 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



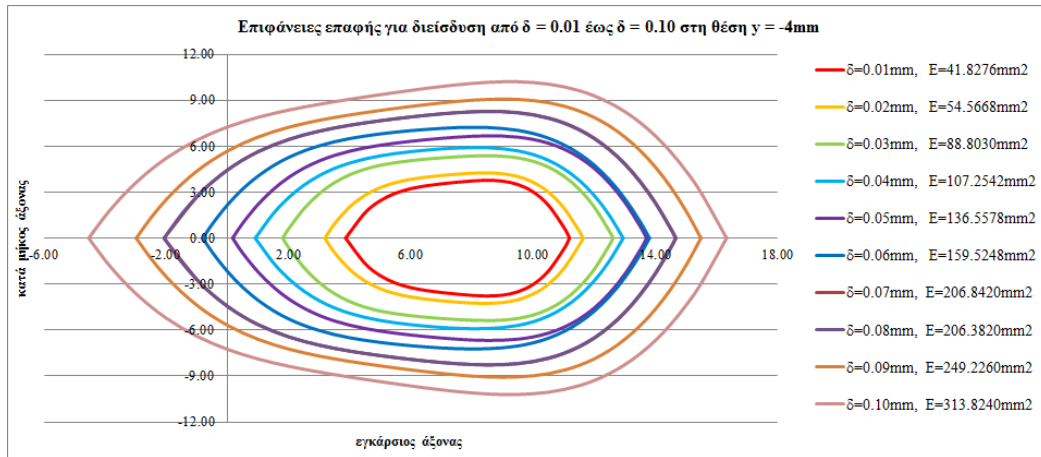
Διάγραμμα 7.10: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -1$ mm, συναρτήσε της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



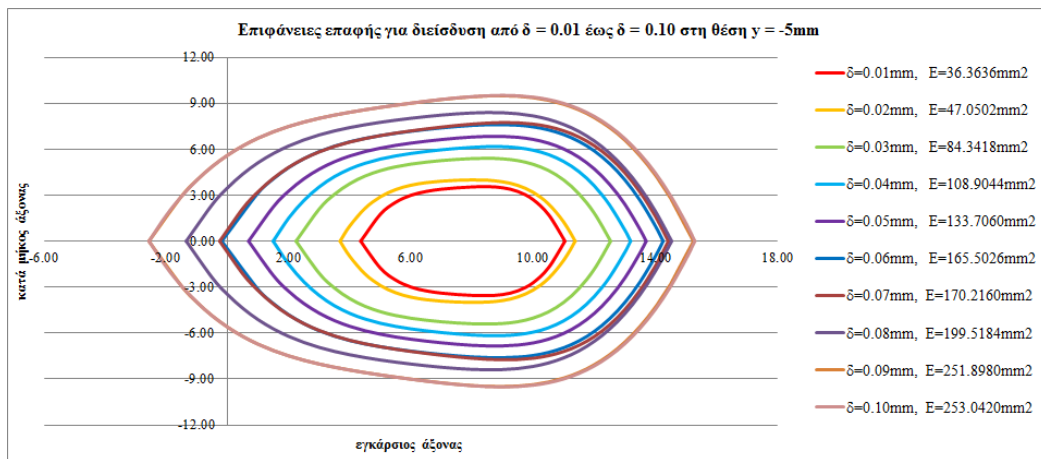
Διάγραμμα 7.11: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -2$ mm, συναρτήσε της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



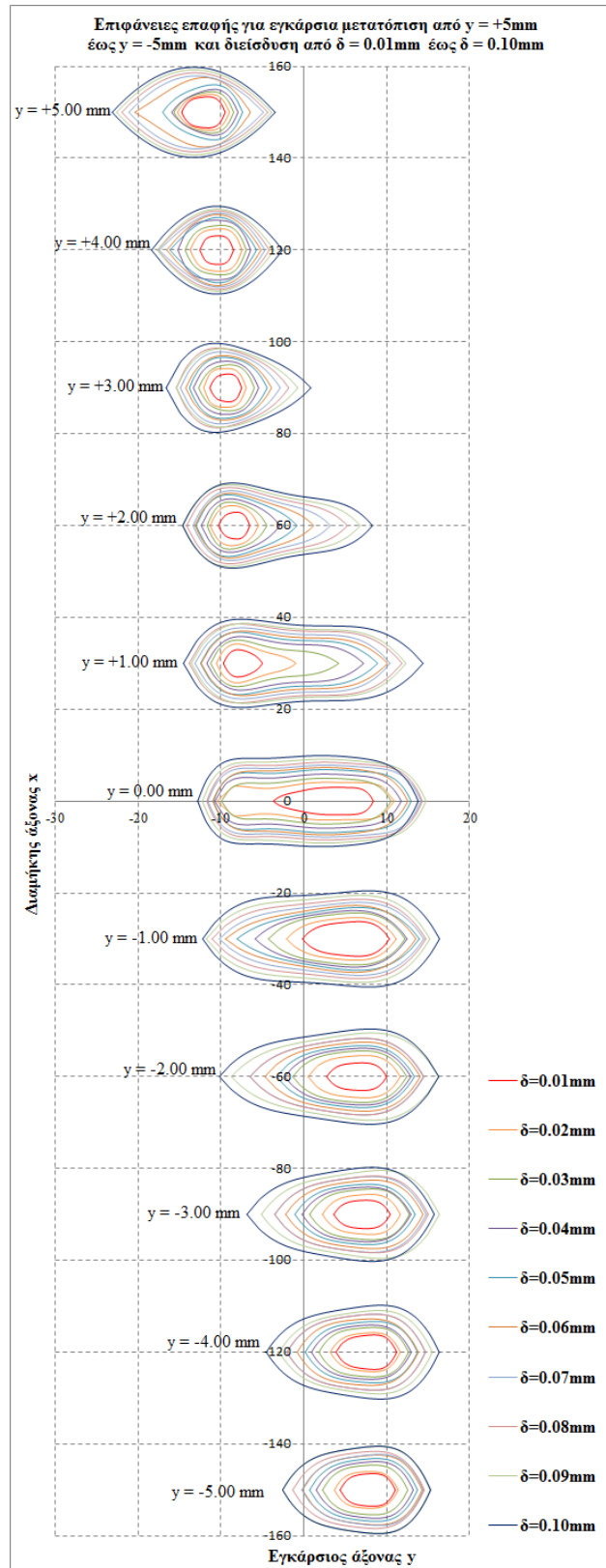
Διάγραμμα 7.12: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -3$ mm, συναρτήσε της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



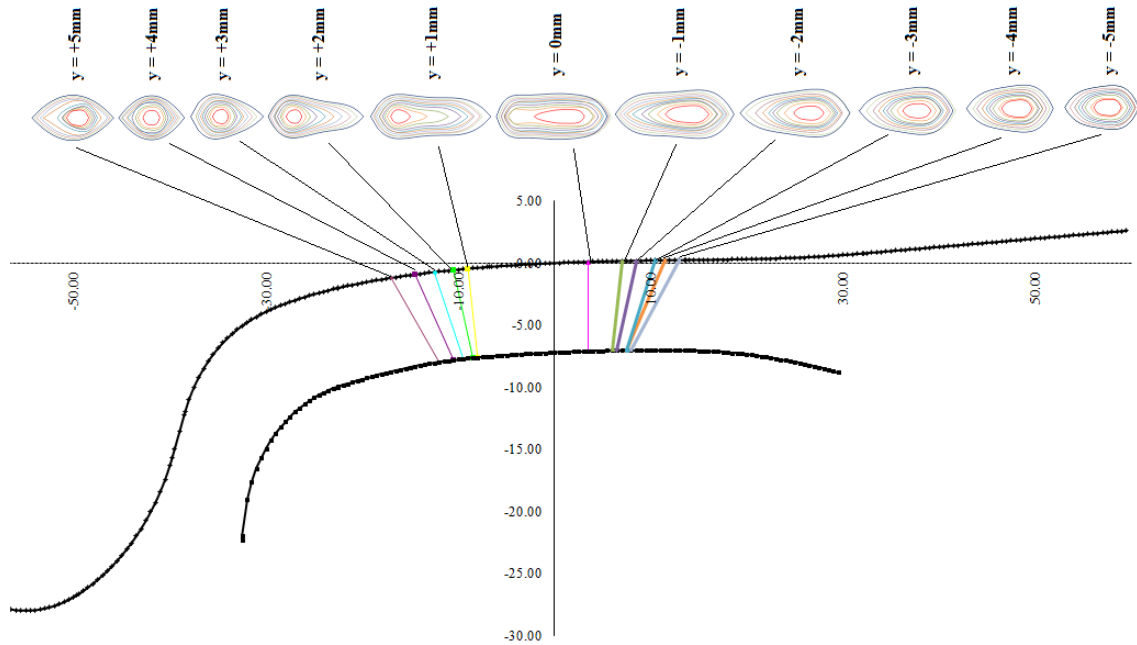
Διάγραμμα 7.13: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -4 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



Διάγραμμα 7.14: Μορφή και μέγεθος επιφανειών επαφής για εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y = -5 \text{ mm}$, συναρτήσει της διείδυσης τροχού-σιδ/χιάς



Διάγραμμα 7.15: Επιφάνειες επαφής συναρτήσει της διείδυσης στις υπό διερεύνηση θέσεις (κάτοψη κεφαλής δεξιάς σιδηροτροχιάς)



Διάγραμμα 7.16: Επιφάνειες επαφής στα αντίστοιχα σημεία επαφής (S1002-60E1, 1:40)

Η τιμή της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [51, 59] μπορεί να υπολογισθεί θεωρητικά συναρτήσει του στατικού φορτίου και της μορφής της διατομής του τροχού. Η επιφάνεια επαφής που υπολογίστηκε είναι συνάρτηση της διείσδυσης και ως εκ τούτου θεωρήθηκε σκόπιμο να εκτιμηθούν πειραματικά για στατική φόρτιση τροχού οι τιμές της διείσδυσης, ώστε να επιβεβαιωθούν οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές. Προς τούτο διεξήχθη πείραμα σε φυσική κλίμακα, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στα ακόλουθα κεφάλαια (Κεφ. 8 και 9). Από τα αποτελέσματα του πειράματος προέκυψαν για πέντε σχετικές θέσεις μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς οι τιμές της διείσδυσης για φορτίο από 10kN έως 100kN με βήμα 10kN.

ΜΕΡΟΣ Γ΄

ΚΕΦ.8 Πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της διείσδυσης μεταξύ τροχού - σιδηροτροχιάς

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, προσδιορίσθηκε μαθηματικά η μορφή και η τιμή της επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, συναρτήσει της διείσδυσης της σιδηροτροχιάς στον τροχό. Το εύρος τιμών της διείσδυσης στους θεωρητικούς υπολογισμούς κυμαίνεται από 0,01mm έως 0,10mm. Ο υπολογισμός αυτός έγινε κατ' αρχήν για τροχοφόρο άξονα κεντρωμένο στη γραμμή (εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα $y=0mm$) και κατόπιν επαναλήφθηκε για διάφορες θέσεις εγκάρσιας μετατόπισης του τροχοφόρου άξονα εκατέρωθεν της αρχικής του θέσης (εγκάρσια μετατόπιση τροχοφόρου άξονα από $y=-5mm$ έως $y=5mm$, με βήμα 1mm).

Η εύρεση της τιμής της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς για διάφορες τιμές φόρτισης και για διάφορες μεταξύ τους θέσεις πραγματοποιήθηκε πειραματικά σε φυσική κλίμακα, με στατική αξονική καταπόνηση σιδηροδρομικού τροχού επί τμήματος σιδηροτροχιάς σε πλάκα έδρασης. Το πείραμα διεξήχθη στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π.

Ο τροχός και η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκαν εντός μηχανικής πρέσσας δοκιμών και με κάμερες υψηλής ευκρίνειας αποτυπώθηκαν οι μικρομετακινήσεις των δύο σωμάτων. Ο τροχός υποστηρίχθηκε μέσω ειδικής διάταξης, η οποία κατασκευάσθηκε κατεξοχήν για το εν λόγω πείραμα. Η διαδικασία φόρτισης επαναλήφθηκε για διάφορες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά και για μέγιστη τιμή φορτίου 100kN. Η λήψη των στοιχείων των καμερών γινόταν με βήμα 10kN μέσω ειδικού λογισμικού. Ακολούθως με κατάλληλους υπολογισμούς προέκυψαν για κάθε θέση και κάθε φορτίο οι τιμές της διείσδυσης.

Στον παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια του σχεδιασμού, της οργάνωσης και της υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας.

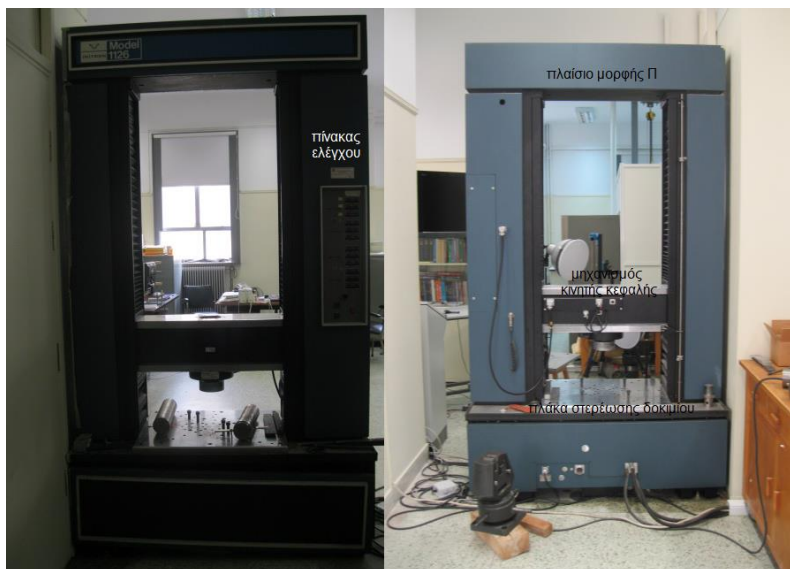
8.1 Εμπλεκόμενοι φορείς και εργαστήρια

Για την πραγματοποίηση του πειράματος απαιτείτο κατάλληλος εργαστηριακός και υλικοτεχνικός εξοπλισμός, ο οποίος δεν ήταν διαθέσιμος από το Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκε συνεργασία:

- με Συγκοινωνιακούς φορείς και εταιρείες για τη διάθεση μέρους των υλικών και την κατασκευή υποστηρικτικών διατάξεων και
- με το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. για την πραγματοποίηση του εγχειρήματος. Σημειώνεται ότι το εν λόγω εργαστήριο διαθέτει μηχανική πρέσσα δοκιμών Instron Model 1126 (εφεξής πρέσσα) ονομαστικού φορτίου 250kN, κατάλληλη για την αξονική στατική καταπόνηση δοκιμίων.

Τα βασικά μέρη της πρέσσας είναι (Εικ. 8.1):

- Το πλαίσιο μορφής Π, που περιλαμβάνει το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου πίεσης.
- Ο μηχανισμός κινητής κεφαλής.
- Η πλάκα στερέωσης του δοκιμίου (Εικ. 8.2).
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας με κατάλληλο πρωτόκολλο, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με κονσόλα χειρισμού.



Εικόνα 8.1: Πρέσσα Instron Model 1126



Εικόνα 8.2: Πλάκα στερέωσης δοκιμίου

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πρέσσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 250 kN.
- Ταχύτητα κινητής κεφαλής: 0,01 mm/min - 200 mm/min.
- Φορτίο/Ταχύτητα κεφαλής: 25.000 kilogrammes έως 50 mm/min.
20.000 kilogrammes έως 100 mm/min.
10.000 kilogrammes έως 200 mm/min.
- Υστέρηση μηχανήματος: 4microns σε 20.000 kilogrammes.
- Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο σύστημα που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας των απαραίτητων υπολογισμών.

Οι σιδηροδρομικοί οργανισμοί, οι οποίοι συνέδραμαν στην πραγματοποίηση του πειράματος είναι οι ακόλουθοι:

- ΟΣΕ: Ο τροχός προέρχεται από όχημα του ΟΣΕ, διατέθηκε για το χρονικό διάστημα που διήρκτησε η πειραματική διαδικασία και εντοπίστηκε ύστερα από επίσκεψη στο εργοστάσιο του ΟΣΕ που βρίσκεται στην περιοχή της Λεύκας. Η διατομή του είναι ORE S1002 (Εικ. 8.3), όμοιο δηλαδή με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στους θεωρητικούς υπολογισμούς.



Εικόνα 8.3: Τροχός ORE S1002

Η αρχική διάμετρος κύλισης του τροχού ήταν 850mm, δεδομένου όμως ότι ύστερα από χρήση του έχει υποβληθεί σε κατεργασία με τόρνο για λείανση και επαναφορά στην αρχική διατομή, κατά την παραλαβή του η διάμετρος κύλισης ήταν 825mm και το βάρος του περίπου 330kg.

Σημειώνεται ότι η αγορά ή ενοικίαση σιδηροδρομικού τροχού, από εργοστάσια κατασκευής τους στο εξωτερικό δεν ήταν εφικτή, λόγω του μοναδιαίου τεμαχίου παραγγελίας.

- ΗΣΑΠ: Η διάταξη στήριξης-φόρτισης του συστήματος άξονας-τροχός κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο που βρίσκεται στο εργοστάσιο των ΗΣΑΠ στην περιοχή του Πειραιά. Αναλυτικά τα τμήματα της κατασκευής περιγράφονται σε ακόλουθο υποκεφάλαιο και τα κατασκευαστικά τους σχέδια παρατίθενται στο Παράρτημα 3. Ο Οργανισμός διέθεσε επίσης και τμήμα τροχοφόρου άξονα, καθώς ο ΟΣΕ αδυνατούσε να το παραχωρήσει. Η ειδική διάταξη για την τοποθέτηση του τροχού επί παλετοφόρου και τη μεταφορά του από το ισόγειο στον 1^ο όροφο του κτιρίου Αντοχής Υλικών, όπου διεξήχθη το πείραμα, κατασκευάστηκε στο ξυλουργείο του εργοστασίου. Για τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά και ανύψωση των επί μέρους τμημάτων της πειραματικής διάταξης γίνεται ειδική μνεία στη συνέχεια. Τέλος, προσωπικό του μηχανουργείου, συνόδραμε με την παρουσία του στις εργασίες μεταφοράς, συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης των τμημάτων της πειραματικής διάταξης, τόσο κατά την προετοιμασία, όσο και μετά το πέρας του πειράματος. Επισημαίνεται ότι, δεδομένου ότι το πείραμα διεξήχθη σε φυσική κλίμακα, διέθετε εξειδικευμένες γνώσεις και εμπειρία όσον αφορά στη διαχείριση βαρέων κατασκευών.
- Η σιδηροτροχιά και η πλάκα έδρασης (Εικ. 8.4) διατέθηκαν για τις ανάγκες του πειράματος από την εταιρεία που κατασκευάζει τη νέα σιδηροδρομική γραμμή Ικόνιο-Θριάσιο Πεδίο. Πρόκειται για σιδηροτροχιά διατομής 60E1, όμοιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Η πλάκα έδρασης εξασφαλίζει την απαιτούμενη κλίση 1:40 της σιδηροτροχιάς ως προς την κατακόρυφο και περιλαμβάνει τα κατάλληλα μέσα σύνδεσης.



Εικόνα 8.4: Σιδηροτροχιά διατομής UIC60 και πλάκα έδρασης κλίσης 1:40

Μηχανικός πεδίου της εν λόγω εταιρείας με εργοταξιακό όχημα ανέλαβε τη μεταφορά του σιδηροδρομικού τροχού από και προς το εργοστάσιο του ΟΣΕ.

- Από το Εργαστήριο Οδοποιίας διατέθηκε χειροκίνητο παλετοφόρο οριζόντιας μεταφοράς (Εικ. 8.5) για τη μεταφορά του τροχού και των λοιπών βαρέων εξαρτημάτων στα επίπεδα και τους χώρους του κτιρίου Αντοχής Υλικών.



Εικόνα 8.5: Χειροκίνητο παλετοφόρο οριζόντιας μεταφοράς

- Τέλος, από τη σχολή Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχ/κών του Ε.Μ.Π. διατέθηκε θεοδόλιχος και από ιδιώτη ταχύμετρο, προκειμένου να ελέγχεται σε διάφορα στάδια της πειραματικής διαδικασίας η κατακόρυφη θέση του τροχού, αλλά και να γίνονται με ταχύτητα και ορθότητα οι μετακινήσεις της τάξης του χιλιοστού του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά και να επαναλαμβάνεται η διαδικασία φόρτισης σε διαφορετικές μεταξύ τους θέσεις. Αναλυτικά η χρήση των εν λόγω τοπογραφικών οργάνων περιγράφεται σε ακόλουθο υποκεφάλαιο.

8.2 Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης σε προκαταρκτικό στάδιο

Πρωταρχικής σημασίας για την πραγματοποίηση του πειράματος ήταν η εξασφάλιση της στήριξης του συστήματος τροχός-άξονας σε κατακόρυφη θέση εντός του κενού πλαισίου της πρέσσας. Επιπροσθέτως απαιτούνταν η κατασκευή φορέα, ο οποίος θα

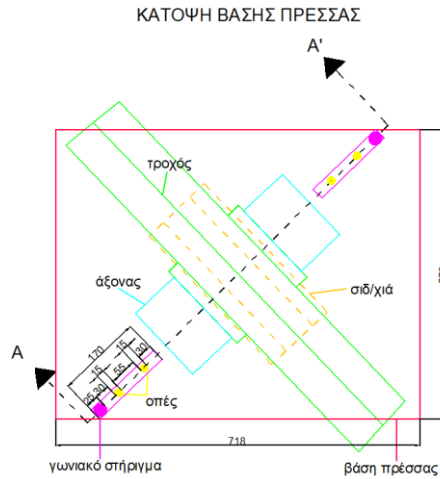
φορτιζόταν από την κινητή κεφαλή της πρέσσας και θα μετέφερε το φορτίο στον τροχοφόρο άξονα. Δεδομένου ότι οι διαστάσεις της πρέσσας ήταν οριακές σε σχέση με το μέγεθος του τροχού, οι διατάξεις στήριξης και φόρτισης έπρεπε να συνδυασθούν σε μία κατασκευή. Σημειώνεται επίσης ότι το μόνο διαθέσιμο σημείο της πρέσσας που μπορούσε να υποδεχθεί μία τέτοια κατασκευή ήταν οι οπές στην πλάκα στερέωσης του δοκιμίου. Προς τούτο σχεδιάστηκε σε προκαταρκτικό στάδιο διάταξη, η οποία εξυπηρετούσε τις ακόλουθες ανάγκες:

- Ασφαλή συγκράτηση του συστήματος τροχός-άξονας στο εσωτερικό της πρέσσας καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.
- Εξασφάλιση της διατήρησης της κατακόρυφης θέσης του συστήματος τροχός-άξονας στο εσωτερικό της πρέσσας καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.
- Μεταφορά του επιβαλλόμενου φορτίου από την κινητή κεφαλή της πρέσσας στον τροχοφόρο άξονα, ώστε κατ' επέκταση να μεταφερθεί στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς.
- Προσάρτηση της όλης κατασκευής στην πλάκα στερέωσης του δοκιμίου, που βρίσκεται στη βάση της πρέσσας.
- Διαμόρφωση της όλης διάταξης με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην εμποδίζεται η κατακόρυφη κίνηση του τροχού κατά τη φόρτιση. Ταυτόχρονα, έπρεπε να μπορεί να ανυψώνεται ο τροχός ελαφρά, προκειμένου να μετακινείται η σιδηροτροχιά με την πλάκα έδρασης και να επαναλαμβάνεται η διαδικασία φόρτισης σε διάφορες θέσεις.

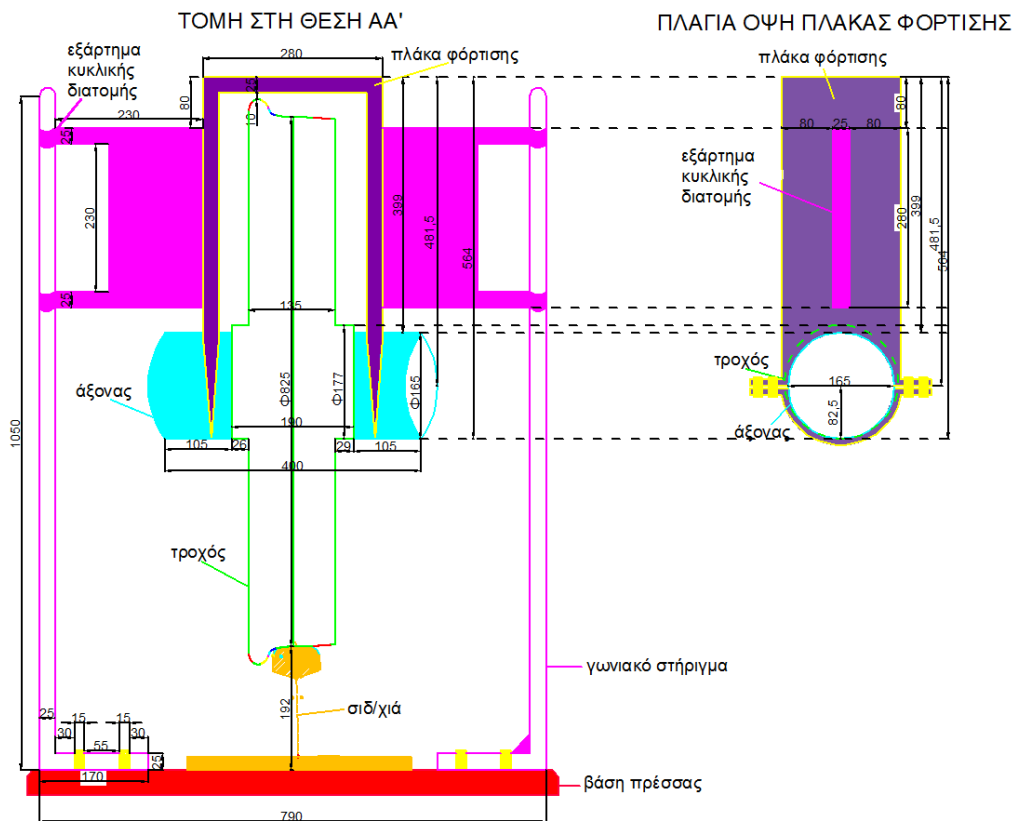
Με γνώμονα τα παραπάνω η διάταξη που προτάθηκε προς κατασκευή από τους Η.Σ.Α.Π. αποτελείτο από τα ακόλουθα μέρη (Σχ. 8.1 και 8.2):

- Μεταλλική πλάκα φόρτισης τύπου Π, η οποία προσαρτάται και αγκυρώνεται στον τροχοφόρο άξονα. Η επιβολή του φορτίου γίνεται μέσω της κινητής κεφαλής της πρέσσας απευθείας στην εν λόγω πλάκα φόρτισης και μέσω του τροχοφόρου άξονα μεταφέρεται στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς. Η πλάκα διαθέτει συγκολλημένα στις δύο πλαϊνές της πλευρές ειδικά εξαρτήματα κυκλικής διατομής, τα οποία προσαρτώνται σε μεταλλικά γωνιακά στηρίγματα που περιγράφονται ακολούθως.

- Μεταλλικά γωνιακά στηρίγματα - οδηγοί τύπου ανεστραμμένου Γ. Στο κατακόρυφο τμήμα οι εν λόγω οδηγοί θα είναι κυκλικής διατομής ώστε να υποδέχονται τα αντίστοιχα εξαρτήματα ίδιας διατομής της πλάκας φόρτισης, ενώ στο οριζόντιο τμήμα τους θα προσαρτώνται μέσω κοχλιών στις οπές της πλάκας στερέωσης δοκιμίου της πρέσσας.



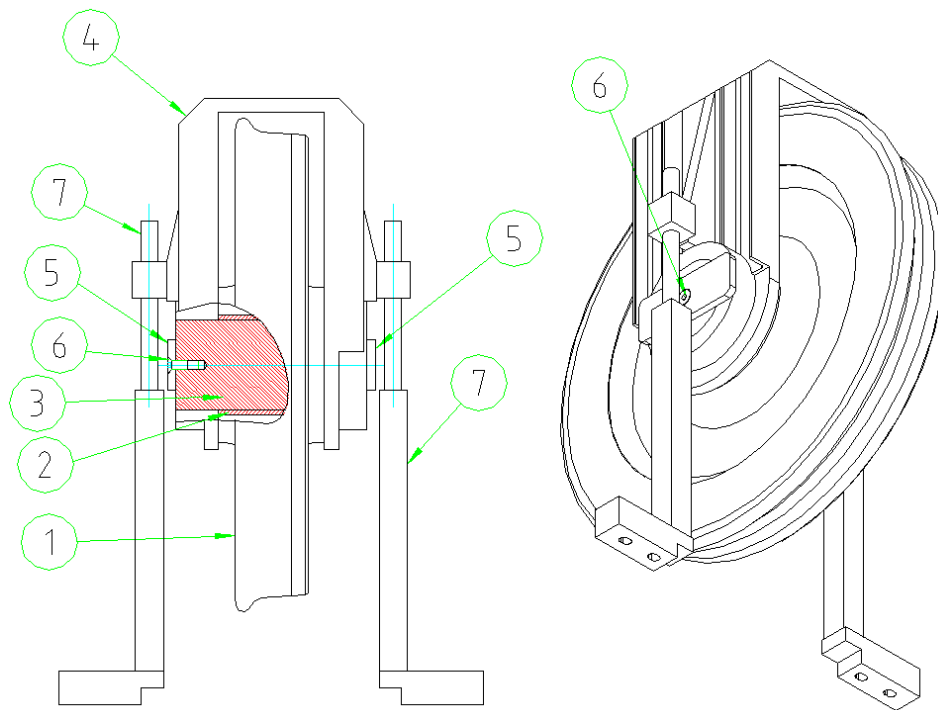
Σχήμα 8.1: Κάτοψη πλάκας στερέωσης δοκιμίου (βάση πρέσσας) με προσαρτημένη την προτεινόμενη διάταξη στήριξης-φόρτισης



Σχήμα 8.2: Τομή πλάκας στερέωσης δοκιμίου (βάση πρέσσας) με προσαρτημένη την προτεινόμενη διάταξη στήριξης-φόρτισης (θέση ΑΑ')

8.3 Τελικός σχεδιασμός και κατασκευή πειραματικής διάταξης

Ο τελικός σχεδιασμός και κατασκευή της πειραματικής διάταξης έγινε στο μηχανουργείο των ΗΣΑΠ και σε συνεργασία με το προσωπικό του Οργανισμού. Αναλυτικά τα σχέδια της κατασκευής και των επιμέρους τεμαχίων με τις ακριβείς τους διαστάσεις παρατίθενται στο Παράρτημα 3. Το υλικό κατασκευής των επιμέρους τμημάτων ήταν Stahl 37. Συνοπτικά, τα τεμάχια της κατασκευής παρουσιάζονται ακολούθως (Σχ. 8.3):



Σχήμα 8.3: Τεμάχια πειραματικής διάταξης

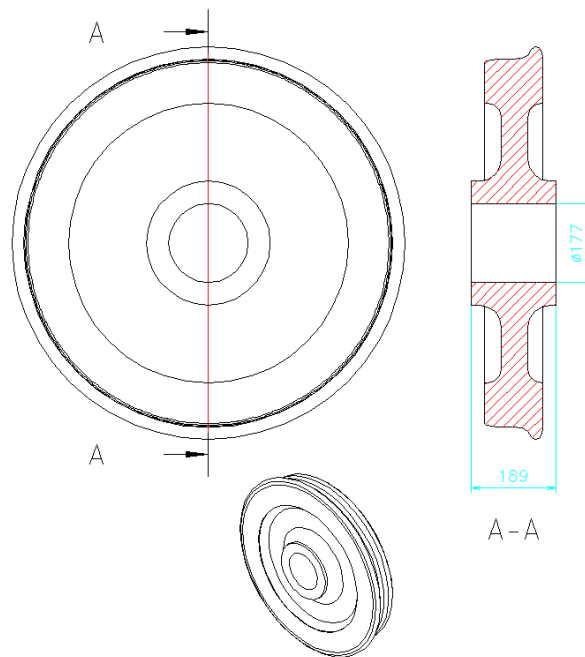
1. Τροχός.
2. Κυλινδρική διάταξη προσάρτησης τροχοφόρου άξονα.
3. Τροχοφόρος άξονας.
4. Φορέας φόρτισης.
5. Σφικτήρας τροχοφόρου άξονα.
6. Κοχλίας τύπου Άλλεν.
7. Φορέας στήριξης (ορθοστάτης).

Αναλυτικά κάθε ένα από τα παραπάνω τεμάχια περιγράφονται παρακάτω:

- Τροχός.

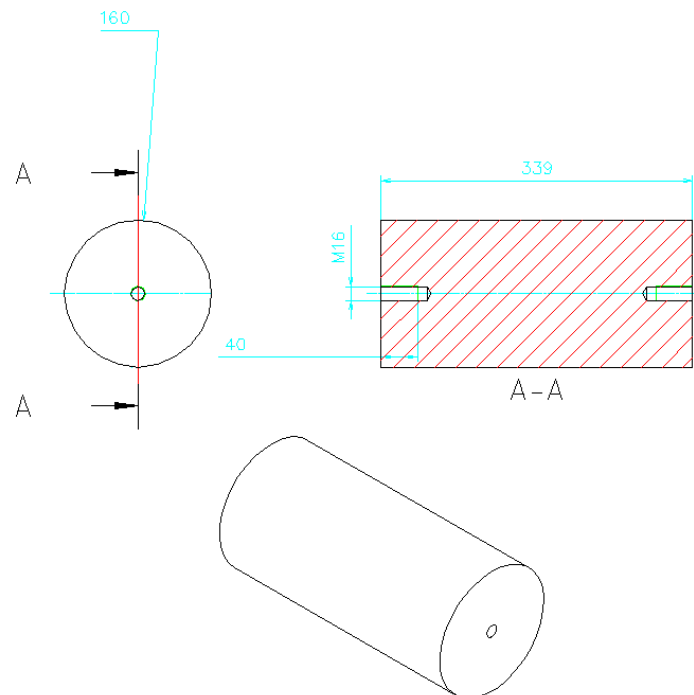
Όπως προαναφέρθηκε ο τροχός είναι διατομής ORE S1002 και διαμέτρου 825mm. Η πλήμνη του τροχού (θέση στην οποία σφηνώνεται ο άξονας) είναι διαμέτρου Φ177mm.

Δεδομένου ότι από τον ΟΣΕ δεν μπορούσαν να διατεθούν τα ακριβή σχέδια του τροχού, στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται μια απλή απεικόνισή του (Σχ. 8.4).



Σχήμα 8.4: Απεικόνιση τροχού

- Τροχοφόρος άξονας και διάταξη προσάρτησής του στον τροχό.
- Όπως προαναφέρθηκε το απαιτούμενο τμήμα τροχοφόρου άξονα, διαμέτρου Φ160mm και βάρους περίπου 70kg, διατέθηκε από τους ΗΣΑΠ (Σχ.8.5).

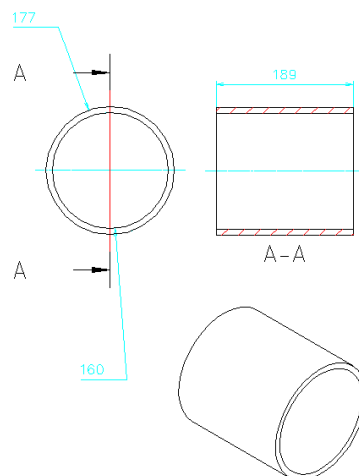


Σχήμα 8.5: Απεικόνιση τροχοφόρου άξονα



Εικόνα 8.6: Τορνάρισμα εξωτερικής διαμέτρου τροχοφόρου άξονα

Δεδομένου ότι η διάμετρος του τροχοφόρου άξονα ήταν $\Phi 160\text{mm}$ κατασκευάστηκε μια κυλινδρική διάταξη («δαχτυλίδι»), προκειμένου αυτός να προσαρτηθεί στην πλήμνη του τροχού διαμέτρου $\Phi 177\text{mm}$ (Σχ. 8.6).

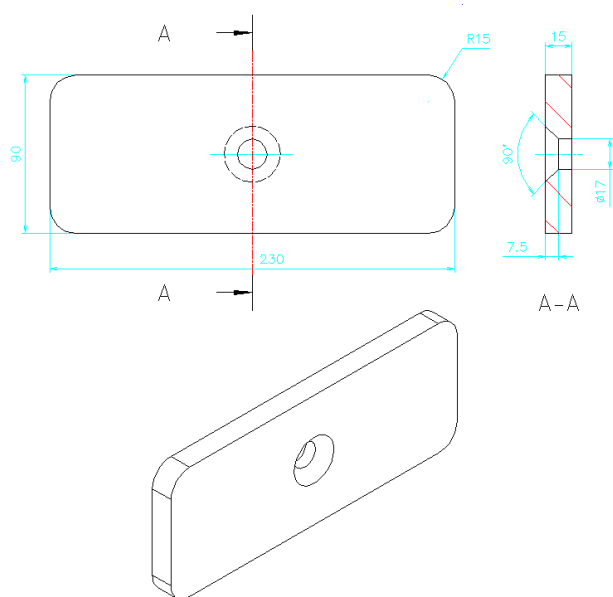


Σχήμα 8.6: Απεικόνιση διάταξης προσάρτησης τροχοφόρου άξονα



Εικόνα 8.7: Τροχός, τροχοφόρος άξονας, «δαχτυλίδι» και φορέας φόρτισης

Για τη στερέωση του τροχοφόρου άξονα χρησιμοποιήθηκαν εκατέρωθεν αυτού πλαϊνές πλάκες σύσφιξης (Σχ. 8.7) και κοχλίες τύπου Άλλεν M16X30mm.



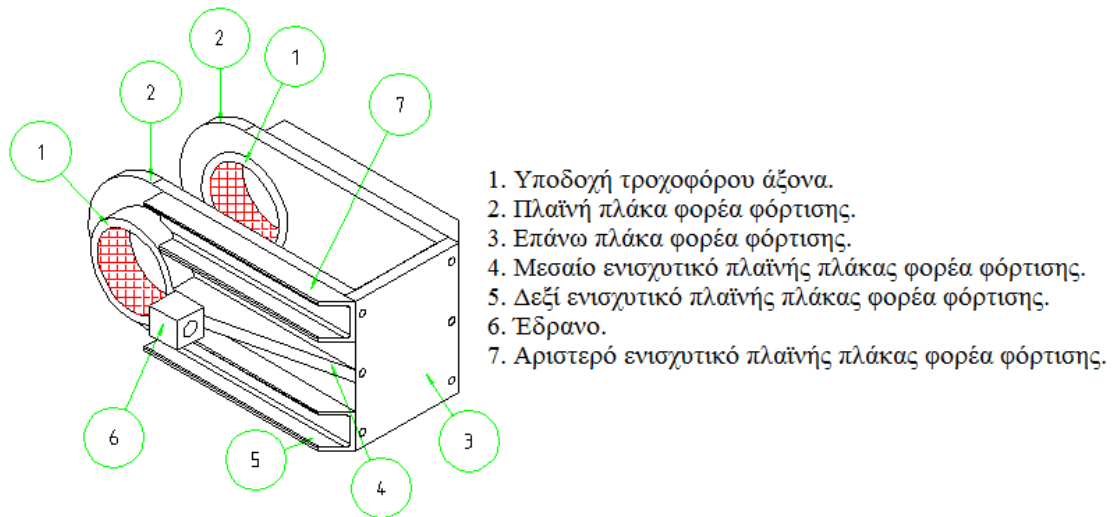
Σχήμα 8.7: Απεικόνιση πλαϊνού σφικτήρα τροχοφόρου άξονα



Εικόνα 8.8: Τροχοφόρος άξονας, πλαϊνοί σφικτήρες και φορέας φόρτισης

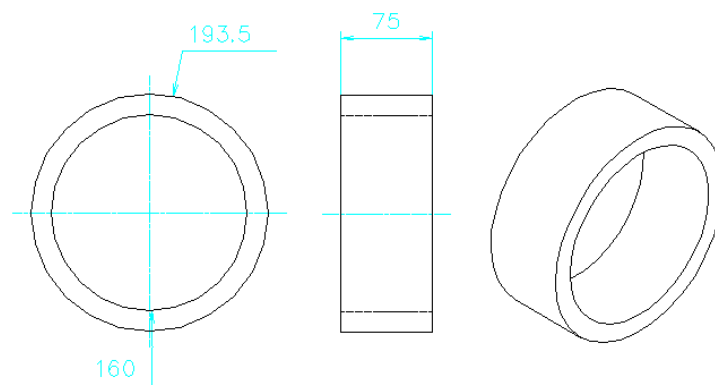
- Φορέας φόρτισης.

Ο φορέας φόρτισης αποτελείται από τρεις πλάκες, δύο κατακόρυφες και μία οριζόντια, σε μορφή πλαισίου Π. Η επάνω πλάκα φορτίζεται από τον μηχανισμό κινητής κεφαλής της πρέσσας. Οι δύο πλαϊνές πλάκες διαθέτουν ενισχυτικά για αποφυγή διάρρηξης της πλάκας κατά τη φόρτιση. Στο μεσαίο ενισχυτικό κάθε κατακόρυφης πλάκας βρίσκεται έδρανο, δια μέσου του οποίου διέρχεται η κολόνα του κάθε ορθοστάτη. Συνοπτικά, τα τεμάχια του φορέα φόρτισης παρουσιάζονται ακολούθως (Σχ. 8.8):



Σχήμα 8.8: Τεμάχια φορέα φόρτισης

1. Υποδοχή τροχοφόρου άξονα: πρόκειται για τεμάχιο κυλινδρικής διατομής (Σχ. 8.9), συγκολλημένο επί του φορέα, από το οποίο διέρχεται ο τροχοφόρος άξονας. Στην εξωτερική του πλευρά τοποθετείται ο πλαϊνός σφικτήρας που προαναφέρθηκε και κατ' αυτόν τον τρόπο «δένεται» το σύστημα τροχός-άξονας με τον φορέα φόρτισης. Έτσι, το επιβαλλόμενο από τον μηχανισμό κινητής κεφαλής της πρέσσας φορτίο, μεταδίδεται στο πλαίσιο φόρτισης και κατ' επέκταση στον τροχοφόρο άξονα.

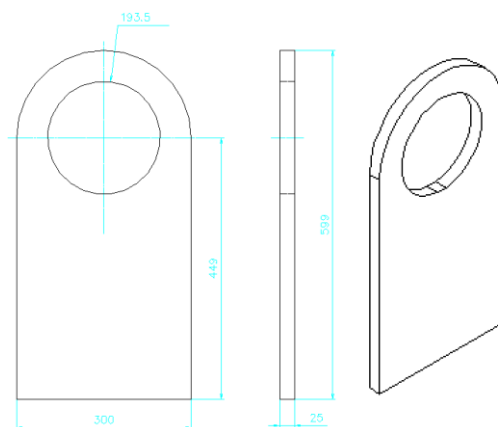


Σχήμα 8.9: Απεικόνιση τεμαχίου υποδοχής τροχοφόρου άξονα



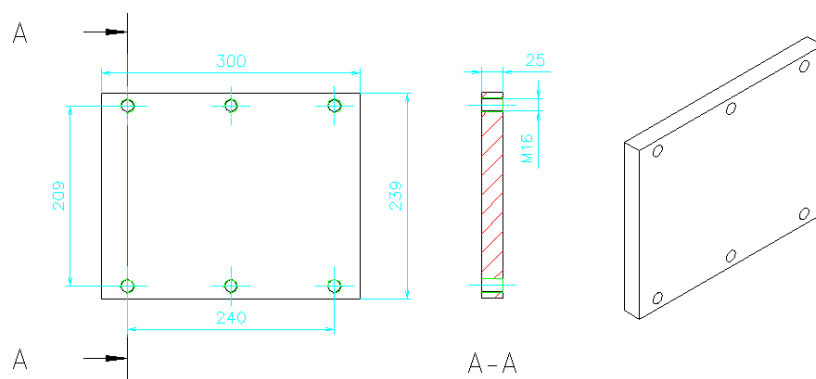
Εικόνα 8.9: Τροχοφόρος άξονας και τεμάχια υποδοχής αυτού

2. Πλαϊνή πλάκα φορέα φόρτισης (Σχ. 8.10).



Σχήμα 8.10: Απεικόνιση πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης

3. Επάνω πλάκα φορέα φόρτισης (Σχ. 8.11).

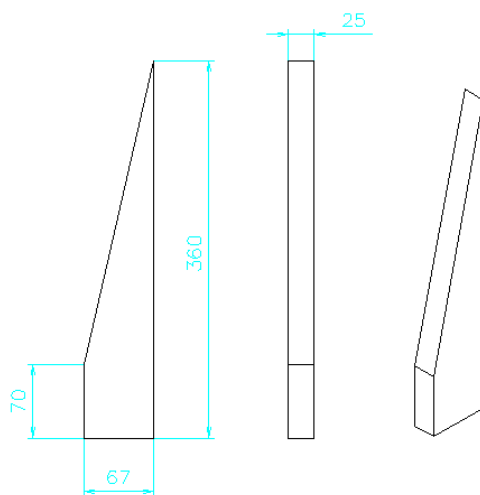


Σχήμα 8.11: Απεικόνιση επάνω πλάκας φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.10: Τρόχισμα συγκολλήσεων επάνω πλάκας φορέα φόρτισης

4. Μεσαίο ενισχυτικό πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης (Σχ. 8.12).

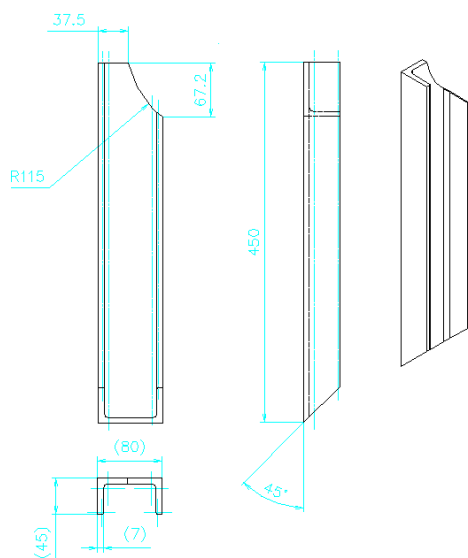


Σχήμα 8.12: Απεικόνιση μεσαίου ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.11: Συγκόλληση μεσαίου ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης

5. Δεξί ενισχυτικό πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης (Σχ. 8.13).

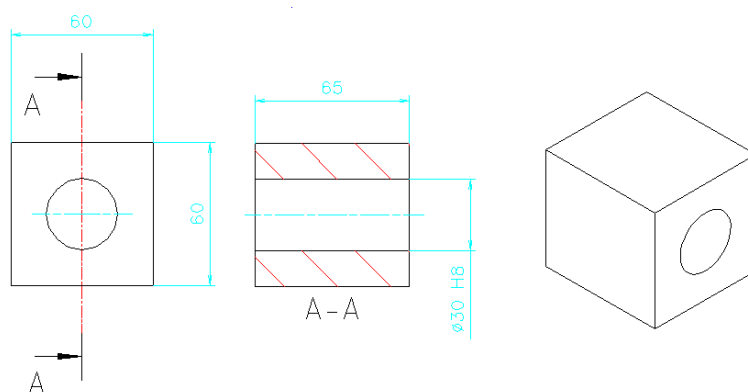


Σχήμα 8.13: Απεικόνιση δεξιού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.12: Συγκόλληση δεξιού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης

6. Έδρανο: τεμάχιο δια μέσου του οποίου διέρχεται η κολόνα του ορθοστάτη (Σχ. 8.14).

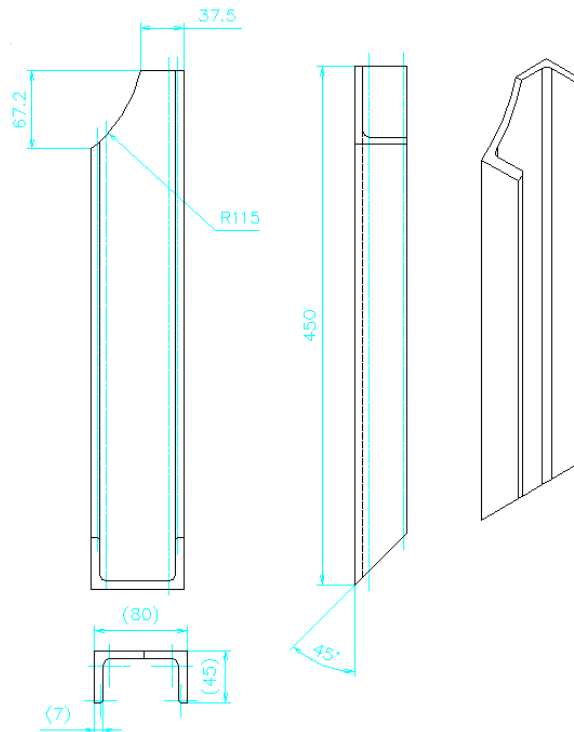


Σχήμα 8.14: Απεικόνιση έδρανου



Εικόνα 8.13: Φορέας φόρτισης με ενισχυτικά και έδρανο

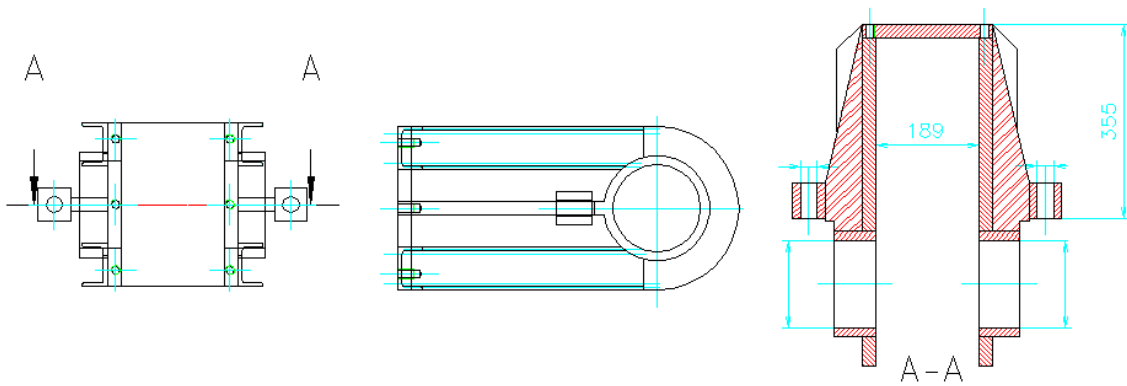
7. Αριστερό ενισχυτικό πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης (Σχ. 8.15).



Σχήμα 8.15: Απεικόνιση αριστερού ενισχυτικού πλαϊνής πλάκας φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.14: Πλαϊνή πλάκα φόρτισης με αριστερό και δεξιό ενισχυτικό. Ο φορέας φόρτισης σε κάτοψη, πλάγια όψη και τομή δίδεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχ. 8.16).



Σχήμα 8.16: Απεικόνιση φορέα φόρτισης σε κάτοψη, πλάγια όψη και τομή



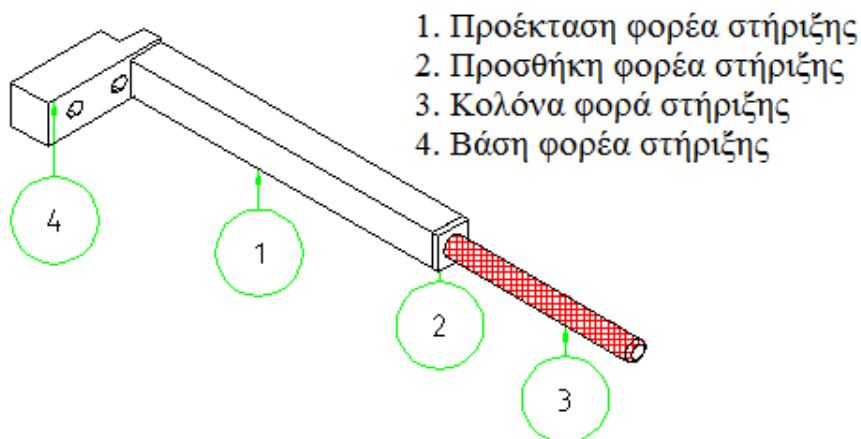
Εικόνα 8.15: Φορέας φόρτισης και τροχοφόρος άξονας με πλαϊνό σφικτήρα



Εικόνα 8.16: Φορέας φόρτισης (επάνω και πλαϊνή πλάκα με ενισχυτικά και έδρανο)

- Φορείς στήριξης (ορθοστάτες).

Οι φορείς στήριξης είναι δύο κατακόρυφοι ορθοστάτες. Οι βάσεις τους διαθέτουν οπές μεγέθους ανάλογο των οπών της πλάκας στερέωσης δοκιμίου της πρέσσας. Η διάνοιξη των οπών στις βάσεις των ορθοστατών έγινε με βάση τις ήδη υπάρχουσες οπές στην πλάκα στερέωσης δοκιμίου, ώστε μέσω των κατάλληλων κοχλιών αφενός να «δεθεί» το σύστημα τροχός-άξονας-φορέας φόρτισης με την πρέσσα, αφετέρου να εξασφαλίζεται η κατακόρυφη θέση του. Συνοπτικά, τα τεμάχια του φορέα στήριξης παρουσιάζονται ακολούθως (Σχ. 8.17):

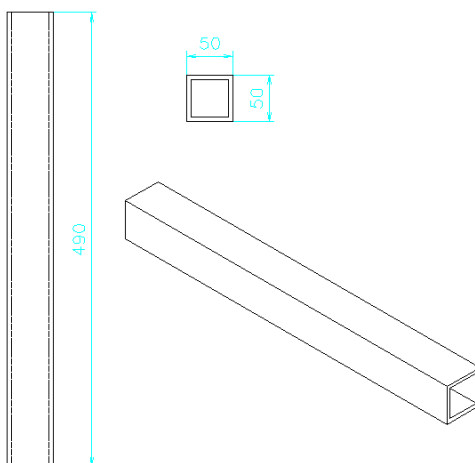


Σχήμα 8.17: Τεμάχια φορέα στήριξης



Εικόνα 8.17: Φορέας στήριξης

1. Προέκταση φορέα στήριξης – μη συμπαγής κατασκευή (Σχ. 8.18).

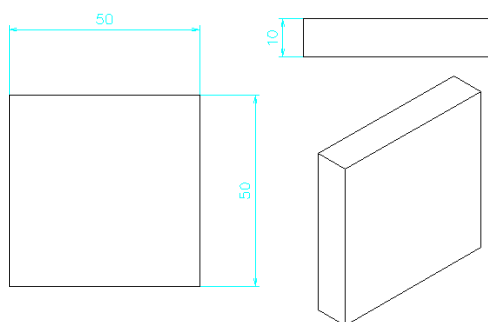


Σχήμα 8.18: Απεικόνιση προέκτασης φορέα στήριξης



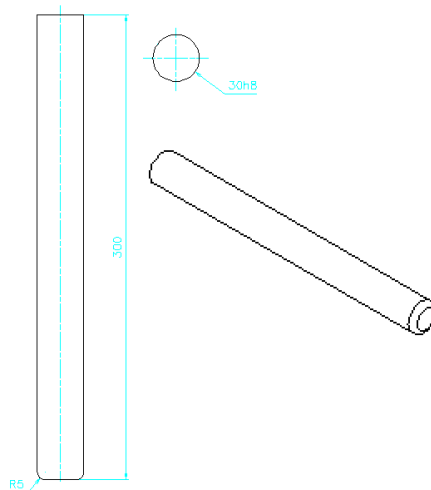
Εικόνα 8.18: Κατασκευή προέκτασης φορέα στήριξης

2. Τεμάχιο προσθήκης φορέα στήριξης (Σχ. 8.19) για τη σύνδεση προέκτασης και κολόνας.



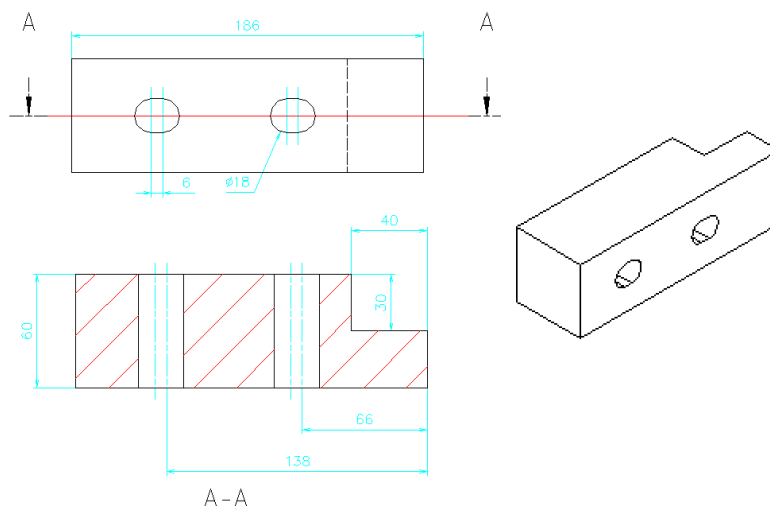
Σχήμα 8.19: Απεικόνιση προσθήκης φορέα στήριξης

3. Κολόνα φορέα στήριξης – συμπαγής κατασκευή (Σχ. 8.20).



Σχήμα 8.20: Απεικόνιση κολόνας φορέα στήριξης

4. Βάση φορέα στήριξης (Σχ. 8.21).



Σχήμα 8.21: Απεικόνιση βάσης φορέα στήριξης



Εικόνα 8.19: Κατασκευή βάσης φορέα στήριξης

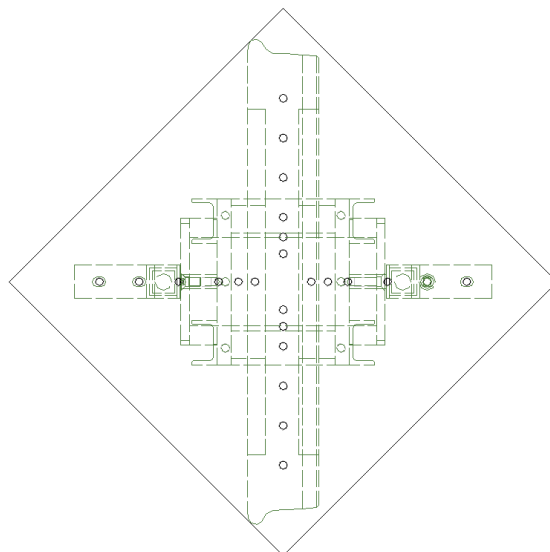
Στο τέλος έγινε επάλειψη των επί μέρους τμημάτων της κατασκευής με λεπτόρρευστο υλικό (αστάρι).



Εικόνα 8.20: Επάλειψη τεμαχίων με αστάρι

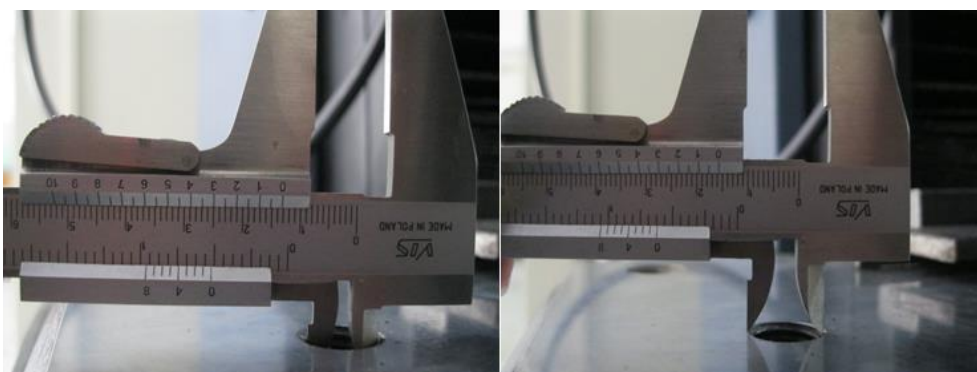
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για την τελική σχεδίαση των τμημάτων της πειραματικής διάταξης απαιτήθηκε πλήρης και λεπτομερής αποτύπωση των εσωτερικών και εξωτερικών διαστάσεων της πρέσσας. Οι διαστάσεις αυτές μετρήθηκαν με μετροταινία και παχύμετρο.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην αποτύπωση της πλάκας στερέωσης δοκιμίων, προκειμένου να υπάρξει απόλυτη ταύτιση με τις βάσεις των ορθοστατών και να εξασφαλισθεί η ασφαλής και ορθή στερέωση της πειραματικής διάταξης.

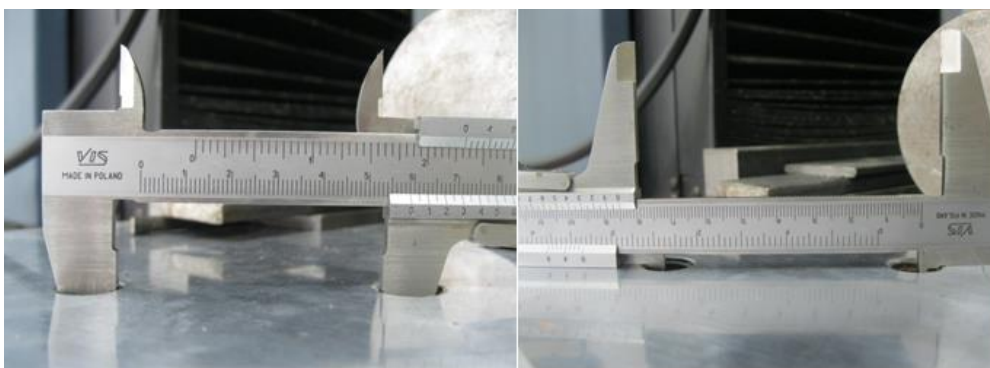


Σχήμα 8.22: Απεικόνιση πλάκας στερέωσης δοκιμίου και διαθέσιμων οπών

Η μέτρηση της διαμέτρου των οπών (Εικ. 8.21), των διαστάσεων μεταξύ των οπών (Εικ. 8.22) καθώς και των διαστάσεων των υπάρχουσών κοχλιών (Εικ. 8.23) για την προμήθεια καινούριων έγινε με παχύμετρο.



Εικόνα 8.21: Μέτρηση της διαμέτρου των οπών της πλάκας στερέωσης δοκιμίου



Εικόνα 8.22: Μέτρηση αποστάσεων μεταξύ των οπών της πλάκας στερέωσης δοκιμίου



Εικόνα 8.23: Μέτρηση διαμέτρου κοχλία

Δευτερεύων βοηθητικός εξοπλισμός-μικρό υλικό

Πέραν των προαναφερθέντων στοιχείων της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον ο ακόλουθος βοηθητικός εξοπλισμός και μικρο-υλικά:

- Σφικτήρες πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς: για τη διασφάλιση της ευστάθειας της πλάκας έδρασης και κατ' επέκταση της σιδηροτροχιάς κατά την επιβολή φορτίου, κατασκευάσθηκαν στο μηχανουργείο των ΗΣΑΠ κατάλληλοι σφικτήρες (Εικ. 8.24).



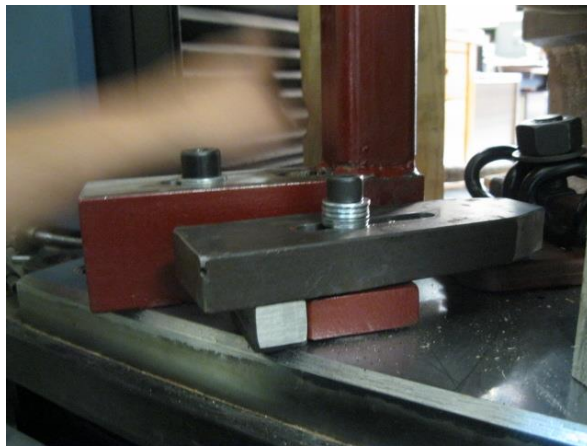
Εικόνα 8.24: Κατασκευή σφικτήρα πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς

Στην τελική τους μορφή οι σφικτήρες διέθεταν κενό στο εσωτερικό της διατομής τους, προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα προσάρτησής τους σε οποιαδήποτε κενή οπή της πλάκας στερέωσης δοκιμίου με κατάλληλο κοχλία (Εικ. 8.25).



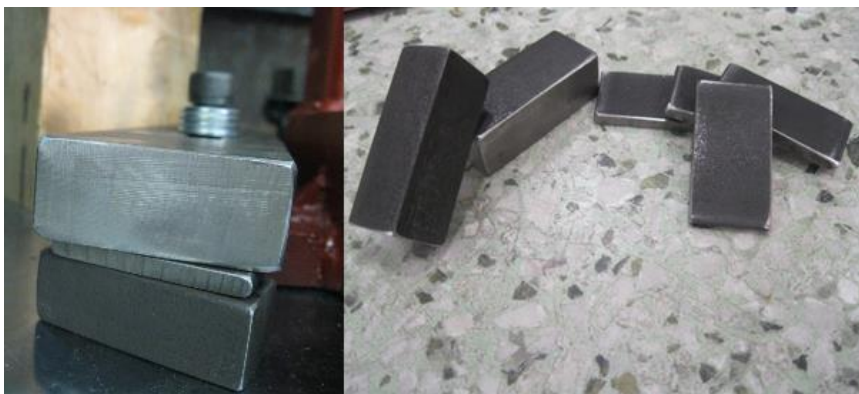
Εικόνα 8.25: Σφικτήρας πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς

Οι εν λόγω σφικτήρες εξασφάλιζαν ταυτόχρονα μια επιπλέον σταθερότητα στη βάση του ορθοστάτη, δεδομένου ότι τοποθετούνταν επ' αυτού (Εικ. 8.26).



Εικόνα 8.26: Τοποθέτηση σφικτήρα πλάκας έδρασης σιδηροτροχιάς

- Μεταλλικά τεμάχια ρύθμισης ύψους σφικτήρων (Εικ. 8.27).



Εικόνα 8.27: Μεταλλικά τεμάχια ρύθμισης ύψους σφικτήρων

- Κοχλίες και εργαλεία σύσφιξης αυτών (κλειδιά) με κεφαλή τύπου Άλλεν (Εικ. 8.28).



Εικόνα 8.28: Κοχλίες και κλειδιά τύπου Άλλεν

- Βλήτρα με κρίκο (μάβες) και ιμάντας μήκους 2,00m και ανυψωτικής ικανότητας 1t (Εικ.8.29).



Εικόνα 8.29: Βλήτρα με κρίκο (μάβες) και ιμάντας

Χρησιμοποιήθηκαν αφενός στην ανύψωση και τοποθέτηση του τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού (Εικ. 8.30) και αφετέρου στην ανύψωση και τοποθέτηση του συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης-φορείς στήριξης εντός της πρέσσας (Εικ. 8.31α και 8.31β) και εκτός αυτής, μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας (Εικ. 8.32).



Εικόνα 8.30: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού



Εικόνα 8.31α: Προετοιμασία ανύψωσης τροχού-άξονα-φορέα φόρτισης

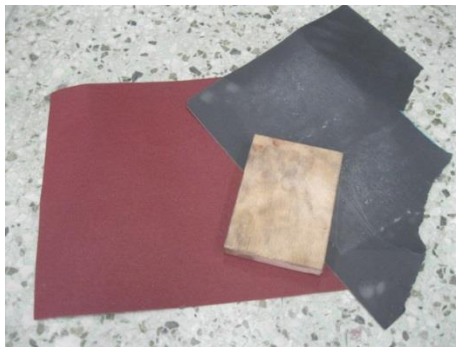


Εικόνα 8.31β: Τοποθέτηση πειραματικής διάταξης στην πρέσσα



Εικόνα 8.32: Απομάκρυνση πειραματικής διάταξης από την πρέσσα

- Γυαλόχαρτα (Εικ. 8.33) με τα οποία λειάνθηκε η πλάκα στερέωσης δοκιμίων πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας (Εικ. 8.34).



Εικόνα 8.33: Γυαλόχαρτα



Εικόνα 8.34: Λείανση πλάκας στερέωσης δοκιμίων

- Αντισκληρωτικό υγρό, σμυριδόπανο σε φύλλα και συρματόβουρτσα χειρός για την αφαίρεση της επιφανειακής οξείδωσης (σκουριάς) της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς (Εικ. 8.35) και γράσο για προστασία από διάβρωση (Εικ. 8.36).



Εικόνα 8.35: Αφαίρεση οξείδωσης της επιφάνειας κύλισης



Εικόνα 8.36: Επάλειψη επιφάνειας κύλισης με γράσο

- Υδραυλικοί γρύλοι ανύψωσης (Εικ. 8.37), με τους οποίους ανυψωνόταν το σύστημα τροχός-τροχοφόρος άξονας-πλαίσιο φόρτισης κατά τη διάρκεια του πειράματος, ώστε να μετακινείται η πλάκα έδρασης με τη σιδηροτροχιά και να επαναλαμβάνεται η πειραματική διαδικασία σε διάφορη θέση.



Εικόνα 8.37: Υδραυλικοί γρύλοι ανύψωσης

Λεπτομέρειες αυτής της διαδικασίας δίδονται στο ακόλουθο υποκεφάλαιο, που αφορά στις διαδικασίες μεταφοράς και ανύψωσης.

- Θεοδόλιχος και ταχύμετρο (Εικ. 8.38), προκειμένου να ελέγχεται σε διάφορα στάδια της πειραματικής διαδικασίας η κατακόρυφη θέση του τροχού, αλλά και να γίνονται με ταχύτητα και ορθότητα οι μετακινήσεις της τάξης του χιλιοστού του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά και να επαναλαμβάνεται η διαδικασία φόρτισης σε διαφορετικές μεταξύ τους θέσεις.



Εικόνα 8.38: Τοπογραφικά όργανα (θεοδόλιχος-ταχύμετρο)

Αναλυτικά η σκοπιμότητα και η χρήση των εν λόγω τοπογραφικών οργάνων περιγράφεται σε ακόλουθο υποκεφάλαιο.

- Αυτοκόλλητη μαγνητική ταινία (Εικ. 8.39), η οποία τοποθετήθηκε με τη μαγνητική της πλευρά επί του τροχού. Η χρήση της περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.



Εικόνα 8.39: Αυτοκόλλητη μαγνητική ταινία

- Χειροκίνητο παλετοφόρο οριζόντιας μεταφοράς (Εικ. 8.5) για τη μεταφορά του τροχού και των λοιπών βαρέων εξαρτημάτων στα επίπεδα και τους χώρους του κτιρίου Αντοχής Υλικών.
- Φορητός γερανός δαπέδου (Εικ. 8.40), ανυψωτικής ικανότητας 1t, για τη συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης και την ανύψωσή της ώστε να τοποθετηθεί στην πρέσσα και να απομακρυνθεί από αυτήν μετά το πέρας του πειράματος.



Εικόνα 8.40: Φορητός γερανός δαπέδου

8.4 Μεταφορά, συναρμολόγηση και ανύψωση των τεμαχίων της πειραματικής διάταξης

Όπως αναφέρθηκε και αρχικά το πείραμα διεξήχθη σε φυσική κλίμακα και ως εκ τούτου οι διαστάσεις και τα βάρη των επί μέρους τεμαχίων που αποτελούσαν το σύνολο της πειραματικής διάταξης απαιτούσαν ειδικούς χειρισμούς, τόσο κατά τη μεταφορά όσο και κατά την εκτέλεση του πειράματος. Σημειώνεται ότι η πειραματική διάταξη στο σύνολό της ζύγιζε περίπου 0,5t (τροχός 330kg, τροχοφόρος άξονας 70kg και φορείς φόρτισης-στήριξης περί τα 100kg). Παράλληλα το πείραμα διεξήχθη στον 1^ο όροφο του κτιρίου Αντοχής Υλικών και ο υπάρχων ανελκυστήρας διαθέτει μέγιστο βάρος ανύψωσης 450kg και πλάτος θύρας 620mm, γεγονός που δυσχέραινε ακόμα περισσότερο τη μεταφορά (υπενθυμίζεται ότι η διάμετρος του τροχού ήταν 825mm).

Επομένως το σύνολο της πειραματικής διάταξης ήταν αδύνατον λόγω βάρους και διαστάσεων να μεταφερθεί συναρμολογημένο μέσω του ανελκυστήρα στον 1^ο όροφο και ως εκ τούτου έπρεπε να μεταφερθούν μεμονωμένα τα τεμάχια της κατασκευής παραπλεύρως της πρέσσας και να συναρμολογηθούν εκεί. Η περίπτωση μεταφοράς των επί μέρους τεμαχίων με γερανοφόρο όχημα («παπαγαλάκι») μέσω εξωτερικού κουφώματος απορρίφθηκε, λόγω των διαστάσεων και της μορφής των ανοιγμάτων του κτιρίου.

Για τη μεταφορά των τεμαχίων στους χώρους του κτιρίου και μέσα στον ανελκυστήρα χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητο παλετοφόρο όχημα φέρουσας ικανότητας 2t και συνολικού πλάτους 520mm (εξωτερική διάσταση μεταξύ των πιρουνιών), ώστε να μπορεί να εισέλθει εντός του ανελκυστήρα. Το βάρος του ιδίου του οχήματος είναι περί τα 60kg, επομένως δεν μειωνόταν ιδιαίτερα το διαθέσιμο βάρος ανύψωσης του ανελκυστήρα.

Φόρτωση, εκφόρτωση και μεταφορά τροχού

Η φορτοεκφόρτωση του τροχού στο ισόγειο του κτιρίου Αντοχής Υλικών έγινε με παλάγκο γερανογέφυρας που διαθέτει το εργαστήριο και χρήση ιμάντα (Εικ. 8.41 και 8.42).



Εικόνα 8.41: Παλάγκο γερανογέφυρας



Εικόνα 8.42: Φορτοεκφόρτωση τροχού

Η μεταφορά του τροχού στον 1^ο όροφο του κτιρίου έγινε μέσω του ανελκυστήρα. Δεδομένου ότι η διάμετρος του τροχού ήταν πολύ μεγαλύτερη από το πλάτος της θύρας του ανελκυστήρα, ο τροχός δεν μπορούσε να μεταφερθεί επί του παλετοφόρου σε οριζόντια θέση. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε στο ξυλουργείο των ΗΣΑΠ ειδική παλέτα μεταφοράς του τροχού για μεταφορά του σε κατακόρυφη θέση. Η εν λόγω παλέτα κατασκευάστηκε στη βάση της σύμφωνα με τις διαστάσεις του διαθέσιμου παλετοφόρου οχήματος (Εικ. 8.43 και 8.44).



Εικόνα 8.43: Παλέτα μεταφοράς τροχού



Εικόνα 8.44: Μεταφορά τροχού στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος

Η εκφόρτωση και ο περαιτέρω χειρισμός του στον χώρο που βρίσκεται η πρέσσα έγινε με φορητό γερανό δαπέδου (Εικ. 8.45).



Εικόνα 8.45: Διαχείριση τροχού στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος

Φόρτωση, εκφόρτωση και μεταφορά υπολοίπων τεμαχίων

Η εκφόρτωση και η μεταφορά των υπολοίπων τεμαχίων της πειραματικής διάταξης (φορέας φόρτισης, φορείς στήριξης και μικρο-υλικά) έγιναν επίσης με χρήση του παλάγκου που βρίσκεται στον ισόγειο χώρο του εργαστηρίου και του παλετοφόρου (Εικ. 8.46 και 8.47).



Εικόνα 8.46: Εκφόρτωση φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.47: Μεταφορά φορέα φόρτισης και ορθοστατών

Η εκφόρτωση και ο περαιτέρω χειρισμός τους στον χώρο που βρίσκεται η πρέσσα έγινε με τον φορητό γερανό δαπέδου (Εικ. 8.48).



Εικόνα 8.48: Διαχείριση φορέα φόρτισης στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος
Συναρμολόγηση των τεμαχίων της πειραματικής διάταξης

Για τη συναρμολόγηση των τεμαχίων της πειραματικής διάταξης ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Αφαιρέθηκε ο τροχοφόρος άξονας και ο σφικτήρας αυτού από τον τροχό, που κατά το στάδιο της μεταφοράς απαιτούνταν για τη στήριξη του τροχού στην ειδική παλέτα.
- Τοποθετήθηκε ο φορέας φόρτισης επί απλής παλέτας (βλ. Εικ. 8.48).
- Μεταφέρθηκε ο τροχός με τον φορητό γερανό δαπέδου και τοποθετήθηκε εντός του φορέα φόρτισης (Εικ. 8.49).



Εικόνα 8.49: Τοποθέτηση τροχού εντός του φορέα φόρτισης

- Τοποθετήθηκε εκ νέου ο τροχοφόρος άξονας, μέσω των αντίστοιχων υποδοχών του φορέα φόρτισης, στην πλήμνη του τροχού (Εικ 8.50 και 8.51).



Εικόνα 8.50: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού



Εικόνα 8.51: Τοποθέτηση τροχοφόρου άξονα στην πλήμνη του τροχού

- Επανατοποθετήθηκαν οι σφικτήρες του τροχοφόρου άξονα (Εικ. 8.52).



Εικόνα 8.52: Τοποθέτηση σφικτήρων τροχοφόρου άξονα

Τέλος, καθαρίστηκαν οι οπές της επάνω πλάκας του φορέα φόρτισης με κατάλληλο εργαλείο (σπειροτόμος) (Εικ. 8.53) και με αέρα (Εικ. 8.54).



Εικόνα 8.53: Καθαρισμός οπών επάνω πλάκας φορέα φόρτισης με σπειροτόμο



Εικόνα 8.54: Καθαρισμός οπών επάνω πλάκας φορέα φόρτισης με αέρα

Τοποθέτηση της πειραματικής διάταξης στην πρέσσα

Η τοποθέτηση της πειραματικής διάταξης στην πρέσσα έγινε ως εξής:

- Τοποθετήθηκαν βλήτρα με κρίκους στην επάνω πλάκα του φορέα φόρτισης και μέσω αυτών τοποθετήθηκε μάντα ανύψωσης (Εικ. 8.55).



Εικόνα 8.55: Τοποθέτηση μάντα ανύψωσης στον φορέα φόρτισης

- Με χρήση του φορητού γερανού δαπέδου μεταφέρθηκε το σύστημα τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης στην πρέσσα (Εικ. 8.56 και 8.57).



Εικόνα 8.56: Ανύψωση συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης



Εικόνα 8.57: Μεταφορά συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης

- Δεδομένου ότι τα διαθέσιμα ύψη ήταν οριακά και ο φορητός γερανός δαπέδου μπορούσε να προσεγγίσει την πρέσσα μέχρι ενός δεδομένου σημείου, όσο βρισκόταν το σύστημα τροχός-τροχοφόρος άξονας-πλαίσιο φόρτισης σε αιώρηση τοποθετήθηκε ο πρώτος ορθοστάτης στο έδρανο της πλάκας φόρτισης και στερεώθηκε προσωρινά με κοχλίες στις προβλεπόμενες από το σχέδιο οπές της πλάκας στερέωσης δοκιμίων (Εικ 8.58 και 8.59).



Εικόνα 8.58: Τοποθέτηση πρώτου ορθοστάτη στο έδρανο του φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.59: Στερέωση πρώτου ορθοστάτη στην πλάκα στερέωση δοκιμίων

- Στη συνέχεια στερεώθηκε ο δεύτερος ορθοστάτης σε τυχαίες οπές, προκειμένου να συγκρατηθεί προσωρινά το σύστημα και να μεταφερθεί ο γερανός στην απέναντι πλευρά της πρέσσας (Εικ. 8.60).



Εικόνα 8.60: Προσωρινή στερέωση δεύτερου ορθοστάτη και αλλαγή θέσης γερανού

- Με στερεωμένο τον πρώτο ορθοστάτη στη σωστή θέση και συγκρατώντας την πειραματική διάταξη με το γεράνο, έγινε στροφή του συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης, έτσι ώστε να προσεγγίσει και ο δεύτερος ορθοστάτης τις προβλεπόμενες από το σχέδιο οπές (Εικ. 8.61).



Εικόνα 8.61: Στροφή του συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης

- Τέλος, όταν στερεώθηκε οριστικά το σύστημα και η κατασκευή ήταν απόλυτα ασφαλής αφαιρέθηκε ο μάντας από τον φορέα φόρτισης (Εικ. 8.62).



Εικόνα 8.62: Οριστική στερέωση δεύτερου ορθοστάτη

- Ακολούθησε η τοποθέτηση της σιδηροτροχιάς με την πλάκα έδρασής της στην πλάκα στερέωσης δοκιμίων (Εικ. 8.63). Για να επιτευχθεί αυτό θα έπρεπε να ανυψωθεί ο φορέας φόρτισης και να γλιστρήσει προς τα επάνω μέσω των κολονών των ορθοστατών.



Εικόνα 8.63: Τοποθέτηση σιδηροτροχιάς-πλάκας έδρασης

- Δεδομένου ότι δεν υπήρχε περιθώριο ανύψωσης του φορέα φόρτισης με τον γερανό δαπέδου λόγω των διαστάσεων της πρέσσας και της πειραματικής διάταξης, η ανύψωση έγινε με γρύλους, οι οποίοι τοποθετήθηκαν κάτω από το τεμάχιο υποδοχής του τροχοφόρου άξονα του φορέα φόρτισης (Εικ. 8.64 και 8.65).



Εικόνα 8.64: Τοποθέτηση γρύλου κάτω από το τεμάχιο υποδοχής του τροχοφόρου άξονα του φορέα φόρτισης



Εικόνα 8.65: Ανύψωση φορέα φόρτισης για τοποθέτηση σιδηροτροχιάς

- Τέλος, τμήμα συγκόλλησης μεταξύ κολόνας και προέκτασης ενός εκ των ορθοστατών, το οποίο εμπόδιζε την ομαλή κατακόρυφη κίνηση του φορέα φόρτισης λειάνθηκε επί τόπου με τροχό (Εικ. 8.66 και 8.67).



Εικόνα 8.66: Επί τόπου διορθωτική επέμβαση στον φορέα στήριξης



Εικόνα 8.67: Επί τόπου διορθωτική επέμβαση στον φορέα στήριξης

Τελικά, μετά την τοποθέτηση της πειραματικής διάταξης εντός της πρέσσας η μορφή της παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικ. 8.68).



Εικόνα 8.68: Πειραματική διάταξη εντός της πρέσσας

Ανύψωση τροχού κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος

Με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς η πειραματική διαδικασία έπρεπε να επαναληφθεί για διάφορες θέσεις οριζόντιας μετατόπισης του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά. Υπενθυμίζεται ότι η εγκάρσια μετατόπιση του τροχού ήταν ανά 1mm. Δεδομένου ότι ο τροχός δεν μπορούσε να μετακινηθεί από την αρχική θέση τοποθέτησής του στην πειραματική διάταξη, προκειμένου να επαναληφθούν οι μετρήσεις σε διαφορετική θέση μετακινούνταν η σιδηροτροχιά με την πλάκα έδρασής της. Η ανύψωση του συστήματος τροχός-τροχοφόρος άξονας-φορέας φόρτισης στους ορθοστάτες δεν μπορούσε να γίνει με χρήση του γερανού δαπέδου λόγω του

περιορισμένου καθ' ύψος χώρου επάνω από τον φορέα φόρτισης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις γρύλοι ανύψωσης, οι οποίοι για να φθάσουν στο επιθυμητό ύψος τοποθετήθηκαν επί ξύλινων βάσεων κατάλληλων διαστάσεων.

Οι γρύλοι τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του τροχού, δύο σε κάθε πλευρά. Επί αυτών τοποθετήθηκαν δύο παραλληλόγραμμα βέργες κοιλοδοκών, οι οποίες κατά την ανύψωσή τους πνέζαν προς τα πάνω τον φορέα φόρτισης στις θέσεις υποδοχής του τροχοφόρου άξονα και έτσι ανύψωναν το όλο σύστημα στις κολόνες των ορθοστατών (Εικ. 8.69 και 8.70).



Εικόνα 8.69: Διάταξη ανύψωσης τροχού με γρύλους ανύψωσης

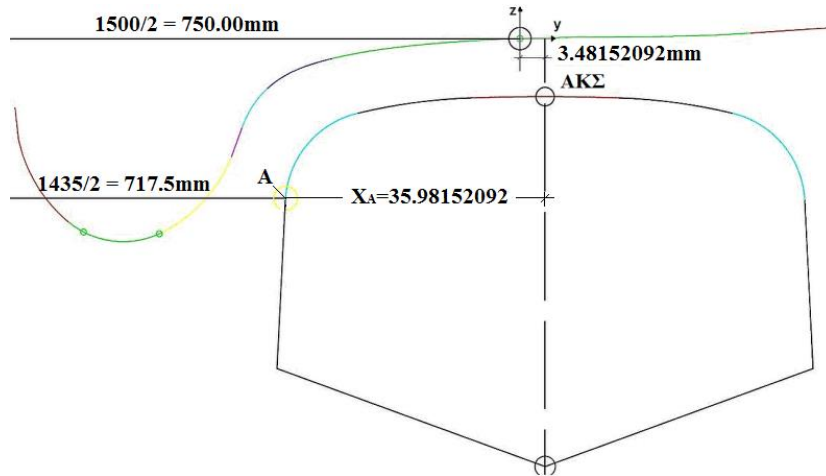


Εικόνα 8.70: Θέση γρύλων ανύψωσης και κοιλοδοκών

8.5 Προετοιμασία διεξαγωγής πειράματος

Καθορισμός θέσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς

Για να διεξαχθεί το πείραμα σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς έπρεπε ο τροχός και η σιδηροτροχιά να βρίσκονται στο σύστημα συντεταγμένων που είχε θεωρητικά οριστεί. Υπενθυμίζεται ότι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων είναι η θέση μέτρησης της ακτίνας του τροχού. Για άξονα κεντρωμένο στη γραμμή (μηδενική εγκάρσια μετατόπιση τροχού), ο άξονας συμμετρίας της σιδηροτροχιάς απέχει από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων κατά 3,48mm (βλ. Κεφ. 6) (Σχ. 8.23).



Σχήμα 8.23: Σύστημα συντεταγμένων θεωρητικών υπολογισμών

Προς τούτο, αποτυπώθηκε σε σχεδιαστικό πρόγραμμα η διατομή της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και χαράχθηκαν ο άξονας συμμετρίας της και η θέση με την οποία συμπίπτει η αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η αποτυπωμένη επιφάνεια επικολλήθηκε και στις δύο πλευρές της κεφαλής (Εικ. 8.71).



Εικόνα 8.71: Αποτύπωση κεφαλής σιδηροτροχιάς και χαρακτηριστικών σημείων

Ακολουθώντας σε σχεδιαστικό πρόγραμμα αποτυπώθηκε δέσμη παράλληλων κατακόρυφων ευθύγραμμων τμημάτων με μεταξύ τους απόσταση 1mm. Κάθε ένα από αυτά τα ευθύγραμμο τμήματα αντιστοιχούσε σε μία διαφορετική θέση του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά. Η αποτυπωμένη επιφάνεια επικολλήθηκε σε αυτοκόλλητη μαγνητική ταινία, η οποία τοποθετήθηκε με τη μαγνητιζόμενη πλευρά της επί του τροχού. Το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα, που αντιπροσώπευε τη θέση μέτρησης της ακτίνας του τροχού, τοποθετήθηκε, με χρήση παχύμετρου, σε απόσταση 70mm από την εσωτερική παρειά του όνυχα (Εικ. 8.72). Έτσι καθορίσθηκε εκατέρωθεν του τροχού η αρχή του συστήματος συντεταγμένων.



Εικόνα 8.72: Τοποθέτηση αυτοκόλλητης μαγνητικής ταινίας επί του τροχού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η πειραματική διαδικασία έπρεπε να επαναληφθεί για διάφορες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά, συγκεκριμένα για εγκάρσια μετατόπιση του τροχού ανά 1mm.

Ο καθορισμός της ακριβούς θέσης της σιδηροτροχιάς ως προς τον τροχό έγινε με χρήση δύο τοπογραφικών οργάνων (θεοδόλιχου και ταχύμετρου) που βρίσκονταν εκατέρωθεν του τροχού ως εξής:

- Ο τροχός ανυψωνόταν με γρύλους, όπως έχει ήδη περιγραφεί.
- Με το πρώτο τοπογραφικό όργανο (Εικ. 8.73) γινόταν στόχευση ενός εκ των καθέτων ευθυγράμμων τμημάτων της μαγνητικής ταινίας, έτσι ώστε το σταυρόνημα του τηλεσκοπίου να συμπίπτει με αυτό.



Εικόνα 8.73: Αρχικός καθορισμός θέσης τροχού-σιδηροτροχιάς

- Το όργανο σταθεροποιούνται ως προς την οριζόντια θέση του και ακολούθως με κάθετη κίνηση του τηλεσκοπίου στοχευόταν η κεφαλή της σιδηροτροχιάς.
- Η πλάκα έδρασης μετακινούνταν έτσι ώστε η κορυφή της συνεχούς γραμμής στην αποτύπωση της κεφαλής της σιδηροτροχιάς να ταυτισθεί με το κέντρο του σταυρονήματος.
- Η θέση τοποθέτησης της πλάκας έδρασης ελεγχόταν και με το δεύτερο τοπογραφικό όργανο (Εικ. 8.74) για αποφυγή ενδεχόμενης εκκεντρότητάς της, και γίνονταν διορθωτικές κινήσεις όταν αυτό απαιτείτο.



Εικόνα 8.74: Τελικός καθορισμός θέσης τροχού-σιδηροτροχιάς

Προετοιμασία δοκιμίων και εργαστηριακού εξοπλισμού

Στην πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε η ψηφιακή μέθοδος συσχέτισης εικόνας. Η τρισδιάστατη ψηφιακή συσχέτιση εικόνας είναι μια σύγχρονη οπτική τεχνική που χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων, για τη διερεύνηση της μετατόπισης-παραμόρφωσης δοκιμίων κατά την επιβολή φορτίου. Το ψηφιακό σύστημα συσχέτισμού εικόνας παρακολουθεί τη θέση των ίδιων σημείων που εμφανίζονται σε μία εικόνα αναφοράς και σε μία παραμορφωμένη εικόνα. Για να επιτευχθεί αυτό εντοπίζεται ένα υποσύνολο των εικονοστοιχείων (pixels) γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος στην εικόνα αναφοράς και προσδιορίζεται η αντίστοιχη θέση τους στην παραμορφωμένη εικόνα. Οι ψηφιακές εικόνες καταγράφονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο συσχέτισης εικόνας. Οι μετατοπίσεις-παραμορφώσεις υπολογίζονται με συσχέτιση των αντίστοιχων εικόνων πριν και μετά την επιβολή φορτίου. Για τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων χρησιμοποιούνται δύο κάμερες υψηλής ευκρίνειας CCD.

Εάν το αντικείμενο παρατηρείται με δύο κάμερες από διαφορετικές κατευθύνσεις, η θέση κάθε σημείου του αντικειμένου εστιάζεται σε ένα συγκεκριμένο εικονοστοιχείο (pixel) στο επίπεδο της κάμερας. Εφόσον είναι γνωστή η σχετική θέση των καμερών, οι μεγεθύνσεις των φακών και οι υπόλοιπες παράμετροι της απεικόνισης, τότε μπορούν υπολογισθούν οι απόλυτες τρισδιάστατες συντεταγμένες οποιουδήποτε σημείου στο χώρο. Έτσι, μπορεί να προσδιορισθεί το τρισδιάστατο περίγραμμα της επιφάνειας του υπό διερεύνηση δοκιμίου.

Πριν την έναρξη του πειράματος απαραίτητη ήταν η προετοιμασία των δοκιμίων και η συνδεσμολογία του εργαστηριακού εξοπλισμού. Αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν τα εξής:

- Βαφή δοκιμίων με σπρέι ψεκασμού

Η υπό διερεύνηση επιφάνεια των δοκιμίων ψεκάστηκε με βαφή σε μορφή σπρέι προκειμένου να δημιουργηθούν επ' αυτής στίγματα, τα οποία θα αντιστοιχίζονταν εν συνεχεία με τα εικονοστοιχεία των καμερών. Δεδομένου ότι τα δοκίμια ήταν σκούρου χρώματος ψεκάστηκαν καταρχήν με σπρέι βαφής χρώματος άσπρου και κατόπιν μαύρου, ώστε να διακρίνονται με σαφήνεια και να επιλέγονται με ευκολία στο στάδιο της επεξεργασίας τα προς αντιστοίχιση σημεία (Εικ. 8.75 και 8.76).



Εικόνα 8.75: Βαφή δοκιμίων με σπρέι ψεκασμού



Εικόνα 8.76: Δημιουργία στιγμάτων στις υπό διερεύνηση επιφάνειες

- Βαθμονόμηση καμερών υψηλής ευκρίνειας

Οι κάμερες υψηλής ευκρίνειας CCD (Εικ. 8.77) λαμβάνουν κατ' αρχήν μία ψηφιακή εικόνα, που αποτελεί την εικόνα αναφοράς και εν συνεχεία ψηφιακές εικόνες κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στη συνέχεια οι εικόνες αυτές συσχετίζονται με την εικόνα αναφοράς και αξιολογούνται. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει των αντίστοιχων εικονοστοιχείων (pixels) της υπό διερεύνηση περιοχής. Πριν από κάθε μέτρηση είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του συστήματος των καμερών. Με τη διαδικασία βαθμονόμησης, καθορίζονται οι ενδογενείς και εξωγενείς παράμετροι των καμερών (εστιακή απόσταση, οι στρεβλώσεις των φακών κλπ), οι παράμετροι δηλαδή

που απαιτούνται ώστε να είναι εφικτή η μετατροπή των θέσεων των καταγεγραμμένων σημείων στο εκάστοτε δοκίμιο, σε τρισδιάστατες συντεταγμένες.



Εικόνα 8.77: Κάμερες υψηλής ευκρίνειας CCD

Οι κάμερες στηρίζονται σε τρίποδα, ο οποίος διαθέτει φυσαλίδα οριζοντίωσης. Τα δοκίμια φωτίζονται με ισχυρή πηγή λευκού φωτός (προβολείς) (Εικ. 8.78).



Εικόνα 8.78: Βαθμονομημένο σύστημα καμερών-προβολέων

Οι κάμερες από το στάδιο της προφόρτισης έως και τη στιγμή της επιβολής του μέγιστου φορτίου των 100kN, με βήμα 10kN κατέγραφαν ψηφιακές εικόνες της υπό διερεύνηση περιοχής.

- Ηλεκτρονικός υπολογιστής

Οι κάμερες του εν λόγω μετρητικού συστήματος (Q-400) συνδέθηκαν με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό πρόγραμμα καταγραφής, αποθήκευσης και ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων ISTR4-4D (Εικ. 8.79 και 8.80).



Εικόνα 8.79: Η/Υ καταγραφής και αποθήκευσης πειραματικών μετρήσεων



Εικόνα 8.80: Σύνδεση καμερών με φορητό Η/Υ

- Καταγραφέας δεδομένων πρέσσας

Ο καταγραφέας δεδομένων TDS-530 (Data Logger) (Εικ. 8.81) είναι συσκευή, η οποία συνδέθηκε με την πρέσσα και η οποία καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης κατέγραφε ανά δευτερόλεπτο την ηλεκτρική τάση της μηχανής σε Volt και την αντίστοιχη μετατόπιση του μηχανισμού κινητής κεφαλής σε mm.



Εικόνα 8.81: Καταγραφέας δεδομένων πρέσσας

Στο τέλος των μετρήσεων από την κάρτα μνήμης της συσκευής εξήχθη αρχείο μορφής *.txt. Οι τιμές της τάσης (Volt) μετετράπησαν με χρήση σταθερής αναλογίας σε φορτίο (kN) και ως εκ τούτου συσχετίστηκε το επιβαλλόμενο φορτίο με τη μετατόπιση του κινητού μηχανισμού της πρέσσας (βλ. Κεφ. 9).

Εποπτικά στην ακόλουθη εικόνα (Εικ. 8.82) φαίνεται ο χώρος διεξαγωγής του πειράματος πριν την έναρξη της διαδικασίας.



Εικόνα 8.82: Άποψη χώρου διεξαγωγής του πειράματος

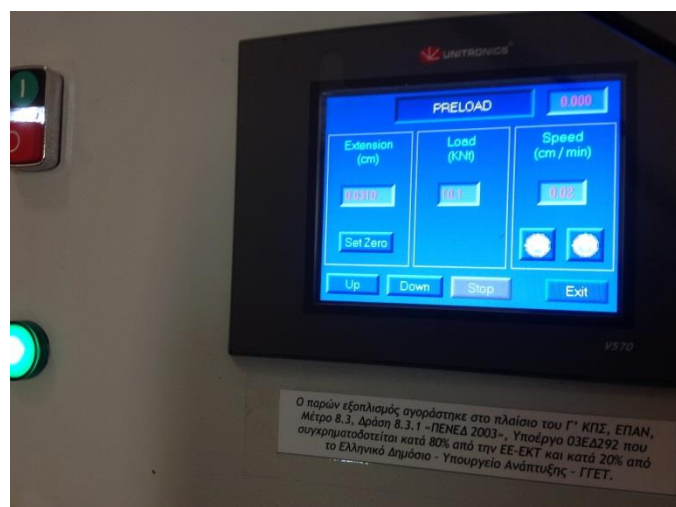
8.6 Διεξαγωγή πειράματος

Το πείραμα διεξήχθη στις 7-6-2013 και διήρκησε μία ημέρα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- Στην κονσόλα χειρισμού της πρέσσας (Εικ. 8.83 και 8.84) ορίσθηκε η ταχύτητα καθόδου του μηχανισμού κινητής κεφαλής στα 0,02cm/min και το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο.



Εικόνα 8.83: Κονσόλα χειρισμού πρέσσας

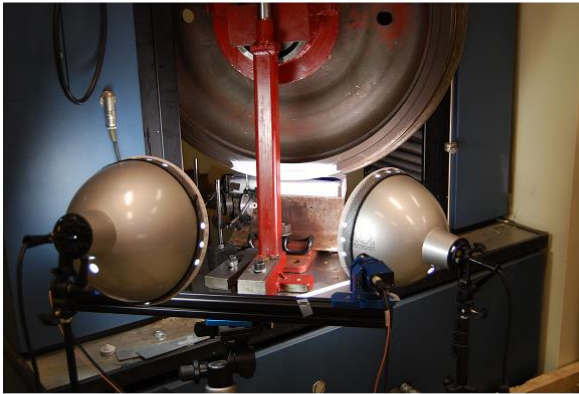


Εικόνα 8.84: Οθόνη κονσόλα χειρισμού πρέσσας

- Στην αρχική κατάσταση (preload) και μόλις ο μηχανισμός ήρθε σε επαφή με την επάνω πλάκα του φορέα φόρτισης λήφθηκε η πρώτη ψηφιακή εικόνα από τις

κάμερες, η οποία θα λειτουργούσε ως εικόνα αναφοράς για την εύρεση των μετακινήσεων.

- Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν τα 100kN. Ανά 10kN σταματούσε η διαδικασία φόρτισης από την κονσόλα χειρισμού της πρέσσας και λαμβάνονταν ψηφιακές εικόνες της υπό διερεύνηση περιοχής από τις κάμερες. Οι εικόνες μεταφέρονταν σε αρχεία του λογισμικού συσχέτισης εικόνας (Εικ. 8.85). Ο τρόπος ανάλυσης των στοιχείων των εικόνων περιγράφεται αναλυτικά στο ακόλουθο κεφάλαιο.



Εικόνα 8.85: Αποτύπωση της υπό διερεύνηση περιοχής σε ψηφιακές εικόνες

- Μόλις ολοκληρωνόταν η διαδικασία για μία θέση μεταξύ των δύο δοκιμίων ακολουθούσε αποφόρτιση και άνοδος του μηχανισμού κεφαλής.
- Εν συνεχεία ο φορέας φόρτισης ανυψωνόταν με γρύλους και μετακινούνταν η πλάκα έδρασης με βάση τις προκαθορισμένες από τους θεωρητικούς υπολογισμούς θέσεις και με τη βοήθεια των τοπογραφικών οργάνων, όπως ήδη περιγράφηκε.
- Η διαδικασία επαναλήφθηκε για πέντε διαφορετικές θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, παρόλο που δεν είχε αρχικά προγραμματισθεί, κρίθηκε απαραίτητη η τοποθέτηση βελομέτρων σε χαρακτηριστικά σημεία του τροχού και της σιδηροτροχιάς (Εικ. 8.86). Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν τέσσερα βελόμετρα:

(α) οριζόντια στην κάτω εσωτερική παρειά του όνυχα, (β) κατακόρυφα στην άνω στάθμη της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, (γ) κατακόρυφα στην κάτω εξέχουσα άκρη του επισώτρου, (δ) οριζόντια στην επάνω άκρη του σώματος του τροχού (Εικ. 8.87).



Εικόνα 8.86: Θέσεις βελομέτρων



Εικόνα 8.87: Λεπτομέρεια τοποθέτησης βελομέτρων

Με τον τρόπο αυτό κατέστη εφικτή η άμεση παρακολούθηση της τάξης μεγέθους των εμφανιζόμενων μετακινήσεων, ώστε να διακοπεί η διαδικασία φόρτισης στην περίπτωση που αυτές κρίνονταν επικίνδυνες για την ευστάθεια της διάταξης.

Οι ενδείξεις των βελομέτρων λαμβάνονταν με χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Όπως και στην περίπτωση των καμερών, φωτογραφήθηκαν οι ενδείξεις τους κατά την τοποθέτησή τους και εν συνεχεία λαμβάνονταν φωτογραφίες κάθε 10kN, όταν σταματούσε προσωρινά η φόρτιση (Εικ. 8.88). Η επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων για κάθε θέση του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά παρουσιάζεται στο ακόλουθο κεφάλαιο.



Εικόνα 8.88: Λήψη των ενδείξεων των βελομέτρων

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι μεταξύ του κυλινδρικού εμβόλου επιβολής φορτίου του μηχανισμού κινητής κεφαλής της πρέσσας και της επάνω πλάκας του φορέα φόρτισης τοποθετήθηκε σφαιρική άρθρωση. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε πλήρης επαφή του εμβόλου φόρτισης με την επάνω πλάκα του φορέα φόρτισης του δοκιμίου, σε περίπτωση που αυτή δεν ήταν παράλληλη με τη βάση του δοκιμίου (Εικ. 8.89).



Εικόνα 8.89: Σφαιρική άρθρωση μεταξύ εμβόλου φόρτισης και φορέα φόρτισης
Η σφαιρική άρθρωση τοποθετήθηκε στο κέντρο της επάνω πλάκας του φορέα φόρτισης
ώστε να αποφευχθεί η μεταφορά ροπών λόγω εκκεντρότητας (Εικ. 8.90).



Εικόνα 8.90: Εύρεση κέντρου επάνω πλάκας φορέα φόρτισης
Στο επάνω μέρος της σφαιρικής άρθρωσης τοποθετήθηκε επίπεδη πλάκα, κυκλικής
διατομής και διαμέτρου ίδιας με αυτή του εμβόλου, για προστασία του δυναμοκελιού
του εμβόλου φόρτισης από την άμεση επαφή του με τη σφαιρική άρθρωση (Εικ. 8.91
και 8.92).



Εικόνα 8.91: Τοποθέτηση πλάκας μεταξύ εμβόλου φόρτισης και σφαιρικής άρθρωσης



Εικόνα 8.92: Τελική διάταξη επιβολής φορτίου

Τέλος, σε κάθε θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς τοποθετήθηκε λωρίδα φύλλου με μελάνι (καρμπόν), οι οποία είχε επικολληθεί σε λευκό φύλλο προκειμένου να ελεγχθεί χονδρικά η τάξη μεγέθους του εύρους του αποτυώματος μεταξύ των δύο δοκιμίων (Εικ. 8.93).



Εικόνα 8.93: Φύλλα καρμπόν μεταξύ των δοκιμίων για λήψη αποτυώματος

Με το πέρας κάθε κύκλου μετρήσεων (φόρτισης και αποφόρτισης), όταν ανυψωνόταν ο τροχός για να μετακινηθεί η πλάκα έδρασης της σιδηροτροχιάς σε άλλη θέση, αποσύρονταν τα εν λόγω φύλλα και αξιολογούνταν τα εύρος και η μορφή του αποτυώματος (Εικ. 8.94).



Εικόνα 8.94: Αποτύπωμα μεταξύ των δοκιμίων σε φύλλο καρμπόν

ΚΕΦ.9 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων, ήτοι: των αποτελεσμάτων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας, των στοιχείων των βελομέτρων και των μετρήσεων του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι η επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας έγινε με το λογισμικό ISTR A 4D. Για την επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων χρησιμοποιήθηκαν οι ψηφιακές φωτογραφίες των ενδείξεών τους. Οι μετρήσεις του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας ελήφθησαν από την κάρτα μνήμης της συσκευής.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους, όπου ήταν εφικτό, προκειμένου να επαληθευθεί η ορθότητα των μετρήσεων και συνδυάστηκαν έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος αλληλεπίδρασης τροχού και σιδηροτροχιάς, υπό την επιβολή στατικού φορτίου στις διάφορες μεταξύ τους θέσεις.

9.1 Επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400

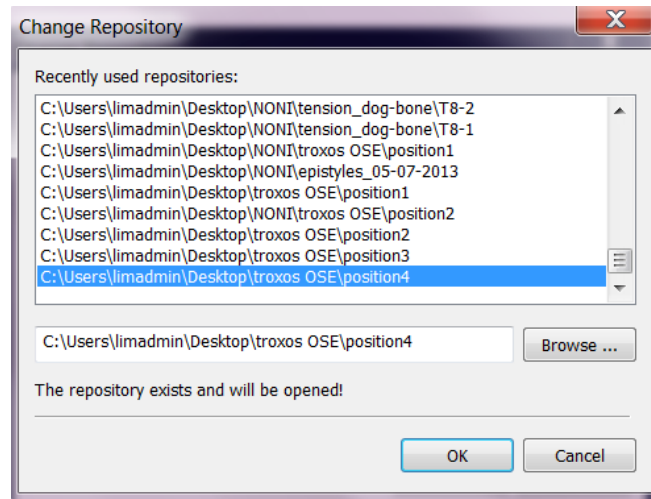
Η επεξεργασία των στοιχείων του μετρητικού συστήματος Q-400 των καμερών υψηλής ευκρίνειας έγινε με το λογισμικό ISTR A 4D, το οποίο έχει σχεδιασθεί για τον έλεγχο του μετρητικού συστήματος και την αξιολόγηση των δεδομένων. Τα καταγεγραμμένα αρχεία περιέχουν τις πληροφορίες κάθε μέτρησης, όπως για παράδειγμα τις παραμέτρους και τα στοιχεία βαθμονόμησης, τις φωτογραφίες που ελήφθησαν κλπ. Επιλέγοντας κάθε αρχείο καταγραφής ενεργοποιούνται όλα τα δεδομένα, οι παράμετροι και τα στοιχεία που συνδέονται με τη μέτρηση αυτή.

Στο πείραμα που διεξήχθη δημιουργήθηκαν υποφάκελοι, κάθε ένας από τους οποίους περιείχε τα μετρητικά δεδομένα και στοιχεία για μια δεδομένη θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Η αντιστοίχιση μετρητικών δεδομένων και θέσεων ήταν η εξής:

- Position 1, τροχοφόρος άξονας κεντρωμένος στη γραμμή (μηδενική εγκάρσια μετατόπιση σιδηροτροχιάς ως προς τον τροχό).
- Position 2, εγκάρσια μετατόπιση της σιδηροτροχιάς κατά 1mm από την αρχική θέση προς τον όνυχα του τροχού.
- Position 3, εγκάρσια μετατόπιση σιδηροτροχιάς κατά 2mm από την αρχική θέση προς τον όνυχα του τροχού.

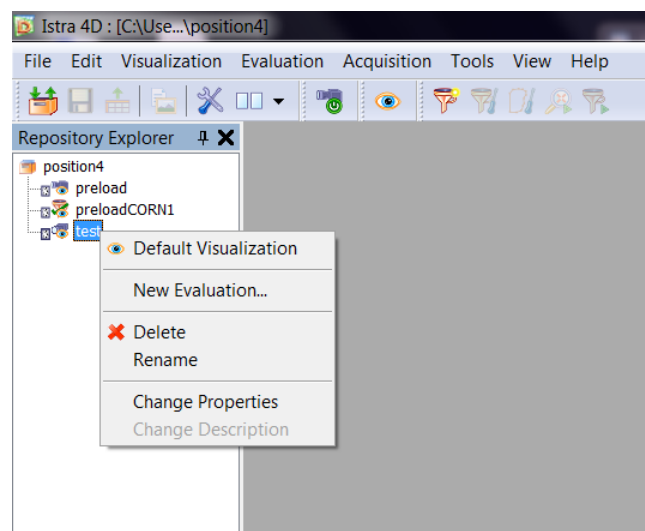
- Position 4, εγκάρσια μετατόπιση σιδηροτροχιάς κατά 3mm από την αρχική θέση προς τον όνυχα του τροχού.
- Position 5, εγκάρσια μετατόπιση σιδηροτροχιάς κατά 4mm από την αρχική θέση προς τον όνυχα του τροχού.

Κατά την έναρξη του προγράμματος επιλέγεται ο υποφάκελος με τα μετρητικά δεδομένα της υπό επεξεργασίας θέσης (Εικ. 9.1).



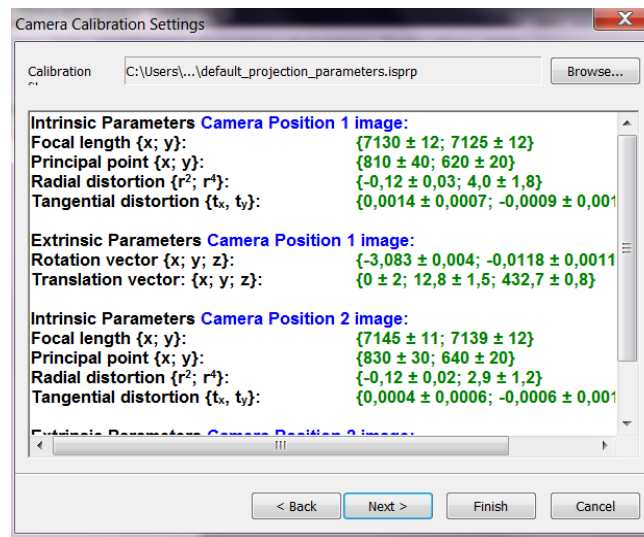
Εικόνα 9.1: Επιλογή υποφακέλου με μετρητικά δεδομένα της κάθε θέσης

Στον συγκεκριμένο υποφάκελο υπάρχουν το αρχείο preload, δηλαδή η πρώτη εικόνα που τραβήχθηκε στην αφόρτιστη κατάσταση και θα αποτελέσει την εικόνα αναφοράς και το αρχείο test, που περιέχει τις εικόνες που τραβήχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος ανά 10kN. Με την επιλογή 'New Evaluation' στο αρχείο test ξεκινάει η διαδικασία επεξεργασίας (Εικ. 9.2).



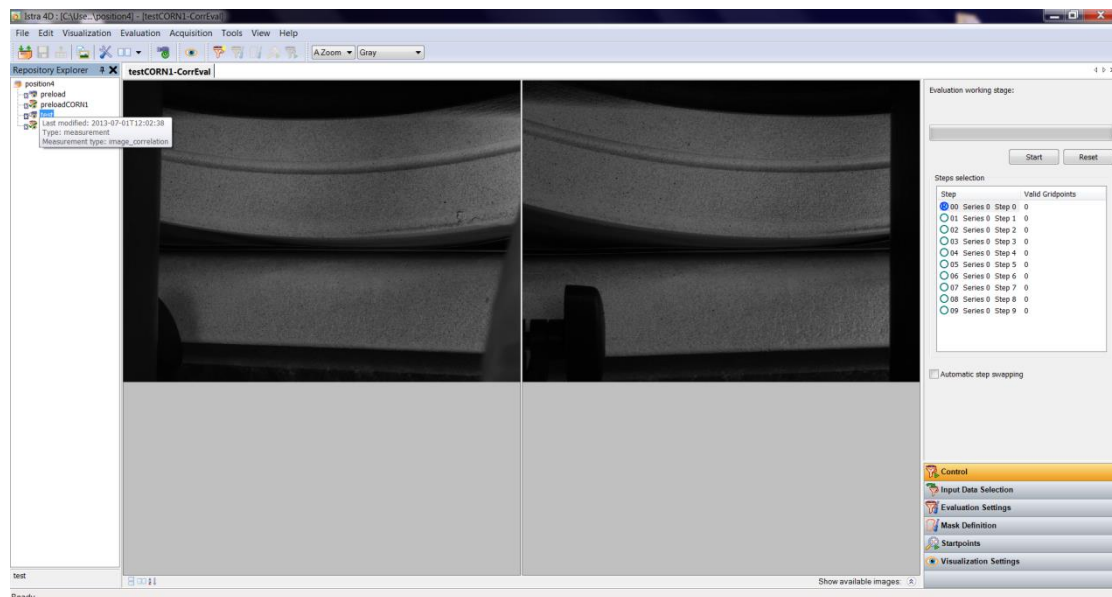
Εικόνα 9.2: Έναρξη διαδικασίας επεξεργασίας δεδομένων

Κατ' αρχήν ορίζεται στο πρόγραμμα το αρχείο που περιέχει τις παραμέτρους βαθμονόμησης των καμερών (Εικ. 9.3).



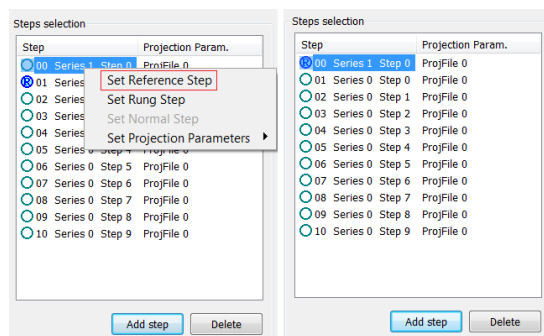
Εικόνα 9.3: Ορισμός παραμέτρων βαθμονόμησης καμερών

Εν συνεχεία το πρόγραμμα εμφανίζει στο κέντρο της οθόνης τις εικόνες των δύο καμερών, αριστερά της πρώτης κάμερας και δεξιά της δεύτερης κάμερας. Στο δεξί μέρος της οθόνης εμφανίζεται η λίστα των εικόνων που περιλαμβάνονται στο αρχείο test. Στο συγκεκριμένο πείραμα πρόκειται για 10 εικόνες, που τραβήχθηκαν από τα 10kN έως τα 100kN με βήμα 10kN (Εικ 9.4).

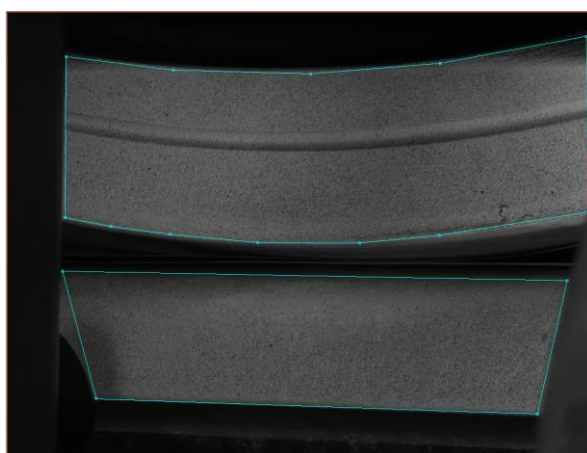


Εικόνα 9.4: Εικόνες δοκιμών από τις δύο κάμερες

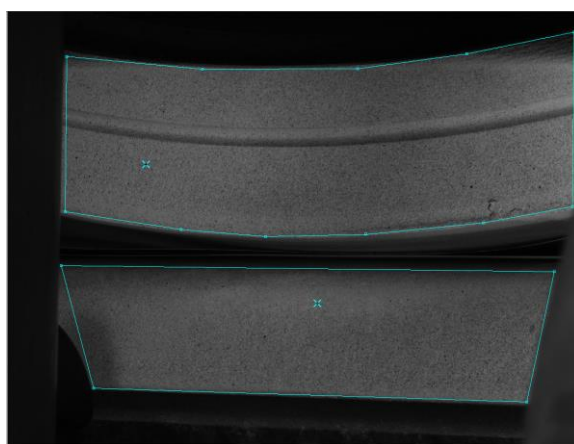
Σ' αυτές προστίθεται χειροκίνητα και η εικόνα που τραβήχθηκε σε κατάσταση προφόρτισης (preload), η οποία ορίζεται ως εικόνα αναφοράς (Εικ 9.5).



Εικόνα 9.5: Ορισμός της εικόνας σε κατάσταση προφόρτισης ως εικόνας αναφοράς
Ακολουθεί ο καθορισμός των υπό διερεύνηση περιοχών στον τροχό και στη
σιδηροτροχιά. Η επισήμανση γίνεται με χρήση πολυγωνικής γραμμής (Εικ. 9.6).

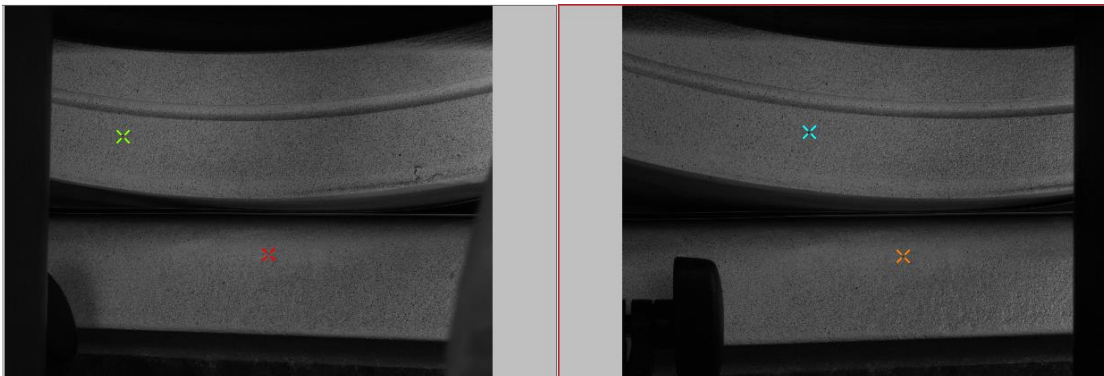


Εικόνα 9.6: Καθορισμός υπό διερεύνηση περιοχών με χρήση πολυγωνικής γραμμής
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η ψηφιακή μέθοδος συσχέτισης
εικόνων βασίζεται στην αντιστοίχιση των ίδιων σημείων σε μία εικόνα αναφοράς και σε
μία παραμορφωμένη εικόνα. Επομένως, στο επόμενο βήμα του προγράμματος
ορίζονται τα υπό παρακολούθηση στίγματα επί του τροχού και επί της σιδηροτροχιάς,
τα οποία θα αποτελέσουν τα σημεία αναφοράς (Εικ. 9.7).



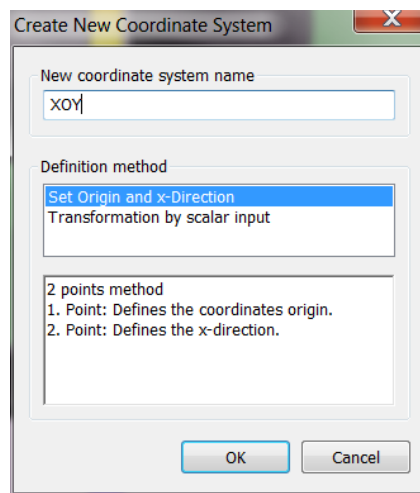
Εικόνα 9.7: Ορισμός των υπό παρακολούθηση στιγμάτων επί των δοκιμίων

Τα στίγματα που επιλέγονται πρέπει να είναι ευδιάκριτα, ώστε να εντοπίζονται με ευκολία τόσο στην αριστερή, όσο και στη δεξιά κάμερα (Εικ. 9.8).



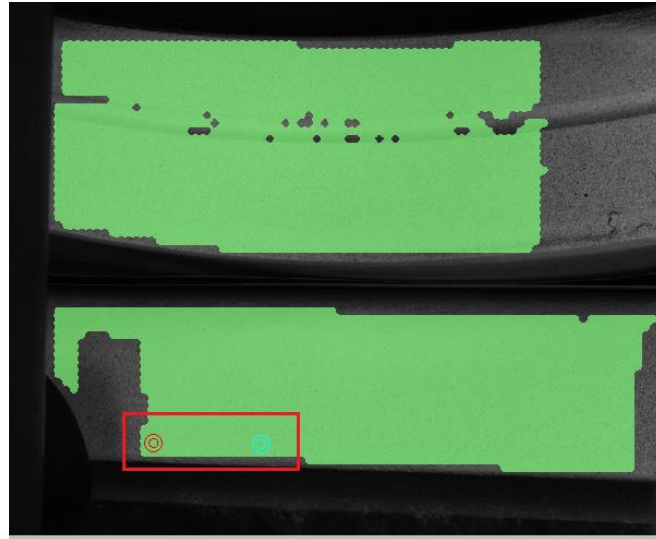
Εικόνα 9.8: Εντοπισμός υπό παρακολούθηση στιγμάτων στις δύο κάμερες

Το πρόγραμμα έχει ορίσει ένα δικό του σύστημα συντεταγμένων. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων και επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να ορισθεί από τον χρήστη το επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων. Το σύστημα συντεταγμένων ορίζεται στην εικόνα αναφοράς (Εικ. 9.9).



Εικόνα 9.9: Καθορισμός συστήματος συντεταγμένων

Μετακινώντας με τη χειροκίνητη συσκευή κατάδειξης («ποντίκι») το πρώτο κυκλικό σημείο (κόκκινο) καθορίζεται η αρχή των συντεταγμένων και μετακινώντας το δεύτερο καθορίζεται η διεύθυνση του άξονα x (Εικ. 9.10).

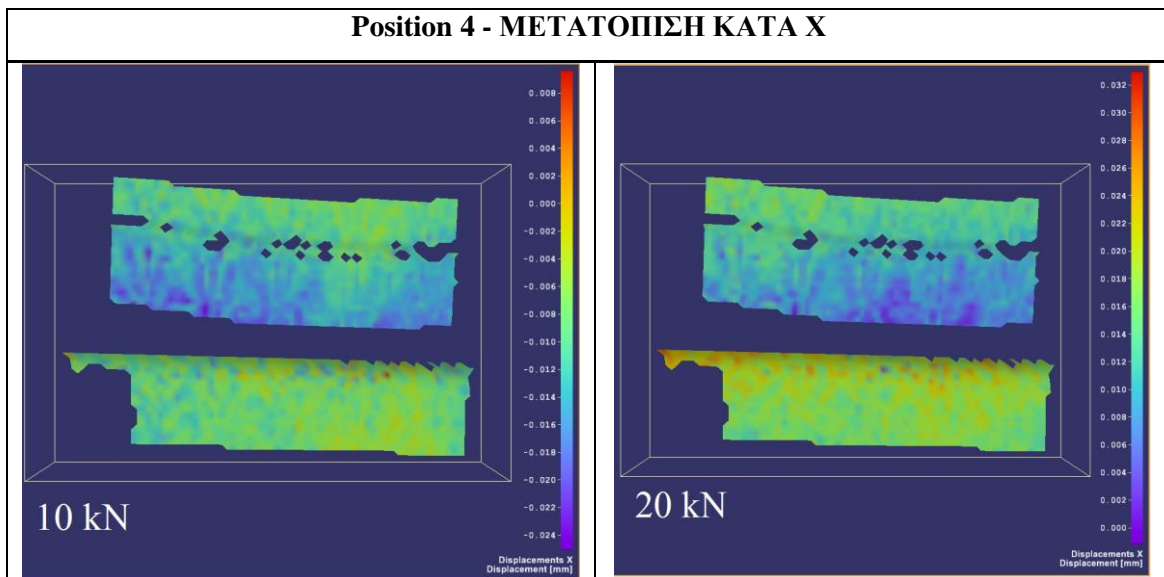


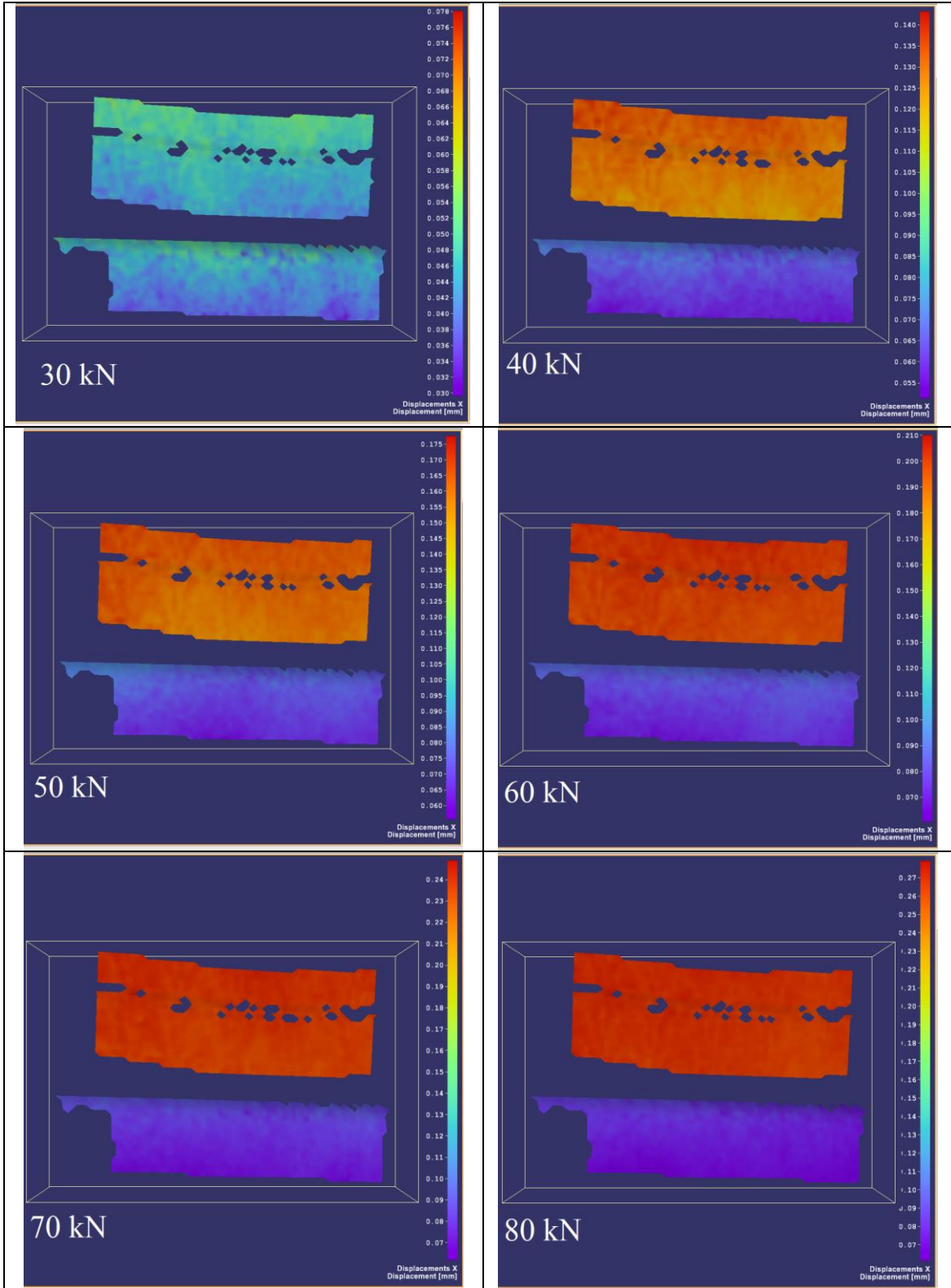
Εικόνα 9.10: Καθορισμός άξονα x

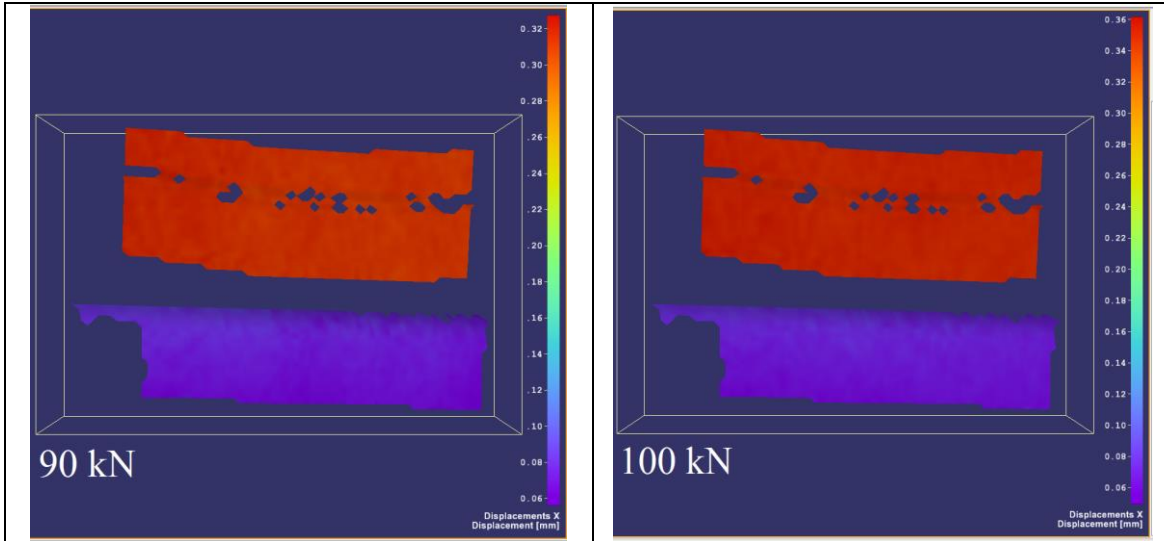
Ο άξονας y τοποθετείται αυτόματα κάθετα στη νοητή γραμμή που ορίζουν τα δύο σημεία και ο άξονας z, με τον κανόνα του δεξιού χεριού, κάθετα στην οθόνη.

Στη φάση αυτή υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης των μετακινήσεων των δοκιμίων κατά x, y και z σε μορφή χρωματοκλίμακας για κάθε μία από τις εικόνες της υπό επεξεργασία θέση, δηλαδή για κάθε φορτίο. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ακολούθως η συγκεκριμένη απεικόνιση για τη θέση ‘Position 4’ (εγκάρσια μετατόπιση της σιδηροτροχιάς προς τον όνυχα του τροχού κατά 3mm από την αρχική θέση) (Πιν. 9.1). Για τις υπόλοιπες θέσεις οι μετατοπίσεις ως προς x, y, z με μορφή χρωματοκλίμακας παρατίθενται στο Παράρτημα 4.

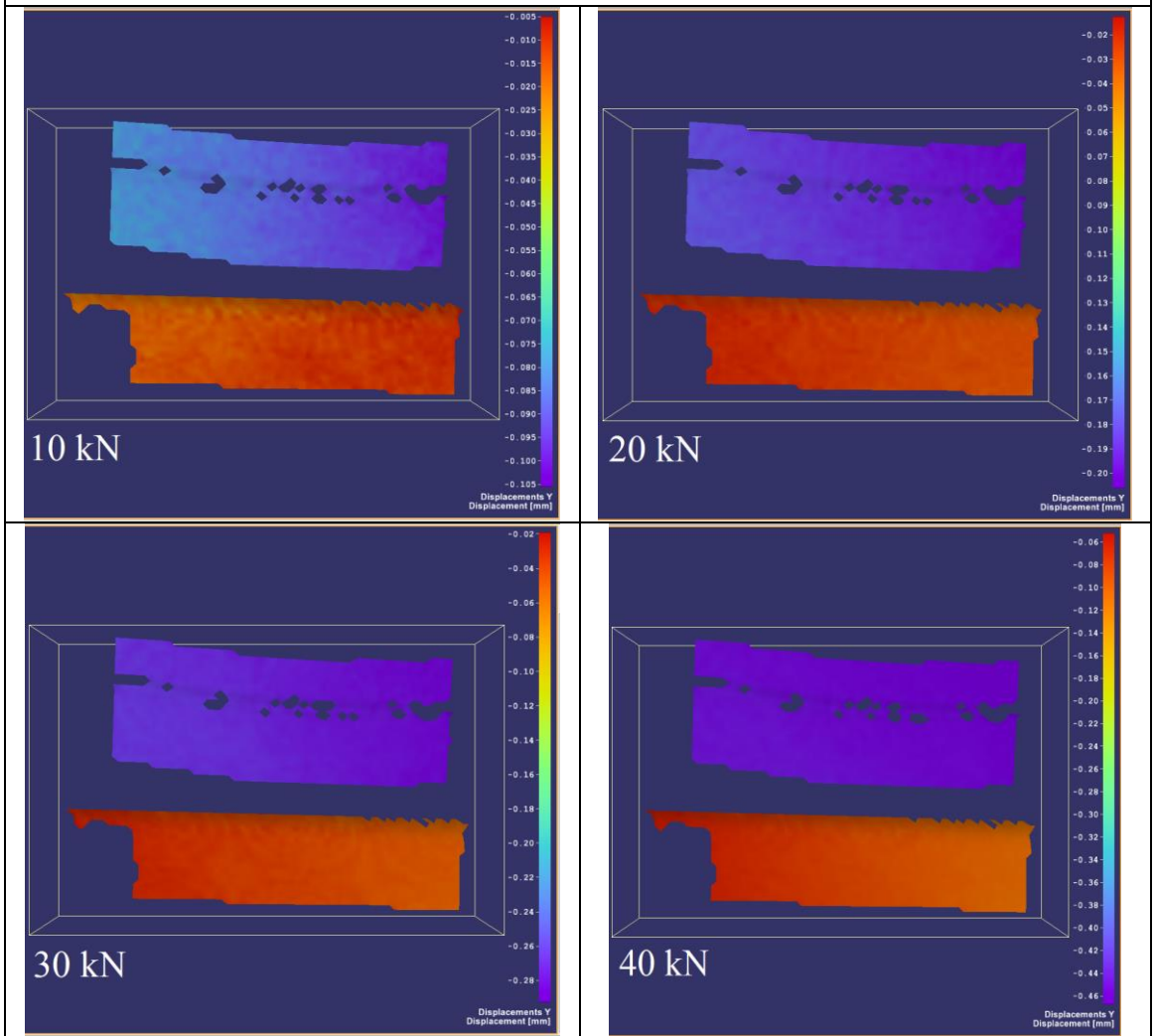
Πίνακας 9.1: Απεικόνιση μετακινήσεων κατά x, y και z με χρωματοκλίμακα στη θέση ‘Position 4’

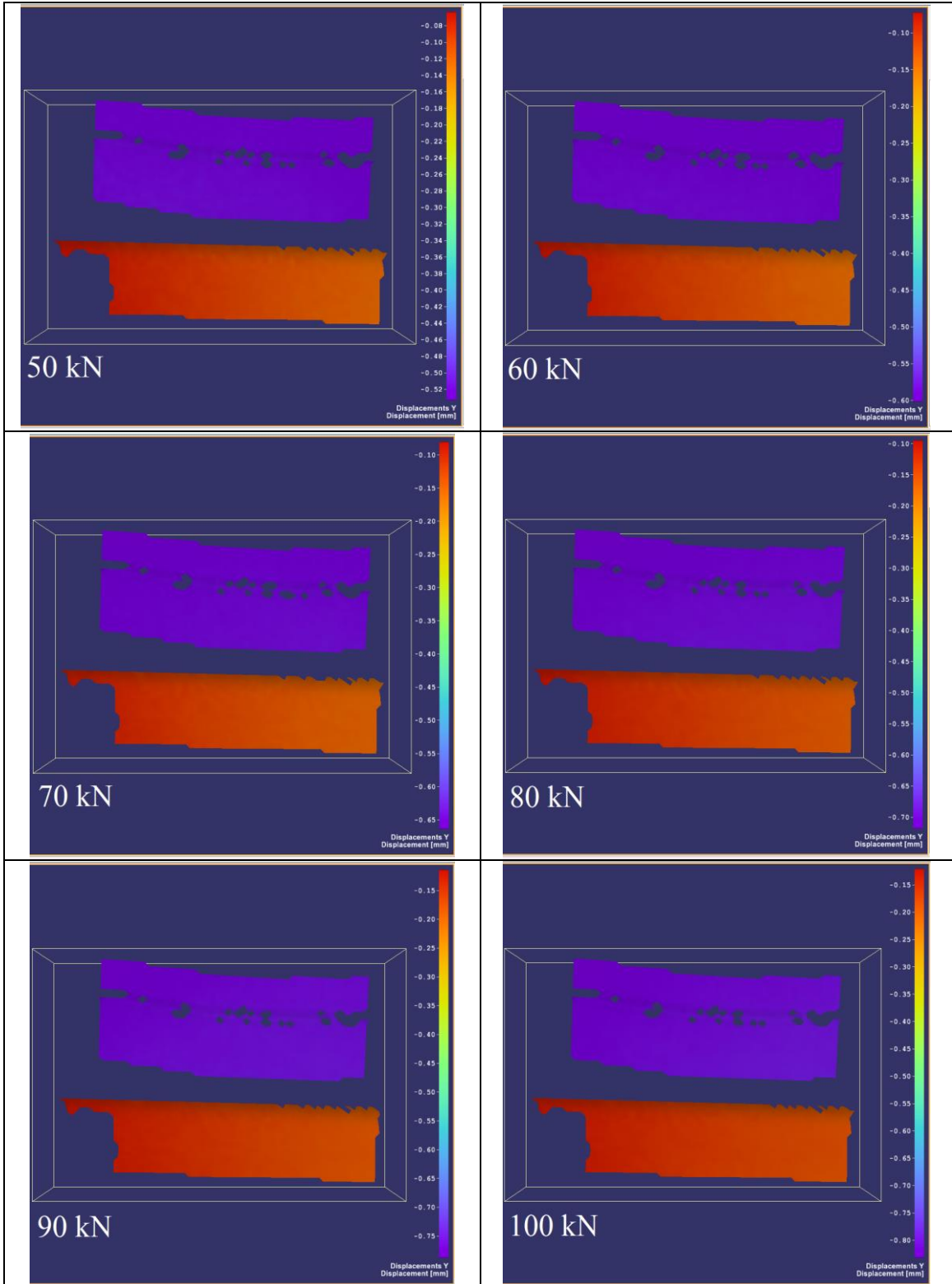




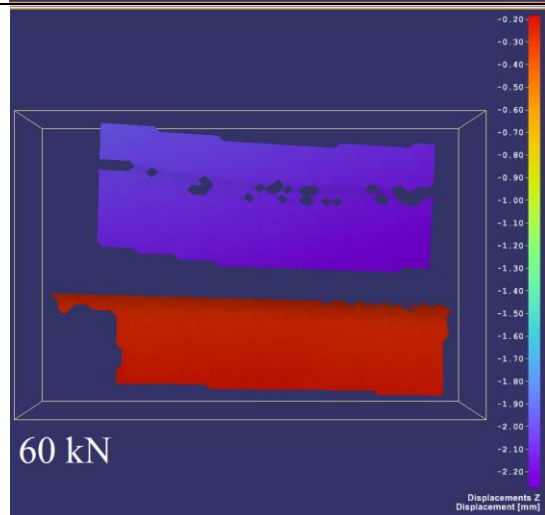
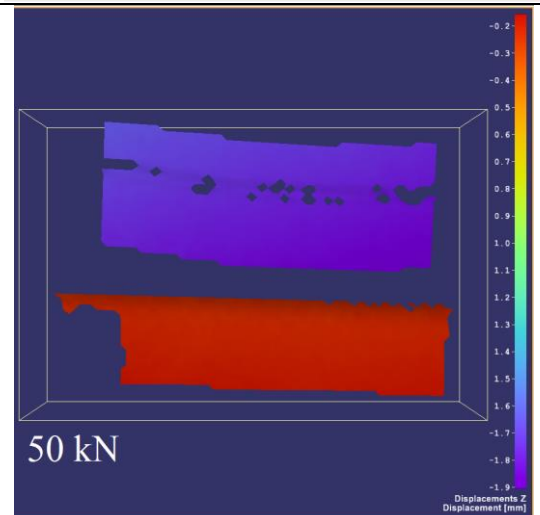
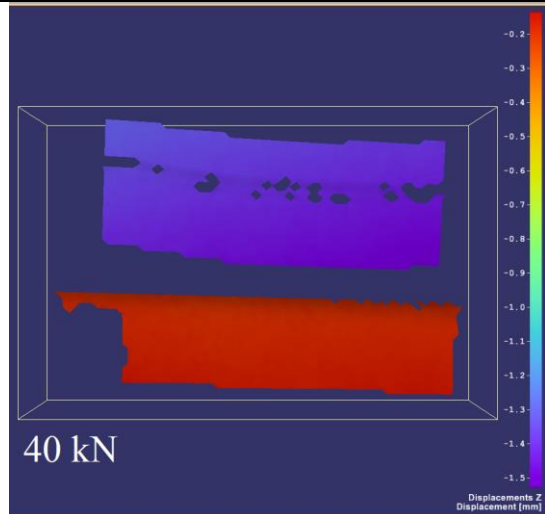
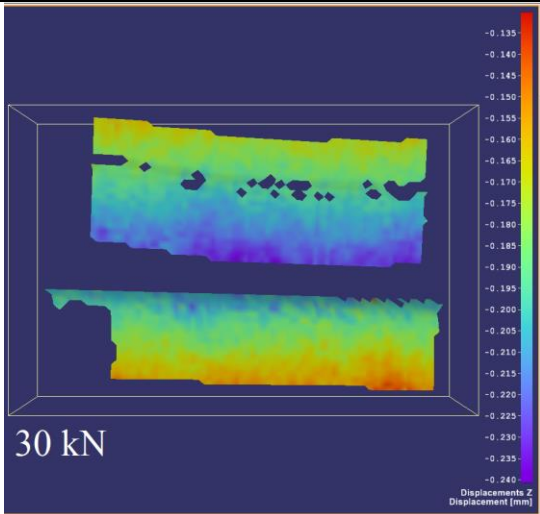
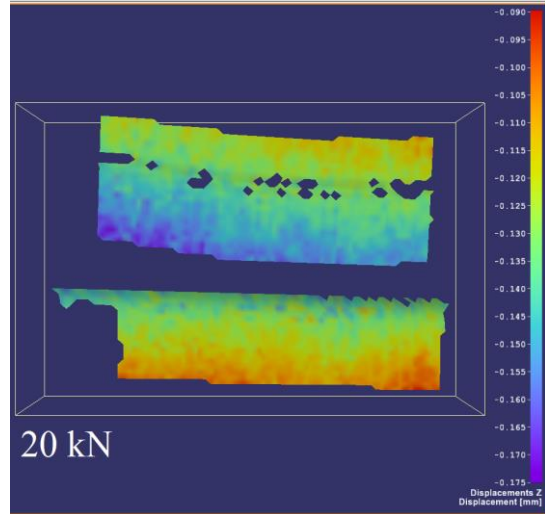
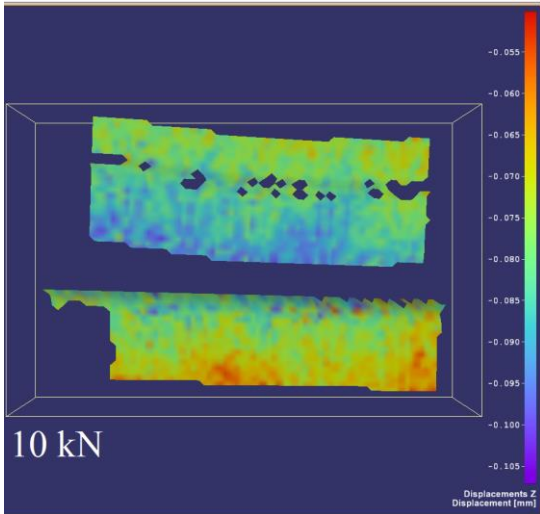


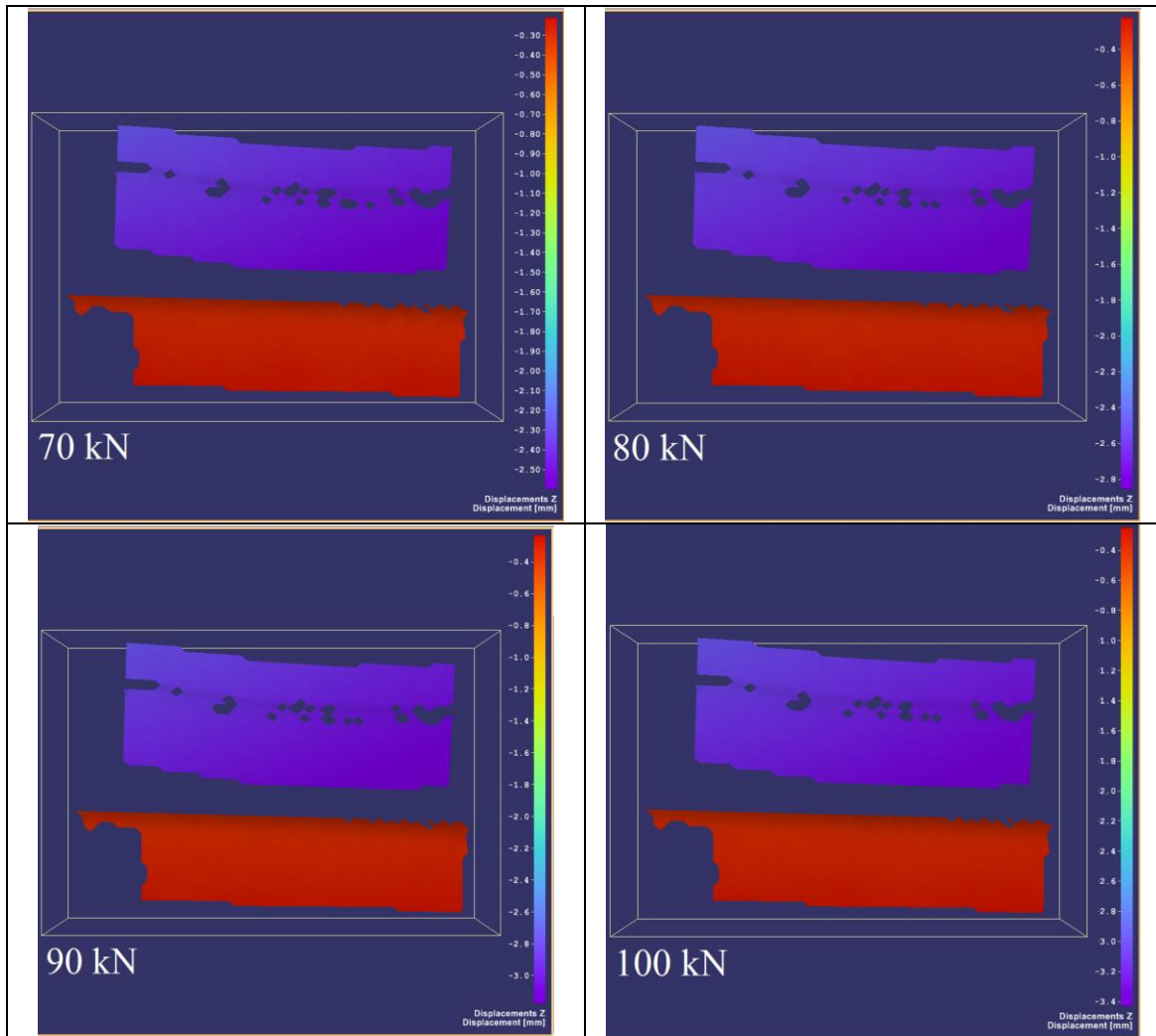
Position 4 - ΜΕΤΑΤΟΜΙΣΗ ΚΑΤΑ Y



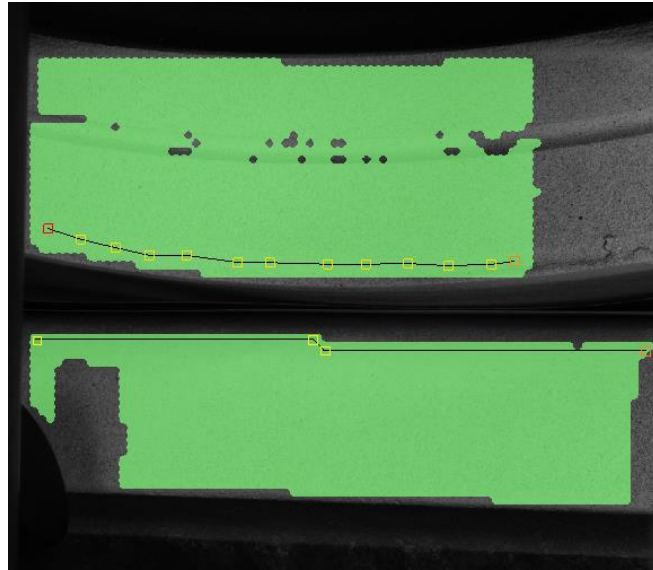


Position 4 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Z





Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η χρωματοκλίμακα παρέχει μια εποπτική εικόνα των μετακινήσεων και την τάξη μεγέθους τους. Το πρόγραμμα μπορεί επιπλέον να παρέχει ακριβείς τιμές για τις μετατοπίσεις ως προς x, y και z. Για τον σκοπό αυτό, ορίστηκαν δύο πολυγωνικές γραμμές: η πρώτη στο κάτω άκρο της επιφάνειας διερεύνησης του τροχού και η δεύτερη στο επάνω άκρο της επιφάνειας διερεύνησης της σιδηροτροχιάς, ακολουθώντας τα περιγράμματα των επιφανειών (Εικ. 9.11).



Εικόνα 9.11: Ορισμός πολυγωνικών γραμμών στα άκρα των επιφανειών διερεύνησης

Έτσι ελήφθησαν, τόσο για τον τροχό όσο και για τη σιδηροτροχιά, οι ακριβείς τιμές των μετακινήσεων ως προς x , y , z κάθε σημείου των πολυγωνικών αυτών γραμμών σε όλο το μήκος τους, για κάθε φορτίο και θέση. Τα αριθμητικά αποτελέσματα εξήχθησαν σε μορφή αρχείων *.txt και επεξεργάστηκαν σε λογιστικά φύλλα Excel, όπου υπολογίστηκε η ακριβής τιμή της μετατόπισης κάθε γραμμής, ως μέσος όρος των μετατοπίσεων των σημείων της. Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πιν. 9.2):

Πίνακας 9.2: Μετατοπίσεις τροχού-σιδηροτροχιάς κατά x,y,z ανά θέση και φορτίο

POSITION 1						
ΦΟΡΤΙΟ (kN)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ (mm)			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ (mm)		
	x	y	z	x	y	z
10	-0.0091547	-0.1166443	-0.0993103	0.0066808	-0.0217180	-0.0848304
20	0.8240713	-0.3284488	-2.4884323	0.0270857	-0.0384283	-0.0775848
30	1.0738183	-0.4759871	-3.3262596	0.0484158	-0.0716520	-0.1250500
40	1.1780553	-0.5434847	-3.6982138	0.0626617	-0.1002390	-0.1680440
50	1.2652048	-0.5978486	-3.9933208	0.0783062	-0.1168200	-0.2011236
60	1.3475173	-0.6515120	-4.2599227	0.0924808	-0.1328720	-0.2356908
70	1.4260889	-0.7026105	-4.5354910	0.0968159	-0.1486330	-0.2643432
80	1.4752490	-0.7449309	-4.7503602	0.0916974	-0.1623890	-0.2971017
90	1.5343620	-0.7845217	-4.9773374	0.0864147	-0.1757170	-0.3266181
100	1.5934563	-0.8252027	-5.1945944	0.0818355	-0.1875040	-0.3391436

POSITION 2						
ΦΟΡΤΙΟ (kN)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ (mm)			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ (mm)		
	x	y	z	x	y	z
10	-0.0267460	-0.0684079	-0.0905002	-0.0049181	-0.0219426	-0.0840824
20	0.0686686	-0.1698613	-0.1585075	0.0193120	-0.0323015	-0.1416945
30	-0.0079570	-0.4459412	-2.4492628	0.0345367	-0.0624846	-0.1352715
40	0.0167661	-0.5340262	-3.1536434	0.0482246	-0.0833956	-0.1890393
50	0.0386465	-0.5934444	-3.4229288	0.0569428	-0.0972056	-0.2223271
60	0.0678296	-0.6537013	-3.6991458	0.0648840	-0.1101869	-0.2549802
70	0.0965898	-0.7039290	-3.9958687	0.0670530	-0.1276411	-0.2986548
80	0.1175829	-0.7579208	-4.2310464	0.0633189	-0.1395785	-0.3421117
90	0.1494327	-0.8102888	-4.5180433	0.0564246	-0.1522742	-0.3672351
100	0.1748530	-0.8593039	-4.7263641	0.0529631	-0.1663013	-0.3989283

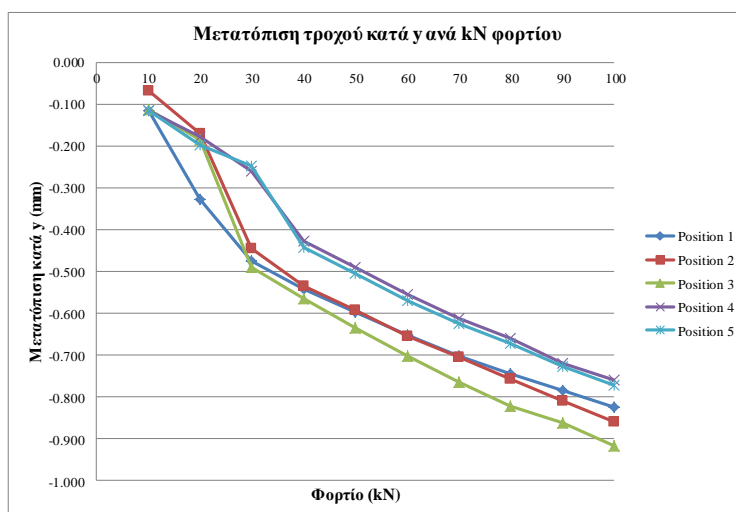
POSITION 3						
ΦΟΡΤΙΟ (kN)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ (mm)			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ (mm)		
	x	y	z	x	y	z
10	0.0082650	-0.1124734	-0.0963813	-0.0058292	-0.0166373	-0.0886757
20	0.0412002	-0.1853060	-0.1704446	0.0203783	-0.0459670	-0.1506645
30	-0.0961034	-0.4889907	-2.4718052	0.0486846	-0.0930630	-0.1334756
40	-0.0816544	-0.5638302	-3.0550060	0.0635453	-0.1186800	-0.1724722
50	-0.0549037	-0.6341355	-3.3571155	0.0734234	-0.1359570	-0.2058542
60	-0.0231344	-0.7025220	-3.6479696	0.0797448	-0.1572540	-0.2391209
70	0.0162728	-0.7634331	-3.9361798	0.0829856	-0.1743910	-0.2866375
80	0.0502696	-0.8220717	-4.2030804	0.0794964	-0.1865260	-0.3150822
90	0.0829261	-0.8605748	-4.4141881	0.0771428	-0.1975180	-0.3391141
100	0.1185884	-0.9176025	-4.6620727	0.0681299	-0.2122320	-0.3643236

POSITION 4						
ΦΟΡΤΙΟ (kN)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ (mm)			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ (mm)		
	x	y	z	x	y	z
10	-0.0167761	-0.1152866	-0.0903402	-0.0076056	-0.0149735	-0.0819825
20	0.0065962	-0.1783792	-0.1569698	0.0203160	-0.0288692	-0.1380278
30	0.0420426	-0.2595683	-0.2256131	0.0472948	-0.0428735	-0.2027533
40	0.1246405	-0.4273501	-1.4772687	0.0693770	-0.0890775	-0.1979085
50	0.1587579	-0.4907485	-1.8443929	0.0795145	-0.1020959	-0.2284682
60	0.1971489	-0.5556738	-2.1942261	0.0870928	-0.1189038	-0.2671846
70	0.2364330	-0.6116778	-2.5162353	0.0885684	-0.1320067	-0.3059698
80	0.2667481	-0.6592654	-2.7578945	0.0844718	-0.1429374	-0.3278870
90	0.3146065	-0.7194805	-3.0779310	0.0805790	-0.1622911	-0.3533812
100	0.3527038	-0.7605569	-3.3167075	0.0766269	-0.1703248	-0.3783757

POSITION 5						
ΦΟΡΤΙΟ (kN)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ (mm)			ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ (mm)		
	x	y	z	x	y	z
10	0.0324392	-0.1163967	-0.0940481	-0.0146040	-0.0139214	-0.0911018
20	0.0535738	-0.1976905	-0.1784865	0.0173237	-0.0272020	-0.1600163
30	0.0859242	-0.2488903	-0.2559379	0.0419226	-0.0355598	-0.2285279
40	0.3387430	-0.4425039	-1.7030231	0.0586435	-0.0733255	-0.2197511
50	0.4217718	-0.5043973	-2.0780096	0.0766979	-0.0859079	-0.2624877
60	0.4965719	-0.5698023	-2.4157729	0.0856116	-0.1030953	-0.2965717
70	0.5673252	-0.6259004	-2.7337602	0.0874435	-0.1153505	-0.3338378
80	0.6182497	-0.6730760	-2.9887626	0.0826591	-0.1255678	-0.3634561
90	0.6775988	-0.7281558	-3.2561145	0.0799375	-0.1440059	-0.3885451
100	0.7322013	-0.7718356	-3.4986168	0.0756299	-0.1551706	-0.4147448

Στα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα παρατηρούνται τα εξής:

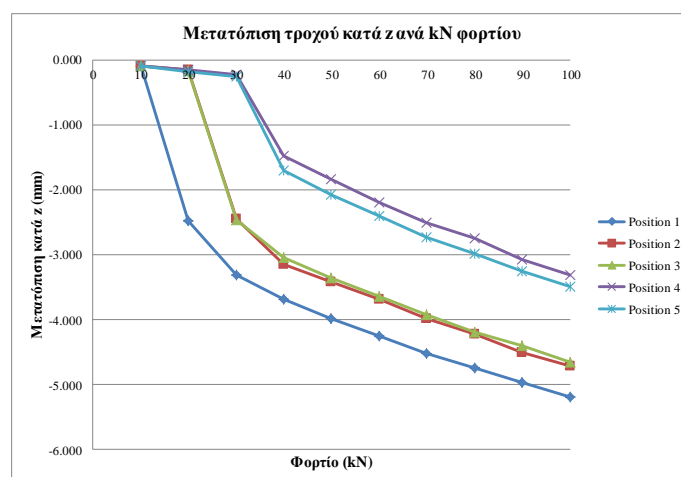
- Ο τροχός κάνει μία σύνθετη κίνηση ως προς τους άξονες x, y και z, η οποία δικαιολογείται λόγω του ότι η πειραματική διάταξη ήταν ελεύθερη (δεν υπάρχει ολόκληρος ο τροχοφόρος άξονας για να τον συγκρατήσει άρρηκτα συνδεδεμένο με δεύτερο τροχό).
- Η μετατόπιση του τροχού ως προς τον άξονα y περιλαμβάνει την ολίσθηση λόγω ελεύθερης διάταξης και τη μετατόπιση του υλικού λόγω της συμπίεσης των δύο μετάλλων στη θέση επαφής. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 9.1 ο τροχός αρχίζει να υποχωρεί ομαλά κατά τον άξονα y για φόρτιση μεγαλύτερη των 40kN, ενώ μέχρις εκείνου του σημείου ολισθαίνει προσπαθώντας να πάρει θέση ως προς τη σιδηροτροχιά.



Διάγραμμα 9.1: Μετατόπιση του τροχού κατά y συναρτήσει της φόρτισης

- Οι μεγαλύτερες τιμές του πίνακα εμφανίζονται στη μετατόπιση του τροχού ως προς τον άξονα z, βάσει του συστήματος αναφοράς που ορίστηκε στο λογισμικό επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των καμερών. Όπως αναφέρθηκε πρόκειται για τον άξονα κάθετα στην οθόνη με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού, αντιστοιχεί δηλαδή στην εγκάρσια μετατόπιση του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά. Το πρόσημο αντιστοιχεί στη φορά, πρόκειται δηλαδή για απομάκρυνση του όνυχα του τροχού από την εσωτερική παρειά της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Η μετατόπιση αυτή του τροχού επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία των βελομέτρων (βελόμετρο 1) τόσο ως προς την κατεύθυνση, όσο και ως προς την τάξη μεγέθους. Στο Διάγραμμα 9.2 φαίνεται ότι μεταξύ 10kN και 40kN ανάλογα με τη θέση (Position) ο τροχός εμφάνιζε ένα «άλμα» ως προς

τον άξονα z, γεγονός που επίσης σχετίζεται με την έλλειψη δεύτερου τροχού που προαναφέρθηκε.



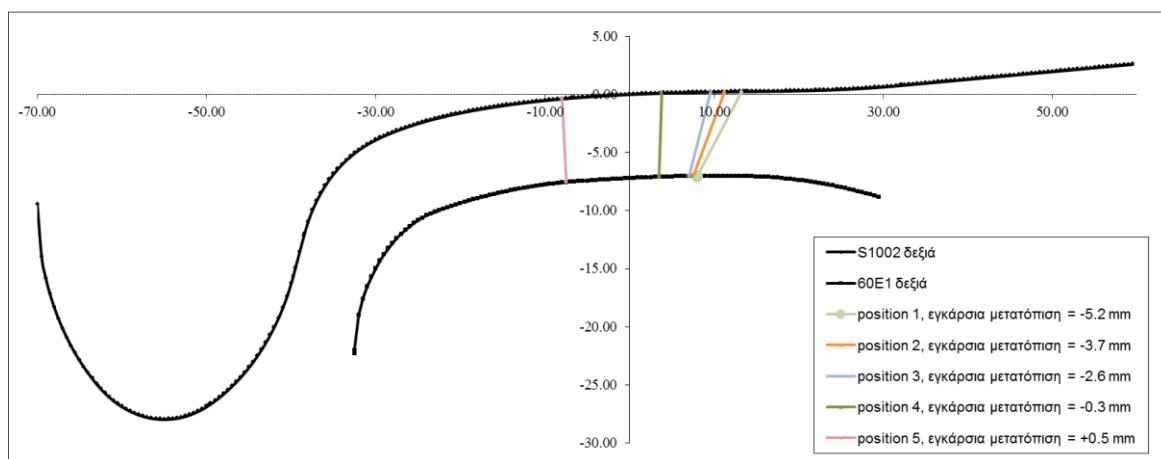
Διάγραμμα 9.2: Μετατόπιση του τροχού κατά z συναρτήσει της φόρτισης

Δεδομένου ότι η εγκάρσια θέση του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά καθοριζόταν εξ' αρχής πριν την έναρξη της φόρτισης ώστε να συμφωνεί με τις θέσεις των θεωρητικών υπολογισμών, κατά τη διάρκεια της φόρτισης υπήρξε απόκλιση από την αρχική εγκάρσια θέση τοποθέτησης. Έτσι τελικά, οι εγκάρσιες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά με βάση το θεωρητικά καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων ήταν οι ακόλουθες (Πιν. 9.3):

Πίνακας 9.3: Τελική εγκάρσια θέση τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά

POSITION 1	
Αρχική τοποθέτηση (mm)	0.0000000000
Μετατόπιση z (mm)	-5.1945943833
Τελική εγκάρσια θέση (mm)	-5.1945943833
POSITION 2	
Αρχική τοποθέτηση (mm)	1.0000000000
Μετατόπιση z (mm)	-4.7263641231
Τελική εγκάρσια θέση (mm)	-3.7263641231
POSITION 3	
Αρχική τοποθέτηση (mm)	2.0000000000
Μετατόπιση z (mm)	-4.6620726518
Τελική εγκάρσια θέση (mm)	-2.6620726518
POSITION 4	
Αρχική τοποθέτηση (mm)	3.0000000000
Μετατόπιση z (mm)	-3.3167074531
Τελική εγκάρσια θέση (mm)	-0.3167074531
POSITION 5	
Αρχική τοποθέτηση (mm)	4.0000000000
Μετατόπιση z (mm)	-3.4986168320
Τελική εγκάρσια θέση (mm)	0.5013831680

Για κάθε μία από τις παραπάνω εγκάρσιες θέσεις του τροχού ως προς τη σιδηροτροχιά, τα αντίστοιχα σημεία επαφής μεταξύ τους και οι συντεταγμένες αυτών υπολογίσθηκαν εκ νέου και φαίνονται στο σχήμα (Σχ. 9.1) και στον πίνακα (Πιν. 9.4) που ακολουθούν.



Σχήμα 9.1: Σημεία επαφής τροχού-σιδ/χιάς στις τελικές πειραματικές θέσεις

Πίνακας 9.4: Συντεταγμένες σημείων επαφής τροχού-σιδ/χιάς (πειραματικές θέσεις)

ΘΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ			
	τροχός		σιδηροτροχιά	
	x	y	x	y
position 1	13.200	0.240	8.000	-7.023
position 2	11.200	0.221	7.500	-7.028
position 3	9.700	0.204	7.000	-7.033
position 4	3.800	0.106	3.500	-7.096
position 5	-8.000	0.240	-7.500	-7.560

- Η υποχώρηση της κεφαλής της σιδηροτροχιάς ως προς τον άξονα y οφείλεται στη μεταφορά του επιβαλλόμενου φορτίου μέσω της διεπιφάνειας τροχού-σιδηροτροχιάς. Η σιδηροτροχιά συγκρατείται με τα μέσα σύνδεσης επί της πλάκας έδρασης, η οποία ήταν στερεωμένη με σφιγκτήρες επί της επιφάνειας στερέωσης του δοκιμίου της πρέσσας. Παρόλα αυτά εμφανίζονται μικρομετακινήσεις της κεφαλής ως προς τους άξονες x και z. Οι μετατοπίσεις ως προς τον άξονα x είναι μηδαμινές (μικρότερες από δέκατο του χιλιοστού) και ενδέχεται να προέρχονται από την επιπέδωση του υλικού. Οι μετατοπίσεις ως προς τον άξονα z είναι επίσης μικρές (μέγιστη 0,4mm) και ενδέχεται να οφείλονται στην ολίσθηση του τροχού ως προς τον άξονα z, που κατά την μετατόπισή του φαίνεται να «συμπαράσφύρει» τη σιδηροτροχιά. Υπενθυμίζεται ότι η σύσφιξη όλων των βλήτρων (μέσων σύνδεσης και σφιγκτήρων) είχε γίνει χειροκίνητα.

9.2 Επεξεργασία των στοιχείων των βελομέτρων

Η τοποθέτηση των τεσσάρων βελομέτρων σε χαρακτηριστικά σημεία του τροχού και της σιδηροτροχιάς έγινε όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικ. 9.12).



Εικόνα 9.12: Τοποθέτηση βελομέτρων

Όπως και στην περίπτωση των καμερών, κατά την τοποθέτηση των βελομέτρων και σε κατάσταση προφόρτισης (preload) λαμβάνονταν ψηφιακές φωτογραφίες των ενδείξεών τους. Στη συνέχεια, για κάθε 10kN που σταματούσε η διαδικασία της φόρτισης, οι ενδείξεις των βελομέτρων φωτογραφίζονταν εκ νέου. Αναλυτικά για κάθε θέση και φόρτιση οι φωτογραφίες των τεσσάρων βελομέτρων παρατίθενται στο Παράρτημα 5. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι ενδείξεις των βελομέτρων στη θέση ‘Position 4’ σε κατάσταση προφόρτισης (φορτίο 0,4kN) και για φορτίο έως 100kN, ανά 10kN (Εικ. 9.13). Η σειρά παρουσίασης των βελομέτρων είναι σύμφωνη με τη σειρά τοποθέτησής τους (βλ. Εικ 9.12).



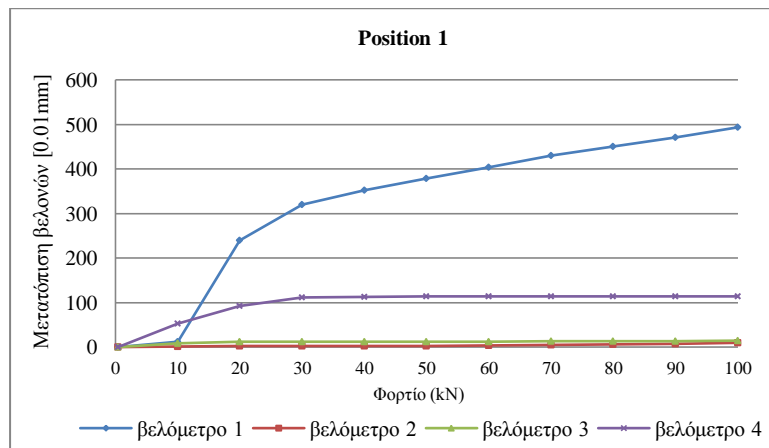
Εικόνα 9.13: Ενδείξεις βελομέτρων στη θέση ‘Position 4’

Τα στοιχεία των φωτογραφιών για κάθε βελόμετρο και φορτίο, σε κάθε θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς μεταφέρθηκαν σε λογιστικό φύλλο Excel. Η μετατόπιση των βελονών για κάθε φορτίο προέκυψε ως η διαφορά της ένδειξης του βελομέτρου για την εκάστοτε τιμή φορτίου από την αρχική ένδειξη. Η επεξεργασία των στοιχείων οδήγησε στα ακόλουθα αποτελέσματα:

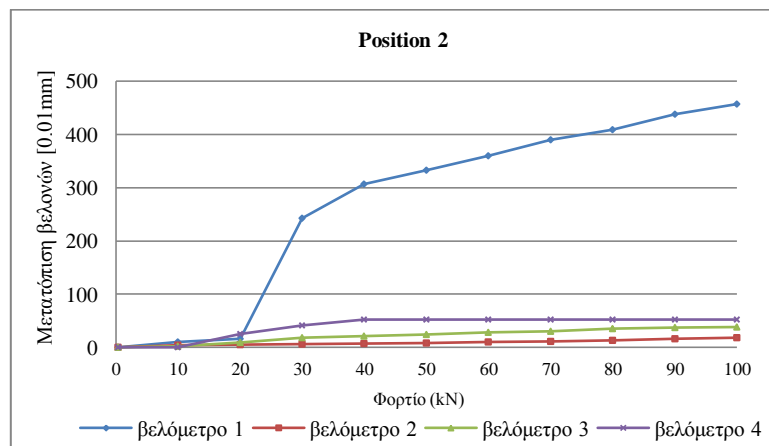
Πίνακας 9.5: Μετατοπίσεις βελομέτρων ανά θέση και φορτίο

POSITION 1								
Φορτίο [kN]	Ενδείξεις βελομέτρων [0.01mm]				Μετατόπιση βελονών [0.01mm]			
	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4
preload 0.4	2370	292	35	2091	0	0	0	0
10	2383	294	44	2144	13	2	9	53
20	2610	295	47	2184	240	3	12	93
30	2690	295	47	2203	320	3	12	112
40	2722	295	47	2205	352	3	12	114
50	2749	295	48	2205	379	3	13	114
60	2774	296	48	2205	404	4	13	114
70	2800	297	49	2205	430	5	14	114
80	2821	299	49	2205	451	7	14	114
90	2841	300	49	2205	471	8	14	114
100	2864	302	50	2205	494	10	15	114
POSITION 2								
Φορτίο [kN]	Ενδείξεις βελομέτρων [0.01mm]				Μετατόπιση βελονών [0.01mm]			
	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4
preload 0.4	609	254	181	1400	0	0	0	0
10	619	258	183	1400	10	4	2	0
20	625	259	190	1425	16	5	9	25
30	852	260	199	1441	243	6	18	41
40	916	261	202	1452	307	7	21	52
50	942	262	205	1452	333	8	24	52
60	969	264	209	1452	360	10	28	52
70	999	265	211	1452	390	11	30	52
80	1018	267	216	1452	409	13	35	52
90	1047	270	218	1452	438	16	37	52
100	1066	272	219	1452	457	18	38	52
POSITION 3								
Φορτίο [kN]	Ενδείξεις βελομέτρων [0.01mm]				Μετατόπιση βελονών [0.01mm]			
	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4
preload 0.3	2109	245	0	3297	0	0	0	0
10	2117	249	6	3302	8	4	6	5
20	2124	250	13	3326	15	5	13	29
30	2348	250	21	3345	239	5	21	48
40	2402	250	26	3358	293	5	26	61
50	2433	251	31	3358	324	6	31	61
60	2460	253	34	3358	351	8	34	61
70	2488	254	36	3358	379	9	36	61
80	2513	256	38	3358	404	11	38	61
90	2533	258	42	3358	424	13	42	61
100	2558	261	46	3358	449	16	46	61
POSITION 4								
Φορτίο [kN]	Ενδείξεις βελομέτρων [0.01mm]				Μετατόπιση βελονών [0.01mm]			
	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4
preload 0.4	2495	239	7	2788	0	0	0	0
10	2503	243	9	2789	8	4	2	1
20	2510	243	17	2818	15	4	10	30
30	2516	244	24	2844	21	5	17	56
40	2639	244	28	2868	144	5	21	80
50	2674	245	32	2868	179	6	25	80
60	2706	246	35	2868	211	7	28	80
70	2737	248	39	2868	242	9	32	80
80	2761	249	42	2868	266	10	35	80
90	2791	252	44	2868	296	13	37	80
100	2814	253	45	2868	319	14	38	80
POSITION 5								
Φορτίο [kN]	Ενδείξεις βελομέτρων [0.01mm]				Μετατόπιση βελονών [0.01mm]			
	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4	βελόμετρο 1	βελόμετρο 2	βελόμετρο 3	βελόμετρο 4
preload 0.3	2088	299	17	2635	0	0	0	0
10	2097	306	22	2667	9	7	5	32
20	2105	309	31	2700	17	10	14	65
30	2113	310	36	2725	25	11	19	90
40	2251	310	37	2725	163	11	20	90
50	2286	311	40	2725	198	12	23	90
60	2318	313	42	2725	230	14	25	90
70	2349	315	43	2725	261	16	26	90
80	2373	317	45	2725	285	18	28	90
90	2404	319	48	2725	316	20	31	90
100	2419	321	48	2725	331	22	31	90

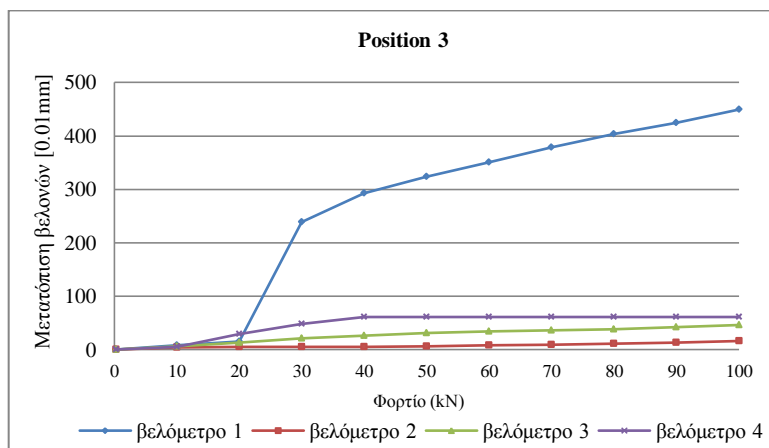
Κατόπιν, οι τιμές των βελομέτρων για κάθε τιμή φορτίου και σε κάθε θέση απεικονίσθηκαν με τη μορφή διαγραμμάτων και παρουσιάζονται ακολούθως.



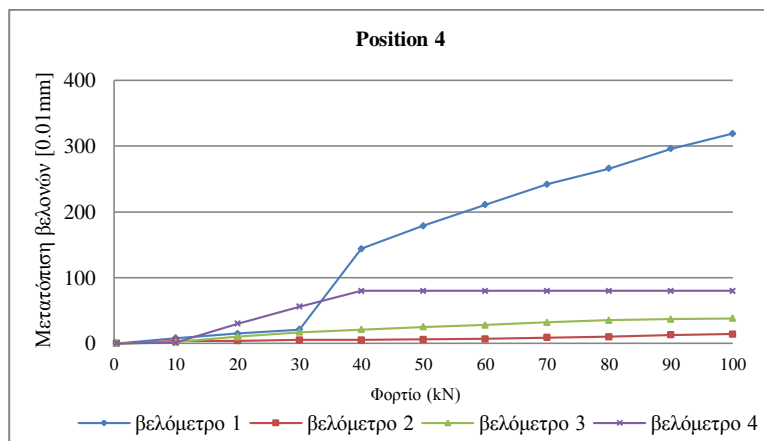
Διάγραμμα 9.3: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση 'Position 1'



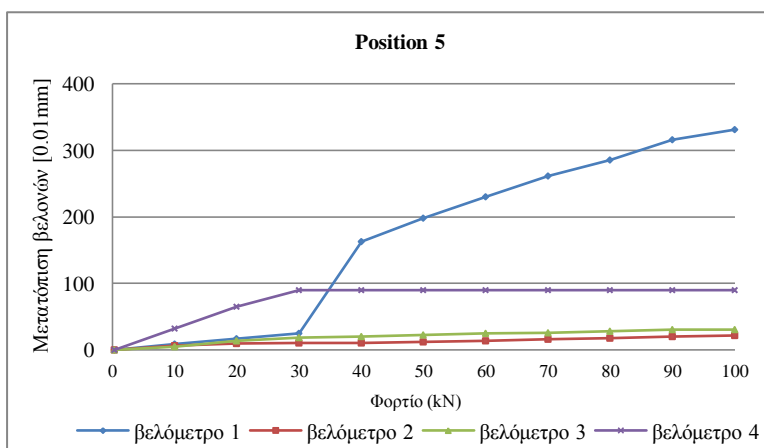
Διάγραμμα 9.4: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση 'Position 2'



Διάγραμμα 9.5: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση 'Position 3'



Διάγραμμα 9.6: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση 'Position 4'



Διάγραμμα 9.7: Μετατόπιση βελομέτρων στη θέση 'Position 5'

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

- Οι τιμές των βελομέτρων 2 και 3 τα οποία τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη θέση στη σιδηροτροχιά και στο σώμα του τροχού (βλ. Εικ. 9.12), αυξάνουν ομαλά με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου.
- Η τιμή του βελομέτρου 1, το οποίο τοποθετήθηκε οριζόντια στην κάτω εσωτερική παρειά του όνυχα παρουσιάζει σταδιακή ομαλή αύξηση για τιμές φόρτισης από 10kN έως 30kN ανάλογα με τη θέση (position), στη συνέχεια απότομο άλμα εντός 10kN φόρτισης και τέλος σταδιακή ομαλή αύξηση μέχρι τα 100kN.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 9.6) παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές του βελομέτρου 1 και την μετατόπισης z του τροχού, όπως καταγράφηκε από το μετρητικό σύστημα των καμερών και διαπιστώνεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων ως προς την τάξη μεγέθους τους.

Πίνακας 9.6: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρητικού συστήματος καμερών και βελομέτρων

Φορτίο [kN]	POSITION 1		POSITION 2		POSITION 3	
	μετατόπιση z τροχού [mm]	μετατόπιση βελομέτρου 1 [mm]	μετατόπιση z τροχού [mm]	μετατόπιση βελομέτρου 1 [mm]	μετατόπιση z τροχού [mm]	μετατόπιση βελομέτρου 1 [mm]
10	0.10	0.13	0.09	0.10	0.10	0.08
20	2.49	2.40	0.16	0.16	0.17	0.15
30	3.33	3.20	2.45	2.43	2.47	2.39
40	3.70	3.52	3.15	3.07	3.06	2.93
50	3.99	3.79	3.42	3.33	3.36	3.24
60	4.26	4.04	3.70	3.60	3.65	3.51
70	4.54	4.30	4.00	3.90	3.94	3.79
80	4.75	4.51	4.23	4.09	4.20	4.04
90	4.98	4.71	4.52	4.38	4.41	4.24
100	5.19	4.94	4.73	4.57	4.66	4.49
Φορτίο [kN]	POSITION 4		POSITION 5			
	μετατόπιση z τροχού [mm]	μετατόπιση βελομέτρου 1 [mm]	μετατόπιση z τροχού [mm]	μετατόπιση βελομέτρου 1 [mm]		
10	0.09	0.08	0.09	0.09		
20	0.16	0.15	0.18	0.17		
30	0.23	0.21	0.26	0.25		
40	1.48	1.44	1.70	1.63		
50	1.84	1.79	2.08	1.98		
60	2.19	2.11	2.42	2.30		
70	2.52	2.42	2.73	2.61		
80	2.76	2.66	2.99	2.85		
90	3.08	2.96	3.26	3.16		
100	3.32	3.19	3.50	3.31		

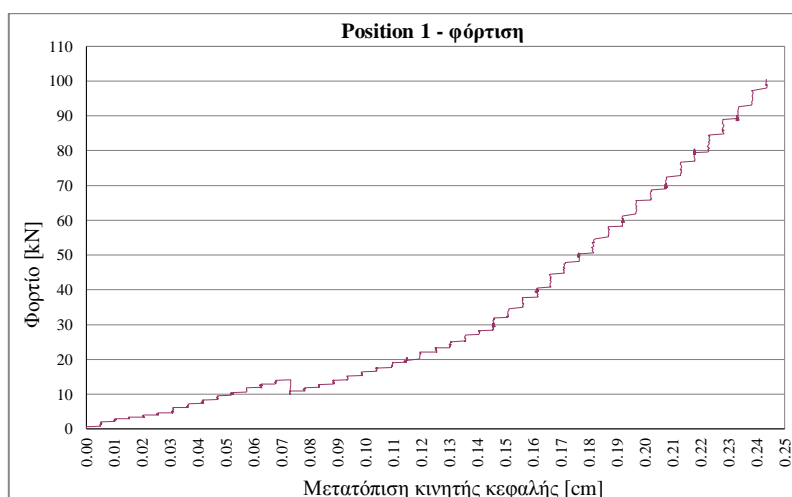
- Η τιμή του βελομέτρου 4, το οποίο τοποθετήθηκε οριζόντια στην επάνω εξωτερική παρειά του σώματος του τροχού παρουσιάζει σταδιακή αύξηση για τιμές φόρτισης έως 40kN και ακολούθως παραμένει σταθερή μέχρι τα 100kN.

9.3 Επεξεργασία των στοιχείων του καταγραφέα δεδομένων της πρέσσας

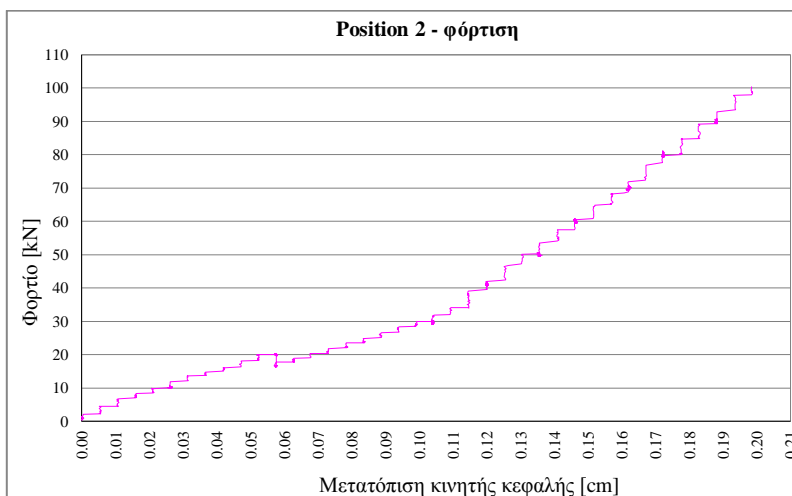
Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο καταγραφέας δεδομένων της πρέσσας κατέγραφε καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης ανά ένα δευτερόλεπτο την ηλεκτρική τάση της μηχανής σε Volt και την αντίστοιχη μετατόπιση του μηχανισμού κινητής κεφαλής σε mm. Η μετατροπή της τάσης της μηχανής σε kN φορτίου έγινε ως εξής:

- Η μέγιστη τάση στην έξοδο της μηχανής είναι 10V και το μέγιστο φορτίο που ορίστηκε στο πείραμα ήταν 150kN (τιμές αναφοράς).
- Επομένως τα 10V της μηχανής αντιστοιχούν σε 150kN φορτίου.
- Με απλή μέθοδο των τριών ανάγονται τα Volt της μηχανής σε κάθε δευτερόλεπτο σε kN φορτίου.
- Στην τιμή του φορτίου που προκύπτει από την αναγωγή προστίθεται το φορτίο της προφόρτισης, ήτοι 0,4kN για τις θέσεις Position 1, 2 και 4 και 0,3kN για τις θέσεις Position 3 και 5.

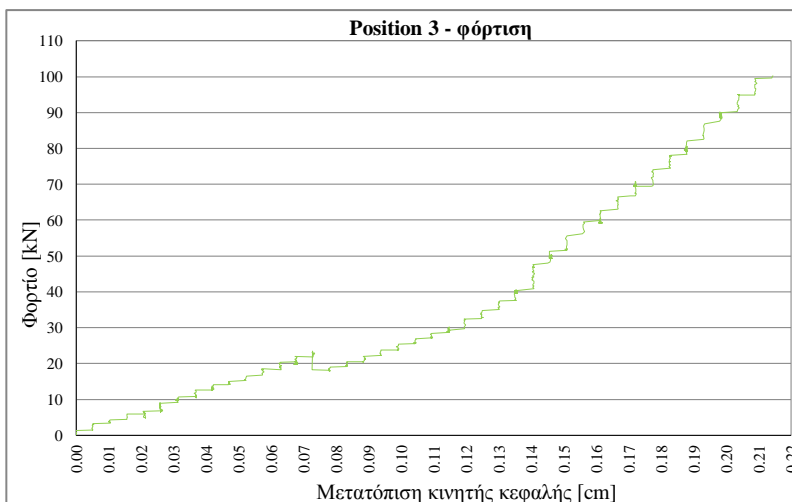
Για την περίπτωση της φόρτισης σε κάθε θέση η σχέση φορτίου-μετατόπισης μηχανισμού κινητής κεφαλής πρέσσας δίδεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



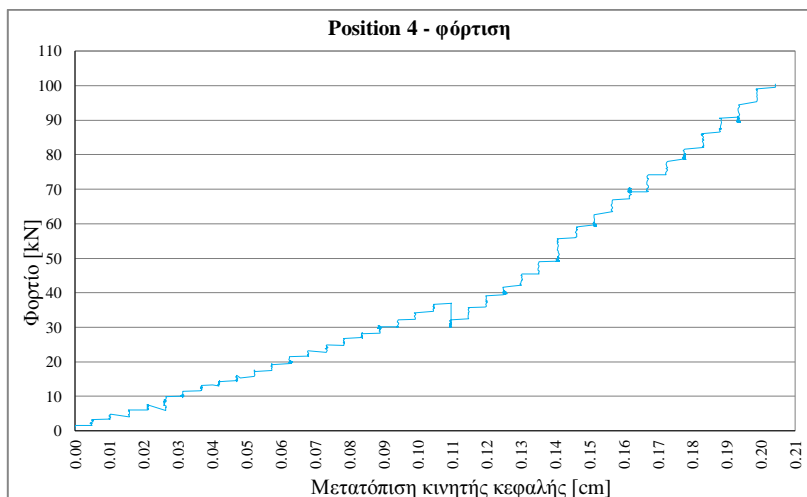
Διάγραμμα 9.8: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - 'Position 1'



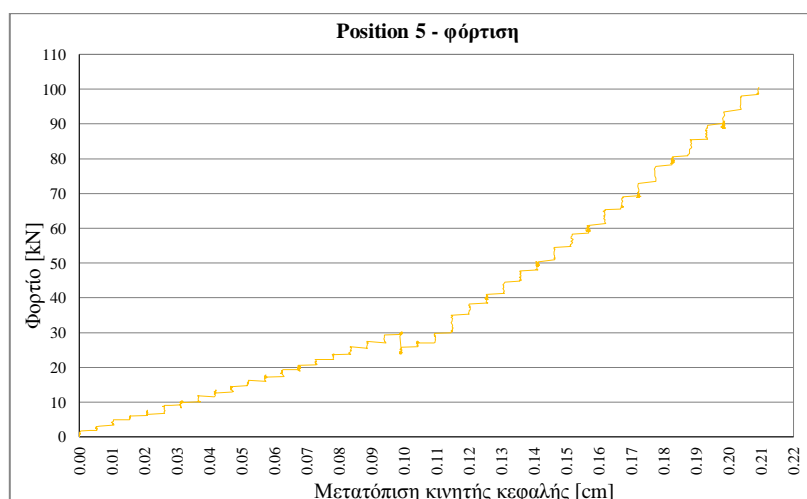
Διάγραμμα 9.9: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - 'Position 2'



Διάγραμμα 9.10: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - 'Position 3'



Διάγραμμα 9.11: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 4’



Διάγραμμα 9.12: Μετατόπιση κινητής κεφαλής συναρτήσει του φορτίου - ‘Position 5’

Σε κάθε ένα από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει μια θέση απότομης απώλειας φορτίου της πρέσσας και σταδιακής επανάκτησής του. Κατά την πειραματική διαδικασία αυτές οι χρονικές στιγμές γίνονταν αισθητές λόγω μιας αιφνίδιας στιγμιαίας κίνησης του τροχού, που συνοδευόταν από έναν απότομο ήχο και από τα διαγράμματα φαίνεται ότι κυμαίνονται μεταξύ 15kN και 37kN, ανάλογα με τη θέση (position).

ΜΕΡΟΣ Δ΄

ΚΕΦ.10 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς με βάση τα εξαγόμενα πειραματικά αποτελέσματα. Οι τιμές της διείσδυσης ανά θέση και φορτίο συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες, οι οποίες προκύπτουν στην περίπτωση στατικής φόρτισης και για κωνική διατομή τροχού. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενων τιμών δεν ξεπερνά το 5% και εμφανίζεται για τιμές φορτίου έως 30kN, γεγονός που δικαιολογείται δεδομένης της ασταθούς συμπεριφοράς του τροχού στα πρώτα στάδια της φόρτισης, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου υπολογίζονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Οι υπολογισμοί αφορούν στις ορθές τάσεις δεδομένου ότι το φορτίο δρα κατακόρυφα στο σημείο επαφής και η επιφάνεια που δημιουργείται είναι παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο. Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται σύμφωνα με τη γενική θεωρία επαφής δύο σωμάτων που αναπτύχθηκε από τον Hertz. Τα αποτελέσματα για κάθε σχετική θέση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς συγκρίθηκαν με τις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στην περίπτωση ελλειπτικής επιφάνειας επαφής, καθώς και με τις μέγιστες τάσεις που προκύπτουν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων NON-HERTZ, που οδηγεί σε μη-ελλειπτικές επιφάνειες.

10.1 Υπολογισμός διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς

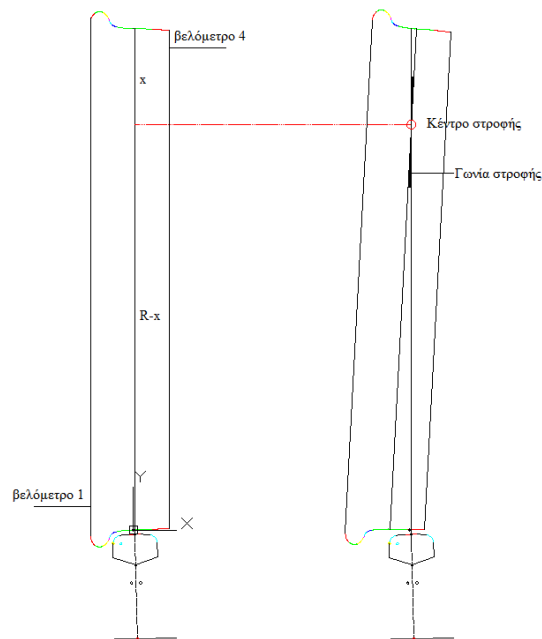
Ο υπολογισμός της τιμής της διείσδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς προέκυψε, για κάθε τιμή φορτίου και θέση, από τα αποτελέσματα του μετρητικού συστήματος των καμερών.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η τιμή της μετατόπισης ως προς y του τροχού, από την οποία αφαιρέθηκε:

- η τιμή της μετατόπισης y της σιδηροτροχιάς, δεδομένου ότι περιέχεται στην καταγεγραμμένη από τις κάμερες μετατόπιση y του τροχού και
- η τιμή της κατακόρυφης ολίσθησης («γλίστρημα») του τροχού, που εμφανίστηκε λόγω στροφής του ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

Σε αφόρτιστη κατάσταση ο τροχός ακουμπά επί της σιδηροτροχιάς στα σημεία επαφής, όπως αυτά υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 6. Με την έναρξη επιβολής φορτίου και

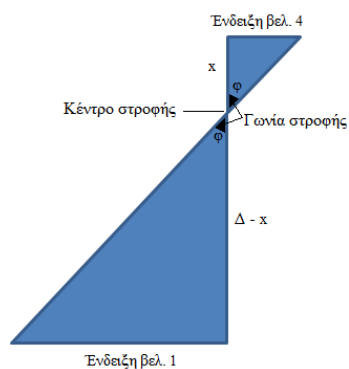
σύμφωνα με τις ενδείξεις των βελομέτρων 1 και 4 (Εικ. 9.12) φαίνεται ότι ο τροχός παρουσιάζει στροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα (Σχ. 10.1).



Σχήμα 10.1: Στροφή τροχού ως προς τον κατακόρυφο άξονα

Ο υπολογισμός της γωνίας στροφής γίνεται ως ακολούθως:

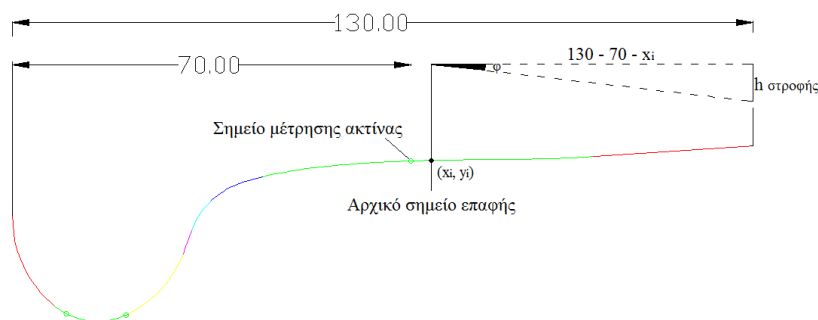
- Υπολογίζεται η ακτίνα R του τροχού στο αρχικό σημείο επαφής και κατ' επέκταση η διάμετρος (Δ).
- Υπολογίζεται το κέντρο στροφής με βάση τα όμοια τρίγωνα που σχηματίζονται (Σχ. 10.2).



Σχήμα 10.2: Όμοια τρίγωνα ως προς το κέντρο στροφής

- Υπολογίζεται η εφαπτομένη της γωνίας στροφής και κατ' επέκταση η γωνία σε μοίρες.

Με τον υπολογισμό της γωνίας στροφής μπορεί να υπολογισθεί και η κατακόρυφη ολίσθηση (γλίστρημα) του τροχού ως προς y , λόγω της στροφής του ($h_{\text{στροφής}}$) (Σχ. 10.3).



Σχήμα 10.3: Υπολογισμός $h_{\sigma\tau\rho\phi\acute{\eta}\varsigma}$

Τελικά, με την παραδοχή ότι τα μέταλλα είναι όμοια, η τιμή της διείδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, για κάθε τιμή φορτίου και θέση, προέκυψε ως:

$$\delta = \frac{y_{\text{τροχού}} - h_{\sigma\tau\rho\phi\acute{\eta}\varsigma} - y_{\text{σιδ/γιάς}}}{2} \quad (10.1)$$

Position 1 (εγκάρσια μετατόπιση τροχού 0mm)

Αρχική θέση επαφής στο σημείο με συντεταγμένες $(x_1, y_1) = (3.5, 0.09957)$ (Πιν. 6.2).

Ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής $R = 412.4004\text{mm}$ και διάμετρος $\Delta = 824.8008\text{mm}$.

Πίνακας 10.1: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 1'

Φορτίο (kN)	Ενδείξεις βελομέτρων		Όμοια τρίγωνα		tgφ	φ°	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	βελ.1(mm)	βελ.4(mm)	x (mm)	Δ - x (mm)							
100	4.94	1.14	158.295	666.506	0.0072	0.4126	0.406898247	0.82520266	0.1875040	0.230800413	0.11540
90	4.71	1.14	164.671	660.130	0.0069	0.3966	0.391142928	0.78452170	0.1757170	0.217661772	0.10883
80	4.51	1.14	170.648	654.152	0.0067	0.3828	0.377442650	0.74493089	0.1623890	0.20509924	0.10255
70	4.30	1.14	177.410	647.391	0.0064	0.3682	0.363057359	0.70261050	0.1486330	0.190920141	0.09546
60	4.04	1.14	186.562	638.239	0.0061	0.3501	0.345246998	0.65151204	0.1328720	0.173393042	0.08670
50	3.79	1.14	196.299	628.502	0.0058	0.3327	0.328121651	0.59784860	0.1168200	0.152906949	0.07645
40	3.52	1.14	208.025	616.776	0.0055	0.3140	0.309626276	0.54348473	0.1002390	0.133619454	0.06681
30	3.20	1.12	219.947	604.854	0.0051	0.2918	0.291755529	0.47598713	0.0716520	0.112579601	0.05629
20	2.40	0.93	225.607	599.194	0.0041	0.2362	0.232904721	0.32844882	0.0384283	0.057115805	0.02856
10	0.13	0.53	386.853	437.947	0.0014	0.0785	0.077406569	0.11664429	0.0217180	0.017519721	0.00876

Position 2 (εγκάρσια μετατόπιση τροχού +1mm)

Αρχική θέση επαφής στο σημείο με συντεταγμένες $(x_2, y_2) = (-9.0, -0.45092)$ (Πιν. 6.2).

Ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής $R = 412.9509\text{mm}$ και διάμετρος $\Delta = 825.9018\text{mm}$.

Πίνακας 10.2: Υπολογισμός διείδυσης στη θέση 'Position 2'

Φορτίο (kN)	Ενδείξεις βελομέτρων		Όμοια τρίγωνα		tgφ	φ°	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	βελ.1(mm)	βελ.4(mm)	x (mm)	Δ - x (mm)							
100	4.57	0.52	77.104	748.798	0.0067	0.3864	0.46534588	0.85930391	0.1663013	0.227656727	0.11383
90	4.38	0.52	79.827	746.075	0.0065	0.3732	0.449472322	0.81028880	0.1522742	0.208542247	0.10427
80	4.09	0.52	84.375	741.527	0.0062	0.3531	0.425244260	0.75792082	0.1395785	0.193098086	0.09655
70	3.90	0.52	87.647	738.255	0.0059	0.3399	0.409370702	0.70392899	0.1276411	0.166917154	0.08346
60	3.60	0.52	93.363	732.539	0.0056	0.3191	0.38430719	0.65370127	0.1101869	0.159207183	0.07960
50	3.33	0.52	99.185	726.717	0.0052	0.3004	0.361750029	0.59344443	0.0972056	0.134488842	0.06724
40	3.07	0.52	105.521	720.381	0.0049	0.2823	0.340028318	0.53402622	0.0833956	0.110602319	0.05530
30	2.43	0.41	98.723	727.179	0.0042	0.2380	0.237950073	0.44594124	0.0624846	0.145506533	0.07275
20	0.16	0.25	177.996	647.906	0.0014	0.0805	0.096912248	0.16986127	0.0323015	0.040647513	0.02032
10	0.10	0	0.000	825.902	0.0001	0.0069	0.008354504	0.06840795	0.0219426	0.038110862	0.01906

Position 3 (εγκάρσια μετατόπιση τροχού +2mm)

Αρχική θέση επαφής στο σημείο με συντεταγμένες $(x_3, y_3) = (-10.5, -0.5606)$ (Πιν. 6.2).

Ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής $R = 413.0606\text{mm}$ και διάμετρος $\Delta = 826.1212\text{mm}$.

Πίνακας 10.3: Υπολογισμός διείσδυσης στη θέση 'Position 3'

Φορτίο (kN)	Ενδείξεις βελομέτρων		Όμοια τρίγωνα		tgφ	φ°	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	βελ.1(mm)	βελ.4(mm)	x (mm)	Δ - x (mm)			h _{επικοινωνίας} (mm)	Υ _{τροχού} (mm)	Υ _{σπιδ/γιάς} (mm)	(2) - (1) - (3)	δ = (4) / 2
100	4.49	0.61	91.791	734.330	0.0066	0.3808	0.468508737	0.91760246	0.2122320	0.236861723	0.11843
90	4.24	0.61	96.171	729.951	0.0063	0.3634	0.447174095	0.86057482	0.1975180	0.215882725	0.10794
80	4.04	0.61	99.987	726.134	0.0061	0.3495	0.430106381	0.82207170	0.1865260	0.205439319	0.10272
70	3.79	0.61	105.205	720.916	0.0058	0.3322	0.40877174	0.76343310	0.1743910	0.18027036	0.09014
60	3.51	0.61	111.737	714.384	0.0055	0.3128	0.384876941	0.70252200	0.1572540	0.160391059	0.08020
50	3.24	0.61	118.852	707.269	0.0051	0.2941	0.361835527	0.63413550	0.1359570	0.136342973	0.06817
40	2.93	0.61	128.227	697.894	0.0048	0.2726	0.335380571	0.56383020	0.1186800	0.109769629	0.05488
30	2.39	0.48	116.973	709.148	0.0041	0.2351	0.289297745	0.48899065	0.0930630	0.106629905	0.05331
20	0.15	0.29	208.326	617.795	0.0014	0.0798	0.098139353	0.18530600	0.0459670	0.041199647	0.02060
10	0.08	0.05	38.246	826.121	0.0001	0.0749	0.092165653	0.11247340	0.0166373	0.00367049	0.00184

Position 4 (εγκάρσια μετατόπιση τροχού +3mm)

Αρχική θέση επαφής στο σημείο με συντεταγμένες $(x_4, y_4) = (-12.5, -0.7259)$ (Πιν. 6.2).

Ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής $R = 413.2259\text{mm}$ και διάμετρος $\Delta = 826.4518\text{mm}$.

Πίνακας 10.4: Υπολογισμός διείσδυσης στη θέση 'Position 4'

Φορτίο (kN)	Ενδείξεις βελομέτρων		Όμοια τρίγωνα		tgφ	φ°	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	βελ.1(mm)	βελ.4(mm)	x (mm)	Δ - x (mm)			h _{επικοινωνίας} (mm)	Υ _{τροχού} (mm)	Υ _{σπιδ/γιάς} (mm)	(2) - (1) - (3)	δ = (4) / 2
100	3.19	0.8	157.795	668.657	0.0051	0.2905	0.367565295	0.76055691	0.1703248	0.222666846	0.11133
90	2.96	0.8	166.960	659.492	0.0048	0.2745	0.34738868	0.71948050	0.1622911	0.209800703	0.10490
80	2.66	0.8	180.645	645.807	0.0044	0.2537	0.321071356	0.65926544	0.1429374	0.195256727	0.09763
70	2.42	0.8	193.322	633.130	0.0041	0.2371	0.300017496	0.61167776	0.1320067	0.179653565	0.08983
60	2.11	0.8	212.592	613.860	0.0038	0.2156	0.272822928	0.55567384	0.1189038	0.163947092	0.08197
50	1.79	0.8	236.975	589.476	0.0034	0.1934	0.244751116	0.49074853	0.1020959	0.143901486	0.07195
40	1.44	0.8	270.968	555.484	0.0030	0.1692	0.214047571	0.42735009	0.0890775	0.124225062	0.06211
30	0.21	0.56	382.490	443.962	0.0015	0.0839	0.106146541	0.25956828	0.0428735	0.11054819	0.05527
20	0.15	0.3	215.596	610.856	0.0014	0.0797	0.100883076	0.17837922	0.0288692	0.048626905	0.02431
10	0.08	0.01	7.652	826.452	0.0001	0.0749	0.094742367	0.11528660	0.0149735	0.005570701	0.00279

Position 5 (εγκάρσια μετατόπιση τροχού +4mm)

Αρχική θέση επαφής στο σημείο με συντεταγμένες $(x_5, y_5) = (-14.5, -0.9157)$ (Πιν. 6.2).

Ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής $R = 413.4157\text{mm}$ και διάμετρος $\Delta = 826.8314\text{mm}$.

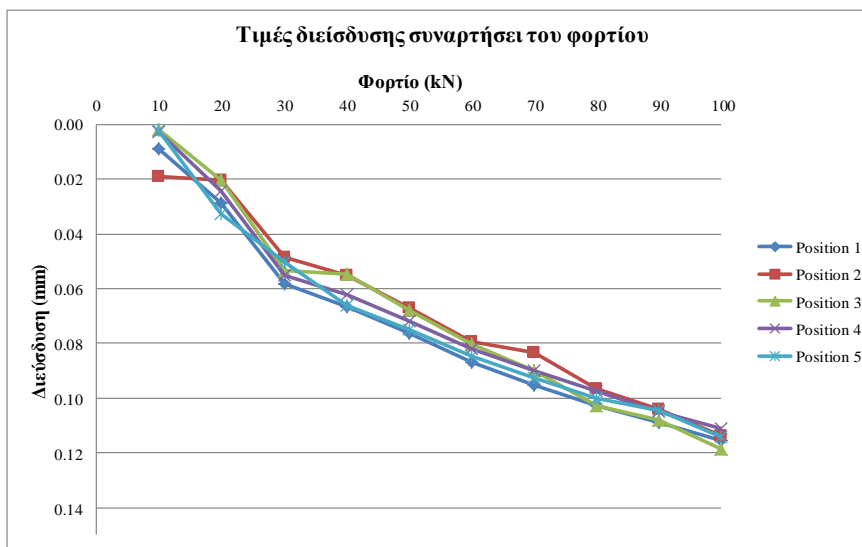
Πίνακας 10.5: Υπολογισμός διείσδυσης στη θέση 'Position 5'

Φορτίο (kN)	Ενδείξεις βελομέτρων		Όμοια τρίγωνα		tgφ	φ°	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	βελ.1(mm)	βελ.4(mm)	x (mm)	Δ - x (mm)			h _{επικοινωνίας} (mm)	Υ _{τροχού} (mm)	Υ _{σπιδ/γιάς} (mm)	(2) - (1) - (3)	δ = (4) / 2
100	3.31	0.9	172.656	654.175	0.0052	0.2987	0.388343984	0.77183557	0.1551706	0.228320977	0.11416
90	3.16	0.9	178.882	647.950	0.0050	0.2883	0.374828532	0.72815585	0.1440059	0.209321416	0.10466
80	2.85	0.9	193.285	633.546	0.0047	0.2668	0.346896598	0.67307595	0.1255678	0.200611567	0.10031
70	2.61	0.9	206.135	620.696	0.0044	0.2502	0.325271875	0.62590036	0.1153505	0.185278025	0.09264
60	2.30	0.9	225.499	601.332	0.0040	0.2287	0.297339941	0.56980228	0.1030953	0.169366992	0.08468
50	1.98	0.9	249.714	577.117	0.0036	0.2065	0.268506977	0.50439728	0.0859079	0.149982396	0.07499
40	1.63	0.9	282.946	543.885	0.0032	0.1822	0.236970923	0.44250390	0.0733255	0.132207453	0.06610
30	0.25	0.9	595.319	231.513	0.0015	0.0866	0.112628766	0.24889028	0.0355598	0.100701758	0.05035
20	0.17	0.65	459.351	367.481	0.0014	0.0811	0.105420525	0.19769054	0.0272020	0.065068031	0.03253
10	0.09	0.32	242.739	826.831	0.0001	0.0755	0.098212284	0.11639670	0.0139214	0.004262983	0.00213

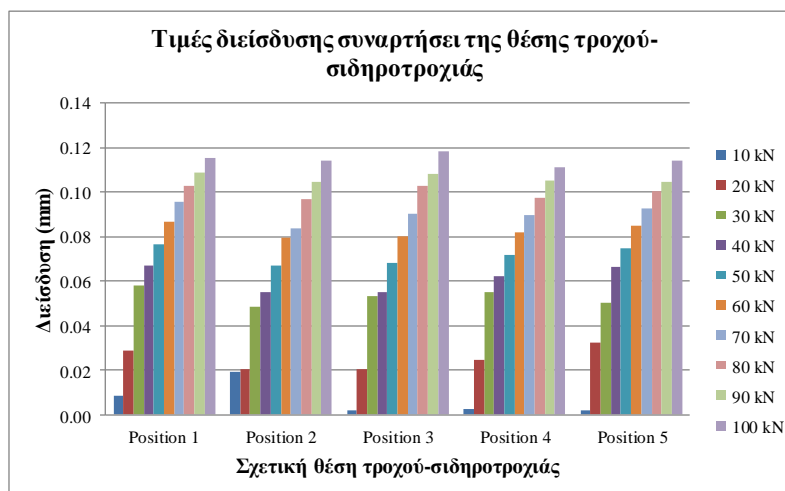
Συγκεντρωτικά οι τιμές της διείδυσης ανά θέση και φορτίο παρουσιάζονται στον πίνακα (Πιν. 10.6) και στα διαγράμματα (Διάγρ. 10.1 και 10.2) που ακολουθούν.

Πίνακας 10.6: Τιμές διείδυσης ανά θέση και φορτίο

Φορτίο (kN)	Διείδυση δ (mm)				
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
10	0.0087599	0.0190554	0.0018352	0.0027854	0.0021315
20	0.0285579	0.0203238	0.0205998	0.0243135	0.0325340
30	0.0583146	0.0484486	0.0533150	0.0552741	0.0503509
40	0.0668097	0.0553012	0.0548848	0.0621125	0.0661037
50	0.0764535	0.0672444	0.0681715	0.0719507	0.0749912
60	0.0866965	0.0796036	0.0801955	0.0819735	0.0846835
70	0.0954601	0.0834586	0.0901352	0.0898268	0.0926390
80	0.1025496	0.0965490	0.1027197	0.0976284	0.1003058
90	0.1088309	0.1042711	0.1079414	0.1049004	0.1046607
100	0.1154002	0.1138284	0.1184309	0.1113334	0.1141605



Διάγραμμα 10.1: Τιμές διείδυσης συναρτήσει της τιμής φορτίου



Διάγραμμα 10.2: Τιμές διείδυσης στις σχετικές θέσεις τροχού-σιδηροτροχιάς ανά φορτίο

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία[51, 59], προκειμένου να διερευνηθεί η γεωμετρία επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς, η διείσδυση (δ) μπορεί να υπολογισθεί θεωρητικά στην περίπτωση στατικής φόρτισης (N-στατικό φορτίο τροχού) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\delta = G * (N)^{2/3} \quad (10.2)$$

όπου G σταθερά, που εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες και καμπυλότητες του τροχού.

$$\text{Για κωνική διατομή τροχού: } G = 4.57 * R^{-0.149} * 10^{-8} (m / N^{2/3}) \quad (10.3)$$

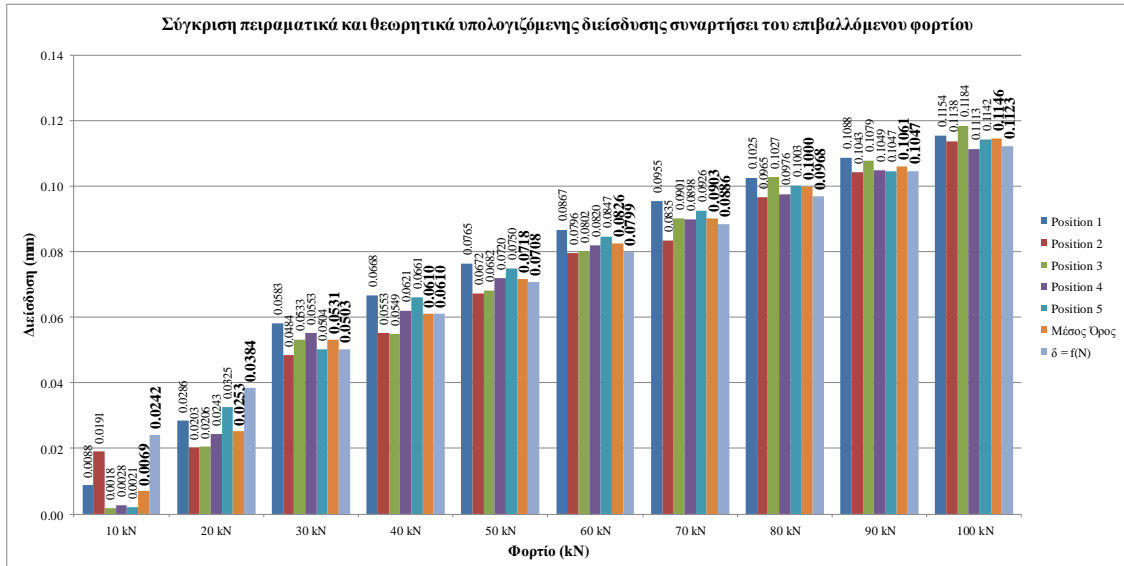
$$\text{Για κοίλη διατομή τροχού: } G = 3.68 * R^{-0.115} * 10^{-8} (m / N^{2/3}) \quad (10.4)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων (10.2) και (10.3) και θεωρώντας ως ακτίνα τροχού την κύρια ακτίνα κύλισης του πειραματικού τροχού ($R = 412.5mm$), οδηγεί στα αποτελέσματα του Πίνακα 10.7 για τις τιμές της διείσδυσης.

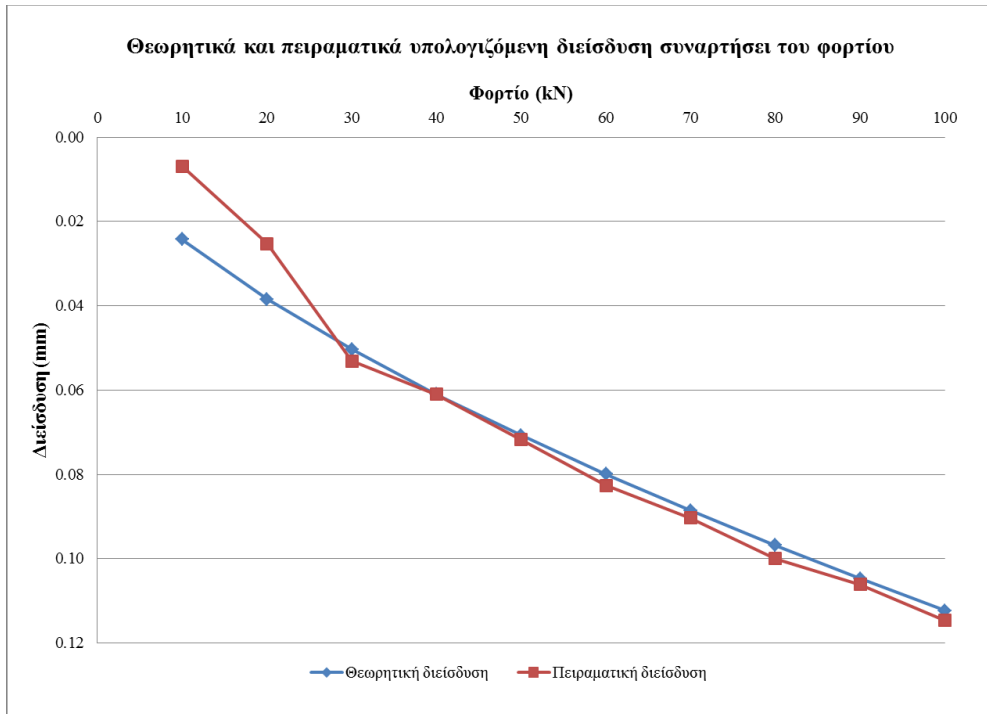
Πίνακας 10.7: Θεωρητικές τιμές διείσδυσης ανά φορτίο

R (m)	G (m/N^{2/3})	N (Nt)	δ (m)	δ (mm)
0.4125	5.21456E-08	10000	2.4204E-05	0.0242
0.4125	5.21456E-08	20000	3.8421E-05	0.03842
0.4125	5.21456E-08	30000	5.0346E-05	0.05035
0.4125	5.21456E-08	40000	6.099E-05	0.060990
0.4125	5.21456E-08	50000	7.0773E-05	0.07077
0.4125	5.21456E-08	60000	7.9919E-05	0.07992
0.4125	5.21456E-08	70000	8.8569E-05	0.08857
0.4125	5.21456E-08	80000	9.6815E-05	0.09682
0.4125	5.21456E-08	90000	0.00010472	0.10472
0.4125	5.21456E-08	100000	0.00011234	0.11234

Στα ραβδογράμματα του Διαγράμματος 10.3 παρουσιάζονται για κάθε τιμή φορτίου οι πειραματικά υπολογιζόμενες τιμές διείσδυσης, ο μέσος όρος αυτών και η θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές διείσδυσης του Πίνακα 10.7.



Διάγραμμα 10.3: Σύγκριση θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενης διείσδυσης ανά θέση και φορτίο. Στο Διάγραμμα 10.4 απεικονίζεται η σύγκριση της θεωρητικά υπολογιζόμενης διείσδυσης και της μέσης τιμής ανά φορτίο της πειραματικά υπολογιζόμενης διείσδυσης.



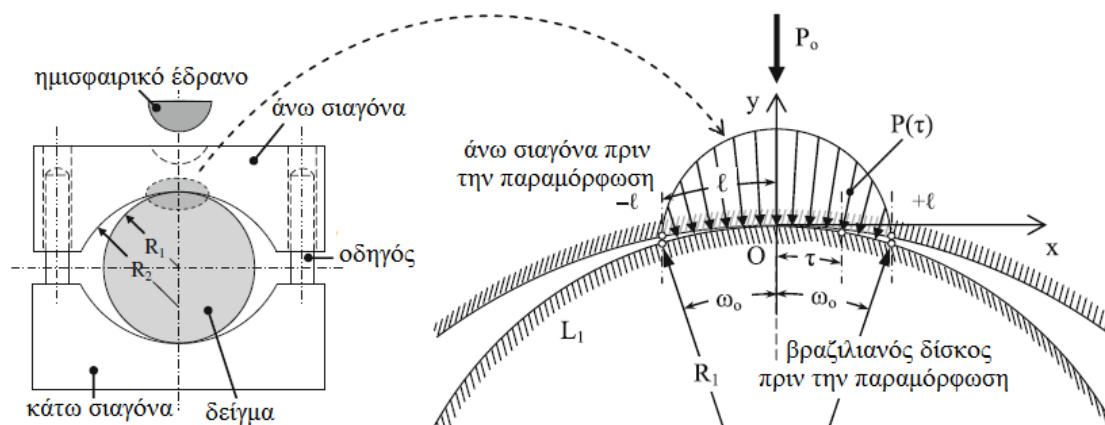
Διάγραμμα 10.4: Σύγκριση θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενης διείσδυσης (μέση τιμή). Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι για φόρτιση άνω των 30kN υπάρχει σύγκλιση μεταξύ θεωρητικά και πειραματικά υπολογιζόμενης διείσδυσης, δεδομένου ότι το μέγιστο σφάλμα είναι της τάξης του 5%. Η απόκλιση που εμφανίζεται στην περίπτωση επιβαλλόμενου φορτίου έως 30kN οφείλεται στην ασταθή συμπεριφορά του

τροχού, η οποία επισημάνθηκε κατ' αρχήν κατά τη διάρκεια του διεξαγωγής του πειράματος και επιβεβαιώθηκε κατόπιν από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

10.2 Υπολογισμός αναπτυσσόμενων τάσεων στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς

Για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς θεωρείται ότι το φορτίο δρα στατικά, κατακόρυφα στο σημείο επαφής και η δημιουργηθείσα επιφάνεια επαφής είναι παράλληλη στο οριζόντιο επίπεδο. Ως εκ τούτου υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες μέγιστες ορθές τάσεις που εμφανίζονται στην υπολογισθείσα επιφάνεια. Τα υλικά θεωρούνται όμοια, ομοιογενή και ισότροπα με μέτρο ελαστικότητας $E_1 = E_2 = E = 210000 \text{ N/mm}^2$ και αναλογία Poisson $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 0.3$.

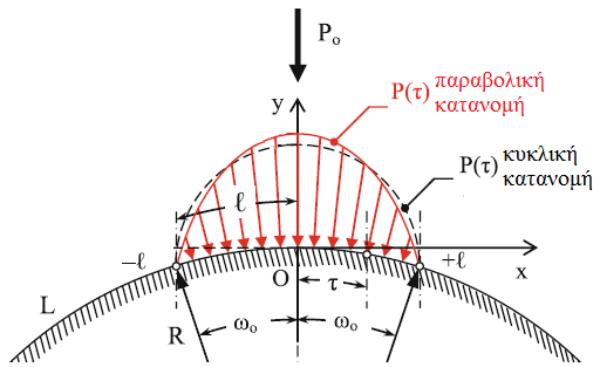
Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θεωρείται ότι το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια επαφής. Στην πραγματικότητα, στο παρόμοιας γεωμετρίας πρόβλημα της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης¹ (βραζιλιανή δοκιμή) φαίνεται ότι η κατανομή του φορτίου είναι μη ομοιόμορφη και για την ακρίβεια κυκλική (Σχ. 10.4).



Σχήμα 10.4: Κατακόρυφη τομή της συσκευής βραζιλιανής δοκιμής και πραγματική (κυκλική) κατανομή του φορτίου κατά μήκος του μήκους επαφής [60, 61]

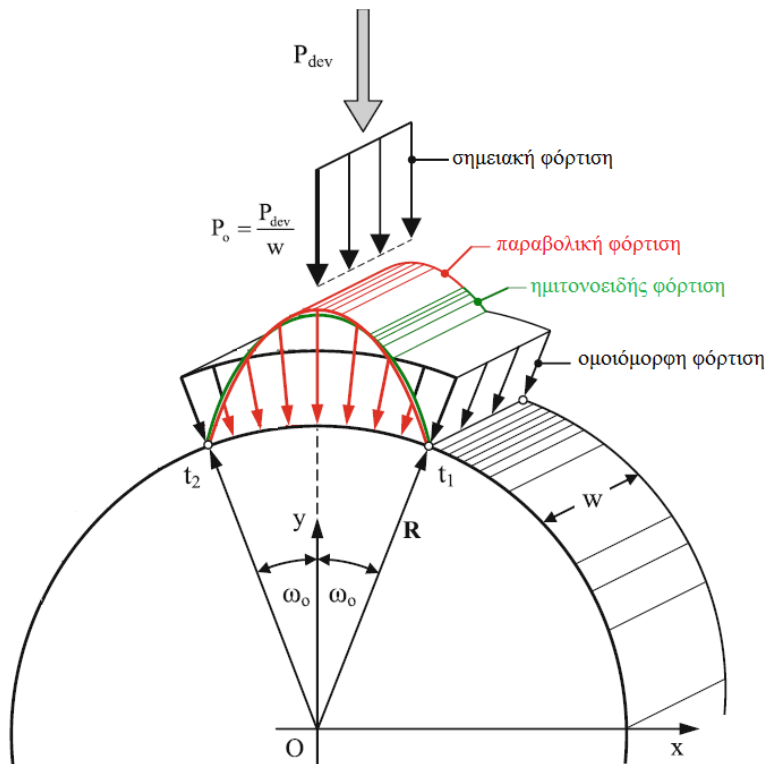
Δεδομένου όμως ότι μια τέτοιου είδους κατανομή δεν οδηγεί σε επίλυση κλειστού τύπου, υιοθετείται μια ισοδύναμη επίσης μη ομοιόμορφη παραβολικού τύπου κατανομή (Σχ. 10.5) [61].

¹ Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης ή βραζιλιανή δοκιμή: Με την εν λόγω δοκιμή επιτυγχάνεται έμμεσα η μέτρηση της αντοχής ενός πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η διάταξη περιλαμβάνει έναν δακτύλιο προσαρμογής δοκιμίου, αποτελούμενο από δύο σιαγόνες φόρτισης, σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εφάπτονται στο μορφής δίσκου δοκίμιο πετρώματος, σε δύο αντιδιαμετρικά αντίθετες επιφάνειες κατά ένα μήκος τόξου L .



Σχήμα 10.5: Αντιπαράθεση της πραγματικής (κυκλικής) κατανομής του φορτίου και της ισοδύναμης παραβολικής [61]

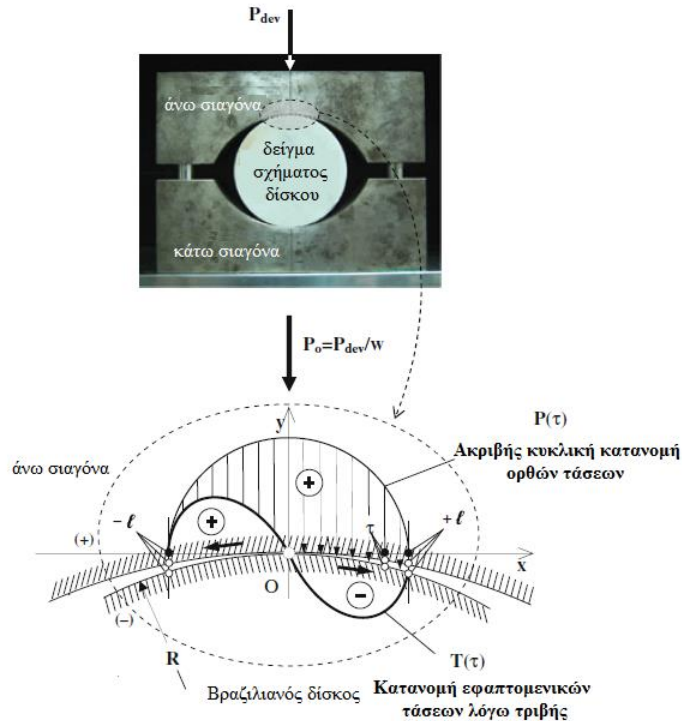
Η αναλυτική διερεύνηση εκτός της παραβολικής κατανομής περιελάμβανε τρεις επιπλέον τρόπους φόρτισης: τη σημειακή φόρτιση, την ημιτονοειδή κατανομή και την ομοιόμορφη κατανομή (Σχ. 10.6).



Σχήμα 10.6: Σχηματική απεικόνιση των τύπων φόρτισης του δίσκου [61]

Οι ακτινικές τάσεις, οι οποίες υπολογίσθηκαν από την ανωτέρω εργαστηριακή δοκιμή για όλους τους τύπους φόρτισης οδήγησαν σε αποτελέσματα που στο μεγαλύτερο μέρος του μήκους του τόξου επαφής εμφανίζουν αμελητέες διαφορές [61]. Ως εκ τούτου οι τάσεις, οι οποίες υπολογίζονται στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς οδηγούν σε αποδεκτά αποτελέσματα στην περίπτωση υπόθεσης ομοιόμορφης κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου.

Εξ' αιτίας της παραμόρφωσης αναπτύσσονται αναπόφευκτα και εφαπτομενικές τάσεις λόγω τριβής, οι οποίες αλλοιώνουν το τασικό πεδίο. Οι εν λόγω τάσεις μελετήθηκαν αναλυτικά στην περίπτωση του βραζιλιανού δίσκου και η κατανομή τους κατά μήκος του τόξου επαφής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχ. 10.7).



Σχήμα 10.7: Σχηματική απεικόνιση των ορθών τάσεων και των εφαπτομενικών τάσεων λόγω τριβής κατά μήκος του τόξου επαφής [62]

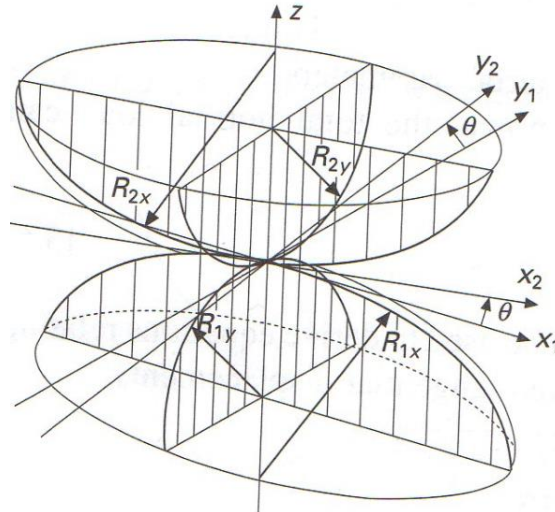
Συμπερασματικά προέκυψε ότι μόνο για συντελεστή τριβής της τάξης της μονάδας υπάρχει λόγος να ληφθούν υπόψη οι τάσεις λόγω τριβής [62] και δεδομένου ότι ο συντελεστής τριβής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς κυμαίνεται σε ξηρές συνθήκες μεταξύ 0.30-0.35 οι εν λόγω τάσεις δεν υπολογίσθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Σύμφωνα με τον Hertz στην ελλειπτική επιφάνεια επαφής, η οποία δημιουργείται στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς αναπτύσσεται ορθή τάση, η κατανομή της οποίας σε τομή έχει τη μορφή ημι-έλλειψης και μέγιστη τιμή που δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4, 63]:

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Q}{\pi ab} \quad (10.5)$$

όπου Q το επιβαλλόμενο φορτίο και a, b οι ημιάξονες της έλλειψης.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες εξισώσεις στη μηχανική της επαφής εκφράστηκαν από τον Hertz και έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις επαφής λείων στερεών σωμάτων υπό κατακόρυφο φορτίο, απουσία τριβής. Στην περιορισμένη περιοχή που περικλείει το σημείο επαφής οι διατομές των δύο σωμάτων μπορούν να περιγραφούν με πολυώνυμα 2^{ης} τάξης. Η γενική περίπτωση επαφής σύμφωνα με τον Hertz [5, 63] παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.8.



Σχήμα 10.8: Επαφή δύο στερεών σύμφωνα με τον Hertz (γενική περίπτωση) [5]

Τα δύο σώματα αρχικά ακουμπούν σε ένα σημείο, το οποίο καθορίζει τη δημιουργία δύο ορθογωνικών συστημάτων συντεταγμένων με κοινό κατακόρυφο άξονα z. Οι διευθύνσεις x και y ταυτίζονται με την κύρια ακτίνα κάθε σώματος. Έτσι, η γεωμετρία του κάθε σώματος περιγράφεται από αντίστοιχες τις ακτίνες καμπυλότητας στο σημείο επαφής και τη γωνία θ. Στην περίπτωση ύπαρξης κοίλων ακτίνων, αυτές καθορίζονται με αρνητικό πρόσημο [5].

Στη γενικευμένη περίπτωση επαφής του Hertz η μέγιστη ορθή τάση δίνεται από την εξίσωση [64]:

$$\sigma_{o,\max} = \left(\frac{6QE^*}{\pi^3 R_e^2} \right)^{1/3} \quad (10.6)$$

όπου E* το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας και R_e η ισοδύναμη ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο επαφής.

Το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας δίνεται από της εξίσωση:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (10.7)$$

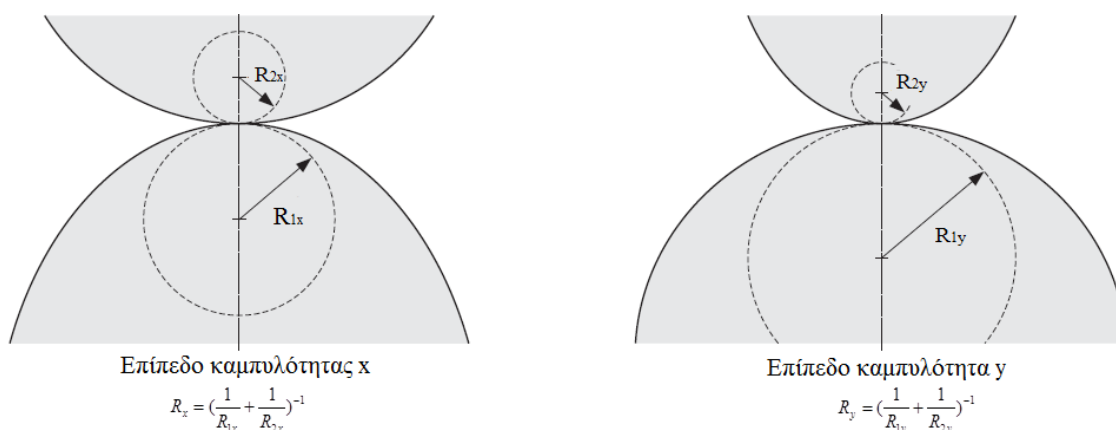
και για το συγκεκριμένο παράδειγμα υπολογισμού $E^* = 115.385 \text{ N/mm}^2$.

Η ισοδύναμη ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο επαφής δίνεται από τη σχέση (Σχ. 10.8):

$$R_e = \sqrt{R_x R_y} \quad (10.8)$$

$$\text{όπου } R_x = \left(\frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}} \right)^{-1} \quad (10.9)$$

$$\text{και } R_y = \left(\frac{1}{R_{1y}} + \frac{1}{R_{2y}} \right)^{-1} \quad (10.10)$$



Σχήμα 10.9: Ακτίνες καμπυλότητας στα επίπεδα καμπυλότητας x και y

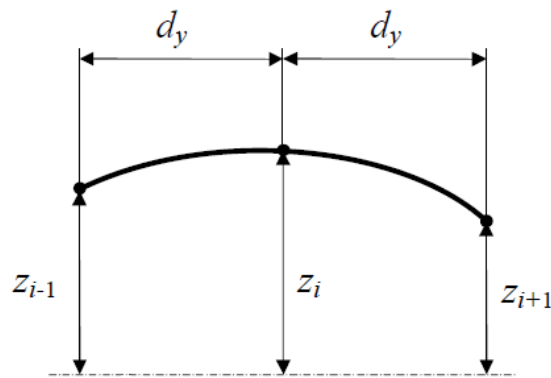
Στην περίπτωση της επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς οι ακτίνες καμπυλότητας στα σημεία επαφής προκύπτουν ως εξής:

- Ακτίνα καμπυλότητας σιδηροτροχιάς στο επίπεδο x, R_{1x} : Ισούται με άπειρο.
- Ακτίνα καμπυλότητας σιδηροτροχιάς στο επίπεδο y, R_{1y} : Προσδιορίζεται από τη θέση του σημείου επαφής επί της σιδηροτροχιάς για κάθε τιμή της εγκάρσιας μετατόπισης και ισούται με $R_{1y}=300\text{mm}$ για εγκάρσια μετατόπιση του τροχού από $y=-5\text{mm}$ έως $y=0\text{mm}$ και $R_{1y}=80\text{mm}$ για εγκάρσια μετατόπιση του τροχού από $y=+1\text{mm}$ έως $y=+5\text{mm}$.
- Ακτίνα καμπυλότητας τροχού στο επίπεδο x, R_{2x} : Προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες του σημείου επαφής του τροχού για κάθε τιμή της εγκάρσιας μετατόπισης και υπολογίζεται με βάση την πολυωνυμική σχέση που περιγράφει τη διατομή του τροχού στο δεδομένο σημείο. Η κύρια ακτίνα κύλισης είναι 420mm .

- Ακτίνα καμπυλότητας τροχού στο επίπεδο y , R_{2y} : Προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες του σημείου επαφής και των εκατέρωθεν αυτού σημείων σε απόσταση dy σύμφωνα με τη σχέση [57]:

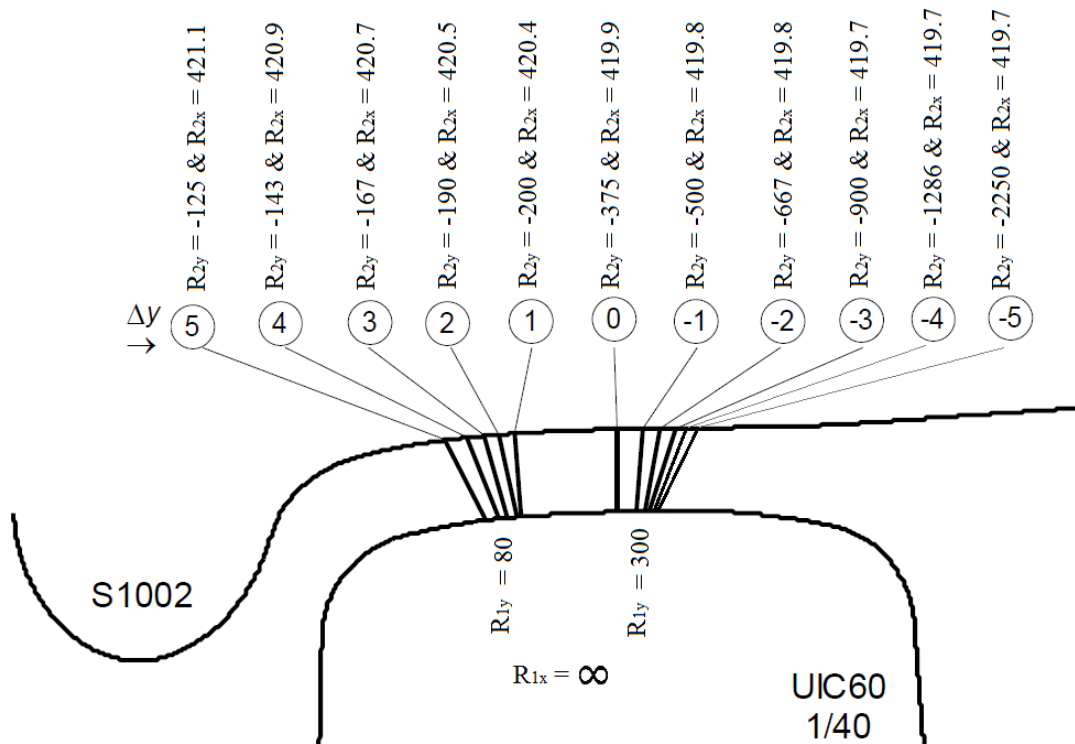
$$R_{2y} = -\frac{dy^2}{z_{i-1} - 2z_i + z_{i+1}} \quad (10.11)$$

όπου dy είναι η εγκάρσια απόσταση του εν λόγω σημείου στον άξονα y από τα γειτονικά του σημεία, και z_i, z_{i-1}, z_{i+1} οι συντεταγμένες στον άξονα z του σημείου επαφής και των γειτονικών του αντιστοίχως (Σχ. 10.10).



Σχήμα 10.10: Υπολογισμός καμπυλότητας τροχού στον άξονα y [57]

Στο Σχήμα 10.11 παρουσιάζονται οι τιμές των καμπυλοτήτων τροχού και σιδηροτροχιάς στα επίπεδα καμπυλότητας x και y και στον πίνακα 10.8 οι τιμές της ισοδύναμης ακτίνας καμπυλότητας R_e στα σημεία επαφής σύμφωνα με τις σχέσεις (10.8), (10.9) και (10.10).




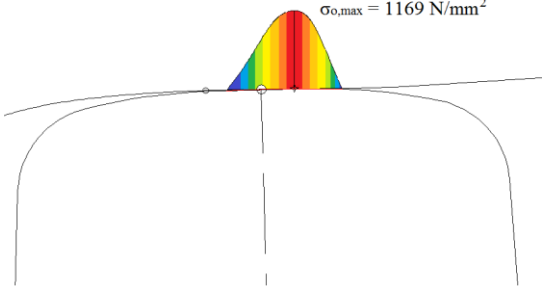
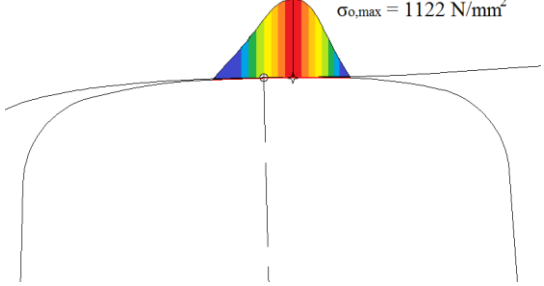
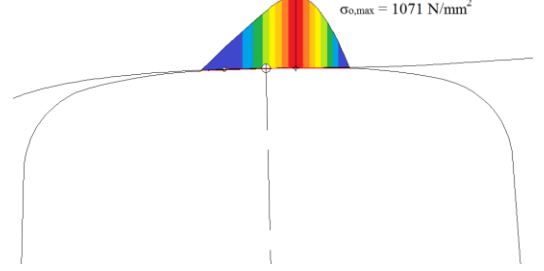
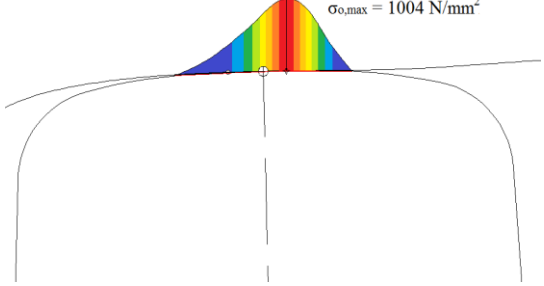
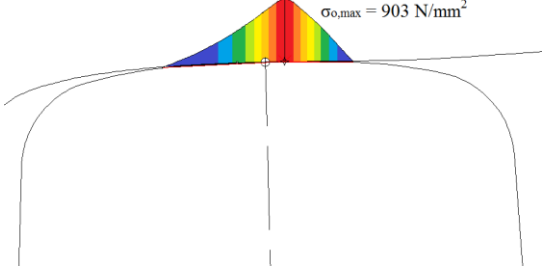
Σχήμα 10.11: Ακτίνες καμπυλότητας τροχού-σιδηροτροχιάς στα επίπεδα καμπυλότητας x και y


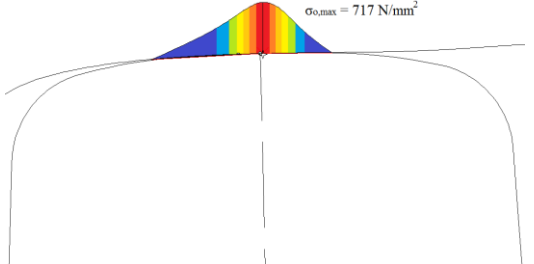
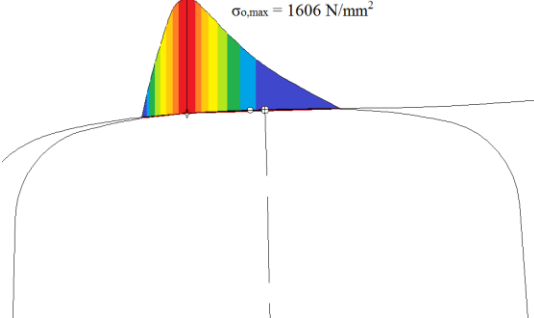
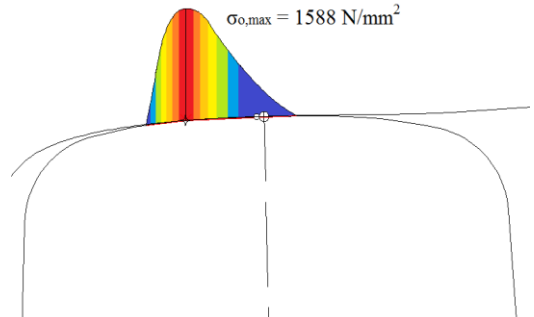
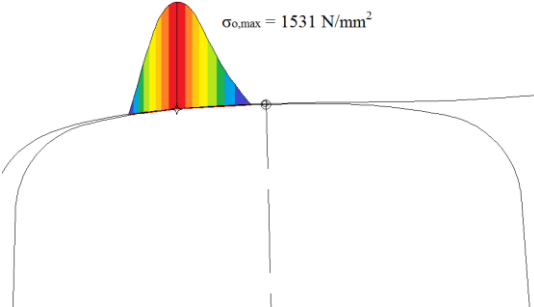
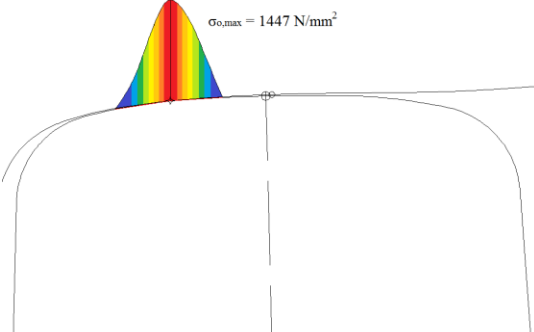
Πίνακας 10.8: Ισοδύναμη καμπυλότητα στα σημεία επαφής (τιμές σε mm)


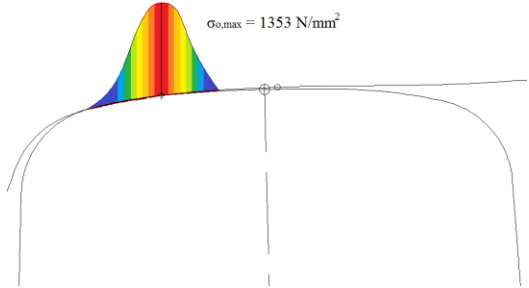
Δy	R_{1y}	R_{2y}	R_{1x}	R_{2x}	R_e
-5	300	-2250	∞	419.7	381.15
-4	300	-1286	∞	419.7	405.25
-3	300	-900	∞	419.7	434.59
-2	300	-667	∞	419.8	478.52
-1	300	-500	∞	419.8	561.12
0	300	-375	∞	419.9	793.63
+1	80	-200	∞	420.4	236.75
+2	80	-190	∞	420.5	240.83
+3	80	-167	∞	420.7	254.41
+4	80	-143	∞	420.9	276.64
+5	80	-125	∞	421.1	305.90

Σύμφωνα με τη σχέση (10.6) για φορτίο 90kN προκύπτει η τιμή της μέγιστης ορθής τάσης, η οποία εμφανίζεται στο σημείο επαφής και φθίνει σταδιακά προς τα όρια της επιφάνειας επαφής. Η τιμή και η ποιοτική κατανομή της φαίνονται στον Πίνακα 10.9.

Πίνακας 10.9: Μέγιστη ορθή τάση και ποιοτική απεικόνιση της κατανομής

Δy (mm)	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6QE^*2}{\pi^3 R_e^2} \right)^{1/3} (N / mm^2)$	Ποιοτική κατανομή ορθής τάσης 
-5	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 381.15^2} \right)^{1/3} = 1169$	
-4	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 405.25^2} \right)^{1/3} = 1122$	
-3	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 434.59^2} \right)^{1/3} = 1071$	
-2	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 478.52^2} \right)^{1/3} = 1004$	
-1	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 561.12^2} \right)^{1/3} = 903$	

Δy (mm)	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6QE^*2}{\pi^3 R_e^2}\right)^{1/3} (N/mm^2)$	Ποιοτική κατανομή ορθής τάσης 
0	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6*90000*115385^2}{3.14^3 * 793.63^2}\right)^{1/3} = 717$	
+1	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6*90000*115385^2}{3.14^3 * 236.75^2}\right)^{1/3} = 1606$	
+2	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6*90000*115385^2}{3.14^3 * 240.83^2}\right)^{1/3} = 1588$	
+3	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6*90000*115385^2}{3.14^3 * 254.41^2}\right)^{1/3} = 1531$	
+4	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6*90000*115385^2}{3.14^3 * 276.64^2}\right)^{1/3} = 1447$	

Δy (mm)	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6QE^{*2}}{\pi^3 R_e^2}\right)^{1/3} (N/mm^2)$	Ποιοτική κατανομή ορθής τάσης 
+5	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6 \cdot 90000 \cdot 115385^2}{3.14^3 \cdot 305.90^2}\right)^{1/3} = 1353$	

Στον πίνακα 10.10 παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες τιμές της μέγιστης ορθής τάσης σε σύγκριση με τις προκύπτουσες από την εφαρμογή της σχέσης (10.5) στην ελλειπτική επιφάνεια του Hertz για φορτίο 90kN [57] και τα αποτελέσματα από τον κώδικα NON-HERTZ του Cretu [56].

Πίνακας 10.10: Συγκριτική παράθεση τιμών μέγιστης ορθής τάσης

Δy (mm)	a (mm)	b (mm)	$P_{o,Hertz}$ (N/mm ²)	$P_{o,Non-Hertz}$ (N/mm ²)	$P_{o,max}$ (N/mm ²)
			$\sigma_{max} = \frac{3}{2} \frac{Q}{\pi ab}$	Finite Elements	$\sigma_{o,max} = \left(\frac{6QE^{*2}}{\pi^3 R_e^2}\right)^{1/3}$
-3	6.5	6.4	1028	1030	1071
-2	6.3	7.1	961	964	1004
-1	6.0	8.2	879	873	903
0	5.4	10.7	746	932	717
+1	7.8	3.4	1617	1261	1606
+2	7.7	3.5	1574	1449	1588
+3	7.6	3.7	1515	1494	1531
+4	7.4	4.1	1425	1425	1447
+5	7.1	4.9	1246	2364	1353

Σύμφωνα με τις τιμές του παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι οι υπολογισθείσες τιμές της μέγιστης ορθής τάσης συμφωνούν με τις προκύπτουσες από την εφαρμογή της θεώρησης της ελλειπτικής επιφάνειας του Hertz, καθώς η μεταξύ τους απόκλιση δεν υπερβαίνει το 4%, εκτός από την περίπτωση εγκάρσιας μετατόπισης κατά +5mm όπου φθάνει το 7%. Στη συγκεκριμένη ακραία θέση υπάρχει μεγάλη απόκλιση και των δύο

μεθόδων σε σχέση με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ίσως λόγω επαφής όνυχα-σιδηροτροχιάς, περίπτωση η οποία δεν εξετάζεται στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή.

Σε σχέση με τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται ότι στις θέσεις με εγκάρσια μετατόπιση -3mm, -2mm, -1mm, +2mm, +3mm και +4mm η απόκλιση μεταξύ των τιμών των μέγιστων ορθών τάσεων κυμαίνεται μεταξύ 2% και 4% και σε μία θέση φθάνει οριακά το 8%. Το σφάλμα που προκύπτει μεταξύ των τιμών στις θέσεις 0mm και +1mm οφείλεται ενδεχομένως στην ύπαρξη και δεύτερου σημείου επαφής (στην περίπτωση φθαρμένων τροχών ή σιδηροτροχιών [51]) και ως εκ τούτου η τάση που αναπτύσσεται διαφέρει σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται συναρτήσει της ισοδύναμης ακτίνας καμπυλότητας στο σημείο επαφής.

Η τάξη μεγέθους των 1500N/mm^2 που φθάνει η μέγιστη τιμή της ορθής τάσης ξεπερνά την τιμή της αντοχής του χάλυβα της σιδηροτροχιάς. Ως εκ τούτου στην πράξη, ύστερα από διαδοχικές διελεύσεις η επιφάνεια κύλισης παραμορφώνεται πλαστικά και κατ' επέκταση επέρχεται σκλήρυνση. Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης της σιδηροτροχιάς προκαλούν αθροιστικές πλαστικές παραμορφώσεις λόγω των υψηλών κατακόρυφων πιέσεων που ασκούνται (φαινόμενο που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως «ratcheting»). Παράλληλα, στην επιφάνεια κύλισης εμφανίζεται φθορά. Αν η φθορά είναι λιγότερο έντονη σε σύγκριση με την πρόοδο του «ratcheting», τότε ενδέχεται να επιτευχθεί στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια της κεφαλής της σιδηροτροχιάς κρίσιμη παραμόρφωση και εμφανίζονται στην επιφάνεια κύλισης βλάβες [65, 66, 67].

Σημειώνεται επίσης ότι κατά την κύλιση τροχού επί σιδηροτροχιάς, λόγω του κατακόρυφου φορτίου του τροχού, εμφανίζονται εκτός από τις ορθές τάσεις στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς και διατμητικές εντός της κεφαλής της. Η μέγιστη τιμή των διατμητικών τάσεων βρίσκεται σε βάθος 4mm-6mm από την άνω στάθμη κεφαλής σιδηροτροχιάς.

ΚΕΦ.11 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία μέθοδος υπολογισμού της μορφής και του μεγέθους της μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς, η οποία βασίζεται κατεξοχήν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις μαθηματικές εκφράσεις των διατομών των δύο σωμάτων, καθώς και στη μεταξύ τους διείδυση στο σημείο επαφής. Η τιμή της διείδυσης υπολογίστηκε πειραματικά. Επίσης υπολογίζονται οι μέγιστες ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς. Από τη διερεύνηση που προηγήθηκε προκύπτουν συμπερασματικά τα ακόλουθα:

- Η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι αποδεκτή σε σχέση με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στάδιο προμελέτης για μία αρχική και γρήγορη εκτίμηση της πραγματικής μη-ελλειπτικής επιφάνειας επαφής και των αναπτυσσόμενων τάσεων επ' αυτής.
- Η προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού εφαρμόστηκε στο σύννηθες ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς, διατομών S1002-60E1(UIC60), μπορεί όμως να αυτοματοποιηθεί και να γενικευθεί εύκολα, ώστε να εφαρμόζεται σε διάφορα ζεύγη διατομών και για διάφορες τιμές κύριας ακτίνας κύλισης τροχού, εύρους γραμμής και κλίσης σιδηροτροχιάς ως προς την κατακόρυφο, δεδομένου ότι βασίζεται κατεξοχήν σε γεωμετρικά, αριθμητικά και πειραματικά δεδομένα.
- Οι τιμές της διείδυσης μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς προέκυψαν ύστερα από τη διεξαγωγή πειράματος, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν θεωρητικές σχέσεις για τον υπολογισμό της. Το πείραμα διεξήχθη μεν για ένα μόνο ζεύγος τροχού-σιδηροτροχιάς, γεγονός που καθιστά το δείγμα μικρό, αλλά η διαδικασία φόρτισης διεξήχθη για έξι σχετικές θέσεις μεταξύ των δύο σωμάτων και ως εκ τούτου τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή.
- Για την υλοποίησή της αρκούν απλά λογισμικά λογιστικά φύλλα και ως εκ τούτου μπορεί να αποφευχθεί το υψηλό κόστος ενός λογισμικού πακέτου, εφόσον στην επίλυση επιτρέπονται απλοποιητικές παραδοχές. Για περαιτέρω ανάλυση οι μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν το περίγραμμα των επιφανειών επαφής μπορούν να εισαχθούν σε μοντέλα προσομοίωσης.

- Ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού είναι περιορισμένος σε σχέση με άλλες προσομοιώσεις π.χ. κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, που μπορεί να είναι πιο ακριβείς αλλά είναι επίσης πιο χρονοβόρες.

Τέλος προτείνονται για περαιτέρω έρευνα τα ακόλουθα:

- Να επαναληφθεί ο πειραματικός υπολογισμός της διείσδυσης και για άλλους τύπους σιδηροτροχιών π.χ. για τη σιδηροτροχιά διατομής 54E1(UIC54), που χρησιμοποιείται στο μετρό της Αθήνας.
- Να εισαχθεί στους υπολογισμούς η γωνία στροφής του τροχοφόρου άξονα ως προς τον κατακόρυφο άξονα της γραμμής, που στην παρούσα διδακτορική διατριβή αγνοήθηκε.
- Να αναπτυχθεί για την προτεινόμενη μέθοδο υπολογισμού μία συναρτησιακή γλώσσα προγραμματισμού, ώστε να μειωθεί επιπλέον ο υπολογιστικός χρόνος.
- Να υπολογισθούν οι διατμητικές τάσεις λόγω του κατακόρυφου φορτίου που εμφανίζονται στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς, με μέγιστη τιμή σε βάθος 4mm-6mm από την άνω στάθμη της κεφαλής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] **Λυμπέρης, Κ. (2007).** *Σιδηροδρομική Θεωρία και εφαρμογές (Τόμος Ι)*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα.
- [2] **Πυργίδης, Χ. (2006).** *Σχεδιασμός και κατασκευή σιδηροδρομικής υποδομής*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- [3] **Προφυλίδης, Β. (1993).** *Σιδηροδρομική (Τόμος Πρώτος)*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- [4] **Esvelt, C. (2001).** *Modern Railway Track (Second Edition)*. MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands.
- [5] **Lewis R., Olofsson U. (2009).** *Wheel-rail interface handbook*. Woodhead Publishing in Mechanical Engineering, Cambridge, UK.
- [6] **Ανδρουλιδάκης, Κ. (1995).** *Η ιστορία των Σιδηροδρόμων. Από τη δημιουργία του πρώτου δικτύου έως τον Ο.Σ.Ε.* Η Καθημερινή, Αθήνα, Ελλάδα.
- [7] **Marshall, D. (1938).** *A History of British Railways down to the Year 1830*, p.148. Oxford University Press, Oxford.
- [8] **Redtenbacher, F.J. (1855).** *Die Gesetzte des Locomotiv – Baues*. Verlag von F.Bassermann, Mannheim.
- [9] **Knothe, K. and Piotrowski, J. (2005).** *Heinrich Hertz und Ferdinand Redtenbacher. Ein Beitrag zur Entwicklung der Kontaktmechanik von Rad und Schiene*. ZEV rail Glasers Annalen, 129: 10, 424-431.
- [10] **Knothe, K. (2008).** *History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker*. Vehicle System Dynamics, 46: 1&2, 9-26.
- [11] **Hertz, H. (1881).** *Über die Berührung fester, elastischer Körper*. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, 156-171.
- [12] **Hertz, H. (1885).** *Über die Berührung fester, elastischer Körper und über die Härte*. Gesammelte Werke, Band 1, p.174–196, Barth, Leipzig.
- [13] **Klingel, J. (1883).** *Über den Lauf von Eisenbahnwagen auf gerader Bahn*. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, 20, 113–123, Table XXI.
- [14] **Boedecker, Chr. (1887).** *Die Wirkungen zwischen Rad und Schiene und ihre Einflüsse auf den Lauf und den Bewegungswiderstand der Fahrzeuge in den Eisenbahnzügen*, Hahn'sche Buchhandlung, Hannover.
- [15] **Knothe, K. and Böhm, F. (1999).** *History of Stability of Railway and Road Vehicles*. Vehicle System Dynamics, 31: 5, 283-323.
- [16] **Knothe, K. (2008).** *History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker*. Vehicle System Dynamics, 46: 1&2, 9-26.
- [17] **Carter, F.W. (1922).** *Railway electric traction*. Edward Arnold, London.
- [18] **Carter, F.W. (1916).** *The electric locomotive*. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 201, 221-252.

- [19] **Carter, F.W. (1926).** *On the action of a locomotive driving wheel.* Proceedings of Royal Society of London, Series A, 12, 151-157, London.
- [20] **Carter, F.W. (1928).** *On the stability of running of locomotives.* Proceedings of Royal Society of London, Series A, 121, 585-610, London.
- [21] **Fromm, H. (1926).** *Berechnung des Schlupfes beim Rollen deformierbarer Scheiben.* Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 7, 27–58, PhD Thesis TH Berlin, Berlin.
- [22] **Becker, G., Fromm, H. and Maruhn, H. (1931).** *Schwingungen in Automobillenkungen (Shimmy).* M. Krayn, Berlin.
- [23] **Fromm, H. (1941).** *Seitenschlupf und Führungswert des rollenden Rades.* Bericht der Lilienthal-Gesellschaft, 140: 56–63 (also in NACA TN 1365, p. 191).
- [24] **Fromm, H. (1931).** *Grenzen des elastischen Verhaltens beanspruchter Stoffe, Nachwirkung und Hysteresis.* In F. Auerbach and E. Hort (Eds) Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, Vol. 4(1) pp. 359–435, 436–550, Barth, Leipzig.
- [25] **Rocard, Y. (1935).** *La stabilité de route des locomotives, première partie, avec une note de M. R. Levy.* Hermann & Cie., Paris.
- [26] **Julié, M. and Rocard, Y. (1935).** *La stabilité de route des locomotives, deuxième partie.* Hermann & Cie., Paris.
- [27] **Matsudaira, T. (1952).** *Shimmy of axles with pair of wheel.* (In Japanese). J. of Railway Engineering Research, pp. 16–26, Japan.
- [28] **Matsudaira, T. (1960).** *Paper awarded prize in the competition sponsored by Office of Research and Experiment (ORE) of the International Unions of Railways (UIC).* ORE-Report RP2rSVA-C9, UIC, Utrecht.
- [29] **de Pater, A.D. (1956).** *Etude du mouvement de lacet d'un véhicule de chemin de fer.* Appl. Sci. Res. A, 6:263–316.
- [30] **A.D. de Pater (1960).** *The approximate determination of the hunting movement of a railway vehicle by aid of the method of Krylov and Bogoljubov.* Appl. Sci. Res., 10:205–228, 1961. Paper delivered at the Xth International Congress of Appl. Mech. at Stresa.
- [31] **van Bommel, P. (1964).** *Application de la théorie des Vibrations nonlineaires sur le problème du mouvement de lacet d'un véhicule de chemin de fer.* PhD Thesis, TH Delft, The Netherlands.
- [32] **Johnson, K.L. (1958).** *The effect of spin upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane.* Journal of Applied Mechanics, 25:332–338.
- [33] **Johnson, K.L. (1958).** *The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane.* Journal of Applied Mechanics, 25:339–346.
- [34] **Wickens, A.H. (1965).** *The dynamic stability of railway vehicle wheelsets and bogies having profiled wheels.* Int. J. Solids Structures, 1:319–341.

- [35] **Wickens, A.H. (1965).** *The dynamics of railway vehicles on straight track: fundamental consideration of lateral stability.* Proc. I. Mech. Engrs., **180(3F)**:1–16.
- [36] **Wickens, A.H. (1965).** *The Dynamics Stability of a simplified four-wheeled vehicle having profiled wheels.* Int. J. Solids Structures, 1:385–406.
- [37] **Kovalev, N.A. (1957).** *The Lateral Oscillation of Rolling Stock.* Transheldhorizdat, Moskau.
- [38] **Kalker, J.J. (1967).** *On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction.* PhD Thesis, TH Delft, Delft, The Netherlands.
- [39] **Kalker, J.J. (1990).** *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [40] **Knothe, K. and Böhm, F. (1999).** *History of Stability of Railway and Road Vehicles.* Vehicle System Dynamics, 31: 5, 283-323.
- [41] **Elkins, J.A. (1992).** *Prediction of wheel rail interaction: The state of the art.* Vehicle System Dynamics, 20: 6, 1-27.
- [42] **Pascal, J.-P. and Sauvage, G. (1993).** *The available methods to calculate the wheel/rail forces in non-Hertzian contact patches and rail damaging.* Vehicle System Dynamics, 22(3/4): 263-75.
- [43] **Kik, W. and Piotrowski, J. (1996).** *A fast, approximate method to calculate normal load at contact between wheel and rail and creep forces during rolling.* Proceedings 2nd Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Budapest, University of Technology Budapest, Hungary, 52-61.
- [44] **Linder, C. and Brauchli, H. (1996).** *Prediction of wheel wear.* Proceedings 2nd Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Budapest, University of Technology Budapest, Hungary, 215-23.
- [45] **Harder, R.F. (1999).** *Creep force-Creepage and frictional work behaviour in non-Hertzian counter formal rail/wheel contacts.* Proceedings International Heavy Haul Association Specialist Technical Session on Wheel/Rail. Budapest, University of Technology, Moscow, Russia, 14-17 June, 207-14.
- [46] **Alonso, A. and Giménez, J.G. (2005).** *A new method for the solution of the normal contact problem in the dynamic simulation of railway vehicles.* Vehicle System Dynamics, 43(2): 149-60.
- [47] **Ayasse, J.B. and Chollet, H. (2005).** *Determination of the wheel rail contact patch for semi-Hertzian conditions.* Veh. Syst. Dyn. 43(3), pp. 157–170.
- [48] **Piotrowski, J. and Kik, W. (2008).** *A simplified model of wheel-rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations.* Veh. Syst. Dyn. 46(1–2), pp. 27–48.
- [49] **Piotrowski, J. and Chollet, H. (2005).** *Wheel–rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact.* Veh. Syst. Dyn. 43(6–7), pp. 455–483.
- [50] **Pombo, J. and Ambrosio, J. (2005).** *A computational efficient general wheel–rail contact detection method,* J.Mech. Sci. Technol. 19(1) (2005), pp. 411–421.

- [51] **Ren, Z., Iwnicki, S. D. and Xie, G. (2011).** *A new method for determining wheel-rail multi-point contact.* Veh. Syst. Dyn. 49(10), pp. 1533–1551.
- [52] **UIC 861-3 (1969).** Einheitliche Schienenprofile von 60kg/m UIC-Profilen 60 und 60E.
- [53] **Technischer Bericht der Arbeitsgruppe Rad/Schiene DB-SNCF (1987).** Bericht Nr.1, *Kompatibilität der Rad-Schiene-Parameter im grenzüberschreitenden Hochgeschwindigkeitsverkehr.* BZA München, Deutschland.
- [54] **Nefzger A. (1974).** *Geometrie der Berührung zwischen Radsatz und Gleis.* ETR Eisenbahntechnische Rundschau, 3, p.113-122.
- [55] **UIC 510-2 (1987).** *Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters.* International Union of Railways.
- [56] **Cretu, S. (2007).** *The influence of roughness on pressure distribution and stress state of concentrated contacts subjected to normal loads.* Bul. Inst. Polit. Iasi, XLXIII (LVII), 1-2, s. Constructii de masini, 1-12.
- [57] **Popovici, R. (2010).** *Friction in Wheel-Rail Contacts.* PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- [58] **Profile Programm.** VoestAlpine Schienen GmbH.
- [59] **Santamaria, J., Vadillo, E. G. and Oyarzabal, O. (2008).** *Wheel-rail wear prediction considering multiple contact patches.* Wear, 267 (5-8), pp. 1100-1104.
- [60] **Kourkoulis, S. K., Markides, Ch. F. and Chatzistergos, P.E. (2011).** *The standardized Brazilian disc test as a contact problem.* International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 57:132–141.
- [61] **Markides, Ch. F. and Kourkoulis, S. K. (2011).** *The Stress Field in a Standardized Brazilian Disc: The Influence of the Loading Type Acting on the Actual Contact Length.* Rock Mech Rock Eng , 45:145–158.
- [62] **Markides, Ch. F. and Kourkoulis, S. K. (2012).** *Naturally Accepted Boundary Conditions for the Brazilian Disc Test and the Corresponding Stress Field.* Rock Mech Rock Eng, 46:959-980.
- [63] **Iwnicki, S. (2006).** *Handbook of railway vehicle dynamics.* Taylor & Francis Group, USA.
- [64] **Dame, S. (2006).** *Zur Finite-Element Modellierung des Stationären Rollkontakts von Rad und Schiene.* PhD Thesis, Technische Universität Dresden, Germany.
- [65] **Lichrberger, B. (2003).** *Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit.* Tetzlaff Verlag, Hamburg, Germany.
- [66] **Köstermann, H., Meißner, K. and Sladek, H. (2008).** *Handbuch der Schienentechnik. Werkstoffe, Herstellung und Bearbeitung, Qualitätssicherung.* DVS Media Verlag, Düsseldorf, Germany.
- [67] **Eisenmann, J. (1974).** *Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Eisenbahn- und Strassenoberbaues.* Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin/München/Düsseldorf, Germany.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Συντεταγμένες σημείων τροχού διατομής S1002

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
1	-1430,000	9,519	∞	1	-70,000	9,519	∞
2	-1430,500	14,019	4,4444	2	-69,500	14,019	4,4444
3	-1431,000	15,844	3,0832	3	-69,000	15,844	3,0832
4	-1431,500	17,217	2,4684	4	-68,500	17,217	2,4684
5	-1432,000	18,351	2,0947	5	-68,000	18,351	2,0947
6	-1432,500	19,330	1,8347	6	-67,500	19,330	1,8347
7	-1433,000	20,196	1,6390	7	-67,000	20,196	1,6390
8	-1433,500	20,976	1,4839	8	-66,500	20,976	1,4839
9	-1434,000	21,685	1,3563	9	-66,000	21,685	1,3563
10	-1434,500	22,335	1,2484	10	-65,500	22,335	1,2484
11	-1435,000	22,936	1,1553	11	-65,000	22,936	1,1553
12	-1435,500	23,492	1,0735	12	-64,500	23,492	1,0735
13	-1436,000	24,011	1,0006	13	-64,000	24,011	1,0006
14	-1436,500	24,494	0,9349	14	-63,500	24,494	0,9349
15	-1437,000	24,947	0,8751	15	-63,000	24,947	0,8751
	-1437,235	25,149	0,849		-62,765	25,149	0,8487
16	-1437,500	25,367	0,8006	16	-62,500	25,367	0,8006
17	-1438,000	25,747	0,7182	17	-62,000	25,747	0,7182
18	-1438,500	26,087	0,6444	18	-61,500	26,087	0,6444
19	-1439,000	26,392	0,5774	19	-61,000	26,392	0,5774
20	-1439,500	26,665	0,5157	20	-60,500	26,665	0,5157
21	-1440,000	26,909	0,4583	21	-60,000	26,909	0,4583
22	-1440,500	27,124	0,4045	22	-59,500	27,124	0,4045
23	-1441,000	27,314	0,3536	23	-59,000	27,314	0,3536
24	-1441,500	27,478	0,3049	24	-58,500	27,478	0,3049
25	-1442,000	27,619	0,2582	25	-58,000	27,619	0,2582
26	-1442,500	27,737	0,2130	26	-57,500	27,737	0,2130
27	-1443,000	27,832	0,1690	27	-57,000	27,832	0,1690
28	-1443,500	27,906	0,1260	28	-56,500	27,906	0,1260
29	-1444,000	27,958	0,0836	29	-56,000	27,958	0,0836
30	-1444,500	27,990	0,0417	30	-55,500	27,990	0,0417
31	-1445,000	28,000	0,0000	31	-55,000	28,000	0,0000
32	-1445,500	27,990	-0,0417	32	-54,500	27,990	-0,0417
33	-1446,000	27,958	-0,0836	33	-54,000	27,958	-0,0836
34	-1446,500	27,906	-0,1260	34	-53,500	27,906	-0,1260
35	-1447,000	27,832	-0,1690	35	-53,000	27,832	-0,1690
36	-1447,500	27,737	-0,2130	36	-52,500	27,737	-0,2130

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
37	-1448,000	27,619	-0,2582	37	-52,000	27,619	-0,2582
38	-1448,500	27,478	-0,3049	38	-51,500	27,478	-0,3049
39	-1449,000	27,314	-0,3536	39	-51,000	27,314	-0,3536
40	-1449,500	27,124	-0,4045	40	-50,500	27,124	-0,4045
41	-1450,000	26,909	-0,4583	41	-50,000	26,909	-0,4583
	-1450,337	26,748	-0,497		-49,663	26,748	-0,497
42	-1450,500	26,666	-0,5080	42	-49,500	26,666	-0,5080
43	-1451,000	26,403	-0,5441	43	-49,000	26,403	-0,5441
44	-1451,500	26,122	-0,5819	44	-48,500	26,122	-0,5819
45	-1452,000	25,821	-0,6216	45	-48,000	25,821	-0,6216
46	-1452,500	25,500	-0,6636	46	-47,500	25,500	-0,6636
47	-1453,000	25,157	-0,7081	47	-47,000	25,157	-0,7081
48	-1453,500	24,791	-0,7557	48	-46,500	24,791	-0,7557
49	-1454,000	24,401	-0,8068	49	-46,000	24,401	-0,8068
50	-1454,500	23,984	-0,8620	50	-45,500	23,984	-0,8620
51	-1455,000	23,538	-0,9222	51	-45,000	23,538	-0,9222
52	-1455,500	23,060	-0,9883	52	-44,500	23,060	-0,9883
53	-1456,000	22,548	-1,0616	53	-44,000	22,548	-1,0616
54	-1456,500	21,997	-1,1440	54	-43,500	21,997	-1,1440
55	-1457,000	21,402	-1,2380	55	-43,000	21,402	-1,2380
56	-1457,500	20,757	-1,3470	56	-42,500	20,757	-1,3470
57	-1458,000	20,052	-1,4762	57	-42,000	20,052	-1,4762
58	-1458,500	19,276	-1,6338	58	-41,500	19,276	-1,6338
59	-1459,000	18,411	-1,8335	59	-41,000	18,411	-1,8335
60	-1459,500	17,431	-2,1007	60	-40,500	17,431	-2,1007
61	-1460,000	16,291	-2,4891	61	-40,000	16,291	-2,4891
	-1460,236	15,675	-2,747		-39,764	15,675	-2,747
62	-1460,500	14,949	-2,7475	62	-39,500	14,949	-2,7475
63	-1461,000	13,575	-2,7475	63	-39,000	13,575	-2,7475
64	-1461,500	12,201	-2,7475	64	-38,500	12,201	-2,7475
	-1461,573	12,000	-2,747		-38,427	12,000	-2,747
65	-1462,000	10,968	-2,1520	65	-38,000	10,968	-2,1520
66	-1462,500	10,000	-1,7514	66	-37,500	10,000	-1,7514
67	-1463,000	9,194	-1,4878	67	-37,000	9,194	-1,4878
68	-1463,500	8,501	-1,2950	68	-36,500	8,501	-1,2950
69	-1464,000	7,892	-1,1444	69	-36,000	7,892	-1,144
70	-1464,500	7,352	-1,0214	70	-35,500	7,352	-1,0214
71	-1465,000	6,868	-0,918	71	-35,000	6,868	-0,918
72	-1465,500	6,432	-0,8279	72	-34,500	6,432	-0,8279
73	-1466,000	6,038	-0,7493	73	-34,000	6,038	-0,7493
74	-1466,500	5,681	-0,6798	74	-33,500	5,681	-0,6798
75	-1467,000	5,357	-0,6181	75	-33,000	5,357	-0,6181

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
76	-1467,500	5,062	-0,5630	76	-32,500	5,062	-0,5630
77	-1468,000	4,793	-0,5140	77	-32,000	4,793	-0,5140
78	-1468,500	4,547	-0,4706	78	-31,500	4,547	-0,4706
79	-1469,000	4,321	-0,4322	79	-31,000	4,321	-0,4322
80	-1469,500	4,114	-0,3988	80	-30,500	4,114	-0,3988
81	-1470,000	3,922	-0,3698	81	-30,000	3,922	-0,3698
82	-1470,500	3,743	-0,3449	82	-29,500	3,743	-0,3449
83	-1471,000	3,576	-0,3237	83	-29,000	3,576	-0,3237
84	-1471,500	3,419	-0,3055	84	-28,500	3,419	-0,3055
85	-1472,000	3,270	-0,2899	85	-28,000	3,270	-0,2899
86	-1472,500	3,129	-0,2763	86	-27,500	3,129	-0,2763
87	-1473,000	2,994	-0,2639	87	-27,000	2,994	-0,2639
88	-1473,500	2,865	-0,2525	88	-26,500	2,865	-0,2525
89	-1474,000	2,741	-0,242	89	-26,000	2,741	-0,242
90	-1474,500	2,623	-0,2315	90	-25,500	2,623	-0,2315
91	-1475,000	2,509	-0,2218	91	-25,000	2,509	-0,2218
92	-1475,500	2,401	-0,2127	92	-24,500	2,401	-0,2127
93	-1476,000	2,297	-0,2041	93	-24,000	2,297	-0,2041
94	-1476,500	2,197	-0,1960	94	-23,500	2,197	-0,1960
95	-1477,000	2,101	-0,1883	95	-23,000	2,101	-0,1883
96	-1477,500	2,008	-0,1810	96	-22,500	2,008	-0,1810
97	-1478,000	1,920	-0,1741	97	-22,000	1,920	-0,1741
98	-1478,500	1,834	-0,1675	98	-21,500	1,834	-0,1675
99	-1479,000	1,752	-0,1613	99	-21,000	1,752	-0,1613
100	-1479,500	1,673	-0,1553	100	-20,500	1,673	-0,1553
101	-1480,000	1,597	-0,1497	101	-20,000	1,597	-0,1497
102	-1480,500	1,523	-0,1443	102	-19,500	1,523	-0,1443
103	-1481,000	1,452	-0,1392	103	-19,000	1,452	-0,1392
104	-1481,500	1,384	-0,1342	104	-18,500	1,384	-0,1342
105	-1482,000	1,318	-0,1295	105	-18,000	1,318	-0,1295
106	-1482,500	1,254	-0,1250	106	-17,500	1,254	-0,1250
107	-1483,000	1,193	-0,1207	107	-17,000	1,193	-0,1207
108	-1483,500	1,134	-0,1166	108	-16,500	1,134	-0,1166
109	-1484,000	1,076	-0,1126	109	-16,000	1,076	-0,1126
110	-1484,500	1,021	-0,1088	110	-15,500	1,021	-0,1088
111	-1485,000	0,967	-0,1051	111	-15,000	0,967	-0,1051
112	-1485,500	0,916	-0,1016	112	-14,500	0,916	-0,1016
113	-1486,000	0,866	-0,0981	113	-14,000	0,866	-0,0981
114	-1486,500	0,818	-0,0948	114	-13,500	0,818	-0,0948
115	-1487,000	0,771	-0,0916	115	-13,000	0,771	-0,0916
116	-1487,500	0,726	-0,0885	116	-12,500	0,726	-0,0885
117	-1488,000	0,682	-0,0855	117	-12,000	0,682	-0,0855

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
118	-1488,500	0,640	-0,0826	118	-11,500	0,640	-0,0826
119	-1489,000	0,600	-0,0798	119	-11,000	0,600	-0,0798
120	-1489,500	0,561	-0,0771	120	-10,500	0,561	-0,0771
121	-1490,000	0,523	-0,0744	121	-10,000	0,523	-0,0744
122	-1490,500	0,486	-0,0718	122	-9,500	0,486	-0,0718
123	-1491,000	0,451	-0,0693	123	-9,000	0,451	-0,0693
124	-1491,500	0,417	-0,0669	124	-8,500	0,417	-0,0669
125	-1492,000	0,384	-0,0645	125	-8,000	0,384	-0,0645
126	-1492,500	0,352	-0,0622	126	-7,500	0,352	-0,0622
127	-1493,000	0,322	-0,0599	127	-7,000	0,322	-0,0599
128	-1493,500	0,292	-0,0577	128	-6,500	0,292	-0,0577
129	-1494,000	0,264	-0,0556	129	-6,000	0,264	-0,0556
130	-1494,500	0,237	-0,0535	130	-5,500	0,237	-0,0535
131	-1495,000	0,211	-0,0514	131	-5,000	0,211	-0,0514
132	-1495,500	0,185	-0,0494	132	-4,500	0,185	-0,0494
133	-1496,000	0,161	-0,0475	133	-4,000	0,161	-0,0475
134	-1496,500	0,138	-0,0456	134	-3,500	0,138	-0,0456
135	-1497,000	0,116	-0,0438	135	-3,000	0,116	-0,0438
136	-1497,500	0,094	-0,0419	136	-2,500	0,094	-0,0419
137	-1498,000	0,074	-0,0402	137	-2,000	0,074	-0,0402
138	-1498,500	0,054	-0,0385	138	-1,500	0,054	-0,0385
139	-1499,000	0,035	-0,0368	139	-1,000	0,035	-0,0368
140	-1499,500	0,017	-0,0352	140	-0,500	0,017	-0,0352
141	-1500,000	0,000	-0,0336	141	0,000	0,000	-0,0336
142	-1500,500	-0,016	-0,0320	142	0,500	-0,016	-0,0320
143	-1501,000	-0,032	-0,0305	143	1,000	-0,032	-0,0305
144	-1501,500	-0,047	-0,0291	144	1,500	-0,047	-0,0291
145	-1502,000	-0,061	-0,0277	145	2,000	-0,061	-0,0277
146	-1502,500	-0,075	-0,0263	146	2,500	-0,075	-0,0263
147	-1503,000	-0,087	-0,0250	147	3,000	-0,087	-0,0250
148	-1503,500	-0,100	-0,0237	148	3,500	-0,100	-0,0237
149	-1504,000	-0,111	-0,0224	149	4,000	-0,111	-0,0224
150	-1504,500	-0,122	-0,0212	150	4,500	-0,122	-0,0212
151	-1505,000	-0,132	-0,0201	151	5,000	-0,132	-0,0201
152	-1505,500	-0,142	-0,0189	152	5,500	-0,142	-0,0189
153	-1506,000	-0,151	-0,0179	153	6,000	-0,151	-0,0179
154	-1506,500	-0,160	-0,0169	154	6,500	-0,160	-0,0169
155	-1507,000	-0,168	-0,0159	155	7,000	-0,168	-0,0159
156	-1507,500	-0,176	-0,0150	156	7,500	-0,176	-0,0150
157	-1508,000	-0,183	-0,0141	157	8,000	-0,183	-0,0141
158	-1508,500	-0,190	-0,0133	158	8,500	-0,190	-0,0133
159	-1509,000	-0,196	-0,0126	159	9,000	-0,196	-0,0126

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
160	-1509,500	-0,203	-0,0119	160	9,500	-0,203	-0,0119
161	-1510,000	-0,208	-0,0113	161	10,000	-0,208	-0,0113
162	-1510,500	-0,214	-0,0107	162	10,500	-0,214	-0,0107
163	-1511,000	-0,219	-0,0102	163	11,000	-0,219	-0,0102
164	-1511,500	-0,224	-0,0098	164	11,500	-0,224	-0,0098
165	-1512,000	-0,229	-0,0094	165	12,000	-0,229	-0,0094
166	-1512,500	-0,234	-0,0091	166	12,500	-0,234	-0,0091
167	-1513,000	-0,238	-0,0089	167	13,000	-0,238	-0,0089
168	-1513,500	-0,242	-0,0088	168	13,500	-0,242	-0,0088
169	-1514,000	-0,247	-0,0087	169	14,000	-0,247	-0,0087
170	-1514,500	-0,251	-0,0088	170	14,500	-0,251	-0,0088
171	-1515,000	-0,256	-0,0089	171	15,000	-0,256	-0,0089
172	-1515,500	-0,260	-0,0091	172	15,500	-0,260	-0,0091
173	-1516,000	-0,265	-0,0094	173	16,000	-0,265	-0,0094
174	-1516,500	-0,269	-0,0097	174	16,500	-0,269	-0,0097
175	-1517,000	-0,274	-0,0102	175	17,000	-0,274	-0,0102
176	-1517,500	-0,280	-0,0108	176	17,500	-0,280	-0,0108
177	-1518,000	-0,285	-0,0115	177	18,000	-0,285	-0,0115
178	-1518,500	-0,291	-0,0123	178	18,500	-0,291	-0,0123
179	-1519,000	-0,298	-0,0132	179	19,000	-0,298	-0,0132
180	-1519,500	-0,304	-0,0142	180	19,500	-0,304	-0,0142
181	-1520,000	-0,312	-0,0153	181	20,000	-0,312	-0,0153
182	-1520,500	-0,320	-0,0165	182	20,500	-0,320	-0,0165
183	-1521,000	-0,328	-0,0178	183	21,000	-0,328	-0,0178
184	-1521,500	-0,338	-0,0192	184	21,500	-0,338	-0,0192
185	-1522,000	-0,348	-0,0208	185	22,000	-0,348	-0,0208
186	-1522,500	-0,358	-0,0224	186	22,500	-0,358	-0,0224
187	-1523,000	-0,370	-0,0241	187	23,000	-0,370	-0,0241
188	-1523,500	-0,382	-0,0260	188	23,500	-0,382	-0,0260
189	-1524,000	-0,396	-0,0279	189	24,000	-0,396	-0,0279
190	-1524,500	-0,410	-0,0300	190	24,500	-0,410	-0,0300
191	-1525,000	-0,426	-0,0321	191	25,000	-0,426	-0,0321
192	-1525,500	-0,443	-0,0343	192	25,500	-0,443	-0,0343
193	-1526,000	-0,460	-0,0366	193	26,000	-0,460	-0,0366
194	-1526,500	-0,479	-0,0390	194	26,500	-0,479	-0,0390
195	-1527,000	-0,499	-0,0414	195	27,000	-0,499	-0,0414
196	-1527,500	-0,521	-0,0439	196	27,500	-0,521	-0,0439
197	-1528,000	-0,543	-0,0464	197	28,000	-0,543	-0,0464
198	-1528,500	-0,567	-0,0490	198	28,500	-0,567	-0,0490
199	-1529,000	-0,592	-0,0515	199	29,000	-0,592	-0,0515
200	-1529,500	-0,619	-0,0541	200	29,500	-0,619	-0,0541
201	-1530,000	-0,646	-0,0566	201	30,000	-0,646	-0,0566

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
202	-1530,500	-0,675	-0,0591	202	30,500	-0,675	-0,0591
203	-1531,000	-0,705	-0,0615	203	31,000	-0,705	-0,0615
204	-1531,500	-0,737	-0,0638	204	31,500	-0,737	-0,0638
205	-1532,000	-0,769	-0,0660	205	32,000	-0,769	-0,0660
	-1532,158	-0,780	-0,067		32,158	-0,780	-0,067
206	-1532,500	-0,802	-0,0667	206	32,500	-0,802	-0,0667
207	-1533,000	-0,836	-0,0667	207	33,000	-0,836	-0,0667
208	-1533,500	-0,869	-0,0667	208	33,500	-0,869	-0,0667
209	-1534,000	-0,902	-0,0667	209	34,000	-0,902	-0,0667
210	-1534,500	-0,936	-0,0667	210	34,500	-0,936	-0,0667
211	-1535,000	-0,969	-0,0667	211	35,000	-0,969	-0,0667
212	-1535,500	-1,002	-0,0667	212	35,500	-1,002	-0,0667
213	-1536,000	-1,036	-0,0667	213	36,000	-1,036	-0,0667
214	-1536,500	-1,069	-0,0667	214	36,500	-1,069	-0,0667
215	-1537,000	-1,102	-0,0667	215	37,000	-1,102	-0,0667
216	-1537,500	-1,136	-0,0667	216	37,500	-1,136	-0,0667
217	-1538,000	-1,169	-0,0667	217	38,000	-1,169	-0,0667
218	-1538,500	-1,202	-0,0667	218	38,500	-1,202	-0,0667
219	-1539,000	-1,236	-0,0667	219	39,000	-1,236	-0,0667
220	-1539,500	-1,269	-0,0667	220	39,500	-1,269	-0,0667
221	-1540,000	-1,302	-0,0667	221	40,000	-1,302	-0,0667
222	-1540,500	-1,336	-0,0667	222	40,500	-1,336	-0,0667
223	-1541,000	-1,369	-0,0667	223	41,000	-1,369	-0,0667
224	-1541,500	-1,402	-0,0667	224	41,500	-1,402	-0,0667
225	-1542,000	-1,436	-0,0667	225	42,000	-1,436	-0,0667
226	-1542,500	-1,469	-0,0667	226	42,500	-1,469	-0,0667
227	-1543,000	-1,502	-0,0667	227	43,000	-1,502	-0,0667
228	-1543,500	-1,536	-0,0667	228	43,500	-1,536	-0,0667
229	-1544,000	-1,569	-0,0667	229	44,000	-1,569	-0,0667
230	-1544,500	-1,602	-0,0667	230	44,500	-1,602	-0,0667
231	-1545,000	-1,636	-0,0667	231	45,000	-1,636	-0,0667
232	-1545,500	-1,669	-0,0667	232	45,500	-1,669	-0,0667
233	-1546,000	-1,702	-0,0667	233	46,000	-1,702	-0,0667
234	-1546,500	-1,736	-0,0667	234	46,500	-1,736	-0,0667
235	-1547,000	-1,769	-0,0667	235	47,000	-1,769	-0,0667
236	-1547,500	-1,802	-0,0667	236	47,500	-1,802	-0,0667
237	-1548,000	-1,836	-0,0667	237	48,000	-1,836	-0,0667
238	-1548,500	-1,869	-0,0667	238	48,500	-1,869	-0,0667
239	-1549,000	-1,902	-0,0667	239	49,000	-1,902	-0,0667
240	-1549,500	-1,936	-0,0667	240	49,500	-1,936	-0,0667
241	-1550,000	-1,969	-0,0667	241	50,000	-1,969	-0,0667
242	-1550,500	-2,002	-0,0667	242	50,500	-2,002	-0,0667

Τροχός S1002 αριστερά				Τροχός S1002 δεξιά			
Σημείο	y	Z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
243	-1551,000	-2,036	-0,0667	243	51,000	-2,036	-0,0667
244	-1551,500	-2,069	-0,0667	244	51,500	-2,069	-0,0667
245	-1552,000	-2,102	-0,0667	245	52,000	-2,102	-0,0667
246	-1552,500	-2,136	-0,0667	246	52,500	-2,136	-0,0667
247	-1553,000	-2,169	-0,0667	247	53,000	-2,169	-0,0667
248	-1553,500	-2,202	-0,0667	248	53,500	-2,202	-0,0667
249	-1554,000	-2,236	-0,0667	249	54,000	-2,236	-0,0667
250	-1554,500	-2,269	-0,0667	250	54,500	-2,269	-0,0667
251	-1555,000	-2,302	-0,0667	251	55,000	-2,302	-0,0667
252	-1555,500	-2,336	-0,0667	252	55,500	-2,336	-0,0667
253	-1556,000	-2,369	-0,0667	253	56,000	-2,369	-0,0667
254	-1556,500	-2,402	-0,0667	254	56,500	-2,402	-0,0667
255	-1557,000	-2,436	-0,0667	255	57,000	-2,436	-0,0667
256	-1557,500	-2,469	-0,0667	256	57,500	-2,469	-0,0667
257	-1558,000	-2,502	-0,0667	257	58,000	-2,502	-0,0667
258	-1558,500	-2,536	-0,0667	258	58,500	-2,536	-0,0667
259	-1559,000	-2,569	-0,0667	259	59,000	-2,569	-0,0667
260	-1559,500	-2,602	-0,0667	260	59,500	-2,602	-0,0667

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Συντεταγμένες σημείων κεφαλής σιδηροτροχιάς διατομής 60E1 (κλίση 1:40)

Σιδηροτροχιά 60E1 αριστερά				Σιδηροτροχιά 60E1 δεξιά			
Σημείο	y	z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
	-1467,489	-22,3004			-32,511	-22,3004	
1	-1467,500	-22,0000	-20,7805	1	-32,500	-22,000	20,7805
2	-1468,000	-19,0020	-3,4461	2	-32,000	-19,0020	3,4461
3	-1468,500	-17,5890	-2,3799	3	-31,500	-17,5890	2,3799
4	-1469,000	-16,5343	-1,8857	4	-31,000	-16,5343	1,8857
5	-1469,500	-15,6729	-1,5801	5	-30,500	-15,6729	1,5801
6	-1470,000	-14,9395	-1,3643	6	-30,000	-14,9395	1,3643
7	-1470,500	-14,3002	-1,1994	7	-29,500	-14,3002	1,1994
8	-1471,000	-13,7347	-1,0669	8	-29,000	-13,7347	1,0669
9	-1471,500	-13,2296	-0,9563	9	-28,500	-13,2296	0,9563
10	-1472,000	-12,7757	-0,8615	10	-28,000	-12,7757	0,8615
11	-1472,500	-12,3662	-0,7784	11	-27,500	-12,3662	0,7784
12	-1473,000	-11,9959	-0,7042	12	-27,000	-11,9959	0,7042
13	-1473,500	-11,6608	-0,6371	13	-26,500	-11,6608	0,6371
14	-1474,000	-11,3579	-0,5756	14	-26,000	-11,3579	0,5756
15	-1474,500	-11,0845	-0,5186	15	-25,500	-11,0845	0,5186
16	-1475,000	-10,8386	-0,4654	16	-25,000	-10,8386	0,4654
17	-1475,500	-10,6186	-0,4152	17	-24,500	-10,6186	0,4152
18	-1476,000	-10,4230	-0,3676	18	-24,000	-10,4230	0,3676
19	-1476,500	-10,2507	-0,3220	19	-23,500	-10,2507	0,3220
20	-1477,000	-10,1007	-0,2783	20	-23,000	-10,1007	0,2783
21	-1477,455	-9,9829	-0,2397	21	-22,5452	-9,9829	0,0379
22	-1477,500	-9,9681	-0,2599	22	-22,500	-9,9681	0,2599
23	-1478,000	-9,8399	-0,2530	23	-22,000	-9,8399	0,2530
24	-1478,500	-9,7150	-0,2462	24	-21,500	-9,7150	0,2462
25	-1479,000	-9,5937	-0,2394	25	-21,000	-9,5937	0,2394
26	-1479,500	-9,4757	-0,2326	26	-20,500	-9,4757	0,2326
27	-1480,000	-9,3610	-0,2259	27	-20,000	-9,3610	0,2259
28	-1480,500	-9,2498	-0,2191	28	-19,500	-9,2498	0,2191
29	-1481,000	-9,1419	-0,2124	29	-19,000	-9,1419	0,2124
30	-1481,500	-9,0373	-0,2058	30	-18,500	-9,0373	0,2058
31	-1482,000	-8,9361	-0,1991	31	-18,000	-8,9361	0,1991
32	-1482,500	-8,8382	-0,1925	32	-17,500	-8,8382	0,1925
33	-1483,000	-8,7436	-0,1859	33	-17,000	-8,7436	0,1859
34	-1483,500	-8,6522	-0,1794	34	-16,500	-8,6522	0,1794
35	-1484,000	-8,5642	-0,1728	35	-16,000	-8,5642	0,1728

Σιδηροτροχιά 60E1 αριστερά				Σιδηροτροχιά 60E1 δεξιά			
Σημείο	y	z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
36	-1484,500	-8,4794	-0,1663	36	-15,500	-8,4794	0,1663
37	-1485,000	-8,3979	-0,1598	37	-15,000	-8,3979	0,1598
38	-1485,500	-8,3196	-0,1533	38	-14,500	-8,3196	0,1533
39	-1486,000	-8,2445	-0,1469	39	-14,000	-8,2445	0,1469
40	-1486,500	-8,1727	-0,1404	40	-13,500	-8,1727	0,1404
41	-1487,000	-8,1041	-0,1340	41	-13,000	-8,1041	0,1340
42	-1487,500	-8,0387	-0,1276	42	-12,500	-8,0387	0,1276
43	-1488,000	-7,9765	-0,1212	43	-12,000	-7,9765	0,1212
44	-1488,500	-7,9175	-0,1148	44	-11,500	-7,9175	0,1148
45	-1489,000	-7,8617	-0,1084	45	-11,000	-7,8617	0,1084
46	-1489,500	-7,8091	-0,1021	46	-10,500	-7,8091	0,1021
47	-1490,000	-7,7596	-0,0957	47	-10,000	-7,7596	0,0957
48	-1490,500	-7,7133	-0,0894	48	-9,500	-7,7133	0,0894
49	-1491,000	-7,6702	-0,0831	49	-9,000	-7,6702	0,0831
50	-1491,500	-7,6302	-0,0768	50	-8,500	-7,6302	0,0768
51	-1492,000	-7,5934	-0,0705	51	-8,000	-7,5934	0,0705
52	-1492,500	-7,5598	-0,0642	52	-7,500	-7,5598	0,0642
53	-1493,000	-7,5292	-0,0579	53	-7,000	-7,5292	0,0579
54	-1493,254	-7,5150	-0,0547	54	-6,746	-7,5150	0,0547
55	-1493,500	-7,5002	-0,0572	55	-6,500	-7,5002	0,0572
56	-1494,000	-7,4720	-0,0555	56	-6,000	-7,4720	0,0555
57	-1494,500	-7,4447	-0,0538	57	-5,500	-7,4447	0,0538
58	-1495,000	-7,4182	-0,0521	58	-5,000	-7,4182	0,0521
59	-1495,500	-7,3926	-0,0505	59	-4,500	-7,3926	0,0505
60	-1496,000	-7,3678	-0,0488	60	-4,000	-7,3678	0,0488
61	-1496,500	-7,3438	-0,0471	61	-3,500	-7,3438	0,0471
62	-1497,000	-7,3207	-0,0454	62	-3,000	-7,3207	0,0454
63	-1497,500	-7,2984	-0,0438	63	-2,500	-7,2984	0,0438
64	-1498,000	-7,2769	-0,0421	64	-2,000	-7,2769	0,0421
65	-1498,500	-7,2563	-0,0404	65	-1,500	-7,2563	0,0404
66	-1499,000	-7,2365	-0,0388	66	-1,000	-7,2365	0,0388
67	-1499,500	-7,2175	-0,0371	67	-0,500	-7,2175	0,0371
68	-1500,000	-7,1994	-0,0354	68	0,000	-7,1994	0,0354
69	-1500,500	-7,1821	-0,0337	69	0,500	-7,1821	0,0337
70	-1501,000	-7,1656	-0,0321	70	1,000	-7,1656	0,0321
71	-1501,500	-7,1500	-0,0304	71	1,500	-7,1500	0,0304
72	-1502,000	-7,1352	-0,0287	72	2,000	-7,1352	0,0287
73	-1502,500	-7,1213	-0,0271	73	2,500	-7,1213	0,0271
74	-1503,000	-7,1081	-0,0254	74	3,000	-7,1081	0,0254
75	-1503,500	-7,0959	-0,0237	75	3,5000	-7,0959	0,0237
76	-1504,000	-7,0844	-0,0221	76	4,000	-7,0844	0,0221

Σιδηροτροχιά 60E1 αριστερά				Σιδηροτροχιά 60E1 δεξιά			
Σημείο	y	z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
77	-1504,500	-7,0738	-0,0204	77	4,500	-7,0738	0,0204
78	-1505,000	-7,0640	-0,0187	78	5,000	-7,0640	0,0187
79	-1505,500	-7,0551	-0,0171	79	5,500	-7,0551	0,0171
80	-1506,000	-7,0470	-0,0154	80	6,000	-7,0470	0,0154
81	-1506,500	-7,0397	-0,0137	81	6,500	-7,0397	0,0137
82	-1507,000	-7,0332	-0,0121	82	7,000	-7,0332	0,0121
83	-1507,500	-7,0276	-0,0104	83	7,500	-7,0276	0,0104
84	-1508,000	-7,0228	-0,0087	84	8,000	-7,0228	0,0087
85	-1508,500	-7,0189	-0,0071	85	8,500	-7,0189	0,0071
86	-1509,000	-7,0158	-0,0054	86	9,000	-7,0158	0,0054
87	-1509,500	-7,0135	-0,0037	87	9,500	-7,0135	0,0037
88	-1510,000	-7,0120	-0,0021	88	10,000	-7,0120	0,0021
89	-1510,500	-7,0114	-0,0004	89	10,500	-7,0114	0,0004
90	-1511,000	-7,0117	0,0013	90	11,000	-7,0117	-0,0013
91	-1511,500	-7,0127	0,0029	91	11,500	-7,0127	-0,0029
92	-1512,000	-7,0146	0,0046	92	12,000	-7,0146	-0,0046
93	-1512,500	-7,0173	0,0063	93	12,500	-7,0173	-0,0063
94	-1513,000	-7,0209	0,0079	94	13,000	-7,0209	-0,0079
95	-1513,500	-7,0253	0,0096	95	13,500	-7,0253	-0,0096
96	-1513,710	-7,0273	0,0103	96	13,710	-7,0273	-0,010
97	-1514,000	-7,0324	0,0172	97	14,000	-7,0324	-0,0172
98	-1514,500	-7,0426	0,0235	98	14,500	-7,0426	-0,0235
99	-1515,000	-7,0559	0,0297	99	15,000	-7,0559	-0,0297
100	-1515,500	-7,0723	0,0360	100	15,500	-7,0723	-0,0360
101	-1516,000	-7,0919	0,0423	101	16,000	-7,0919	-0,0423
102	-1516,500	-7,1146	0,0485	102	16,500	-7,1146	-0,0485
103	-1517,000	-7,1405	0,0548	103	17,000	-7,1405	-0,0548
104	-1517,500	-7,1694	0,0611	104	17,500	-7,1694	-0,0611
105	-1518,000	-7,2016	0,0674	105	18,000	-7,2016	-0,0674
106	-1518,500	-7,2368	0,0737	106	18,500	-7,2368	-0,0737
107	-1519,000	-7,2752	0,0800	107	19,000	-7,2752	-0,0800
108	-1519,500	-7,3168	0,0863	108	19,500	-7,3168	-0,0863
109	-1520,000	-7,3616	0,0926	109	20,000	-7,3616	-0,0926
110	-1520,500	-7,4095	0,0990	110	20,500	-7,4095	-0,0990
111	-1521,000	-7,4605	0,1053	111	21,000	-7,4605	-0,1053
112	-1521,500	-7,5148	0,1117	112	21,500	-7,5148	-0,1117
113	-1522,000	-7,5722	0,1180	113	22,000	-7,5722	-0,1180
114	-1522,500	-7,6328	0,1244	114	22,500	-7,6328	-0,1244
115	-1523,000	-7,6966	0,1308	115	23,000	-7,6966	-0,1308
116	-1523,500	-7,7637	0,1373	116	23,500	-7,7637	-0,1373
117	-1524,000	-7,8339	0,1437	117	24,000	-7,8339	-0,1437
118	-1524,500	-7,9074	0,1502	118	24,500	-7,9074	-0,1502

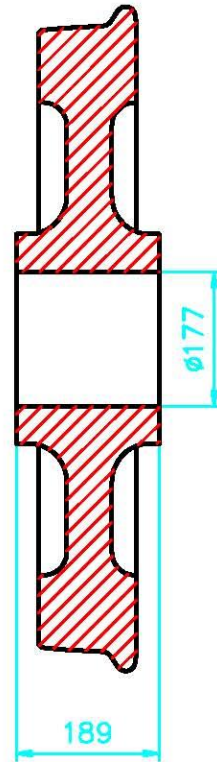
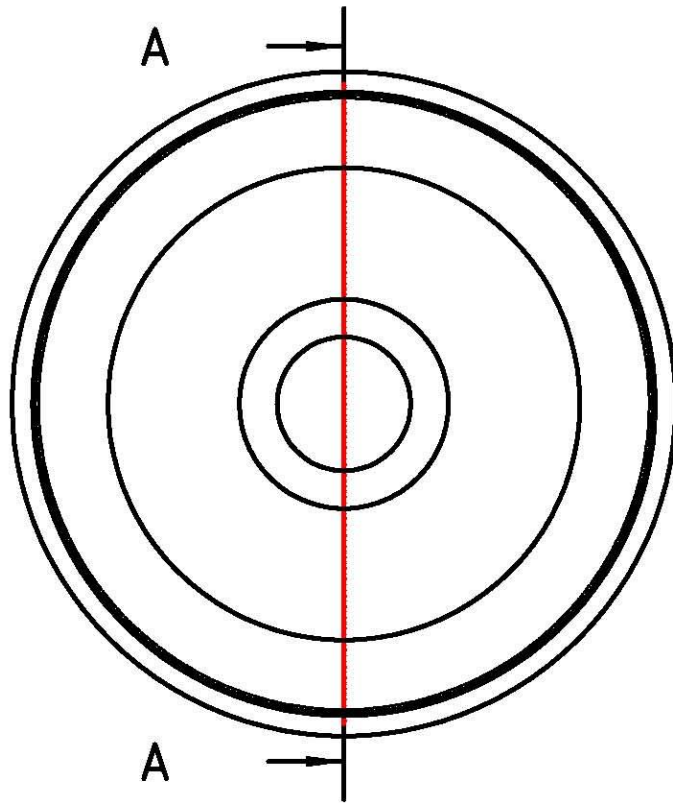
Σιδηροτροχιά 60E1 αριστερά				Σιδηροτροχιά 60E1 δεξιά			
Σημείο	y	z	tg	Σημείο	y	z	tg
	mm	mm			mm	mm	
119	-1525,000	-7,9841	0,1566	119	25,000	-7,9841	-0,1566
120	-1525,500	-8,0640	0,1631	120	25,500	-8,0640	-0,1631
121	-1526,000	-8,1472	0,1696	121	26,000	-8,1472	-0,1696
122	-1526,500	-8,2336	0,1762	122	26,500	-8,2336	-0,1762
123	-1527,000	-8,3233	0,1827	123	27,000	-8,3233	-0,1827
124	-1527,500	-8,4163	0,1893	124	27,500	-8,4163	-0,1893
125	-1528,000	-8,5126	0,1959	125	28,000	-8,5126	-0,1959
126	-1528,500	-8,6122	0,2025	126	28,500	-8,6122	-0,2025
127	-1529,000	-8,7151	0,2092	127	29,000	-8,7151	-0,2092
128	-1529,500	-8,8214	0,2158	128	29,500	-8,8214	-0,2158
129	-1529,508	-8,8232	0,2160	129	29,508	-8,8232	-0,2160

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

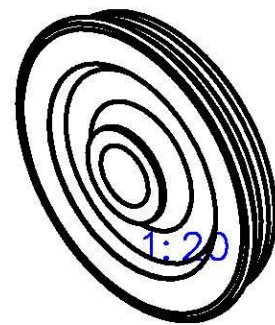
Κατασκευαστικά σχέδια πειραματικής διάταξης - ΗΣΑΠ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	8/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



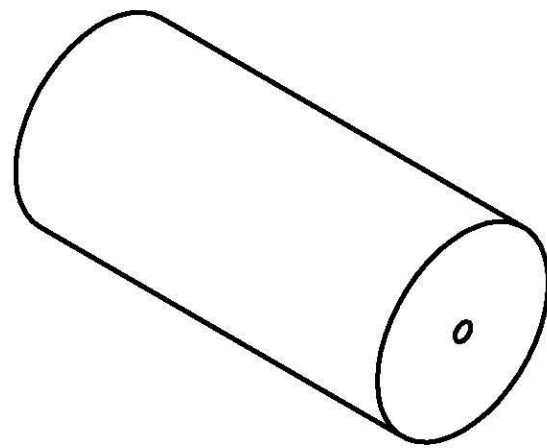
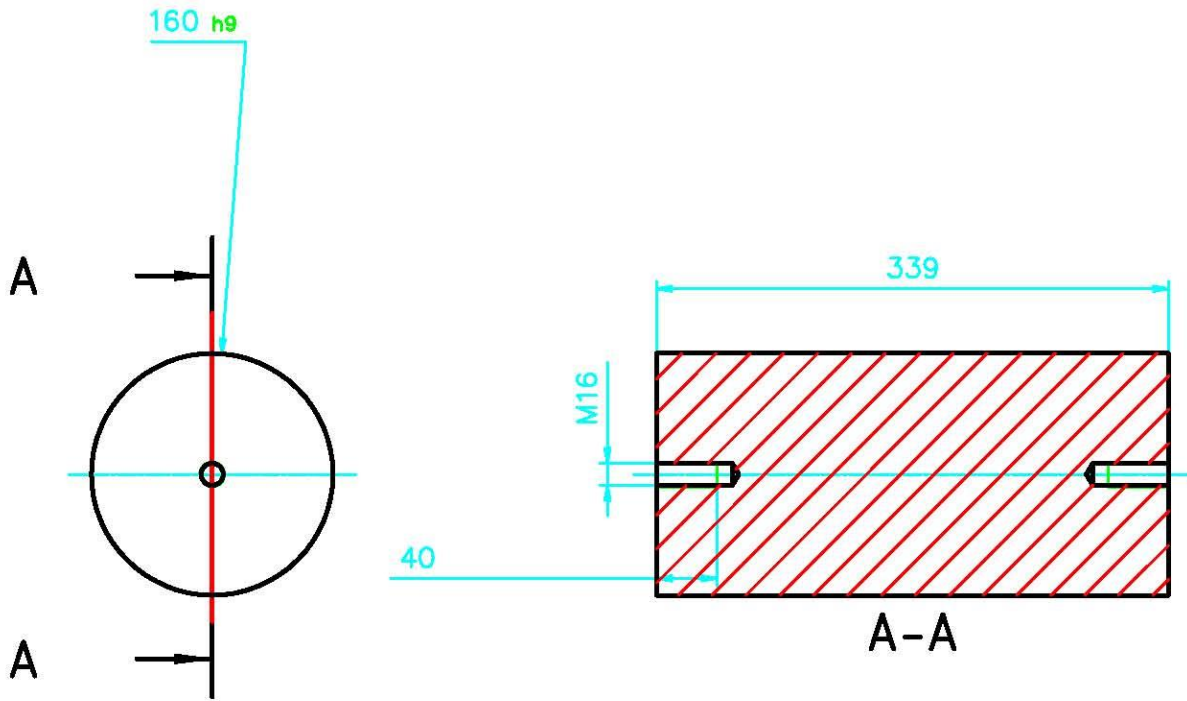
A-A



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 7/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΤΡΟΧΟΣ (ΜΟΝΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ)	
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	-		ΜΕΓΕΘΟΣ SIZE	ΑΝΑΘ. REV.
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT	-		Α4	
	ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH	-		ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	
				ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-001
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	ΣΕΛΙΔΑ SHEET
				c:\users\user\documents\ergasia emp\ ERGASIA EMP.DWG	
				1 / 1	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	8/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

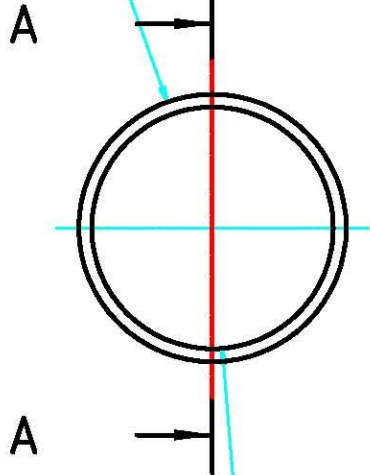


ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ	ΗΜΕΡ.- DATE 8/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS	
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE ΑΞΟΝΑΣ	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE 1:5
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.	
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37			100-002	-	
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT -			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ ERGASIA EMP.DWG	ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH					

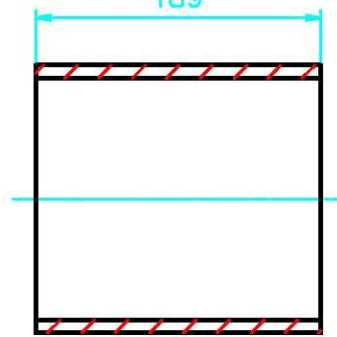
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	8/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

177 h9

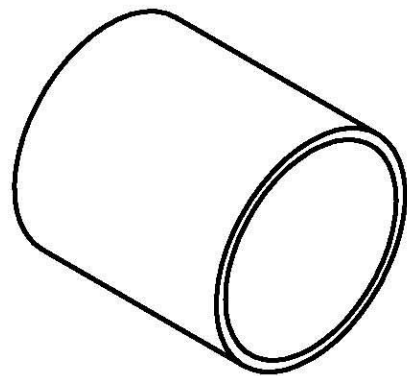


189



A-A

160 g9



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

ΣΧΕΔ. DSGN

ΟΝΟΜΑ - NAME

ΗΜΕΡ.- DATE

Π.Κ.

8/3/13



ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ
ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP
ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ
2 KONONOS PIRAEUS

ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

ΕΛΕΓΧ. CHECK

ΜΕΛΕΤ. ENGR

ΕΓΚΡ. APRVD

ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ.
DWG TITLE

ΚΛΙΜΑΚΑ
SCALE

ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES
ISO 2768 - mk

ΥΛΙΚΟ - MATERIAL

st 37

ΜΕΓΕΘΟΣ
SIZE

A 4

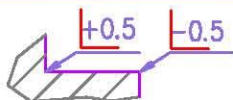
ΚΩΔ. ΑΡΙΘ.
CODE No.

ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ.
DWG No.

100-003

ΑΝΑΘ.
REV.

ΣΕΛΙΔΑ
SHEET 1/1



3.2 ✓

(1.6 ✓)

ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT

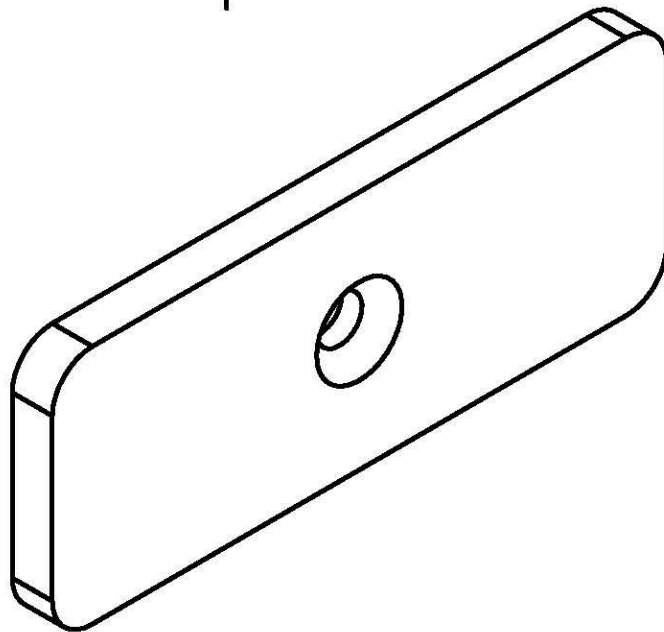
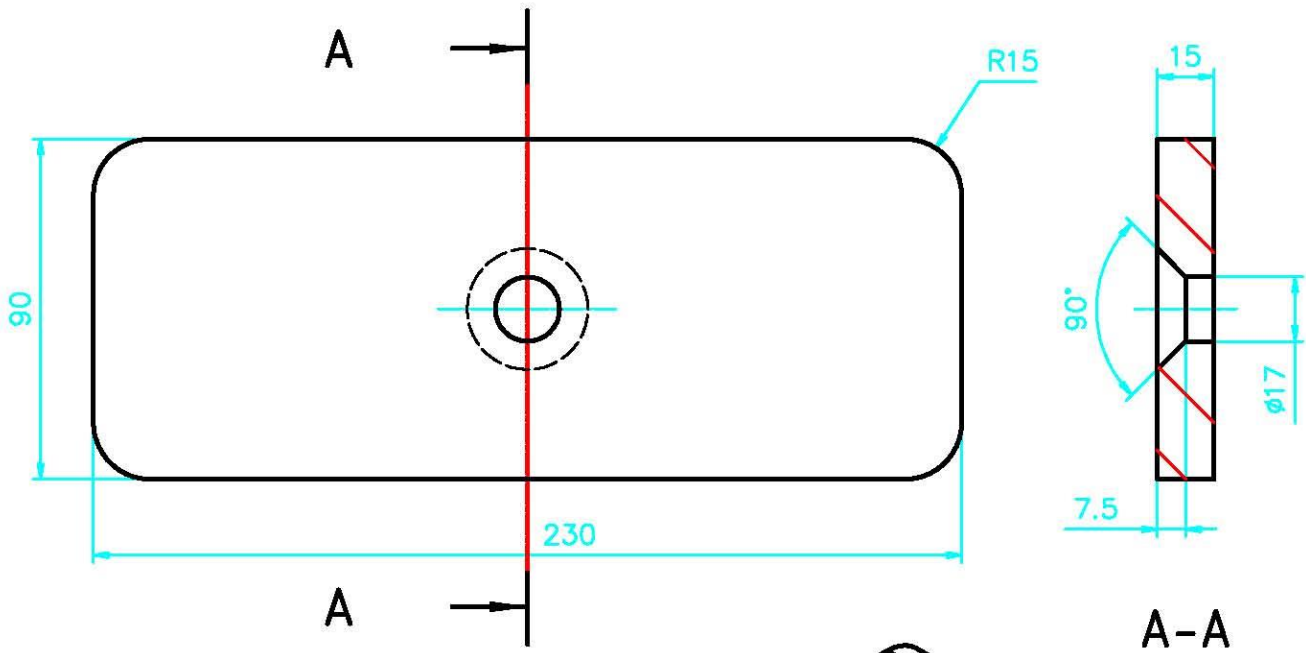
ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH

ΑΡΧΕΙΟ CAD
CAD FILE

C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\
ERGASIA EMP.DWG

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

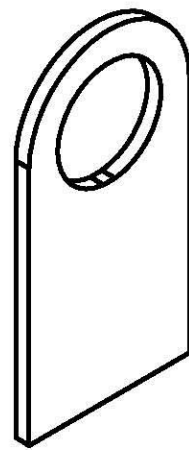
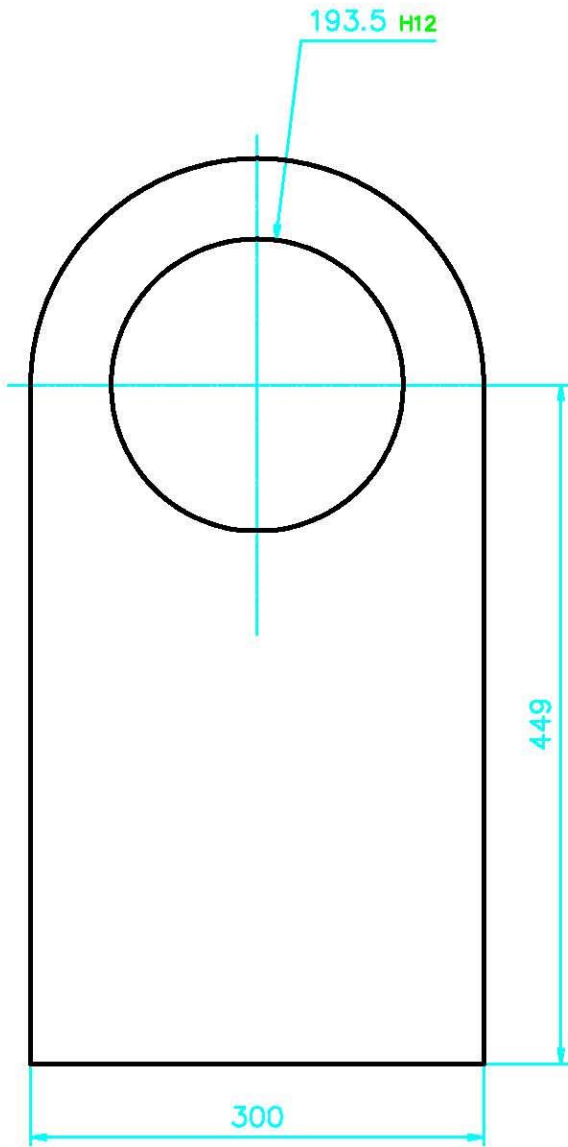
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	8/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Γ.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 8/3/13			ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK					
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΣΦΙΚΤΗΡΑΣ ΑΞΟΝΑ	1:2	
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT -				ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-004	-
	ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ERGASIA EMP.DWG		ΣΕΛΙΔΑ SHEET	1/1	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	9/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

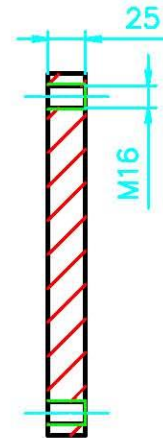
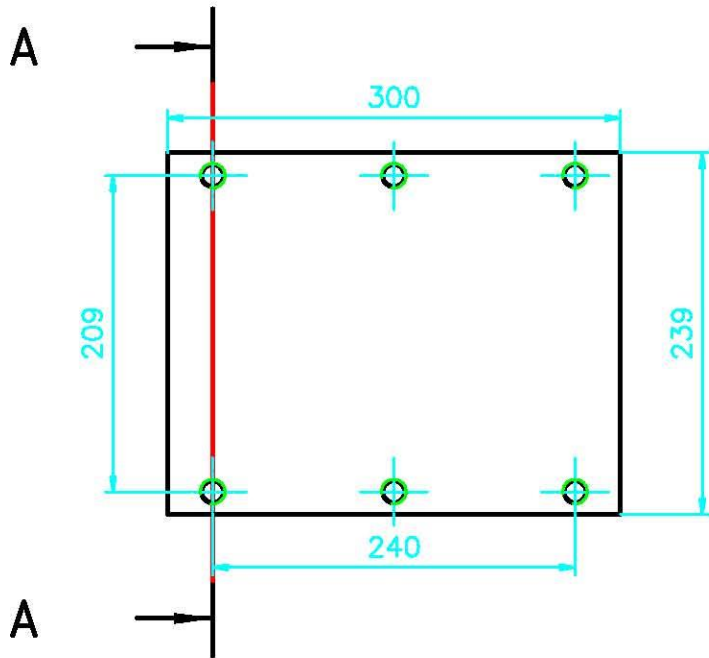


1:10

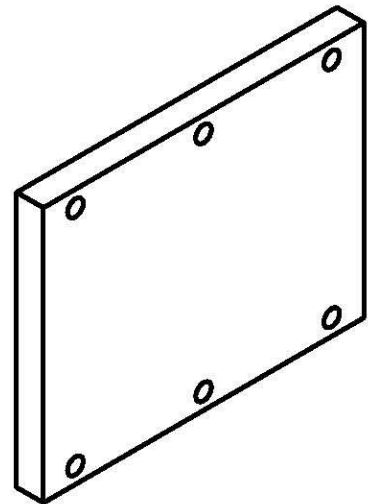
ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 9/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK			
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΠΛΑΪΝΗ ΠΛΑΚΑ ΦΟΡΕΑ 100-005	1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37 25mm	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT -			
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ FOREAS ASSY.DWG
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1

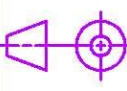

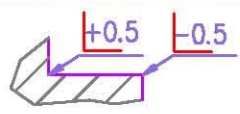
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	9/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



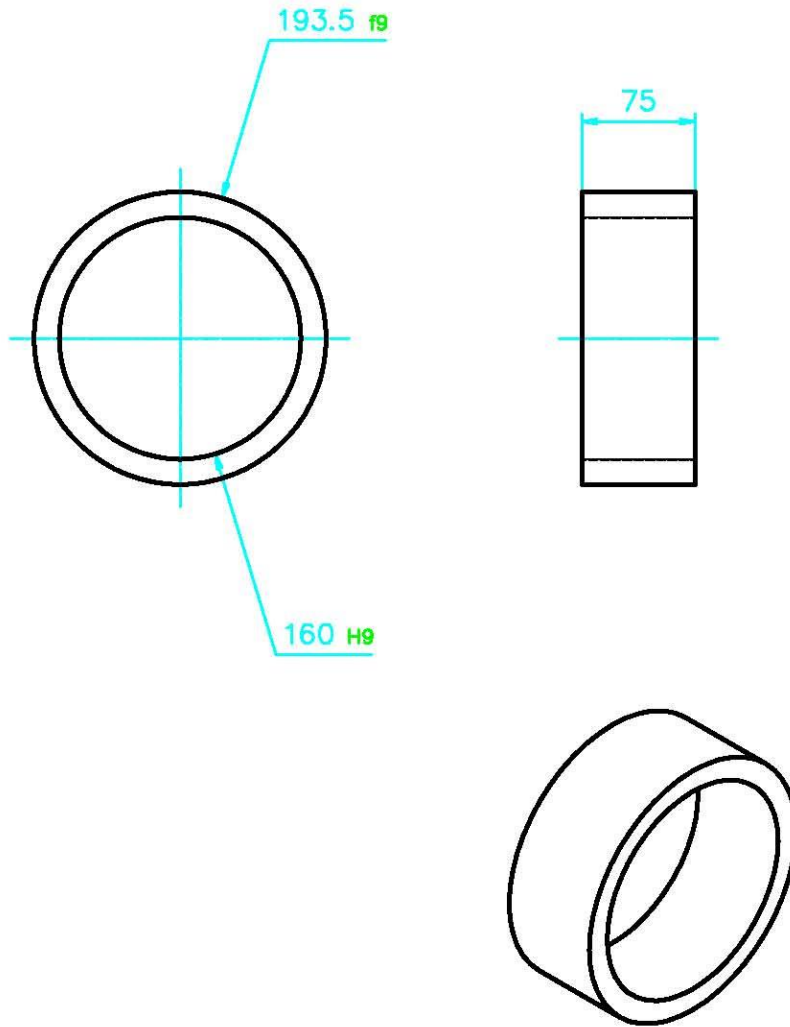
A-A



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 9/3/13	 	ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK			
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΕΠΑΝΩ ΠΛΑΚΑ ΦΟΡΕΑ	1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37 25mm	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT -			
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.
				100-006	-
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	ΣΕΛΙΔΑ SHEET
				C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ FOREAS ASSY.DWG	1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

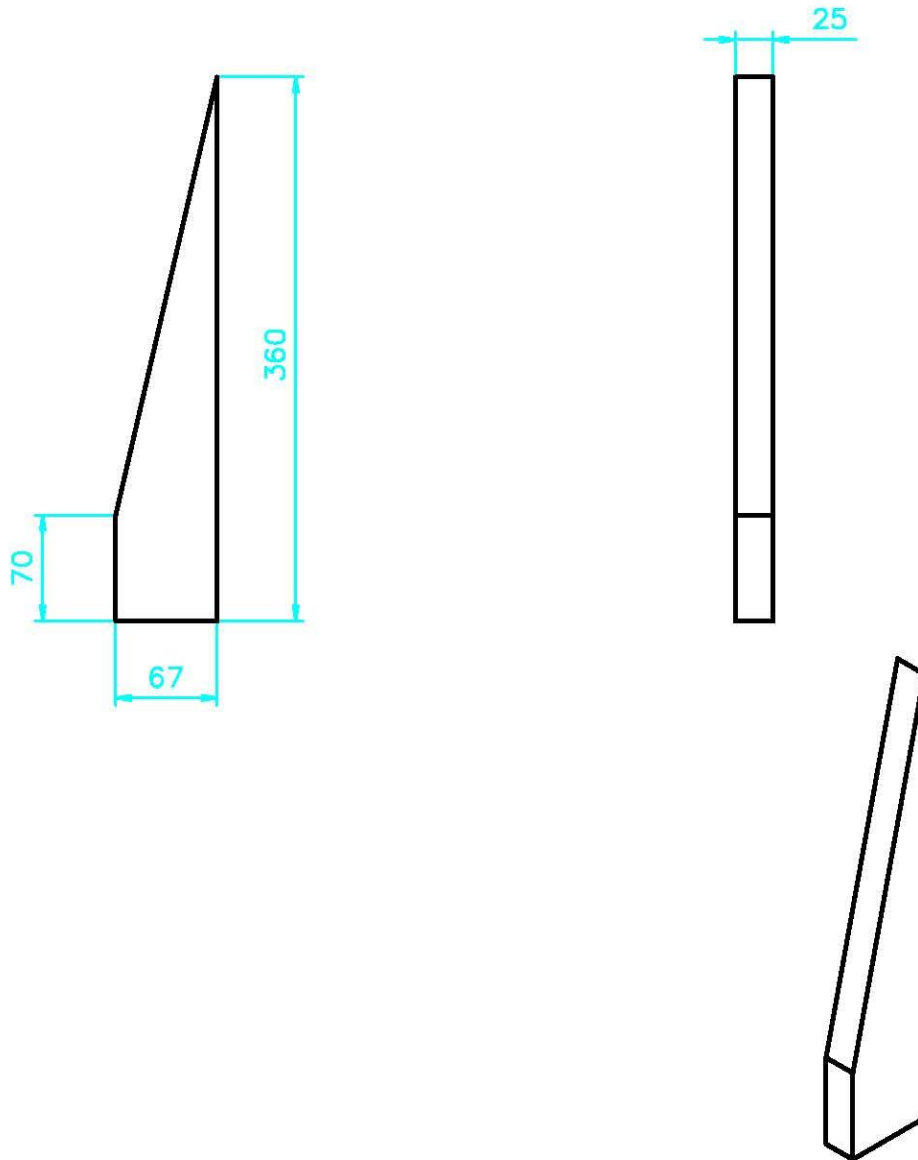
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	9/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



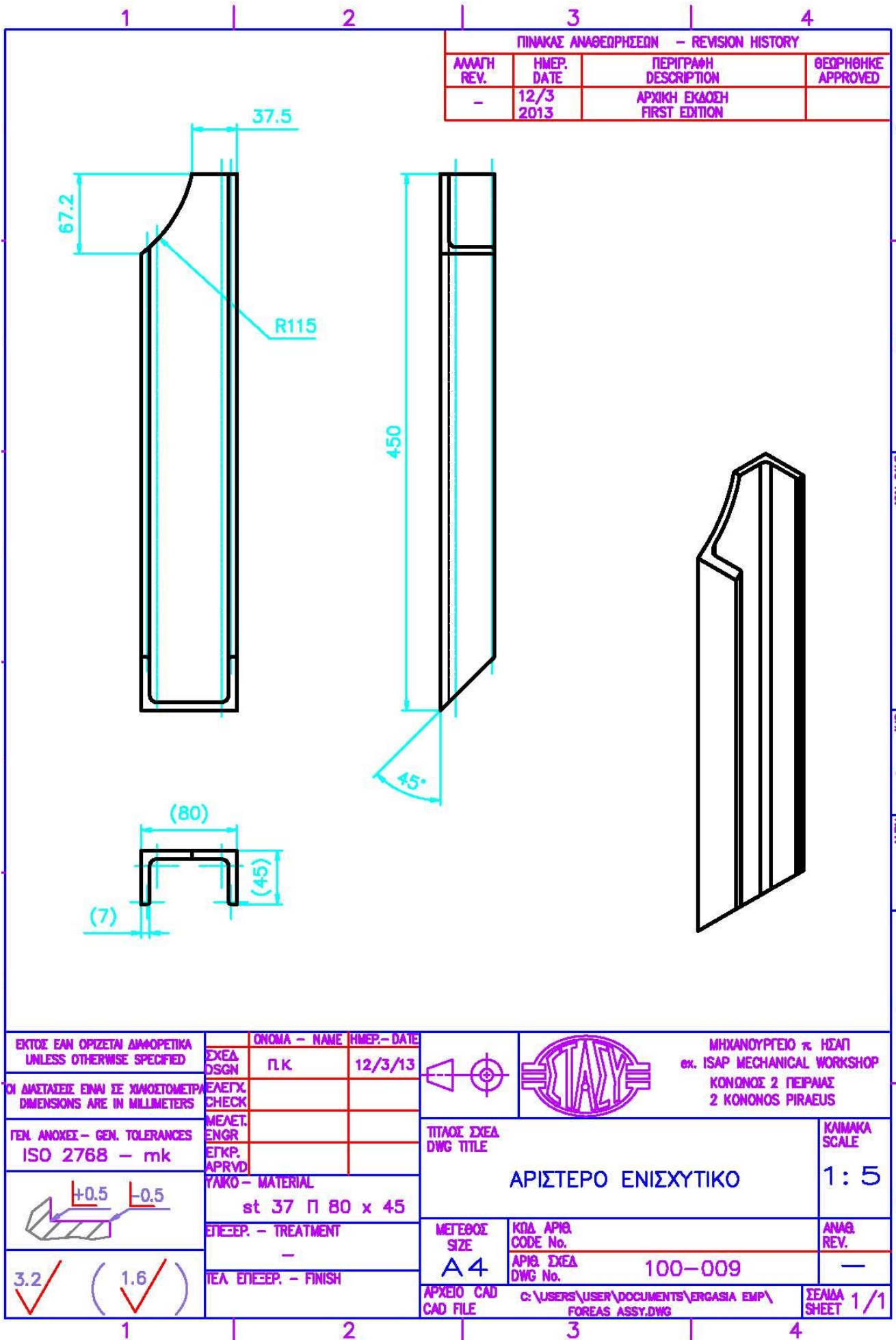
ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 9/3/13			ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΥΠΟΔΟΧΗ ΑΞΟΝΑ ΦΟΡΕΑ		1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT -	ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	ΑΝΑΘ. REV.	
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-007	
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ FOREAS ASSY.DWG	ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	12/8 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 12/8/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK			
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΜΕΣΑΙΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37 25 mm	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT	-		
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.
				100-008	-
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	ΣΕΛΙΔΑ SHEET
				C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ FOREAS ASSY.DWG	1/1




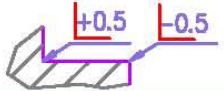

A

B

ΑΡΙΘ ΣΧΕΔ
DWG No. 100-009
ΣΕΛ
SH. 1/1
ΑΝΑΘ
REV. -

E

F

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΛΛΟΘΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 12/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ κ. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΟΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 ΚΟΝΟΝΟΣ PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ DWG TITLE
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	1:5
	ΕΓΚΡ. APRVD				
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	st 37 Π 80 x 45		A4	
	ΕΠΙΞΕΡ. - TREATMENT	-		ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	100-009
	ΤΕΛ. ΕΠΙΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ FOREAS ASSY.DWG
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1

1

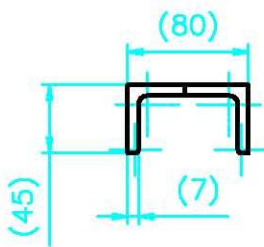
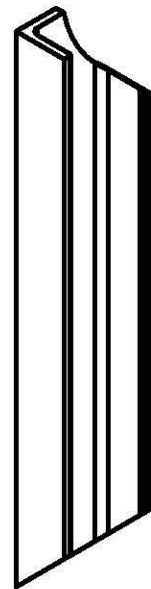
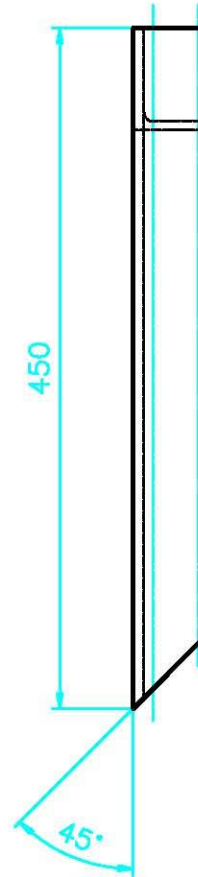
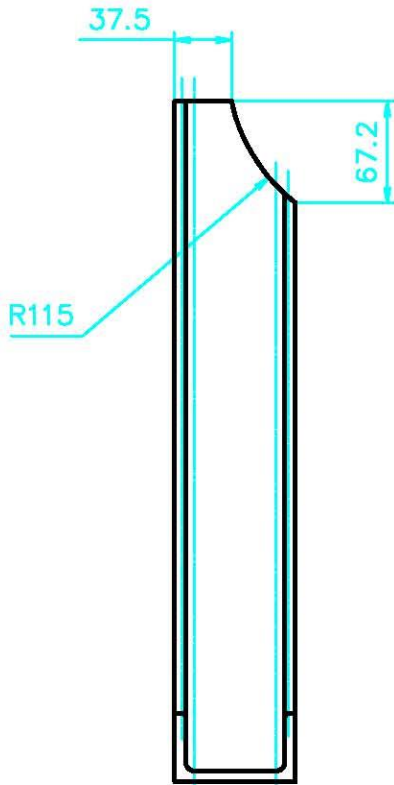
2

3

4

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

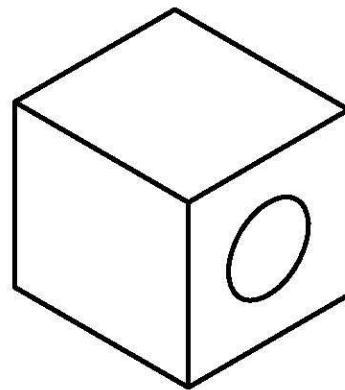
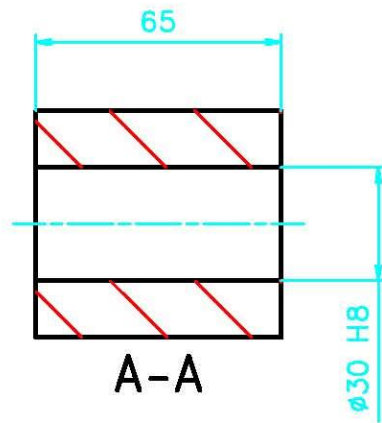
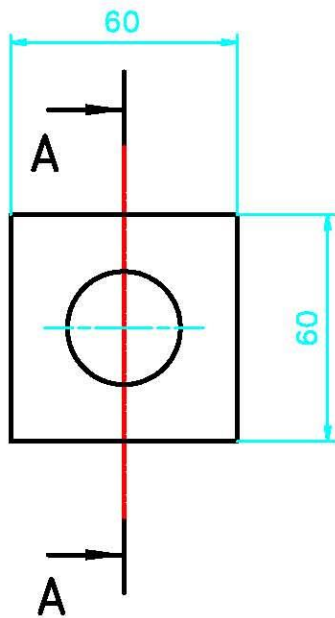
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	12/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 12/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS	
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK					
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΔΕΞΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	1:5	
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37 Π 80 x 45	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT	-			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.	
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ FOREAS ASSY.DWG	ΣΕΛΙΔΑ SHEET

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

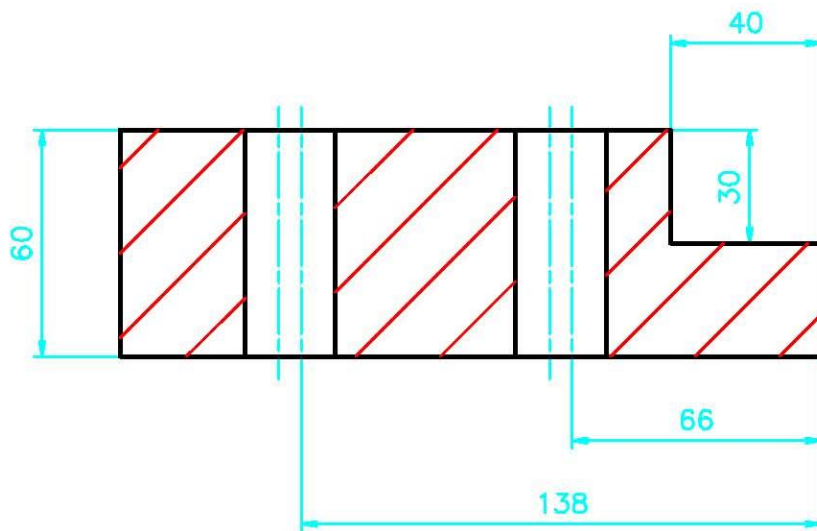
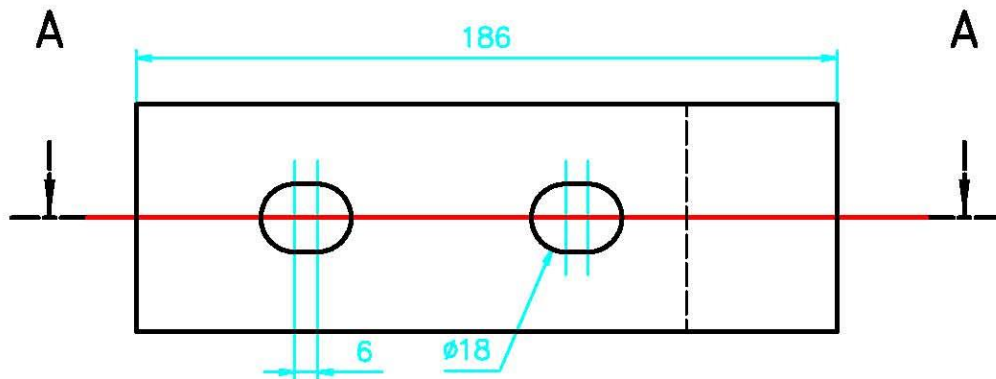
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	12/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



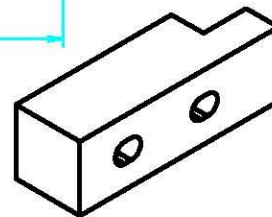
ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 12/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS	
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK					
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΕΔΡΑΝΟ	1:2	
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT	-			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.	
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ FOREAS ASSY.DWG	ΣΕΛΙΔΑ SHEET
						1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΔΙΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



A-A

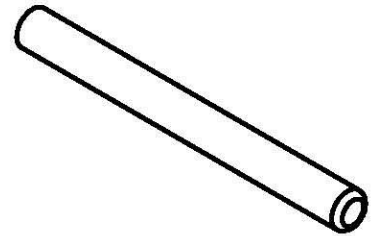
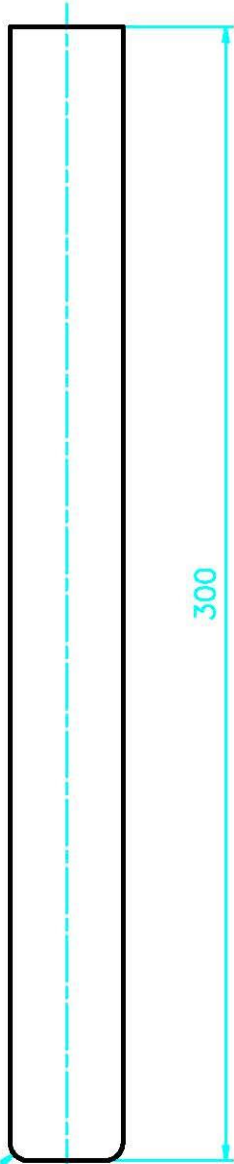
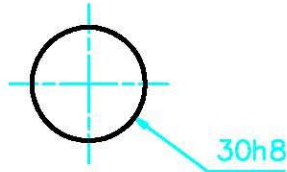


1:5

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE ΒΑΣΗ
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT		100-012	-
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ OR8OSTATHS3D.DWG	ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

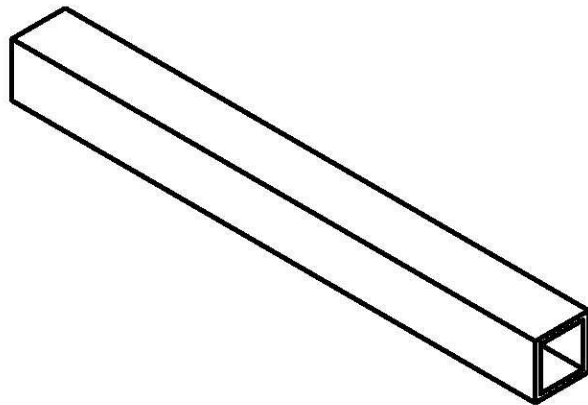
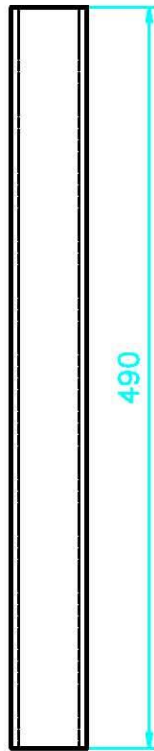
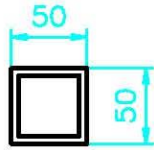


1:5

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK			
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE ΚΟΛΩΝΑ	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE 1:2
	ΕΓΚΡ. APRVD				
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A4	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT				ΑΝΑΘ. REV.
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH				100-013
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ OR80STATHS3D.DWG
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET
					1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

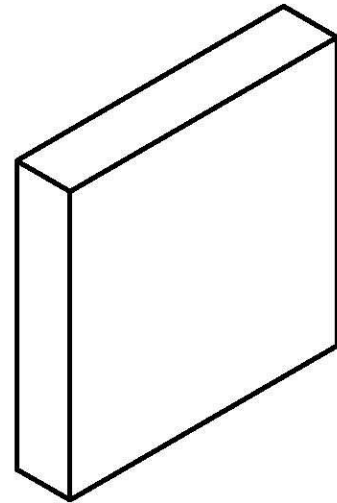
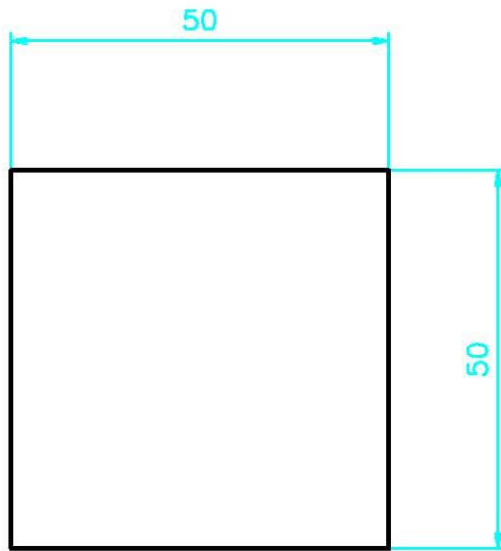
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
	ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK			
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ	1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL ΚΟΙΛΟΔΟΚΟΣ 50X50mm	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	ΑΝΑΘ. REV.
				100-014	-
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	ΣΕΛΙΔΑ SHEET
				C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ OR8OSTATHS3D.DWG	1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

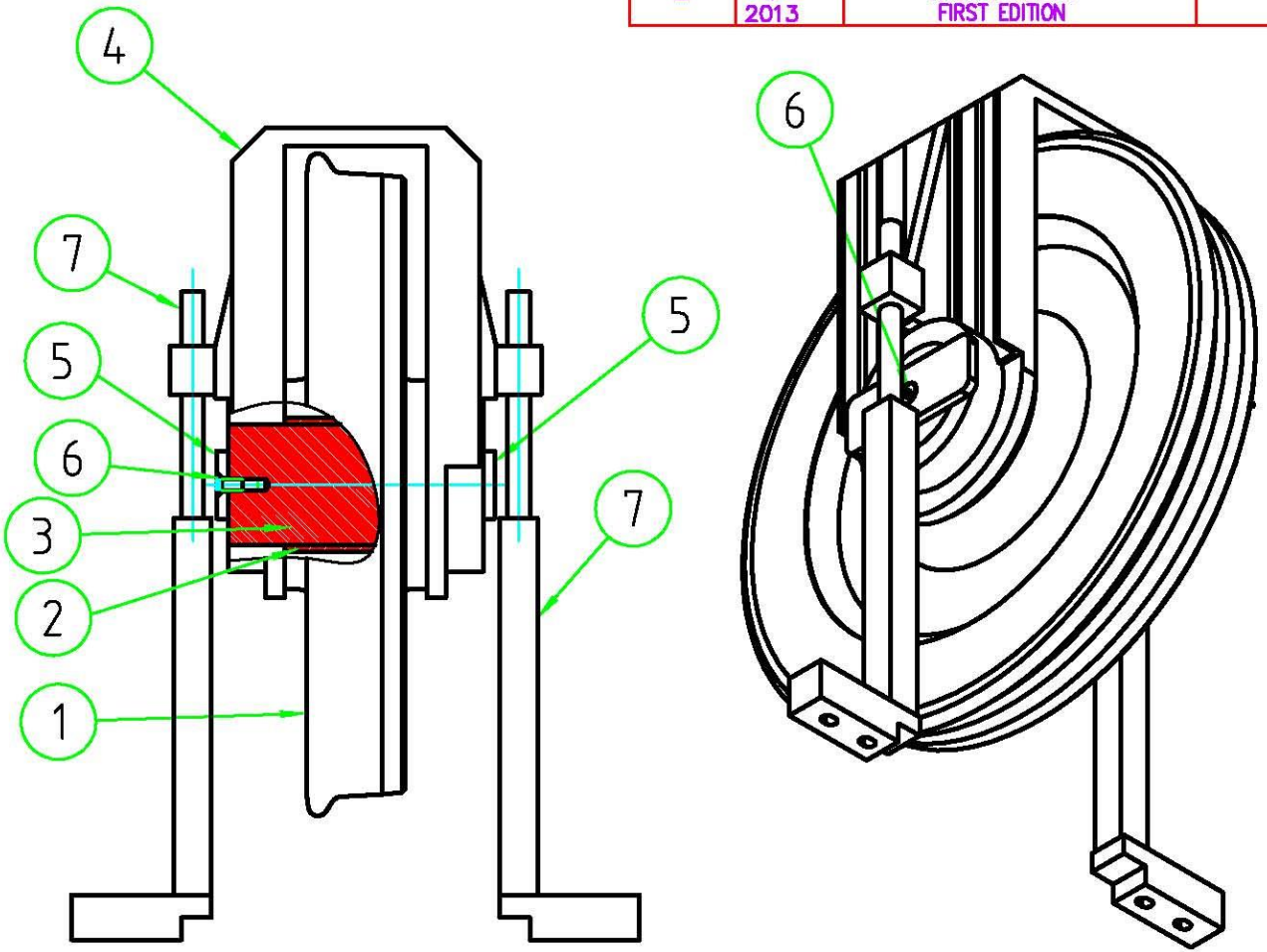
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13			ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK					
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE	
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΠΡΟΣΘΗΚΗ		1 : 1
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL st 37	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT				
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-015	
ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE				C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ OR8OSTATHS3D.DWG		ΣΕΛΙΔΑ SHEET 1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΔΙΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



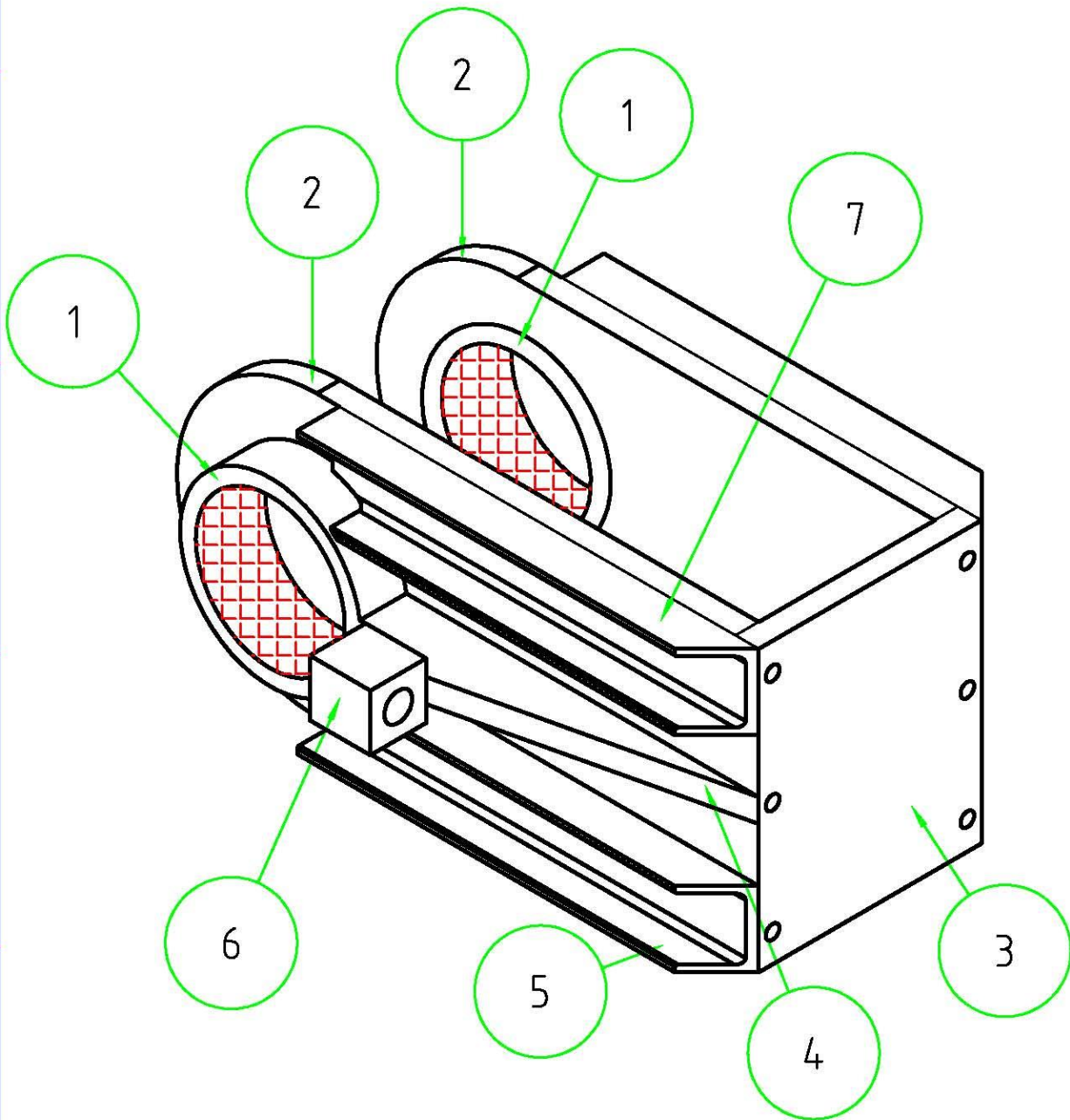
7	100-103	ΟΡΘΟΣΤΑΤΗΣ	2	
6	-	ΚΟΧΛΙΑΣ ΑΛΕΝ ΦΡΕΖΑΤΟΣ Μ16Χ30	2	
5	100-004	ΣΦΙΚΤΗΡΑΣ ΑΞΟΝΑ	2	
4	100-102	ΦΟΡΕΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	1	
3	100-002	ΑΞΟΝΑΣ	1	
2	100-003	ΔΑΚΤΥΛΙΔΙ	1	
1	100-001	ΤΡΟΧΟΣ	1	
A/A ITEM	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ DWG No.	ΟΝΟΜΑΣΙΑ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ NOMENCLATURE - DESCRIPTION	ΠΟΣΟΤ. QTY	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ REMARKS

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ - PARTS LIST

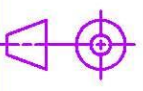

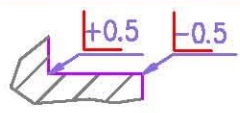
ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	1:10
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL			ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE	Α 4
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	
	ΠΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-101
				ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP.DWG
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET
					1/1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	13/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



ΣΗΜ: Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ  ΔΕΝ ΧΡΩΜΑΤΙΖΟΝΤΑΙ

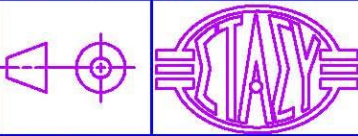
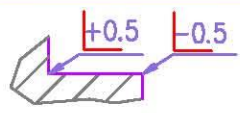

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME	ΗΜΕΡ.- DATE	 	ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS	
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK	Π.Κ.	13/3/13		ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΦΟΡΕΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ		1:5
	ΕΓΚΡ. APRVD					
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	-		Α 4	ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-102
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ FOREAS FORTISHS.DWG	
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH				ΣΕΛΙΔΑ SHEET	1/3
	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ					

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	13/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

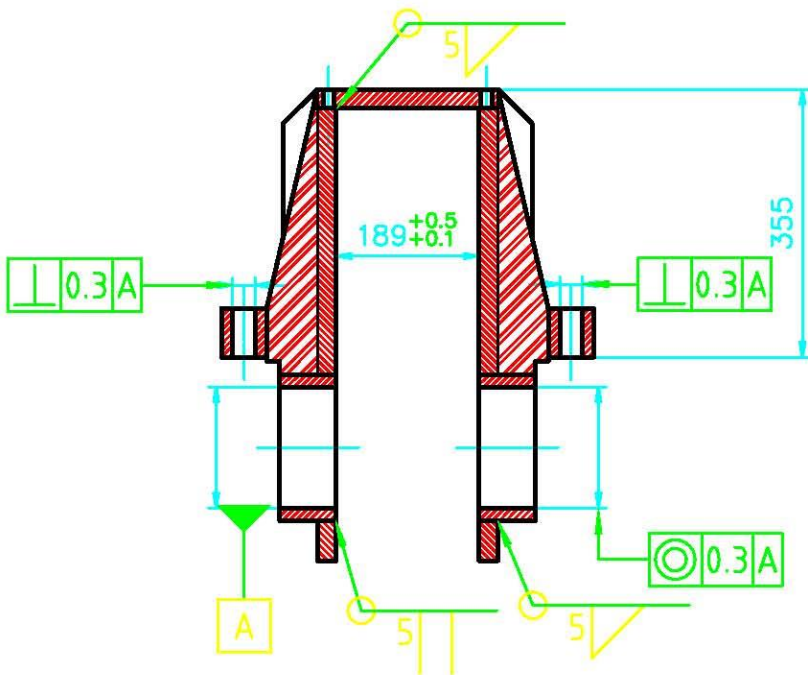
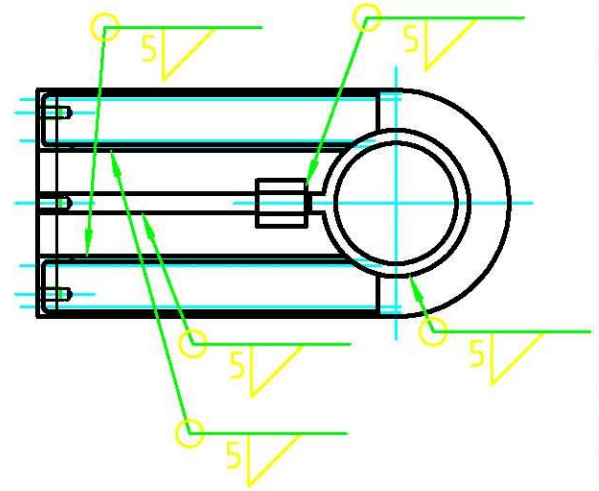
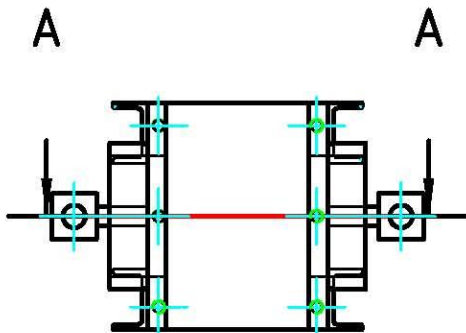
7	100-009	ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	2	
6	100-011	ΕΔΡΑΝΟ	2	
5	100-010	ΔΕΞΙ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	2	
4	100-008	ΜΕΣΑΙΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ	2	
3	100-006	ΕΠΑΝΩ ΠΛΑΚΑ ΦΟΡΕΑ	1	
2	100-005	ΠΑΪΝΗ ΠΛΑΚΑ ΦΟΡΕΑ	2	
1	100-007	ΥΠΟΔΟΧΗ ΑΞΟΝΑ ΦΟΡΕΑ	2	
A/A ITEM	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ DWG No.	ΟΝΟΜΑΣΙΑ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ NOMENCLATURE - DESCRIPTION	ΠΟΣΟΤ. QTY	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ REMARKS

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ - PARTS LIST

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	Π.Κ.	13/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE ΦΟΡΕΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE 1:5
	ΕΓΚΡ. APRVD				
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	-		ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			A4	ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH				100-102
	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ FOREAS FORTISHS.DWG
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET
					2/3

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	13/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

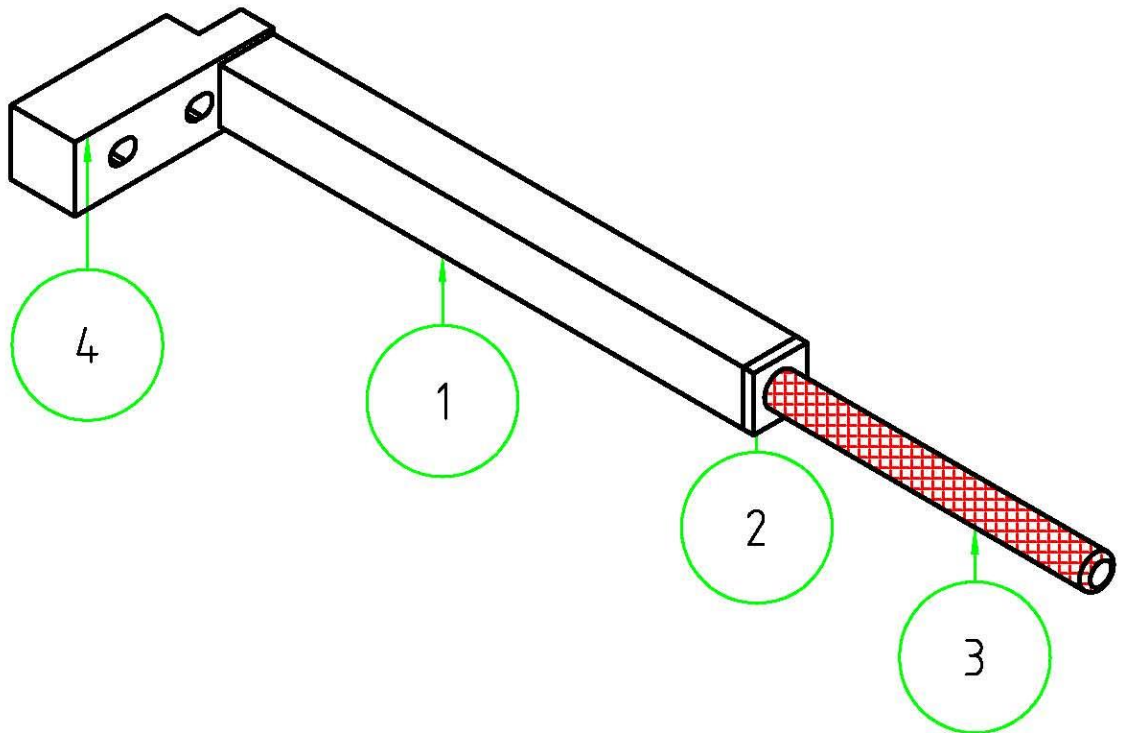


A-A

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 13/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS	
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK	ΜΕΛΕΤ. ENGR		ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΕΓΚΡ. APRVD	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	ΦΟΡΕΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ		1:10
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH	ΜΕΤΕΘΟΣ SIZE A 4	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	ΑΝΑΘ. REV.
	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-102
	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\FOREAS FORTISHS.DWG			ΣΕΛΙΔΑ SHEET	3/3

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	



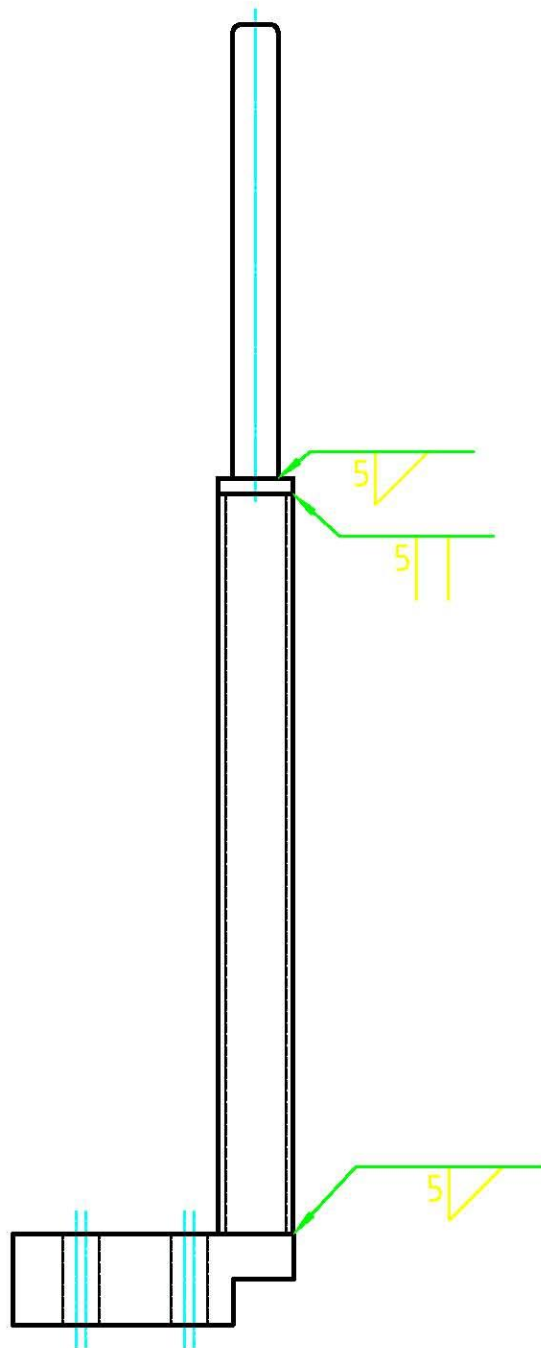
4	100-012	ΒΑΣΗ	1	
3	100-013	ΚΟΛΩΝΑ	1	
2	100-015	ΠΡΟΣΘΗΚΗ	1	
1	100-014	ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ	1	
A/A ITEM	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ DWG No.	ΟΝΟΜΑΣΙΑ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ NOMENCLATURE - DESCRIPTION	ΠΟΣΟΤ. QTY	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ REMARKS

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ - PARTS LIST

ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME	ΗΜΕΡ.- DATE		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK	Π.Κ.	19/3/13		
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE	ΚΛΙΜΑΚΑ SCALE
	ΕΓΚΡ. APRVD			ΟΡΘΟΣΤΑΤΗΣ	1:5
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL				
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			ΜΕΓΕΘΟΣ SIZE	ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.
3.2 ✓ (1.6 ✓)	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			Α4	ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.
	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	100-103
				C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ERGASIA EMP\ OROSTATHS3D.DWG	
					ΣΕΛΙΔΑ SHEET
					1/2

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - REVISION HISTORY

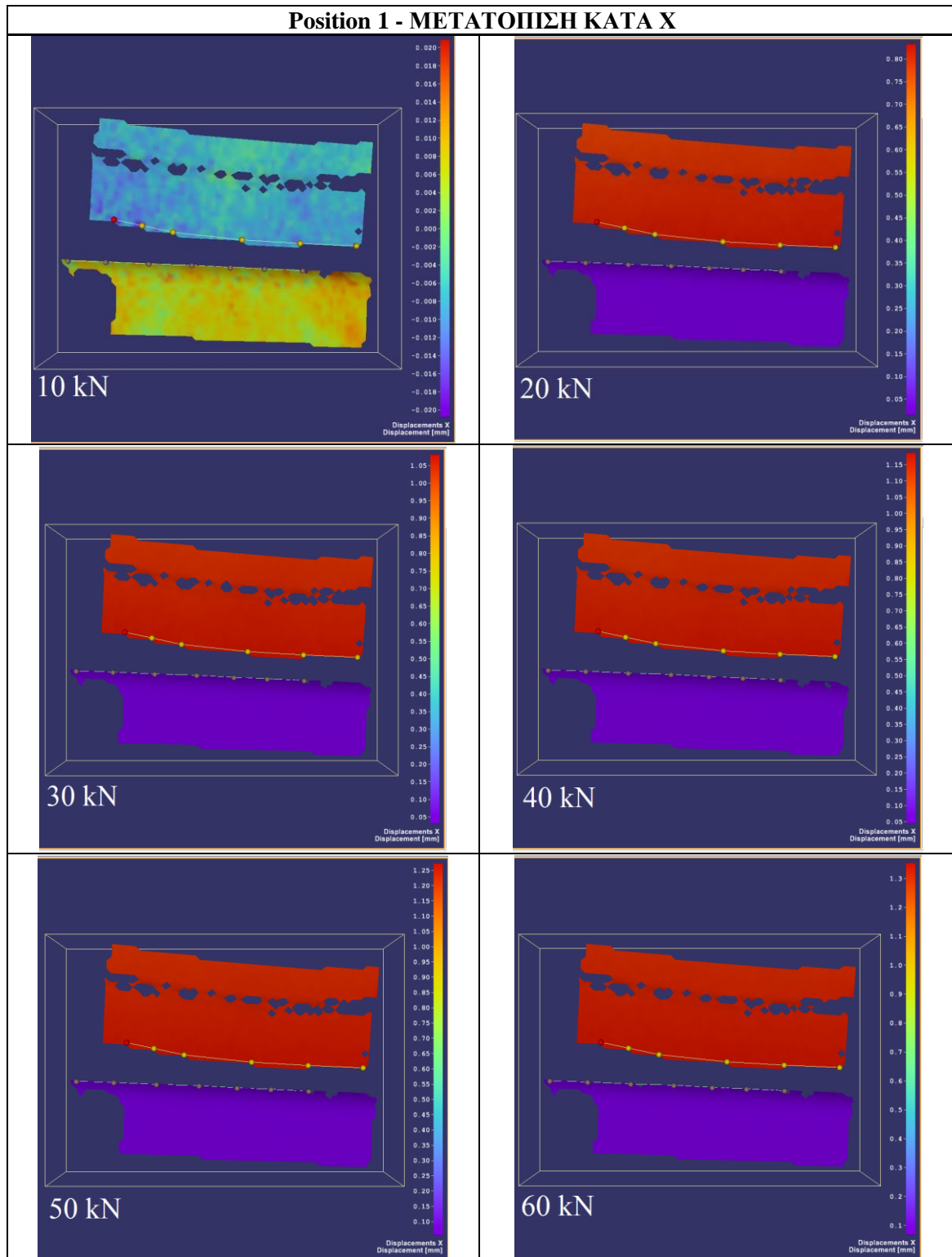
ΑΛΛΑΓΗ REV.	ΗΜΕΡ. DATE	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ DESCRIPTION	ΘΕΩΡΗΘΗΚΕ APPROVED
-	19/3 2013	ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ FIRST EDITION	

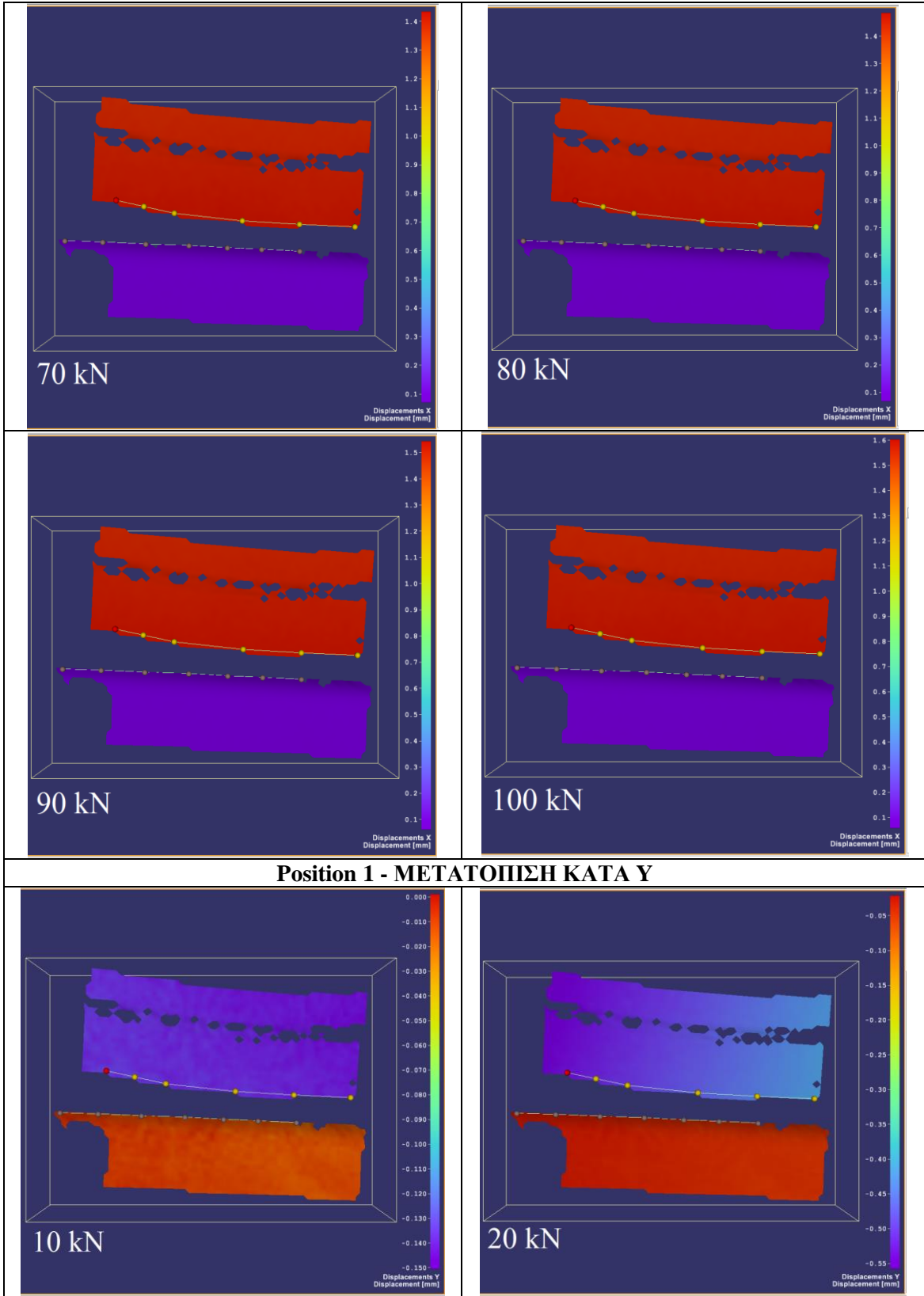


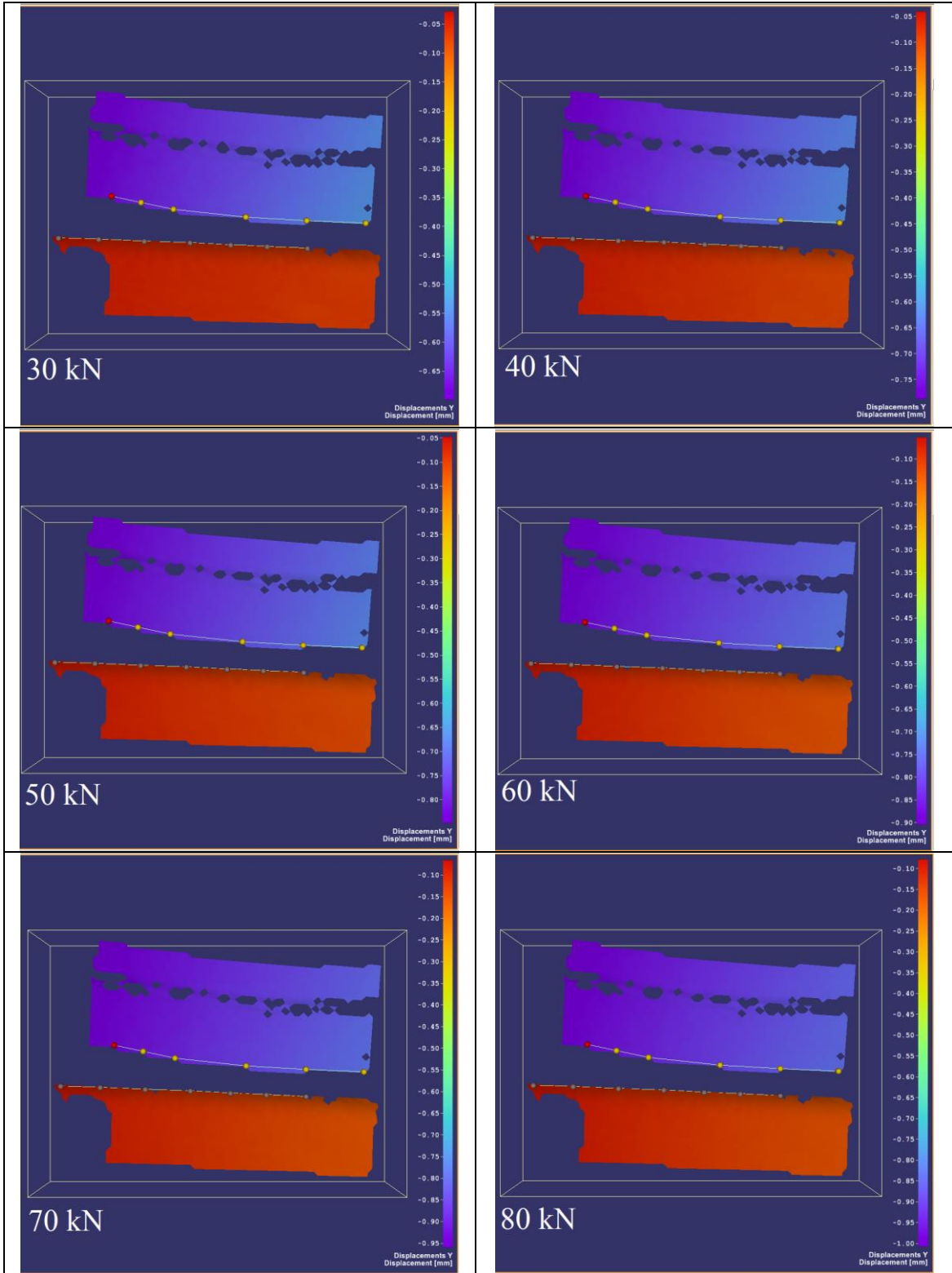
ΕΚΤΟΣ ΕΑΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	ΣΧΕΔ. DSGN	ΟΝΟΜΑ - NAME Π.Κ.	ΗΜΕΡ.- DATE 19/3/13		ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ π. ΗΣΑΠ ex. ISAP MECHANICAL WORKSHOP ΚΟΝΩΝΟΣ 2 ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2 KONONOS PIRAEUS
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΑ DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ΕΛΕΓΧ. CHECK				ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΕΔ. DWG TITLE
ΓΕΝ. ΑΝΟΧΕΣ - GEN. TOLERANCES ISO 2768 - mk	ΜΕΛΕΤ. ENGR			ΟΡΘΟΣΤΑΤΗΣ 1:5	
	ΕΓΚΡ. APRVD				
	ΥΛΙΚΟ - MATERIAL	-		Α 4	-
	ΕΠΕΞΕΡ. - TREATMENT			ΚΩΔ. ΑΡΙΘ. CODE No.	
	ΤΕΛ. ΕΠΕΞΕΡ. - FINISH			ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. DWG No.	100-103
	ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ			ΑΡΧΕΙΟ CAD CAD FILE	C:\USERS\USER\DOCUMENTS\ΕΡΓΑΣΙΑ EMP\ ORΘOSTATHS3D.DWG
				ΣΕΛΙΔΑ SHEET	2/2

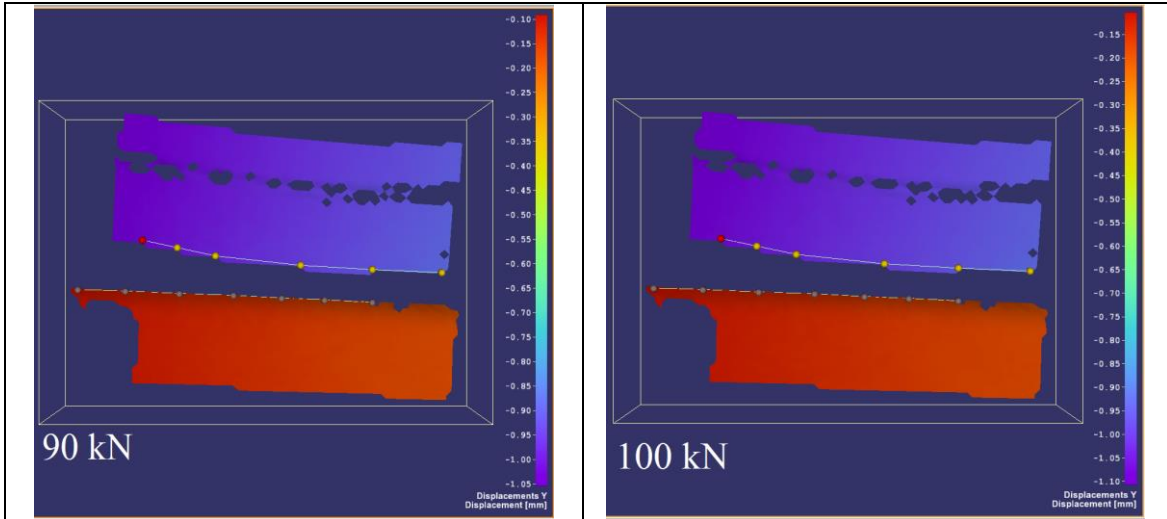
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Χρωματοκλίμακα απεικόνισης μετατοπίσεων κατά x, y και z ανά τιμή φορτίου στις θέσεις Position 1, 2, 3 και 5

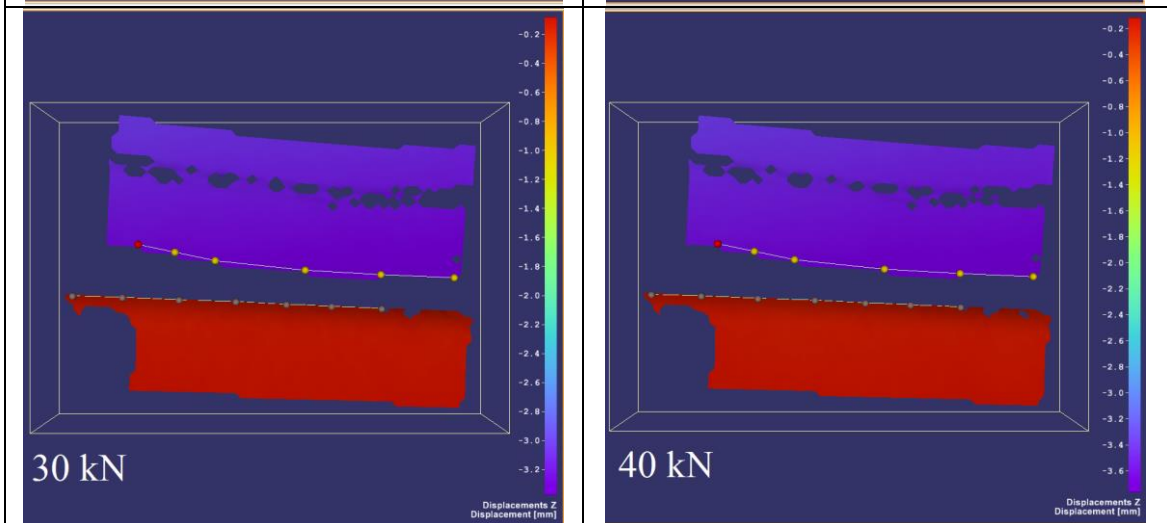
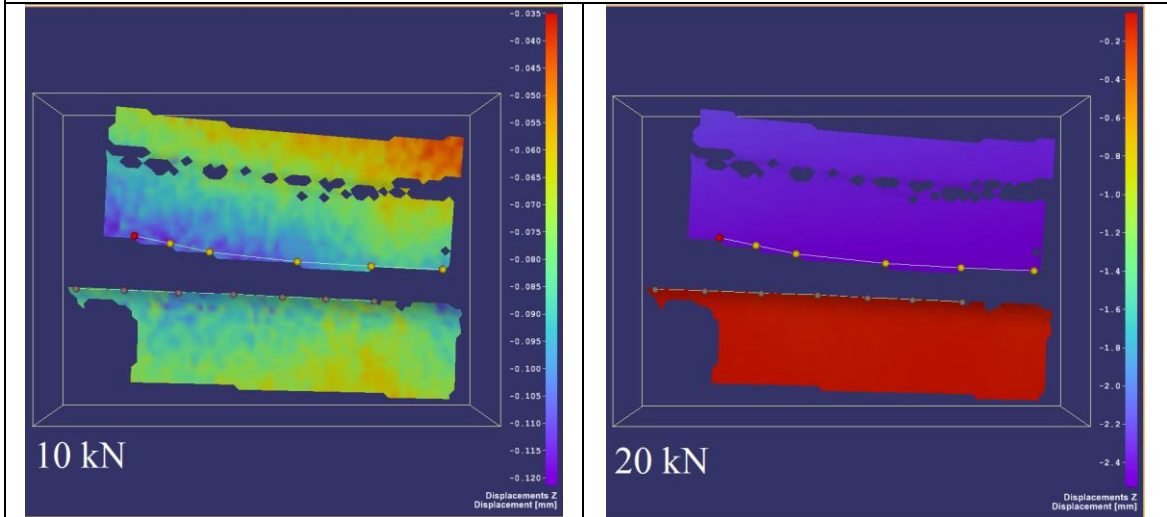


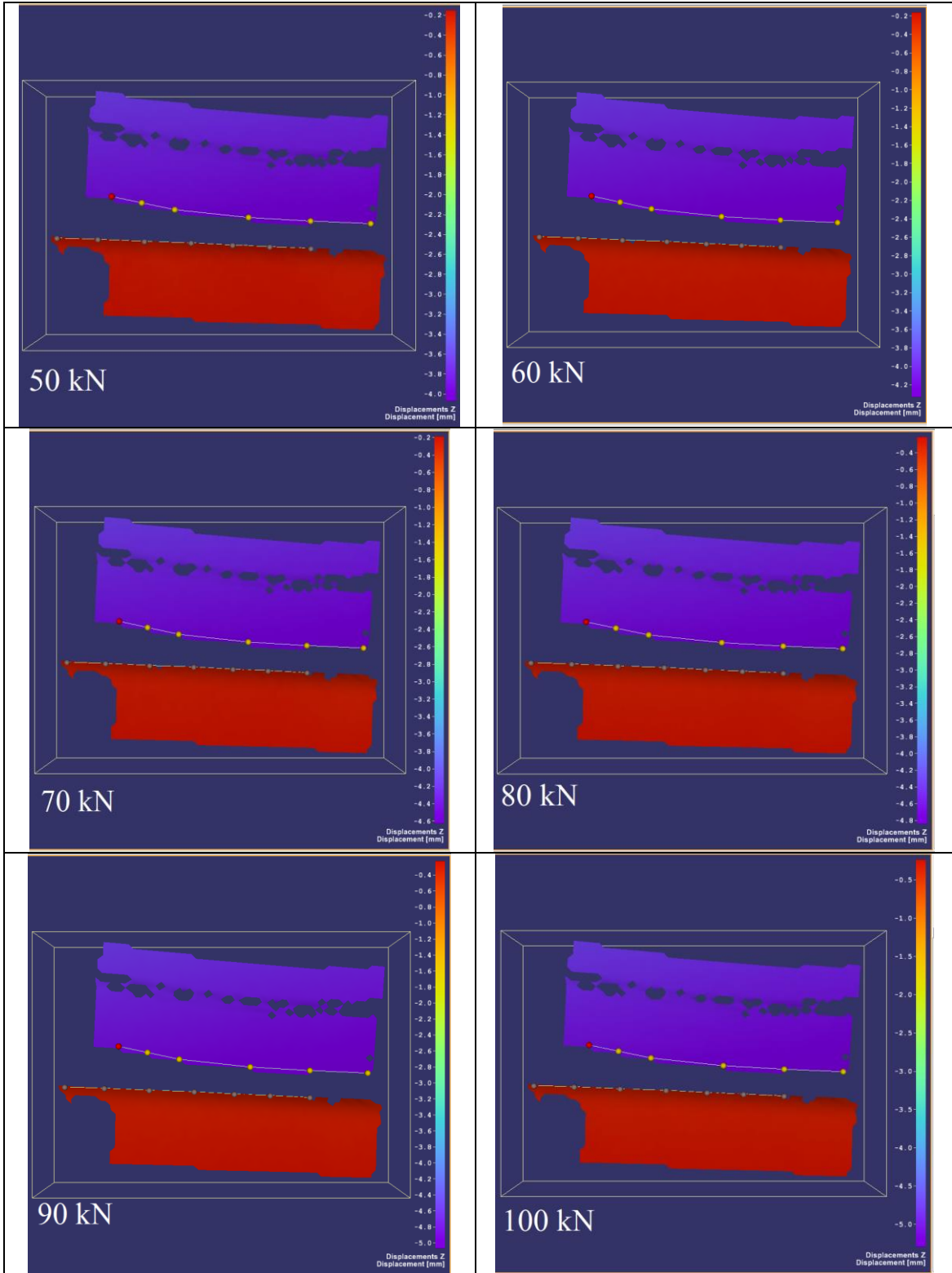




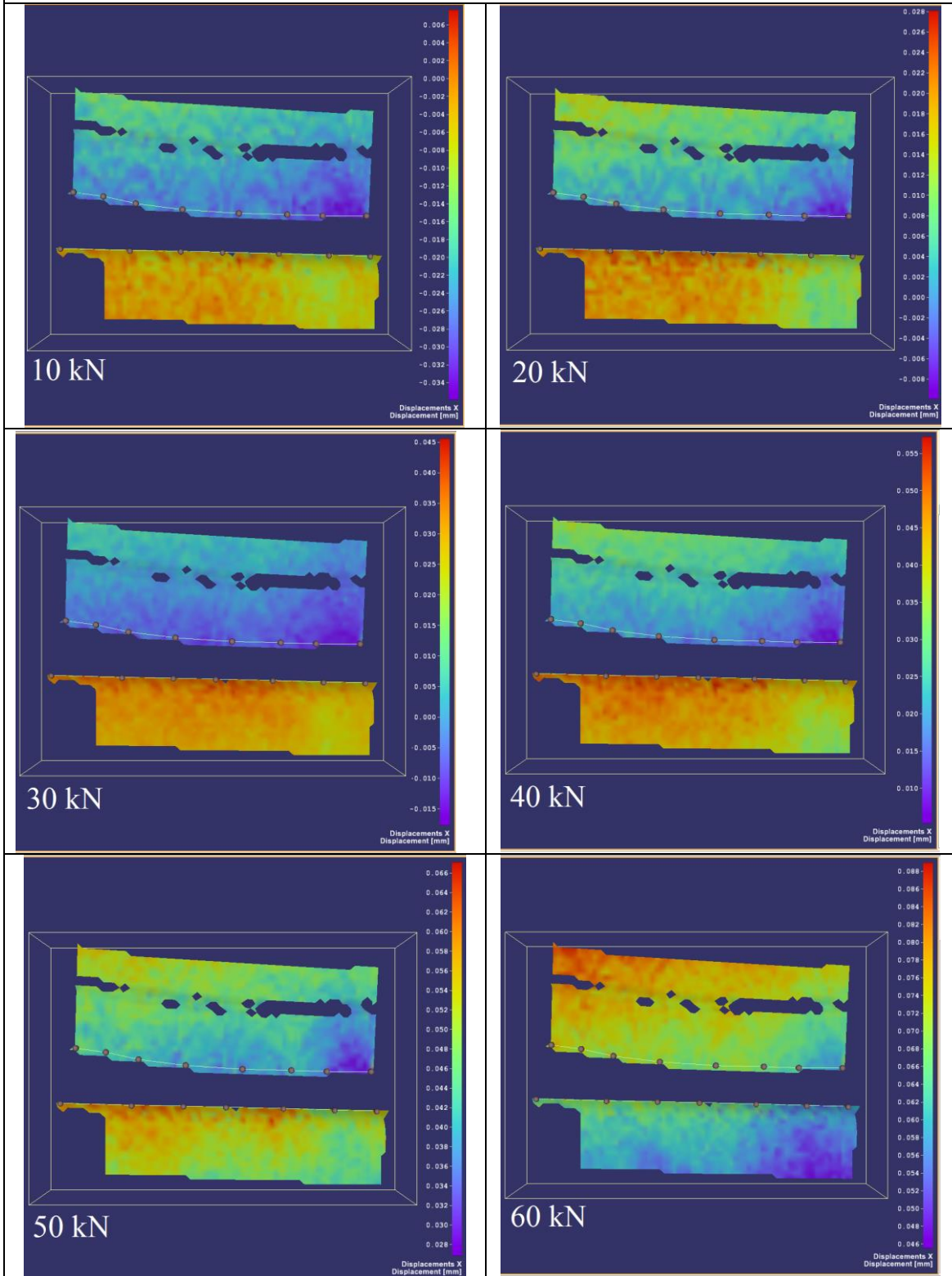


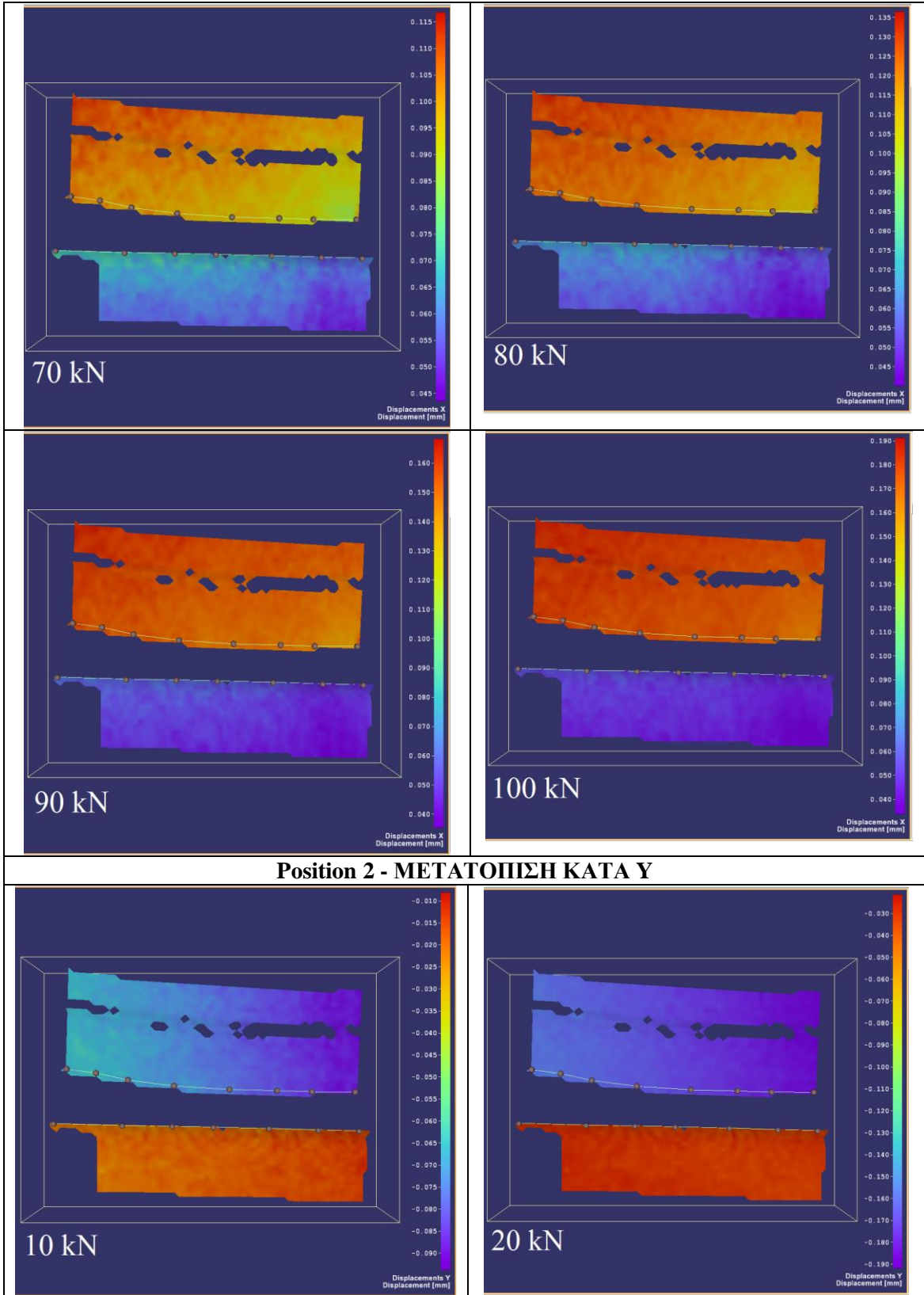
Position 1 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Z

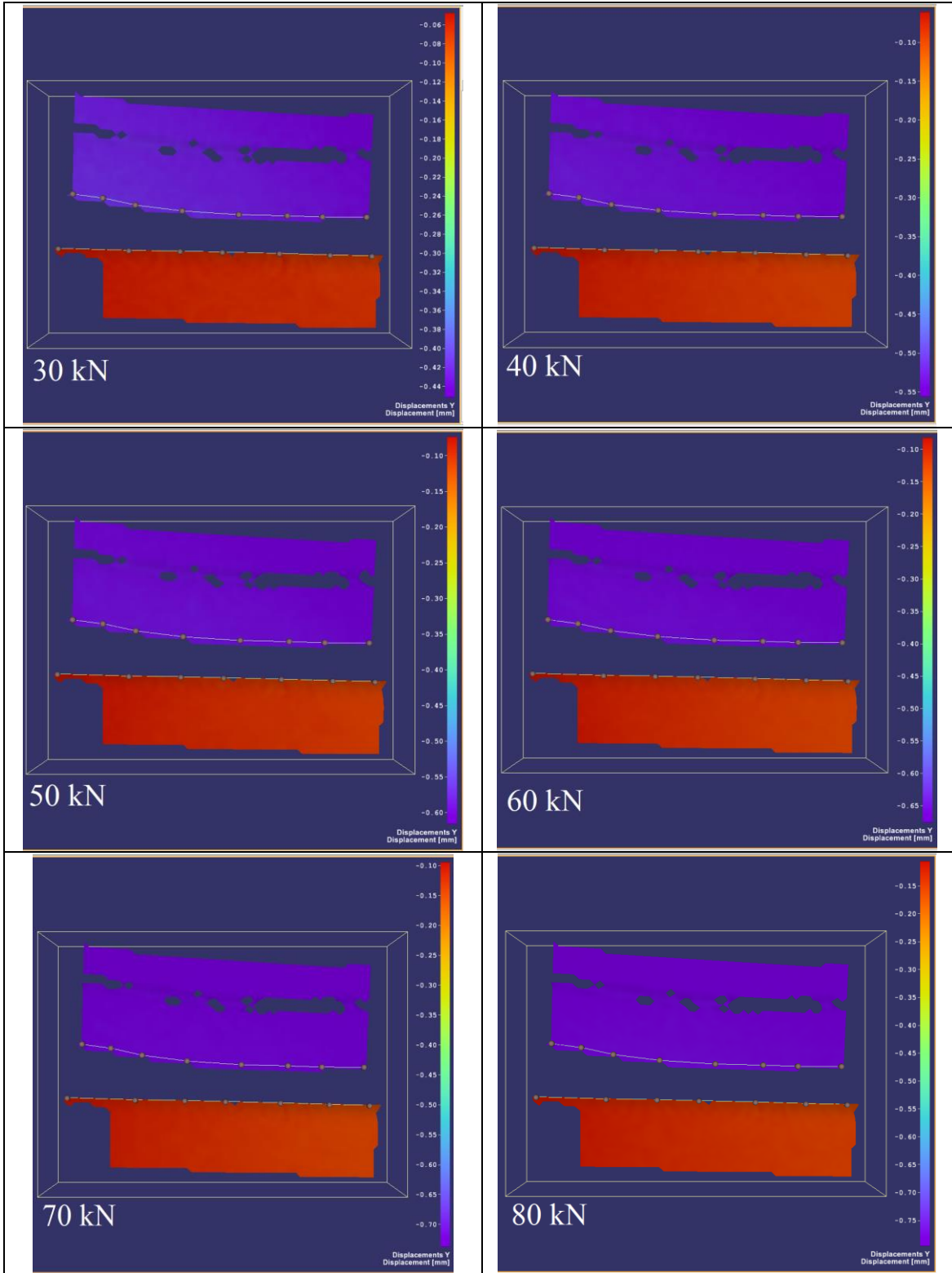


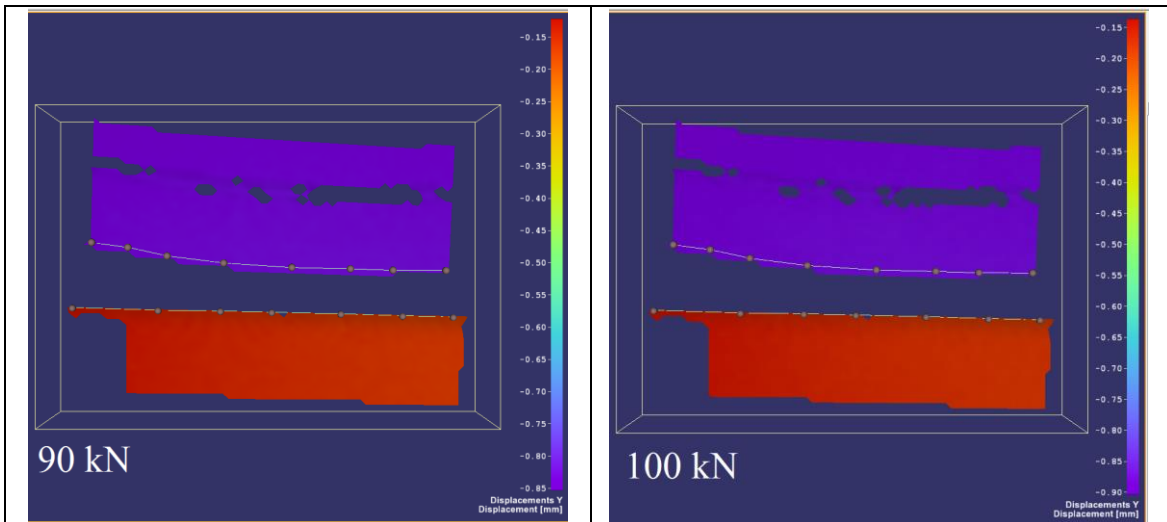


Position 2 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ

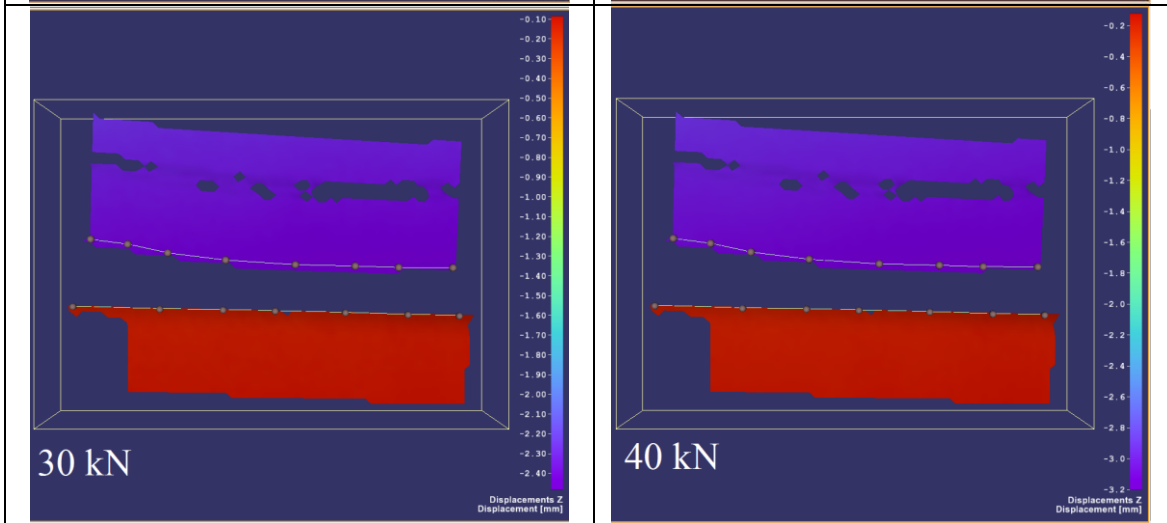
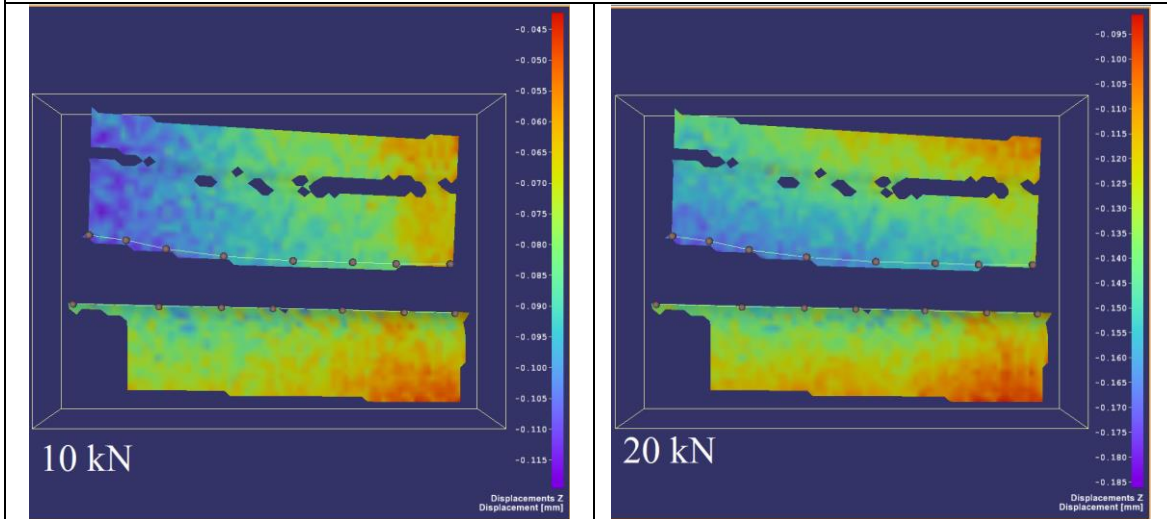


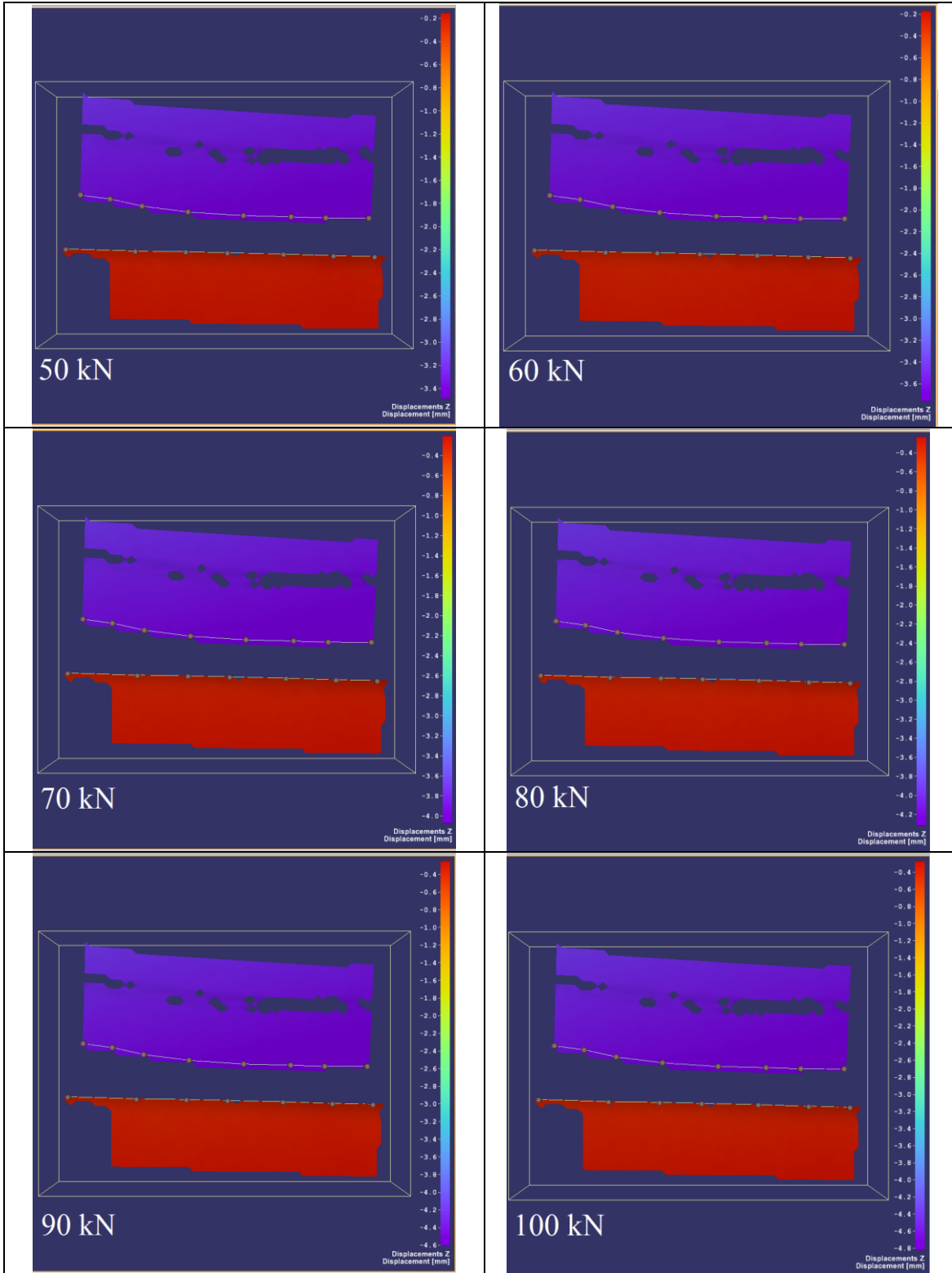




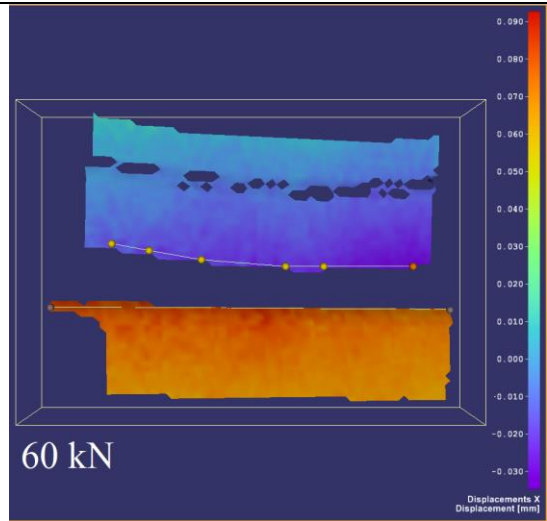
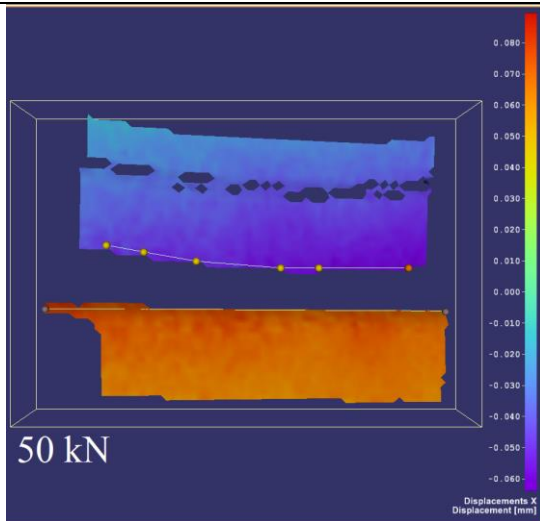
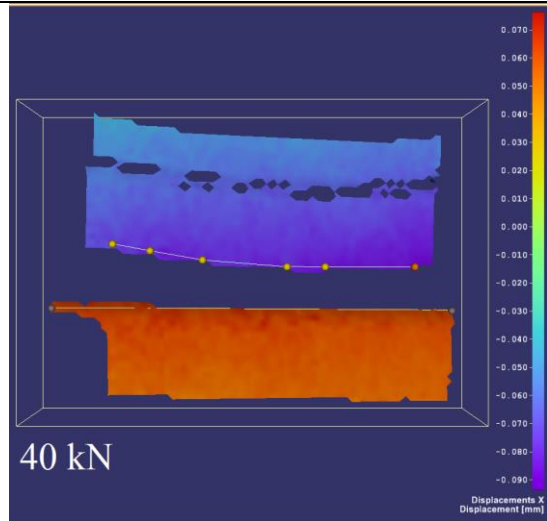
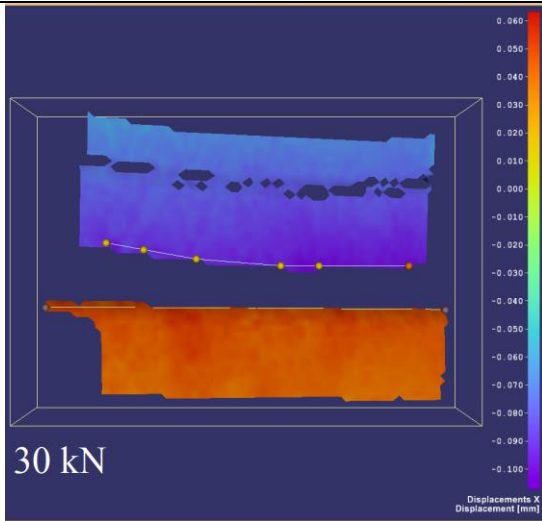
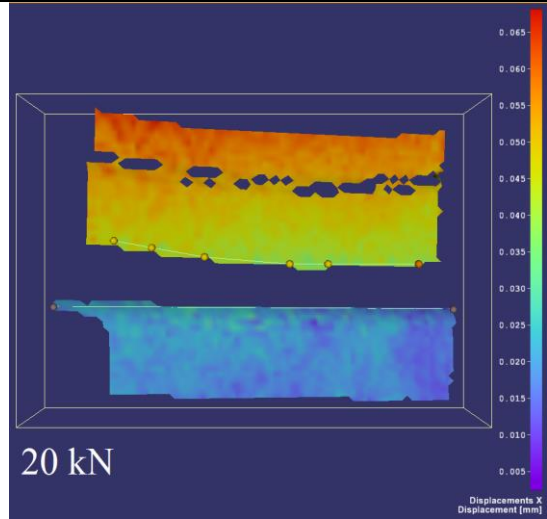
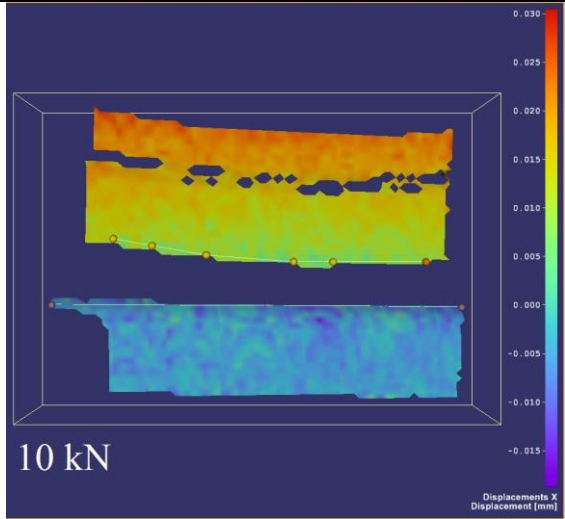


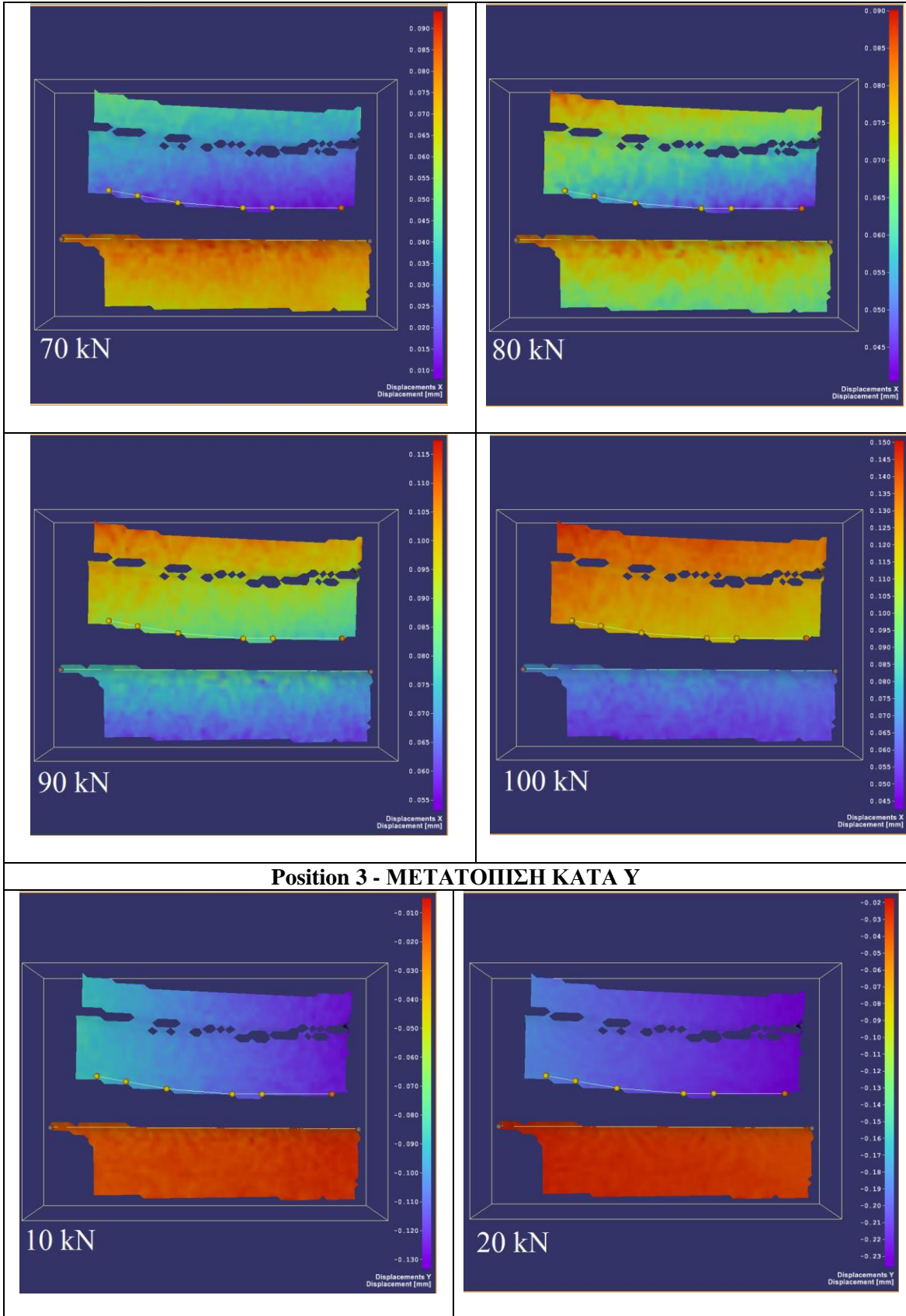
Position 2 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Z

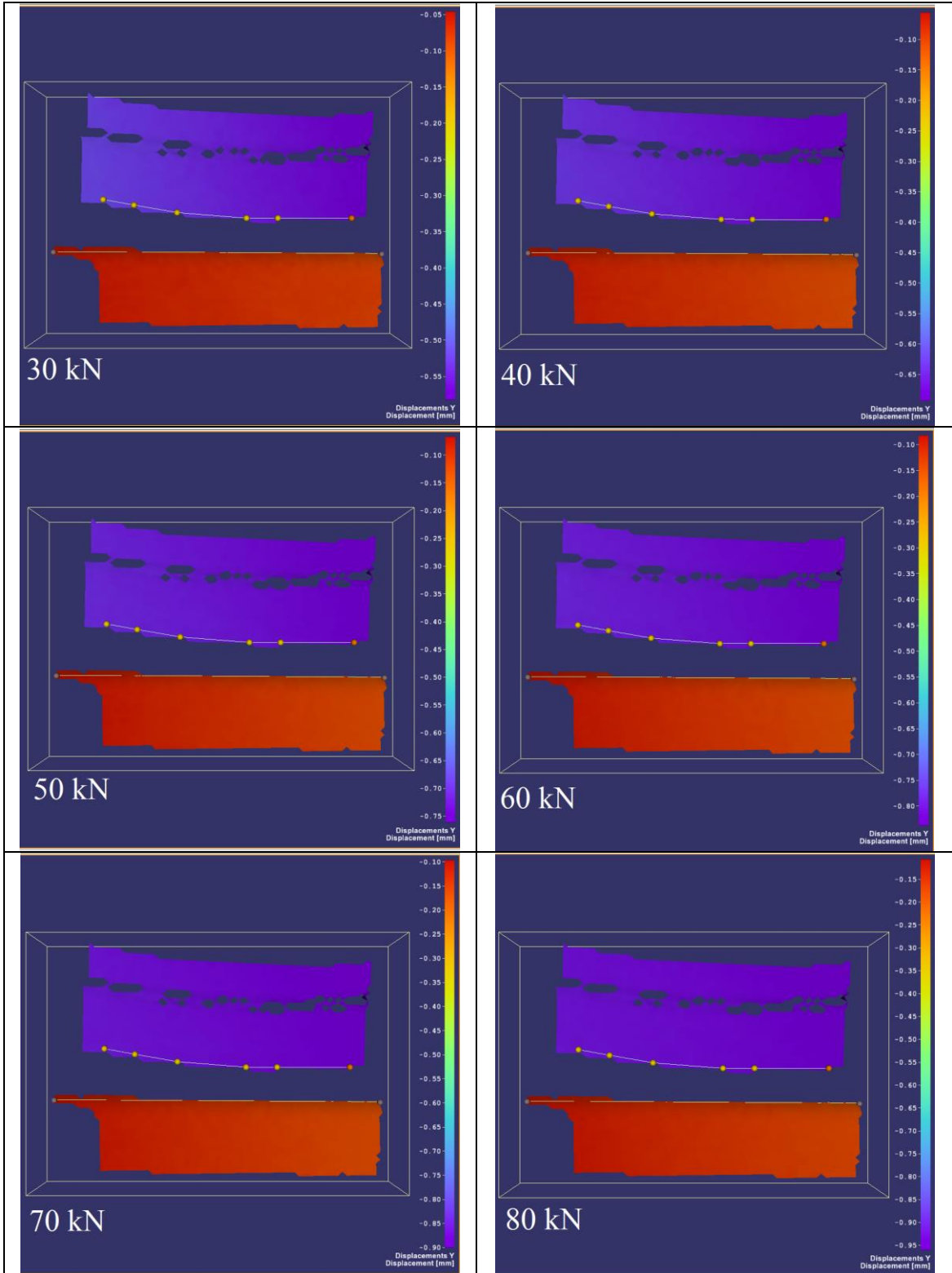


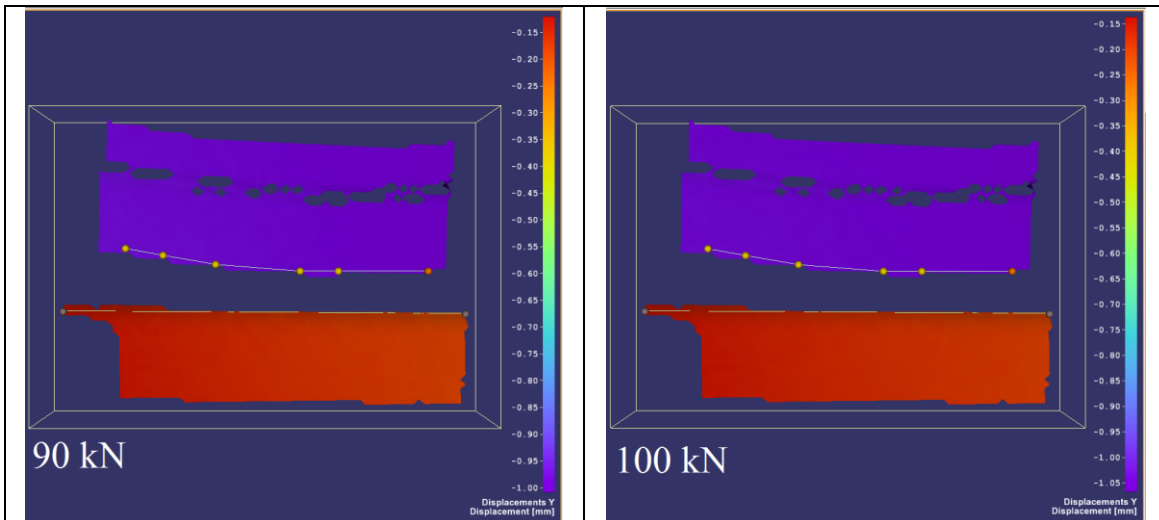


Position 3 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ

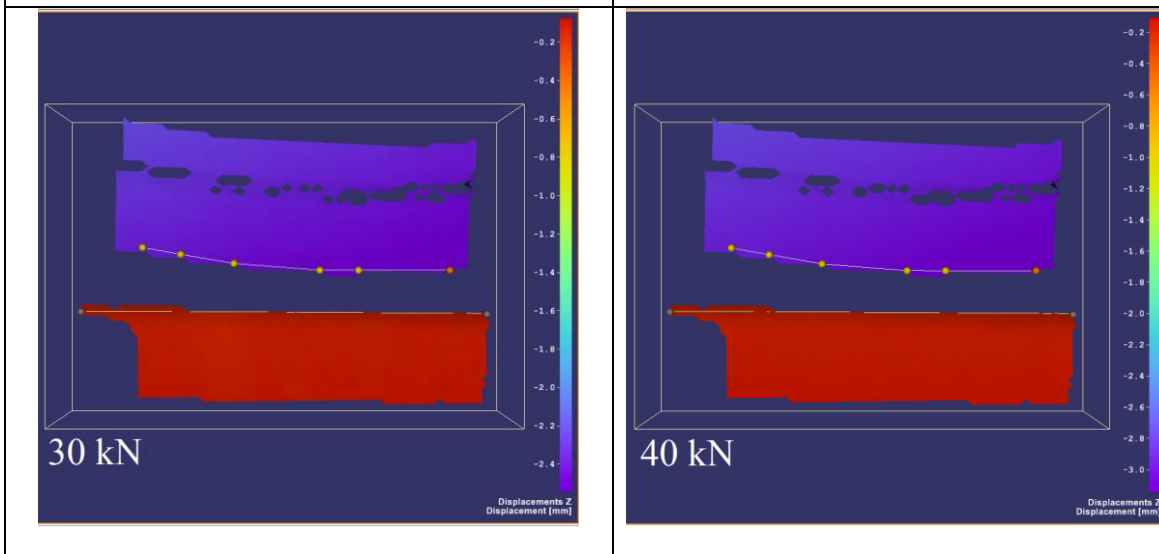
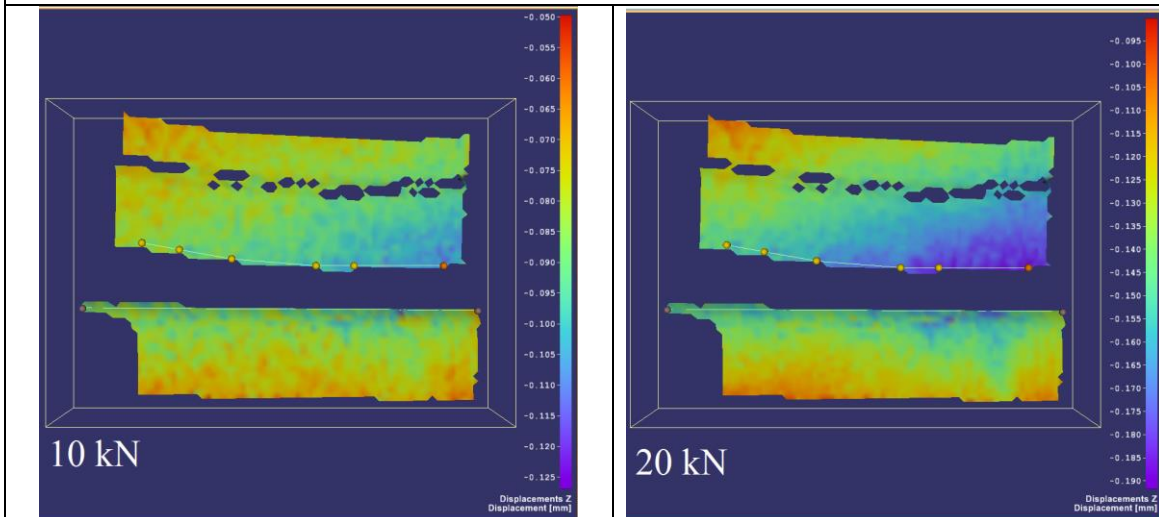


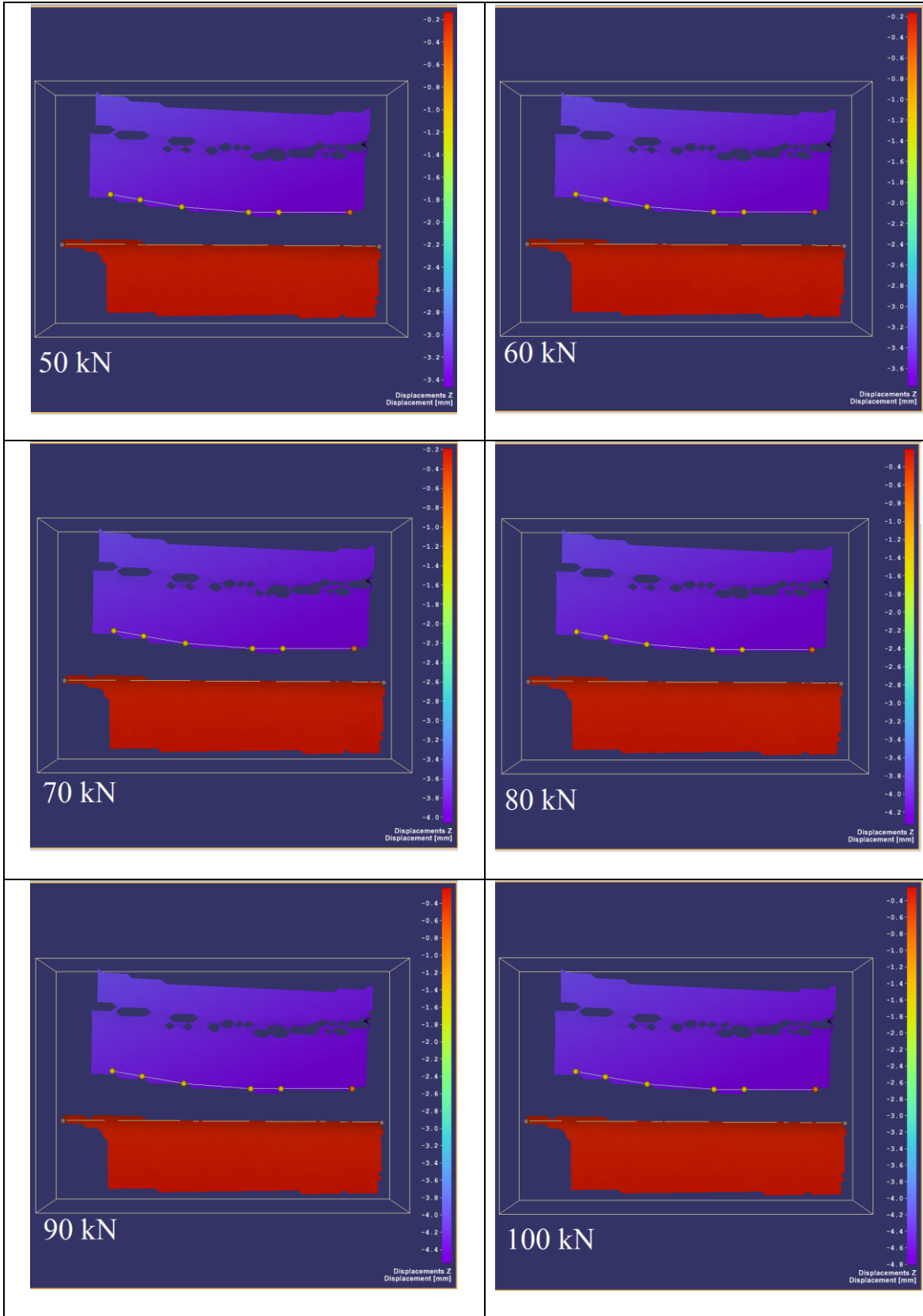




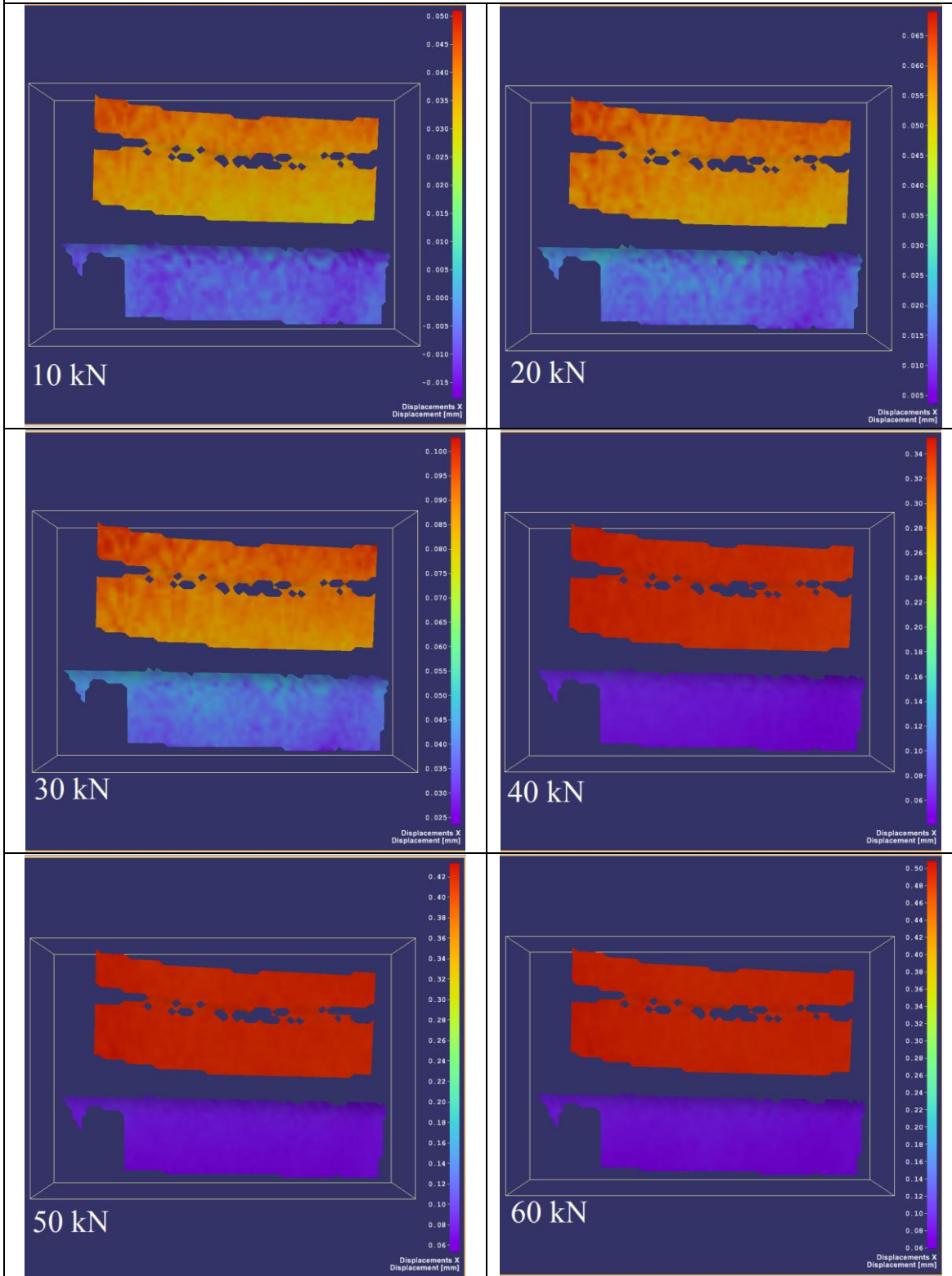


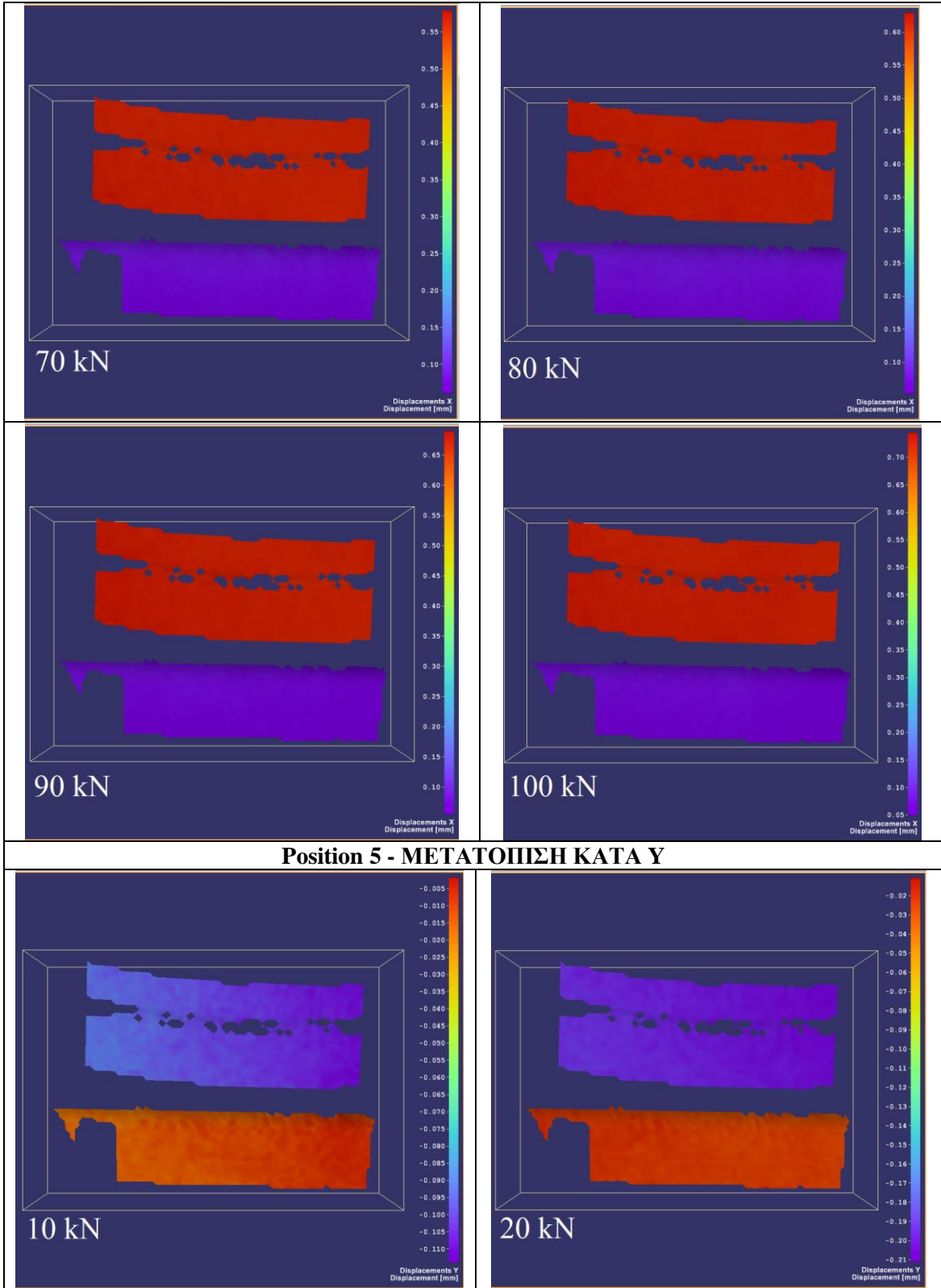
Position 3 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Z

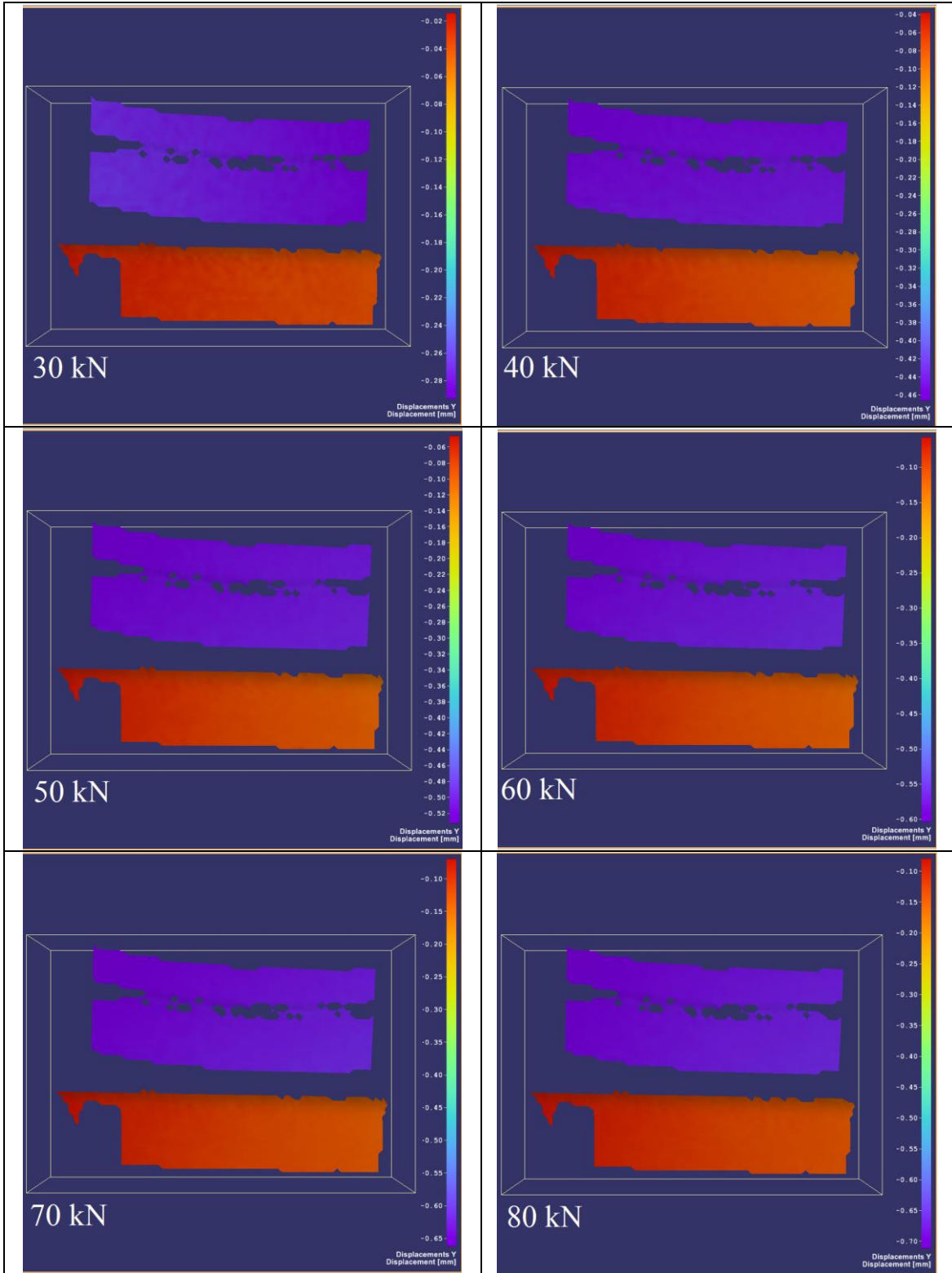


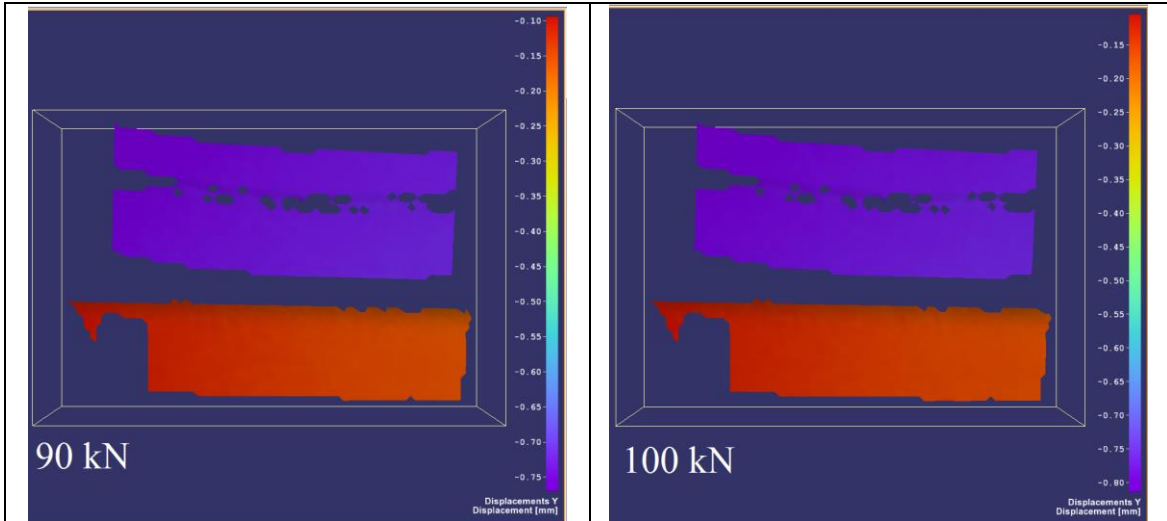


Position 5 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Χ

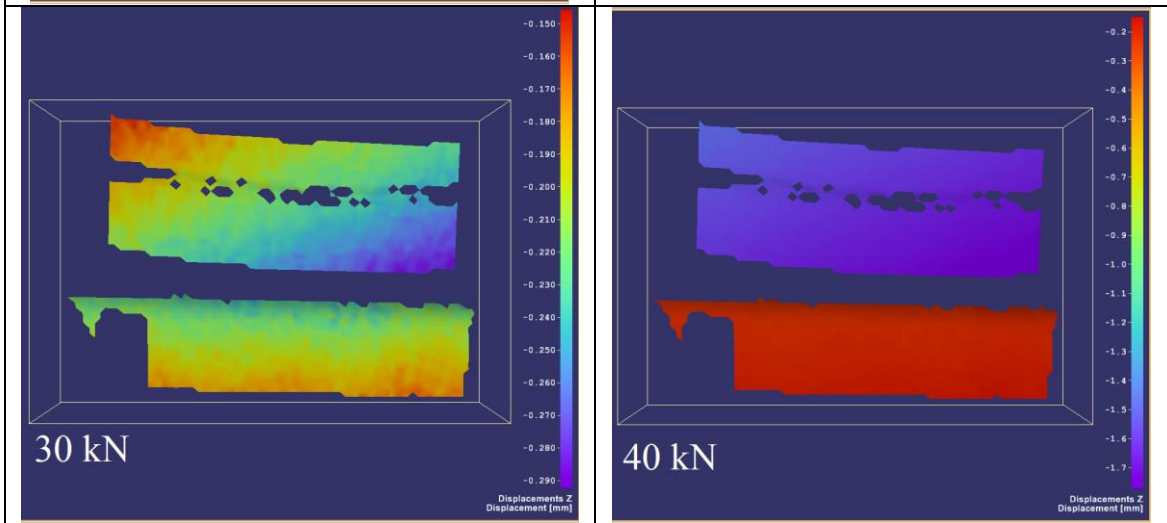
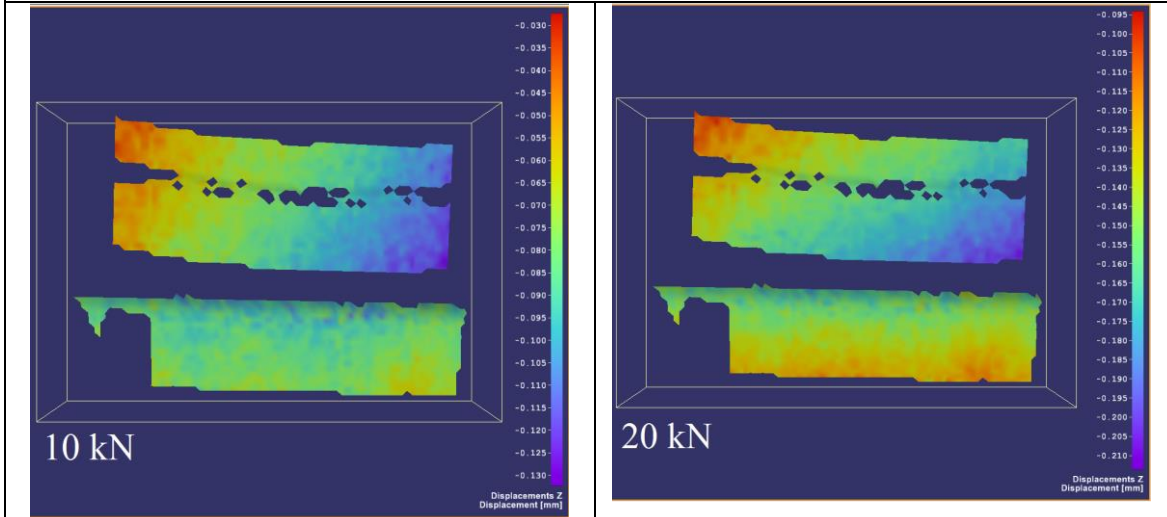


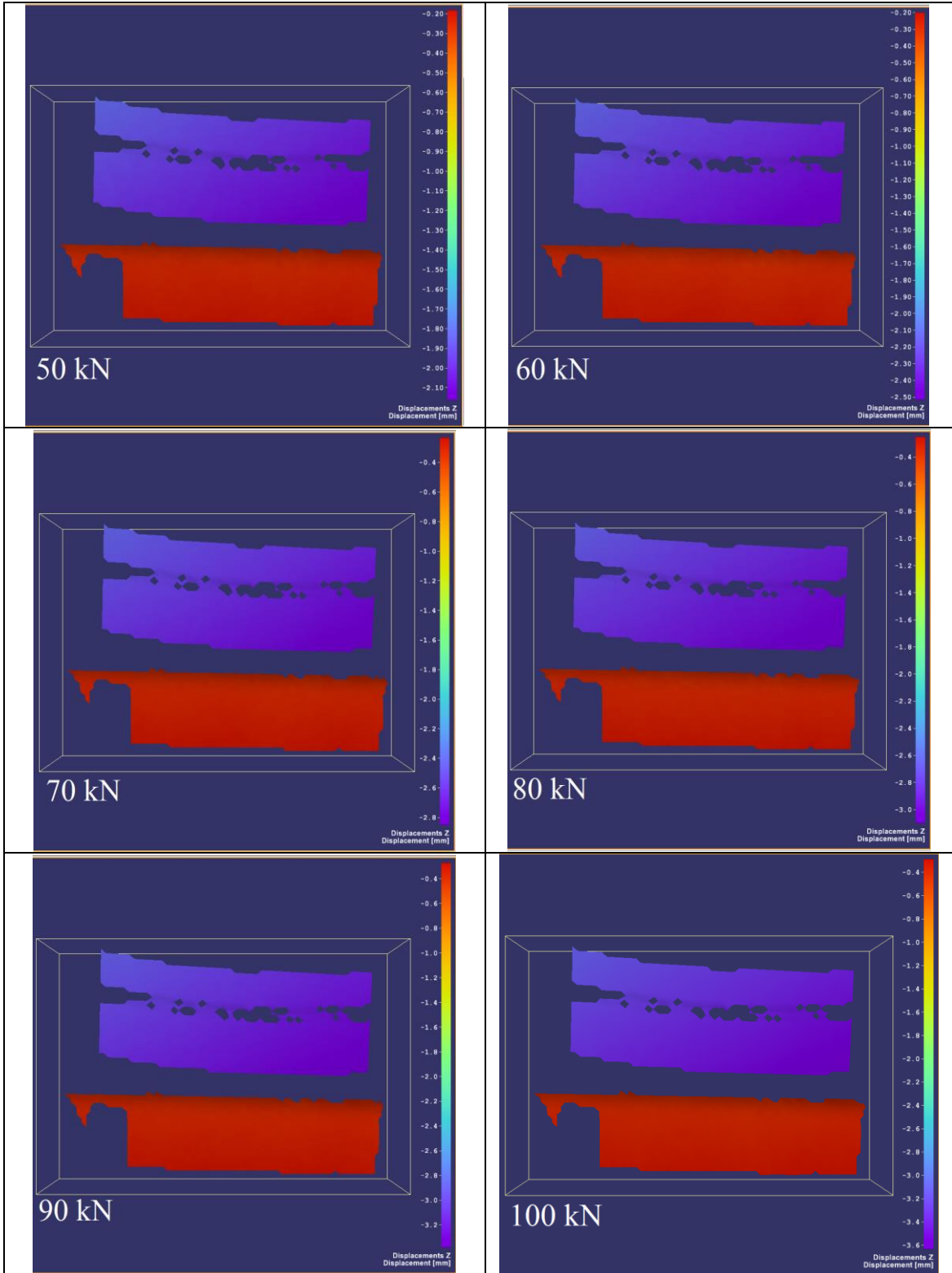






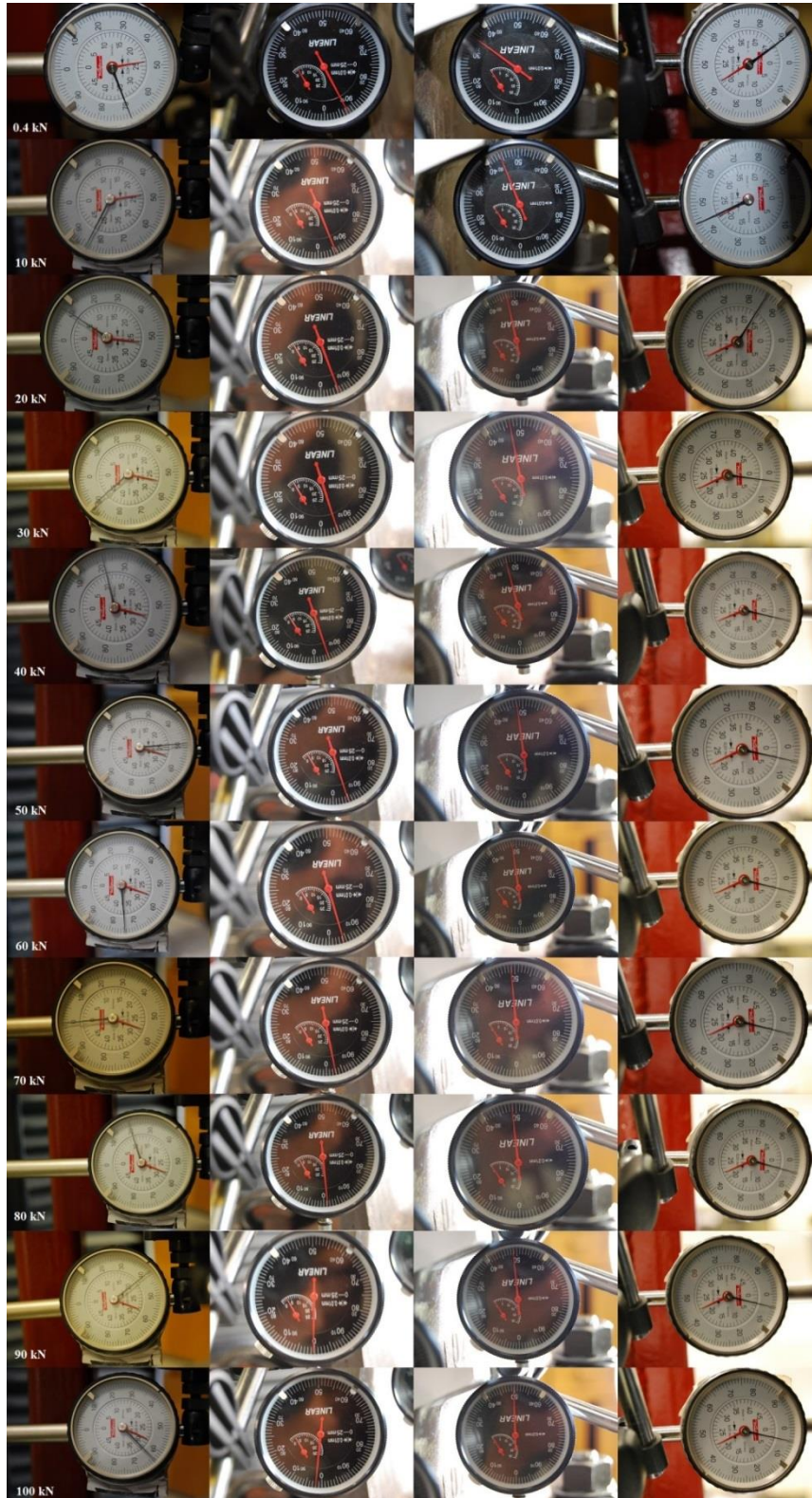
Position 5 - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ Z



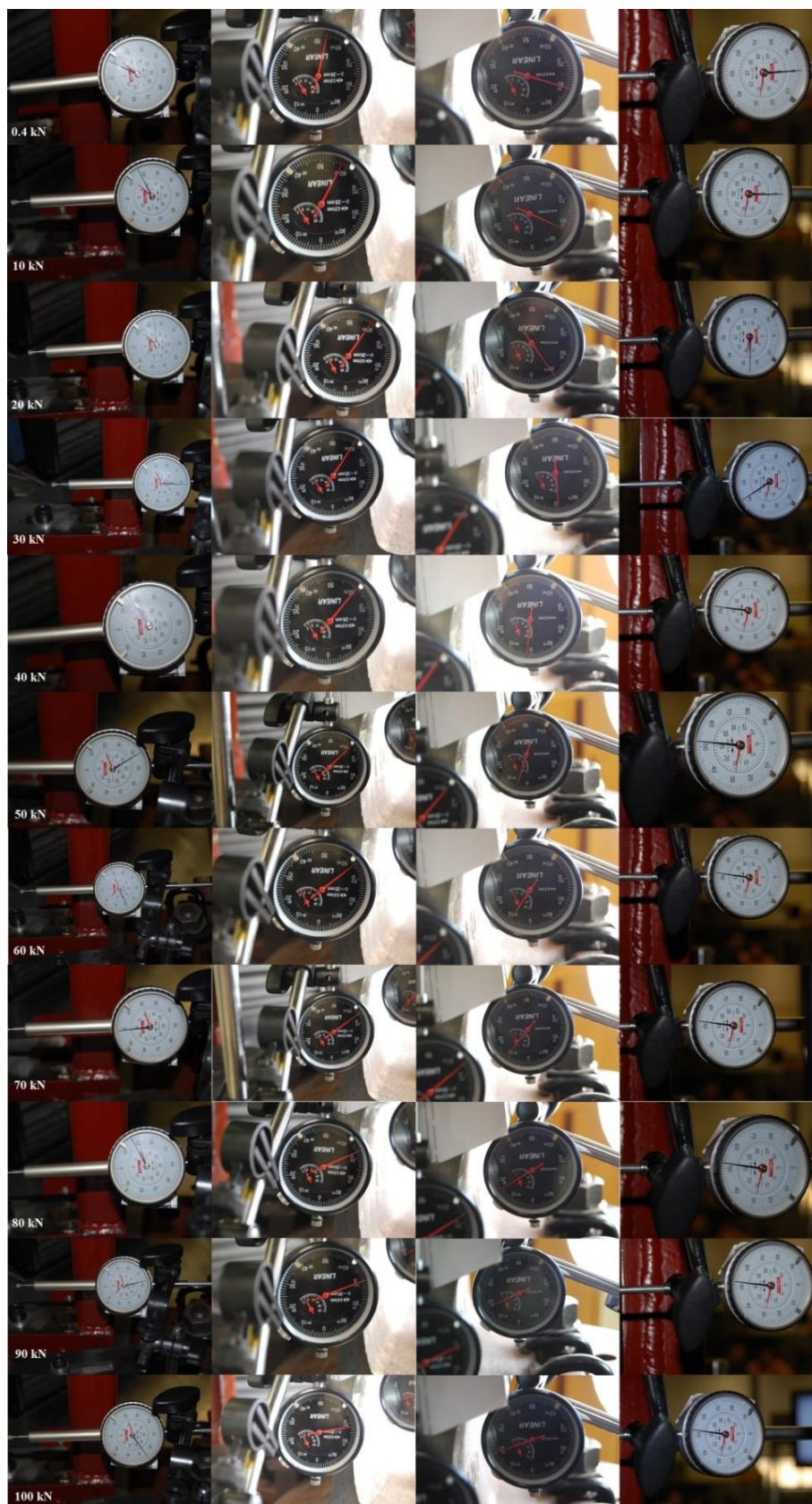


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

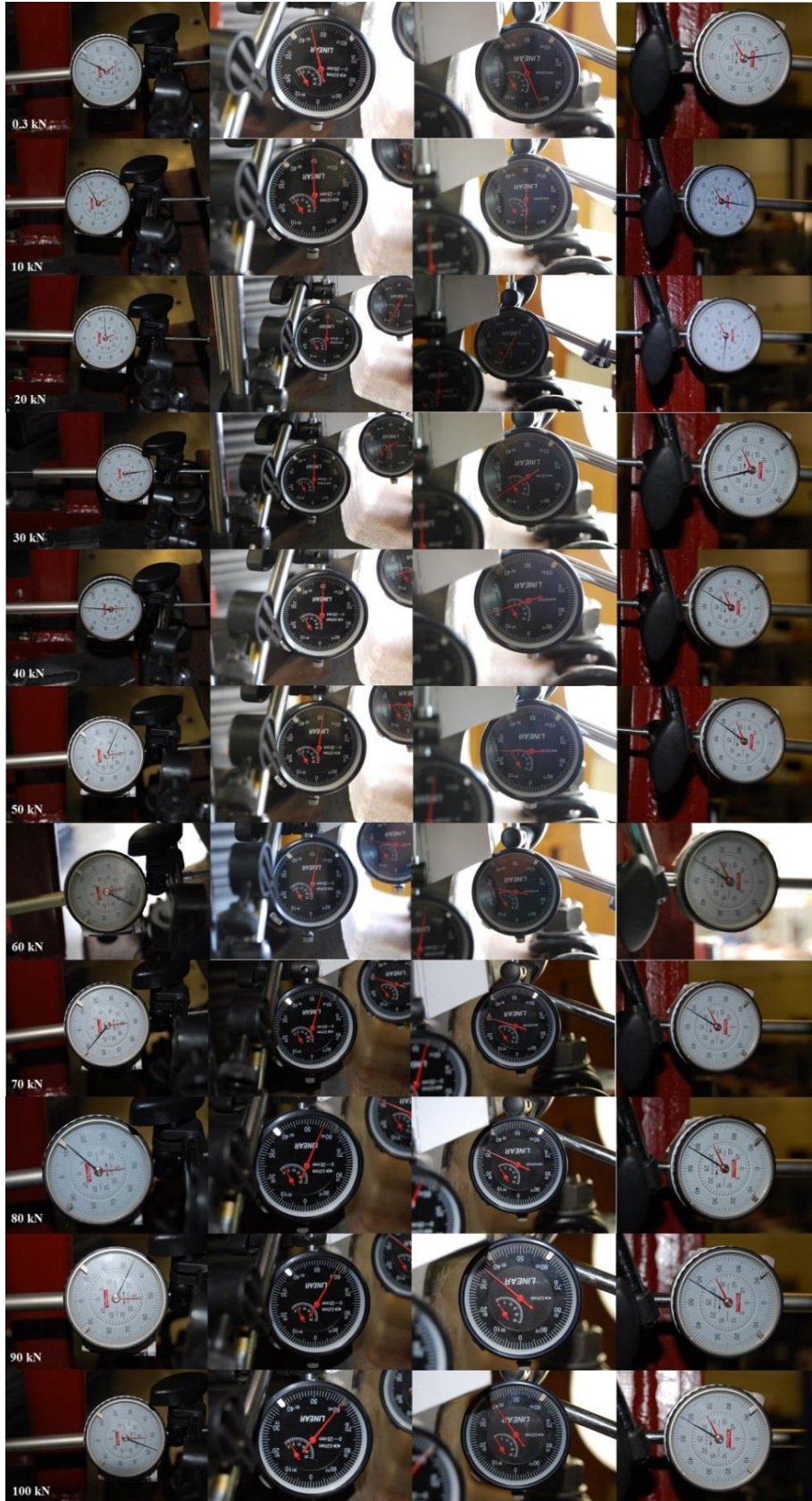
Ενδείξεις βελομέτρων – Position 1



Ενδείξεις βελομέτρων – Position 2



Ενδείξεις βελομέτρων – Position 3



Ενδείξεις βελομέτρων – Position 5

