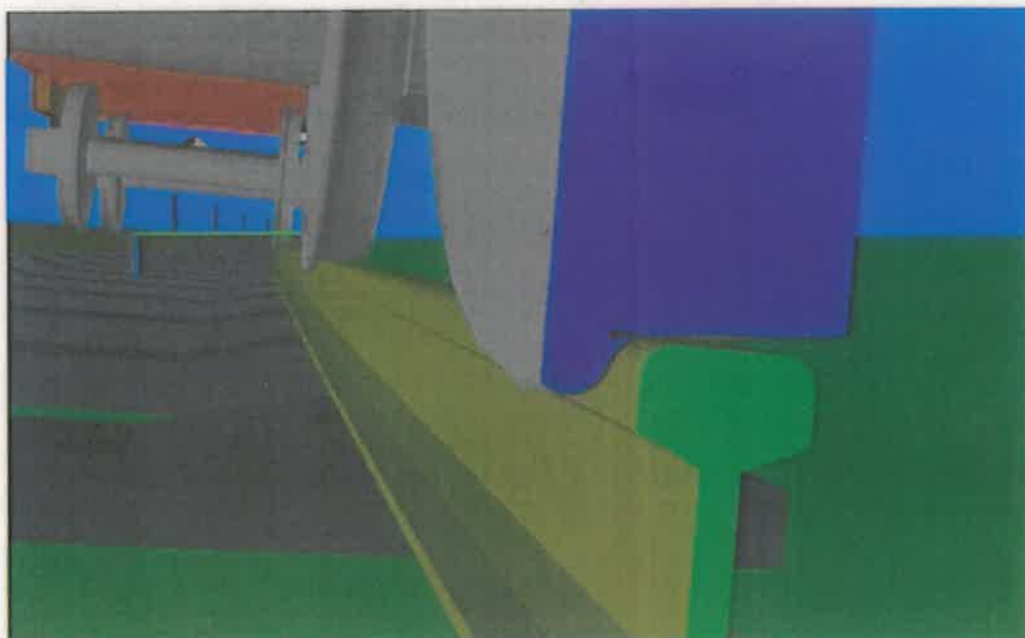




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΡΟΧΟΥ / ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ – ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΑΝΤΙ ΑΥΞΗΜΕΝΟΥ
ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΕΚΤΡΟΧΙΑΣΜΟΥ**

Διπλωματική Εργασία: Καρανάσιου Αλεξάνδρας



Επιβλέπων: Κ. Λυμπέρης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2006

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Κωνσταντίνο Λυμπέρη, λέκτορα Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της εργασίας και την πολύτιμη καθοδήγησή και συμβολή του κατά την εκπόνησή της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την απόφοιτο Πολιτικό Μηχανικό Κώνστα Δήμητρα για την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε.

Καρανάσιου Αλεξάνδρα

ΣΥΝΟΨΗ

Τίτλος: «Διεπιφάνεια τροχού / σιδηροτροχιάς – Σχεδιαστική προσέγγιση για τη μελέτη έναντι αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού»

Όνομα: Καρανάσιου Αλεξάνδρα

Επόπτης: Λυμπέρης Κωνσταντίνος, Λέκτορας Ε.Μ.Πολυτεχνείου

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αρχικά βασικές έννοιες που αναφέρονται στη σιδηροδρομική γραμμή καθώς και στοιχεία του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Μελετώνται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερώς οι συνθήκες εκτροχιασμού και αναφέρονται κριτήρια που ισχύουν σε περίπτωση αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού. Τέλος, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα AutoCAD γίνεται απεικόνιση της κίνησης των τροχών πάνω στη σιδηροτροχιά (λόγω εγκάρσιας μετακίνησης του άξονα των τροχών) και εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με τον εκτροχιασμό του σιδηροδρομικού οχήματος, την ισοδύναμη κωνικότητα και το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης.

Λέξεις κλειδιά: τροχός, σιδηροτροχιά, εύρος γραμμής, αλληλεπίδραση τροχού – σιδηροτροχιάς, ισοδύναμη κωνικότητα, οφιοειδής κίνηση.

ABSTRACT

Title: "Wheel / Rail interface – Approach of derailment risk with AutoCAD usage"

Name: Karanasiou Alexandra

Supervisor: Liberis Konstantinos

In the present dissertation are presented, at first, basic meanings that characterize the permanent way, as well as elements of the wheel and the rail. The forces between the wheel and the rail are studied carefully. Then the derailment conditions are presented with details and some derailment criteria are mentioned. Finally with the use of AutoCAD, the movement of the wheels on top of the rail (because of the lateral displacement of the wheel axle) can be depicted and conclusions that have to do with derailment, equivalent conicity and wavelength of Klingel's movement are drawn

Keywords: wheel, rail, track gauge, derailment risk, rail – wheel interaction, equivalent conicity, Klingel movement

ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
L	Μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης (m)
γ_e	Ισοδύναμη κωνικότητα τροχού
y	Πλευρική μετατόπιση
$Y/Q = L/V = F/Q$	Μέτρο καθοδήγησης του τροχού
Y	Δύναμη καθοδήγησης (KN)
Q	Φορτίο τροχού (KN)
α	Γωνία παρέκκλισης
2e	Εύρος γραμμής (mm)
P	Κατευθυντήρια δύναμη (KN)
γ	Γωνία επαφής
ρ	Γωνία τριβής
μ	Συντελεστής τριβής
Δr	Διαφορά ακτίνων κύλισης (mm)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ:.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΤΡΟΧΟΙ.....	10
1.1 Ορισμός και συνιστώσες του συστήματος.....	10
1.1.1 Διάρκεια ζωής της επιδομής.....	15
1.2 Διαστάσεις για το σύστημα των τροχών και τη σιδηροδρομική γραμμή.....	15
1.3 Οφιοειδής κίνηση του τροχού κατά μήκος της σιδηροτροχιάς.....	21
1.4 Σχέσεις Klingel για την οφιοειδή κίνηση.....	23
1.5 Τροχός.....	29
1.6 Ονομασία τμημάτων πέλματος και εξέλιξη της μορφής του.....	31
1.7 Κωνικότητα της επιφάνεια κύλισης των τροχών σιδηροδρομικού οχήματος...34	
1.8 Η έννοια της ισοδύναμης κωνικότητας.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ.....	39
2.1 Σκοπιμότητα.....	39
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	40
2.3 Μέρη που απαρτίζουν τη σιδηροτροχιά.....	44
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών και τυπικές διατομές.....	48
2.5 Τύποι σιδηροτροχιών και επιλογή διατομής.....	48
2.6 Απαιτήσεις στη σιδηροτροχιά.....	54
2.7 Δυνάμεις που ασκούνται επί των σιδηροτροχιών.....	55
2.8 Ανάλυση δυνάμεων που ασκούνται επί της σιδηροτροχιάς.....	57
2.8.1 Κατακόρυφες δυνάμεις.....	57
2.8.1.1 Στατικά κατακόρυφα φορτία.....	57

2.8.1.2 Δυναμικά φορτία.....	62
2.8.2 Εγκάρσιες δυνάμεις.....	63
2.8.2.1 Δυνάμεις βαρύτητας.....	63
2.8.2.2 Δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης.....	66
2.8.2.3 Δύναμη πλευρικών ανέμων.....	68
2.8.2.4 Παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη.....	69
2.8.2.5 Δυνάμεις ελατηρίων.....	71
2.8.2.6 Δυνάμεις καθοδήγησης.....	71
2.8.3 Διαμήκεις (οριζόντιες) δυνάμεις.....	73
2.8.3.1 Δυνάμεις θερμοκρασιακών μεταβολών.....	73
2.8.3.2 Δυνάμεις τροχοπέδησης-Δυνάμεις επιτάχυνσης.....	74
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΑΦΗ ΤΡΟΧΟΥ – ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ.....	75
3.1 Βαθμοί ελευθερίας συμβατικού σιδηροδρομικού άξονα.....	75
3.2 Γεωμετρία επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς.....	76
3.2.1 Υποθέσεις.....	76
3.2.2 Μαθηματική επίλυση.....	80
3.2.3 Συμπεράσματα επί της μελέτης της γεωμετρίας επαφής.....	82
3.3 Η κίνηση του τροχαίου υλικού επί των σιδηροτροχιών.....	83
3.4 Φαινόμενα επαφής κατά την κίνηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς.....	86
3.4.1 Οριζόντια ψευδο –ολίσθηση.....	86
3.4.2 Εγκάρσια ψευδο –ολίσθηση.....	91
3.4.3 Spin.....	93
3.5 Επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς ενός και δύο σημείων.....	94
3.5.1 Δυνάμεις μεταξύ γραμμών και τροχών.....	94
3.5.2 Επαφή δύο σημείων.....	95
3.5.3 Επαφή ενός σημείου.....	96
3.6 Θέσεις μέγιστης καταπόνησης της σιδηροτροχιάς κατά την επαφή με τον τροχό.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΥΞΗΜΕΝΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΕΚΤΡΟΧΙΑΣΜΟΥ.....103

4.1 Γενικά στοιχεία – Ορισμός.....	103
4.2 Τρόποι εκτροχιασμού σιδηροδρομικού οχήματος.....	104
4.2.1 Εκτροχιασμός με μετατόπιση της γραμμής.....	106
4.2.2 Εκτροχιασμός λόγω ανατροπής του οχήματος.....	106
4.2.3 Εκτροχιασμός με αναρρίχηση των τροχών.....	108
4.2.3.1 Περιγραφή του φαινομένου.....	108
4.2.3.2 Κριτήρια εκτροχιασμού.....	109
4.3 Λοιπά κριτήρια για τον έλεγχο σε εκτροχιασμό.....	113
4.3.1 Κριτήριο για την απόσταση αναρρίχησης του τροχού.....	114
4.3.1.1 Γενικός τύπος για το κριτήριο της απόστασης αναρρίχησης.....	115
4.3.2 Προσδιορισμός της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης.....	116
4.3.3 Ορισμός της απόστασης αναρρίχησης.....	117
4.4 Εξαγωγή του τύπου του Nadal μέσω γεωμετρικών σχέσεων.....	119
4.5 Περιγραφή μηχανισμού εκτροχίασης.....	122
4.6 Συνθήκες εκτροχίασης.....	123
4.7 Κίνδυνος εκτροχίασης.....	124
4.8 Διαδικασία εκτροχίασης.....	127

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ AUTOCAD ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΞΗΧΘΗΣΑΝ.....129

5.1 Γενικά.....	129
5.2 Παραδοχές.....	130
5.3 Στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	131
5.4 Πορεία εργασίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD.....	138
5.5 Αποτελέσματα που εξήχθησαν με την εφαρμογή στο AutoCAD.....	163

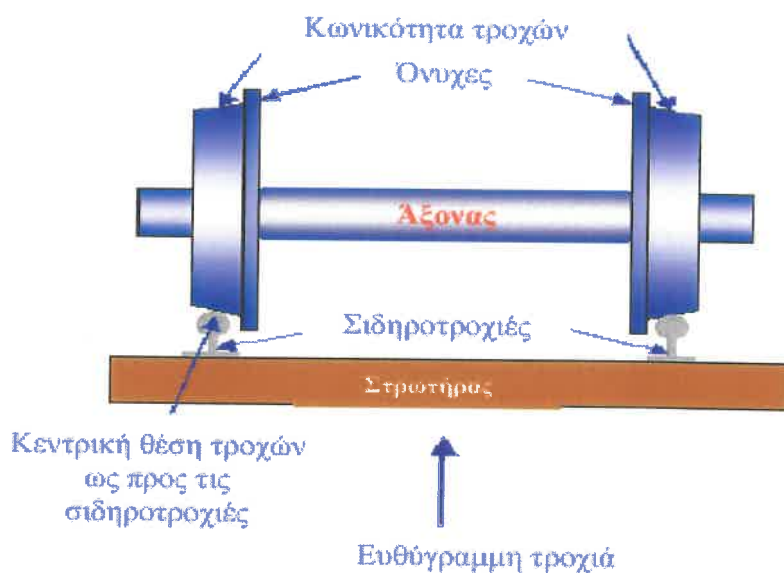
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....192

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	192
-----------------------------------	-----

6.2 Τελικά συμπεράσματα.....	196
6.3 Προτάσεις.....	197
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΠΑΚΕΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	198
1.1 Πρόβλεψη εκτροχιασμού.....	198
1.2 Χρήση πακέτων προσομοίωσης.....	201
1.2.1 ADAMS/Rail.....	201
1.2.2 NUCARS.....	203
1.2.3 MEDYNA.....	203
1.2.4 A'GEM.....	203
1.2.5 VAMPIRE.....	204
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΡΟΧΙΑΣΕΩΝ.....	208
2.1 Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου κοντά στην περιοχή Queensland της Αυστραλίας.....	208
2.1.1 Γενικές πληροφορίες – περιγραφή.....	208
2.1.2 Αιτία του εκτροχιασμού.....	209
2.2 Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου στην Τουρκία κοντά στην Κωνσταντινούπολη.....	210
2.2.1 Γενικές πληροφορίες – περιγραφή.....	210
2.2.2 Κατάσταση γραμμής.....	211
2.2.3 Προσομοίωση του ατυχήματος με το πρόγραμμα ADAMS/Rail.....	212
2.2.4 Αιτία εκτροχιασμού – Αποτελέσματα έρευνας.....	217
2.3 Εκτροχιασμός φορτηγού τρένου στην περιοχή Camrose του Καναδά.....	217
2.3.1 Γενικές πληροφορίες – περιγραφή.....	217
2.3.2 Αιτία εκτροχιασμού.....	217
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	219
ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	221

Περίληψη:

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χερσαία μέσα μεταφοράς, όπου οχήματα με τροχούς φέροντες όνυχες κινούνται πάνω σε δύο παράλληλες χαλύβδινες σιδηροτροχιές, είτε αυτοκινούμενα είτε ελκόμενα από κινητήρια μονάδα (Σχήμα 1). Η προσφερόμενη άνεση και ασφάλεια των επιβατών, η μεγάλη διάρκεια ζωής της επιδομής αλλά και οι μειωμένες φθορές του τροχού και της σιδηροτροχιάς αποτελούν βασικές επιδιώξεις.



Σχήμα 1: Κωνικότητα τροχών και θέση τους επί της σιδηροτροχιάς.(1)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η γεωμετρία του τροχού και της σιδηροτροχιάς, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την επαφή τους και οι θέσεις που λαμβάνουν οι τροχοί επί των σιδηροτροχιών. Γίνεται ανάλυση διαφόρων ειδών εκτροχιασμού και παρουσίαση κριτηρίων που ισχύουν για αυξημένο κίνδυνο εκτροχιασμού, ενώ περιγράφεται και η διαδικασία εκτροχίασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα και με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD γίνεται απεικόνιση της κίνησης των τροχών επί των σιδηροτροχιών για δύο διαφορετικές τιμές του εύρους γραμμής. Τέλος παρουσιάζονται διάφορα σιδηροδρομικά ατυχήματα που οφείλονται σε εκτροχιασμούς και προσομοιωτικά προγράμματα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη προκειμένου να μελετηθούν αίτια προηγούμενων ατυχημάτων και να αποφευχθούν καινούρια.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 1 δίνεται ο ορισμός βασικών εννοιών κυρίως για τις διαστάσεις της σιδηροδρομικής γραμμής με αναφορά σε τιμές που χρησιμοποιούνται από διάφορες χώρες. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην οφιοειδή κίνηση των τροχών επί των σιδηροτροχιών (η οποία οφείλεται στην κωνικότητα των τροχών) και παρουσιάζονται οι σχέσεις του Klingel που την περιγράφουν, ενώ παρουσιάζονται και στοιχεία της γεωμετρίας του τροχού καθώς και η έννοια της ισοδύναμης κωνικότητας των τροχών.

Το Κεφάλαιο 2 αρχίζει με την ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της σιδηροτροχιάς. Μελετώνται τα διάφορα μέρη που την απαρτίζουν και γίνεται αναφορά σε κάποια χαρακτηριστικά τους και σε διάφορους τύπους τους. Τέλος αναφέρονται και αναλύονται διεξοδικά οι διάφορες δυνάμεις που ασκούνται επί της σιδηροτροχιάς.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται λόγος για την επαφή του τροχού με τη σιδηροτροχιά. Μελετάται η γεωμετρία επαφής τους και αναφέρονται τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την επαφή αυτή. Στη συνέχεια αναφέρονται οι περιπτώσεις επαφής ενός και δύο σημείων και οι θέσεις μέγιστης καταπόνησης της σιδηροτροχιάς.

Στο Κεφάλαιο 4 επισημαίνονται οι συνθήκες αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού. Δίνεται ο ορισμός του εκτροχιασμού σιδηροδρομικού οχήματος

καθώς και οι βασικοί λόγοι που οδηγούν σε εκτροχιασμό και η ανάλυση αυτών. Γίνεται περιγραφή του μηχανισμού και της διαδικασίας εκτροχίασης και παρουσιάζονται διάφορα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο έναντι αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού.

Το Κεφάλαιο 5 αποτελείται από μια εφαρμογή της κίνησης των τροχών επί της σιδηροτροχιάς με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Για τιμές του εύρους γραμμής 1435mm και 1432mm αντίστοιχα, γίνεται μετακίνηση των τροχών σε σχέση με τη σιδηροτροχιά και μελετώνται οι γωνίες επαφής και η ισοδύναμη κωνικότητα για κάθε μετακίνηση που πραγματοποιήθηκε. Στη συνέχεια παρατίθενται οι επαφές για κάθε ξεχωριστή εγκάρσια μετακίνηση και στοιχεία που μετρήθηκαν επ' αυτών σε σχήματα που δημιουργήθηκαν μέσω του AutoCAD, ενώ παρατίθενται επίσης και τα υπόλοιπα αποτελέσματα που απορρέουν από την εφαρμογή αυτή και γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα που έχουν αντληθεί από βιβλιογραφικές πηγές.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη δεδομένη εφαρμογή που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Τέλος, στα παραρτήματα της εργασίας αυτής υπάρχουν παραδείγματα ατυχημάτων εκτροχιασμών με σύντομες αναλύσεις για τα αίτιά τους, καθώς και παρουσιάσεις πακέτων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται σε διάφορες χώρες με σκοπό την πρόληψη ατυχημάτων εκτροχιασμού, την ανάλυση αιτιών που οδήγησαν σε τέτοιου είδους ατυχήματα και την γενικότερη κατανόηση του φαινομένου.

Εισαγωγή:

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή μέσα μαζικής μεταφοράς, λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα της σιδηροδρομικής και της αλματώδους ανάπτυξης των σιδηροδρομικών δικτύων σε πολλές χώρες (συμπεριλαμβανομένου και της Ελλάδας). Τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τα άλλα μεταφορικά μέσα είναι η μεγάλη μεταφορική ικανότητα, η φιλικότητά του προς το περιβάλλον και η μεγάλη ασφάλεια που παρέχει. Επειδή η ασφάλεια των επιβατών αποτελεί κύριο στόχο, η μείωση των σιδηροδρομικών ατυχημάτων στο ελάχιστο δυνατό αποτελεί κύριο μέλημα του τομέα της σιδηροδρομικής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία του εκτροχιασμού και μελετώνται οι διάφορες παράμετροι που εμπλέκονται σε αυτή. Για να κατανοηθεί όμως το φαινόμενο του εκτροχιασμού πρέπει να ληφθεί υπόψη η ιδιαίτερη μορφή του τροχού και της σιδηροτροχιάς, γεγονός που περιπλέκει το φαινόμενο της κίνησης των τροχών. Γι' αυτό θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούν, αρχικά, στην παρούσα εργασία στοιχεία της γεωμετρίας του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Η μορφή του τροχού είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Απλοποιητικά θεωρείται ότι οι τροχοί έχουν τη μορφή κολουρου κώνου. Εξαιτίας της μορφής αυτής δημιουργούνται δύο διαφορετικές ακτίνες κύλισης στους τροχούς, που εξαναγκάζονται έτσι σε οφιοειδή κίνηση επί των σιδηροτροχιών (στην ευθυγραμμία). Στην πράξη η οφιοειδής κίνηση σημαίνει ότι η επαφή του όνυχας του τροχού με τη σιδηροτροχιά συμβαίνει περιοδικά. Επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος κατά την οφιοειδή κίνηση, τόσο λιγότερες

είναι και οι επαφές αυτές, άρα και λιγότερες οι πιθανότητες εκτροχιασμού. ωστόσο, για τον εντοπισμό του μήκους κύματος, σύμφωνα με τον τύπο του Klingel, πρέπει να υπολογισθεί η τιμή της ισοδύναμης κωνικότητας. Επιπλέον οι τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας υπεισέρχονται στους τύπους των δυνάμεων βαρύτητας και των δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης (που σχετίζονται άμεσα με την εγκάρσια συμπεριφορά του οχήματος).

Σημαντικό παράγοντα για τη μελέτη έναντι αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού αποτελούν οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς καθώς και ο εντοπισμός των θέσεων που αυτές δρουν πάνω στον τροχό. Οι θέσεις αυτές είναι ελλειπτικές επιφάνειες διαστάσεων 12 mm*20 mm περίπου. Απλοποιητικά όμως στην πράξη θεωρούνται σημεία. Για τη διερεύνηση των θέσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε σε σχετική εφαρμογή το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει μεγάλη ακρίβεια (της τάξης του 10^{-4} mm) και δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί ένα σημείο που χαρακτηρίζει την εκάστοτε επιφάνεια χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε τροχός με προφίλ S1002 (που προσαρμόζεται στις φθορές) και σιδηροτροχιά τύπου U.I.C.60 (η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην Ελλάδα). Για τιμές του εύρους γραμμής 1435mm και 1432mm μελετήθηκε η πλευρική μετακίνηση των τροχών επί των σιδηροτροχιών και εντοπίστηκαν τα σημεία επαφής του τροχού με τη σιδηροτροχιά για δεδομένες πλευρικές μετατοπίσεις. Τέλος εξήχθησαν αποτελέσματα σχετικά με την ισοδύναμη κωνικότητα και το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης, ενώ παρουσιάσθηκαν και οι οριακές τιμές που μπορεί να λάβει η πλευρική μετατόπιση των τροχών, ώστε το σιδηροδρομικό όχημα να κινείται με ασφάλεια (περαιτέρω εγκάρσια μετακίνηση σημαίνει αυξημένο κίνδυνο εκτροχιασμού). Από τα παραπάνω προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη διαφοροποίηση της τιμής του εύρους γραμμής, την ισοδύναμη κωνικότητα, το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης και τη γεωμετρία που πρέπει να έχει ο τροχός προκειμένου η κίνησή του να είναι όσο το δυνατόν ασφαλέστερη.

Κεφάλαιο 1

Βασικές έννοιες - τροχοί

1.1 Ορισμός και συνιστώσες του συστήματος

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί ένα χερσαίο μαζικό μέσο μεταφοράς. Κινείται (ηλεκτρικά ή μηχανικά) μέσω χαλύβδινων τροχών σε αποκλειστικά δικό του διάδρομο κυκλοφορίας, ο οποίος και ορίζεται από δύο παράλληλες μεταξύ τους σιδηροτροχιές.[16]

Ο σιδηρόδρομος ως μέσο μεταφοράς ορίζεται από δύο συνιστώσες(1):

- Το τροχαίο υλικό και
- τη σιδηροδρομική υποδομή.

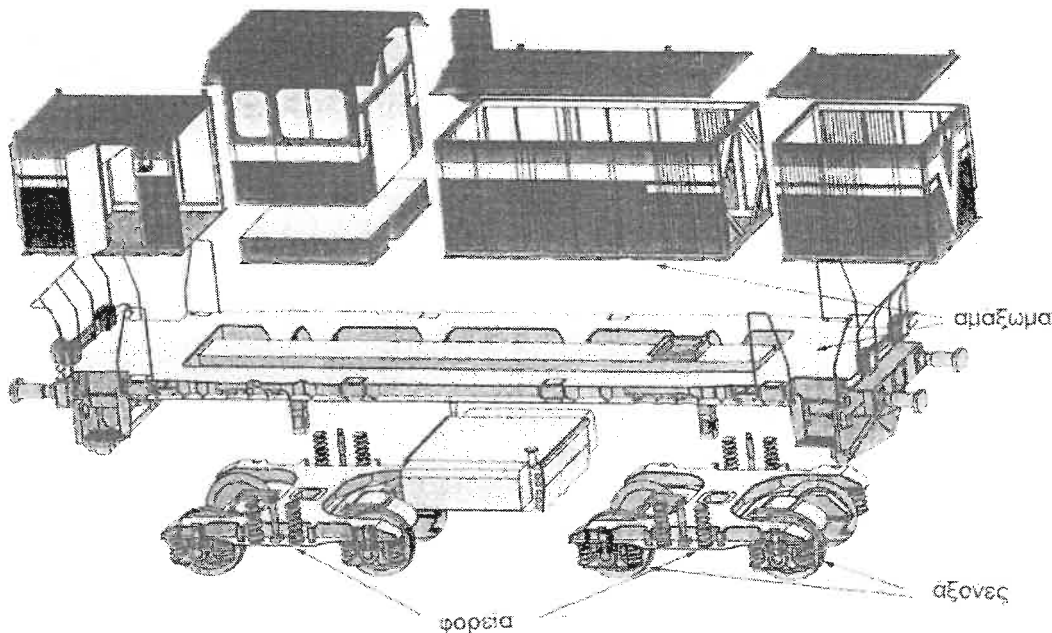
Με τον όρο **σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό** εννοούμε όλα τα οχήματα, κινητήρια (έλκοντα) και ελκόμενα, που κινούνται μέσω σιδερένιων τροχών πάνω στις σιδηροτροχιές.

Τα έλκοντα οχήματα διαθέτουν αυτόνομη κίνηση, είναι δηλαδή εφοδιασμένα με κινητήρες. Τα οχήματα αυτά ή εξυπηρετούν αποκλειστικά την έλξη των ελκόμενων οχημάτων και ονομάζονται «κινητήρια οχήματα» (ή συρμοκινητήρες), ή επιτρέπουν συγχρόνως και τη μεταφορά περιορισμένου σχετικά αριθμού επιβατών και ονομάζονται «αυτοκινητάμαξες».

Τα ελκόμενα (ή φερόμενα) οχήματα δε διαθέτουν αυτόνομη έλξη. Εξυπηρετούν τη μεταφορά προσώπων ή αγαθών. Διακρίνονται σε επιβατικά και εμπορικά οχήματα.

Κάθε σιδηροδρομικό όχημα, ελκόμενο ή κινητήριο, αποτελείται από τρία βασικά μέρη (Σχήμα 1.1):[16]

- το αμάξωμα (ή κιβώτιο)
- τα φορεία
- τους άξονες



Σχήμα 1.1: Κύρια μέρη σιδηροδρομικού οχήματος (έλκον όχημα):
αμάξωμα – φορεία – άξονες [16]

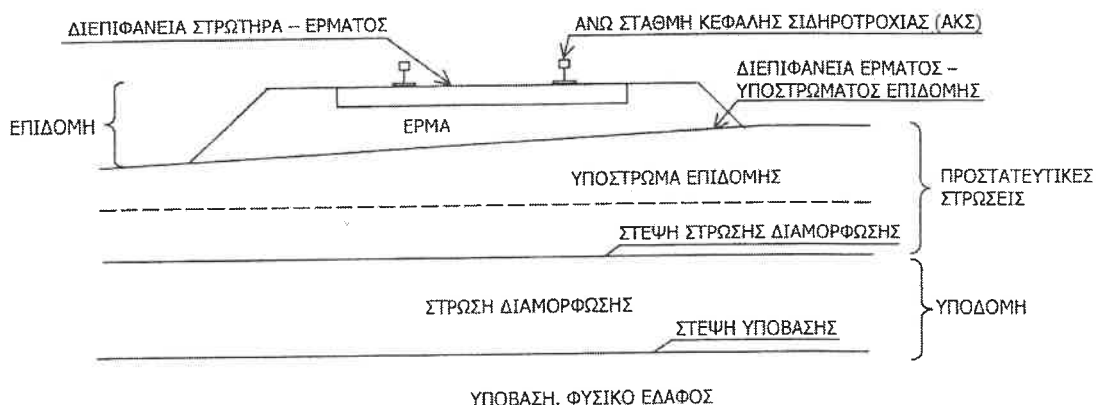
Με τον όρο σιδηροδρομική υποδομή εννοούμε: [16],(1)

(α) την οδό μεταφοράς (ή αλλιώς σιδηροδρομική γραμμή)

(β) το σύνολο των εγκαταστάσεων και τεχνικών έργων, που εξασφαλίζουν την κυκλοφορία των συρμών και τη ρύθμιση της οδού μεταφοράς.

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από μια σειρά στοιχείων και υλικών διαφορετικών ελαστικότητων που μεταφέρουν τα στατικά και δυναμικά φορτία της κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης. Περιλαμβάνει διαδοχικά από πάνω προς τα κάτω τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, το έρμα, το υπόστρωμα του έρματος, τη στρώση διαμόρφωσης και το έδαφος θεμελίωσης ή υπόβαση (Σχήμα 1.2). Οι σιδηροτροχιές τοποθετούνται επί των στρωτήρων μέσω ελαστικών υποθεμάτων και συνδέονται με αυτούς με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων (συνδέσμων) (Σχήμα 1.3).

Σιδηροτροχιές, στρωτήρες, σύνδεσμοι, ελαστικά υποθέματα και έρμα αποτελούν την «επιδομή» της γραμμής, ενώ υπόβαση και στρώση διαμόρφωσης αποτελούν την «υποδομή» της γραμμής (Σχήματα 1.2 και 1.4)



Σχήμα 1.2: Σιδηροδρομική οδός μεταφοράς [2]



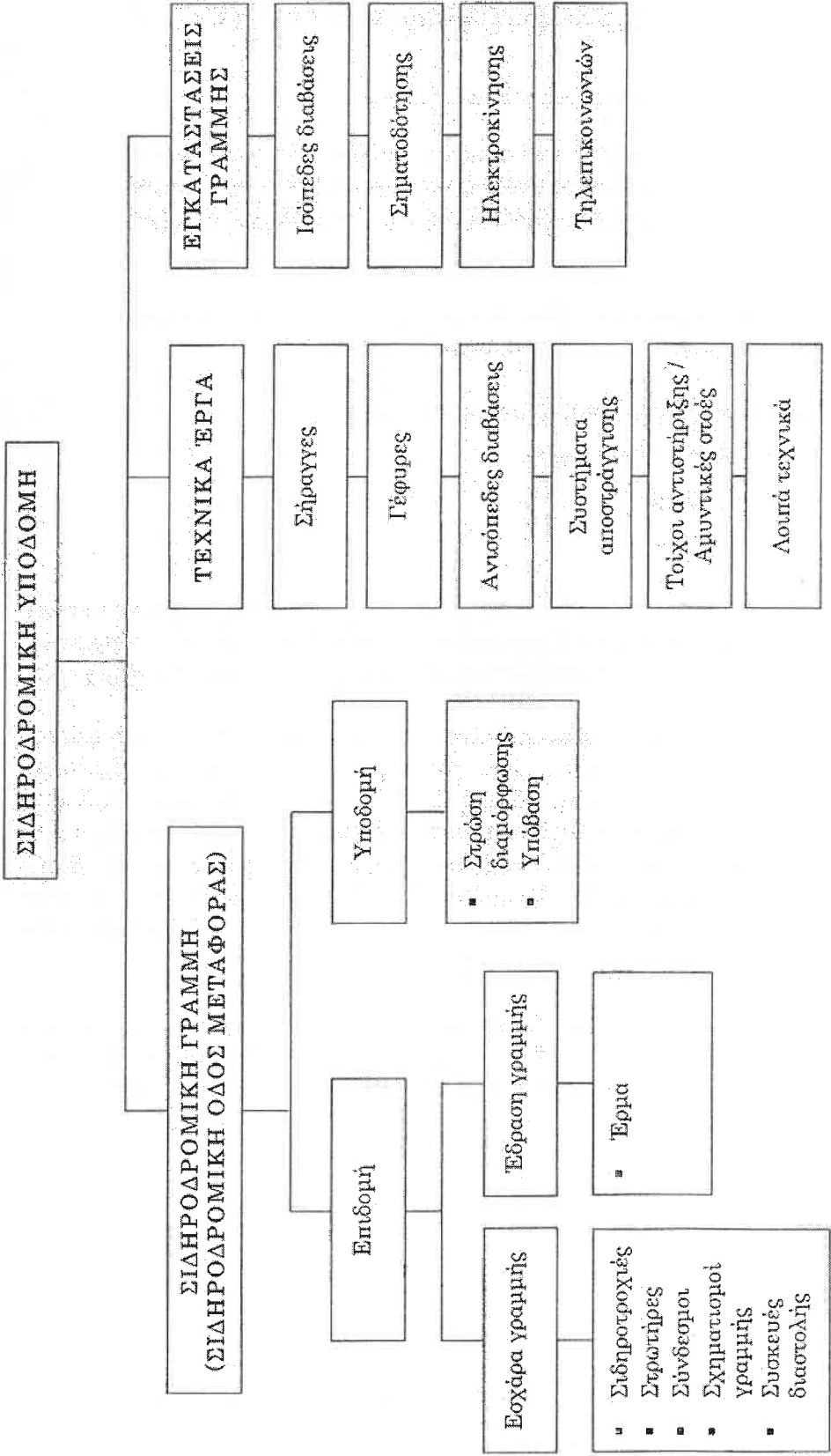
Σχήμα 1.3: Σύνδεση σιδηροτροχιών – στρωτήρων. [16]

Το ανώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, τους συνδέσμους και τα υλικά σύνδεσης σιδηροτροχιών – στρωτήρων καλείται «εσχάρα γραμμής».

Το κατώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει το έρμα και τις υποκείμενες στρώσεις του, καλείται «έδραση» της γραμμής.

Στα τεχνικά έργα συγκαταλέγονται οι σήραγγες και οι υπόγειες διατομές γραμμής κατασκευασμένες με τη μέθοδο “cut and cover”, οι γέφυρες, οι ανισόπεδες διαβάσεις, τα συστήματα αποστράγγισης (στραγγιστήρια, ανοικτές τάφροι), οι τοίχοι και τα έργα αντιστήριξης των εδαφών, οι οχετοί κλπ.

Τέλος, στις εγκαταστάσεις γραμμής περιλαμβάνονται οι ισόπεδες σιδηροδρομικές διαβάσεις και οι εγκαταστάσεις ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης και τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 1.4: Συνιστώσες και στοιχεία σιδηροδρομικής υποδομής. [16]

1.1.1 Διάρκεια ζωής της επιδομής

Με τα σημερινά δεδομένα, η βέλτιστη διάρκεια ζωής της σιδηροδρομικής επιδομής είναι 50 χρόνια. Η υλοποίησή της αφ'ενός μεν απαιτεί μεγάλα ποσά για να πραγματοποιηθεί, αφ'ετέρου οποιαδήποτε εκ των υστέρων επέμβαση στη χάραξη και στα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά είναι δύσκολη και αντισοικονομική. Ως εκ τούτου μια τέτοιου είδους επένδυση πρέπει πάντοτε να εξετάζεται μακροπρόθεσμα και συγκεκριμένα πρέπει να προβλέπεται ποιές μέγιστες ταχύτητες θα αναπτυχθούν και τι φορτία κατ'άξονα θα κυκλοφορήσουν στις επόμενες δεκαετίες.(1)

Η σιδηροδρομική γραμμή πρέπει να εξασφαλίζει: (1)

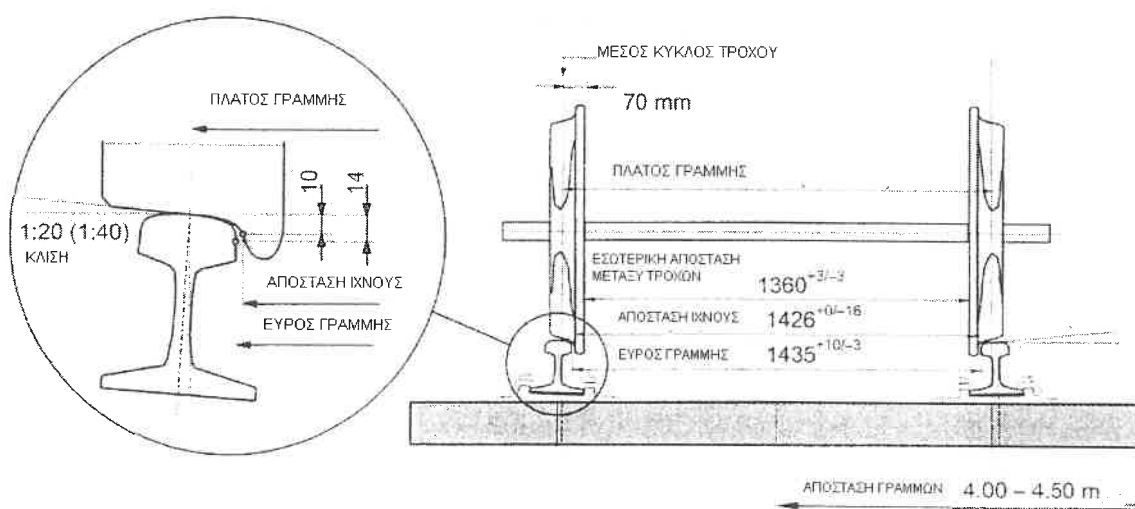
- καλή διανομή των φορτίων κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης,
- αντοχή της επιδομής και υποδομής στα στατικά και δυναμικά φορτία,
- ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων στις ευθυγράμμιες και στις καμπύλες,
- δυναμική άνεση των επιβατών, ασφάλεια κυκλοφορίας,
- μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρό σχετικά κόστος συντήρησης.

1.2 Διαστάσεις για το σύστημα των τροχών και τη σιδηροδρομική γραμμή.

Γενικά ο όρος **εύρος γραμμής** (2e) χρησιμοποιείται για τη μετρούμενη απόσταση μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών. Ειδικότερα πρόκειται για την απόσταση των εσωτερικών παρειών των σιδηροτροχιών η οποία μετράται 14mm κάτω από την επιφάνεια κύλισης. Επιλέγουμε τα 14mm έτσι ώστε η μέτρηση να επηρεάζεται λιγότερο από τις πλευρικές φθορές που υφίσταται η κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Σε κανονικές γραμμές το εύρος είναι 1435mm ενώ οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποκλίσεις είναι +10mm και -3mm.

Παρακάτω δίνονται βασικοί ορισμοί που αφορούν διαστάσεις της σιδηροδρομικής γραμμής (Σχήμα 1.5): [3]

- **Πλάτος γραμμής:** η απόσταση μεταξύ του σημείου επαφής του μέσου κύκλου του τροχού με τη σιδηροτροχιά, έχει ονομαστική τιμή 1500mm
- **Απόσταση γραμμών:** η απόσταση μεταξύ πλαϊνών σιδηροδρομικών γραμμών. Η απόσταση αυτή μπορεί να κυμανθεί από 4m μέχρι 4,50m.
- **Απόσταση ίχνους:** η απόσταση μεταξύ των ονύχων, η οποία μετράται 10mm κάτω από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Σε κανονικές γραμμές η απόσταση αυτή έχει τιμή 1426mm με μέγιστες αποκλίσεις +0mm και -16mm.
- **Εσωτερική απόσταση μεταξύ τροχών:** η απόσταση μεταξύ των εσωτερικών των τροχών. Σε κανονικές γραμμές η απόσταση αυτή έχει τιμή 1360mm με μέγιστες αποκλίσεις +3mm και -3mm
- **Ανοχή ή Ενδιάμεσο πλευρικό κενό (τζόγος):** η απόσταση κατά την οποία μπορεί να μετατοπισθεί το σύστημα των τροχών πλευρικά. Η απόσταση αυτή είναι η ίδια με τη διαφορά μεταξύ εύρους γραμμής και απόστασης ίχνους αυξημένη κατά 1mm [3].



Σχήμα 1: Διαστάσεις μεταξύ συστήματος τροχών [3].

Με βάση το εύρος, οι σιδηροδρομικές γραμμές χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες: [16]

- Κανονικές γραμμές

Στην κατηγορία αυτή ανήκει κυρίως το εύρος των 1435mm. Η απόσταση αυτή (8 πόδια και 4 ίντσες) καθιερώθηκε από τον Άγγλο μηχανικό George Stephenson (1781– 1848). Επειδή την εποχή εκείνη οι περισσότερες χώρες προμηθεύονταν τις ατμομηχανές από την Αγγλία, επικράτησε από τότε, στα περισσότερα κράτη, η απόσταση αυτή. Σήμερα το 62% περίπου του συνολικού μήκους των σιδηροδρομικών γραμμών σε όλο τον κόσμο έχει το εύρος αυτό.

- Ευρείες γραμμές

Στην κατηγορία αυτή συναντώνται τα παρακάτω κυρίως εύρη: 1520/1524mm (Ρωσικό εύρος), 1600mm (Ιρλανδικό εύρος) και 1665mm, 1667mm.

- Μετρικές γραμμές

Στην κατηγορία αυτή συναντώνται τα παρακάτω εύρη: 914mm, 950mm, 1000mm (μετρικό), 1050mm, 1067mm (εύρος Ακρωτηρίου).

- Στενές γραμμές

Στην κατηγορία αυτή συναντώνται εύρη από 600 μέχρι 900mm και κυρίως: 600mm, 700mm, 750mm, 760mm (Βοσνιακό εύρος). Τα εύρη αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε δευτερεύουσες γραμμές (εξυπηρέτηση βιομηχανικών περιοχών, εργοστασίων, ορυχείων).

- Γραμμές μικτού εύρους

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν γραμμές όπου μπορούν να κυκλοφορήσουν ταυτόχρονα συρμοί με άξονες κανονικού εύρους και συρμοί με άξονες μετρικού εύρους.

Η αύξηση του εύρους της γραμμής παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα: [16]

- Βελτιώνει την ευστάθεια των οχημάτων και κατά συνέπεια επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων.
- Επιτρέπει την κατασκευή πλατύτερων οχημάτων και επομένως παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερων φορτίων αλλά και ανετότερης διαρρύθμισης των εσωτερικών χώρων των οχημάτων.
- Αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής της γραμμής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η κατασκευή μιας μετρικής γραμμής εκτιμάται ότι είναι κατά 30% περίπου οικονομικότερη από την κατασκευή μιας γραμμής κανονικού εύρους.

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικές χρησιμοποιούμενες τιμές για το εύρος γραμμής.

➤ Μικρό εύρος:

- 750mm: σε περιοχές της Ινδονησίας
- 1000mm: σε περιοχές της Ελβετίας, σε γραμμές του τραμ κλπ.
- 1067mm: στη Νότια Αφρική, την Ιαπωνία, την Ινδονησία κλπ.

➤ Κανονικό εύρος:

- 1435mm: το πιο σύνηθες χρησιμοποιούμενο εύρος γραμμής σήμερα.

➤ Μεγάλο εύρος:

- 1524mm: στη Ρωσία και τη Φινλανδία
- 1665mm: στην Πορτογαλία
- 1667mm: στην Ισπανία [3].

Στον Πίνακα 1.1 δίνονται συγκεντρωτικά οι κατηγορίες και τα εύρη γραμμών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες χώρες του κόσμου. Στην Ευρώπη πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται το κανονικό εύρος.

Οι σημερινές τάσεις στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών αποβλέπουν τόσο στην αύξηση εκμετάλλευσης των ταχυτήτων των συρμών, όσο και στη μαζικοποίηση των μεταφορών. Έτσι, υπό τις συνθήκες αυτές, το κανονικό εύρος γραμμής ως το πλέον διαδεδομένο αλλά και ως συγκριτικά μεγάλο, υπερτερεί και φαίνεται ότι θα καθιερωθεί μελλοντικά στα περισσότερα κράτη. Ήδη χώρες με διαφορετικά εύρη γραμμής (Ισπανία, Ιαπωνία, Ταϊλάνδη, κλπ.) έχουν αρχίσει την αντικατάσταση των γραμμών τους με γραμμές κανονικού εύρους.[16]

Ανεξάρτητα με την κατηγορία της γραμμής ως προς το εύρος, η απόσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του δικτύου εκτός από τα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας με μικρές ακτίνες καμπυλότητας (400 – 600m), όπου το εύρος της γραμμής αυξάνει μέχρι και 35mm.[16]

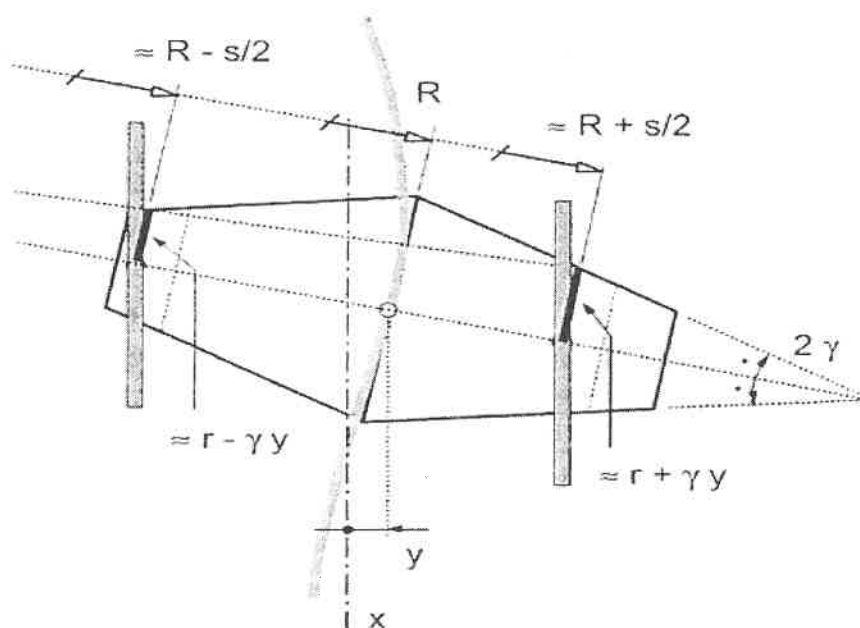
<i>Χώρες</i>	<i>Εύρος (mm)</i>
Ελλάδα	1435, 1000
Ιταλία	1435, 950
Ελβετία	1435, 1000
Ιρλανδία	1600
Φινλανδία	1524
Τουρκία	1435
Ισπανία	1435, 1000, 1674
Πορτογαλία	1000, 1665
Γερμανία	1435, 1000
Χώρες πρώην Σοβ. Ένωσης	1520
Ιαπωνία	1435, 1067
Βραζιλία	1600, 1435, 1000
Χιλή	1676, 1000
Κολομβία	914
Γουατεμάλα	914
Περου	1435
Ουρουγουάη	1435
ΗΠΑ	1435
Καναδάς	1435
Αυστραλία	1600, 1435, 1067, 610
Ν. Ζηλανδία	1067
Ινδία	1676, 1000, 762, 610
Κίνα	1435, 1000
Ταϊλάνδη	1000
Ιορδανία	1050
Ισραήλ	1435
Ιράν	1435
Ιράκ	1435
Ινδοκίνα	1067, 600
Πακιστάν	1672, 762, 1000
Β. Κορέα	1435, 762
Συρία	1435
Ν. Αφρική	1067
Τυνησία	1435, 1000
Αλγερία	1435, 1054
Αίγυπτος	1435
Γαλλόφωνες χώρες Αφρικής	1000

Πίνακας 1.1: Χρησιμοποιούμενες τιμές του εύρους γραμμής σε διάφορες χώρες. [16]

1.3 Οφιοειδής κίνηση του τροχού κατά μήκος της σιδηροτροχιάς.

Το σιδηροδρομικό όχημα μπορεί να προσομοιωθεί με ένα στερεό το οποίο αποτελείται από δύο κώνους που είναι συνδεδεμένοι στη βάση τους (Σχήμα 1.6). Η γωνία γ των κώνων ισούται με την κωνικότητα των τροχών, όπου συνήθως $\tan \gamma = 1/20$ ή $1/40$ [5].

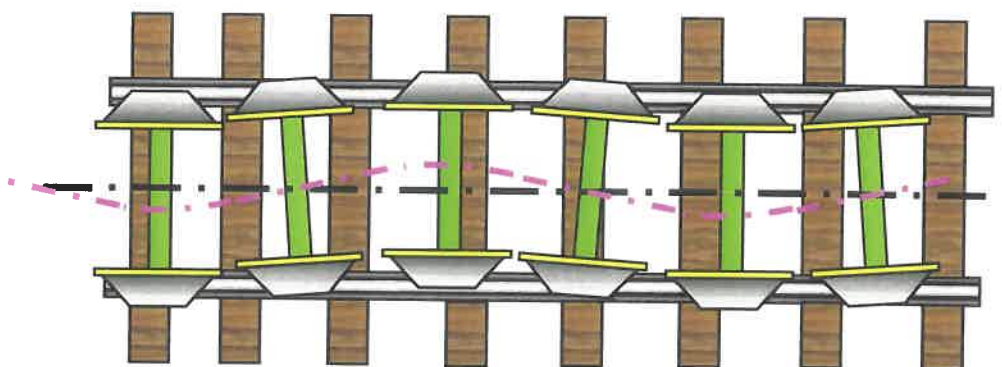
Λόγω τις κωνικότητας του τροχού η κίνηση του σιδηροδρομικού οχήματος έχει οφιοειδή μορφή. Έτσι, με χρήση του κενού διαστήματος που δημιουργείται μεταξύ του όνυχας και της πλευράς της σιδηροτροχιάς, οι δυνάμεις (διαφόρων προελεύσεων) ωθούν το όχημα και καθεπέκταση τους άξονες του τροχού προς τη μια ή την άλλη πλευρά. Με την κίνηση αυτή έρχεται σε επαφή ο τροχός με τη σιδηροτροχιά, γεγονός που προκαλεί φθορές αλλά και ανάπτυξη αντιδράσεων που ωθούν τον τροχό προς την άλλη σιδηροτροχιά [5].



Σχήμα 1.6: Προσομοίωση σιδηροδρομικού οχήματος με στερεό αποτελούμενο από δύο ενωμένους κώνους.[3]

Αναλυτικότερα η οφιοειδής κίνηση συμβαίνει ως εξής (Σχήμα 1.7). Όταν ο άξονας δεν βρίσκεται ακριβώς στη μέση της απόστασης των σιδηροτροχιών αλλά είναι λίγο μετατοπισμένος π.χ. προς τα αριστερά, τότε ο αριστερός τροχός κυλίζει με μεγαλύτερη ακτίνα σε σχέση με τον δεξιό. Δεδομένου ότι το σύστημα των τροχών είναι σταθερά συνδεδεμένο, η γωνιακή ταχύτητα είναι η ίδια και για τους δύο τροχούς. Επομένως ο αριστερός τροχός διανύει μεγαλύτερη απόσταση και άρα προπορεύεται στην κίνηση ενώ ο άξονας λαμβάνει πλάγια θέση σε σχέση με τον άξονα της γραμμής. Στη συνέχεια ο άξονας κινείται προς τη μέση της γραμμής και ακόλουθα προς τη δεξιά πλευρά. Έτσι τα σημεία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς μεταφέρονται προς τα εσωτερικά του επισώτρου με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακτίνα του αριστερού τροχού και αντίστοιχα να αυξάνεται η ακτίνα με την οποία κυλίζει ο δεξιός τροχός. Όταν η μέση του άξονα συναντά τον άξονα της γραμμής τότε οι ακτίνες των τροχών είναι ίσες και ο άξονας κινείται σε ευθυγραμμία, λόγω όμως της πλάγιας θέσης που ήδη έχει η κίνηση γίνεται προς τα δεξιά. Σε αυτή τη φάση προπορεύεται ο δεξιός τροχός. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της οφιοειδούς κίνησης. Στις εγκάρσιες αυτές μετακινήσεις του τροχού αντιτίθενται οι δυνάμεις ψευδοολίσθησης [2].

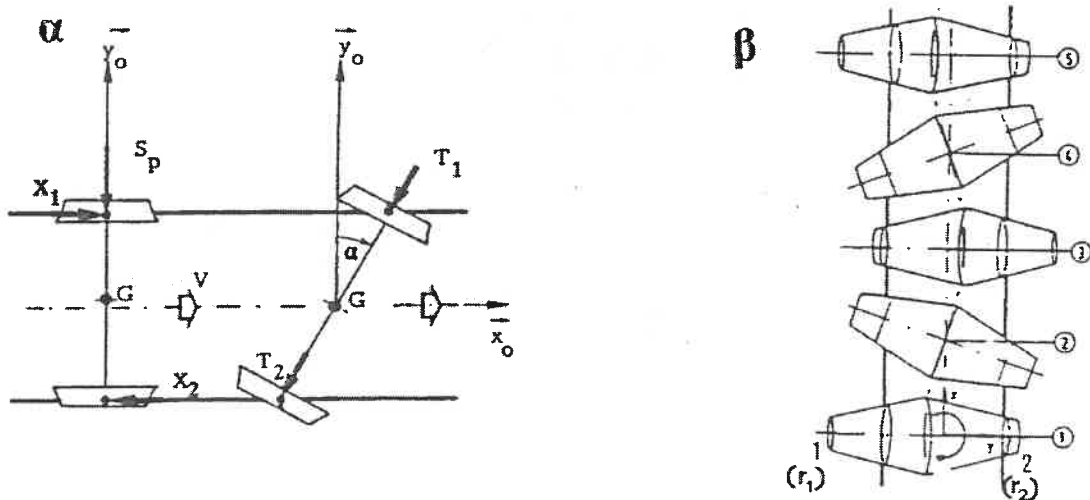
Η οφιοειδής κίνηση μελετήθηκε από τον Klingel το 1883 και για το λόγο αυτό φέρει συχνά το όνομά του. Υποθέτοντας αρμονική εγκάρσια κίνηση χωρίς απόσβεση ο Klingel παρουσίασε την κινηματική ανάλυση του φαινομένου [3].



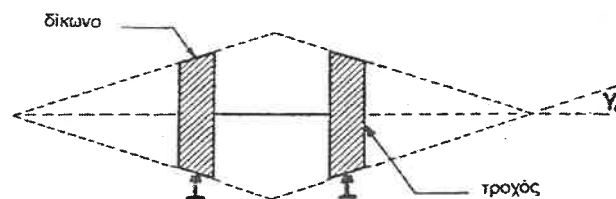
Σχήμα 1.7: Κυματοειδής κίνηση άξονα

1.4 Σχέσεις Klingel για την οφιοειδή κίνηση

Η κίνηση ενός σιδηροδρομικού άξονα είναι γνωστή ως οφιοειδής ή λοξοειδής κίνηση (Σχήμα 1.8). Ο Klingel προσομοίωσε το σιδηροδρομικό άξονα με ένα δίκωνο (Σχήμα 1.9) -δύο συμμετρικοί κώνοι κολλημένοι στη βάση τους-. Υπέθεσε ότι ο άξονας κινείται με σταθερή ταχύτητα V κατά τη διεύθυνση του άξονα της γραμμής $\bar{x}$ ενώ συγχρόνως, σε μια τυχαία χρονική στιγμή t , μετατοπίζεται εγκάρσια κατά μια ποσότητα y και στρέφεται κατά μια γωνία α (Σχήμα 1.10α).

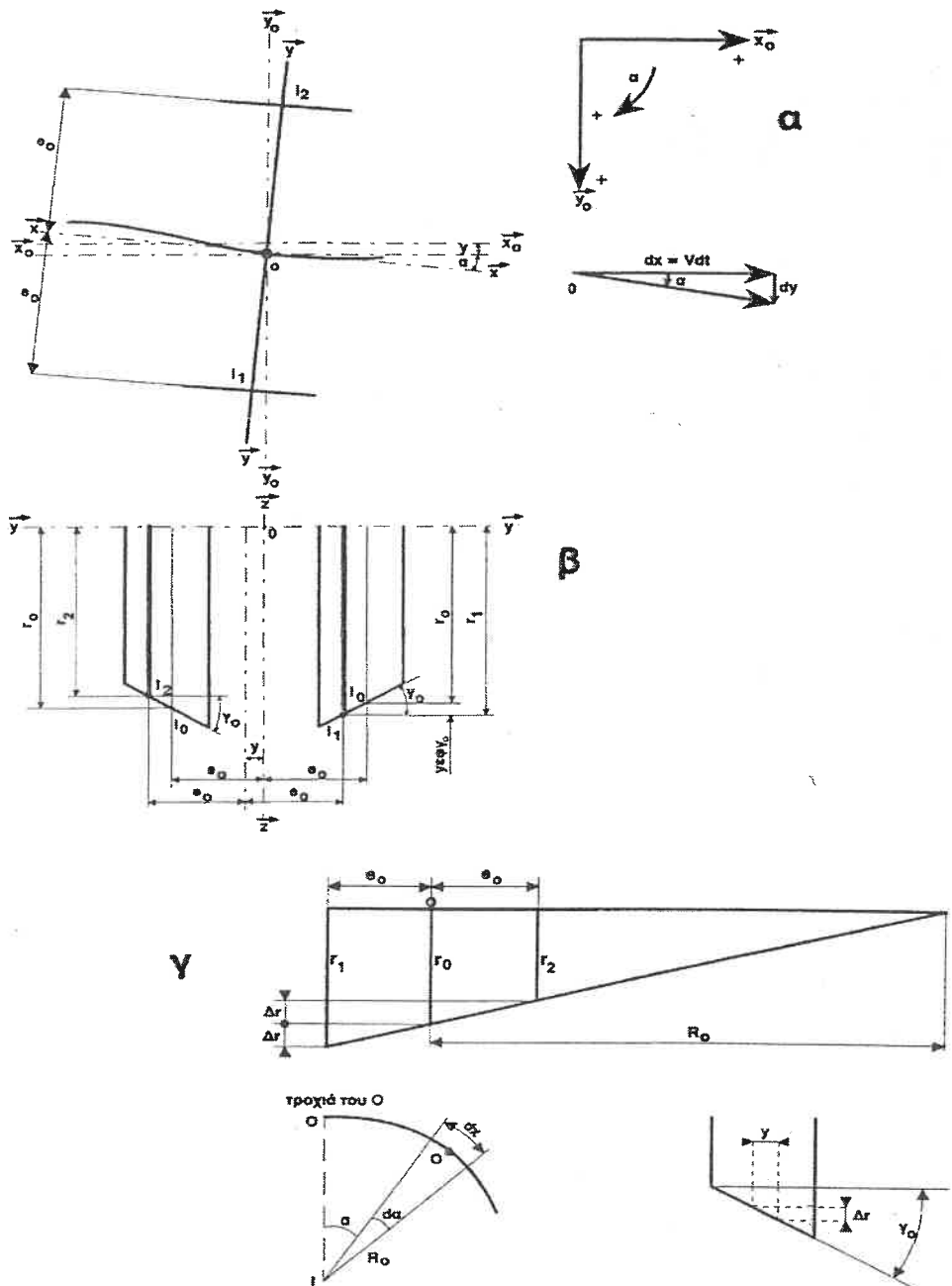


Σχήμα 1.8: Οφιοειδής κίνηση σιδηροδρομικού άξονα [16]



Σχήμα 1.9: Προσομοίωση σιδηροδρομικού άξονα με δίκωνο [16]

Κατά την κίνηση δε λαμβάνει χώρα επαφή ονύχων – σιδηροτροχιών ($y < \sigma$). Σύμφωνα με το Σχήμα 1.10β η ακτίνα κύλισης r_1 του τροχού 1 αυξάνει κατά μια ποσότητα Δr ενώ η ακτίνα κύλισης r_2 του τροχού 2 μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα.



Σχήμα 1.9: Άξονας μεμονωμένος σε τυχαία θέση στη γραμμή [16]

Η ταχύτητα του σημείου Ο του άξονα δίνεται από τις σχέσεις [16]:

$$dx = Vdt \quad (1.1)$$

$$dy = a dx = aVdt \quad (1.2)$$

Η κίνηση του άξονα ισοδυναμεί με περιστροφή του γύρω από ένα σημείο Ι με ακτίνα ΙΟ = R_0 (Σχήματα 1.10β και γ). Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$R_0 = \frac{2e_0 r_0}{r_1 - r_2} \quad (1.3)$$

$$dx = -R_0 da \quad (1.4)$$

$$\Delta r = \frac{r_1 - r_2}{2} \quad (1.5)$$

$$\Delta r = y \varepsilon \phi \gamma_0 \quad (1.6)$$

Από τις σχέσεις 1.1 έως 1.6 προκύπτουν οι κινηματικές εξισώσεις:

$$y' = Va \quad (1.7)$$

$$a' = -V \frac{\varepsilon \phi \gamma_0}{e_0 r_0} y \quad (1.8)$$

από όπου προκύπτει:

$$y'' + \frac{\varepsilon \phi \gamma_0}{e_0 r_0} V^2 y = 0 \quad (1.9)$$

$$a'' + \frac{\varepsilon\phi\gamma_0}{e_0 r_0} V^2 a = 0 \quad (1.10)$$

Οι λύσεις των διαφορικών εξισώσεων 1.9 και 1.10 δίνουν:

$$y = y_0 \eta \mu \sqrt{\frac{\varepsilon\phi\gamma_0}{e_0 r_0}} V t \quad (1.11)$$

$$a = a_0 \eta \mu \sqrt{\frac{\varepsilon\phi\gamma_0}{e_0 r_0}} V t \quad (1.12)$$

Η κίνηση του δίκωνου είναι μια ημιτονοειδής κίνηση με διαφορά φάσης των παραμέτρων y και a ίση με $\pi/2$ και με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

$$\text{Εύρος κύματος:} \quad y_0 \quad (1.13)$$

$$\text{Μήκος κύματος:} \quad L_0 = 2\pi \sqrt{\frac{e_0 r_0}{\varepsilon\phi\gamma_0}} \quad (1.14)$$

$$\text{Συχνότητα:} \quad f = \frac{V}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon\phi\gamma_0}{e_0 r_0}} \quad (1.15)$$

$$\text{Μέγιστη εγκάρσια επιτάχυνση :} \quad y_{\max}'' = 4\pi^2 y_0 \frac{V^2}{L_0^2} \quad (1.16)$$

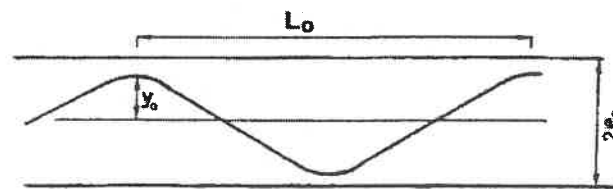
Η μείωση της κωνικότητας γ_0 των τροχών και η αύξηση της ακτίνας κύλισης r_0 αυξάνουν το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης και μειώνουν τις εγκάρσιες επιταχύνσεις.

Ο Klingel παρουσίασε καθαρά κινηματική ανάλυση του φαινομένου υποθέτοντας αρμονική κίνηση χωρίς απόσβεση και χωρίς επαφή ονύχων τροχών – σιδηροτροχιάς (Σχήμα 1.11).

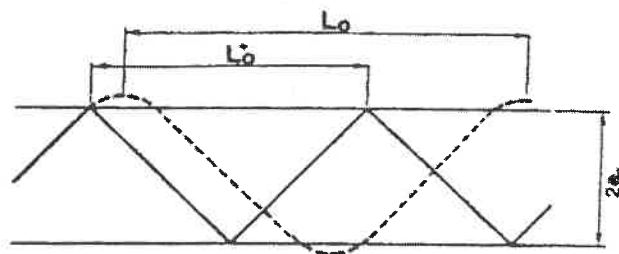
Στην πραγματικότητα η κίνηση ενός σιδηροδρομικού άξονα και ιδίως ενός πλήρους οχήματος (αμάξωμα και φορεία) είναι πολύ πιο σύνθετη.

Η παρουσία των δυνάμεων ψευδο – ολίσθησης και των δυνάμεων βαρύτητας στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και η μεταβλητή κωνικότητα των τροχών δεν επιτρέπουν την καθαρή κύλιση των τροχών και προσδίδουν στην κίνηση του άξονα δυναμική συμπεριφορά.

Η παρουσία των φορείων και του αμαξώματος και οι ελαστικές συνδέσεις της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ανάρτησης αυξάνουν τη μη γραμμικότητα των φαινομένων.



Σχήμα 1.11: Καθαρά κινηματική παράσταση της οφιοειδούς κίνησης του άξονα [16]



Σχήμα 1.12: Κίνηση άξονα με επαφή ονύχων - σιδηροτροχιών [16]

Οι οριζόντιες δυνάμεις ψευδο – ολίσθησης X_1 και X_2 προκαλούν την οριζόντια στροφή του άξονα και σε συνδυασμό με τις εγκάρσιες δυνάμεις

ψευδο – ολίσθησης και τις δυνάμεις βαρύτητας ενεργοποιούν το μηχανισμό της οφιοειδούς κίνησης του άξονα (Σχήμα 1.8).

Η κίνηση αυτή στις μικρές ταχύτητες είναι ευσταθής και εξασφαλίζει τη φυσική καθοδήγηση του άξονα (ένας μεμονωμένος σιδηροδρομικός άξονας είναι ευσταθής μέχρι μια ταχύτητα 16 m/sec). Πέρα από μια ταχύτητα η κίνηση γίνεται ασταθής δημιουργώντας ταλαντώσεις μεγάλου εύρους που περιορίζονται από την παρουσία των σιδηροτροχιών. Στην περίπτωση επαφής των ονύχων με τις σιδηροτροχιές η μορφή της κίνησης αλλάζει ενώ το μήκος κύματος των ταλαντώσεων μειώνεται και η συχνότητα αυξάνει (Σχήμα 1.12).

Σε γενικές γραμμές οι τύποι του Klingel που αναπτύχθηκαν και προέκυψαν παραπάνω βασίζονται στις παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές: [11]

- Το σύστημα των τροχών είναι ένα αλύγιστο σώμα. Ο άξονας των τροχών δεν είναι ελαστικός ούτε σε κάμψη ούτε σε στρέψη και ο τροχός δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελαστικά. Και οι δύο τροχοί μπορούν να στραφούν κατά κοινή γωνία χ (η οποία στους υπολογισμούς αγνοείται ως αμελητέα ποσότητα) και μένουν σταθερά παράλληλοι μεταξύ τους.
- Το μέσο του τροχοφόρου άξονα έχει ελευθερία κίνησης μόνο κατά μήκος της σιδηροτροχιάς (χ_0) και εγκάρσια στο μέσο της σιδηροδρομικής γραμμής (y_0). Εκτός αυτών μπορεί ο τροχοφόρος άξονας να περιστραφεί γύρω από το κέντρο του κατά γωνία α (γωνία παρέκκλισης) σε σχέση με τον άξονα y_0 .
- Η επιφάνεια κύλισης του τροχού αποτελείται από ένα κώνο χωρίς όνυχια.
- Οι τροχοί έχουν μια πολύ μικρή επιφάνεια κύλισης. Όταν η κλίση της επιφάνειας κύλισης του τροχού (επίσωτρο) αλλάζει ως προς το επίπεδο της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς, στην περίπτωση που έχουμε εγκάρσια μετατόπιση του άξονα, το σημείο επαφής του τροχού δε μετατίθεται εγκάρσια.

Αυτό συμβαίνει γιατί ο τροχοφόρος άξονας παίρνει μια κλίση σε σχέση με την οριζόντιο.

- Η εγκάρσια μετακίνηση y του μέσου του τροχοφόρου άξονα καθώς και η στροφή του συστήματος των τροχών κατά γωνία α παραμένουν σταθερά μικρά, αφού το y δε μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μισό του ενδιάμεσου πλευρικού κενού.

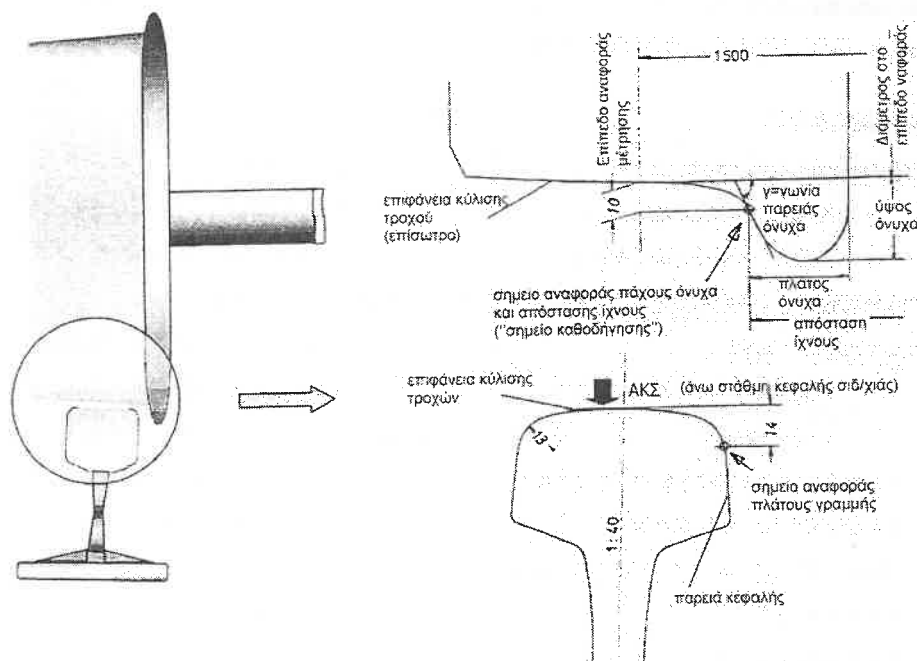
Μπορούμε σε αυτό το σημείο να θεωρήσουμε ότι:

- $\tan \alpha \approx \alpha \approx \sin \alpha$
- μια κίνηση του μέσου του τροχοφόρου άξονα στη x κατεύθυνση είναι ίση με μια τέτοια στη x_0 κατεύθυνση
- μια μετακίνηση του σημείου επαφής πάνω στον κωνικό τροχό κατά μια εγκάρσια μετακίνηση y του μέσου του τροχοφόρου άξονα, είναι ίση με μετακίνηση y_0 .

Στην κίνηση αυτή που παρουσίασε ο Klingel αγνοείται η τριβή και θεωρείται ότι ο τροχός κυλίζει επί της σιδηροτροχιάς.

1.5 Τροχός

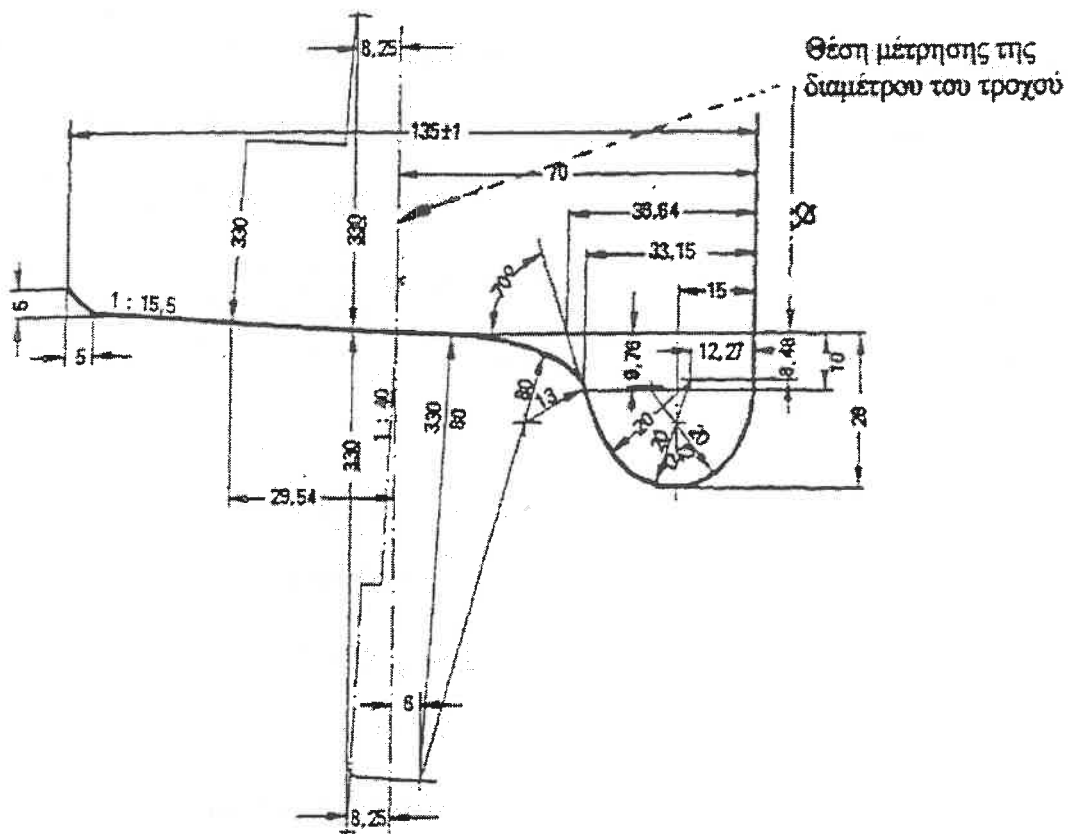
Ο τροχός κυλίζει επί της Άνω Στάθμης Κεφαλής Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) με το επίσωτρο (Σχήμα 1.13) και στις καμπύλες οδηγείται από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών. Επομένως, ο τροχός και η σιδηροτροχιά πρέπει να εναρμονίζονται ως προς τη μορφή τους στην περιοχή επαφής. Το επίσωτρο των τροχών τόσο των μηχανών όσο και των ελκόμενων οχημάτων έχει ενιαία διατομή, η οποία διαμορφώνεται με βάση την εμπειρία από παρατηρηθείσες φθορές προγενέστερων μορφών.[2]



Σχήμα 1.13: Στοιχεία τροχού και σιδηροτροχιάς. [2]

Η επιφάνεια επαφής δεν είναι οριζόντια. Έχει ελαφρά κλίση προς τον άξονα της γραμμής. Έτσι, η επιφάνεια του επισώτρου, αυτή που κυλιέται επί της σιδηροτροχιάς, είναι κολουροκωνική. Η μορφή αυτή εξισώνει κατά το δυνατό τη διαφορά των οριζοντιογραφικών ακτίνων εσωτερικής και εξωτερικής σιδηροτροχιάς, κατά την κίνηση των συρμών στις καμπύλες. Η σιδηροτροχιά τοποθετείται με κλίση 1:40 ως προς την κατακόρυφο. Η κλίση του αξονικού επιπέδου της σιδηροτροχιάς, σε συνδυασμό με την κωνικότητα των επισώτρων, βοηθάει στην ευστάθεια και στην ομαλότερη κίνηση των συρμών.[2]

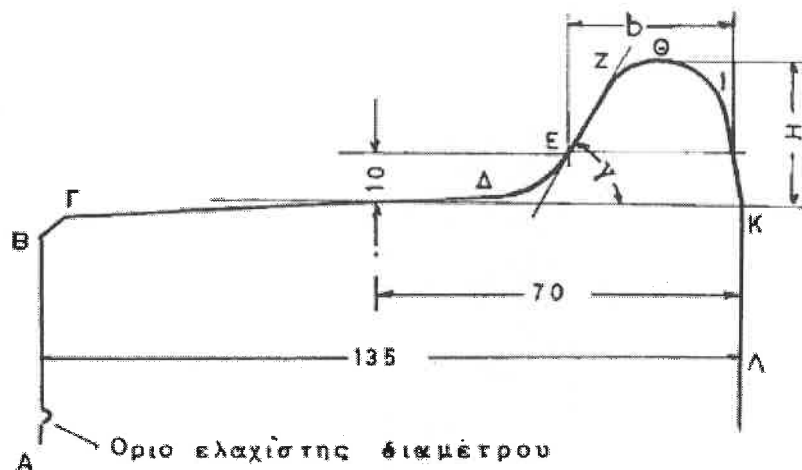
Η κλίση του όνυχας στην επιφάνεια επαφής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς δεν επιτρέπεται να είναι ούτε πολύ απότομη ούτε πολύ ομαλή. Στην πρώτη περίπτωση ο όνυχας θα «κτύπαγε» και θα «ολίσθαινε» επί αυτής. Στη δεύτερη περίπτωση θα υπήρχε ο κίνδυνος να αναρριχηθεί επί της σιδηροτροχιάς, με συνέπεια τον εκτροχιασμό του οχήματος και του συρμού. Τεχνικά κατάλληλη κλίση θεωρείται μια γωνία 70° (Σχήμα 1.14).[2]



Σχήμα 1.14: Διατομή (προφίλ) τροχού.[2]

1.6 Ονομασία τμημάτων πέλματος και εξέλιξη της μορφής του

Σύμφωνα με τη UIC 510-2, τα διάφορα τμήματα της μορφής του πέλματος του τροχού έχουν τις παρακάτω ονομασίες (Σχήμα 1.15): (4)



Σχήμα 1.15 : Τμήματα που απαρτίζουν το πέλμα του τροχού (4)

όπου γ = γωνία (εξωτερικής επιφάνειας) όνυχα

AB = εξωτερική μετωπική επιφάνεια

BΓ = εξωτερική λοξοτομή

ΓΔ = επιφάνεια κύλισης (επίσωτρο τροχού)

ΔΕ = κοίλο τμήμα όνυχα

ΕΖ = εσωτερική επιφάνεια όνυχα

ΖΘΙ = κορυφή όνυχα

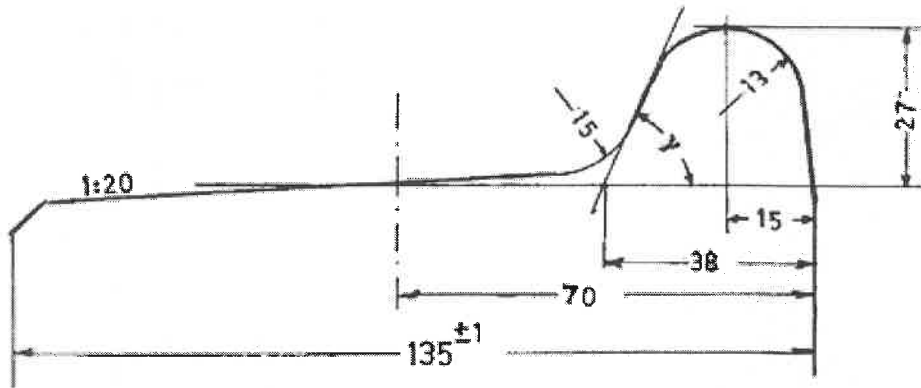
ΙΚ = εσωτερική επιφάνεια όνυχα

ΚΛ = εσωτερική μετωπική επιφάνεια

Το τμήμα ΔΕ έχει άμεση σχέση με την ομαλή απόσβεση των εγκαρσίων δυνάμεων ενώ το ΕΖΘ με την ασφάλεια κυκλοφορίας.

Στη συνέχεια στο σχήμα 1.16 δίνεται μια από τις παλαιότερες μορφές πέλματος. Η κλίση του πέλματος είναι σταθερή και συνήθως 1:20, η δε γωνία $\gamma = 60^\circ$. Τα δίκτυα παρακολουθούν την εξέλιξη της μορφής λόγω φθορών κατά την κυκλοφορία. Συχνά στην περιοχή κύλισης δίνουν κλίση 1:40 ή προσαρμόζουν αυτή στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Στην περιοχή του όνυχα δίνεται συχνά εκ των προτέρων η μορφή φθοράς που έχει παρατηρηθεί κατά την κυκλοφορία, ενώ η γωνία γ αυξάνει από $\gamma = 60^\circ$ σε $\gamma = 70^\circ$. Όλες αυτές οι προσπάθειες με ταυτόχρονη θεωρητική προσέγγιση οδήγησαν, στη δεκαετία

του 1970, στην καθιέρωση της ενοποιημένης κατά UIC – ORE μορφής πέλματος για ταχύτητες μέχρι 160 km/h. Η μορφή αυτή είναι υποχρεωτική μόνο σε περιοχές του πέλματος που έχουν σχέση με την ασφάλεια, ενώ τη θέση κύλισης έχουν τη δυνατότητα στο δίκτυο να τη διαμορφώνουν ανάλογα με τις ιδιομορφίες της υποδομής τους.



Σχήμα 1.16: Μορφή πέλματος (4)

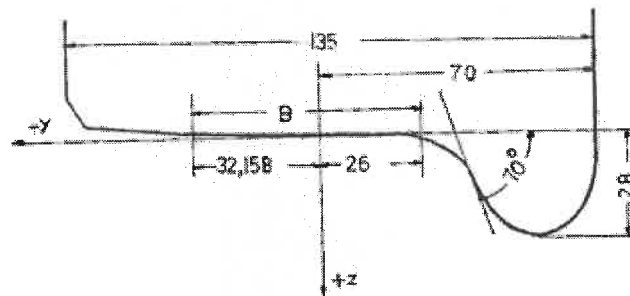
Η μορφή αυτή στην περιοχή επαφής B (Σχήμα 1.16) για $y = +32,158\text{mm}$ μέχρι $y = -26\text{mm}$ δίνεται από τη σχέση:

$$Z = f(y) = 0 - 3.358 \dots 10^{-2}y + 1.565 \dots 10^{-3}y^2 - 2.810 \dots 10^{-5}y^3 + 5.844 \dots 10^{-8}y^4 - 1.562 \dots 10^{-8}y^5 + 5.309 \dots 10^{-15}y^6 - 5.957 \dots 10^{-12}y^7 + 2.646 \dots 10^{-13}y^8$$

Στην περιοχή αυτή η μορφή δεν είναι υποχρεωτική. Η πλήρης μορφή του πέλματος δίνεται από το UIC-510-2. Η ενοποιημένη μορφή δίνει πάχος όνυχας $b = 32.5\text{ mm}$ και γωνία $\gamma = 70^\circ$.

Η ενοποιημένη μορφή δίνεται στο σχήμα 1.17. Είναι γνωστό, πως ο τροχός λόγω της κωνικότητάς του, εκτελεί κάτω από ιδανικές συνθήκες, ομαλή παλινδρόμηση. Το μήκος κύματος αυτής της ημιτονοειδούς κίνησης, φαινόμενα συντονισμού κλπ. έχουν άμεση σχέση με την κλίση του πέλματος. Όσο η κλίση αυξάνει τόσο το φαινόμενο του συντονισμού μετατοπίζεται προς

χαμηλότερες ταχύτητες (μικρή V κρίσιμη), το μήκος κύματος ελαττώνεται κλπ. Η ελάττωση της κλίσης του πέλματος επιφέρει αντίθετα αποτελέσματα.



Σχήμα 1.17: Ενοποιημένη μορφή πέλματος τροχού. (4)

1.7 Κωνικότητα της επιφάνειας κύλισης των τροχών σιδηροδρομικού οχήματος

Η επιφάνεια κύλισης των τροχών σιδηροδρομικού οχήματος κατασκευάζεται με μορφή κολουρου κώνου, Παλαιότερα η κλίση της επιφάνειας αυτής ήταν 1:20, σήμερα όμως ανέρχεται σε 1:40, ενώ στις σιδηροτροχιές UIC60 προτιμάται η κλίση 1:60 [8]. Οι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη η κατασκευή κολουροκωνικής επιφάνειας κύλισης των τροχών παρατίθενται παρακάτω : [2]

- I. Καλύτερη προσαρμογή του φορείου στις καμπύλες και παράλληλη αποφυγή κατά το δυνατόν της ολίσθησης του τροχού στις καμπύλες.

Στις καμπύλες κάθε τροχός διανύει διαφορετική απόσταση. Έτσι οι τροχοί ενός άξονα που είναι σταθερά συνεζευγμένοι διανύουν διαφορετικές αποστάσεις έχοντας ίδια γωνιακή ταχύτητα και ίδια ακτίνα τροχών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο ένας ή και οι δύο τροχοί να

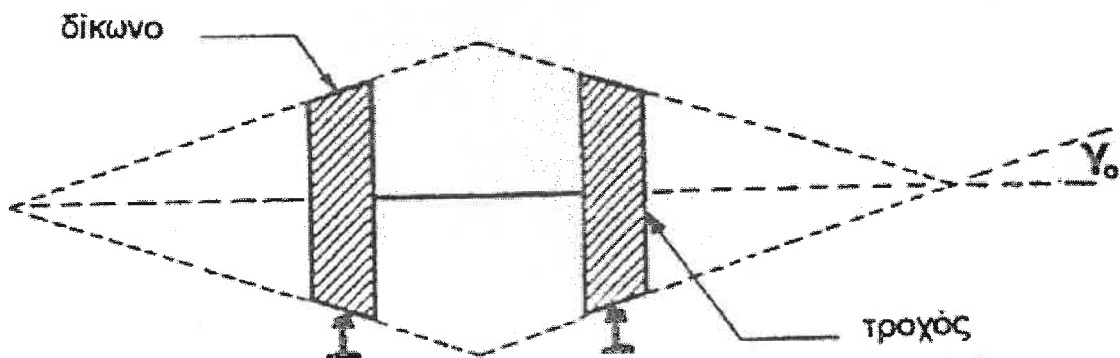
βοήθεια της διαφοροποίησης των ακτινών δίνεται η δυνατότητα άρσης των διαφορών αυτών.

1.8 Η έννοια της ισοδύναμης κωνικότητας

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται στο δελτίο 519/12-04-05 της UIC:

[15]

«**Ισοδύναμη κωνικότητα** (γ_e) ενός δεδομένου σιδηροδρομικού άξονα είναι η επαπτομένη της κωνικότητας (γ_0) (εφγ₀ (cone angle)) ενός υποθετικού σιδηροδρομικού άξονα με τροχούς κωνικούς (εγκάρσια διατομή τριγωνική- Σχήμα 1.18) 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.»



Σχήμα 1.18 : Προσομοίωση ενός σιδηροδρομικού άξονα με δίκωνο [15]

Για να γίνει πιο σαφής ο παραπάνω ορισμός πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο δεδομένος άξονας (και γενικότερα όλοι οι σιδηροδρομικοί άξονες) δεν έχει τροχούς κωνικούς (εγκάρσια διατομή κωνική).

Η ισοδύναμη κωνικότητα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο υπεισέρχεται στις μαθηματικές εκφράσεις των δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης και βαρύτητας που ασκούνται στην ελλειπτική επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και ως εκ τούτου επηρεάζει την εγκάρσια συμπεριφορά του (Joly, 1983). Συγκεκριμένα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την κρίσιμη ταχύτητα (ταχύτητα ευστάθειας) ενός οχήματος στις ευθυγραμμίες και την ποιότητα εγγραφής των φορέων στα καμπύλα οριζοντιογραφικά τμήματα γραμμής (αποφυγή ή όχι της ολίσθησης των τροχών και κυρίως αποφυγή ή όχι της επαφής όνυχα τροχού – εσωτερικής παρειάς κεφαλής σιδηροτροχιάς).

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 αυτού άξονα, το διάκενο όνυχα τροχού – σιδηροτροχιάς, την εγκάρσια διατομή της επιφάνειας κύλισης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και την εγκάρσια διατομή της επιφάνειας κύλισης του επισώτρου του τροχού (profil τροχού) (Joly, 1983). Εξαρτάται δηλαδή τόσο από γεωμετρικά στοιχεία της γραμμής όσο και από κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού με αποτέλεσμα να συγκαταλέγεται στις παραμέτρους «διεπαφών».

Με δεδομένα τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι το αρχικό profil του επισώτρου ενός τροχού είναι μεταβλητό κατά το μήκος του (μεταβλητή κωνικότητα) η ισοδύναμη κωνικότητα είναι διαφορετική για διαφορετική εγκάρσια μετακίνηση του άξονα από τη θέση της αρχικής ισορροπίας (άξονας κεντρωμένος στη γραμμή). Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι το profil του τροχού, με τα χιλιόμετρα που αυτός διανύει, φθείρεται με αποτέλεσμα να αλλάζει η τιμή της αρχικά σχεδιασμένης ισοδύναμης κωνικότητας και κατ' επέκταση να μεταβάλλεται η εγκάρσια συμπεριφορά του οχήματος (η αντίστοιχη φθορά της κεφαλής της σιδηροτροχιάς είναι θεωρητικά πολύ μικρότερη).

Όπως αποδεικνύεται από τη θεωρία (αναλυτικές εκφράσεις των δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης – μαθηματικά μοντέλα) (Joly and Pyrgidis, 1994) όσο και από την πράξη, μικρές τιμές ισοδύναμης κωνικότητας επιτρέπουν μεγάλες ταχύτητες στην ευθυγραμμία. Αντίθετα στα καμπύλα τμήματα

γραμμής, όπως αποδεικνύεται, οι μεγάλες τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας διευκολύνουν την εγγραφή των φορέων.

Με βάση τα παραπάνω ένα «έξυπνο» προφίλ τροχού, που για μικρές τιμές εγκάρσιας μετακίνησης του άξονα θα εξασφάλιζε μικρές τιμές ισοδύναμης κωνικότητας (περίπτωση ευθυγραμμίας) ενώ για μεγάλες τιμές εγκάρσιας μετατόπισης θα εξασφάλιζε μεγάλες τιμές ισοδύναμης κωνικότητας (περίπτωση καμπυλών) θα αποτελούσε μια πολύ καλή λύση στην προσπάθεια να συμβιβαστεί η αναγκαστική συνύπαρξη ευθύγραμμων /καμπύλων οριζιντιογραφικών τμημάτων σε μια γραμμή.

Στην τελευταία έκδοση (AEIF, 04/02/02- HS INS TSI for EC 040205) των τεχνικών προδιαγραφών διαλειτουργικότητας (ΤΠΔ) για το υποσύστημα «Υποδομή», προτείνεται, σε σχέση με την ταχύτητα του οχήματος, οι τιμές σχεδιασμού της ισοδύναμης κωνικότητας που δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.2).

Περιοχή ταχύτητας (km/h)	Οριακές τιμές ισοδύναμης κωνικότητας (γ_e)
≤ 160	
> 160 και ≤ 200	0,30
> 200 και ≤ 230	0,25
> 230 και ≤ 250	0,25
> 250 και ≤ 280	0,20
> 280 και ≤ 300	0,10
> 300	0,10

Πίνακας 1.2: Προτεινόμενες στις ΤΠΔ τιμές σχεδιασμού ισοδύναμης κωνικότητας.[15]

Κεφάλαιο 2

Σιδηροτροχιές

2.1 Σκοπιμότητα

Οι σιδηροτροχιές είναι το ανώτερο στοιχείο της επιδομής και της εσχάρας της γραμμής. Ο ρόλος τους είναι τριπλός: [2],[16]

- Παραλαμβάνουν τα φορτία από τους τροχούς και μέσω της μεταβίβασής τους στους στρωτήρες και στο έρμα τα κατανέμουν τελικά στο έδαφος θεμελίωσης,
- Υλοποιούν την επιφάνεια επί της οποίας κυλίνουν οι τροχοί,
- Καθοδηγούν πλευρικά, όταν χρειάζεται, τους τροχούς.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Στον πίνακα 2.1 δίνονται κάποιες σημαντικές χρονολογίες που καθόρισαν την εξέλιξη της σιδηροτροχιάς.[16]

Το 1738 εμφανίζονται οι πρώτες ξύλινες σιδηροτροχιές με επένδυση από χυτοσίδηρο (Σχήμα 2.1). Το 1789 ο William Jessop προτείνει ένα τύπο σιδηροτροχιάς που μοιάζει αρκετά με αυτόν που έχει επικρατήσει σήμερα. (Σχήμα 2.2).

Το 1820 ο John Birkenstow προτείνει ένα νέο τύπο σιδηροτροχιάς (Σχήμα 2.1) με τον οποίο εξοπλίσθηκε η πρώτη σιδηροδρομική γραμμή, μεταξύ Stockton-Darlington που εγκαινιάσθηκε το 1825 στην Αγγλία.

1738	Πρώτες σιδηροτροχιές επενδεδυμένες με χυτοσίδηρο (ανθρακωρυχεία Β.Αγγλίας)
1767	Πρώτη μεταλλική σιδηροτροχιά μορφής L (από τον R.Reynolds)
1789	Σιδηροτροχιά W.Jessop
1820	Σιδηροτροχιά Birkenstow (τύπος σιδηροτροχιών πρώτης σιδηροδρομικής γραμμής)
1830-1840	Εμφάνιση σιδηροτροχιάς διπλής κεφαλής
1830	Πρώτη σιδηροτροχιά με πέλμα στις Η.Π.Α. (Stevens)
1839	Πρώτη σιδηροτροχιά με πέλμα στην Ευρώπη (Vignoles)
1847	Εμφάνιση της τεχνικής της αμφίδεσης (Αγγλία, W.Bridges Adams)
1858	Οι πρώτες σιδηροτροχιές από χάλυβα (Bessemer)
1860	Καθιέρωση της αμφίδεσης
1949	Καθιέρωση της τεχνικής της συνεχούς συγκόλλησης των σιδηροτροχιών

Πίνακας 2.1: Σημαντικές χρονολογίες στην ιστορία εξέλιξης της σιδηροτροχιάς.[16]

Κατά τη δεκαετία 1830-1840 εμφανίζονται οι σιδηροτροχιές διπλής κεφαλής (Σχήματα 2.1, 2.3). Το σχήμα τους είναι σχεδόν συμμετρικό και χρησιμοποιήθηκε με την προοπτική όταν φθαρεί το πάνω τμήμα της να αντιστραφεί η διατομή έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί το τμήμα που κατά τις προβλέψεις δεν θα είχε φθαρεί. Η πρόβλεψη αυτή όμως διαψεύσθηκε, καθώς παρατηρήθηκε ότι με τη χρήση φθείρονται ταυτόχρονα και οι δύο κεφαλές. Ο

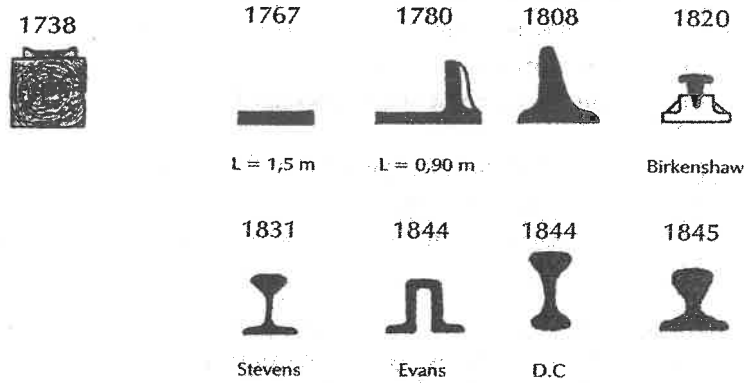
τύπος αυτός διατομής παρουσίαζε και άλλα μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθεί (1920-1940) και να αντικατασταθεί σταδιακά από τη διατομή με πέλμα. [16],(1)

Το 1839 ο Βρετανός μηχανικός Charles Blacker Vignoles εισάγει στην Ευρώπη (από την Αμερική) τη σιδηροτροχιά με πέλμα (Σχήματα 2.2,2.4). Η σιδηροτροχιά αυτή χρησιμοποιείται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά στα διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα. Το επίμηκες πέλμα της επιτρέπει την εύκολη σύνδεση με τους στρωτήρες είτε απευθείας, είτε μέσω ελαστικών συνδέσμων, ενώ η ενισχυμένη κεφαλή της επιτρέπει την ανάληψη των εγκαρσίων και κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται από τους τροχούς.

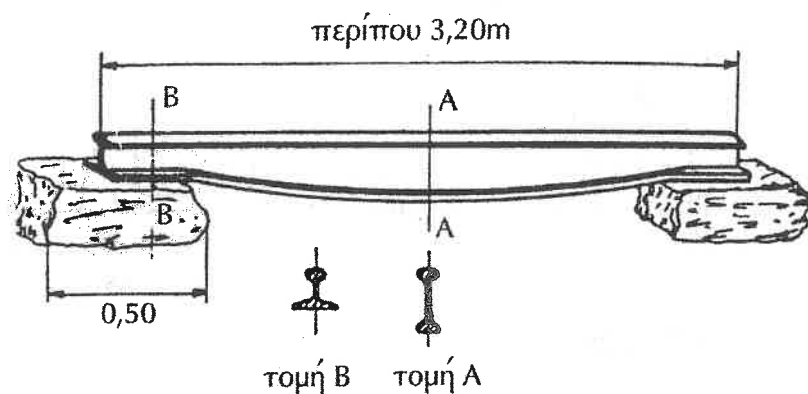
Το 1858 ο Bressemer προτείνει τις σιδηροτροχιές από χυτοχάλυβα και μέσα στα επόμενα χρόνια γενικεύεται η κατασκευή των σιδηροτροχιών με τη μέθοδο Thomas Martin. [16]

Σήμερα χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η διατομή με πέλμα (Vignoles) συναντώνται όμως και δύο άλλοι τύποι σιδηροτροχιών που έχουν όμως πολύ περιορισμένη και ειδική χρήση. Οι τύποι αυτοί είναι :[16],(1)

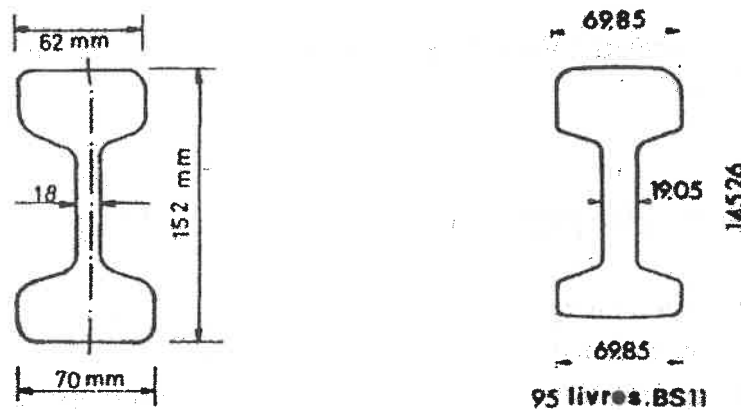
- Οι σιδηροτροχιές με λαιμό (Σχήμα 2.5), οι οποίες ήταν από τις πρώτες διατομές που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Επιτρέπουν την τοποθέτηση της σιδηροδρομικής γραμμής επί των οδικών αρτηριών, στην ίδια στάθμη με το οδόστρωμα. Οι σιδηροτροχιές αυτού του τύπου εγκιβωτίζονται κατάλληλα στο οδόστρωμα και επιτρέπουν ανεμπόδιστα τη διέλευση και των οδικών και των σιδηροδρομικών οχημάτων. Αυτός ο τύπος σιδηροτροχιών χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές τραμ και σε σιδηροδρομικές γραμμές που εξυπηρετούν λιμενικές εγκαταστάσεις.
- Οι σιδηροτροχιές τύπου Brunel (μορφής αντεστραμμένου U, Σχήμα 2.6) που χρησιμοποιούνται για την κίνηση πυλώνων.



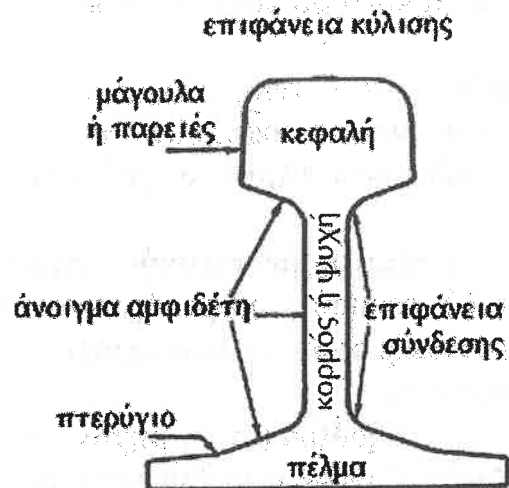
Σχήμα 2.1 : Εξέλιξη μορφής διατομής σιδηροτροχιάς. [16]



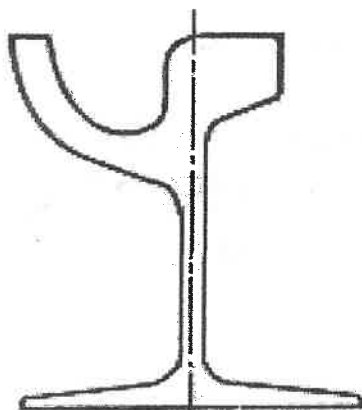
Σχήμα 2.2 : Σιδηροτροχιά Jessop. [16]



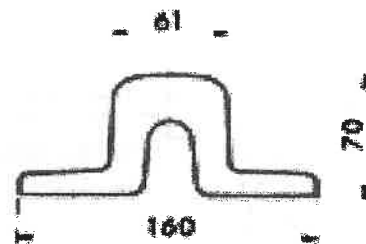
Σχήμα 2.3 : Σιδηροτροχιές διπλής κεφαλής. [16], (1)



Σχήμα 2.4 : Σιδηροτροχιά με πέλμα. [16]



Σχήμα 2.5: Σιδηροτροχιά με λαιμό[16]



Σχήμα 2.6: Σιδηροτροχιά Brunel[16]

2.3 Μέρη που απαρτίζουν τη σιδηροτροχιά

Η σιδηροτροχιά με πέλμα (Vignoles) αποτελείται από τα παρακάτω μέρη (Σχήμα2.4): [16],(1)

• Την κεφαλή

Αποτελεί το ανώτερο τμήμα της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και περιλαμβάνει:

- την επιφάνεια κύλισης επί της οποίας ασκούνται τα κατακόρυφα φορτία των τροχών και κυλίνουν οι τροχοί
- τις παρειές (μάγουλα) «εξωτερικές» και «εσωτερικές» (ως προς τη γραμμή) που διαμορφώνονται με κατάλληλη κλίση. Επί των εσωτερικών παρειών της κεφαλής ασκούνται, σε περίπτωση επαφής ονύχων τροχών-σιδηροτροχιών, οι δυνάμεις καθοδήγησης.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεφαλής (από τα οποία και χαρακτηρίζεται) είναι :

1) Το πλάτος, που πρέπει:

- να είναι επαρκές για να παρέχει ένα περιθώριο ασφαλείας στις πλάγιες φθορές που παρατηρούνται κυρίως στα καμπύλα οριζοντιογραφικά τμήματα μικρής ακτίνας. Οι φθορές αυτές προκαλούνται από την ανάπτυξη τάσεων, που οφείλονται στην επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς και οι οποίες οδηγούν σε πλευρική παραμόρφωση και θραύση της μάζας του μετάλλου της κεφαλής.
- να επιτρέπει τη χάραξη με «ικανή» ακτίνα της καμπύλης συναρμογής μεταξύ κορμού- κεφαλής, ενώ παράλληλα να ικανοποιεί τις γεωμετρικές ανάγκες που απαιτεί η σύνδεση δύο σιδηροτροχιών με αμφίδεση.

Εμπειρικά μπορεί πλέον να ειπωθεί ότι ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς, το πλάτος της κεφαλής κυμαίνεται μεταξύ 65-72mm. Μεγαλύτερο πλάτος καθιστά ιδιαίτερα έκκεντρα τα κατακόρυφα φορτία των τροχών.

2) Το ύψος, που πρέπει:

- να παρέχει ένα περιθώριο ασφαλείας στις κατακόρυφες φθορές,
- να εξασφαλίζει μια εξισορρόπηση των μαζών της κεφαλής και του πέλματος της σιδηροτροχιάς ώστε να μειώνονται οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται μετά την εξέλαση και οδηγούν σε παραμένουσες τάσεις.

Με βάση τη μέχρι τώρα εμπειρία το ύψος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς κυμαίνεται γύρω στα 50mm. Στα υπόγεια τμήματα γραμμής, όπου υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης λόγω της υγρασίας, χρησιμοποιούνται ενισχυμένες και ειδικά επενδεδυμένες διατομές σιδηροτροχιών, όπου το ύψος της κεφαλής είναι συνήθως κατά 10mm υψηλότερο του ύψους που χρησιμοποιείται στις σιδηροτροχιές στην επιφανειακή γραμμή.

3) Η ακτίνα καμπυλότητας R' και η μορφή της επιφάνειας κύλισης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά καθορίζουν, μαζί με τα αντίστοιχα των τροχών, τη γεωμετρία επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Αυτή επηρεάζει με τη σειρά της, σε μεγάλο βαθμό, τις δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης και βαρύτητας που καθορίζουν την ευστάθεια των οχημάτων στις ευθυγραμμίες και την εγγραφή των σιδηροδρομικών φορείων στις στροφές.

Η συνήθης τιμή για την R' είναι 300mm.

4) Η κλίση των παρειών που «ανοίγεται» και στις δύο πλευρές της κεφαλής προς τα έξω και πρέπει να είναι τέτοια ώστε:

- να αποφεύγεται στις ευθυγραμμίες η επαφή όνυχα τροχού – εσωτερικής παρειάς σιδηροτροχιάς.

- σε περίπτωση επαφής(στις στροφές μικρής ακτίνας καμπυλότητας) το σημείο επαφής όνυχα τροχού – σιδηροτροχιάς να είναι χαμηλά.

Με βάση την εμπειρία που υπάρχει έως σήμερα χρησιμοποιείται κλίση παρειών 1/20.

• Το πέλμα

Αποτελεί το κατώτερο τμήμα της διατομής της σιδηροτροχιάς και περιλαμβάνει:

- την επιφάνεια έδρασης επί των στρωτήρων
- τα πτερύγια

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πέλματος είναι:

1) Το πλάτος του πέλματος που καθορίζει:

- την εγκάρσια ακαμψία της σιδηροτροχιάς
- την ασκούμενη πίεση επί των στρωτήρων
- την αντίσταση της σιδηροτροχιάς σε ανατροπή

Η αύξηση του πλάτους του πέλματος μειώνει τις καταπονήσεις των στρωτήρων με μείωση της πίεσης ανά μονάδα επιφανείας, αλλά δημιουργεί προβλήματα κατά την εξέλαση.

2) Το πάχος και γενικότερα η μορφή των πτερυγίων του πέλματος που πρέπει να εξασφαλίζουν μια εξισορρόπηση μαζών μεταξύ κεφαλής – πέλματος και να διευκολύνουν την εξέλαση.

• Ο κορμός

Αποτελεί το τμήμα που συνδέει την κεφαλή με το πέλμα και περιλαμβάνει:

- τον κυρίως κορμό (ψυχή)
- τις επιφάνειες (περιοχές) έδρασης του αμφιδέτη
- τις επιφάνειες (περιοχές) σύνδεσης κεφαλής – κορμού και κορμού – πέλματος

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κορμού είναι:

1) Το πάχος που πρέπει:

- να προσδίδει στον κορμό τη μηχανική αντοχή που απαιτείται για να παραλαμβάνονται οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στον κορμό και οι καταπονήσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή των οπών της αμφίδεσης.
- να εξασφαλίζεται στον κορμό αντοχή σε διάβρωση.

Εμπειρικά μέχρι τώρα, μπορεί να ειπωθεί ότι το πάχος του κορμού κυμαίνεται μεταξύ 15 – 17 mm, ενώ αυξάνεται στις διατομές που χρησιμοποιούνται μέσα σε σήραγγες.

2) Οι καμπύλες συναρμογής των επιφανειών σύνδεσης κεφαλής – κορμού και κορμού – πέλματος. Τα τμήματα αυτά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα καθώς παρατηρείται σε αυτά συγκέντρωση τάσεων. Η υιοθέτηση μεγάλων ακτινών συναρμογής περιορίζει το πρόβλημα.

3) Η κλίση των επιφανειών έδρασης του αμφιδέτη που πρέπει να είναι τέτοια ώστε να περιορίζονται οι καταπονήσεις στην περιοχή της αμφίδεσης. Με βάση τη μέχρι τώρα εμπειρία η κλίση αυτή λαμβάνεται 1 / 2,75.

2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών και τυπικές διατομές

Τα βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών είναι [16]:

- το υλικό κατασκευής

Οι σιδηροτροχιές κατασκευάζονται από χυτοχάλυβα και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό ($70 - 90 \text{ kp/mm}^2$)

- το μήκος της σιδηροτροχιάς

Τα μήκη είναι τυποποιημένα. Υπάρχουν σιδηροτροχιές μήκους 18m, 24m και 36m. Όλες οι σιδηροτροχιές είναι ευθύγραμμες. Στα καμπύλα τμήματα χρησιμοποιούνται διαφορετικά μήκη σιδηροτροχιών.

- το βάρος των σιδηροτροχιών

Εκφράζεται σε κιλά ανά τρέχον μέτρο (kg/m) και ποικίλει ανάλογα με τον τύπο των σιδηροτροχιών.

- η διάρκεια ζωής των σιδηροτροχιών κυμαίνεται μεταξύ 20 – 25 έτη για τις κύριες γραμμές.

2.5 Τύποι σιδηροτροχιών και επιλογή διατομής

Σήμερα ανά τον κόσμο χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σιδηροτροχιών. Στον Πίνακα 2.2 δίνονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Στην Ευρώπη σήμερα χρησιμοποιούνται σιδηροτροχιές των οποίων το βάρος κυμαίνεται μεταξύ 49 – 60 kg/m. Ειδικότερα στη Δυτική Ευρώπη τείνουν να καθιερωθούν οι διατομές που προτείνει η U.I.C. (UIC 50, 54, 60

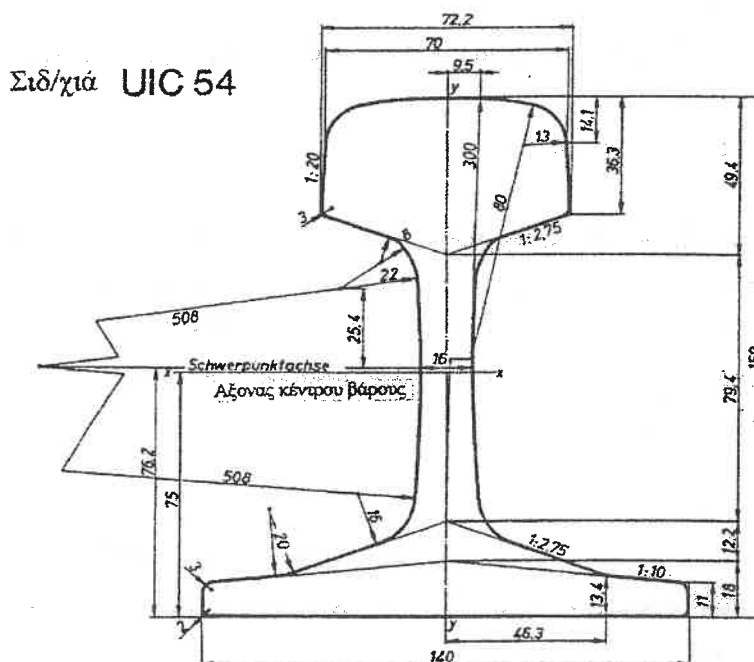
kg/m) (Σχήματα 2.7α και 2.7β) (Union Internationale des Chemins de fer: Διεθνής Ένωση Σιδηροδρόμων).

Αντίθετα στις Η.Π.Α. και στις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης όπου τα αξονικά φορτία είναι μεγαλύτερα, χρησιμοποιούνται βαρύτερες σιδηροτροχιές (65 - 70 kg/m) (Σχήμα 2.8) [16]

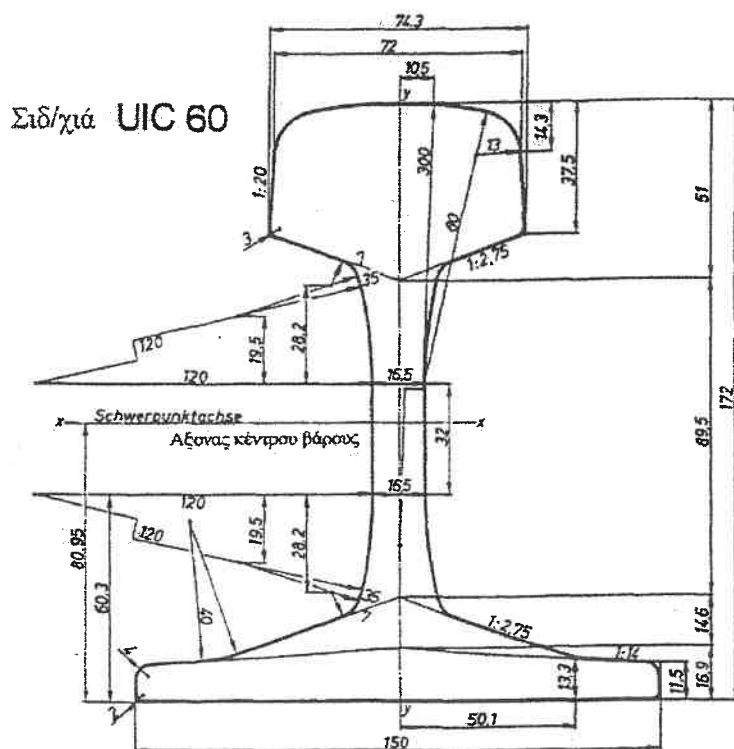
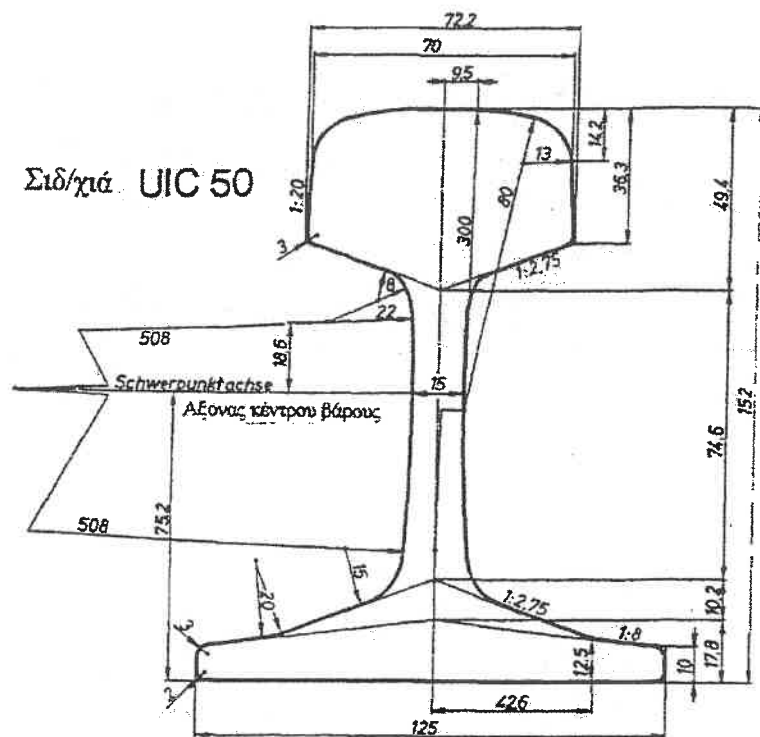
Η επιλογή της διατομής της σιδηροτροχιάς εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως [16]:

- το ημερήσιο φορτίο κυκλοφορίας T_f
- το αξονικό φορτίο Q
- τις ταχύτητες κυκλοφορίας V
- την απόσταση μεταξύ στρωτήρων l

Για γραμμές κανονικού εύρους έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται για χαμηλούς φόρτους η σιδηροτροχιά UIC50 ενώ για μέσους και υψηλούς φόρτους οι σιδηροτροχιές UIC60. (1)

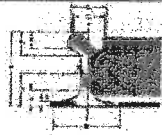


Σχήμα 2.7α: Διατομή σιδηροτροχιάς UIC 54. [2]



Πηγή: Oberbau-Profile, Oberbau-Fertigteile VOEST-ALPINE

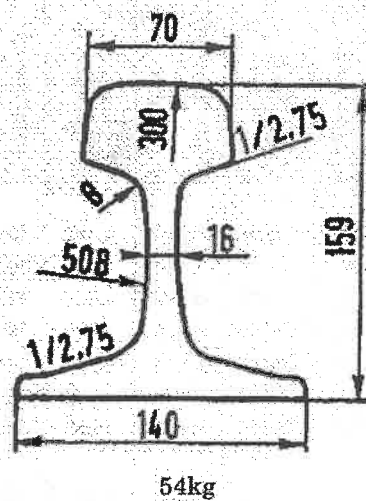
Σχήμα 2.7β: Διατομές σιδηροτροχιών UIC 50, UIC 60. [2]

	Συνολικό ύψος σι- δηρούς H (mm)	Πλάτος πέλματος B (mm)	Πλάτος κα- υάλυξης C ₁ (mm)	Πλάτος κα- υάλυξης C (mm)	Πάχος τρο- χοί S (mm)	Συνολικό τύπος καφε- τύλης K (mm)	Τύπος καφε- τύλης K ₁ (mm)
Γερμανία							
SMR 29	115.00	90.00	47.00	55.00	12.00	40.00	31.00
S 30	108.00	108.00	60.30	60.30	12.30	31.00	24.00
S 33	134.00	105.00	58.00	58.00	11.00	39.00	31.75
S 41, 10 R	138.00	125.00	67.00	67.00	12.00	43.00	31.83
S 41, 14 R	138.00	125.00	67.00	67.00	12.00	43.00	31.83
S 49	149.00	125.00	67.00	70.00	14.00	51.50	39.80
S 54	154.00	125.00	67.00	70.00	16.00	55.00	43.30
UIC							
UIC 50	152.00	125.00	70.00	72.20	15.00	49.40	36.30
UIC 54 E (SBB IV)	161.00	125.00	67.00	69.50	16.00	51.40	38.70
UIC 54 (SBB III)	159.00	140.00	70.00	72.20	16.00	49.40	36.30
UIC 60	172.00	150.00	72.00	74.30	16.50	51.00	37.50
UIC 71	186.00	160.00					
Αμερική							
ASCE 60	107.95	107.95	60.33	60.33	12.30	30.96	23.99
ASCE 75	122.20	122.20	62.70	72.70	13.50	36.10	23.90
ASCE 80	127.00	127.00	63.50	63.50	13.90	38.10	30.80
ARAA 90	142.90	130.20	61.60	65.10	14.30	37.30	29.20
AREA 100	152.40	136.50	65.30	68.30	14.30	42.10	33.50
AREA 115	168.27	139.70	69.06	69.06	15.87	42.86	34.23
AREA 132	180.98	152.40	74.45	76.20	16.67	44.45	34.93
AREA 133	179.39	152.40	71.10	76.20	17.46	49.21	36.51
AREA 136	185.74	152.40	72.62	74.61	17.46	49.21	39.89
CB 122	172.21	152.40	71.14	74.68	16.51	49.02	36.00
Μ. Βρετανία							
BS 60 R	114.30	109.54	57.20	57.20	11.11	35.70	26.20
BS 70 A	123.80	111.10	60.30	60.30	12.30	39.70	28.20
BS 80 A	133.40	117.50	63.50	65.40	13.10	42.50	30.60
BS 90 R	142.90	136.50	66.70	66.70	13.90	43.70	32.50
BS 90 A	142.90	127.00	66.70	68.75	13.90	46.00	33.50
BS 113 A	158.75	139.70	69.85	72.06	20.00	49.21	36.12
Άλλοι τύποι							
U 33	145.00	134.00	62.00	64.30	15.00	47.00	36.30
Ινδία 52	156.00	136.00	67.00	67.00	15.50	51.00	38.32
Ολλανδία NP 42	138.00	110.00	68.00	71.00	13.50	40.50	31.60
Ολλανδία NP46	142.00	120.00	74.00	76.00	14.00	42.50	34.00
Δανία Form V	141.00	126.00	69.30	71.00	13.80	43.00	34.00
Δανία Form VII	172.00	150.00	72.00	74.30	16.50	51.00	37.50
Ελβετία SBB I	145.00	125.00	65.00	65.00	14.00	45.00	36.88
Τουρκία 145/46 303	145.00	134.00	62.00	64.30	15.00	47.00	36.30
Ν. Αφρική SAR 48	150.00	127.00	68.00	68.00	14.00	43.00	35.00
Κίνα 43	140.00	114.00	70.00	70.00	14.50	42.00	29.50
Κίνα 50	152.00	132.00	70.00	70.00	15.50	42.00	33.30

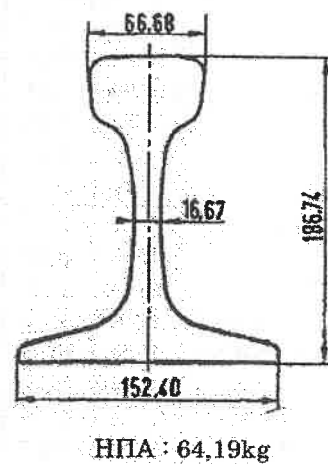
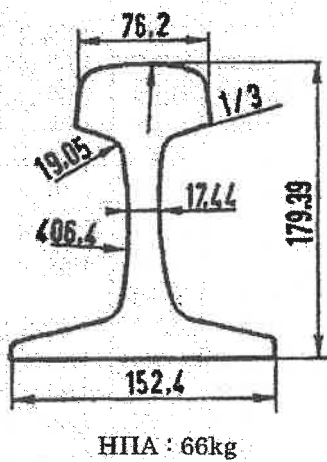
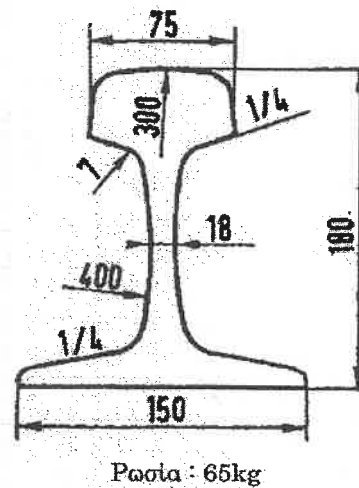
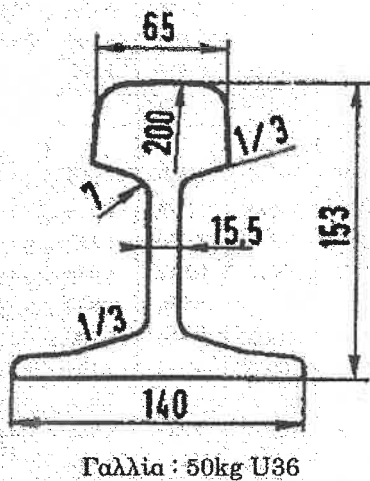
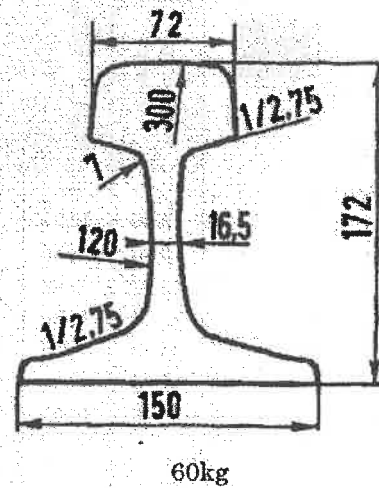
Πίνακας 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιών που χρησιμοποιούνται διεθνώς. [16]

	Υψος ράγας r (mm)	Πλάτος κεφαλής D (mm)	Εμβαδόν διατομής A (mm ²)	Βήρος (kg/m)	Απόσταση οριζ. τροχιών πλάτος (mm)	Ροπή αδράνειας Ix (cm ⁴)	W _x (cm ³)	Διακτινισμός βάρους B/H	W _y (cm ³)	Διακτινισμός βάρους B/H
Γερμανία										
SMR 29	19.00	10.00	3794	29.78	55.00	624	103.98	0.783	3.492	20.954
S 30	19.50	7.00	3825	30.03	52.12	606	109.00	1.000	3.630	20.180
S 33	19.00	9.50	4264	33.47	67.33	1040	155.00	0.784	4.631	31.073
S 41, 10 R	24.00	9.50	5271	41.38	68.23	1368	196.00	0.905	4.736	33.059
S 41, 14 R	24.00	9.50	5216	40.95	68.23	1368	196.00	0.905	4.736	33.059
S 49	27.50	10.50	6297	49.43	73.30	1819	240.00	0.838	4.855	36.799
S 54	29.00	12.00	6948	54.54	75.00	2073	262.00	0.811	4.083	38.000
ΥΙC										
UIC 50	28.00	10.00	6392	50.18	76.00	1940	253.60	0.822	5.053	38.660
UIC 54 E (SBB IV)	30.20	12.00	6855	53.81	69.47	2308	276.37	0.778	5.136	42.892
UIC 54 (SBB III)	30.20	11.00	6934	54.43	74.97	2127	279.19	0.880	5.129	39.077
UIC 60	31.50	11.50	7687	60.34	80.90	3055	335.50	0.872	5.560	50.630
UIC 71			9079	71.27		4152	403.00	0.860		58.257
Αμερική										
ASCE 60	19.45	6.99	3825	30.03	52.07	606	108.50	1.000	3.613	20.179
ASCE 75	21.40	7.30	4727	37.11	58.40	952	149.00	1.000	4.015	25.653
ASCE 80	22.20	7.60	5070	39.80	61.20	1098	165.00	1.000	4.145	27.587
ARAA 90	25.40	9.10	5686	44.64	64.50	1610	205.49	0.911	4.603	36.066
AREA 100	27.00	9.90	6414	50.35	75.40	2040	247.00	0.895	4.905	40.516
AREA 115	28.57	11.10	7236	56.80	75.69	2730	295.00	0.830	5.193	48.063
AREA 132	30.16	11.11	7633	65.53	81.28	3671	368.70	0.842	6.153	61.265
AREA 133	30.16	11.60	8429	66.17	81.28	3576	364.70	0.849	5.511	54.042
AREA 136	30.16	11.11	8606	67.56	85.01	3949	391.50	0.820	5.794	58.451
CB 122	31.50	11.43	7743	60.78	80.77	3080	337.00	0.884	5.544	50.674
Μ. Βρετανία										
BS 60 R	16.70	7.60	3792	29.77	55.70	677	115.40	0.958	3.876	22.741
BS 70 A	23.00	7.90	4438	34.84	61.30	912	146.00	0.897	4.190	28.176
BS 80 A	25.00	8.70	5071	39.80	65.60	1209	178.00	0.880	4.472	30.376
BS 90 R	20.60	9.30	5684	44.62	68.00	1600	214.00	0.955	4.796	35.858
BS 90 A	26.20	9.10	5735	45.02	70.00	1558	214.00	0.888	4.753	34.606
BS 113 A	30.16	11.11	7183	56.39	84.32	2349	278.61	0.888	4.940	41.656
Άλλες χώρες										
U 33	27.00	10.50	5898	46.30	67.20	1588	204.00	0.924	4.406	34.298
Ινδία 52	29.00	9.00	6610	51.89				0.872		
Ολλανδία NP 42	23.50	9.75	5289	41.52	69.50	1360	196.00	0.797	4.721	32.755
Ολλανδία NP46	25.00	10.00	5930	46.55	70.30	1605	224.00	0.845	4.612	34.479
Δανία Form V	24.00	8.30	5791	45.46	68.00	1520	209.00	0.894	4.597	33.436
Δανία Form VII	31.50	11.50	7687	60.34	80.90	3055	335.50	0.872	5.560	50.630
Ελβετία SBB I	25.00	9.40	5880	46.16	69.47	1631	216.30	0.862	4.686	35.394
Τουρκία 145/46 303	27.00	10.50	5898	46.30	67.20	1588	204.00	0.924	4.405	34.298
Ν. Αφρική SAR 48	25.00	11.00	6114	48.00	72.20	1822	234.00	0.846	4.875	37.958
Κίνα 43	27.00	11.00	5688	44.65	68.80	1489	208.30	0.814	4.665	33.348
Κίνα 50	27.00	10.50	6562	51.51	70.90	2037	251.30	0.868	4.879	39.546

Πίνακας 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σιδηροτροχιών που χρησιμοποιούνται διεθνώς. [16]



Τυπικές
διατομές
UIC



Σχήμα 2.8: Τύποι διατομών σιδηροτροχιών και γεωμετρικά στοιχεία. [16]

$T_f(t)$	<25000	$25000 \leq T_f < 35000$	≥ 35000
Βάρος σιδηροτροχιάς (kg/m)	50	- 50 (ξύλινοι στρωτήρες) - 60 (στρωτήρες σκυροδέματος)	60

Πίνακας 2.3: Επιλογή διατομής σιδηροτροχιάς συναρτήσει του ημερήσιου φόρτου κυκλοφορίας T_f . [16],(1)

2.6 Απαιτήσεις στη σιδηροτροχιά

Η σιδηροτροχιά που χρησιμοποιείται κάθε φορά θα πρέπει να εκπληρώνει τις παρακάτω απαιτήσεις: [2]

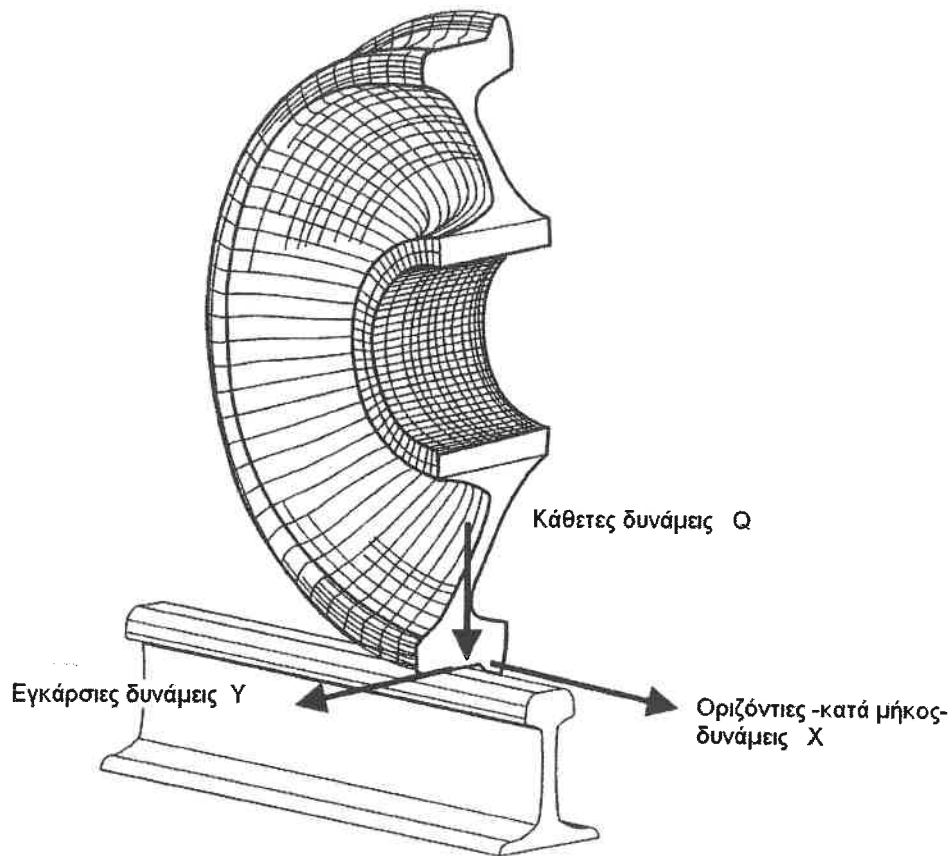
- Ικανοποιητικό πλάτος της επιφάνειας κύλισης και τέτοια διαμόρφωση, ώστε οι πιέσεις να είναι όσο το δυνατόν μικρές
- Ποσότητα υλικού τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται (με την προβλεπόμενη φθορά) μεγάλη ενεργός διάρκεια ζωής
- Επάρκεια της φέρουσας ικανότητας και ακαμψίας της σιδηροτροχιάς (αρκετό πάχος, προβλεπόμενης και της ελάττωσης του υλικού λόγω σκουριάς)
- Πλάτος πέλματος τέτοιο, ώστε να προκύπτει σταθερή έδραση και μικρή πίεση επί του στρωτήρα
- Πάχος πέλματος τέτοιο για επαρκή ακαμψία

- Ροπή αντίστασης της σιδηροτροχιάς όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έναντι κατακόρυφων δυνάμεων (σχέση διατομών κεφαλής/ πέλματος με διατομή κορμού)
- Ροπή αντίστασης της σιδηροτροχιάς όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έναντι οριζοντίων δυνάμεων για επαρκή πλευρική ακαμψία
- Σταθερή έναντι ανατροπής (σχέση ύψους/ πέλματος)
- Η επιφάνεια της διατομής θα πρέπει να έχει το κέντρο βάρους της στο μισό του ύψους της
- Υποδοχή του αμφιδέτη στη μορφή του αμφιδέτη
- Στρογγύλευση των θέσεων μετάβασης των τάσεων για την ευχερέστερη κατανομή των τάσεων στη διατομή της σιδηροτροχιάς με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες ακτίνες.

2.7 Δυνάμεις που ασκούνται επί των σιδηροτροχιών.

Οι δυνάμεις που δέχονται οι σιδηροτροχιές είναι τριών ειδών (Σχήμα 2.9) [8]. Χωρίζονται σε οριζόντιες -κατά μήκος- (X), εγκάρσιες (Y) και κάθετες στη σιδηροτροχιά (Q).

Οι οριζόντιες δυνάμεις X εμφανίζονται λόγω της επιτάχυνσης, της πέδησης, καθώς και εξαιτίας θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και διάφορων συγκολλητικών διεργασιών. Από τις παραπάνω αιτίες εξετάζονται μόνο οι δυνάμεις που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα υπόλοιπα αίτια δημιουργούν δυνάμεις πολύ μικρότερες από τις εγκάρσιες ή τις κάθετες γ'αυτό και συνήθως παραλείπονται.



Σχήμα 2.9: Κατευθύνσεις δυνάμεων που δέχονται οι σιδηροτροχιές. (2)

Οι εγκάρσιες δυνάμεις Y αποτελούνται από τις κατευθυντήριες δυνάμεις και τη φυγόκεντρο δύναμη. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαρτώνται από την κατασκευή του οχήματος, την ακτίνα του τόξου, την υπερύψωση και την ταχύτητα.

Τέλος οι κάθετες δυνάμεις Q οφείλονται αποκλειστικά στην επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς δηλαδή στη στατική δύναμη του τροχού. Στην τελευταία προστίθενται και άλλες δυνάμεις που εξαρτώνται από την ακτίνα του τόξου, την υπερύψωση, την ταχύτητα και το κέντρο βάρους του οχήματος. Το σύνολο των δυνάμεων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 10 με 25% της στατικής δύναμης του τροχού.

2.8 Ανάλυση δυνάμεων που ασκούνται επί της σιδηροτροχιάς

Οι σιδηροτροχιές δέχονται δυνάμεις και κατά τις τρεις διευθύνσεις: κατακόρυφα, εγκάρσια και κατά τη διαμήκη έννοια. Οι δυνάμεις μπορεί να οφείλονται σε φορτία στατικά οπότε ονομάζονται στατικές δυνάμεις ή να οφείλονται σε φορτία δυναμικά οπότε ονομάζονται δυναμικές φορτίσεις.

Ο Πίνακας 2.4 κατατάσσει τις δυνάμεις ανάλογα με τη διεύθυνσή τους και δίνει στοιχεία σχετικά με το σημείο επενεργείας τους, την προέλευσή τους και το μέτρο τους. [16]

2.8.1 Κατακόρυφες δυνάμεις

Τα κατακόρυφα φορτία ενεργούν στο σημείο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς. Διακρίνονται σε στατικά φορτία και δυναμικά φορτία.

2.8.1.1 Στατικά κατακόρυφα φορτία

Στα στατικά κατακόρυφα φορτία περιλαμβάνονται:

- Το στατικό φορτίο ανά τροχό Q_0 , δηλαδή το βάρος ή φορτίο κατ' άξονα και ανά συρμό που μεταβιβάζεται, μέσω των τροχών, στις σιδηροτροχιές. (Το βάρος κατ' άξονα υπεισέρχεται έμμεσα ή άμεσα στις αναλυτικές εκφράσεις όλων των δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και επηρεάζει τη συμπεριφορά τόσο του τροχαίου υλικού όσο και της γραμμής. Ειδικότερα σε γραμμές που κυκλοφορούν πολύ βαριά οχήματα παρατηρείται αύξηση του αριθμού και του μεγέθους των σφαλμάτων γραμμής ως επίσης και της κόπωσης των υλικών της επιδομής με

αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ανάγκες και τα έξοδα συντήρησης της γραμμής.)

- Το κατακόρυφο φορτίο $\pm Q_H$ των τροχών που οφείλεται στις εγκάρσιες δυνάμεις H που ασκούνται στο αμάξωμα και στα φορεία και μεταβιβάζονται μέσω των αξόνων στους τροχούς. Ανάλογα με τη διεύθυνση της δύναμης H το φορτίο του ενός τροχού αυξάνει κατά Q_H , ενώ το φορτίο του άλλου τροχού μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα.

Το κατακόρυφο φορτίο $\pm Q_H$ περιλαμβάνει τα εξής επιμέρους φορτία:

- Το κατακόρυφο φορτίο Q_W λόγω πλευρικών ανέμων (Σχήμα 2.10)

$$\pm Q_W = H_W \frac{q_0}{2e_0}$$

όπου H_W : εγκάρσια δύναμη ανέμου ασκούμενη στο κέντρο βάρους της πλευρικής επιφάνειας του αμαξώματος

q_0 : κατακόρυφη απόσταση του κέντρου βάρους της πλευρικής επιφάνειας του αμαξώματος από την επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών

$2e_0$: απόσταση αξόνων σιδηροτροχιών

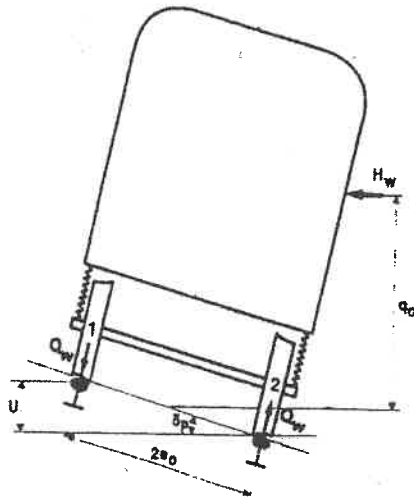
Διεύθυνση δυνάμεων ως προς το επίπεδο της επιφάνειας κλίσης της σιδηροτροχιάς	Ονομασία – Συμβολισμός δυνάμεων	Είδος επιμόνησης	Αιτία γένεσης	Σημείο εφαρμογής	Αναλυτική έκφραση ($i = 1$, τροχός 1) ($i = 2$, τροχός 2)
Κατακόρυφα φορτία	Κατακόρυφο φορτίο ανά τροχή Q_0	Στατική	μάζα τροχαίου υλικού	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$Q_{0j} = \frac{1}{2} \left(\frac{M}{4} + m \right) g$
	Φορτίο λόγω πλευρικών ανέμων Q_w	Στατική	πλευρικοί άνεμοι	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$\pm Q_{wj} = H_w \frac{q_a}{2e_0}$
	Φορτίο λόγω παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης Q_{ac}	Στατική	καμπύλη χάρδζι στην οριζόντιογραμμία	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$\pm Q_{acj} = F_{ac} \frac{h_{kb}}{2e_0} = Q \frac{h_{kb}}{4e_0^2}$
	Φορτίο λόγω ελατηρίων αναρτήσεων Q_e	Δυναμική	παραμορφώσεις ελατηρίων πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$Q_{ej} = H_{ra} \frac{q_a}{2e_0} + H_{rb} \frac{q_b}{2e_0}$
	Κατακόρυφο δυναμικό φορτίο Q_{dm}	Δυναμική	- σφάλματα γραμμής - φθορές επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιών - ασυνέχειες κύλισης - ασυμμετρία τροχαίου υλικού	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$Q_{dmj} = Q_{d1} + Q_{d2} + Q_{d3} + Q_{d4}$
Εγκάρσια φορτία	Συνολική δύναμη βαρύτητας S_p	Στατική	- προφίλ τροχών - προφίλ κεφαλής σιδηροτροχιών	Σιδηροδρομικός άξονας	$S_p = 2Q_0 \frac{1}{R - R'} y = 2Q_0 \frac{\gamma_e y}{R \gamma_0}$
	Εγκάρσιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης T_i	Δυναμική	- προφίλ τροχών - άκαμπτη σύνδεση τροχών - φανόμενα ψευδο-ολίσθησης	Επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς	$T_1 = T_2 = -c_{22} \left[\kappa \frac{y'}{V} - a \right] \frac{E y_0}{V}$
	Δύναμη πλευρικών ανέμων H_w	Στατική	πλευρικοί άνεμοι	Κέντρο βάρους πλευρικής επιφάνειας αμαξώματος	$T_1 = T_2 = -c_{22}(-a) \frac{H_w}{\Sigma \text{τροχούς}}$

Πίνακας 2.4: Δυνάμεις ασκούμενες επί της σιδηροτροχιάς [16]

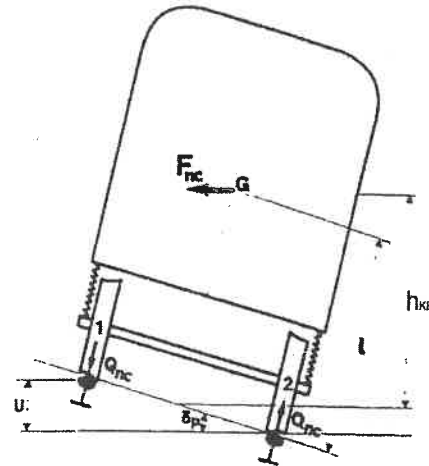
Διεύθυνση δυνάμεων ως προς το επίπεδο της επιφάνειας κλίσης της σιδηροτροχιάς	Ονομασία - Συμβολισμός δυνάμεων	Είδος επιδότησης	Διτία γένεσης	Σημείο εφαρμογής	Αναλυτική έκφραση ($j = 1$, τροχός 1) ($j = 2$, τροχός 2)
	Παραμένονσα φυγόκεντρη δύναμη F_{ac}	Στατική	καμπύλη χάραξη στην οριζοντιογραφία	Κέντρο βάρους οχήματος	$F_{nc} = \frac{Q}{g} \left(\frac{V^2}{R_c} - g \frac{U}{2e_o} \right) = \frac{QI}{2e_o}$
	Δύναμη ελατηρίων H_r	Δυναμική	παραμορφώσεις ελατηρίων ανάρτησης	Επίπεδα πρώτευουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης	H_r
	Δύναμη καθοδήγησης F_j	Στατική	επαφή όνυχια τροχού -- σιδηροτροχιάς ($\gamma = \alpha$)	Εσωτερική πλευρά κεφαλής σιδηροτροχιάς	$F_j = \frac{QI}{1500} + \frac{QV}{1000}$ ή $\pm (T_1 + T_2) \pm H_w - Sp + F_{nc} \pm H_r$
	Οριζόντιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης X_j	Δυναμική	- προφίλ τροχών - άκαμψη σύνδεση τροχών - φαινόμενα ψευδο-ολίσθησης	Επιφάνεια επαφής τροχού -- σιδηροτροχιάς	<u>Ευθείες</u> $X_1 = -c_{11} \left[\frac{x'}{V} - \frac{e_o}{V} a' - \frac{\gamma_e}{r_o} y \right]$ $X_2 = -c_{11} \left[\frac{x'}{V} + \frac{e_o}{V} a' + \frac{\gamma_e}{r_o} y \right]$ <u>Στροφές</u> $X_1 = -c_{11} \left(-\frac{\gamma_e}{r_o} y + \frac{e_o}{R_c} \right)$ $X_2 = -c_{11} \left(\frac{\gamma_e}{r_o} y - \frac{e_o}{R_c} \right)$
Διαμήκη (οριζόντια) φορτία	Δύναμη θερμοκρασιακών μεταβολών N	Στατική	θερμοκρασιακές μεταβολές	Διαμήκης άξονας σιδηροτροχιάς	$N_j = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta t$
	Δυνάμεις προχοπέδησης N_t	Δυναμική	πέδηση οχημάτων	Επιφάνεια επαφής τροχού -- σιδηροτροχιάς	$N_t = 0,25\Sigma Q$
	Δυνάμεις επιτάχυνσης N_v	Δυναμική	επιτάχυνση οχημάτων	Επιφάνεια επαφής τροχού -- σιδηροτροχιάς	N_v

Πίνακας 2.4: Δυνάμεις ασκούμενες επί της σιδηροτροχιάς [16]

Όταν η δύναμη H_W έχει φορά από τον τροχό 2 προς τον τροχό 1, τότε το φορτίο του τροχού 1 αυξάνεται κατά Q_W , ενώ το φορτίο του τροχού 2 μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα.



Σχήμα 2.10: Κατακόρυφο φορτίο Q_W λόγω πλευρικών ανέμων [16]



Σχήμα 2.11: Κατακόρυφο φορτίο Q_{nc} λόγω παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης [16]

- Το κατακόρυφο φορτίο Q_{nc} λόγω παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης (Σχήμα 2.11)

$$\pm Q_{nc} = F_{nc} \frac{h_{KB}}{2e_0} = Q \frac{I h_{KB}}{4e_0^2}$$

όπου F_{nc} : παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη

$$I: \frac{2e_0 V^2}{g R_c} - U \text{ ανεπάρκεια υπερύψωσης}$$

h_{KB} : απόσταση του κέντρου βάρους του οχήματος από την επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών

U : κανονική υπερύψωση γραμμής

Το φορτίο λόγω παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης ασκείται μόνο κατά την κίνηση σε καμπύλη γραμμή και το μέτρο του είναι συνήθως το 10-25% της τιμής του στατικού φορτίου ανά τροχό. Το φορτίο του τροχού που κυλίνει επί της εξωτερικής σιδηροτροχιάς αυξάνεται κατά Q_{nc} ενώ το φορτίο του εσωτερικού τροχού μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα.

- Το κατακόρυφο φορτίο Q_r λόγω των ελατηρίων της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης

$$Q_r = H_{rA} \frac{q_A}{2e_0} + H_{rB} \frac{q_B}{2e_0}$$

όπου H_{rA}, H_{rB} : εγκάρσιες δυνάμεις ελατηρίων της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης

q_A, q_B : αποστάσεις των επιπέδων της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης από την επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών.

2.8.1.2 Δυναμικά φορτία

Η γένεση των δυναμικών κατακόρυφων φορτίων οφείλεται στα γεωμετρικά σφάλματα γραμμής, στις φθορές της επιφάνειας κύλισης των σιδηροτροχιών των επισώτρων, στα σημεία ασυνέχειας της κύλισης (αλλαγές, αμφιδέτες, αρμοί), στην ανομοιογενή κατακόρυφη ακαμψία της γραμμής, σε τυχόν ασυμμετρίες του τροχαίου υλικού κλπ.

Τα κατακόρυφα δυναμικά φορτία απορροφώνται γρήγορα από τα μηχανικά στοιχεία της γραμμής και του τροχαίου υλικού με αποτέλεσμα ο υπολογισμός τους να είναι δύσκολος.

Η μείωση της μάζας του άξονα, η αύξηση της ευκαμψίας της γραμμής και η αύξηση του πάχους του έρματος συντελούν στη μείωση των δυναμικών κατακορύφων επιφορτίσεων.

2.8.2 Εγκάρσιες δυνάμεις [16]

Οι εγκάρσιες δυνάμεις μεταβιβάζονται στις σιδηροτροχιές μέσω της επιφάνειας κύλισης ή μέσω των ονύχων των τροχών.

Ο υπολογισμός τους είναι σχετικά δύσκολος γιατί οι ροπές πάκτωσης σιδηροτροχιών / στρωτήρων και η τριβή στρωτήρων / έρματος δεν υπακούουν σε ελαστικούς νόμους συμπεριφοράς.

Επιπλέον οι σιδηροτροχιές λόγω έκκεντρου εφαρμογής των δυνάμεων αλλά και λόγω επαφής ονύχων – σιδηροτροχιών υπόκεινται σε δυνάμεις στρέψης.

Μας ενδιαφέρουν οι μέγιστες τιμές των εγκαρσίων δυνάμεων (πλαστική περιοχή).

2.8.2.1 Δυνάμεις βαρύτητας

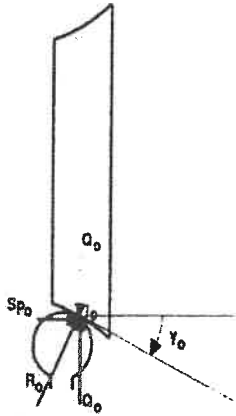
Σε κάθε τροχό, στο σημείο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς, η αντίδραση R_0 αναλύεται σε δύο συνιστώσες Q_0 και Sp_0 (Σχήμα 2.12). Η εγκάρσια συνιστώσα Sp_0 ονομάζεται δύναμη βαρύτητας ή επαναφοράς. Οφείλεται αποκλειστικά στην κωνικότητα των τροχών και ενεργεί μέσω του άξονα πάνω στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς.

Θεωρείται δύναμη στατική και έχει μέτρο $Q_0 \epsilon \phi \gamma_0$ όπου:

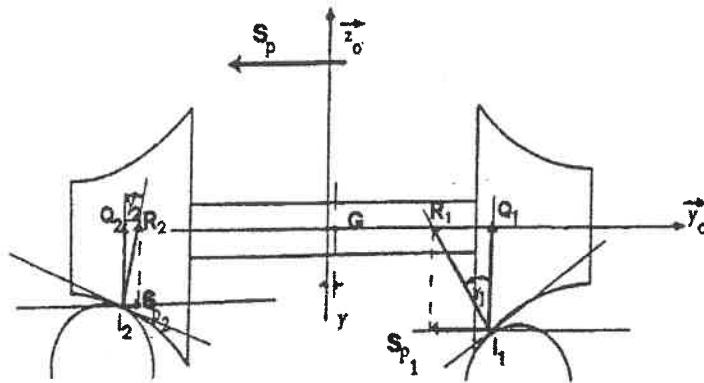
Q_0 : στατικό φορτίο ανά τροχό

γ_0 : γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο το εφαπτόμενο επίπεδο στο σημείο επαφής l_0 .

Στην περίπτωση ενός άξονα έχουμε δύο δυνάμεις επαναφοράς, μία για κάθε τροχό ($S_{p,j}, j=1,2$) (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.12: Δύναμη βαρύτητας ανά τροχό [16]



Σχήμα 2.13: Συνολική δύναμη βαρύτητας S_p [16]

Αν « y » είναι η εγκάρσια μετατόπιση ενός άξονα σύμφωνα με το Σχήμα 2.13 έχουμε:

$$S_{p1} = Q_1 \varepsilon \phi \gamma_1 = Q_1 \gamma_1 \quad (2.1)$$

$$S_{p2} = Q_2 \varepsilon \phi \gamma_2 = Q_2 \gamma_2 \quad (2.2)$$

όπου Q_1, Q_2 : κατακόρυφη συνιστώσα των αντιδράσεων R_1 και R_2 στα σημεία επαφής l_1 και l_2 αντίστοιχα.

γ_1, γ_2 : γωνίες που σχηματίζουν με το οριζόντιο επίπεδο τα εφαπτόμενα επίπεδα στα σημεία επαφής l_1 και l_2 αντίστοιχα (επειδή γ_1, γ_2 είναι πολύ μικρές, ισχύει $\varepsilon \phi \gamma_1 = \varepsilon \phi \gamma_2 = \gamma_{1,2}$)

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της μελέτης γεωμετρίας επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς (σχέσεις 3.5, 3.6 και 3.13) και θεωρώντας $\frac{e_0 + R\gamma_0}{e_0 - R\gamma_0} = 1$ οι σχέσεις 3.5 και 3.3 γράφονται:

$$\gamma_1 = \gamma_0 + 2Q_0 = \gamma_0 + \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} y \quad (2.3)$$

$$\gamma_2 = -\gamma_0 + \frac{y}{R - R'} = -\gamma_0 + \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} y \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.3) και (2.4) στις σχέσεις (2.1) και (2.2), προκύπτουν οι δυνάμεις βαρύτητας που ασκούνται σε κάθε τροχό:

$$Sp_1 = Q_1 \left(\gamma_0 + \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} y \right) \quad (2.5)$$

$$Sp_2 = Q_2 \left(-\gamma_0 + \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} y \right) \quad (2.6)$$

Θεωρώντας ίσα βάρη σε κάθε τροχό η συνολική δύναμη βαρύτητας ή επαναφοράς είναι:

$$Sp = Sp_1 + Sp_2 = 2Q_0 \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} y \quad (2.7)$$

Αν λάβουμε υπόψη τη σχέση (3.13) έχουμε

$$Sp = 2Q_0 \frac{1}{R - R'} y \quad (2.8)$$

Από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Η συνολική δύναμη βαρύτητας είναι ανάλογη της μετατόπισης «y» του κέντρου βάρους του άξονα. Αν δηλαδή για οιονδήποτε λόγο μετατοπιστεί ο

άξονας εγκάρσια τότε η δύναμη βαρύτητας τείνει να τον επαναφέρει στην αρχική του θέση ισορροπίας (για $y = 0$, $S_p = 0$)

• Η συνολική δύναμη βαρύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας R του επισώτρου των τροχών και ανάλογη της ισοδύναμης κωνικότητας γ_e . Οι φθαρμένοι τροχοί, μικρές τιμές της R / μεγάλες τιμές της γ_e , δημιουργούν αυτόματα και μεγαλύτερη δύναμη βαρύτητας. Στην περίπτωση κωνικών τροχών (εγκάρσια διατομή τριγωνική) η συνολική δύναμη βαρύτητας είναι μηδενική ($R = \infty$, $\gamma_0 = 0$, $S_p = 0$)

Η δύναμη βαρύτητας δεν προκαλεί φθορές στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών που επενεργεί. Συμπερασματικά, η συνολική δύναμη βαρύτητας ή επαναφοράς S_p , οφείλεται στην ειδική κατασκευή των σιδηροδρομικών τροχών και είναι πάντοτε επιθυμητή γιατί βοηθά στο μηχανισμό κέντρωσης του άξονα στη γραμμή ενώ συγχρόνως δεν προκαλεί φθορές του τροχαίου υλικού και της γραμμής.

2.8.2.2. Δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης

Κίνηση σε ευθυγραμμία

Στην περίπτωση κίνησης ενός συμβατικού άξονα σε ευθυγραμμία οι αναλυτικές εκφράσεις των δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης που προκύπτουν από την εφαρμογή της γραμμικής θεωρίας του Kalker δίνονται από τις σχέσεις (2.9) έως (2.14). (Για τις παραμέτρους κίνησης ισχύει η σύμβαση προσήμων του σχήματος).

$$X_1 = -c_{11} \left[\frac{x'}{V} - \frac{e_0}{V} \alpha' - \frac{\gamma_e}{r_0} y \right] \quad (2.9)$$

$$X_2 = -c_{11} \left[\frac{x'}{V} + \frac{e_0}{V} \alpha' + \frac{\gamma_e}{r_0} y \right] \quad (2.10)$$

$$T_1 = -c_{22} \left[x \frac{y'}{V} - \alpha \right] - c_{23} \left[\frac{\alpha'}{V} - \frac{\gamma_0}{r_0} - \frac{\gamma_e y}{R \gamma_0 r_0} \right] \quad (2.11)$$

$$T_2 = -c_{22} \left[x \frac{y'}{V} - \alpha \right] - c_{23} \left[\frac{\alpha'}{V} + \frac{\gamma_0}{r_0} - \frac{\gamma_e y}{R \gamma_0 r_0} \right] \quad (2.12)$$

$$M_1 = c_{23} \left[x \frac{y'}{V} - \alpha \right] - c_{33} \left[\frac{\alpha'}{V} - \frac{\gamma_0}{r_0} - \frac{\gamma_e y}{R \gamma_0 r_0} \right] \quad (2.13)$$

$$M_2 = -c_{23} \left[x \frac{y'}{V} - \alpha \right] - c_{33} \left[\frac{\alpha'}{V} + \frac{\gamma_0}{r_0} - \frac{\gamma_e y}{R \gamma_0 r_0} \right] \quad (2.14)$$

όπου X_1, X_2 : οριζόντιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης που ασκούνται στους τροχούς 1 και 2.

T_1, T_2 : εγκάρσιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης που ασκούνται στους δύο τροχούς.

M_1, M_2 : ροπή της στροφορμής (spin) στους δύο τροχούς.

c_{11}, c_{22}, c_{23} : συντελεστές ψευδο-ολίσθησης του Kalker

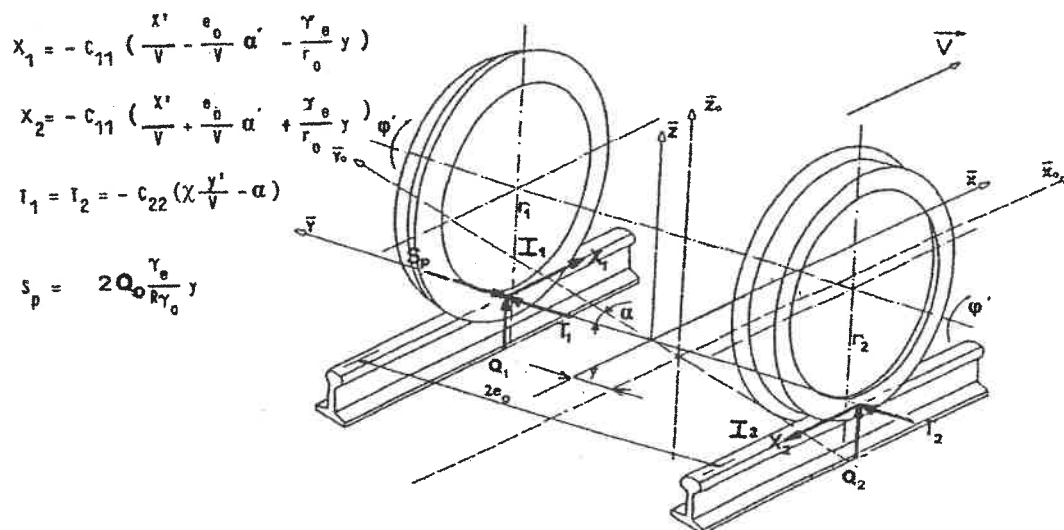
Από τις σχέσεις (2.9) έως (2.12) μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Οι οριζόντιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης X_1 και X_2 που ασκούνται στους δύο τροχούς δημιουργούν ένα ζεύγος δυνάμεων που τείνει να στρέψει το σιδηροδρομικό άξονα περί τον άξονα $\vec{z}_0$ (Σχήμα 2.14). Για $\chi=0$, οι δυνάμεις X_1 και X_2 είναι ίσες και αντίθετες.

- Οι εγκάρσιες δυνάμεις που ενεργούν σε κάθε τροχό για $c_{23} = 0$ είναι ίσες και ομόρροπες.

- Η αύξηση της ταχύτητας V μειώνει τους όρους απόσβεσης $(\frac{x'}{V}, \frac{\alpha'}{V}, \frac{y'}{V})$ που τείνουν να σταθεροποιήσουν τον άξονα.

- Η αύξηση της ισοδύναμης κωνικότητας γ_e και η μείωση της ακτίνας κύλισης των τροχών r_0 αυξάνουν το μέτρο των οριζοντίων δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης.



Σχήμα 2.14: Δυνάμεις ασκούμενες επί της σιδηροτροχιάς σε τυχαία θέση επί της γραμμής [16]

2.8.2.3 Δύναμη πλευρικών ανέμων

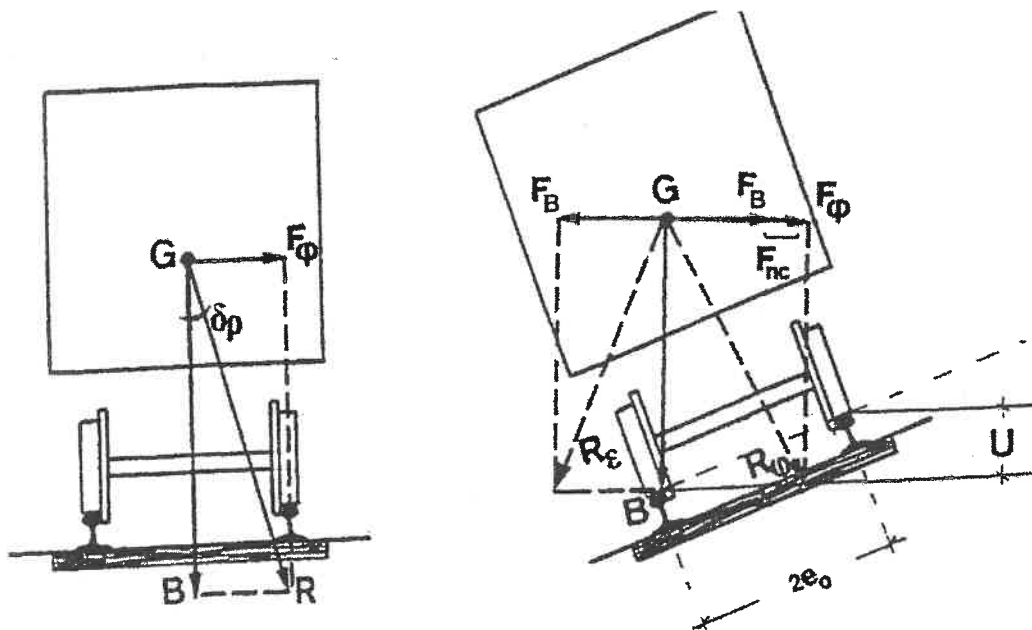
Στην περίπτωση που φυσούν πλευρικοί άνεμοι μεταβιβάζεται, μέσω των αξόνων, στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών, μια εγκάρσια δύναμη H_w . Η δύναμη αυτή θεωρείται στατική και η φορά της εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου. Ενεργεί θεωρητικά στο κέντρο βάρους της πλευρικής επιφάνειας του αμαξώματος.

Η δύναμη πλευρικών ανέμων H_w είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί αύξηση των εγκάρσιων μετατοπίσεων των αξόνων και υποβοηθά το μηχανισμό ανατροπής των οχημάτων.

2.8.2.4 Παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη

Όταν ένα όχημα μάζας M_t κινείται με ταχύτητα V σε μία στροφή ακτίνας καμπυλότητας R_c τότε στο κέντρο βάρους του οχήματος ενεργεί η φυγόκεντρη δύναμη F_ϕ η οποία ωθεί το όχημα προς το εξωτερικό της καμπύλης (Σχήμα 2.15).

$$F_\phi = M_t \frac{V^2}{R_c}$$



Σχήμα 2.15: Κίνηση σε καμπύλη – Παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη [16]

Λόγω της υπερύψωσης U που δίδεται στην εξωτερική σιδηροτροχιά, ενεργεί συγχρόνως και η εγκάρσια συνιστώσα του βάρους F_B . Η F_B έχει φορά αντίθετη προς αυτή της φυγόκεντρης και μέτρο ίσο με:

$$F_B = M_t g \delta_p = M_t g \frac{U}{2e_0}$$

όπου δ_p : γωνία υπερύψωσης

$2e_0$: απόσταση αξόνων σιδηροτροχιών

Η διαφορά των δυνάμεων F_ϕ και F_B εκφράζει την παραμένουσα φυγόκεντρη δύναμη F_{nc} . Στο επίπεδο των αξόνων και κατ' επέκταση στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών θα έχουμε:

$$F_{nc} = \frac{Q}{g} \left(\frac{V^2}{R_c} - g \frac{U}{2e_0} \right) = \frac{QI}{2e_0}$$

όπου Q : βάρος κατ' άξονα

I : ανεπάρκεια υπερύψωσης

Η ποσότητα $\frac{V^2}{R_c} - g \frac{U}{2e_0}$ αντιπροσωπεύει την εγκάρσια παραμένουσα

επιτάχυνση γ_{nc} .

Η αύξηση της ταχύτητας V του οχήματος καθώς και η μείωση της ακτίνας καμπυλότητας R_c και της υπερύψωσης U συμβάλλουν στην αύξηση της παραμένουσας φυγόκεντρης επιτάχυνσης.

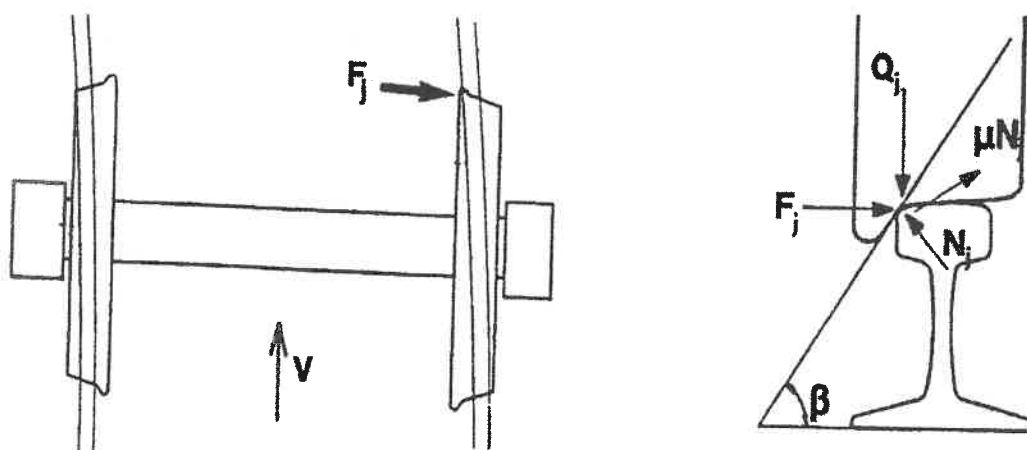
Η F_{nc} θεωρείται στατική δύναμη και είναι πάντοτε ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί μετατόπιση των αξόνων (κίνδυνος επαφής όνυχια – σιδηροτροχιάς), προβλήματα εγκάρσιας δυναμικής άνεσης στους επιβάτες και υποβοηθά το μηχανισμό ανατροπής των οχημάτων. Ωστόσο, λόγοι κυκλοφορίας, όπως η παρουσία συγχρόνως αργών και γρήγορων τρένων σε μια γραμμή επιβάλλουν την υιοθέτηση υπερύψωσης μικρότερης της θεωρητικής και επομένως την παρουσία της παραμένουσας φυγόκεντρης δύναμης.

2.8.2.5 Δυνάμεις ελατηρίων

Κατά την ταλάντωση των οχημάτων στις ευθυγραμμίες και κατά την εγγραφή των φορέων στις καμπύλες τα ελατήρια της δευτερεύουσας και της πρωτεύουσας ανάρτησης παραμορφώνονται. Οι δημιουργούμενες δυνάμεις H_r μεταβιβάζονται μέσω των φορέων στους άξονες.

2.8.2.6 Δυνάμεις καθοδήγησης

Όταν η εγκάρσια μετατόπιση « y » ενός σιδηροδρομικού άξονα γίνει ίση με το διάκενο « σ » όνυχα τροχού – σιδηροτροχιάς, τότε η εξωτερική παρειά των ονύχων των τροχών έρχεται σε επαφή με την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών (Σχήμα 2.16)



Σχήμα 2.16: Επαφή όνυχα – τροχού / Δύναμη καθοδήγησης [16]

Στην επιφάνεια επαφής ασκούνται εγκάρσια δυναμικά φορτία που ονομάζονται δυνάμεις καθοδήγησης F_j ($j=1$ ή 2).

Οι δυνάμεις καθοδήγησης δημιουργούν προβλήματα τόσο στους επιβάτες όσο και στο τροχαίο υλικό και στη γραμμή. Συγκεκριμένα:

- Μειώνουν τη δυναμική άνεση των επιβατών (αύξηση των εγκαρσίων επιταχύνσεων, τραντάγματα)
- Αυξάνουν σημαντικά το θόρυβο κύλισης
- Προκαλούν φθορές στους τροχούς και στις σιδηροτροχιές
- Αυξάνουν την κόπωση των φορέων
- Υπό ορισμένες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν μετατόπιση της γραμμής και εκτροχιασμό των οχημάτων

Ο υπολογισμός των δυνάμεων καθοδήγησης μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε θεωρητικά (μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων, γραφικές μέθοδοι, κλπ.)

Κατά την κίνηση των σιδηροδρομικών οχημάτων πρέπει επομένως να αποφεύγεται, όσο αυτό είναι δυνατό, η επαφή ονύχων – σιδηροτροχιών.

Η δύναμη καθοδήγησης ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα όλων των εγκαρσίων δυνάμεων που ενεργούν μέσω των τροχών επί της σιδηροτροχιάς και η τιμή δίνεται εμπειρικά από τον παρακάτω τύπο:

$$F = \frac{QI}{1500} + \frac{QV}{1000}$$

όπου F : σε t

I : ανεπάρκεια υπερύψωσης (στην περίπτωση κίνησης σε καμπύλη) ή στρεβλότητα γραμμής (στην περίπτωση κίνησης σε ευθυγραμμία) σε mm

Q : φορτίο κατ' άξονα σε t

2.8.3 Διαμήκεις (οριζόντιες) δυνάμεις

2.8.3.1 Δυνάμεις θερμοκρασιακών μεταβολών

Σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας οι σιδηροτροχιές παρουσιάζουν τάση αύξησης ή μείωσης του μήκους τους κατά μία ποσότητα Δl :

$$\Delta l = \alpha_t \Delta_t l_0$$

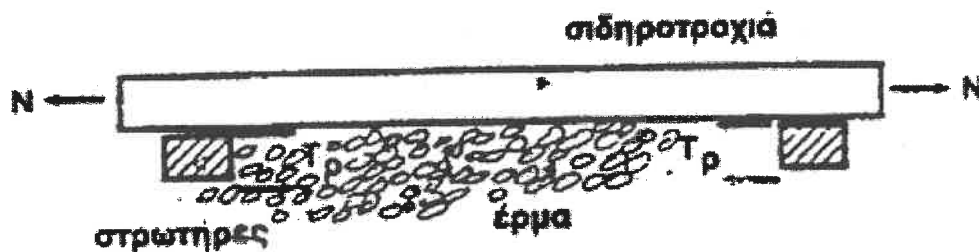
όπου Δl : μεταβολή του μήκους (συστολή ή διαστολή) (σε mm)

α_t : δείκτης θερμικής διαστολής χάλυβα (σε grad^{-1})

Δ_t : μεταβολή θερμοκρασίας (αύξηση ή μείωση) (σε 0°C)

l_0 : αρχικό μήκος σιδηροτροχιάς (σε mm)

Στη μετατόπιση αυτή αντιτίθενται οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ σιδηροτροχιών – στρωτήρων και στρωτήρων – έρματος. (Σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17: Δυνάμεις τριβής σιδηροτροχιών – έδρασης επιδομής. Δυνάμεις θερμοκρασιακών μεταβολών N [16]

2.8.3.2 Δυνάμεις τροχοπέδησης – Δυνάμεις επιτάχυνσης

Οι δυνάμεις τροχοπέδησης N_r και επιτάχυνσης N_y θεωρούνται δυναμικά φορτία και λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη των τεχνικών έργων (γέφυρες).

Πολλά σιδηροδρομικά δίκτυα δέχονται ότι η συνολική δύναμη τροχοπέδησης ισούται με το 25% του συνολικού βάρους του συρμού.

Κεφάλαιο 3

Επαφή τροχού - σιδηροτροχιάς

3.1 Βαθμοί ελευθερίας συμβατικού σιδηροδρομικού άξονα.

Η μελέτη των κινήσεων ενός σιδηροδρομικού άξονα γίνεται ως προς ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς $G_o \vec{x}_o \vec{y}_o \vec{z}_o$ συνδεδεμένο με το κέντρο βάρους G_o του άξονα και κινούμενο με σταθερή ταχύτητα V ως προς ένα ακίνητο σύστημα συντεταγμένων $O_g \vec{x}_g \vec{y}_g \vec{z}_g$ του οποίου ο άξονας $O_g \vec{x}_g$ είναι παράλληλος προς τον άξονα της σιδηροδρομικής γραμμής (Σχήμα 3.1)

Σε μια τυχαία θέση του άξονα επί της γραμμής το κέντρο βάρους του μετατοπίζεται στη θέση G ($G \vec{xyz}$: μεταβλητά τρίεδρο).

Ένας συμβατικός σιδηροδρομικός άξονας έχει συνολικά έξι βαθμούς ελευθερίας: $x, y, z, \alpha, \psi, \phi$ (Σχήμα 3.1α,γ). [16]

Όπου x, y, z : οριζόντια εγκάρσια και κατακόρυφη αντίστοιχα μετατόπιση του κέντρου βάρους του άξονα ως προς $G_o \vec{x}_o, G_o \vec{y}_o, G_o \vec{z}_o$.

α : γωνία στροφής (παρέκκλισης) του άξονα ως προς $G_o \vec{z}_o$

ψ : γωνία περιστροφής του άξονα ως προς $G_o \vec{x}_o$

φ : γωνία περιστροφής του άξονα ως προς $G_o \vec{y}_o$ ($\varphi' \approx V/r_o$)

3.2 Γεωμετρία της επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς

3.2.1 Υποθέσεις

Η μελέτη της γεωμετρίας τροχού – σιδηροτροχιάς επιτρέπει να υπολογιστούν, για μια τυχαία θέση ενός σιδηροδρομικού άξονα πάνω στη γραμμή (Σχήμα 3.1α,γ), οι τιμές των παραμέτρων $e_1, e_2, \gamma_1, \gamma_2, r_1, r_2, \psi$ και z .

Όπου e_1, e_2 : αποστάσεις του κέντρου βάρους του άξονα από τα σημεία επαφής I_1 και I_2

r_1, r_2 : ακτίνες κύλισης των δύο τροχών

γ_1, γ_2 : γωνίες κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο των εφαπτόμενων επιπέδων στα σημεία επαφής I_1 και I_2

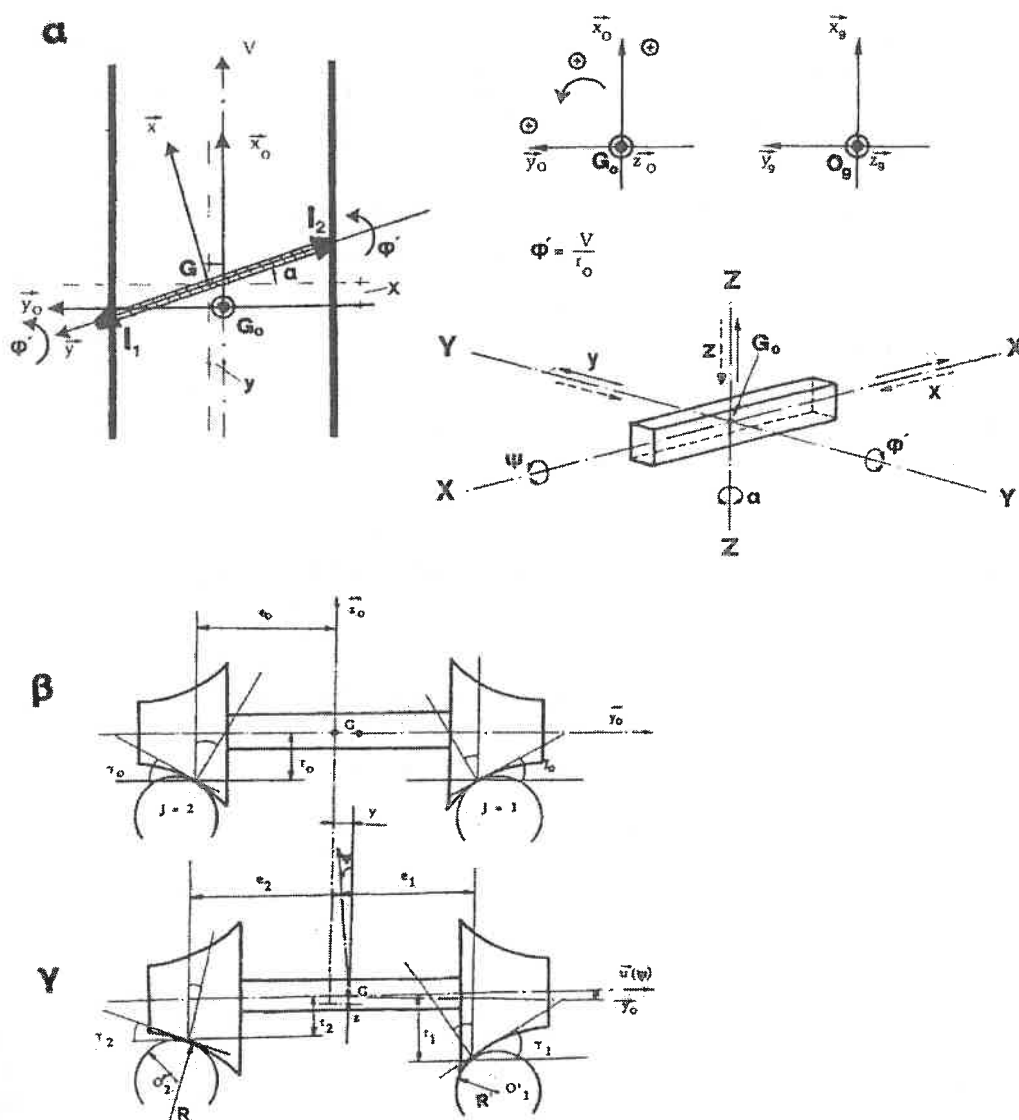
e_o, r_o, γ_o : αντίστοιχα μεγέθη στην περίπτωση που ο άξονας είναι κεντρωμένος στη γραμμή (Σχήμα 3.1β)

Οι παράμετροι αυτές εκφράζονται με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων, συναρτήσεων των παραμέτρων θέσης του άξονα y και α και έχουν τη μορφή: [16]

$$e_j = f(y), r_j = f(y), \gamma_j = f(y)$$

$$\Psi = f(y), z = f(y^2, \alpha^2)$$

όπου $j=1,2$ (1: αριστερός τροχός κατά τη διεύθυνση της κίνησης).



Σχήμα 3.1: Κίνηση σιδηροδρομικού άξονα- Σύστημα αναφοράς και βαθμοί ελευθερίας[16]

Για τη μελέτη της γεωμετρίας επαφής είναι απαραίτητο να καθορισθεί πρώτα η γεωμετρική επιφάνεια κύλισης του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Η θεώρηση της πραγματικής γεωμετρίας του τροχού εισάγει αυτόματα τη μη γραμμικότητα στους υπολογισμούς (κατατομή με μεταβλητή

κωνικότητα). Για την απλοποίηση των υπολογισμών έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που στηρίζονται σε συγκεκριμένες υποθέσεις: [16]

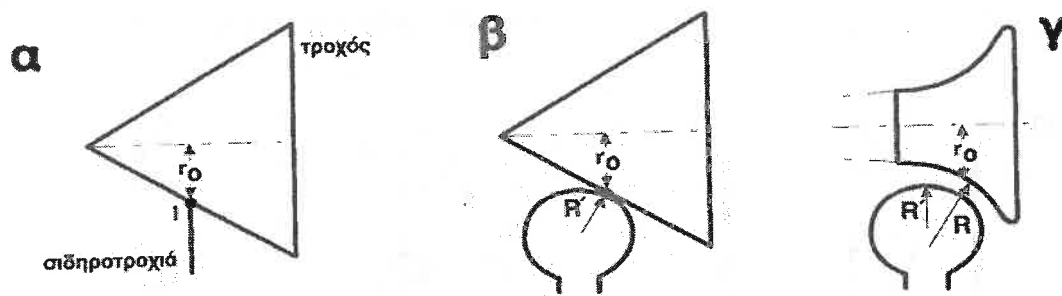
- Οι τροχοί θεωρούνται κωνικοί (εγκάρσια διατομή τριγωνική) και οι σιδηροτροχιές ράβδοι κατακόρυφοι, απειροελάχιστης διατομής (Σχήμα 3.2α). Στην περίπτωση αυτή το σημείο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς προκύπτει από την τομή ευθείας (γενέτειρας κώνου) για τον τροχό και σημείου για τη σιδηροτροχιά.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό (μοντέλο Carter) όταν ο άξονας μετατοπίζεται εγκάρσια κατά μια ποσότητα « y » πάνω στη γραμμή, τότε το σημείο επαφής παραμένει αμετάβλητο πάνω στη σιδηροτροχιά ενώ μετατοπίζεται κατά « y » πάνω στον τροχό.

- Οι τροχοί θεωρούνται κωνικοί και η κεφαλή των σιδηροτροχιών σφαιρική (Σχήμα 3.2β). Στην περίπτωση αυτή το σημείο επαφής προκύπτει από την τομή ευθείας (γενέτειρας κώνου) για τον τροχό και κύκλου ακτίνας R' για τη σιδηροτροχιά.

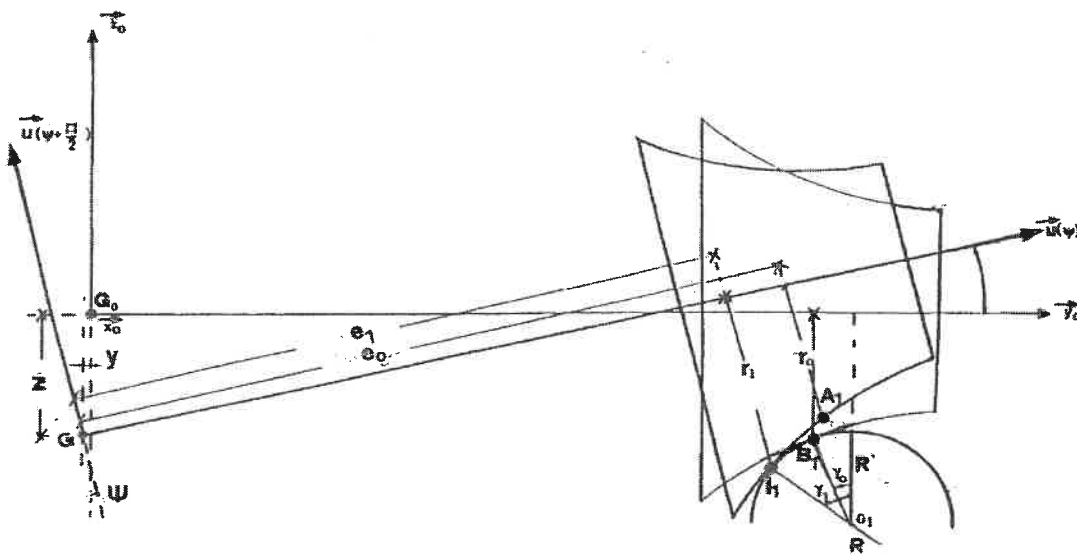
- Οι τροχοί θεωρούνται κωνικής μορφής με γενέτειρες καμπύλες γραμμές σταθερής ακτίνας ενώ οι κεφαλές των σιδηροτροχιών σφαιρικές (Σχήμα 3.2γ). Στην περίπτωση αυτή το σημείο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς προκύπτει από την τομή κύκλου ακτίνας R για τον τροχό, με κύκλο ακτίνας R' για τη σιδηροτροχιά.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό που προτάθηκε από το Γάλλο R. Joly, μια εγκάρσια μετατόπιση του άξονα κατά « y » πάνω στη γραμμή, συνοδεύεται από μετατόπιση του σημείου επαφής τόσο πάνω στον τροχό όσο και στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 3.3)



Σχήμα 3.2: Μοντέλα μελέτης της γεωμετρίας επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς.[16]

Όλα τα παραπάνω μοντέλα καταλήγουν σε γραμμικές μαθηματικές σχέσεις που μπορούν να ενταχθούν στη συνέχεια εύκολα στο διαφορικό σύστημα που εκφράζει τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων. Ωστόσο το μοντέλο του R. Joly παρέχει πολύ πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση φθοράς στην επιφάνεια κύλισης των τροχών και των σιδηροτροχιών, παράγοντα πολύ σημαντικό για την ευστάθεια και την καθοδήγηση των οχημάτων.



Σχήμα 3.3: Μετατόπιση του άξονα από τη θέση της αρχικής ισορροπίας – Διπλή μετατόπιση του σημείου επαφής.[16]

Η χρησιμοποίηση των γραμμικών μαθηματικών μοντέλων δίνει αποτελέσματα αρκετά αξιόπιστα στις ευθυγραμμίες. Στις καμπύλες, οι εγκάρσιες μετατοπίσεις των αξόνων είναι μεγαλύτερες. Μια μη γραμμική θεώρηση του προβλήματος (πραγματικό προφίλ τροχών) θα έδινε αποτελέσματα πιο κοντά στην πραγματικότητα.

3.2.2 Μαθηματική επίλυση

Η μαθηματική επίλυση της γεωμετρίας της επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς με το μοντέλο του R. Joly καταλήγει στις παρακάτω γραμμικές σχέσεις: [16]

$$e_1 = e_0 - \frac{R}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R' \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.1)$$

$$e_2 = e_0 + \frac{R}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R' \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.2)$$

$$r_1 = r_0 + \frac{R \gamma_0}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R' \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.3)$$

$$r_2 = r_0 - \frac{R \gamma_0}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R' \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.4)$$

$$\gamma_1 = \gamma_0 + \frac{1}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.5)$$

$$\gamma_2 = -\gamma_0 + \frac{1}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R \gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.6)$$

$$\psi = \left(\frac{\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) y \quad (3.7)$$

$$z = \frac{y^2}{2(R - R')} \left(\frac{e_0 + R\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right)^2 - \gamma_0 [e_0 - (R + 2r_0)\gamma_0] \frac{\alpha^2}{2} \quad (3.8)$$

Θέτουμε:

$$\Gamma = \frac{\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0}$$

$$\varepsilon_0 = e_0 - (R + 2r_0)\gamma_0$$

$$\zeta = \frac{1}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right)^2$$

Οι σχέσεις (3.7) και (3.8) γίνονται:

$$\psi = \Gamma y \quad (3.9)$$

$$z = \frac{1}{2} \zeta y^2 - \frac{1}{2} \gamma_0 \varepsilon_0 \alpha^2 \quad (3.10)$$

Θέτοντας:

$$\gamma_e = \frac{R\gamma_0}{R - R'} \left(\frac{e_0 + R'\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) \quad (3.11)$$

και αφαιρώντας τις σχέσεις (3.3) και (3.4) προκύπτει:

$$r_1 - r_2 = 2\gamma_e y \quad (3.12)$$

Οι ποσότητες:

$$\left(\frac{e_0 + R'\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) \text{ και } \left(\frac{e_0 + R\gamma_0}{e_0 - r_0 \gamma_0} \right) \text{ είναι περίπου ίσες με τη μονάδα.}$$

Οι σχέσεις (3.11) και (3.12) γίνονται αντίστοιχα:

$$\gamma_e = \frac{R\gamma_0}{R - R'} \quad (3.13)$$

$$\zeta = \frac{1}{R - R'} \quad (3.14)$$

και συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.13) και (3.14) προκύπτει τελικά:

$$\zeta = \frac{\gamma_e}{R\gamma_0} \quad (3.15)$$

3.2.3 Συμπεράσματα επί της μελέτης της γεωμετρίας επαφής.

Η ποσότητα γ_e καλείται ισοδύναμη κωνικότητα και χαρακτηρίζει από μόνη της τη γεωμετρία επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς. Η τιμή της εξαρτάται κυρίως από τη διαφορά των ακτίνων καμπυλότητας του τροχού (R) και της σιδηροτροχιάς (R'). Επειδή η ακτίνα καμπυλότητας R' της κεφαλής της σιδηροτροχιάς μεταβάλλεται λίγο με το χρόνο μπορεί να θεωρηθεί ότι η ισοδύναμη κωνικότητα χαρακτηρίζει τη φθορά της επιφάνειας κύλισης των τροχών. Η φθορά αυτή αυξάνει με τον αριθμό των διαδρομών των αξόνων των οχημάτων.

Για τροχούς φθαρμένους, δηλαδή μικρές τιμές της R , η ισοδύναμη κωνικότητα μεγαλώνει. Αντίθετα για καινούριους τροχούς (μεγάλες τιμές της R) η ισοδύναμη κωνικότητα μικραίνει.

Όπως ήδη είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ισοδύναμη κωνικότητα γ_e υπεισέρχεται στις αναλυτικές εκφράσεις των δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης και βαρύτητας που ασκούνται στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά ενός σιδηροδρομικού οχήματος.[16]

3.3 Η κίνηση του τροχαίου υλικού επί των σιδηροτροχιών [12]

Η κίνηση των τροχών επί των σιδηροτροχιών διακρίνεται σε κύλιση, ολίσθηση και ολίσθηση επί τόπου.

Η γωνιακή ταχύτητα περιστρεφόμενου τροχού περί τον άξονά του είναι

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ sec}^{-1}$$

εάν n ο αριθμός των περιστροφών του τροχού ανά πρώτο λεπτό.

Η ταχύτητα v_e του στιγμιαίου σημείου επαφής των τροχών και σιδηροτροχιών είναι $v_e = v - r\omega$ m/sec όπου r η ακτίνα του τροχού και v η ταχύτητα του οχήματος.

Έστω ο τροχός (Σχήμα 3.4) και η διάμετρος ab αυτού. Μετά από χρονικό διάστημα dt η ίδια διάμετρος κατά την κίνηση του τροχού λαμβάνει τη θέση $a'b'$. Η τομή των δύο διαμέτρων O συμπίπτει με το σημείο τομής τροχού και σιδηροτροχιάς και καλείται στιγμιαίος πόλος περιστροφής του κυλιόμενου τροχού. Η μετακίνηση του σημείου C , δηλαδή το τμήμα $CC' = v dt$ και το μήκος κυλίσεως της περιμέτρου του τροχού $\omega r dt$ είναι ίσα με το διανυθέν διάστημα υπό του οχήματος. Την κίνηση ενός τροχού, όταν πληρούται η συνθήκη $v = \omega r$ την ονομάζουμε κύλιση. Κατά την κύλιση ο αριθμός των περιστροφών ενός τροχού για διανυθέν διάστημα l είναι $l/2\pi r$.

Στην περίπτωση της ολίσθησης το σημείο O βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 3.4α). Το τμήμα $CC' = v dt$, δηλαδή το διανυθέν διάστημα υπό του οχήματος, είναι μεγαλύτερο του μήκους κυλίσεως της περιμέτρου του τροχού $\omega r dt$. Το διάστημα $(v - r\omega)dt$ διανύθηκε με ολίσθηση. Κατά την ολίσθηση ισχύει η σχέση $v > r\omega$. Η ποσότητα ολισθήσεως είναι

$$\left(\frac{v dt - r \omega dt}{v dt} \right) * 100 = a \%$$

σε περίπτωση μάλιστα τελείως τροχοπεδημένου τροχού ισχύει ότι $a=100\%$. Ο αριθμός των περιστροφών ενός τροχού σε διανυθέν διάστημα μήκους l από αυτόν είναι

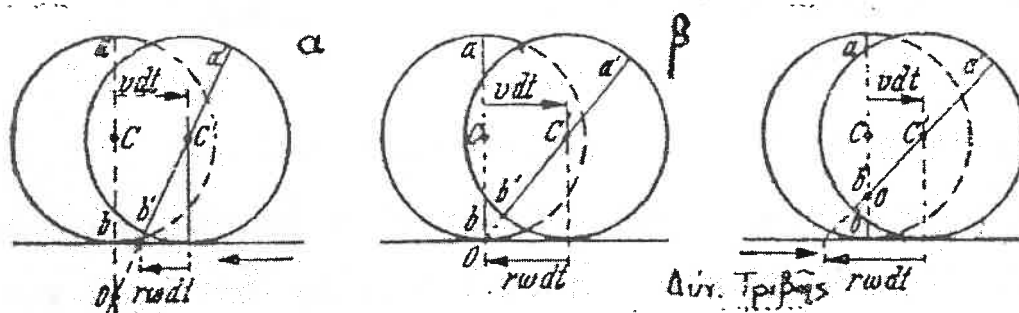
$$\frac{l(1 - \frac{a}{100})}{2r\pi}$$

Κατά την περίπτωση ολίσθησης επί τόπου το σημείο O βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 3.4γ). Το τμήμα $CC'=v dt$, δηλαδή το διανυθέν διάστημα από το όχημα, είναι μικρότερο από το μήκος κύλισης της περιμέτρου του τροχού $\omega r dt$. Η περίπτωση αυτής της κίνησης ονομάζεται ολίσθηση επί τόπου και προκαλείται όταν η δύναμη έλξεως είναι μεγαλύτερη από τις δυνάμεις τριβής μεταξύ τροχών και σιδηροτροχιών. Ισχύει μάλιστα η σχέση $v < r\omega$. Η ποσότητα ολισθήσεως επί τόπου είναι

$$\left(\frac{r \omega dt - v dt}{r \omega dt} \right) * 100 = \beta \%$$

Εάν περιστρέφονται οι τροχοί, το δε όχημα δεν κινείται, δηλαδή $v = 0$, τότε $\beta = 100\%$. Ο αριθμός των περιστροφών του τροχού σε διάστημα l είναι

$$\frac{l}{\left[2r\pi \left(1 - \frac{\beta}{100} \right) \right]}$$



Σχήμα 3.4: α)Ολίσθηση β)Κύλιση γ)Ολίσθηση επί τόπου [12]

Κατά την κύλιση των οχημάτων πρέπει αφενός μεν η σιδηροδρομική γραμμή να παρουσιάζει ικανή αντοχή, αφετέρου η οδήγηση αυτών πρέπει να είναι ασφαλής. Για το λόγο αυτό δεν είναι αρκετό η σιδηροδρομική γραμμή να είναι ικανής αντοχής, αλλά συγχρόνως πρέπει να υπάρχει και ασφάλεια στην οδήγηση και κίνηση των οχημάτων. Η ασφαλής κίνηση δεν εξαρτάται μόνο από την επιδομή αλλά και από τη διαμόρφωση των τροχών των οχημάτων, δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι η ασφαλής κίνηση των οχημάτων επί των σιδηροτροχιών εξαρτάται από την καλή συνεργασία των τροχών και σιδηροτροχιών ή καλύτερα από την καλή συνεργασία του οχήματος και της σιδηροδρομικής γραμμής και τελικά από την ορθή θέση της γραμμής.

Σε όλο τον κόσμο τα σιδηροδρομικά οχήματα οδηγούνται επί των σιδηροτροχιών με τη βοήθεια προεξοχής της περιμέτρου των τροχών τους (επισώτρου) προς το εσωτερικό μέρος της γραμμής 20-30 χλστ., το οποίο καλείται όνυχας. Αξιοπαρατήρητο είναι το μικρό μέγεθος του όνυχας σε σχέση με τις διαστάσεις του οχήματος και η ασφάλεια που επιτυγχάνεται στην κίνηση του οχήματος με τη βοήθεια ενός τόσο μικρού στοιχείου.

Για την ομαλή και ασφαλή κίνηση των τροχών επί των σιδηροτροχιών έχει διαμορφωθεί η επιφάνεια κύλισής τους κατάλληλα. Η επιφάνεια κύλισής τους είναι κωνική, κλίσεως 1:20 η οποία στο εξωτερικό μέρος του τροχού καταλήγει σε κωνική επιφάνεια κλίσεως 1:10. Σε άλλες χώρες, όπως στην Αμερική, η κλίση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 1:40 έως 1:∞ .

Μέσω της επιφάνειας κύλισης του τροχού μεταφέρονται τα φορτία επί των σιδηροτροχιών. Για την καλύτερη διανομή των τάσεων εντός της σιδηροτροχιάς δίνεται στη σιδηροτροχιά κλίση 1:20 έως 1:40 ως προς την κατακόρυφο προς το εσωτερικό της γραμμής. Στην επιφάνεια επαφής των

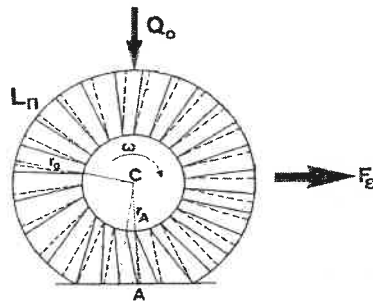
σιδηροτροχιών και των τροχών αναπτύσσονται μεγάλες επιφανειακές τάσεις (4000 kg/cm^2), οι οποίες σε περίπτωση ολίσθησης οδηγούν σε ανεπιθύμητες φθορές. Για το λόγο αυτό πρέπει με κατάλληλη διαμόρφωση τόσο της επιφάνειας κύλισης του τροχού, όσο και της κεφαλής της σιδηροτροχιάς να αποφευχθούν οι μεγάλες πιέσεις και οι κινήσεις ολισθήσεως να περιορισθούν στο ελάχιστο δυνατό. Σε περίπτωση επίπεδης διαμόρφωσης της επιφάνειας της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, πάνω στην οποία κυλίζει ο τροχός, και κυλινδρικής επιφάνειας κύλισης του τροχού, η επιφάνεια επαφής τροχού και σιδηροτροχιάς γίνεται μέγιστη, όταν ο τροχός είναι κατακόρυφος. Εάν έχουμε αποκλίσεις του τροχού από την κατακόρυφο, τότε αναπτύσσονται εξαιρετικά μεγάλες τάσεις στα άκρα της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και στην επιφάνεια κύλισης του τροχού. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο η κεφαλή της σιδηροτροχιάς να καμπυλώνει ελαφρώς. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται μεγαλύτερες επιφανειακές πιέσεις, αλλά οι θέσεις που καταπονούνται περισσότερο δεν βρίσκονται στα άκρα, όπου το υλικό είναι ευπαθέστερο, με αποτέλεσμα να προκαλούνται μικρότερες φθορές.

3.4 Φαινόμενα επαφής κατά την κίνηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς

3.4.1. Οριζόντια ψευδο-ολίσθηση [16]

Θεωρούμε ένα τροχό ακτίνας r_0 ο οποίος υπό την επίδραση μιας ελκτικής δύναμης F_e κυλίνεται με γωνιακή ταχύτητα ω επί μιας σιδηροτροχιάς (Σχήμα 3.5).

Στο κέντρο C του άξονα περιστροφής του τροχού ασκείται ένα κατακόρυφο φορτίο Q_0 .



Σχήμα 3.5: Κύλιση τροχού υπό την επίδραση ελκτικής δύναμης [16]

Ονομάζουμε:

- **Πραγματική ταχύτητα** ή ταχύτητα μετατόπισης (V_{actx}) την ταχύτητα του τροχού μετρούμενη επί της σιδηροτροχιάς.
- **Θεωρητική ταχύτητα** κύλισης ή περιφερειακή ταχύτητα (V_{roix}) την ταχύτητα του τροχού μετρούμενη επί του τροχού.

Στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς λαμβάνουν χώρα ελαστικές παραμορφώσεις (Σχήμα 3.5). Κοντά στο σημείο A του επισώτρου όπου μεταβιβάζεται η ελκτική δύναμη $F_ε$ μικρή περιοχή της περιφέρειας του τροχού συρρικνώνεται ενώ μια άλλη περιοχή εφελκύεται. Επειδή οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές το συνολικό μήκος L_π της περιφέρειας του τροχού παραμένει σταθερό:

$$L_\pi = 2\pi r_0 = ct$$

Λόγω των παραμορφώσεων η ακτίνα κύλισης του τροχού που αντιστοιχεί στο σημείο A μειώνεται ($r_A < r_0$) (Σχήμα 3.5). Το διανυόμενο διάστημα μετρούμενο επί της σιδηροτροχιάς θα είναι:

$$S_{actx} = 2\pi r_A n_\sigma$$

όπου n_σ : ο αριθμός περιστροφών του τροχού

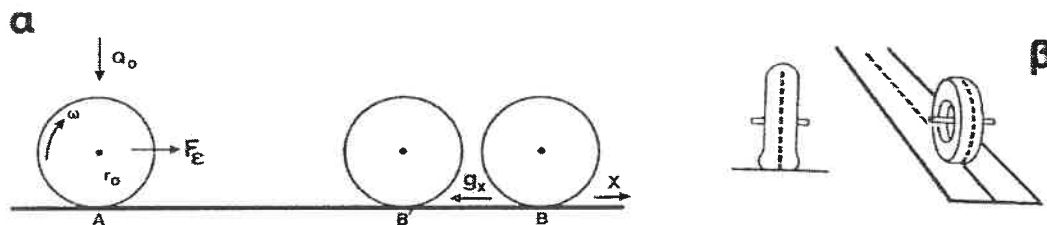
Μετρώντας και τα δύο διαστήματα επί της σιδηροτροχιάς θα έχουμε (Σχήμα 3.6):

$$S_{actx} < S_{rolx}$$

Ο τροχός αντί να διανύσει επί της σιδηροτροχιάς το τμήμα AB (που αντιστοιχεί σε καθαρή κύλιση) διανύει ένα μικρότερο διάστημα AB'.

Για τη μετακίνηση από το A στο B απαιτείται επομένως ένας μεγαλύτερος αριθμός στροφών από αυτόν που αντιστοιχεί σε κίνηση με καθαρή κύλιση.

Μπορούμε να αναλύσουμε το παραπάνω φαινόμενο θεωρώντας ότι ο τροχός κινείται με καθαρή κύλιση ενώ συγχρόνως, χωρίς να καταργείται η πρόσφυση τροχού – σιδηροτροχιάς, ολισθαίνει αντίθετα προς τη διεύθυνση μετακίνησης με μια ταχύτητα g_x (Σχήμα 3.6α).



Σχήμα 3.6: Φαινόμενο οριζόντιας ψευδο-ολίσθησης [16]

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται οριζόντια ψευδο-ολίσθηση και γίνεται ευκολότερα αντιληπτό στην περίπτωση κύλισης ελαστικών τροχών επί οδοστρώματος (Σχήμα 3.6β).

Η διαφορά:

$$V_{actx} - V_{rolx} = g_x$$

ονομάζεται οριζόντια ταχύτητα ολίσθησης, ενώ το πηλίκο:

$$\frac{V_{actx} - V_{rolx}}{V_{actx}} = \frac{g_x}{V} = v_x$$

ονομάζεται οριζόντια μειωμένη ολίσθηση.

Στο σημείο Α ασκείται επί της σιδηροτροχιάς μια δύναμη X η οποία ονομάζεται οριζόντια δύναμη ψευδο-ολίσθησης και εκφράζεται από τη σχέση (Σχήμα 3.6α):

$$\vec{X} = -f_x \vec{v}_x$$

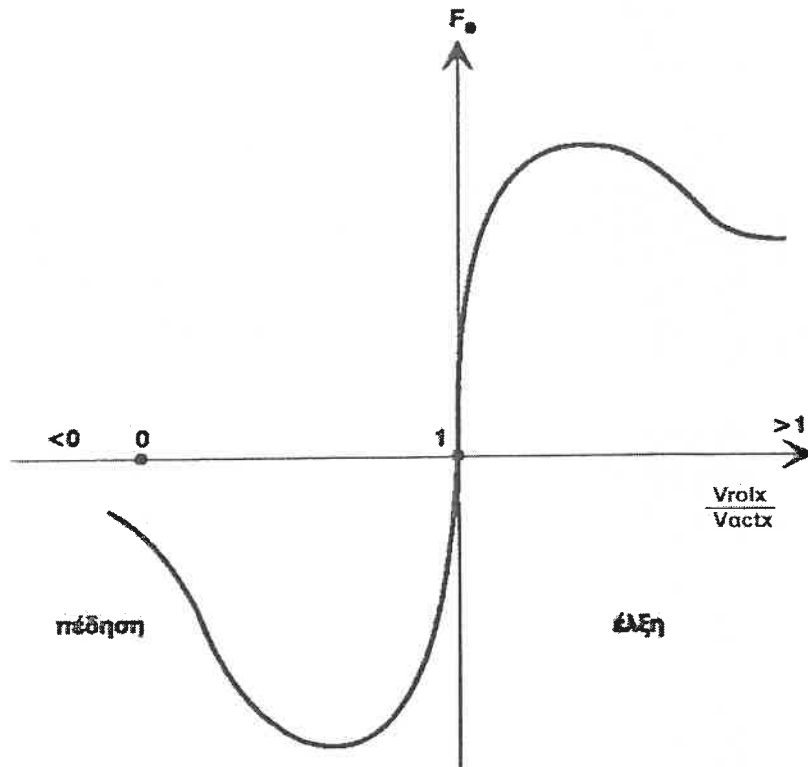
όπου f_x : συντελεστής οριζόντιας ψευδο-ολίσθησης.

Οι οριζόντιες δυνάμεις ψευδο-ολίσθησης προκαλούν φθορές στην επιφάνεια κύλισης του τροχού και της σιδηροτροχιάς, κόπωση των υλικών επαφής και θόρυβο.

Το μέτρο τους αυξάνει ανάλογα με το βάρος του τροχού Q_0 και με την ελκτική δύναμη F_e .

Όταν η δύναμη ψευδο-ολίσθησης X υπερβεί τη δύναμη που ορίζει ο νόμος του Coulomb ($X > \mu Q_0$, όπου μ : συντελεστής τριβής τροχού – σιδηροτροχιάς) τότε λαμβάνουν χώρα πραγματικές ολισθήσεις.

Στο σχήμα 3.7 δίνεται η καμπύλη $F_e - \frac{V_{rolx}}{V_{actx}}$



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα μεταβολής της F_e συναρτήσει της ποσότητας $\frac{V_{rolx}}{V_{actx}}$ [16]

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις κύλισης:

- Καθαρή κύλιση τροχού

$$V_{actx}, V_{rolx} \neq 0 \quad \frac{V_{rolx}}{V_{actx}} = 1, \quad g_x = 0$$

- Έλξη

$$V_{actx}, V_{rolx} \neq 0 \quad \frac{V_{rolx}}{V_{actx}} > 1, \quad g_x \neq 0$$

- Πέδηση τροχού

$$V_{actx}, V_{rolx} \neq 0 \quad \frac{V_{rolx}}{V_{actx}} < 1, \quad g_x \neq 0$$

- Πατινάρισμα τροχού

$$V_{actx} = 0, V_{rolx} \neq 0 \quad \frac{V_{rolx}}{V_{actx}} = \infty, g_x = 0$$

- Μπλοκάρισμα τροχού

$$V_{actx} \neq 0, V_{rolx} = 0 \quad \frac{V_{rolx}}{V_{actx}} = 0, g_x \neq 0$$

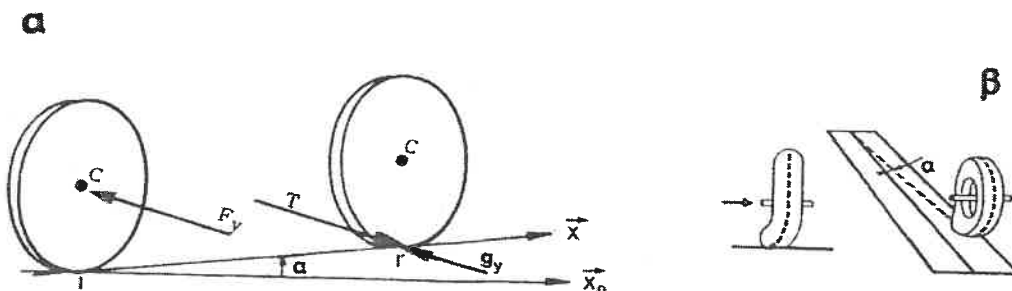
3.4.2 Εγκάρσια ψευδο-ολίσθηση [16]

Θεωρούμε έναν τροχό ο οποίος υπό την επίδραση μιας ελκτικής δύναμης F_ϵ κυλίνεται επί της σιδηροτροχιάς.

Στο κέντρο C του τροχού ασκείται συγχρόνως μια εξωτερική εγκάρσια δύναμη F_y (Σχήμα 3.8α).

Υπό την επίδραση της F_y ο τροχός χωρίς να χάνει την πρόσφυσή του με τη σιδηροτροχιά παραμορφώνεται ενώ συγχρόνως η διεύθυνση κύλισης σχηματίζει μια γωνία α με τη διεύθυνση μετατόπισης,

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εγκάρσια ψευδο-ολίσθηση και γίνεται ευκολότερα αντιληπτό στην περίπτωση κύλισης ελαστικών τροχών επί οδοστρώματος (Σχήμα 3.8β).



Σχήμα 3.8: Φαινόμενο εγκάρσιας ψευδο-ολίσθησης τροχού [16]

Η γωνία α καλείται γωνία παρέκκλισης. Όπως και στην περίπτωση της οριζόντιας ψευδο-ολίσθησης η διαφορά:

$$V_{acty} - V_{roly} = g_y$$

ονομάζεται αντίστοιχα εγκάρσια ταχύτητα ολίσθησης, ενώ το πηλίκο:

$$\frac{V_{acty} - V_{roly}}{V_{acty}} = \frac{g_y}{V} = v_y$$

ονομάζεται εγκάρσια μειωμένη ολίσθηση.

Στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς ασκείται μια εγκάρσια δύναμη T (Σχήμα 3.8β) η οποία ονομάζεται εγκάρσια δύναμη ψευδο-ολίσθησης και δίνεται από τη σχέση:

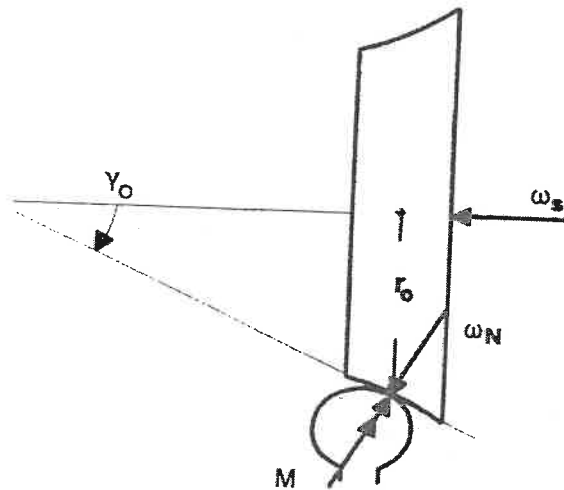
$$\vec{T} = -f_y \vec{v}_y$$

όπου f_y : συντελεστής εγκάρσιας ψευδο-ολίσθησης

Η εγκάρσια δύναμη ψευδο-ολίσθησης προκαλεί φθορές στους τροχούς και στη σιδηροτροχιά, κόπωση των υλικών επαφής και θόρυβο. Το μέτρο της αυξάνει ανάλογα με το μέτρο της εξωτερικής δύναμης F_y . Όταν η δύναμη ψευδο-ολίσθησης T υπερβεί τη δύναμη που ορίζει ο νόμος του Coulomb ($T > \mu Q_0$) τότε ο τροχός ολισθαίνει.

3.4.3 Στροφορμή (Spin)

Όταν ο άξονας περιστροφής του τροχού σχηματίζει γωνία με το επίπεδο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω_s του άξονα του τροχού δημιουργεί στην επιφάνεια κύλισης μια γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω_N και από αντίδραση μια ροπή περιστροφής M (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Ροπή στοφορμής (spin) [16]

Η ροπή αυτή καλείται ροπή στοφορμής (spin) και το μέτρο της ισούται με:

$$M = f_{\phi} \Phi$$

Όπου f_{ϕ} : συντελεστής της στοφορμής (spin).

$$\Phi: \text{spin} = \frac{\omega_N}{V} = \frac{\gamma_0}{r_0}$$

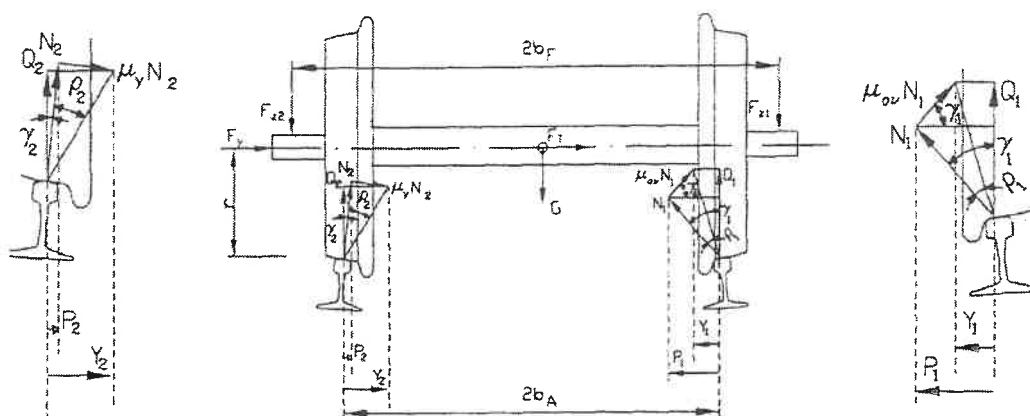
Η ροπή της στοφορμής (spin), δημιουργεί φθορές στους τροχούς και στη σιδηροτροχιά.

3.5 Επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς ενός και δύο σημείων

3.5.1 Δυνάμεις μεταξύ γραμμών και τροχών

Με την υπόθεση γραμμών με κυλινδρική διατομή επισώτρων και χωρίς όνυχες, οι δυνάμεις φαίνεται να αναπτύσσονται στο επίπεδο Άνω Κεφαλής Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ). Στην πραγματικότητα όμως οι δυνάμεις αυτές δρουν στο χώρο. Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται ένας άξονας ο οποίος ευρίσκεται σε πρόσπτωση παρά τη σιδηροτροχιά με το δεξιό τροχό (τροχός 1).

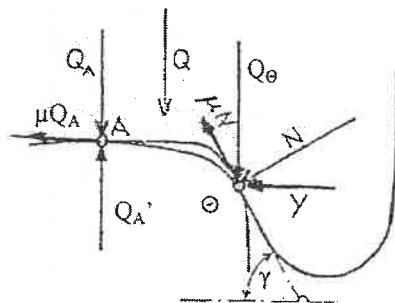
Στον αριστερό τροχό 2 υφίσταται διάκενο μεταξύ όνυχα και σιδηροτροχιάς. Το σημείο εφαρμογής του ίδιου βάρους του άξονα ευρίσκεται στο μέσο σύνδεσης των δύο τροχών. Στο ίδιο σημείο εφαρμόζεται και η αδρανειακή δύναμη της μάζας F_T , η οποία αντιτίθεται σε εγκάρσια επιτάχυνση που μπορεί να υποστεί ο άξονας (π.χ. από γεωμετρικό λάθος γραμμής). Στο λαιμό του άξονα μεταδίδονται οι δυνάμεις που προέρχονται από το όχημα και μεταφέρονται σε αυτόν: οι κατακόρυφες δυνάμεις F_{z1} και F_{z2} καθώς και οι εγκάρσιες δυνάμεις των εδράνων οι οποίες μπορούν να συμπτυχθούν σε μία F_y καθώς ον η γραμμή δράσης τους είναι η ίδια. [7]



Σχήμα 3.10: Δυνάμεις μεταξύ τροχών και σιδηροτροχιών [7]

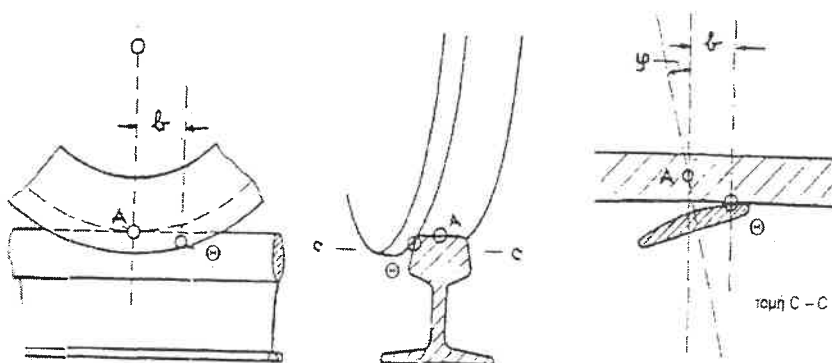
3.5.2 Επαφή δύο σημείων

Σε καινούρια κατάσταση υφίσταται μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς επαφή σε δυο σημεία. Η επαφή γίνεται στο σημείο έδρασης του τροχού Α και στο σημείο Θ του όνυχα [7] (Σχήμα 3.11).



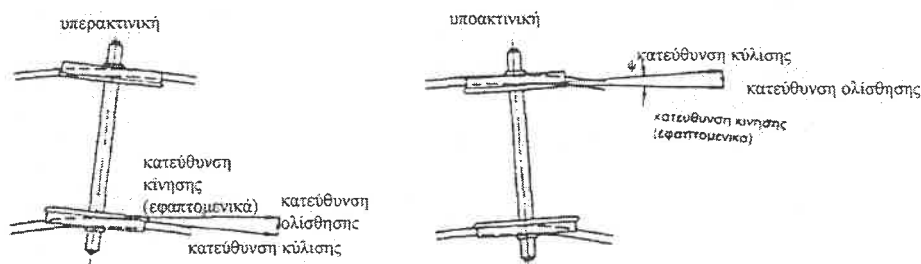
Σχήμα 3.11: Επαφή δύο σημείων [7]

Επειδή ο καθοδηγών τροχός δεν έχει θέση ακτινική, αλλά κινείται παρά τη σιδηροτροχιά υπό γωνία πρόσπτωσης, τα σημεία Α και Θ δεν ευρίσκονται στο κάθετο μεσημβρινό επίπεδο του άξονα, αλλά το σημείο Θ κείται λίγο πιο μπροστά (Σχήμα 3.12). Όμως στο σχήμα 3.12 ή και για την ευκολία της ανάλυσης, τα σημεία Α και Θ θεωρούνται στο ίδιο επίπεδο.



Σχήμα 3.12: Θέση των σημείων επαφής [7]

Η μετάδοση του συνολικού φορτίου Q του τροχού επιτυγχάνεται μέσω των Q_A και Q_Θ , όπου $Q_A + Q_\Theta = Q$. Επίσης δρουν οι δυνάμεις τριβής μQ_A οριζόντια στο A προς το εξωτερικό της καμπύλης και μN πλάγια προς τα πάνω, επειδή η συνήθης κίνηση του προσπίπτοντος τροχού μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχή εισχώρηση εντός της γραμμής, δηλαδή ο όνυχας υφίσταται στο Θ ολίσθηση συνεχώς προς τα κάτω. Στο σχήμα 3.13 φαίνεται η αιτιολόγηση αυτού. Κάθετα στο Θ δρα η Q_Θ και οριζόντια η δύναμη καθοδήγησης Y .



Σχήμα 3.13: Εγκάρσια ολίσθηση ενός προσπίπτοντος τροχού [7]

3.5.3 Επαφή ενός σημείου

Μετά από ορισμένη φθορά του όνυχας και της σιδηροτροχιάς, υφίσταται επαφή ενός σημείου (Σχήματα 3.10 τροχός 1 και 3.15). Το σημείο A μετατοπίζεται προς τα κοίλα του όνυχας. Ως εκ τούτου η μεταδιδόμενη κάθετη δύναμη N_1 στο σημείο αυτό, εφαρμόζει πλάγιως. Η αντίσταση ολίσθησης είναι $\mu_{ov}N_1$ και έχει κατεύθυνση πλάγια προς τα πάνω. Η συνισταμένη από την κάθετη δύναμη N_1 και την αντίσταση ολίσθησης $\mu_{ov}N_1$, παρουσιάζει μια πιο απότομη κλίση απ' ό,τι η N_1 και σχηματίζει με αυτή γωνία τριβής ρ_1 . Η ανάλυση αυτής σε δύο συνιστώσες, μια κατακόρυφη και μια οριζόντια, δίνει δύο σημαντικές δυνάμεις. Το φορτίο του τροχού Q και τη δύναμη καθοδήγησης Y .

Η δύναμη καθοδήγησης Y_1 στον προσπίπτοντα τροχό δρα πάντα προς το εσωτερικό της γραμμής. Μειώνεται από τη δράση της οριζόντιας συνιστώσας της αντίστασης ολίσθησης. Αν η γωνία μεταξύ Q_1 και N_1 είναι γ_1 (η γωνία γ_1 είναι η γωνία παρειάς του όνυχας ως προς την οριζόντιο) τότε ισχύει:

$$\varepsilon\phi(\gamma_1 - \rho_1) = \frac{Y_1}{Q_1}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατευθυντήρια δύναμη P προκύπτει από την ισορροπία των δυνάμεων σε όλο το όχημα (η κατευθυντήρια δύναμη P προκύπτει από την ανάγκη εξισορρόπησης των συνισταμένων S των δυνάμεων τριβής μQ . Έχει αντίθετη κατεύθυνση και ίδιο μέτρο με αυτές ενώ ασκείται στο σημείο όπου υπάρχει επαφή του τροχού με τη σιδηροτροχιά), ενώ η δύναμη καθοδήγησης Y είναι αυτή η οποία καταπονεί την επιδομή και δημιουργεί φθορές στον τροχό και στη σιδηροτροχιά. Το μέγεθος της δύναμης καθοδήγησης προκύπτει αν από την κατευθυντήρια δύναμη αφαιρεθεί η αντίσταση ολίσθησης μQ . Επομένως:

$$Y = P - \mu Q \quad \text{και ακριβέστερα} \quad Y = P - \mu Q \sin \gamma$$

Στον τροχό 2 (ο όνυχας ευρίσκεται σε απόσταση από τη σιδηροτροχιά), η διάταξη των δυνάμεων είναι κάπως διαφορετική. Ο τροχός εφάπτεται επί της σιδηροτροχιάς περισσότερο με την εξωτερική πλευρά της επιφάνειας του επισώτρου όπου η κλίση αυτού ως προς την οριζόντιο είναι πολύ μικρή. Ως εκ τούτου η κάθετη δύναμη N_2 που δρα από τη σιδηροτροχιά στον τροχό έχει μικρή κλίση ως προς την κατακόρυφο.

Από το σχήμα 3.10 φαίνεται ότι ο μη προσπίπτον τροχός έχει πάντα την τάση να κινείται πλάγια προς το εσωτερικό της γραμμής. Η καθοδήγηση του προσπίπτοντος τροχού μέσω του όνυχά του επιδρά έτσι ώστε ο μη προσπίπτον τροχός να απωθείται προς το εξωτερικό της γραμμής. Στην

ολίσθηση αυτή αντιστασεται μια αντίσταση ολίσθησης, η $\mu_y N_2$, όπου μ_y είναι η τριβή στην επιφάνεια κύλισης του επισώτρου κατά την εγκάρσια ολίσθηση. Επομένως η αντίσταση ολίσθησης έχει κατεύθυνση προς το εσωτερικό της γραμμής.

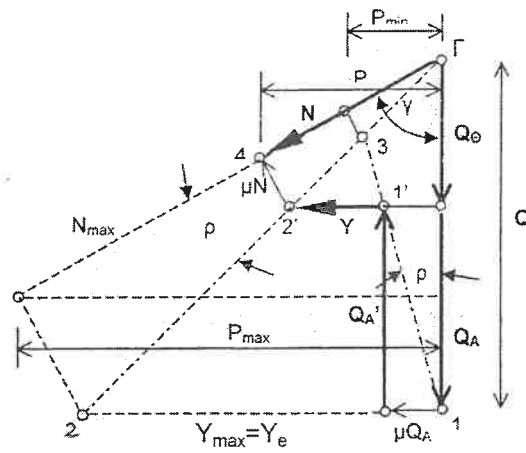
Η συνισταμένη από την κάθετη δύναμη και την αντίσταση ολίσθησης στον αποκλίνοντα τροχό 2, αναλύεται επίσης στις συνιστώσες Q_2 και Y_2 .

Ανάλογα για τον αποκλίνοντα τροχό 2 ισχύει:

$$\varepsilon\phi(\gamma_2 + \rho_2) = \frac{Y_2}{Q_2}$$

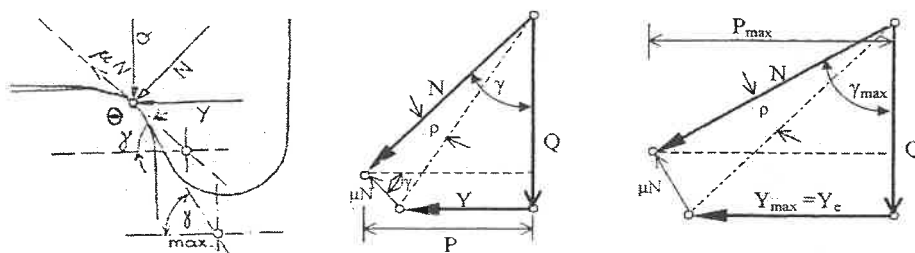
Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι λόγω της κωνικής διατομής των τροχών, η κατευθυντήρια δύναμη δε δρα μόνο στον προσπίπτοντα τροχό, αλλά και στον αποκλίνοντα, έστω και μικρή.

Γραφικά το μέγεθος των δυνάμεων αυτών προκύπτει από το σχήμα 3.14, καταρχήν για επαφή δύο σημείων, ως εξής: Από το σημείο Γ φέρεται κατακόρυφα προς τα κάτω η συνολική Q , μετά η γωνία παρειάς του όνυχα γ και ακολούθως η γωνία τριβής ρ . Η ήδη με κάποια μέθοδο (υπολογιστική ή γραφική) υπολογισθείσα κατευθυντήρια δύναμη P φέρεται οριζόντια από το Γ τέμνοντας το πλάγιο σκέλος της γ (σημείο 4). Το άνυσμα Γ-4 αποτελεί την κάθετη δύναμη N και η κάθετος στο 4 την αντίσταση ολίσθησης μN τέμνοντας το δεξί σκέλος της ρ στο 2'. Στη συνέχεια και στο κάτω άκρο της Q αριστερά σχηματίζεται η γωνία τριβής ρ . Η οριζόντιος από το 2' μέχρι την τομή της με το πλάγιο σκέλος της ρ (σημείο 1'), δίνει τη δύναμη καθοδήγησης Y (άνυσμα 2'-1'). Η συνέχεια της οριζοντίου διαιρεί την Q στην Q_Θ και στην Q_A , ενώ η κάθετος από το 1' δίνει την αντίδραση Q'_A στο Α. Το τρίγωνο των δυνάμεων κλίνει με το άνυσμα μQ_A .



Σχήμα 3.14: Πολύγωνο δυνάμεων για επαφή δύο σημείων [7]

Απλούστερα προκύπτει το τρίγωνο των δυνάμεων για την επαφή ενός σημείου (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Τρίγωνο δυνάμεων για επαφή ενός σημείου [7]

Ως εκ τούτου ολοκληρώνεται το πολύγωνο των δυνάμεων που δρουν επί του άξονα. Και οι δύο δυνάμεις καθοδήγησης Y_1 και Y_2 , έχουν διεύθυνση προς το εσωτερικό της γραμμής.

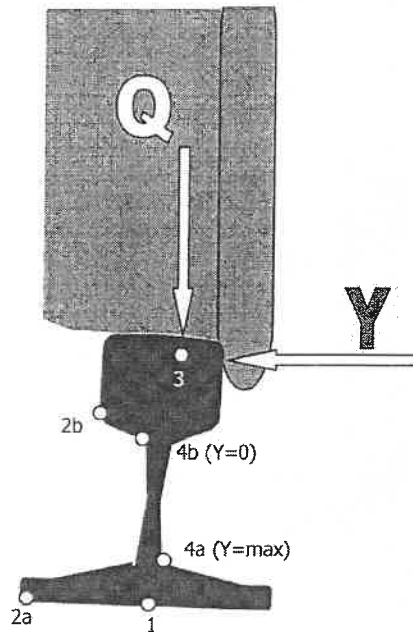
Λόγω του νόμου δράσης – αντίδρασης, οι δυνάμεις Y_1 και Y_2 επί των τροχών προς το εσωτερικό της γραμμής, δρουν επί των σιδηροτροχιών στην αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι οι δύο σιδηροτροχιές ωθούνται προς τα έξω. Επομένως η επιδομή δοκιμάζεται ως προς την ικανότητά της να διατηρήσει σταθερή την απόσταση μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών.

Η κατευθυντήρια δύναμη Y_1 στον προσπίπτοντα τροχό, είναι γενικά μεγαλύτερη απ' ότι στον αποκλίνοντα. Η συνισταμένη των δύο δυνάμεων καθοδήγησης (ΣY), προσπαθεί να μετατοπίσει εγκάρσια την εσχάρα (σιδηροτροχιές και στρωτήρες). Λαμβάνοντας υπόψη την αντίστασή της έναντι της μετατόπισης αυτής, εισάγεται για το ΣY η οριακή τιμή του Prud' homme. Η οριακή τιμή εξαρτάται από τα φορτία Q_1 και Q_2 , επειδή μια μεγαλύτερη φόρτιση αυξάνει την αντίσταση της γραμμής. Σύμφωνα με μετρήσεις των Γαλλικών Σιδηροδρόμων, συντάχθηκε για την οριακή τιμή η εμπειρική εξίσωση

$$\Sigma Y = 0,85 * \left[10kN + \left(\frac{(Q_1 + Q_2)}{3} \right) \right]$$

3.6 Θέσεις μέγιστης καταπόνησης της σιδηροτροχιάς κατά την επαφή με τον τροχό

Στην παρακάτω απεικόνιση (Σχήμα 3.16) φαίνονται οι θέσεις μεγάλης καταπόνησης της σιδηροτροχιάς.[2]



Σχήμα 3.16: Θέσεις καταπόνησης της σιδηροτροχιάς [2]

Σημείο 1: Στο μέσο του πέλματος της σιδηροτροχιάς εμφανίζονται:

- Εφελκυστικές καμπτικές τάσεις κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, συνέπεια της δύναμης τροχού Q
- τάσεις από τη θερμοκρασία
- ίδιες τάσεις

Σημεία 2a + 2b: Στην κεφαλή και στην άκρη του πέλματος της σιδηροτροχιάς εμφανίζονται:

- εφελκυστικές καμπτικές τάσεις, συνέπεια της δύναμης τροχού Q και της δύναμης καθοδήγησης Y
- τάσεις από τη θερμοκρασία
- τάσεις καμπύλωσης στα καμπύλα τμήματα

Σημείο 3: Πλησίον της θέσης επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς (σημείο τομής των Q και Υ) εμφανίζονται:

- διατμητικές τάσεις, συνέπεια συγκεντρωτικής δράσης δυνάμεων
- τάσεις από θερμοκρασία
- ίδιες τάσεις

Σημεία 4a + 4b: Στις θέσεις μετάβασης από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς στον κορμό και στο πέλμα εμφανίζονται:

- καμπτικές τάσεις στον κορμό εγκάρσια στη σιδηροτροχιά, συνέπεια των έκκεντρων φορτίων Q και Υ.

Κεφάλαιο 4

Συνθήκες αυξημένου κινδύνου εκτροχιασμού

4.1 Γενικά στοιχεία - ορισμός

Με τον όρο «**εκτροχιασμός σιδηροδρομικού οχήματος**» εννοούμε την οριστική απώλεια επαφής της επιφάνειας κύλισης ενός τουλάχιστον τροχού του οχήματος με την επιφάνεια κύλισης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και με επακόλουθο την απομάκρυνση του τροχού από τη σιδηροτροχιά. [7], [16]

Για την καθημερινή πράξη της λειτουργίας του σιδηρόδρομου, η εκτροχίαση χαρακτηρίζεται ως ατύχημα. Είναι σημαντικό θέμα καθώς οι επιπτώσεις σχετίζονται και με την ασφάλεια των επιβατών και μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρές.

Ο εκτροχιασμός μπορεί αν οφείλεται σε ποικίλα αίτια (ενδογενή ή εξωγενή) (Πίνακας 4.1), τα πιο συνηθισμένα από τα οποία είναι:[7]

- Ελαττώματα του οχήματος και ειδικότερα των τροχών του οχήματος ή και των αξόνων. Ελαττώματα του υλικού μειώνουν τους συντελεστές ασφάλειας και με την κόπωση του υλικού (δηλαδή τη μείωση της αντοχής του λόγω της συνεχής καταπόνησης) υπερβαίνεται το όρια θραύσης. Ελαττώματα της γεωμετρίας των τροχών αυξάνουν τις καταπονήσεις
- Κακή φόρτωση του οχήματος με συνέπεια την αύξηση του ύψους του κέντρου μάζας
- Υπέρβαση ορίων ταχύτητας σε καμπύλες
- Υποχώρηση μιας σιδηροτροχιάς (ή και των δύο) λόγω ασθενούς υποδομής ή άλλων συναφών αιτιών
- Παραμόρφωση της σιδηροτροχιάς (συνήθως ανύψωση) λόγω ανεπάρκειας αρμών διαστολής ή ανεπάρκεια εγκιβωτισμού (περίπτωση ΣΣΣ) της εσχάρας (σιδηροτροχιές και στρωτήρες)
- Υπερβολικές φθορές της κεφαλής της σιδηροτροχιάς
- Συνδυασμοί γεωμετρίας διατομής του επισώτρου του τροχού, γεωμετρίας διατομής της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και συντελεστών τριβής.

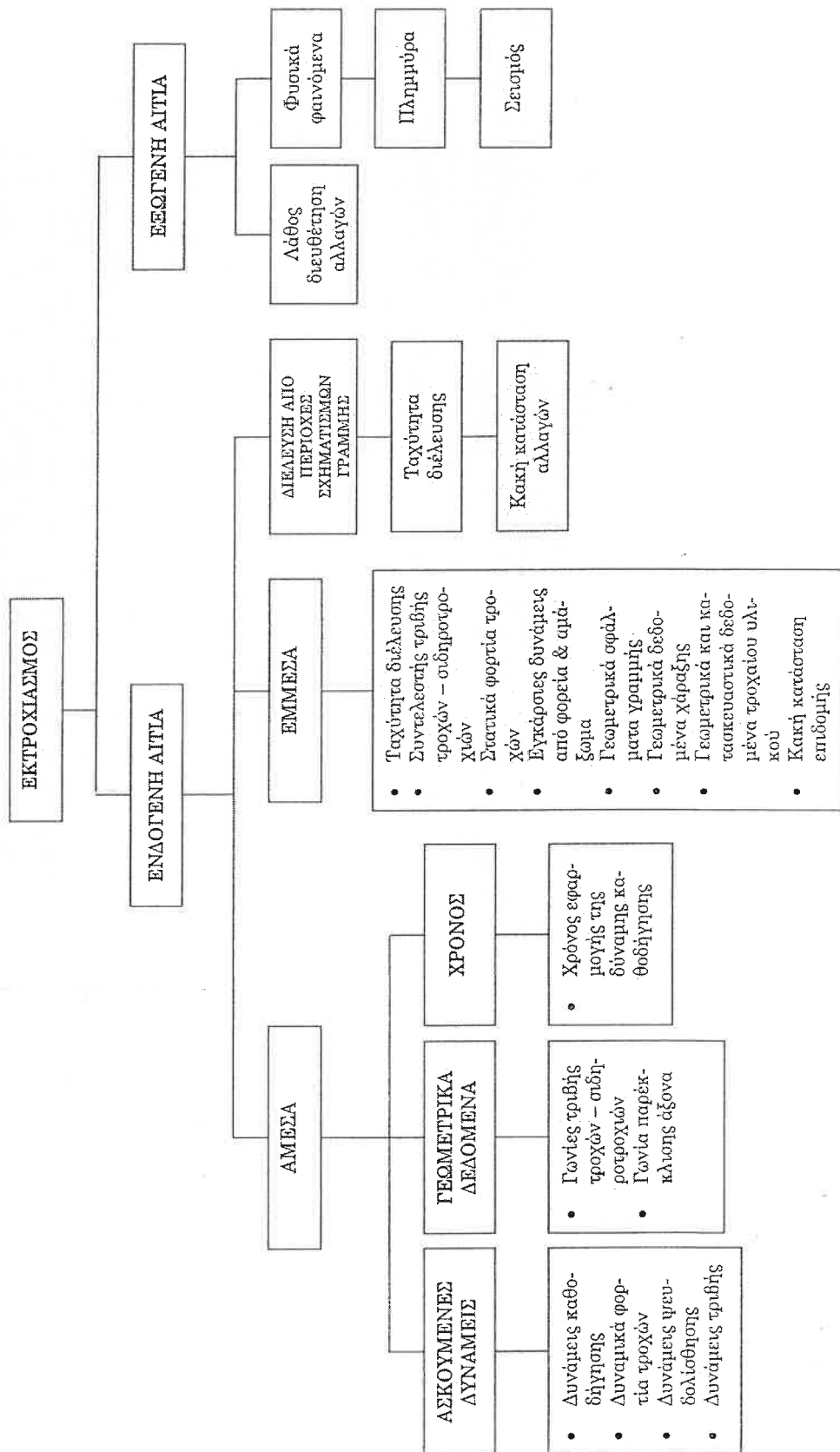
4.2 Τρόποι εκτροχιασμού σιδηροδρομικού οχήματος

Ο εκτροχιασμός ενός σιδηροδρομικού οχήματος μπορεί να επέλθει λόγω: [16]

- Εγκάρσιας μετατόπισης της γραμμής
- Ανατροπής του οχήματος
- Αναρρίχησης των τροχών επί της σιδηροτροχιάς και υπερπήδησης της σιδηροτροχιάς.

Και στις τρεις περιπτώσεις οι συνέπειες μπορεί να είναι οδυνηρές τόσο για τους επιβάτες όσο και για το τροχαίο υλικό.

Παρακάτω γίνεται ξεχωριστή ανάλυση για καθένα από τους λόγους που αναφέρθηκαν. [16]



Πίνακας 4.1: Αίτια εκτροχιασμού [1]

4.2.1 Εκτροχιασμός με μετατόπιση της γραμμής.

Στην περίπτωση αυτή τμήμα της επιδομής της γραμμής (σιδηροτροχιές και στρωτήρες) υπό την επίδραση σημαντικών εγκάρσιων δυνάμεων μετατοπίζεται με αποτέλεσμα τον εκτροχιασμό ενός ή περισσότερων οχημάτων του συρμού. Εκτροχιασμό με μετατόπιση της γραμμής έχουμε όταν:

$$F > \nu H_R \quad (4.1)$$

όπου F : συνολική εγκάρσια δύναμη που μεταβιβάζεται από τον όνυχα του τροχού στη σιδηροτροχιά

H_R : εγκάρσια αντίσταση γραμμής

ν : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνεται συνήθως ίσος με 0,85

Η μορφή αυτή εκτροχιασμού οφείλεται αποκλειστικά σε ενδογενή αίτια και αποτελεί τη πιο συνήθη περίπτωση εκτροχιασμού.

4.2.2 Εκτροχιασμός λόγω ανατροπής του οχήματος

Κατά την κίνηση ή τη στάθμευση ενός σιδηροδρομικού οχήματος στα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας μπορεί να συμβεί, υπό ορισμένες συνθήκες, ανατροπή του οχήματος.

Η ανατροπή μπορεί να γίνει προς το εξωτερικό ή το εσωτερικό της καμπύλης. Για την πρώτη περίπτωση (Σχήμα 4.1α) πρέπει να συντρέχουν οι εξής λόγοι:

- Μεγάλη ανεπάρκεια υπερύψωσης I σε σχέση με την ταχύτητα κυκλοφορίας και την ακτίνα καμπυλότητας R_c της στροφής
- Πλευρική δύναμη ανέμου H_w με φορά προς το εξωτερικό της καμπύλης

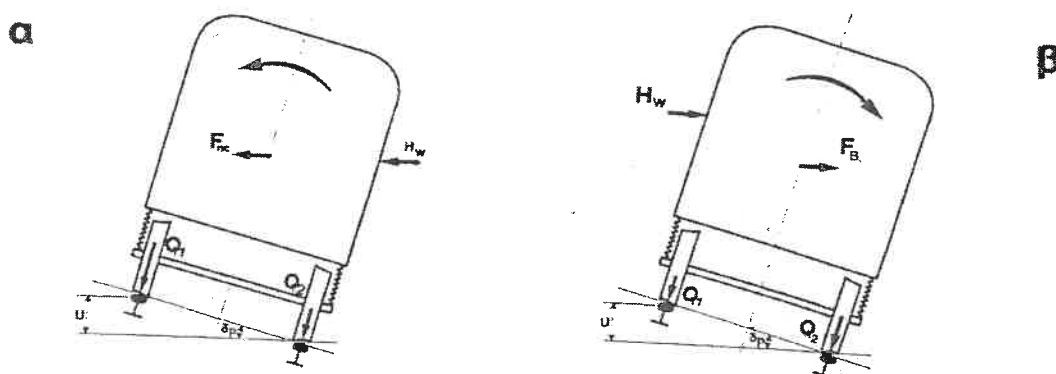
- Άνιση κατανομή του φορτίου στους δύο τροχούς, με λιγότερη φόρτιση στον εσωτερικό τροχό ($Q_1 > Q_2$)

Όλοι οι παραπάνω λόγοι έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπών που τείνουν να ανατρέψουν το όχημα ως προς την εξωτερική σιδηροτροχιά.

Για τη δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 4.1β) πρέπει αντίστοιχα να συντρέχουν οι εξής λόγοι:

- Πλευρική δύναμη ανέμου H_w με φορά προς το εσωτερικό της καμπύλης
- Στάθμευση των φορτίων ($V=0$) σε καμπύλη γραμμή με μεγάλη κανονική υπερύψωση ($F_\phi = 0, F_B = \max$)
- Μικρό φορτίο κατ' άξονα
- Μετατόπιση του φορτίου προς τους εσωτερικούς τροχούς.

Υπό τις συνθήκες αυτές δημιουργούνται ροπές που τείνουν να ανατρέψουν το όχημα ως προς την εσωτερική σιδηροτροχιά.



Σχήμα 4.1: Μηχανισμός ανατροπής οχήματος σε καμπύλες α)Προς το εξωτερικό της καμπύλης β) Προς το εσωτερικό της καμπύλης [16]

4.2.3 Εκτροχιασμός με αναρρίχηση των τροχών

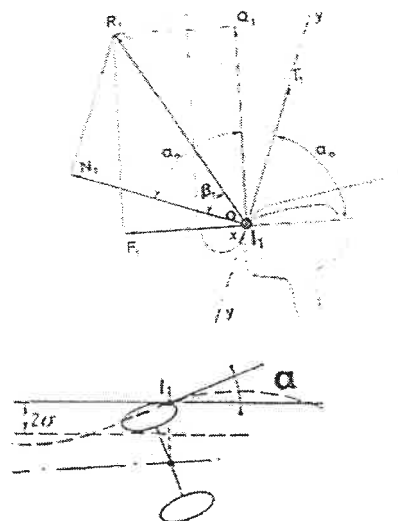
4.2.3.1 Περιγραφή του φαινομένου

Θεωρούμε την περίπτωση κύλισης του σχήματος 4.2. Στον υπό εκτροχίαση τροχό (τροχός 1) ασκείται στο σημείο επαφής I_1 το κατακόρυφο φορτίο Q_1 και η δύναμη F_1 (συνολική δύναμη που ασκείται μέσω του όνυχας του τροχού στη σιδηροτροχιά). Η αντίδραση R_1 της σιδηροτροχιάς αναλύεται σε δύο συνιστώσες:[16]

- Σε μία δύναμη N_1 κάθετη στο επίπεδο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς
- Στην εγκάρσια δύναμη ψευδο-ολίσθησης T_1 η οποία δρα πάνω στο επίπεδο επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς, διευθύνεται προς τα άνω και έχει μέτρο ίσο με

$$T_1 = C_{22}a = N_1 \varepsilon \phi \beta_1 \quad (4.2)$$

όπου α : γωνία παρέκκλισης του άξονα (Σχήμα 4.2)



Σχήμα 4.2: Εκτροχιασμός με αναρρίχηση των τροχών [16]

Στην περίπτωση που ο τροχός 1 ολισθαίνει, η δύναμη T_1 ισούται με τη δύναμη τριβής του Coulomb.

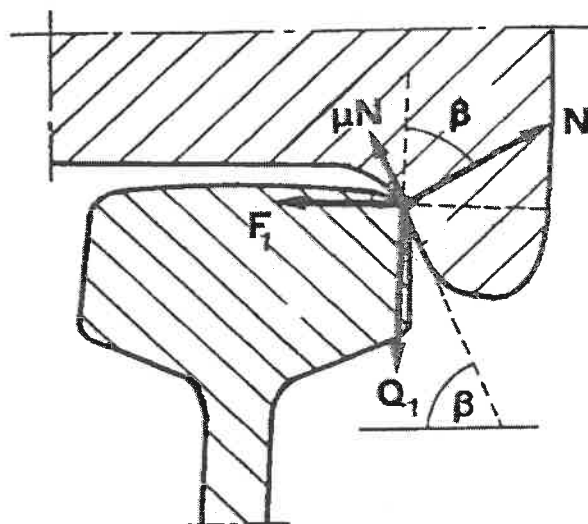
Στην πράξη εκτροχιασμός συμβαίνει όταν η προβολή της συνισταμένης όλων των δυνάμεων, πάνω στον άξονα yy (άξονας δύναμης εκτροχίασης) έχει φορά προς τα άνω και ο χρόνος επενεργείας της αρκεί για να υπερπηδηθεί η σιδηροτροχιά.

4.2.3.2 Κριτήρια εκτροχιασμού

Για τον έλεγχο σε εκτροχιασμό χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια.

Σχέση του Nadal

Το κριτήριο αυτό δε λαμβάνει υπόψη την παρουσία του φαινομένου ψευδο-ολίσθησης και της γωνίας παρέκκλισης (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3: Κριτήριο εκτροχιασμού Nadal [16]

Η συνθήκη αποφυγής του εκτροχιασμού δίνεται από τη σχέση:

$$F_1 < Q_1 \frac{\varepsilon\phi\beta - \mu}{1 + \mu\varepsilon\phi\beta} \quad (4.3)$$

όπου F_1 : συνολική εγκάρσια δύναμη ασκούμενη μέσω του όνυχα του υπό εκτροχίαση τροχού στη σιδηροτροχιά (έστω τροχός 1)

μ : συντελεστής τριβής τροχού – σιδηροτροχιάς

β : γωνία επαφής τροχού - σιδηροτροχιάς

Q_1 : στατικό φορτίο τροχού 1

Από μετρήσεις που έγιναν προέκυψε ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\frac{F_1}{Q_1} < K \quad (4.4)$$

όπου $K = 1,2$ για οχήματα χωρίς φορεία

$K = 1,3$ για οχήματα με φορεία

Κριτήριο του Chartet

Ο Μ. Chartet το 1950 διατύπωσε τη θεωρία για το φαινόμενο του εκτροχιασμού και πρότεινε την παρακάτω σχέση:

$$\frac{F_D}{Q_{d1}} < 2 - \frac{0.7}{\lambda_0} \quad (4.5)$$

$$\text{όπου } \lambda_0 = \frac{2Q_{d1}}{Q_{d1} + Q_{d2}}$$

F_D : οριακή δύναμη εκτροχιασμού (εκτροχιασμό έχουμε όταν η συνολική δύναμη F_1 που μεταβιβάζεται από τον όνυχα στις σιδηροτροχιές υπερβεί την τιμή της F_D)

$Q_{d1} + Q_{d2}$: δυναμικά κατακόρυφα φορτία των τροχών 1 και 2 (εκτροχιαζόμενος τροχός ο 1)

Η σχέση (4.5) ισχύει για μια γωνία παρέκκλισης $\alpha > 1^\circ$ και δίνει αποτελέσματα αξιόπιστα μόνο για την περίπτωση που ο εκτροχιαζόμενος τροχός είναι πιο φορτωμένος από το μη εκτροχιαζόμενο.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (4.5) την τιμή του λ_0 με $\frac{2Q_{d1}}{Q_{d1} + Q_{d2}}$

προκύπτει η απλοποιημένη σχέση:

$$F_D < 1,65Q_{d1} - 0,35Q_{d2} \quad (4.6)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (4.6)

$$Q_{d1} \text{ με } Q_1 + \frac{r_0}{2e_0} F_D \text{ και}$$

$$Q_{d2} \text{ με } Q_2 - \frac{r_0}{2e_0} F_D \text{ προκύπτει τελικά:}$$

$$F_D < \frac{1,65Q_1 - 0,35Q_2}{1 - \frac{r_0}{e_0}} \quad (4.7)$$

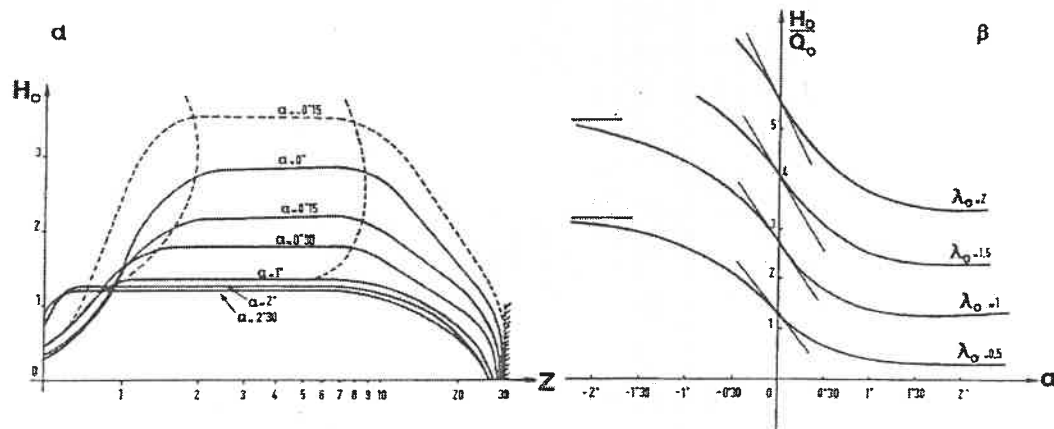
όπου Q_1, Q_2 : στατικά φορτία για τους τροχούς 1 και 2 αντίστοιχα

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.4α δίνεται για διαφορετικές γωνίες παρέκκλισης α , η μεταβολή της ανύψωσης z του όνυχα του εκτροχιαζόμενου τροχού επί της σιδηροτροχιάς συναρτήσει της οριακής δύναμης εκτροχιασμού F_D .

Αύξηση της γωνίας παρέκκλισης προκαλεί εκτροχιασμό για μικρότερες εγκάρσιες δυνάμεις. Για την τιμή $\alpha = 2^\circ$ η δύναμη F_D παραμένει σταθερή.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.4β δίνεται για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου λ_0 , η μεταβολή του πηλίκου F_D / Q_D συναρτήσει της γωνίας παρέκκλισης α .

Η μείωση της παραμέτρου λ_0 , δηλαδή η αύξηση του βάρους του μη εκτροχιαζόμενου τροχού σε σχέση με τον εκτροχιαζόμενο, προκαλεί εκτροχιασμό του οχήματος για μικρότερες εγκάρσιες δυνάμεις.



Σχήμα 4.4: Καμπύλες Chartet [16]

Κριτήριο εκτροχιασμού για γωνίες παρέκκλισης $\alpha > 5 \text{ mrad}$

$$F_D = \frac{KQ_1 - Q_2 \varepsilon \phi(\gamma_2 + \beta_2)}{1 - \frac{r_0}{2e_0} [K + \varepsilon \phi(\gamma_2 + \beta_2)]} \quad (4.8)$$

όπου F_D : οριακή δύναμη εκτροχιασμού

$K = \frac{F_1}{Q_1}$: συντελεστής εκτροχιασμού

β_2 : γωνία τριβής τροχού –σιδηροτροχιάς για τον τροχό 2

γ_2 : γωνία που σχηματίζει το επίπεδο κύλισης του τροχού 2 με το οριζόντιο επίπεδο ($\gamma_2 = 0,02$)

Δοκιμές που έγιναν στη Γερμανία, Αγγλία και Γαλλία, για γωνίες παρέκκλισης $\alpha \geq 5 \text{ mrad}$ και για την περίπτωση στεγνών σιδηροτροχιών κατέληξαν στις παρακάτω τιμές του K .

$K=1,2$ (Γερμανικές δοκιμές – βαγόνια με 2 άξονες)

$K=1,8$ (Γαλλικές δοκιμές – βαγόνια με φορεία)

$K=2$ (Αγγλικές δοκιμές)

Για τον υπολογισμό της $\varepsilon\phi(\gamma_2 + \beta_2)$ χρησιμοποιείται η πειραματική σχέση:

$$\varepsilon\phi(\gamma_2 + \beta_2) = \frac{135}{150 + R_c} \quad (4.9)$$

όπου R_c : ακτίνα καμπυλότητας σε m.

Η τιμή της $\varepsilon\phi(\gamma_2 + \beta_2)$ ποικίλει ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

4.3 Λοιπά κριτήρια για τον έλεγχο σε εκτροχιασμό (3)

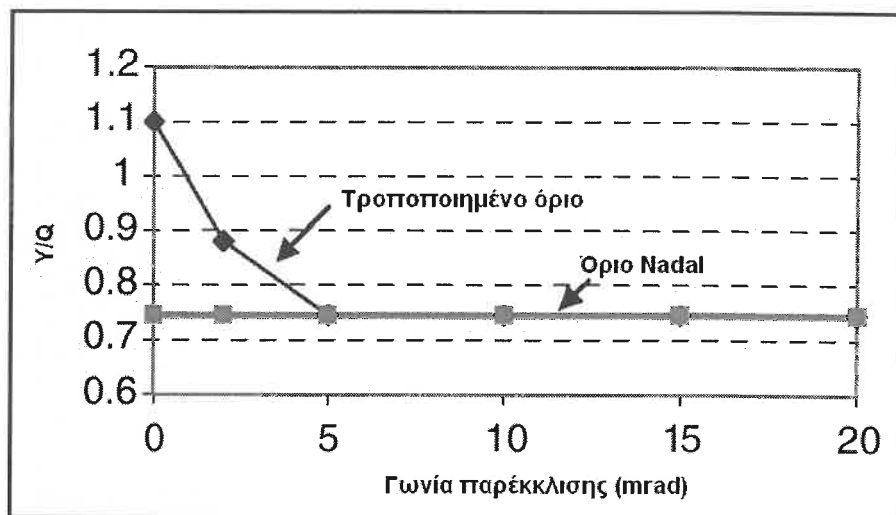
Όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως, όταν η γωνία παρέκκλισης είναι άγνωστη τότε γίνεται χρήση του κριτηρίου του Nadal. Σε περίπτωση μικρής γωνίας παρέκκλισης, μικρότερη από 5mrad, γίνεται χρήση του παρακάτω τύπου:

$$\frac{Y}{Q} < q_0 + \frac{0,43}{AOA + 1,2} \quad (4.10)$$

όπου q_0 ο λόγος του Nadal όπως παρουσιάστηκε και πριν: $q_0 = \frac{\varepsilon\phi\beta - \mu}{1 + \mu\varepsilon\phi\beta}$ και

AOA η γωνία παρέκκλισης.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εξίσωση 4.10 σε σχέση με τα αποτελέσματα του κριτηρίου του Nadal.



Σχήμα 4.5 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μέτρου καθοδήγησης (Y/Q) που προκύπτουν από το όριο του Nadal και από το τροποποιημένο όριο (σχέση 4.10) (3)

4.3.1 Κριτήριο για την απόσταση εκτροχιασμού

Στην πράξη ο εκτροχιασμός λόγω αναρρίχησης του τροχού δε συμβαίνει στιγμιαία. Ο μέγιστος λόγος του Y/Q πρέπει να διατηρείται και ενώ η αναρρίχηση λαμβάνει χώρα. Εάν για παράδειγμα η οριζόντια δύναμη γίνει μηδενική χωρίς ο τροχός να έχει προλάβει να φτάσει στην κορυφή της σιδηροτροχιάς, ο τροχός μπορεί να αρχίσει να κινείται ξανά προς τα κάτω. Όταν ο όνυχας έρχεται σε επαφή με τη σιδηροτροχιά για μικρή διάρκεια, όπως μπορεί να συμβεί στην περίπτωση της οφιοειδούς κίνησης, το μέτρο καθοδήγησης του τροχού (Y/Q) μπορεί να υπερβεί το όριο του Nadal χωρίς ο όνυχας του τροχού να αναρριχηθεί επί του τροχού. Για το λόγο αυτό το κριτήριο για την απόσταση εκτροχιασμού σε συνδυασμό με το κριτήριο για την οριακή τιμή του μέτρου καθοδήγησης, συμβάλουν στην εκτίμηση πιθανότητας εκτροχιασμού του σιδηροδρομικού οχήματος. Τελικά λοιπόν, εκτροχιασμός λόγω αναρρίχησης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς θα συμβεί αν ξεπεραστούν τα όρια και για τα δύο προαναφερθέντα κριτήρια.

4.3.1.1 Γενικός τύπος για το κριτήριο της απόστασης εκτροχιασμού

Αυτό το γενικό κριτήριο (σχέση 4.11) για την απόσταση εκτροχιασμού έχει ως παραμέτρους τη γωνία παρέκκλισης, τη γωνία του όνυχα και το μήκος του όνυχα.

$$D < \frac{A * B * Len}{AOA + B * Len} \quad (4.11)$$

όπου D: η απόσταση εκτροχιασμού (σε πόδια)
και AOA: η γωνία παρέκκλισης (σε mrad)

Οι συντελεστές A και B είναι συναρτήσεις της μέγιστης γωνίας του όνυχα (Ang σε degrees) και το μήκος του όνυχα Len όπως ορίζεται στην παράγραφο 4.3.3.

$$A = \left(\frac{100}{-1,9128 Ang + 146,56} + 3,1 \right) * Len - \frac{1}{-0,0092 (Ang)^2 + 1,2152 Ang - 39,031} + 1,23$$

$$B = \left(\frac{10}{-21,157 Len + 2,1052} + 0,05 \right) * Ang + \frac{10}{0,2688 Len - 0,0266} - 5$$

Στη συνέχεια στον πίνακα 4.2 παρατίθενται οι τιμές της απόστασης εκτροχιασμού για διάφορες τιμές γωνιών του όνυχα καθώς και για διάφορα μήκη ονύχων και για δύο διαφορετικές τιμές των γωνιών παρέκκλισης. Από τον πίνακα φαίνεται ότι για γωνία παρέκκλισης 5mrad, η απόσταση εκτροχιασμού αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία του όνυχα του τροχού και το μήκος του όνυχα. Για γωνία παρέκκλισης 10mrad το μήκος όνυχα έχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόσταση εκτροχιασμού σε σχέση με τη γωνία του όνυχα.

	AOA = 5 mrad				AOA = 10 mrad			
Γωνία όνυχα (deg)	63 deg	68 deg	72 deg	75 deg	63 deg	68 deg	72 deg	75 deg
Μήκος όνυχα (inch)								
0.4 inch	2.0	2.2	2.4	3.3	1.5	1.5	1.5	1.9
0.52 inch	2.4	2.6	2.9	3.8	1.8	1.8	1.8	2.1
0.75 inch	3.2	3.5	3.7	4.3	2.3	2.3	2.2	2.4

Πίνακας 4.2 : Οριακές τιμές της απόστασης εκτροχιασμού (3)

Συνοψίζοντας, δεδομένου ότι η αναρρίχηση του τροχού συνήθως λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες τιμές της γωνίας παρέκκλισης, η αύξηση της γωνίας του όνυχα μπορεί να αυξήσει το μέτρο καθοδήγησης του τροχού (Y/Q) που αν ξεπεραστεί μπορεί να επέλθει εκτροχιασμός ενώ η αύξηση του μήκους του όνυχα αυξάνει την απόσταση εκτροχιασμού.

4.3.2 Προσδιορισμός της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης (AOA_e)

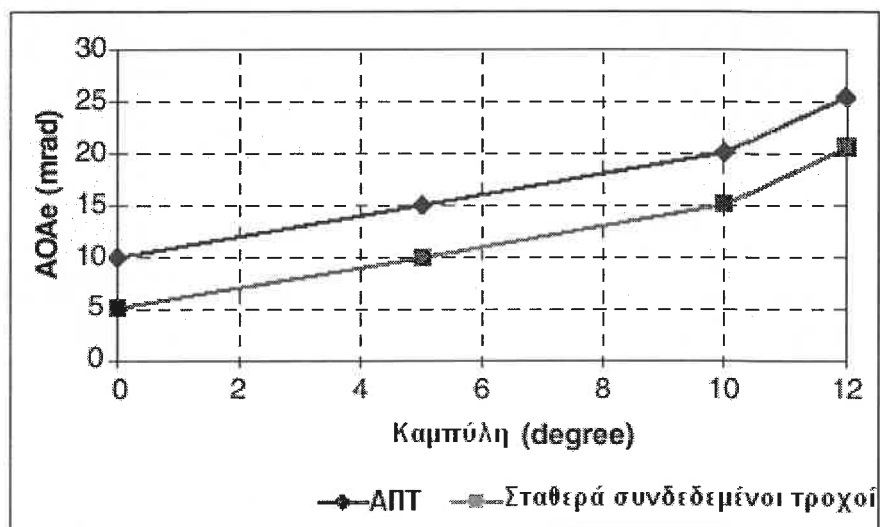
Το κριτήριο για την αναρρίχηση του τροχού, που συμπεριλαμβάνει τα όρια για το μέτρο καθοδήγησης του τροχού καθώς και για την απόσταση εκτροχιασμού είναι συνδεδεμένο με τη γωνία παρέκκλισης του άξονα των τροχών. Επειδή η γωνία παρέκκλισης ίσως να μη μπορεί να υπολογιστεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης ώστε να είναι δυνατή η χρήση των κριτηρίων για την αναρρίχηση των τροχών.

Στον πίνακα 4.3 δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης για την ευθυγραμμία και την καμπύλη και για δύο διαφορετικούς τύπους οχημάτων (οχήματα με τροχούς που ο ένας περιστρέφεται ανεξάρτητα από τον άλλο -ΑΠΤ- και οχήματα άλλου τύπου).

Τύποι οχημάτων και γραμμών	Ευθυγραμμία	5-Degree Καμπύλη	10-Degree Καμπύλη
Οχήματα με ΑΠΤ	10	15	20
Οχήματα άλλου τύπου	5	10	15

Πίνακας 4.3: Τιμές της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης για την ευθυγραμμία και την καμπύλη (3)

Ενώ στο σχήμα 4.6 φαίνονται οι προτεινόμενες τιμές της ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης για διάφορες καμπύλες και για τις περιπτώσεις τροχών ανεξάρτητα περιστρεφόμενων και σταθερά συνδεδεμένων.



Σχήμα 4.6: Προτεινόμενες τιμές ισοδύναμης γωνίας παρέκκλισης για κίνηση σε καμπύλη (3)

4.3.3 Ορισμός της απόστασης εκτροχιασμού.

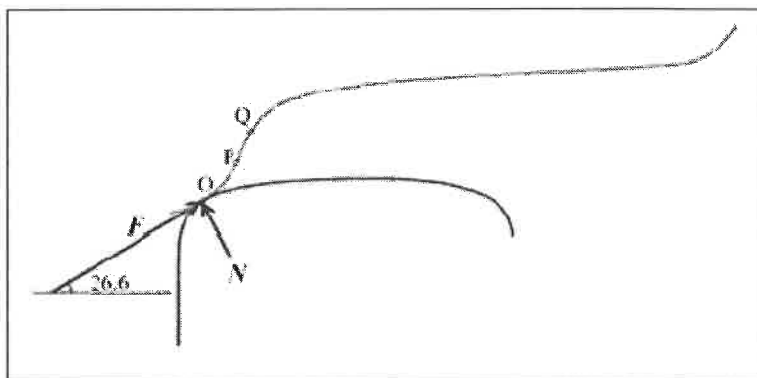
Ως **απόσταση εκτροχιασμού** ορίζεται η απόσταση που διανύει το σιδηροδρομικό όχημα από το σημείο που θα ξεπεραστεί το μέτρο

καθοδήγησης του τροχού (Υ/Q) έως το σημείο του εκτροχιασμού. Το σημείο του εκτροχιασμού καθορίζεται από τη γωνία των $26,6^\circ$ κατά την επαφή του όνυχα με τη σιδηροτροχιά και αφού έχει περάσει η μέγιστη γωνία επαφής. (Σχήμα 4.7)

Η γωνία επαφής των $26,6^\circ$ είναι η μικρότερη γωνία επαφής για συντελεστή τριβής 0,5. Στο σχήμα 4.7 φαίνεται η άκρη του όνυχα του τροχού σε επαφή με τη σιδηροτροχιά και με γωνία επαφής $26,6^\circ$. Μεταξύ της μέγιστης γωνίας επαφής (σημείο Q) και της γωνίας επαφής των $26,6^\circ$ (σημείο O) ο τροχός είναι σε θέση να αρχίσει καθοδική πορεία και να επανέλθει στην αρχική του θέση εξαιτίας του ιδίου κατακόρυφου βάρους του εάν οι εξωτερικές οριζόντιες δυνάμεις γίνουν μηδενικές. Στην περίπτωση αυτή η οριζόντια δύναμη F κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης στο σημείο επαφής από μόνη της δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει εκτροχιασμό του τροχού.

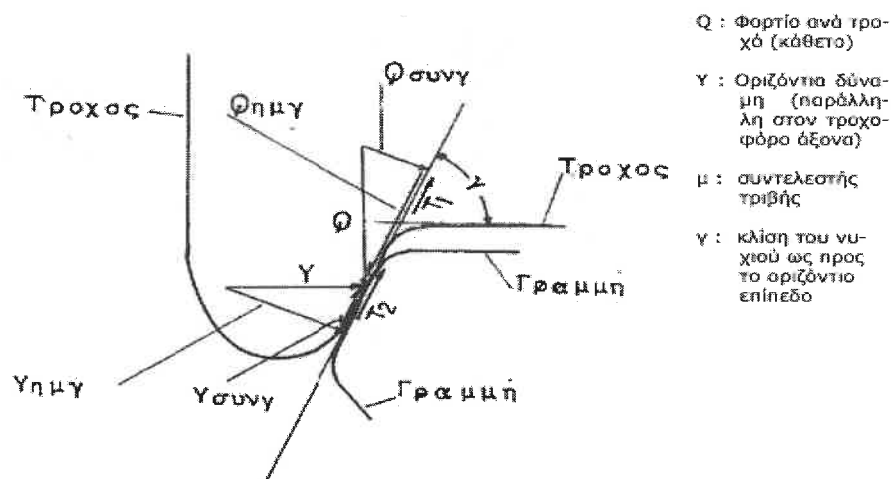
Όταν ο τροχός αναρριχηθεί πέρα από τη γωνία επαφής των $26,6^\circ$ (σημείο O) στην άκρη του όνυχα, δε μπορεί να επανέλθει στην αρχική του θέση εξαιτίας του ιδίου κατακόρυφου βάρους. Η δύναμη F που δημιουργείται λόγω της γωνίας παρέκκλισης είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αντισταθεί στην καθοδική πορεία του τροχού και τελικά οδηγεί τον όνυχα να αναρριχηθεί επί της σιδηροτροχιάς.

Το μήκος του όνυχα L_{en} προσδιορίζεται ως η επί του όνυχα μετρούμενη απόσταση QO (δηλαδή η απόσταση από τη max γωνία επαφής έως τη γωνία επαφής των $26,6^\circ$)



Σχήμα 4.7: Μήκος όνυχα QO (3)

4.4 Εξαγωγή του τύπου του Nadal για τον εκτροχιασμό, μέσω γεωμετρικών σχέσεων



Σχήμα 4.7: Δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς(4)

Θεωρούμε ότι ο ονύχας αναρριχώμενος ή επανερχόμενος εφάπτεται της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Από το σχήμα προκύπτει ότι ο εκτροχιασμός είναι αδύνατος όταν:

$$Q\eta\mu\gamma \geq Y\sigma\upsilon\nu\gamma + \mu Q\sigma\upsilon\nu\gamma + \mu Y\eta\mu\gamma \quad \Rightarrow$$

$$Q(\eta\mu\gamma - \mu\sigma\upsilon\nu\gamma) \geq Y(\sigma\upsilon\nu\gamma + \mu\eta\mu\gamma) \quad \Rightarrow$$

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{\eta\mu\gamma - \mu\sigma\upsilon\nu\gamma}{\sigma\upsilon\nu\gamma + \mu\eta\mu\gamma} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{\epsilon\phi\gamma - \mu}{1 + \mu\epsilon\phi\gamma}$$

Η σχέση Y/Q (μέτρο καθοδήγησης του τροχού) είναι ένας συντελεστής ασφαλείας. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος $\frac{\epsilon\phi\gamma - \mu}{1 + \mu\epsilon\phi\gamma}$ τόσο η πιθανότητα εκτροχιασμού είναι μικρότερη.

Ανάλυση δυνάμεων (4)

Συνιστώσες:

- Παράλληλες στο επίπεδο εφαρμογής: $Q_{\eta\mu\gamma}$ και $Y_{\sigma\upsilon\nu\gamma}$

Εξ αυτών η $Q_{\eta\mu\gamma}$ πιέζει τον τροχό προς την κεφαλή της σιδηροτροχιάς ενώ η $Y_{\sigma\upsilon\nu\gamma}$ ωθεί τον τροχό βοηθώντας τον να αναρριχηθεί.

- Κάθετες στο επίπεδο εφαρμογής: $Q_{\sigma\upsilon\nu\gamma}$ και $Y_{\eta\mu\gamma}$

Από αυτές τις δύο εμφανίζονται οι δυνάμεις τριβής $T_1 = \mu Q_{\sigma\upsilon\nu\gamma}$ και $T_2 = \mu Y_{\eta\mu\gamma}$ οι οποίες εξωθούν τον τροχό.

Διερευνώντας τη σχέση $\frac{Y}{Q} \leq \frac{\epsilon\phi\gamma - \mu}{1 + \mu\epsilon\phi\gamma}$ διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

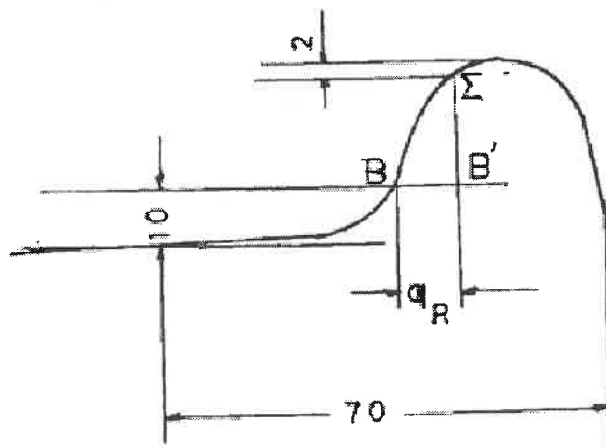
- Όσο ο συντελεστής τριβής μ ελαττώνεται τόσο αυξάνει ο συντελεστής ασφαλείας της κυκλοφορίας. Συνεπώς, τόσο οι λιπαντήρες ονύχων στις κινητήριες μονάδες, όσο και οι λιπαντήρες γραμμής στις καμπύλες, έχουν διπλό ρόλο. Αυξάνουν τη διάρκεια ζωής των υλικών από φθορά και βελτιώνουν την ασφάλεια από εκτροχιασμό.
- Όσο αυξάνει η γωνία γ τόσο αυξάνει και ο συντελεστής ασφαλείας Y/Q από εκτροχιασμό. Μάλιστα για $\mu = 0,25$ όταν η γωνία $\gamma = 90^\circ$ ο λόγος $Y/Q = 4$. Μεγάλη γωνία γ σημαίνει μικρό q_R (σχήμα 4.8). Για $q_R \leq 6,5$ mm ο τροχός τίθεται εκτός κυκλοφορίας. Αυτό προφανώς είναι σε αντίθεση με το συμπέρασμα που προκύπτει από τη διερεύνηση του λόγου Y/Q .

Οφείλεται δε αυτή η αντίφαση στο γεγονός ότι κατά την απόδειξη της σχέσης Y/Q λήφθηκε μόνο η ισορροπία δυνάμεων στη θέση επαφής και καθόλου η γεωμετρική μορφή όνυχια – κεφαλής της σιδηροτροχιάς.

Πράγματι όταν η γωνία γ του όνυχα αυξάνει, η δύναμη $Υ_{\sigma\upsilon\nu\gamma}$, που εξωθεί τον τροχό, ελαττώνεται. Απαιτείται λοιπόν μεγαλύτερη οριζόντια δύναμη για να αναρριχηθεί ο τροχός. Όσο η γωνία γ αυξάνεται το q_R ελαττώνεται.

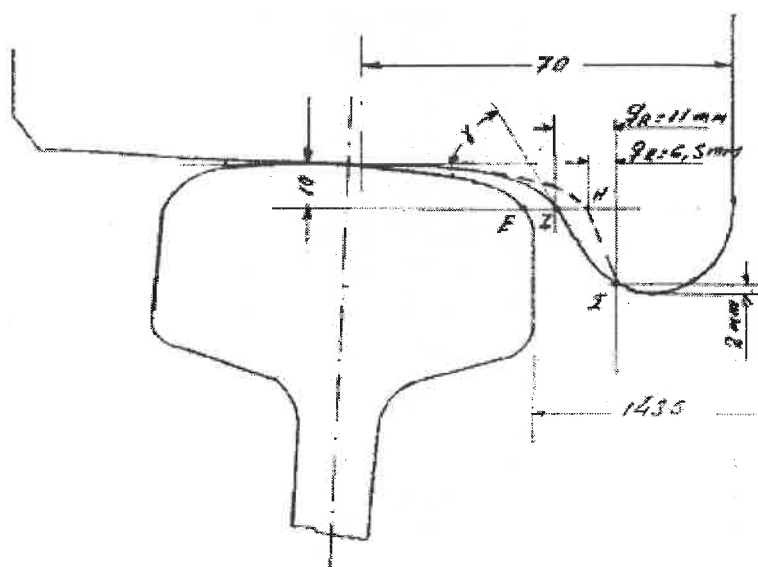
Το μικρό q_R δίνει τη δυνατότητα στον όνυχα να συναντήσει την κεφαλή υπό μεγαλύτερη γωνία, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει το χώρο μεταξύ όνυχα – κεφαλής, που είναι αναγκαίος για την ασφαλή διέλευση πάνω από στοιχεία της επιδομής (π.χ. αιχμές, καρδιές). Το σχήμα 4.9 παριστά τροχό και κεφαλή σε μέση θέση επαφής. Έχει σχεδιασθεί πλήρης μορφή όνυχα ($q_R = 11$ mm) και με διακεκομμένη νύχι φθαρμένο με $q_R = 6.5$ mm (όριο απόσυρσης του τροχού)

Όταν η πλήρης μορφή πλησιάζει την κεφαλή της σιδηροτροχιάς, το σημείο Z του όνυχα μπορεί να μετακινηθεί το πολύ κατά την απόσταση ZE . Η απόσταση του οριακού σημείου Σ από την πλευρική επιφάνεια της κεφαλής ελαττώνεται κατά το μήκος EZ . Ο φθαρμένος όνυχας με μικρό $q_R = 6.5$ mm μπορεί να πλησιάσει την κεφαλή διατρέχοντας την απόσταση EH . Επειδή $EH > EZ$ η επιφάνεια του όνυχα (στην περίπτωση του μικρού $q_R = 6.5$ mm) περιορίζει τον ελεύθερο χώρο για στοιχεία της γραμμής (π.χ. αιχμές) άνω των οποίων διέρχεται ο τροχός.



Σχήμα 4.8: Απεικόνιση του τμήματος BB' του τροχού (4)

Εκτός τούτου, το μικρό q_R δίνει τη δυνατότητα στον τροχό να προσβάλει τη γραμμή υπό μεγαλύτερη γωνία. Έτσι αυξάνεται η πιθανότητα, σημεία του όνυχας πέραν του Σ προς την κορυφή να έλθουν σε επαφή είτε με την κεφαλή είτε με στοιχεία της γραμμής, οπότε η αναρρίχηση είναι βεβαία. Επιπλέον το μικρό q_R αυξάνει τη γωνία γ ώστε η κλίση της ΣB (Σχήμα 4.8) να επιτρέπει την ανάπτυξη κρουστικών δυνάμεων, όταν ο όνυχας έρχεται σε επαφή με τη γραμμή, κατά την εγκάρσια κίνηση του τροχού.



Σχήμα 4.9: Τροχός και κεφαλή σιδηροτροχιάς σε μέση θέση επαφής (4)

4.5 Περιγραφή μηχανισμού εκτροχιασμού

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται ο εκτροχιασμός λόγω ενδογενών παραγόντων. Θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ελαττώματα γραμμής (ούτε κατά πλάτος ούτε κατά μήκος), δεν υπάρχουν ελαττώματα οχήματος και γενικά άλλα αίτια που από μόνα τους μπορούν να οδηγήσουν σε εκτροχιασμό. Απαιτείται να εκτιμηθούν εκείνες οι καταστάσεις οι οποίες προκαλούν τον εκτροχιασμό, είναι δε απαραίτητη η γνώση της στατικής των δυνάμεων στις

θέσεις επαφής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς. Έχοντας ασχοληθεί με την παρουσία των δυνάμεων αυτών στα σημεία επαφής, θα παρουσιαστεί παρακάτω η αλληλεπίδραση αυτών και η οριακή κατάσταση που οδηγεί στο σημείο έναρξης του εκτροχιασμού.

Για να ανέλθει ο όνυχας επί της σιδηροτροχιάς, θα πρέπει πρώτα να πλησιάσει και να έρθει σε επαφή με αυτή. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο στην ευθυγραμμία η επαφή αυτή συμβαίνει περιοδικά (λόγω της οφιοειδούς κίνησης), ενώ στην καμπύλη μόνιμα με τον ιθυντήριο τροχό. Η επαφή αυτή έχει σχέση με τη θέση του οχήματος και κατ' επέκταση με τη θέση που λαμβάνουν οι άξονες εντός του εύρους της γραμμής.

4.6 Συνθήκες εκτροχιασμού

Από το διάγραμμα των δυνάμεων (Σχήμα 3.14), είναι προφανές ότι όταν αυξάνεται η P ή η Y , ο τροχός πιέζεται όλο και περισσότερο προς τη σιδηροτροχιά, που σημαίνει ότι πλησιάζει μια κατάσταση που μπορεί να αρχίσει η αναρρίχηση του επί αυτής. Η δράση αυτή εκφράζεται στο σχήμα 3.14 με το τρίγωνο 1-2-3. Αυξανόμενης της δύναμης καθοδήγησης, το άνυσμα Y μετατοπίζεται προς τα κάτω με συνέπεια η Q_A να ελαττώνεται και η Q_Θ να αυξάνει. Όταν το άνυσμα Y πάρει τη θέση 2-1 τότε η Q_A γίνεται μηδενική, που σημαίνει ότι το σημείο έδρασης A αποφορτίζεται εντελώς και η επαφή δύο σημείων μεταβάλλεται σε επαφή ενός σημείου και μάλιστα μόνο στο Θ .

Από το σχήμα 3.15 συνάγεται ότι αυξανόμενων των P και Y (π.χ. αύξηση της δύναμης έδρασης F_y του άξονα), ο τροχός πιέζεται στη σιδηροτροχιά προς τα πάνω και το σημείο Θ μετατοπίζεται προς τα κάτω, φθάνοντας στο ευθύγραμμο τμήμα της παρειάς του όνυχας. Συγχρόνως η γωνία γ αυξάνει και φθάνει τη μέγιστη τιμή της. Στη θέση αυτή ο τροχός μπορεί να αναλάβει τη μέγιστη δύναμη καθοδήγησης Y . Η οριακή θέση προς τον εκτροχιασμό επήλθε.

Επιπλέον αύξηση της Y σημαίνει αντίστοιχη μείωση της αντίστασης ολίσθησης μN προκειμένου να αποκατασταθεί ισορροπία δυνάμεων, οπότε ο τροχός δε μπορεί πια να ολισθαίνει προς τα κάτω και η αναρρίχηση του αρχίζει. Ο κίνδυνος εκτροχιασμού θεωρείται αυξημένος ως υπαρκτός.[7]

4.7 Κίνδυνος εκτροχιασμού

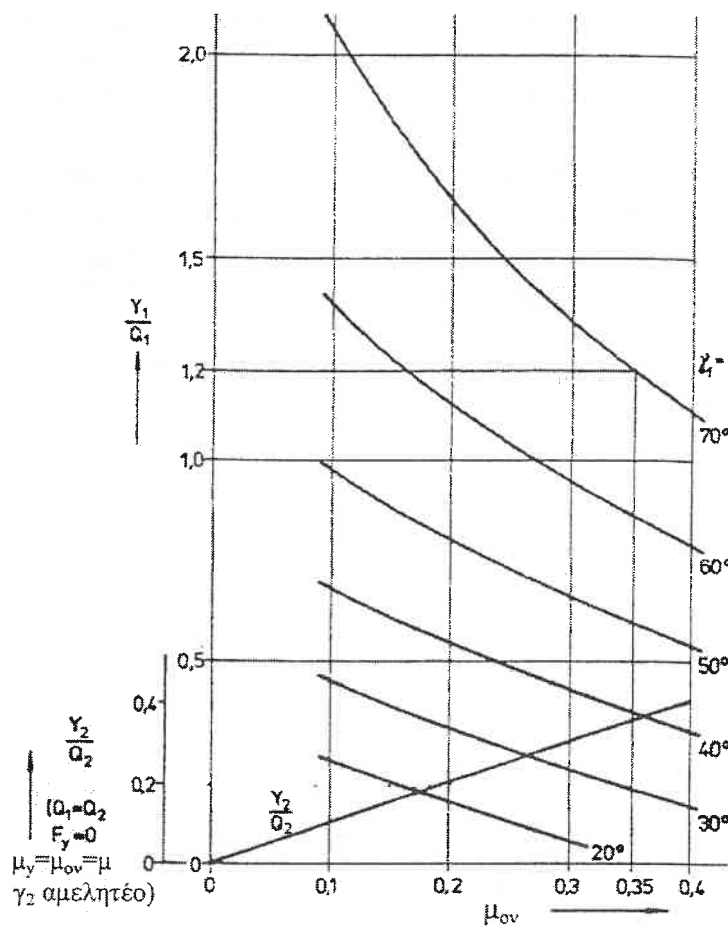
Σημαντικός παράγοντας στην εκτίμηση του κινδύνου εκτροχιασμού αποτελεί το μέτρο καθοδήγησης του τροχού. Είναι λοιπόν σκόπιμη μια εκτενέστερη αναφορά στον παράγοντα αυτό και ιδιαίτερα ως προς τον ιθυντήριο τροχό.[7]

Από τα σχήματα 3.14 και 3.15, φαίνεται ότι υπάρχει μια τιμή της Y που αντιστοιχεί στη συνήθη κύλιση και μια οριακή τιμή Y_e κατά την οποία αρχίζει ο κίνδυνος του εκτροχιασμού. Τότε και η συνισταμένη από την κάθετη δύναμη N και την αντίσταση ολίσθησης μN λαμβάνει τη μέγιστη κλίση και η γωνία γ στα σχεδιαγράμματα ισούται με γ_{max} . Από αυτή καθορίζεται η μέγιστη δύναμη της δύναμης καθοδήγησης Y προς το φορτίο του τροχού Q . Ο λόγος $(Y/Q)_e$ ονομάζεται μέτρο καθοδήγησης του τροχού.

Παλαιότερα υπήρχε η αντίληψη ότι για λόγο $Y/Q > 1/3$ άρχιζε ο κίνδυνος εκτροχιασμού. Ήταν ένας κανόνας που δεν λάμβανε υπόψη ούτε τη γωνία τριβής ρ ούτε τη γωνία παρειάς του όνυχα γ . Μετρήσεις σε όλα τα είδη των οχημάτων απέδειξαν ότι ο κίνδυνος εκτροχιασμού αρχίζει για $Y/Q > 1/1$ για γωνία $\gamma = 60^\circ$. Τα σχήματα 3.14 και 3.15 πιστοποιούν τη σχέση αυτή αφού φαίνεται ότι είναι $Q = Y_e$. Για τροχούς με γωνία $\gamma=70^\circ$ η αποδεκτή τιμή Y/Q ισούται με 1,2 στην οποία αντιστοιχεί τιμή του συντελεστή τριβής 0,35 στην παρειά του όνυχα. Η τιμή αυτή του μέτρου καθοδήγησης επιλέχθηκε επειδή παρουσιάζεται συχνά και περιέχει μεγάλο συντελεστή τριβής στον όνυχα. Όπως συνεπάγεται από τα σχήματα 3.10 και 3.15 το μέτρο καθοδήγησης

εξαρτάται από τη γωνία παρειάς γ του όνυχα και το συντελεστή τριβής μ_{ov} . Στο σχήμα 4.10 αποδίδεται γραφικά η σχέση αυτή.

Όπως έχει αναφερθεί, στον απέναντι τροχό (του οποίου η παρειά του όνυχα απέχει από την παρειά της σιδηροτροχιάς) αναπτύσσεται εγκάρσια αντίσταση ολίσθησης με την οποία μέσω της δύναμης καθοδήγησης Y_1 του προσπίπτοντος τροχού, διατηρείται η ισορροπία του συστήματος. Με την αύξηση της τριβής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς αυξάνει ανάλογα και εγκάρσια αντίσταση ολίσθησης. Αυτό σημαίνει ότι αν λόγω ξηρασίας ή ανεπαρκούς λίπανσης η τριβή αυξηθεί, τότε μειώνεται το μέτρο καθοδήγησης του προσπίπτοντος τροχού (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Μέτρο καθοδήγησης για ένα προσπίπτοντα τροχό [7]

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της αύξησης της τιμής της τριβής επί του μέτρου καθοδήγησης ενός άξονα, γίνεται η παραδοχή ότι στην επιφάνεια κύλισης του τροχού 2 (Σχήμα 3.10) και στην παρειά του όνυχα του τροχού 1 η τριβή είναι ίδια και οι δυο τροχοί του άξονα έχουν το ίδιο φορτίο. Ισχύει λοιπόν $\mu_y = \mu_{ov} = \mu$ και $Q_1 = Q_2$.

Επομένως στο σχήμα 4.10 μπορεί να χαραχθεί μια ευθεία η οποία δείχνει κατά πόσο μειώνεται το μέτρο καθοδήγησης του προσπίπτοντος τροχού (τροχός 1 σχήματος 3.10), ένεκα της δύναμης καθοδήγησης του απέναντι τροχού (τροχός 2 σχήματος 3.10). Η κάθετη απόσταση μεταξύ της ευθείας και της καμπύλης π.χ. για γωνία $\gamma_1 = 70^\circ$, απεικονίζει το εναπομένον μέτρο καθοδήγησης του τροχού 1. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τριβής, τόσο μικρότερη είναι η απόσταση αυτή.

Αν λιπανθεί ο όνυχας δεν ισχύει πια η υπόθεση $\mu_y = \mu_{ov} = \mu$. Η τριβή στον όνυχα του προσπίπτοντος τροχού είναι σαφώς μικρότερη. Έτσι αυξάνεται το μέτρο καθοδήγησης. Στο σχήμα 4.10 και για καμπύλη με $\gamma_1 = 70^\circ$ το εναπομένον μέτρο καθοδήγησης λαμβάνεται πηγαίνοντας προς τα αριστερά της καμπύλης, οπότε η απόσταση από την ευθεία Y_2/Q_2 γίνεται μεγαλύτερη. Ο άξονας τότε μπορεί να αναλάβει μεγαλύτερη δύναμη καθοδήγησης και ο κίνδυνος εκτροχιασμού μειώνεται.

Ένας άξονας αποτελεί πάντα μέρος του οχήματος και μέσω του φορείου είναι συνδεδεμένος με αυτό. Έτσι δρα επί αυτού μέσω των εδράνων του, μια εγκάρσια δύναμη F_y . Η δύναμη αυτή έχει δύο επιδράσεις:

- Επιβαρύνει την καθοδήγηση μέσω του προσπίπτοντος τροχού (αυξάνει την απαίτηση ως προς το μέτρο καθοδήγησης) και
- Σχηματίζει με τη δύναμη καθοδήγησης ροπή, μέσω της οποίας ο προσπίπτων τροχός επιδέχεται πρόσθετη φόρτιση ενώ ο άλλος αποφορτίζεται, δηλαδή το Q_1 αυξάνει ενώ το Q_2 μειώνεται.

Έτσι παύει να ισχύει η παραδοχή $Q_1 = Q_2$. Η τελευταία επίδραση έχει ένα πλεονέκτημα, ότι συγχρόνως με την αύξηση της δύναμης καθοδήγησης μεγαλώνει και η κατακόρυφη δύναμη του τροχού και έτσι αυξάνει και η μέγιστη δύναμη καθοδήγησης που μπορεί να ασκηθεί επί του τροχού. Έτσι μειώνεται

ο κίνδυνος το μέτρο καθοδήγησης να υπερβεί την αποδεκτή τιμή, επομένως και ενός πιθανού εκτροχιασμού.

4.8 Η διαδικασία εκτροχιασμού [7]

Αναγνωρίζεται ότι η αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς δεν πραγματοποιείται στιγμιαία, δηλαδή ο τροχός δεν ολισθαίνει προς τα πάνω ακαριαία. Πάντα απαιτείται κάποια απόσταση μέχρις ότου ο τροχός φθάσει στην ΑΚΣ. Στην περίπτωση που η δύναμη καθοδήγησης είναι πολύ μεγάλη και/ή η δύναμη του τροχού μικρή έτσι ώστε ένας τροχός να μην ολισθαίνει, τότε η απόσταση εκτροχιασμού σε τροχούς με διατομή αναμενόμενης φθοράς είναι μικρή, διότι το ευθύγραμμο τμήμα της παρειάς του όνυχα είναι μόνο μερικά χιλιοστά. Στην περίπτωση αυτή, η οποία θεωρείται σπάνια, η απόσταση εκτροχιασμού είναι μόλις 0,3 m.

Συνήθως απαιτούνται μερικά μέτρα όπως έχουν δείξει πολυπληθείς εργαστηριακοί πειραματισμοί.

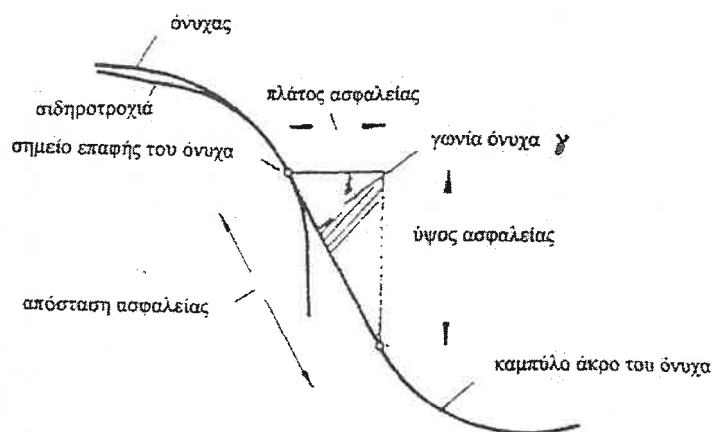
Αναλυτικότερα, για να εξαναγκασθεί ο τροχός σε αναρρίχηση επί της σιδηροτροχιάς, πρέπει η κατευθυντήρια δύναμη P και κατ' επέκταση η Y να γίνεται τόσο μεγαλύτερη όσο πιο απότομη είναι η κλίση παρειάς του όνυχα, δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία γ . Από την άλλη πλευρά, η απόσταση μέχρις ότου το κάτω μέρος του όνυχα ανέλθει επί της σιδηροτροχιάς είναι μικρότερη. Αυτό σημαίνει ότι για να ανέλθει ο τροχός επί της σιδηροτροχιάς στην περίπτωση μικρής γωνίας γ του όνυχα (οι υπόλοιπες διαστάσεις παραμένουν ίδιες), αρκεί μια σχετικά μικρή δύναμη P_e με αρκετή διάρκεια δράσης, ενώ στην περίπτωση μεγάλης γωνίας γ , η δύναμη P_e πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη όμως αρκεί μικρή διάρκεια δράσης για την άνοδο του τροχού επί της σιδηροτροχιάς.

Πρέπει λοιπόν η παρειά του όνυχα του τροχού να έχει τέτοια διαμόρφωση, ώστε να μπορεί να αναλάβει μια αρκετά μεγάλη κατευθυντήρια

δύναμη P_e αφενός και αφετέρου να εξασφαλίζει μια χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της διαδικασίας εκτροχιασμού μεγαλύτερη απ' ό,τι η χρονική διάρκεια δράσης της δυναμικής δύναμης. Η διατομή μιας τέτοιας παρειάς όνυχα φαίνεται στο σχήμα 4.11.

Στο σχήμα 4.11 εμφανίζονται τρεις διαστάσεις:

- Το πλάτος ασφαλείας
- Το ύψος ασφαλείας
- Η απόσταση ασφαλείας



Σχήμα 4.11: Διατομή παρειάς όνυχα [9]

Από αυτές τις γεωμετρικές συνθήκες απορρέουν δύο αλληλοαναιρούμενες απαιτήσεις:

- Το πλάτος ασφαλείας πρέπει να είναι τόσο μεγάλο έτσι ώστε να επιμηκύνεται η χρονική διάρκεια εκτροχίασης
- Η γωνία γ της παρειάς του όνυχου να είναι τόσο μεγάλη, ώστε να αναλαμβάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη δύναμη P_e .

Ο συγκερασμός των αιτήσεων αυτών, οδήγησε σε ελάχιστη απόσταση ασφαλείας 4 mm και γωνία γ μεταξύ 60° και 80° για γωνία πρόσπτωσης 0° .

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και αποτελέσματα που εξήχθησαν

5.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε απεικόνιση της μετακίνησης των τροχών σε σχέση με τη σιδηροτροχιά, με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD και με σκοπό τη μελέτη της ισοδύναμης κωνικότητας καθώς και τον εντοπισμό των επικίνδυνων θέσεων έναντι εκτροχιασμού. Τα παραπάνω μελετήθηκαν για δύο διαφορετικές τιμές του εύρους γραμμής (των 1435mm και των 1432mm) και για την υπόθεση ότι το σιδηροδρομικό όχημα κινείται στην ευθυγραμμία.

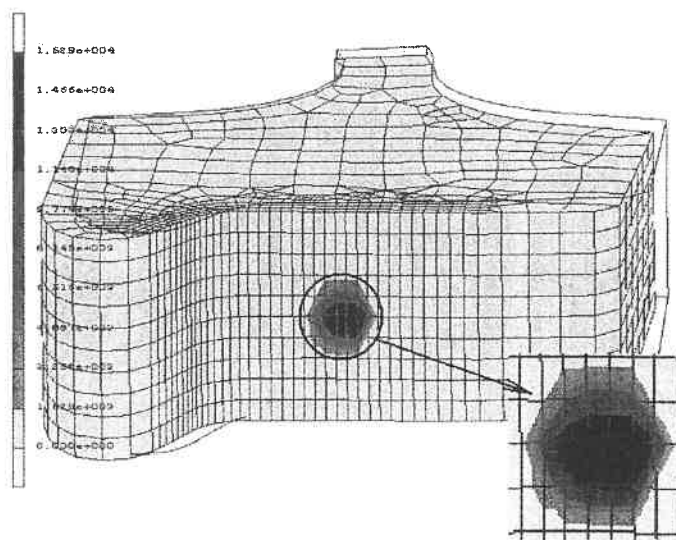
5.2 Παραδοχές

Η κίνηση των τροχών πάνω στις σιδηροτροχιές είναι αρκετά πολύπλοκη. Οι δυνάμεις που ασκούνται στους τροχούς και τις σιδηροτροχιές, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, δρουν στο χώρο, ενώ εκεί που συμβαίνει η επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς σχηματίζεται ελλειπτική επιφάνεια επαφής (ενώ τελικά λαμβάνονται ως σημεία επαφής). Από όλα τα παραπάνω λοιπόν εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι χρήσιμη η θεώρηση κάποιων απλοποιητικών παραδοχών για τη μελέτη της κίνησης των τροχών επί των σιδηροτροχιών και για την κατάληξη σε ασφαλή συμπεράσματα.

Οι απλοποιητικές παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Οι δύο τροχοί είναι σταθερά συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω του άξονα των τροχών, χωρίς να επιτρέπεται η ανεξάρτητη περιστροφή τους
2. το σύστημα δυνάμεων στο χώρο αντικαθίσταται από επίπεδο σύστημα
3. οι ελλειπτικές επιφάνειες επαφής (κατά τη επαφή του τροχού με τη σιδηροτροχιά) (σχήμα 5.0) θεωρούνται, εκφυλιστικά, σημεία επαφής
4. θεωρείται ότι έχουμε επαφή ενός και όχι δύο σημείων
5. θεωρείται συντελεστής τριβής μ ίδιος και για τους δύο τροχούς καθώς επίσης κοινός και για τον όνυχά του τροχού, το επίσωτρο του τροχού και τη σιδηροτροχιά
6. θεωρείται ίδιο φορτίο Q και στους δύο τροχούς

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι γίνονται αυτές οι απλοποιητικές παραδοχές, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν θεωρούνται αξιόπιστα και συγκλίνουν με αυτά που προκύπτουν από πειραματικούς εργαστηριακούς ελέγχους στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 5.0: Ελλειπτική επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς.(13)

5.3 Στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν

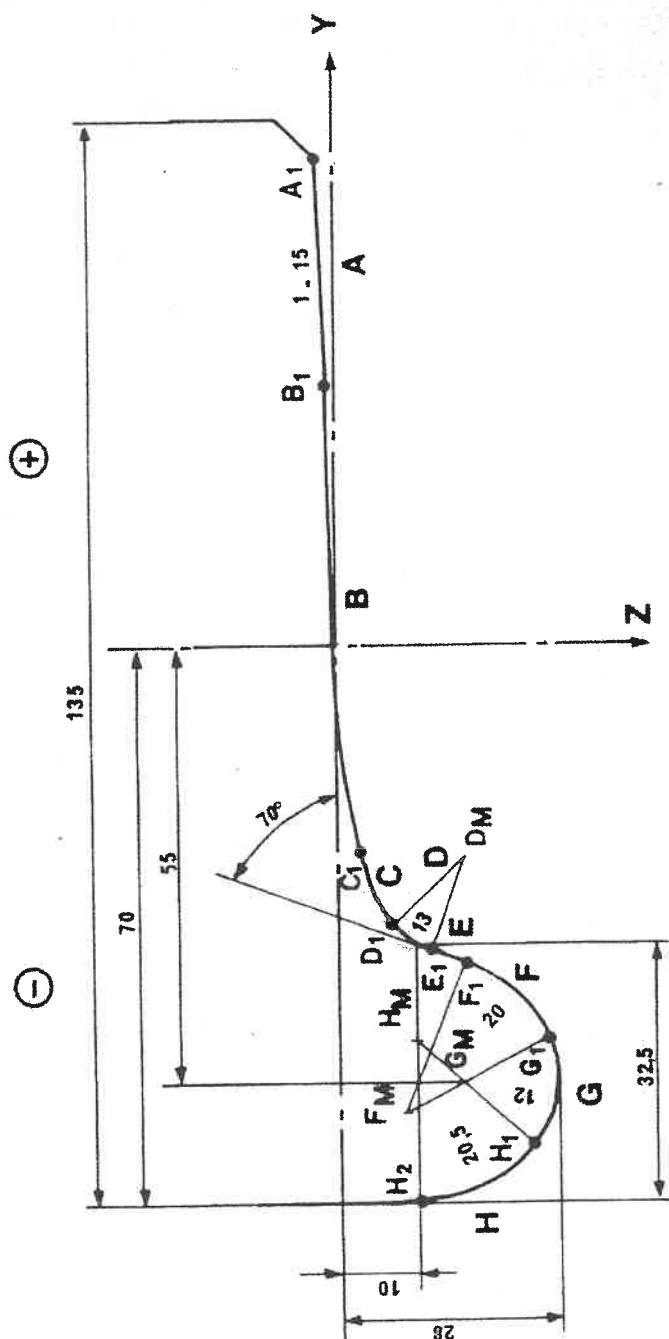
Για την εύρεση των σημείων επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και για τη γενικότερη μελέτη του φαινομένου κατά την παρούσα φάση απεικόνισης μέσω του AutoCAD χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία:

1. Σιδηροτροχιά τύπου UIC 60 (Σχήμα 5.2)

Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται σιδηροτροχιές με βάρος που κυμαίνεται μεταξύ 49 και 60 kg/m. Ειδικότερα στη Δυτική Ευρώπη τείνει πλέον να καθιερωθεί η χρήση της διατομής UIC 60. Η επιλογή της σιδηροτροχιάς αυτής προσφέρει επιπλέον μικρές βυθίσεις της γραμμής σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων (όπου τα αξονικά φορτία των οχημάτων είναι συγκριτικά μικρά) [16]. Τέλος η σιδηροτροχιά με βάρος 60 kg/m είναι η ελαφρύτερη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξονικά φορτία της τάξης των 25t.

2. Προφίλ τροχού S1002 (Σχήμα 5.1)
Ο τροχός με εγκάρσια διατομή τύπου S1002 είναι κατασκευασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζεται εύκολα στις φθορές χωρίς να αλλάζει ουσιαστικά η μορφή της εγκάρσιας διατομής του.
3. Εύρος γραμμής 1435mm και 1432mm
Η επιλογή του εύρους γραμμής συσχετίζεται με τα φορτία που κυκλοφορούν στη γραμμή. Στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης το χρησιμοποιούμενο εύρος γραμμής είναι αυτό των 1435mm το οποίο μάλιστα παρέχει καλύτερη εγγραφή των φορέων στα καμπύλα τμήματα.
4. Κλίση σιδηροτροχιών 1:40
Η κλίση αυτή δίνεται στις σιδηροτροχιές προς το εσωτερικό της γραμμής. Η τοποθέτηση αυτή βελτιώνει την εγκάρσια ευστάθεια των οχημάτων.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο των απλοποιήσεων που έχουν γίνει, έχει αγνοηθεί η γωνία παρέκκλισης του άξονα (Σχήμα 5.3)



Σχήμα 5.1: Προφίλ τροχού S1002 [10]

TOMEAZ A Z = 1,364 323 640 - 0,066 666 667 y

TOMEAZ B Z = 0 - 3,358 537 058 · 10⁻²y + 1,565 681 624 · 10⁻³y² - 2,810 427 944 · 10⁻⁵y³ + 5,844 240 864 · 10⁻⁸y⁴
- 1,562 379 023 · 10⁻⁸y⁵ + 5,309 217 349 · 10⁻¹⁵y⁶ - 5,657 839 943 · 10⁻¹²y⁷ + 2,646 655 573 · 10⁻¹³y⁸

TOMEAZ C Z = -4,320 221 063 · 10⁻³ - 1,039 384 026 · 10⁻³y - 1,055 501 873 · 10⁻²y² - 6,051 367 875 · 10⁰y³
- 2,054 332 446 · 10⁻¹y⁴ - 4,169 739 389 · 10⁻³y⁵ - 4,687 195 829 · 10⁻⁵y⁶ - 2,252 755 540 · 10⁻⁷y⁷

TOMEAZ D Z = 16,446 - $\sqrt{13^2 - (y + 26,210 665)^2}$

TOMEAZ E Z = -93,576 657 419 - 2,747 477 419 · y

TOMEAZ F Z = -8,834 924 130 + $\sqrt{20^2 - (y + 58,553 326 413)^2}$

TOMEAZ G Z = 16 + $\sqrt{12^2 - (y + 55)^2}$

TOMEAZ H Z = -9,519 259 302 + $\sqrt{20,5^2 - (y + 49,5)^2}$

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ		Α	από	y	= + 60	έως	y	= + 32,157 96
B		y	= + 32,157 96			y	= - 26	
C		y	= - 26			y	= - 35	
D		y	= - 35			y	= - 38,426 669 071	
E		y	= - 38,426 669 071			y	= - 39,764 473 993	
F		y	= - 39,764 473 993			y	= - 49,662 510 381	
G		y	= - 49,662 510 381			y	= - 62,764 705 382	
H		y	= - 62,764 705 382			y	= - 70	

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ		A ₁	y	= + 60	Z	= - 2,536
B ₁	= A ₂		y	= + 32,158	Z	= - 0,780
C ₁	= B ₂		y	= - 26	Z	= + 2,741
D ₁	= C ₂		y	= - 35	Z	= + 6,857
E ₁	= D ₂		y	= - 38,427	Z	= + 12
F ₁	= E ₂		y	= - 39,764	Z	= + 15,575
G ₁	= F ₂		y	= - 49,663	Z	= + 25,748
H ₁	= G ₂		y	= - 62,765	Z	= + 25,149
	H ₂		y	= - 70	Z	= + 9,519

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΚΥΚΛΩΝ	D ₁	y = - 26,211	Z = + 16,446
	F ₁	y = - 58,558	Z = + 8,835
	G ₁	y = - 55	Z = + 16
	H ₁	y = - 49,5	Z = + 9,519

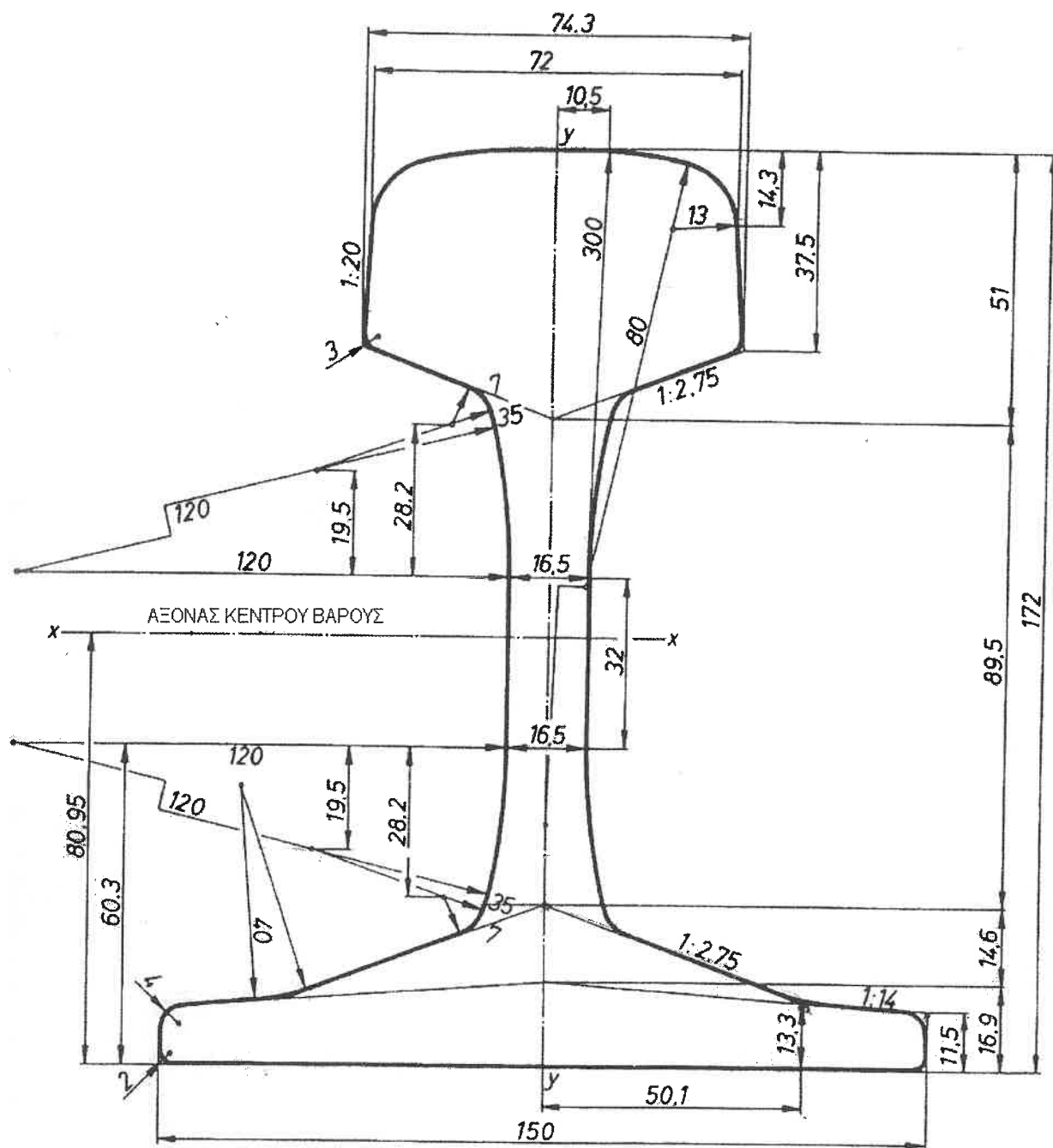
Σχήμα 5.1α: Στοιχεία για την κατασκευή του προφίλ του τροχού S1002 [10]

NR	Y MM	Z MM	TG	NR	Y MM	Z MM	TG
1	- 70.000	9.519	-	66	- 37.500	10.000	- 1.7514
2	- 69.500	14.019	4.4444	67	- 37.000	9.194	- 1.4878
3	- 69.000	15.844	3.0832	68	- 36.500	8.501	- 1.2950
4	- 58.500	17.217	2.4684	69	- 36.000	7.892	- 1.1444
5	- 68.000	18.351	2.0947	70	- 35.500	7.352	- 1.0214
6	- 67.500	19.330	1.8347	71	- 35.000	6.867	- 0.9176
7	- 67.000	20.196	1.6390	72	- 34.500	6.432	- 0.8279
8	- 66.500	20.976	1.4839	73	- 34.000	6.038	- 0.7493
9	- 66.000	21.685	1.3563	74	- 33.500	5.681	- 0.6798
10	- 65.500	22.335	1.2484	75	- 33.000	5.357	- 0.6181
11	- 65.000	22.936	1.1553	76	- 32.500	5.062	- 0.5630
12	- 64.500	23.492	1.0735	77	- 32.000	4.793	- 0.5140
13	- 64.000	24.011	1.0006	78	- 31.500	4.547	- 0.4706
14	- 63.500	24.494	0.9349	79	- 31.000	4.321	- 0.4322
15	- 63.000	24.947	0.8751	80	- 30.500	4.114	- 0.3988
16	- 62.500	25.367	0.8006	81	- 30.000	3.922	- 0.3698
17	- 62.000	25.747	0.7182	82	- 29.500	3.743	- 0.3449
18	- 61.500	26.087	0.6444	83	- 29.000	3.576	- 0.3237
19	- 61.000	26.392	0.5774	84	- 28.500	3.419	- 0.3055
20	- 60.500	26.665	0.5157	85	- 28.000	3.270	- 0.2899
21	- 60.000	26.909	0.4583	86	- 27.500	3.129	- 0.2763
22	- 59.500	27.124	0.4045	87	- 27.000	2.994	- 0.2639
23	- 59.000	27.314	0.3536	88	- 26.500	2.865	- 0.2525
24	- 58.500	27.478	0.3049	89	- 26.000	2.741	- 0.2417
25	- 58.000	27.619	0.2582	90	- 25.500	2.623	- 0.2315
26	- 57.500	27.737	0.2130	91	- 25.000	2.509	- 0.2218
27	- 57.000	27.832	0.1690	92	- 24.500	2.401	- 0.2127
28	- 56.500	27.906	0.1260	93	- 24.000	2.297	- 0.2041
29	- 56.000	27.958	0.0836	94	- 23.500	2.197	- 0.1960
30	- 55.500	27.990	0.0417	95	- 23.000	2.101	- 0.1883
31	- 55.000	28.000	0.0	96	- 22.500	2.008	- 0.1810
32	- 54.500	27.990	0.0417	97	- 22.000	1.920	- 0.1741
33	- 54.000	27.958	0.0836	98	- 21.500	1.834	- 0.1675
34	- 53.500	27.906	0.1260	99	- 21.000	1.752	- 0.1613
35	- 53.000	27.832	0.1690	100	- 20.500	1.673	- 0.1553
36	- 52.500	27.737	0.2130	101	- 20.000	1.597	- 0.1497
37	- 52.000	27.619	0.2582	102	- 19.500	1.523	- 0.1443
38	- 51.500	27.478	0.3049	103	- 19.000	1.452	- 0.1392
39	- 51.000	27.314	0.3536	104	- 18.500	1.384	- 0.1342
40	- 50.500	27.124	0.4045	105	- 18.000	1.318	- 0.1295
41	- 50.000	26.909	0.4583	106	- 17.500	1.254	- 0.1250
42	- 49.500	26.666	0.5080	107	- 17.000	1.193	- 0.1207
43	- 49.000	26.403	0.5441	108	- 16.500	1.134	- 0.1166
44	- 48.500	26.122	0.5819	109	- 16.000	1.076	- 0.1126
45	- 48.000	25.821	0.6216	110	- 15.500	1.021	- 0.1088
46	- 47.500	25.500	0.6636	111	- 15.000	0.967	- 0.1051
47	- 47.000	25.157	0.7081	112	- 14.500	0.916	- 0.1016
48	- 46.500	24.791	0.7557	113	- 14.000	0.866	- 0.0981
49	- 46.000	24.401	0.8068	114	- 13.500	0.818	- 0.0948
50	- 45.500	23.984	0.8620	115	- 13.000	0.771	- 0.0916
51	- 45.000	23.538	0.9222	116	- 12.500	0.726	- 0.0885
52	- 44.500	23.060	0.9883	117	- 12.000	0.682	- 0.0855
53	- 44.000	22.548	1.0616	118	- 11.500	0.640	- 0.0826
54	- 43.500	21.997	1.1440	119	- 11.000	0.600	- 0.0798
55	- 43.000	21.402	1.2380	120	- 10.500	0.561	- 0.0771
56	- 42.500	20.757	1.3470	121	- 10.000	0.523	- 0.0744
57	- 42.000	20.052	1.4762	122	- 9.500	0.486	- 0.0718
58	- 41.500	19.276	1.6338	123	- 9.000	0.451	- 0.0693
59	- 41.000	18.411	1.8335	124	- 8.500	0.417	- 0.0669
60	- 40.500	17.431	2.1097	125	- 8.000	0.384	- 0.0645
61	- 40.000	16.291	2.4891	126	- 7.500	0.352	- 0.0622
62	- 39.500	14.949	2.7475	127	- 7.000	0.322	- 0.0599
63	- 39.000	13.575	2.7475	128	- 6.500	0.292	- 0.0577
64	- 38.500	12.201	2.7475	129	- 6.000	0.264	- 0.0556
65	- 38.000	10.968	2.1520	130	- 5.500	0.237	- 0.0535

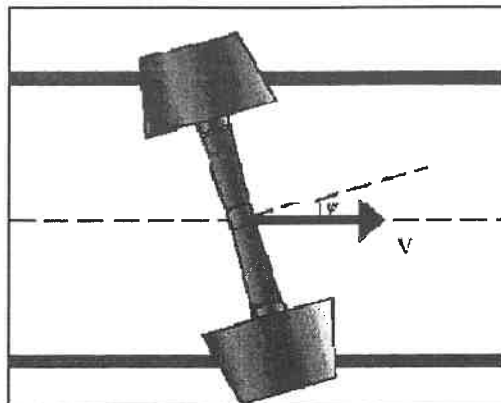
Σχήμα 5.1β: Συντεταγμένες σημείων του προφίλ του τροχού S1002 [10]

NR	Y MM	Z MM	TG	NR	Y MM	Z MM	TG
131	- 5.000	0.211	- 0.0514	196	27.500	- 0.521	- 0.0439
132	- 4.500	0.185	- 0.0494	197	28.000	- 0.543	- 0.0464
133	- 4.000	0.161	- 0.0475	198	28.500	- 0.567	- 0.0490
134	- 3.500	0.138	- 0.0456	199	29.000	- 0.592	- 0.0515
135	- 3.000	0.116	- 0.0438	200	29.500	- 0.619	- 0.0541
136	- 2.500	0.094	- 0.0419	201	30.000	- 0.646	- 0.0566
137	- 2.000	0.074	- 0.0402	202	30.500	- 0.675	- 0.0591
138	- 1.500	0.054	- 0.0385	203	31.000	- 0.705	- 0.0615
139	- 1.000	0.035	- 0.0368	204	31.500	- 0.737	- 0.0638
140	- 0.500	0.017	- 0.0352	205	32.000	- 0.769	- 0.0660
141	0.0	0.0	- 0.0336	206	32.500	- 0.802	- 0.0667
142	0.500	- 0.016	- 0.0320	207	33.000	- 0.836	- 0.0667
143	1.000	- 0.032	- 0.0305	208	33.500	- 0.869	- 0.0667
144	1.500	- 0.047	- 0.0291	209	34.000	- 0.902	- 0.0667
145	2.000	- 0.061	- 0.0277	210	34.500	- 0.936	- 0.0667
146	2.500	- 0.075	- 0.0263	211	35.000	- 0.969	- 0.0667
147	3.000	- 0.087	- 0.0250	212	35.500	- 1.002	- 0.0667
148	3.500	- 0.100	- 0.0237	213	36.000	- 1.036	- 0.0667
149	4.000	- 0.111	- 0.0224	214	36.500	- 1.069	- 0.0667
150	4.500	- 0.122	- 0.0212	215	37.000	- 1.102	- 0.0667
151	5.000	- 0.132	- 0.0201	216	37.500	- 1.136	- 0.0667
152	5.500	- 0.142	- 0.0189	217	38.000	- 1.169	- 0.0667
153	6.000	- 0.151	- 0.0179	218	38.500	- 1.202	- 0.0667
154	6.500	- 0.160	- 0.0159	219	39.000	- 1.236	- 0.0667
155	7.000	- 0.168	- 0.0159	220	39.500	- 1.269	- 0.0667
156	7.500	- 0.176	- 0.0150	221	40.000	- 1.302	- 0.0667
157	8.000	- 0.183	- 0.0141	222	40.500	- 1.336	- 0.0667
158	8.500	- 0.190	- 0.0133	223	41.000	- 1.369	- 0.0667
159	9.000	- 0.196	- 0.0126	224	41.500	- 1.402	- 0.0667
160	9.500	- 0.203	- 0.0119	225	42.000	- 1.436	- 0.0667
161	10.000	- 0.208	- 0.0113	226	42.500	- 1.469	- 0.0667
162	10.500	- 0.214	- 0.0107	227	43.000	- 1.502	- 0.0667
163	11.000	- 0.219	- 0.0102	228	43.500	- 1.536	- 0.0667
164	11.500	- 0.224	- 0.0098	229	44.000	- 1.569	- 0.0667
165	12.000	- 0.229	- 0.0094	230	44.500	- 1.602	- 0.0667
166	12.500	- 0.234	- 0.0091	231	45.000	- 1.636	- 0.0667
167	13.000	- 0.238	- 0.0089	232	45.500	- 1.669	- 0.0667
168	13.500	- 0.242	- 0.0088	233	46.000	- 1.702	- 0.0667
169	14.000	- 0.247	- 0.0087	234	46.500	- 1.736	- 0.0667
170	14.500	- 0.251	- 0.0088	235	47.000	- 1.769	- 0.0667
171	15.000	- 0.256	- 0.0089	236	47.500	- 1.802	- 0.0667
172	15.500	- 0.260	- 0.0091	237	48.000	- 1.836	- 0.0667
173	16.000	- 0.265	- 0.0094	238	48.500	- 1.869	- 0.0667
174	16.500	- 0.269	- 0.0097	239	49.000	- 1.902	- 0.0667
175	17.000	- 0.274	- 0.0102	240	49.500	- 1.936	- 0.0667
176	17.500	- 0.280	- 0.0108	241	50.000	- 1.969	- 0.0667
177	18.000	- 0.285	- 0.0115	242	50.500	- 2.002	- 0.0667
178	18.500	- 0.291	- 0.0123	243	51.000	- 2.036	- 0.0667
179	19.000	- 0.298	- 0.0132	244	51.500	- 2.069	- 0.0667
180	19.500	- 0.304	- 0.0142	245	52.000	- 2.102	- 0.0667
181	20.000	- 0.312	- 0.0153	246	52.500	- 2.136	- 0.0667
182	20.500	- 0.320	- 0.0165	247	53.000	- 2.169	- 0.0667
183	21.000	- 0.323	- 0.0178	248	53.500	- 2.202	- 0.0667
184	21.500	- 0.338	- 0.0192	249	54.000	- 2.236	- 0.0667
185	22.000	- 0.348	- 0.0208	250	54.500	- 2.269	- 0.0667
186	22.500	- 0.358	- 0.0224	251	55.000	- 2.302	- 0.0667
187	23.000	- 0.370	- 0.0241	252	55.500	- 2.336	- 0.0667
188	23.500	- 0.382	- 0.0260	253	56.000	- 2.369	- 0.0667
189	24.000	- 0.396	- 0.0279	254	56.500	- 2.402	- 0.0667
190	24.500	- 0.410	- 0.0300	255	57.000	- 2.436	- 0.0667
191	25.000	- 0.426	- 0.0321	256	57.500	- 2.469	- 0.0667
192	25.500	- 0.443	- 0.0343	257	58.000	- 2.502	- 0.0667
193	26.000	- 0.460	- 0.0366	258	58.500	- 2.536	- 0.0667
194	26.500	- 0.479	- 0.0390	259	59.000	- 2.569	- 0.0667
195	27.000	- 0.499	- 0.0414	260	59.500	- 2.602	- 0.0667

Σχήμα 5.1β: Συντεταγμένες σημείων του προφίλ του τροχού S1002 [10]



Σχήμα 5.2: Διατομή σιδηροτροχιάς UIC 60 [9]



Σχήμα 5.3: Γωνία παρέκκλισης (3)

5.4 Πορεία εργασίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD

Για τη μελέτη του φαινομένου επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και με σκοπό τον εντοπισμό των επικίνδυνων θέσεων έναντι εκτροχιασμού έγινε απεικόνιση του συστήματος των τροχών και της σιδηροτροχιάς στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και σε κλίμακα 1:1.

Αρχικά μελετήθηκαν τα σημεία επαφής για το εύρος των 1435 mm, ενώ η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η παρακάτω. Τοποθετήθηκε η μια σιδηροτροχιά (τύπου UIC 60) με κλίση 1:40. Στη συνέχεια 14 mm κάτω από την ΑΚΣ μετρήθηκαν 1435 mm από την εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς μέχρι το αντίστοιχο σημείο στην εσωτερική παρειά της απέναντι σιδηροτροχιάς όπου τοποθετήθηκε και αυτή με την ίδια κλίση (1:40). Το σύστημα των τροχών φτιάχτηκε με τέτοιο τρόπο ώστε οι εσωτερικές παρειές των ονύχων να απέχουν μεταξύ τους σταθερή απόσταση 1360 mm.

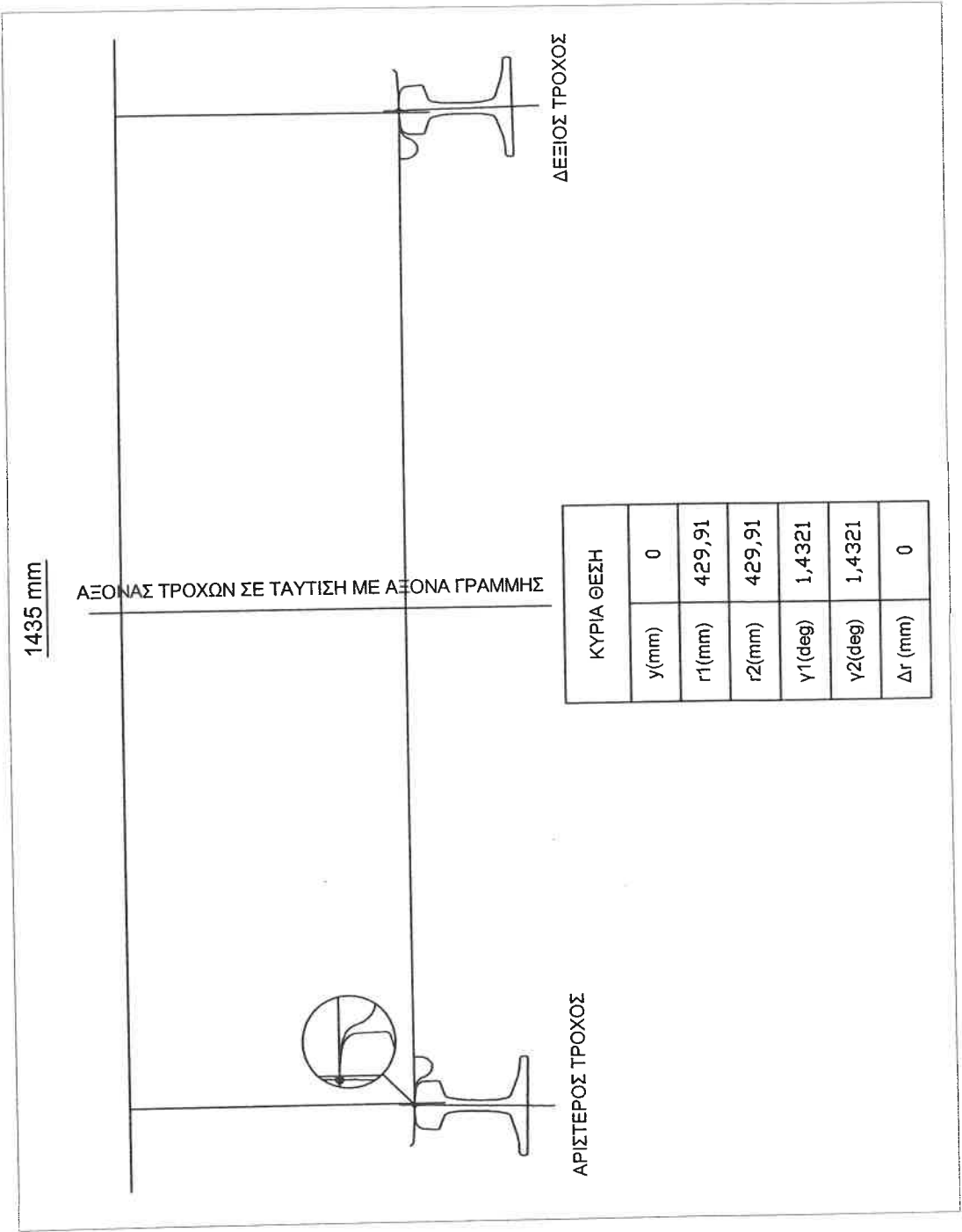
Η αρχική επιδίωξη ήταν να βρεθεί η θέση που ο άξονας ήταν κεντρωμένος (δηλαδή η πλευρική μετατόπιση y μηδενική). Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκε το σύστημα των τροχών (χωρίς καμία κλίση) πάνω στις σιδηροτροχιές ενώ παράλληλα ο άξονας των τροχών ταυτίστηκε με τον άξονα της γραμμής. Για τη θέση αυτή μετρήθηκε η ακτίνα r_0 η οποία είναι η ίδια και για τους δύο τροχούς.

Υποθέτοντας ότι η επαφή του όνυχα του τροχού και της σιδηροτροχιάς θα γίνει στον αριστερό τροχό, ακολούθησε μετακίνηση του συστήματος των

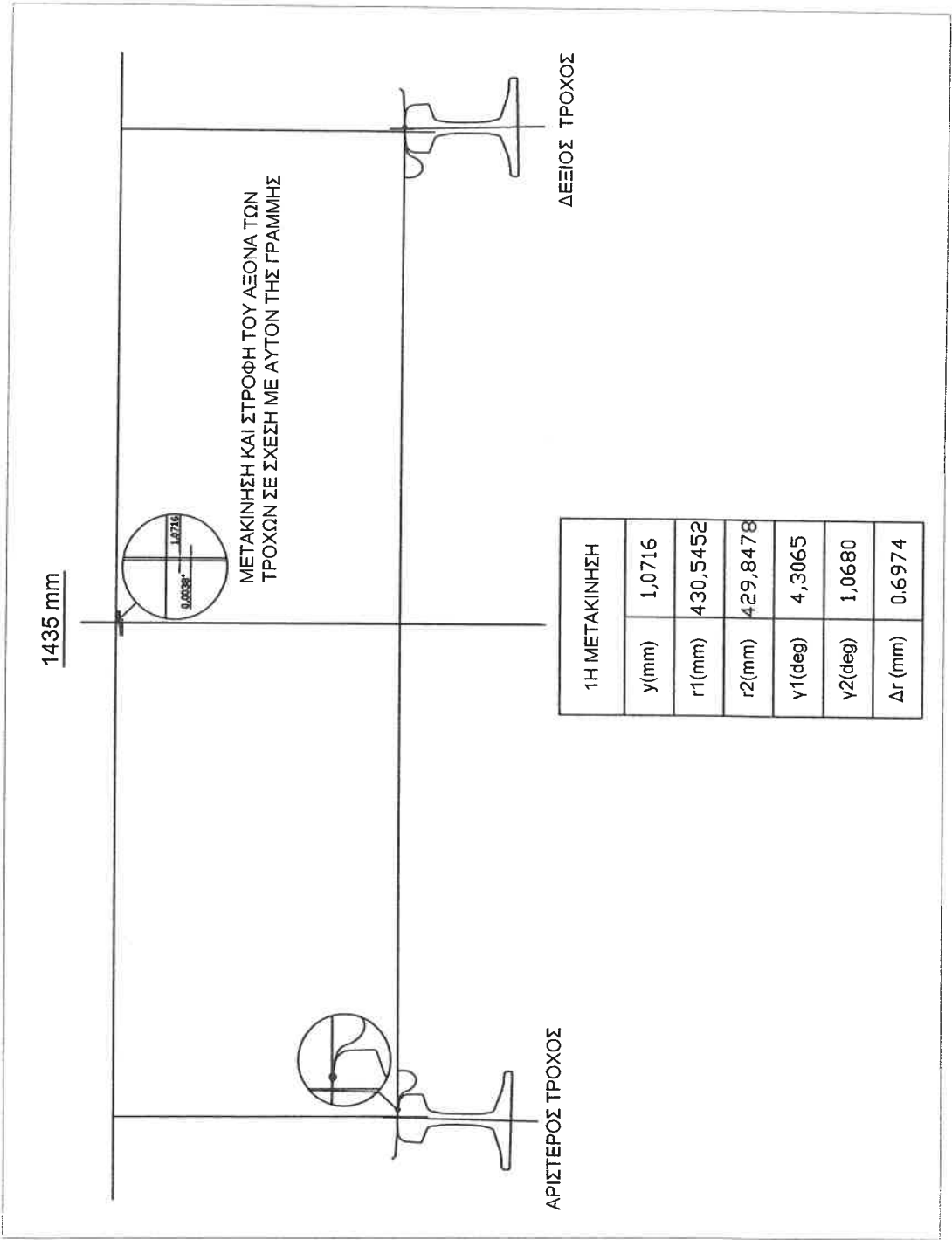
τροχών προς τα αριστερά. Η μετακίνηση αυτή ήταν οριζόντια και κατά 1 mm. Στη συνέχεια και προκειμένου να βρεθούν τα σημεία επαφής του τροχού με τη σιδηροτροχιά ανυψώθηκε το σύστημα των τροχών έως το σημείο όπου ο αριστερός τροχός αποκτά μοναδικό σημείο επαφής με τη σιδηροτροχιά. Περιστρέφοντας τον άξονα των τροχών γύρω από το σημείο αυτό είμαστε σε θέση να εντοπίσουμε και τη μοναδική επαφή που υπάρχει μεταξύ του δεξιού τροχού και της σιδηροτροχιάς. Στις νέες αυτές επαφές μετρούνται οι ακτίνες κύλισης r_1 (για τον αριστερό τροχό) και r_2 (για τον δεξή τροχό) και υπολογίζεται η διαφορά τους Δr ($r_1 - r_2$). Τελικά η οριζόντια μετατόπιση προέκυψε 1,0716 mm ενώ ο άξονας τροχών έχει στραφεί κατά γωνία 0,0038° σε σχέση με την οριζόντιο.

Με την ίδια λογική και χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία έγιναν συνολικά οκτώ μετακινήσεις, με μέγιστη οριζόντια μετατόπιση $y=6,7409$ mm, για τα 1435 mm και επτά μετακινήσεις, με μέγιστη οριζόντια μετατόπιση $y=5,9970$ mm, για τα 1432 mm. Κατά τις μετακινήσεις αυτές μετρήθηκαν οι τιμές των ακτινών κύλισης r_1 -και r_2 και υπολογίστηκε η διαφορά τους Δr ($r_1 - r_2$).

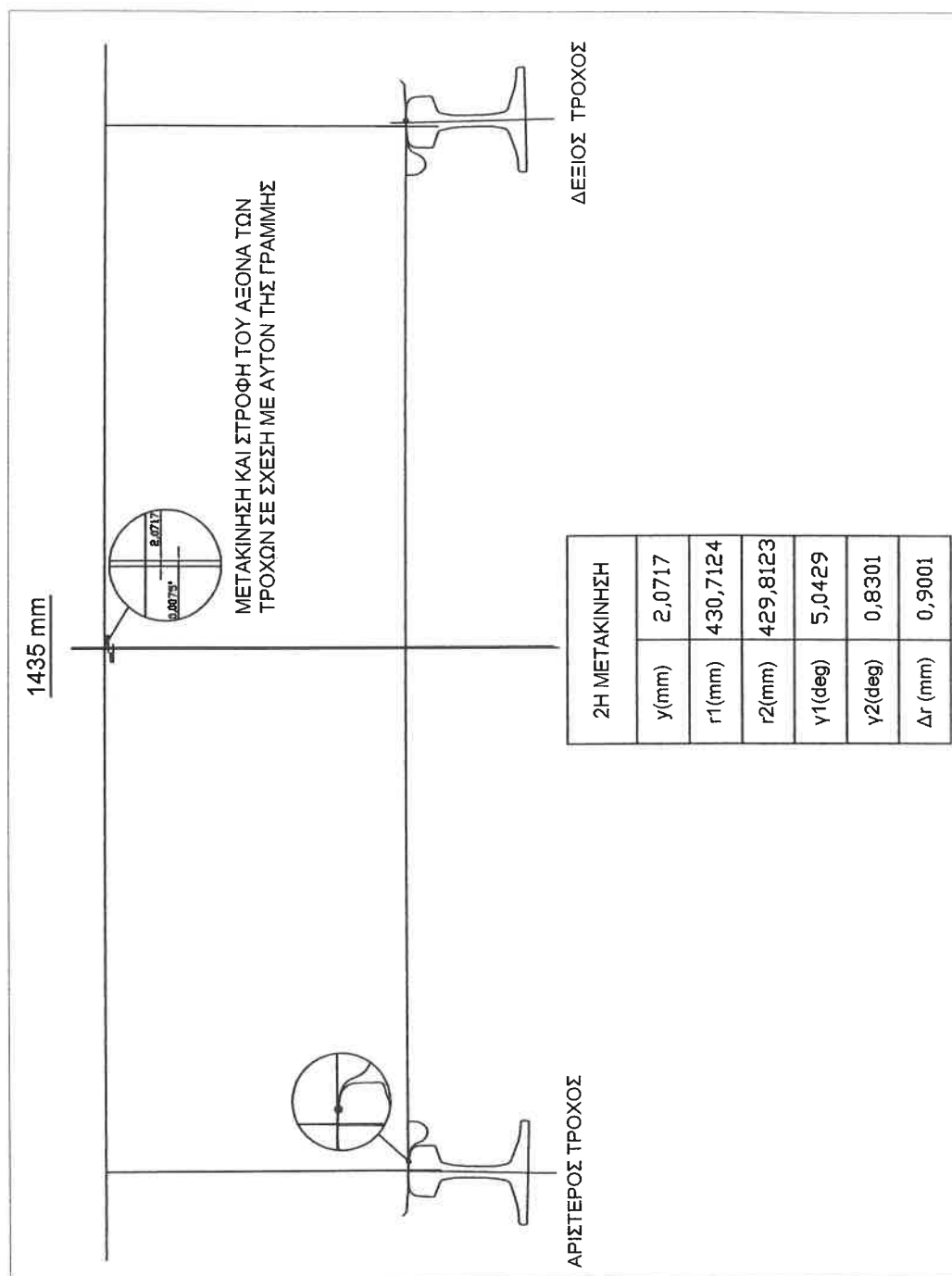
Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 5.4 έως 5.20) φαίνονται, με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD, οι επαφές τροχού – σιδηροτροχιάς για τις δεδομένες οριζόντιες μετακινήσεις και για τιμές του εύρους γραμμής 1435 mm και 1432 mm, ενώ στα σχήματα 5.21 έως 5.24 φαίνονται τα σημεία του τροχού και της σιδηροτροχιάς που αντιστοιχούν σε κάθε επαφή. Σε κάθε σχήμα αναγράφονται οι τιμές της οριζόντιας μετακίνησης (y), οι ακτίνες κύλισης των τροχών (r_1 και r_2) και η διαφορά αυτών (Δr). Τέλος για κάθε πλευρική μετακίνηση μετρήθηκαν και οι γωνίες επαφής του όνυχα με τη σιδηροτροχιά (δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στο σημείο επαφής με την οριζόντιο). Οι γωνίες αυτές έχουν πρακτική σημασία για εγκάρσιες μετακινήσεις όπου το σημείο του τροχού που έρχεται σε επαφή με τη σιδηροτροχιά βρίσκεται στο ευθύγραμμο τμήμα του τομέα Ε (Σχήμα 5.1). Όπως αποδεικνύεται όταν η επαφή γίνεται στο ευθύγραμμο αυτό τμήμα τότε μπορεί να παραλειφθεί με ασφάλεια η μέγιστη οριζόντια δύναμη (Y). Περαιτέρω εγκάρσια μετακίνηση οδηγεί σε αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς και τελικά σε πιθανό εκτροχιασμό.



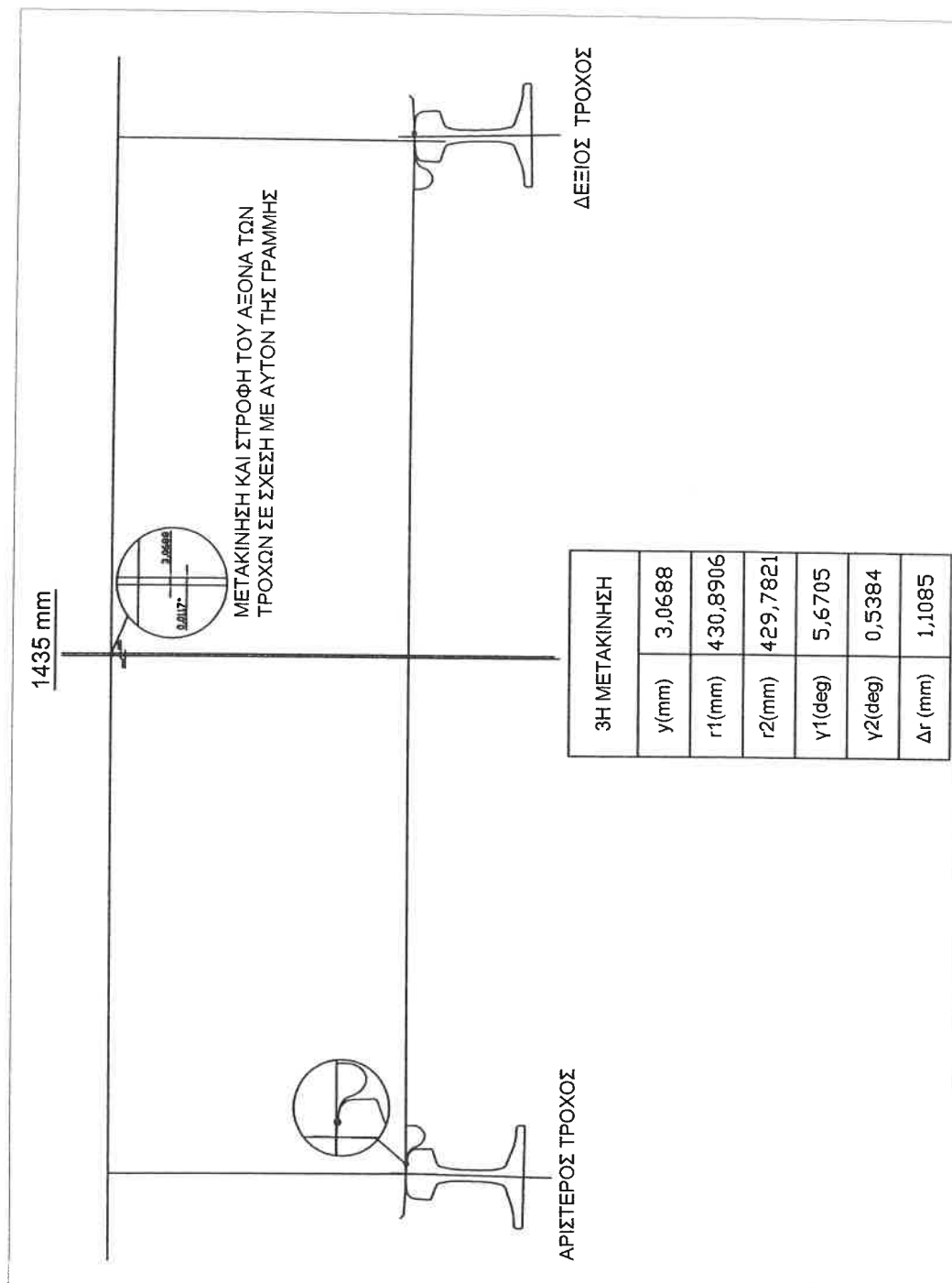
Σχήμα 5.4: Κύρια θέση (1435 mm)



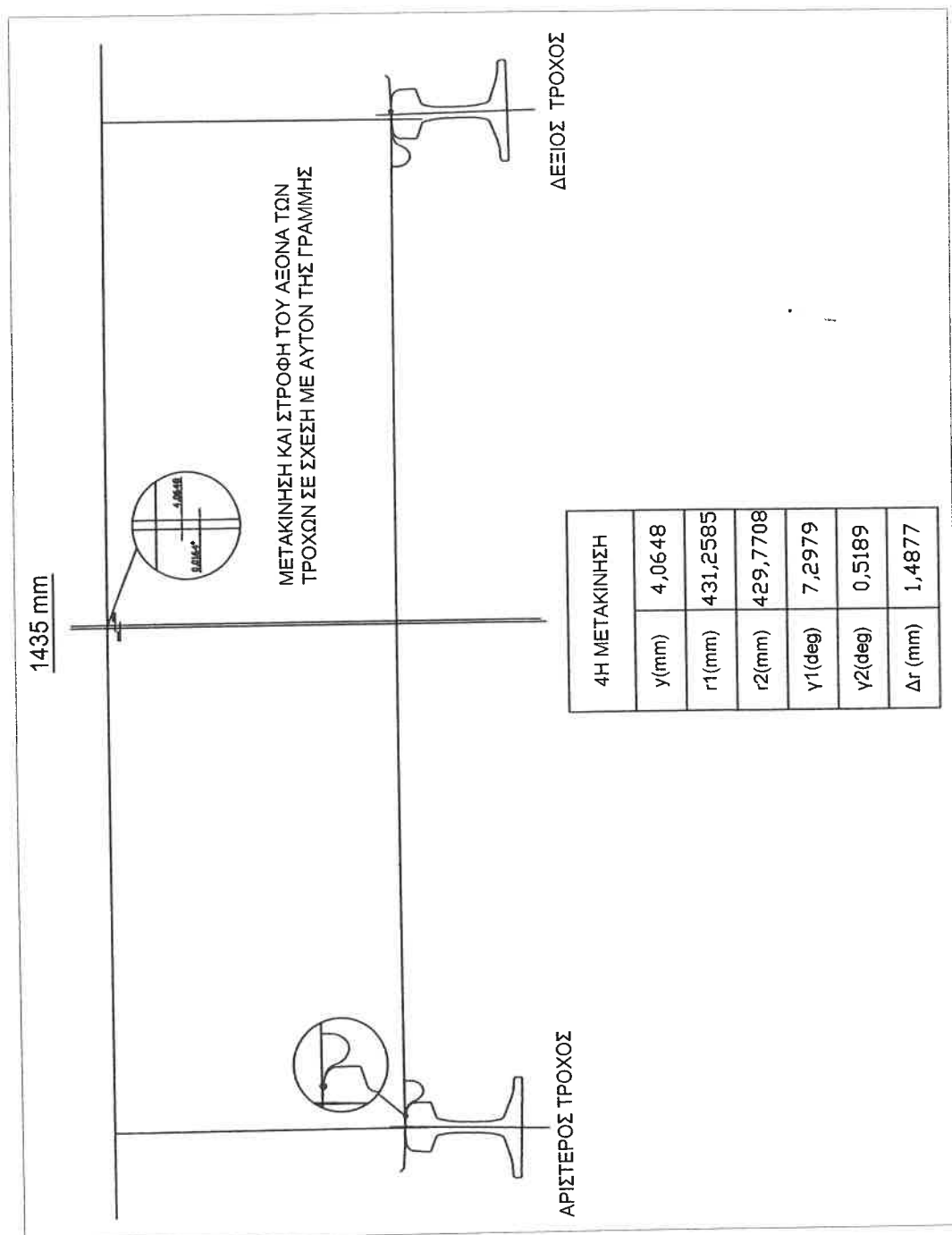
Σχήμα 5.5: 1η μετακίνηση (1435mm)



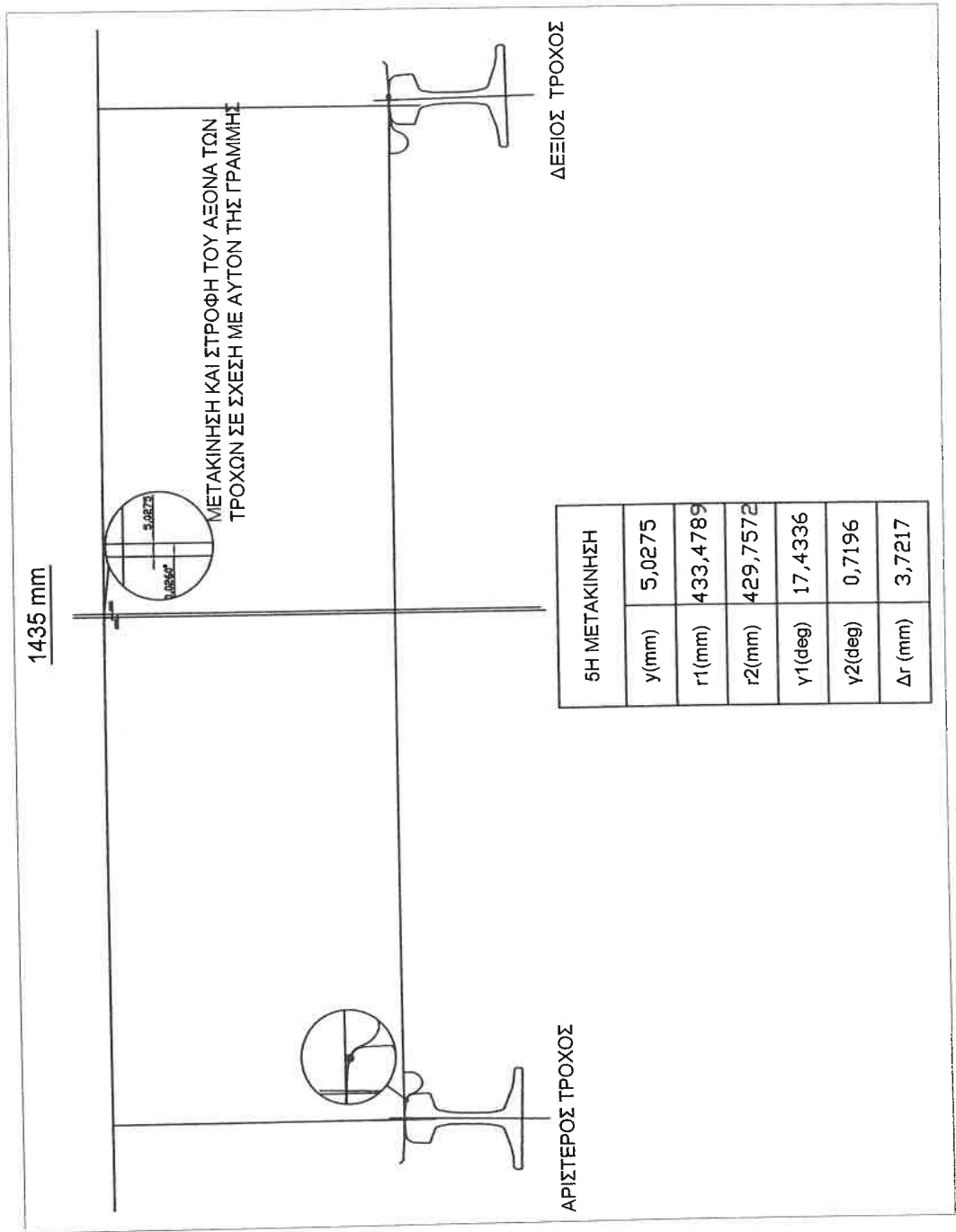
Σχήμα 5.6: 2η μετακίνηση (1435 mm)



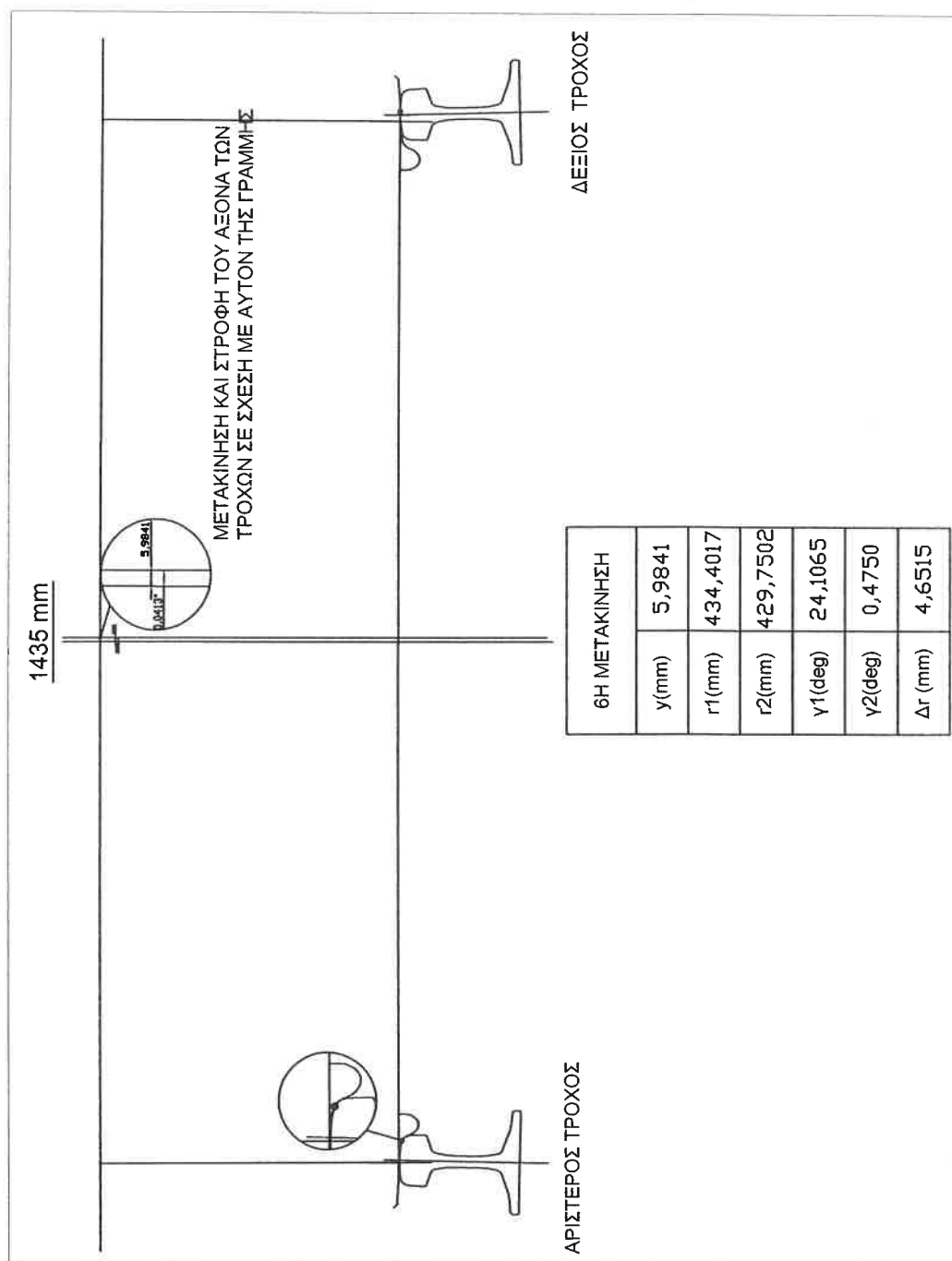
Σχήμα 5.7: 3η μετακίνηση (1435 mm)



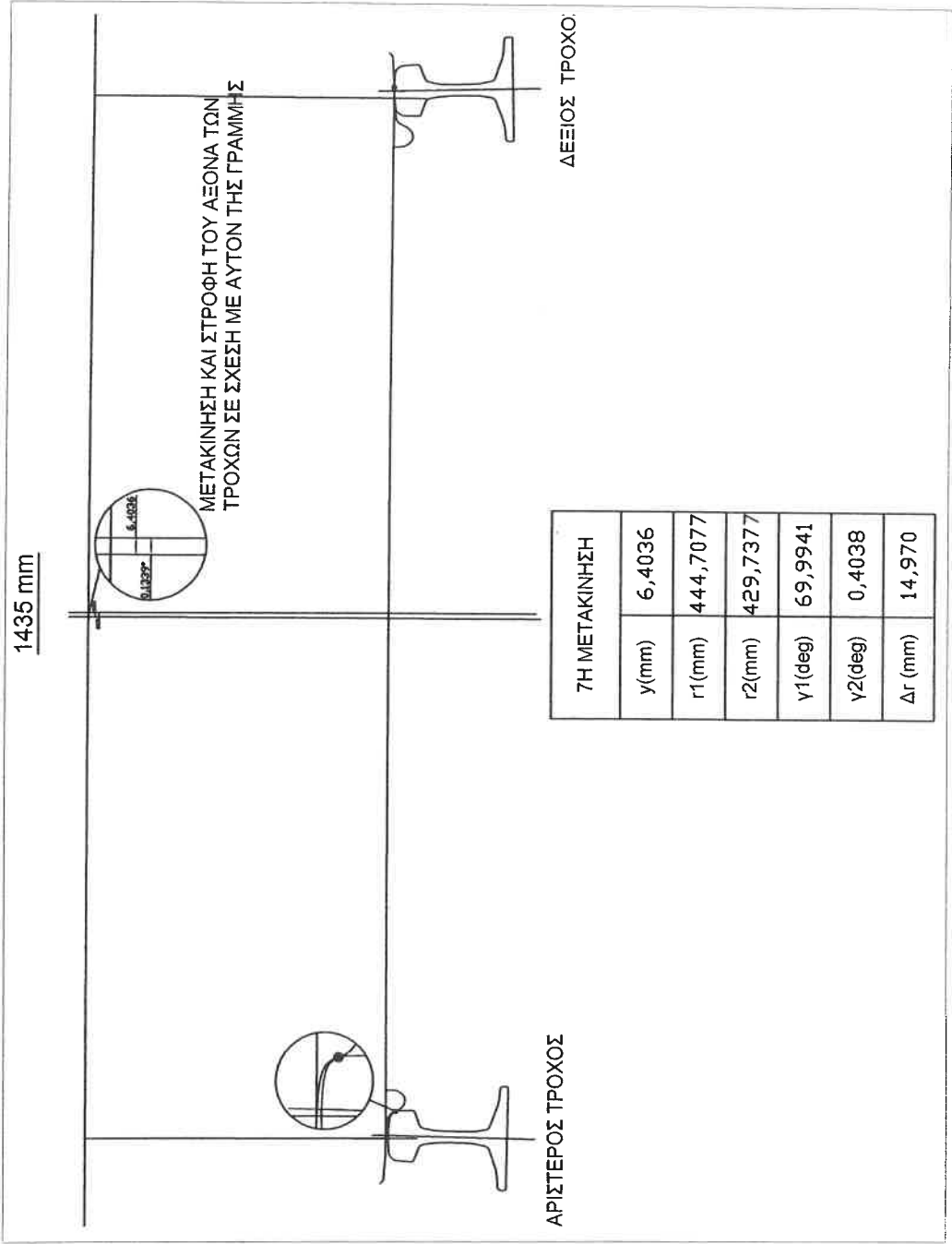
Σχήμα 5.8: 4η μετακίνηση (1435 mm)



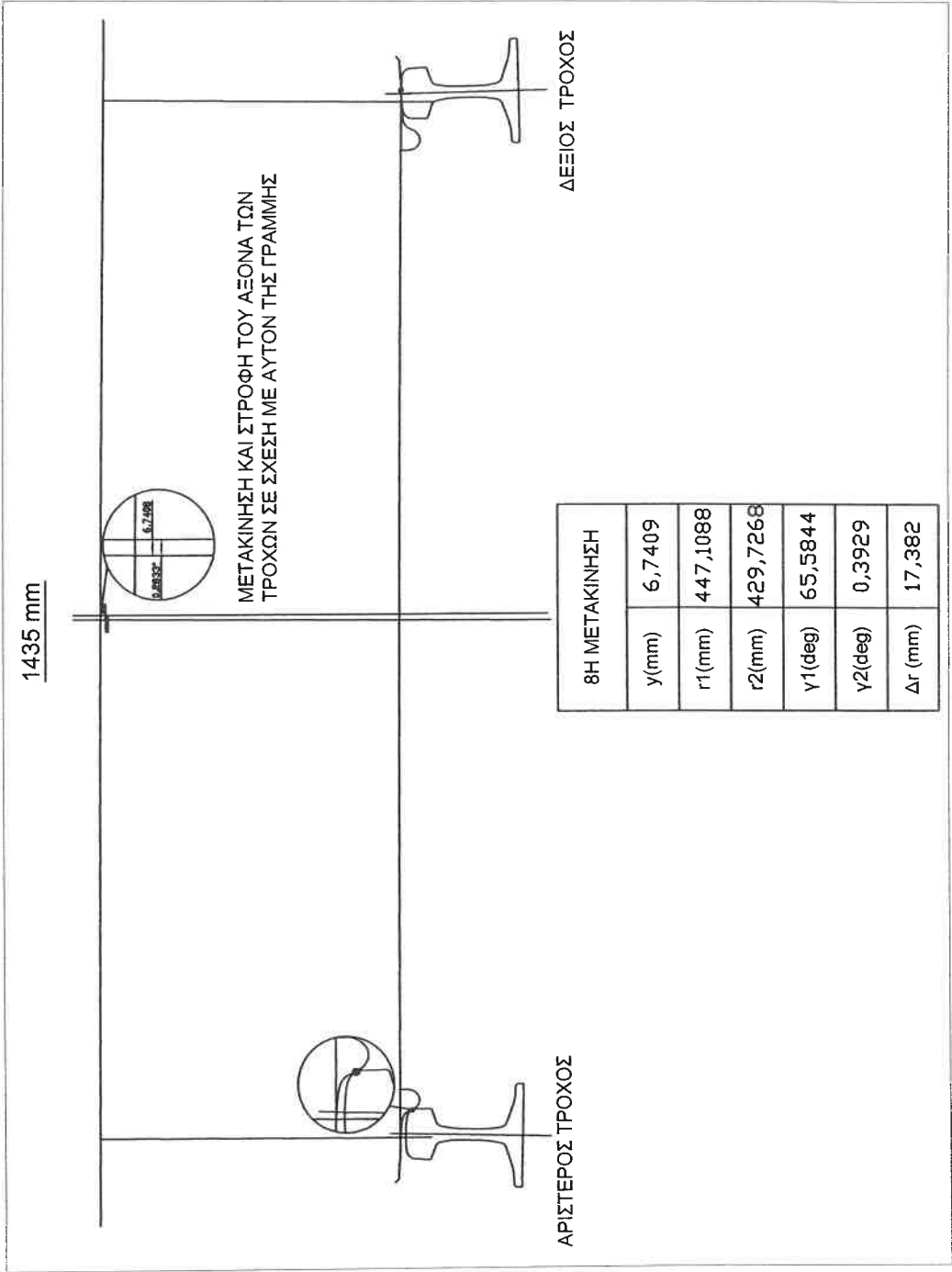
Σχήμα 5.9: 5 η μετακίνηση (1435 mm)



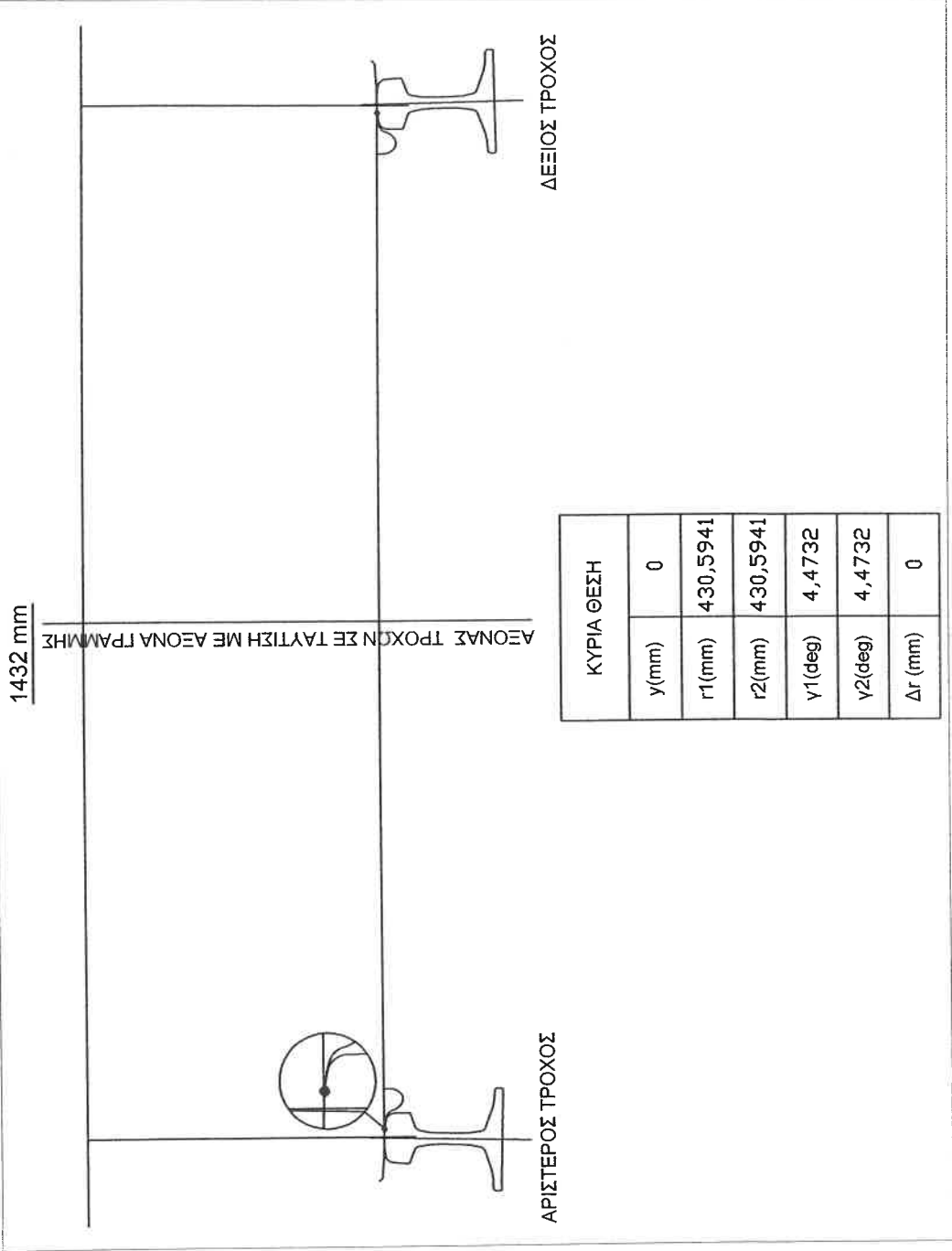
Σχήμα 5.10: 6^η μετακίνηση (1435 mm)



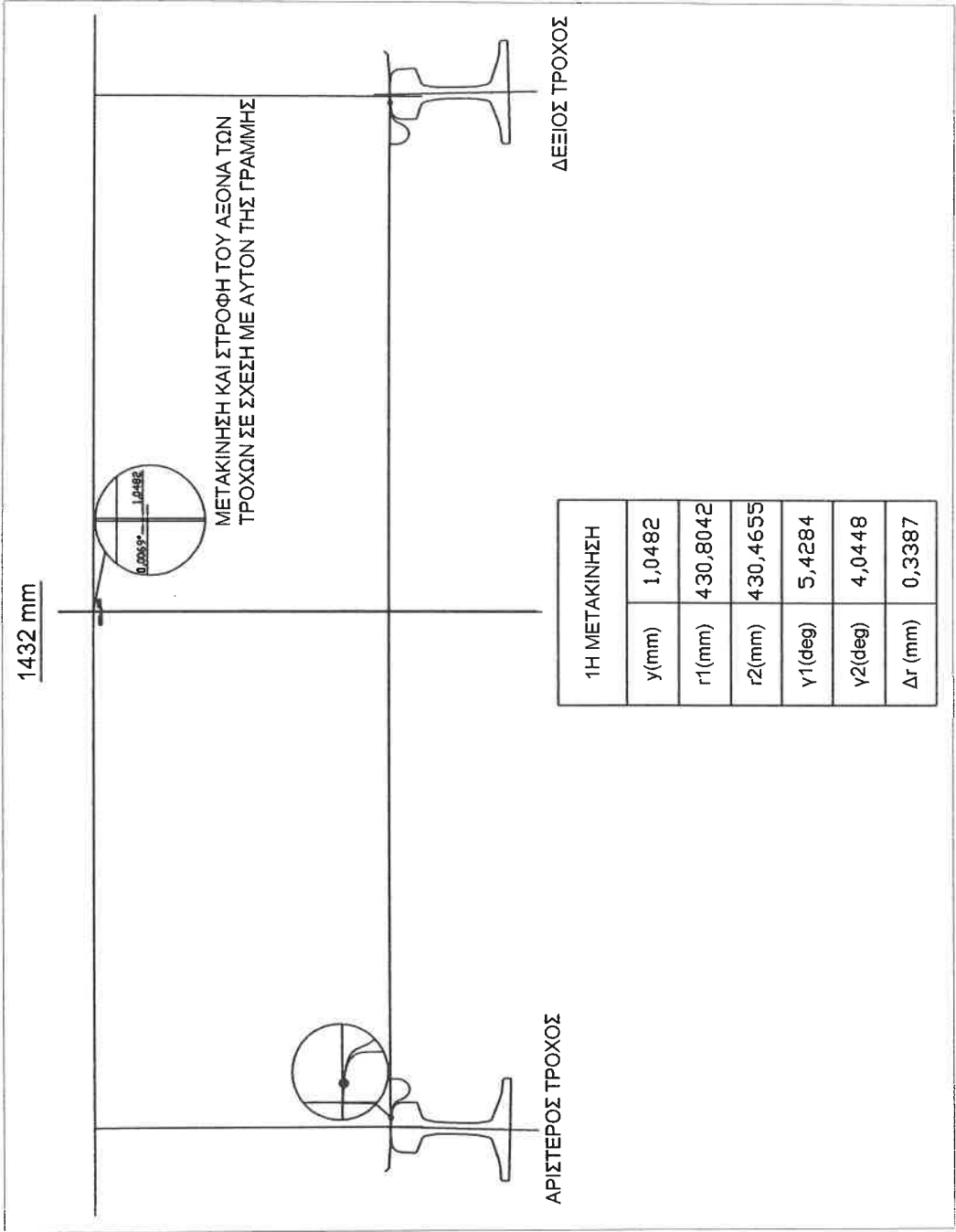
Σχήμα 5.11: 7^η μετακίνηση (1435 mm)



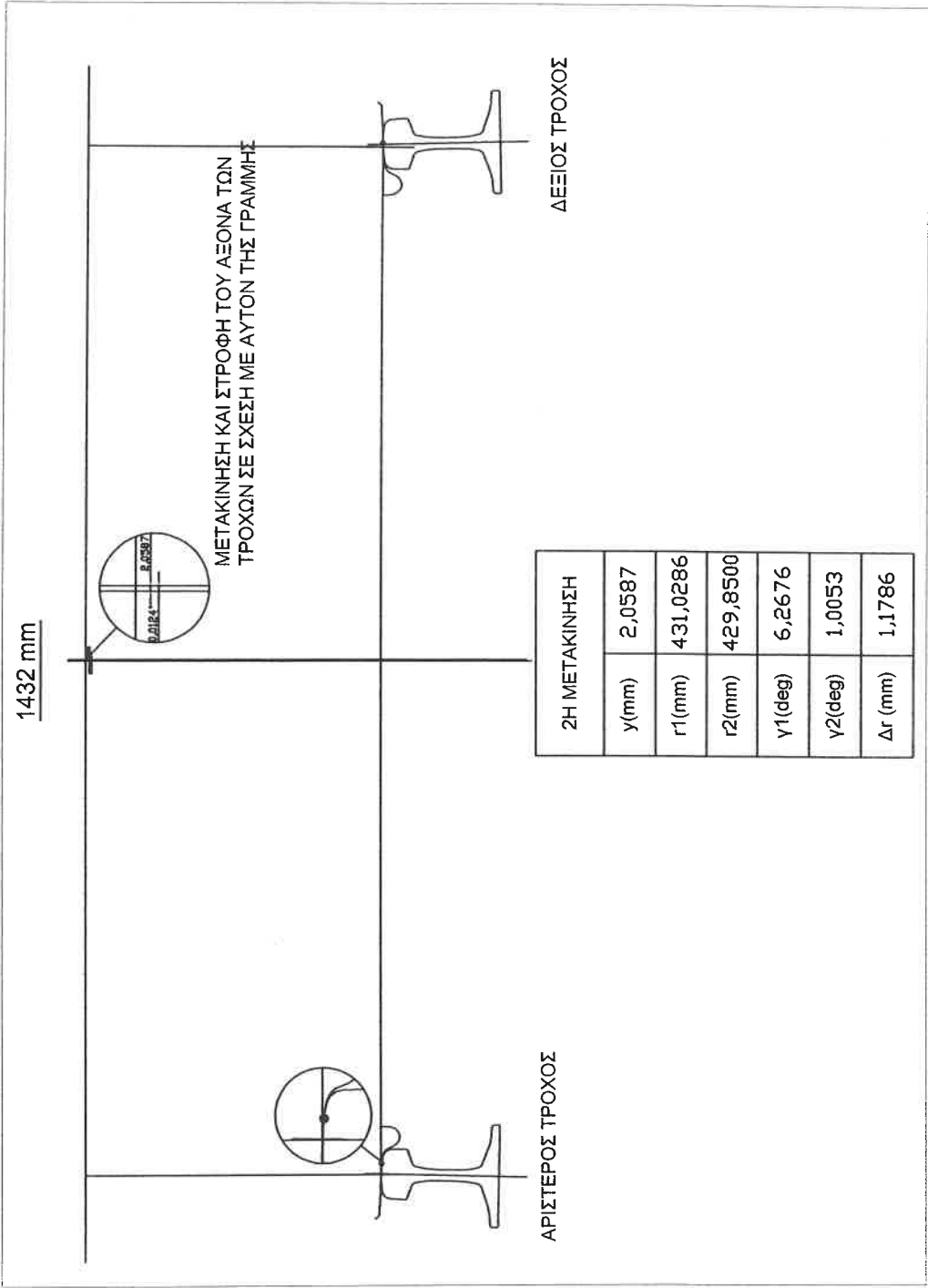
Σχήμα 5.12: 8^η μετακίνηση (1435 mm)



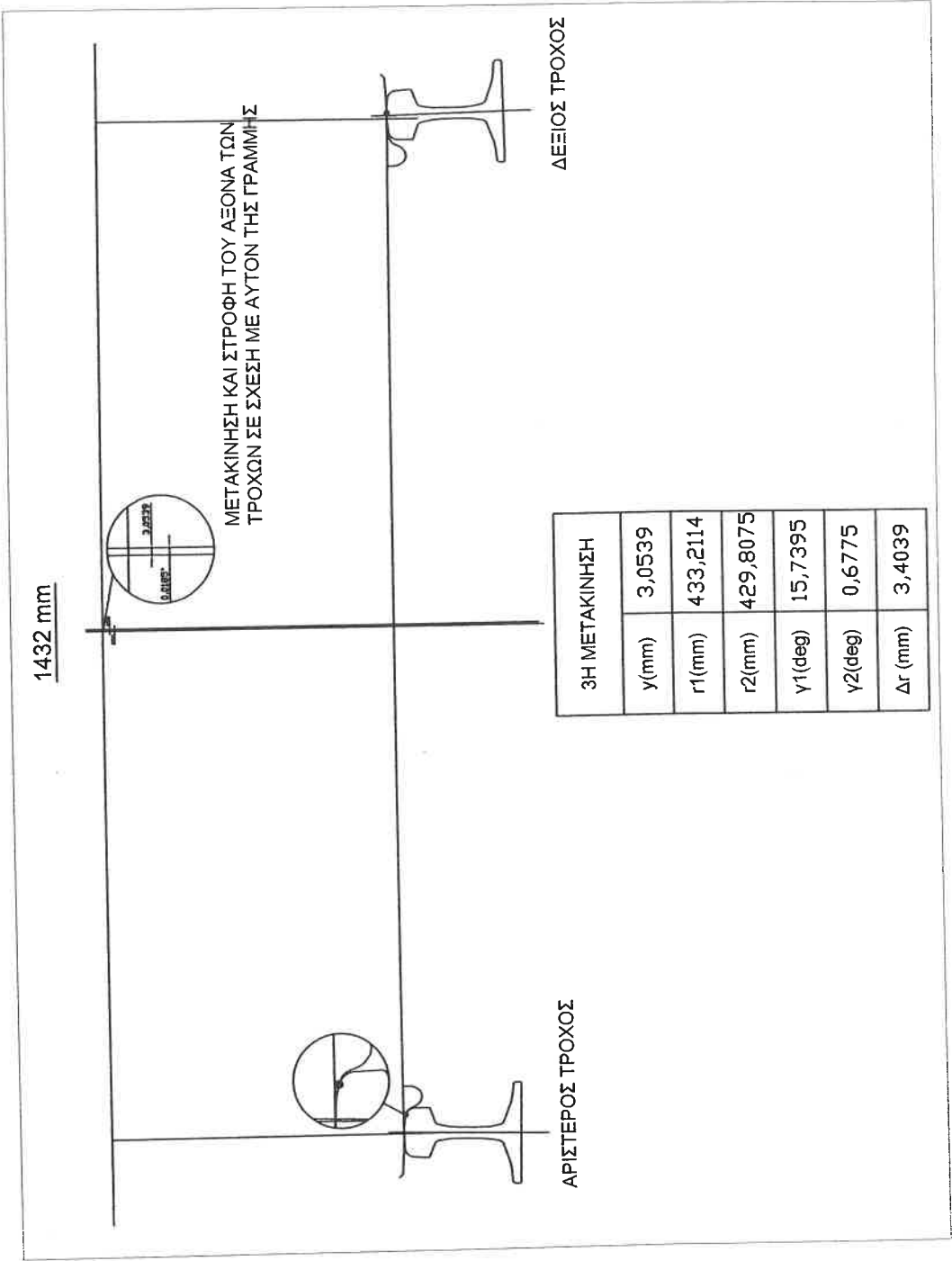
Σχήμα 5.13: κύρια θέση (1432 mm)



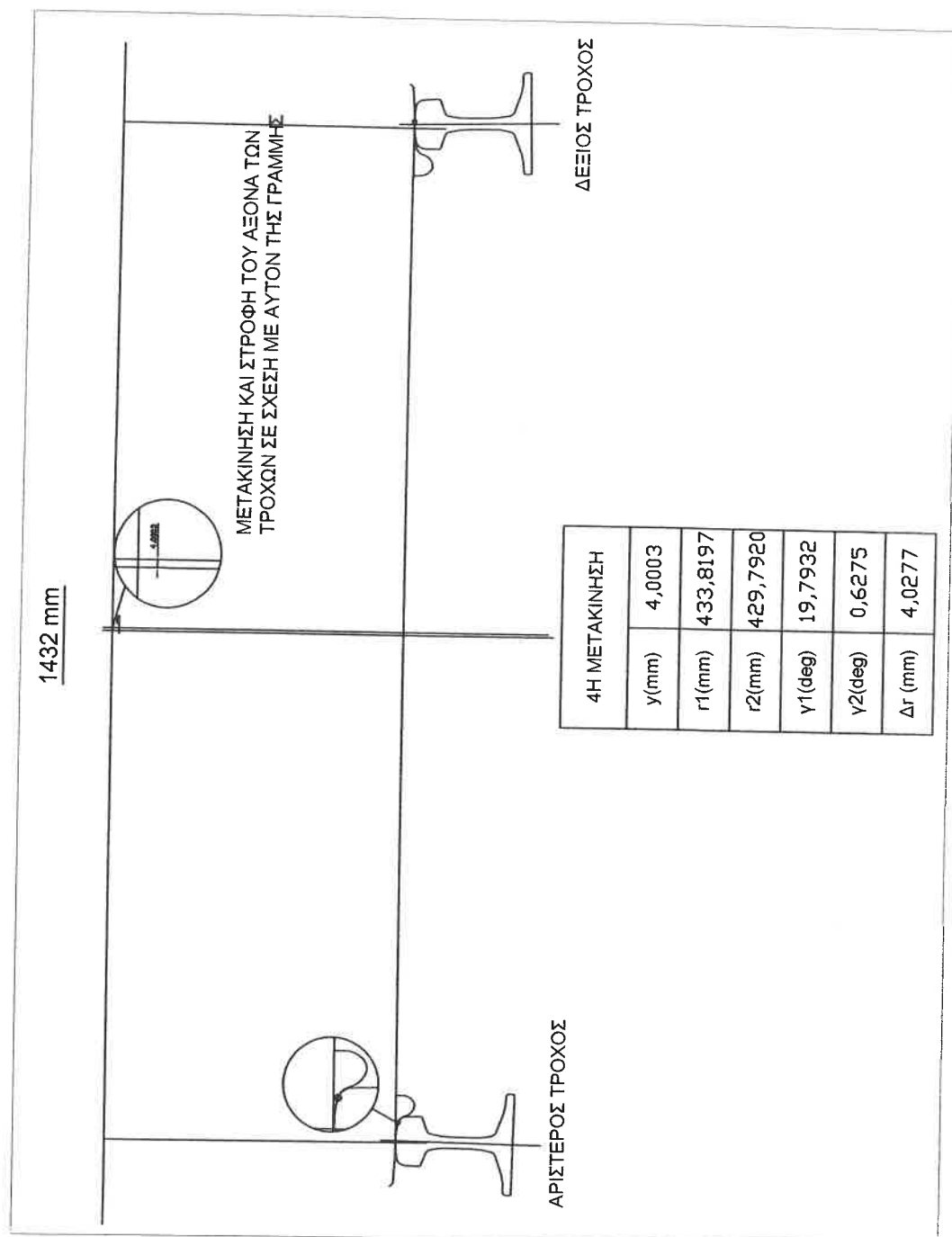
Σχήμα 5.14: 1^η μετακίνηση (1432 mm)



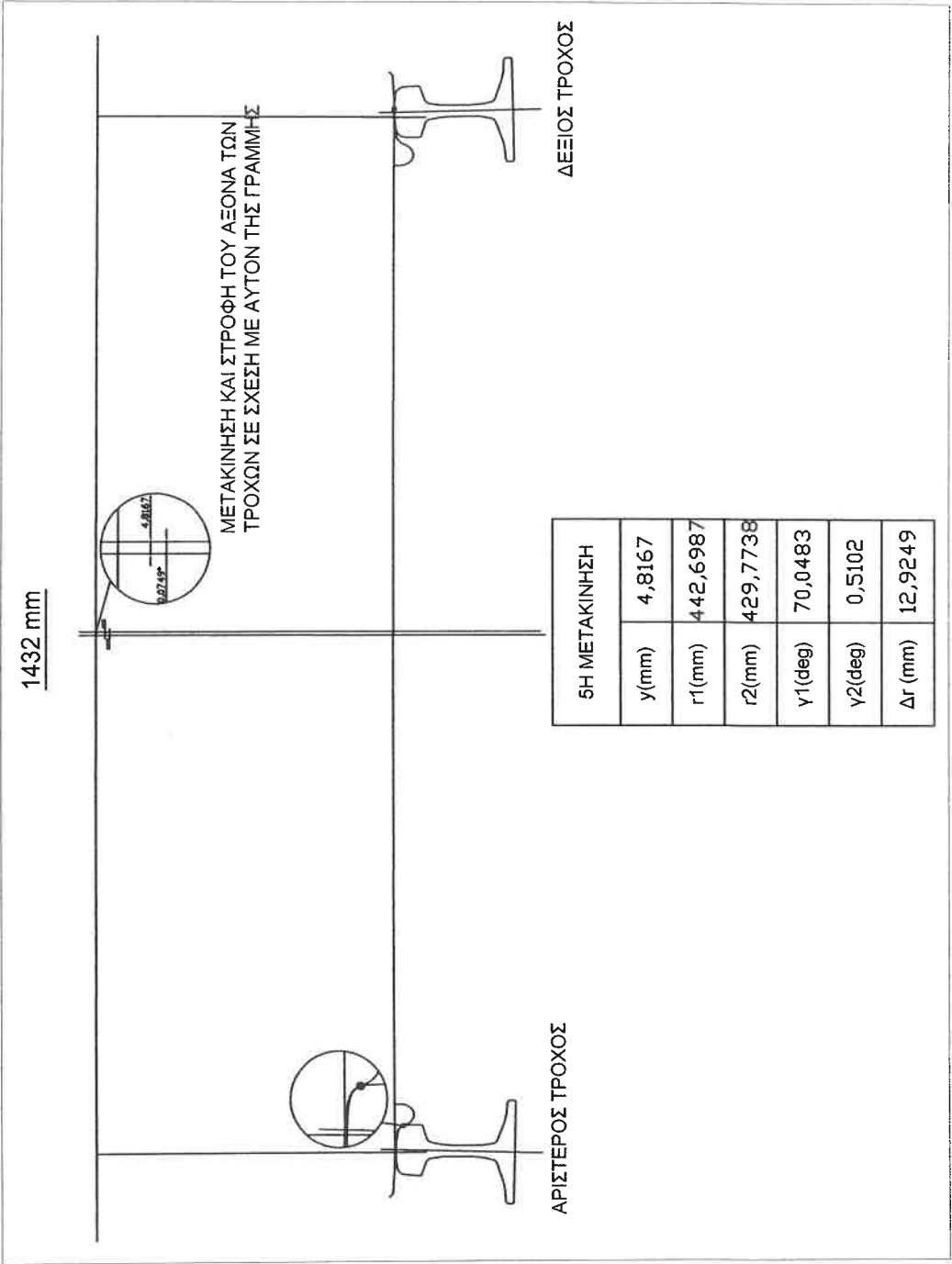
Σχήμα 5.15: 2^η μείκνιση (1432 mm)



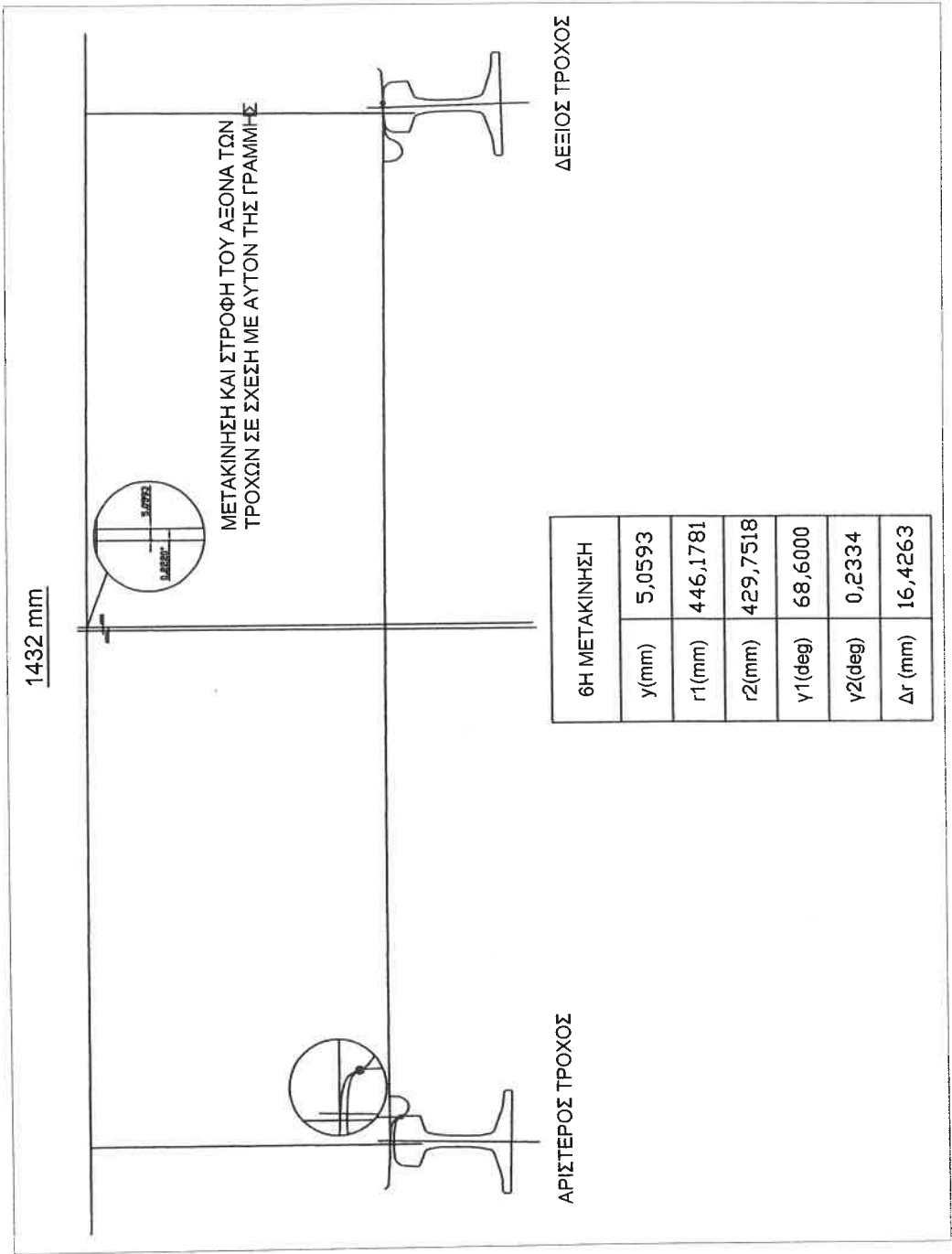
Σχήμα 5.16: 3^η μετακίνηση (1432 mm)



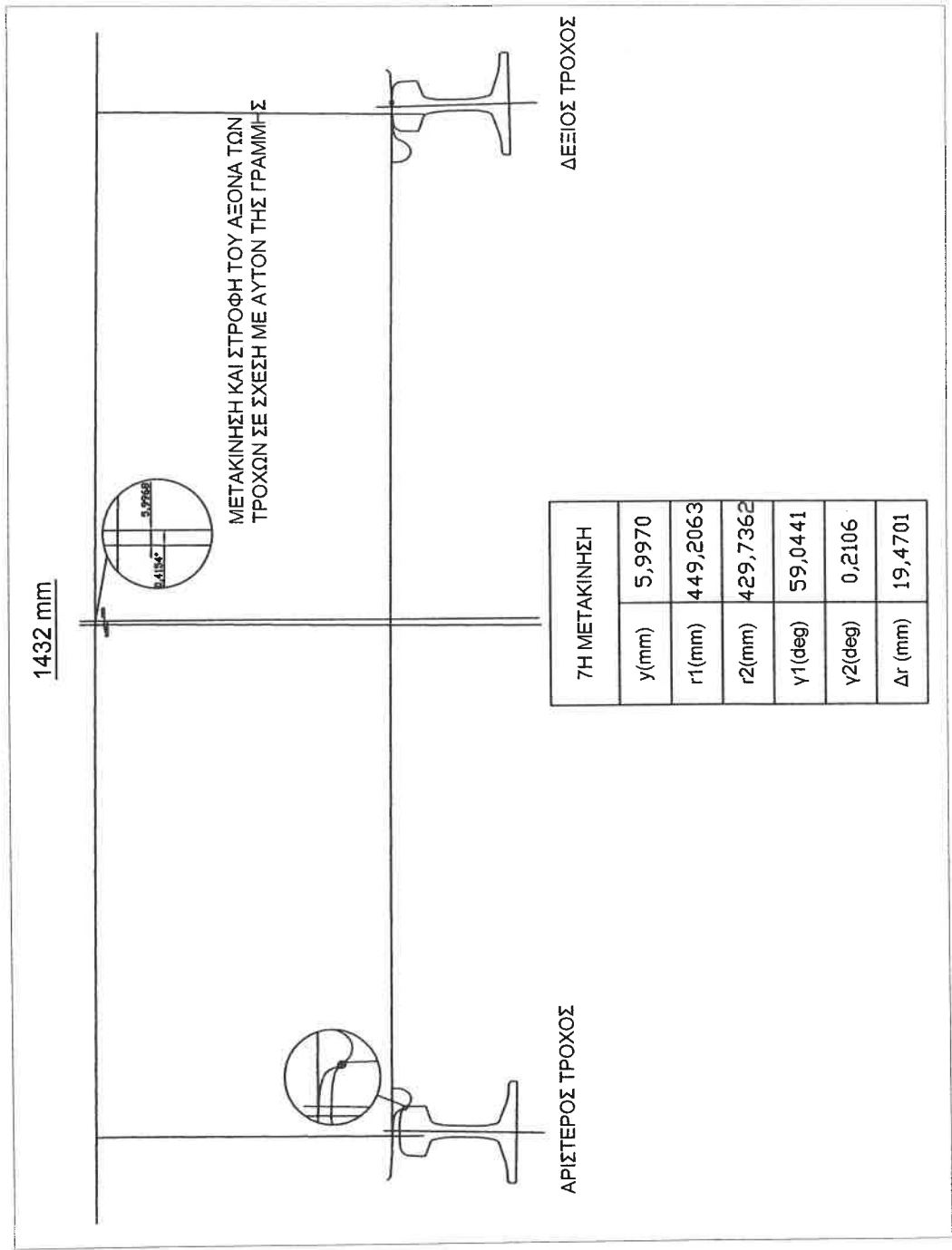
Σχήμα 5.17: 4^η μετακίνηση (1432 mm)



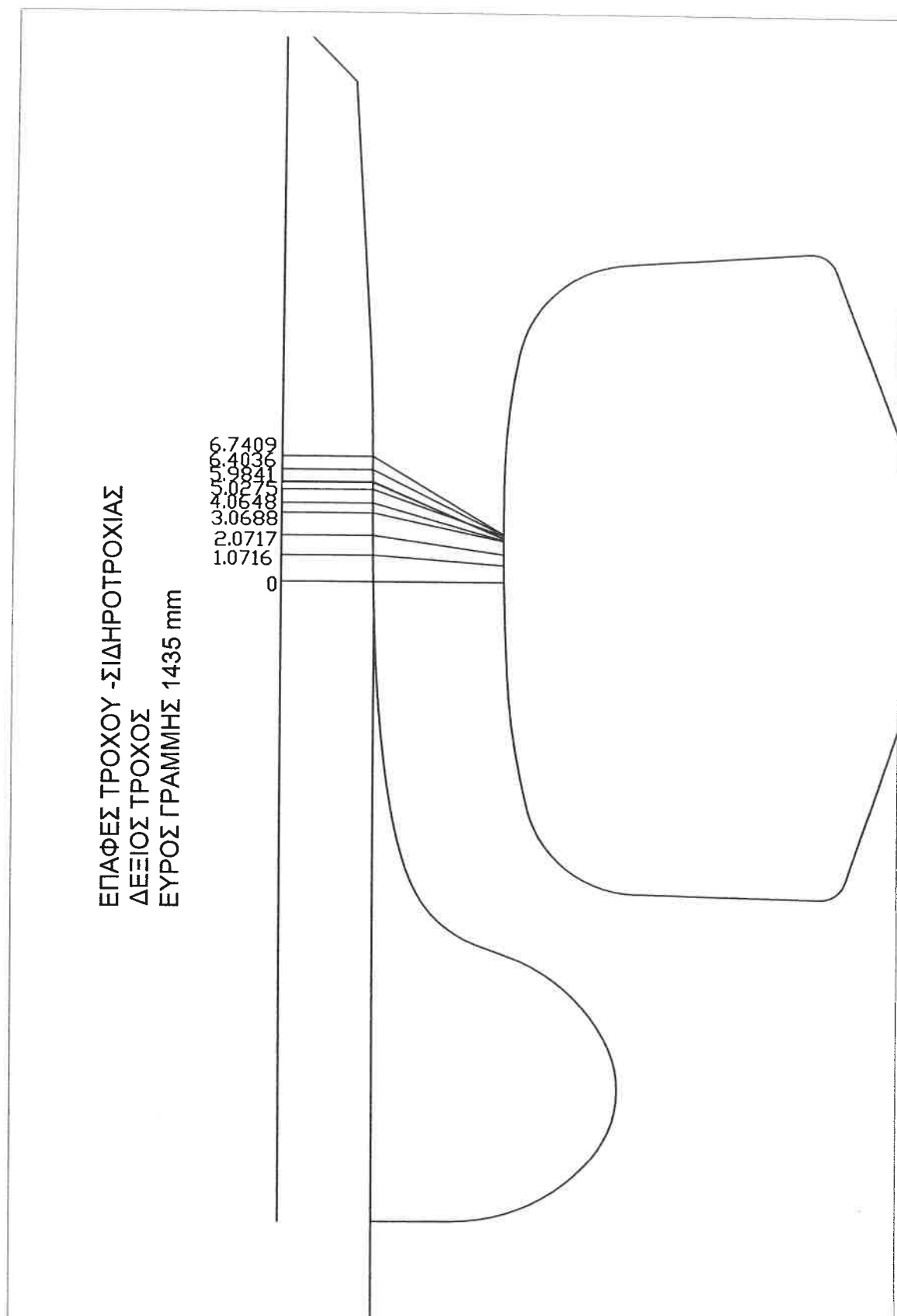
Σχήμα 5.18: 5^η μετακίνηση (1432 mm)



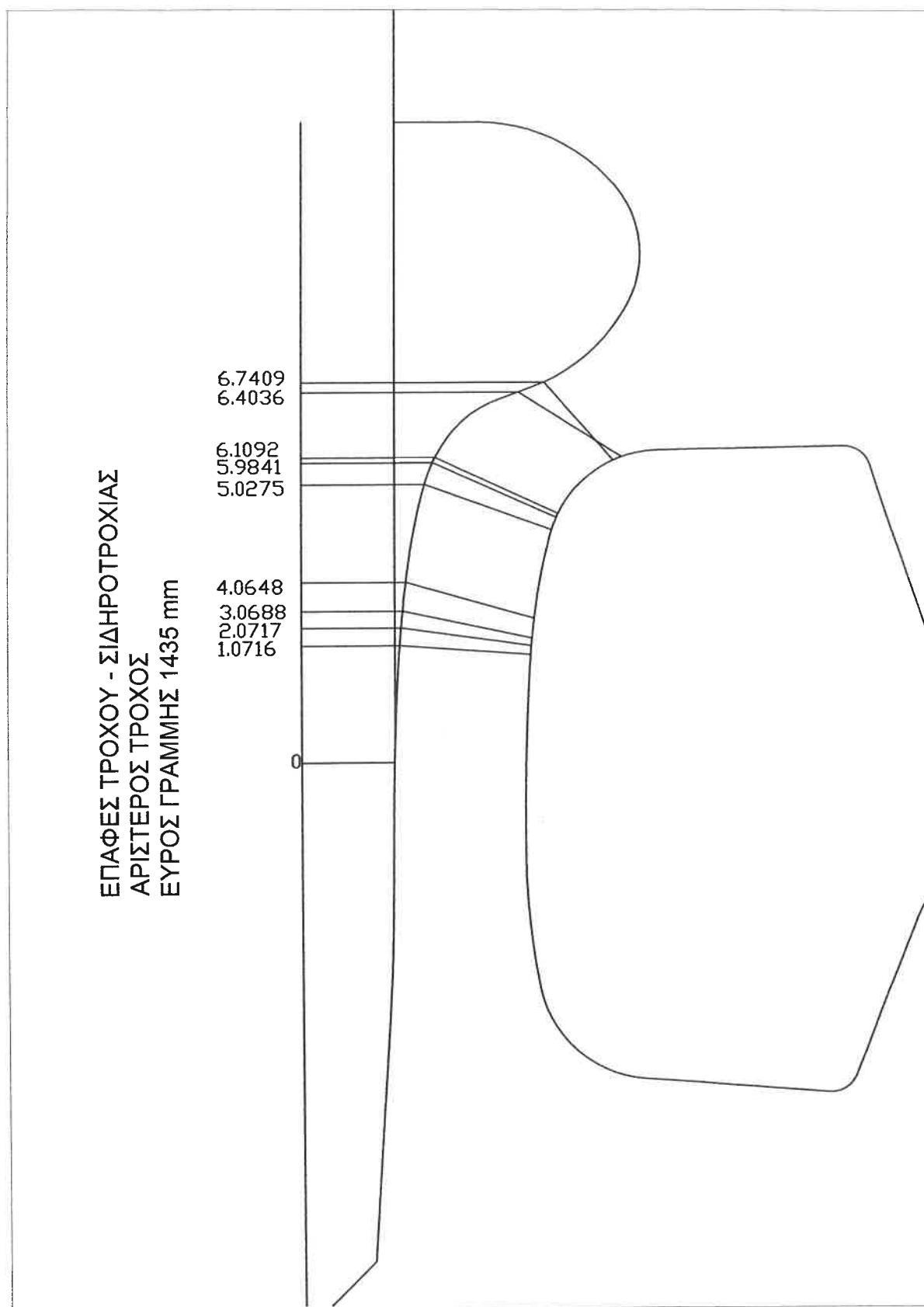
Σχήμα 5.19: 6^η μετακίνηση (1432 mm)



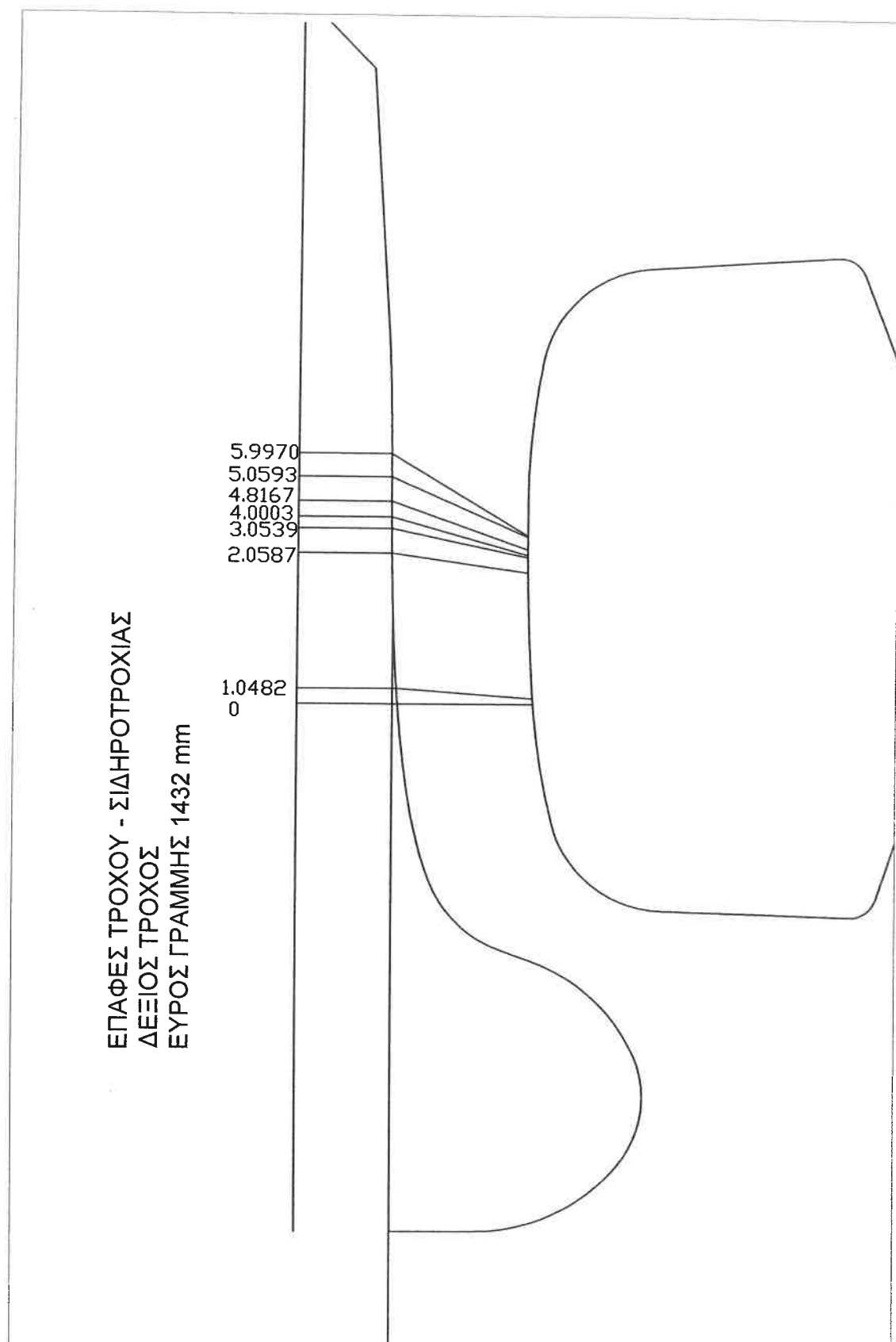
Σχήμα 5.20: 7^η μετακίνηση (1432 mm)



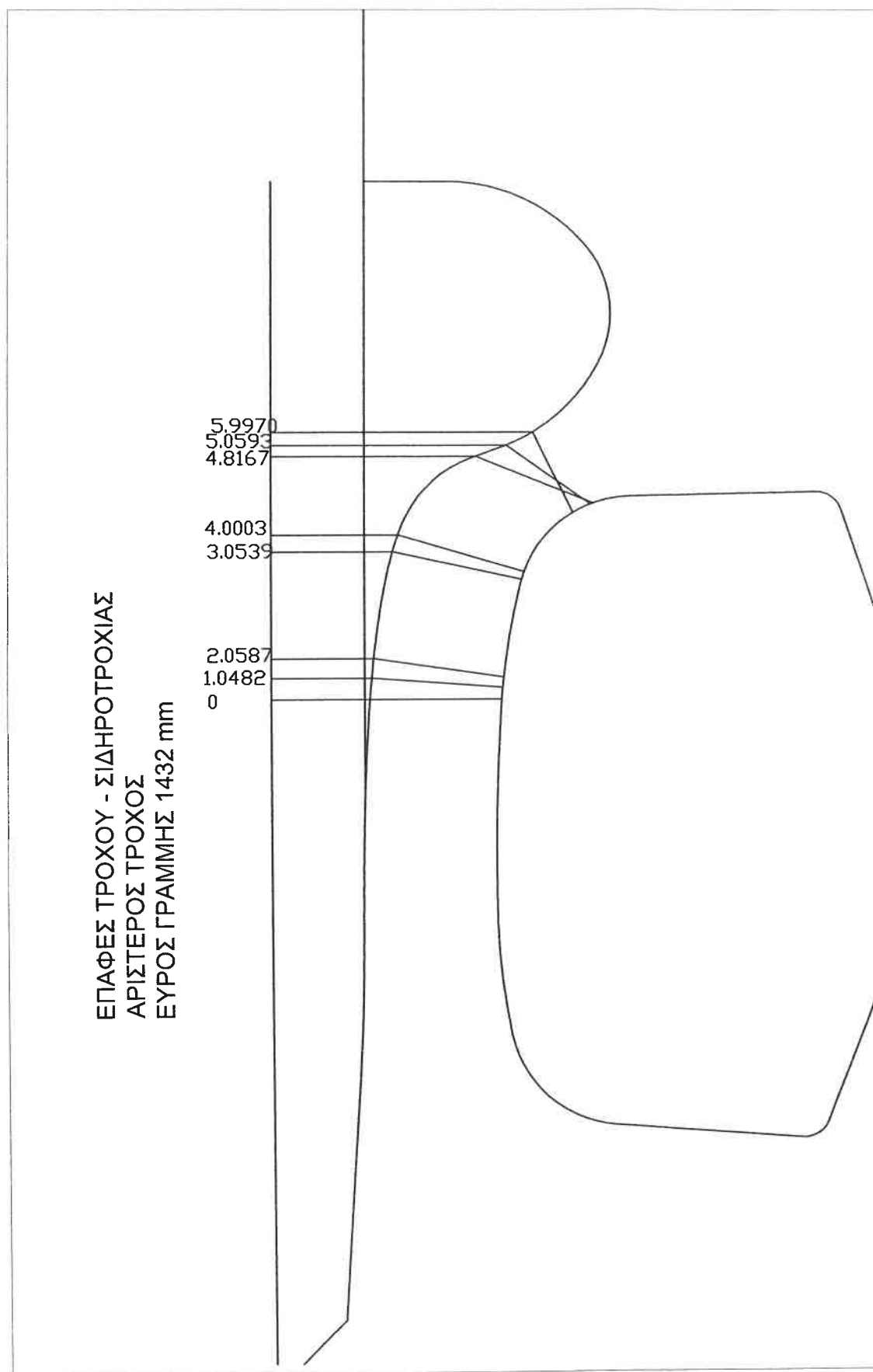
Σχήμα 5.21: Σημεία επαφών για τον αποκλίνοντα τροχό (1435 mm)



Σχήμα 5.22: Σημεία επαφών για τον προσπίπτοντα τροχό (1435 mm)

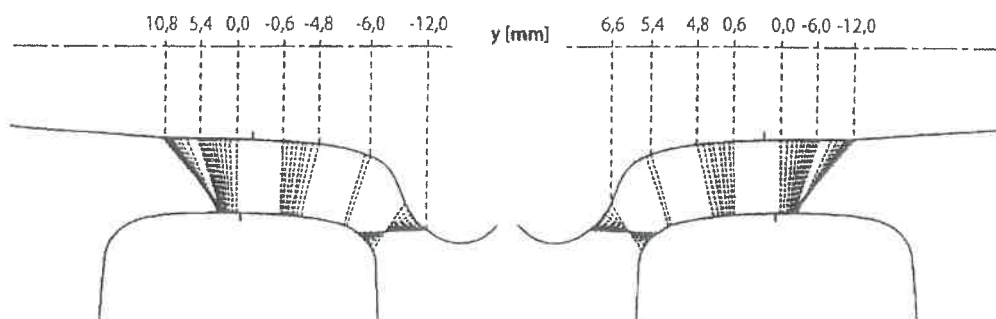


Σχήμα 5.23: Σημεία επαφών για τον αποκλίνοντα τροχό (1432 mm)

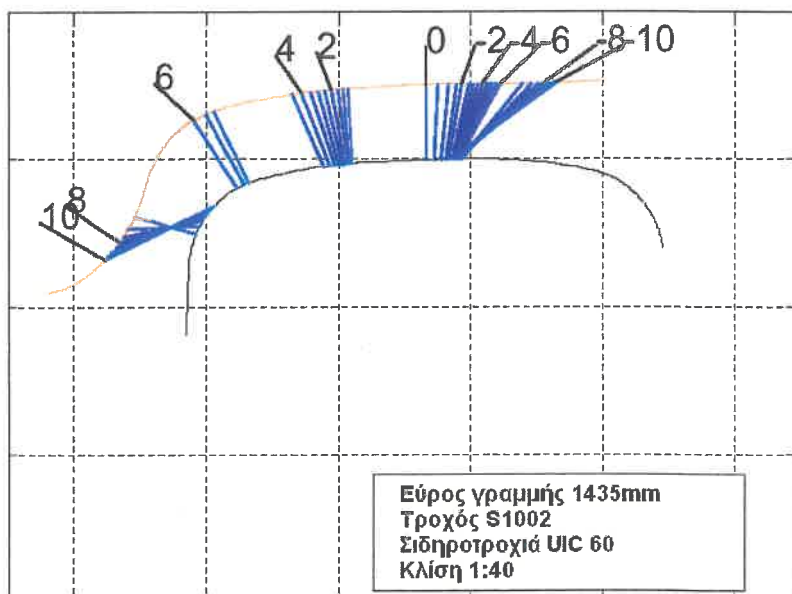


Σχήμα 5.24: Σημεία επαφών για τον προσπίπτοντα τροχό (1432 mm)

Αξίζει μάλιστα να σημειωθεί ότι τα σχήμα 5.21 και 5.22 που παρουσιάζουν τα σημεία επαφής μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς για τις εγκάρσιες μετακινήσεις που πραγματοποιήθηκαν και για τιμή του εύρους γραμμής 1435mm συγκλίνουν με τα σχήματα 5.25 και 5.26 από τη διεθνή βιβλιογραφία.

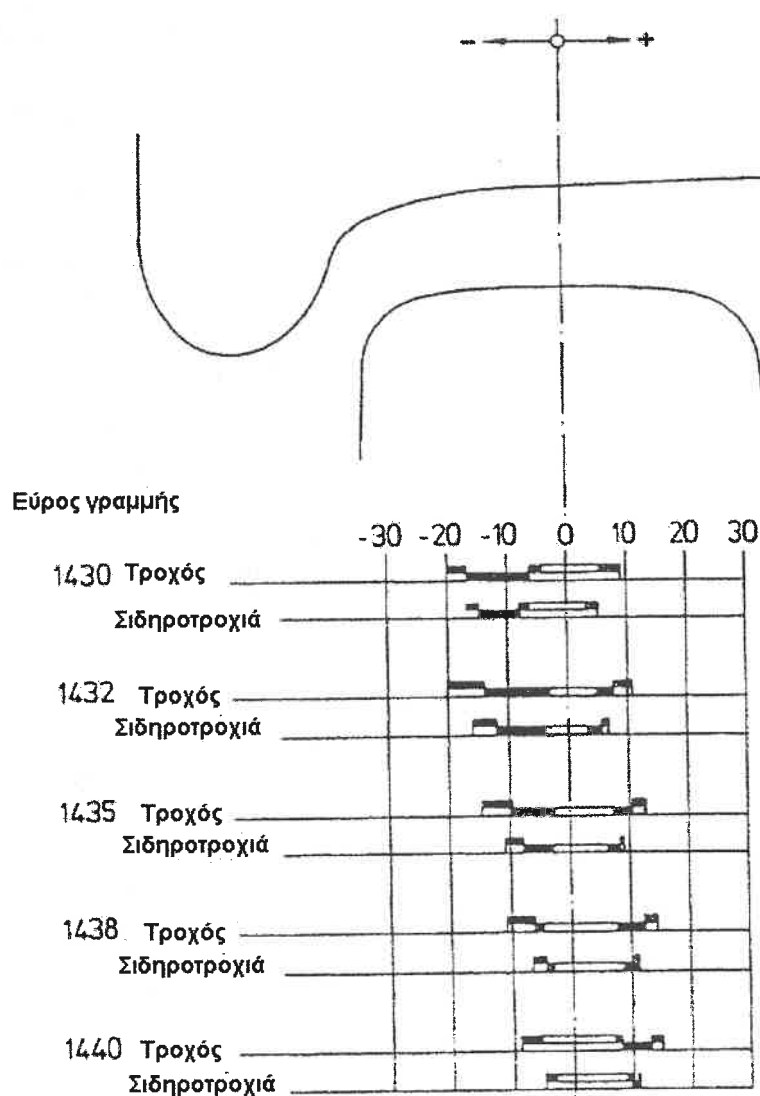


Σχήμα 5.25: Αντιστοιχία σημείων επαφής μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς για διάφορες εγκάρσιες μετακινήσεις και για εύρος γραμμής 1435mm [14]



Σχήμα 5.26: Αντιστοιχία σημείων επαφής μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς για διάφορες εγκάρσιες μετακινήσεις και για εύρος γραμμής 1435mm (2),(14)

Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.27 φαίνεται σε ποια τμήματα του τροχού και της σιδηροτροχιάς παρουσιάζονται τα σημεία επαφής όταν γίνεται εγκάρσια μετακίνηση. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται για τιμές του εύρους γραμμής 1430, 1432, 1435, 1438 και 1440mm και για τον τροχό S1002, τη σιδηροτροχιά UIC 60 και κλίση των σιδηροτροχιών 1:40.



Σχήμα 5.27: Τμήματα στα οποία συμβαίνει η επαφή τροχού και σιδηροτροχιάς για διάφορες τιμές του εύρους γραμμής [13]

5.5 Αποτελέσματα που εξήχθησαν με την εφαρμογή στο AutoCAD

Στη συνέχεια δίνονται συγκεντρωμένα και πινακοποιημένα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το AutoCAD και για τις συγκεκριμένες οριζόντιες μετακινήσεις. Ο πίνακας 5.1 αντιστοιχεί στα 1435 mm ενώ ο πίνακας 5.2 στα 1432 mm.

1435 mm

y (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	Δr (mm)
0	429,91	429,91	0
1,0716	430,5452	429,8478	0,6974
2,0717	430,7124	429,8123	0,9001
3,0688	430,8906	429,7821	1,1085
4,0648	431,2585	429,7708	1,4877
5,0275	433,4789	429,7572	3,7217
5,9841	434,4017	429,7502	4,6515
6,4036	444,7077	429,7377	14,97
6,7409	447,1088	429,7268	17,382

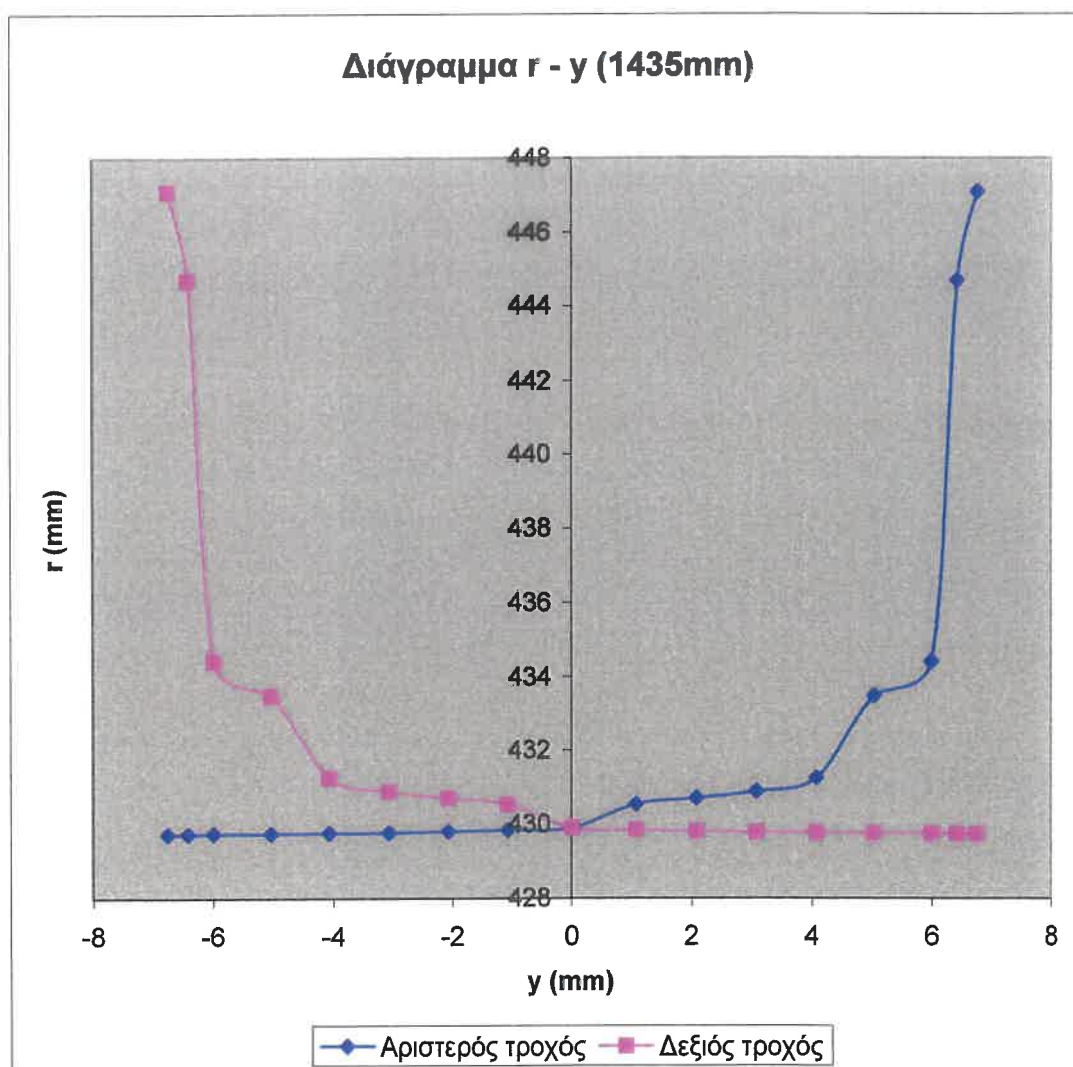
Πίνακας 5.1: Διαφορές ακτινών κύλισης για δεδομένες οριζόντιες μετατοπίσεις

1432 mm

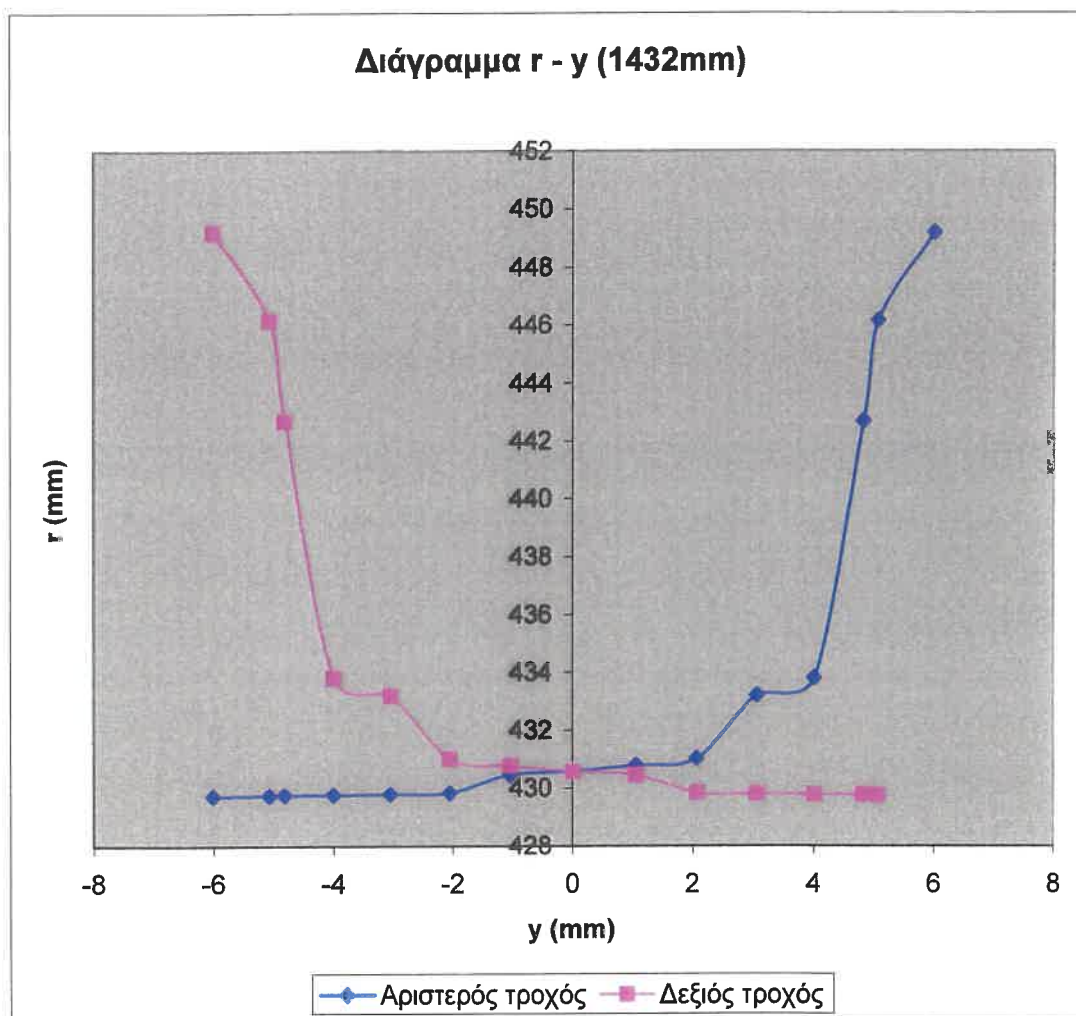
y (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	Δr (mm)
0	430,5941	430,5941	0
1,0482	430,8042	430,4655	0,3387
2,0587	431,0286	429,85	1,1786
3,0539	433,2114	429,8075	3,4039
4,0003	433,8197	429,792	4,0277
4,8167	442,6987	429,7738	12,9249
5,0593	446,1781	429,7518	16,4263
5,997	449,2063	429,7362	19,4701

Πίνακας 5.2: Διαφορές ακτινών κύλισης για δεδομένες οριζόντιες μετατοπίσεις

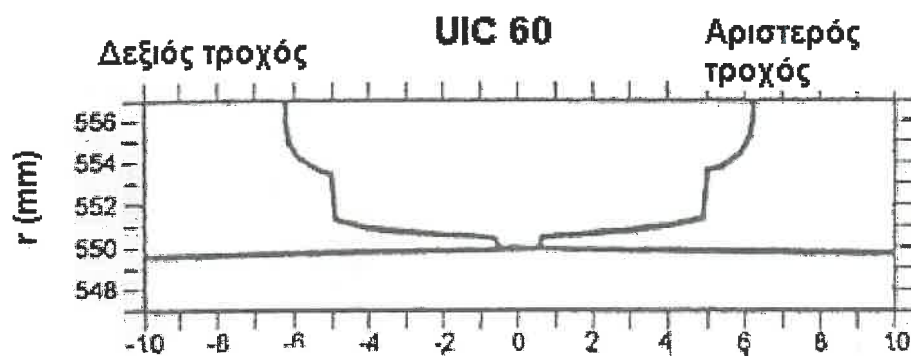
Στα σχήματα 5.28 και 5.29 παρουσιάζονται τα διαγράμματα $r - y$ όπου φαίνεται πως αλλάζει η ακτίνα κύλισης για κάθε εγκάρσια μετατόπιση που πραγματοποιήθηκε. Το σχήμα 5.28 προέκυψε για εύρος γραμμής 1435mm ενώ το σχήμα 5.29 για εύρος γραμμής 1432mm. Και στις δύο περιπτώσεις η ακτίνα του τροχού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 430mm, ενώ τα αποτελέσματα του σχήματος 5.28 μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα του σχήματος 5.30 που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία με τη μόνη διαφορά ότι ο τροχός που έχει χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση αυτή έχει ακτίνα 550mm.



Σχήμα 5.28: Διάγραμμα $r - y$ για την περίπτωση του εύρους γραμμής των 1435mm και για ακτίνα τροχού 430mm

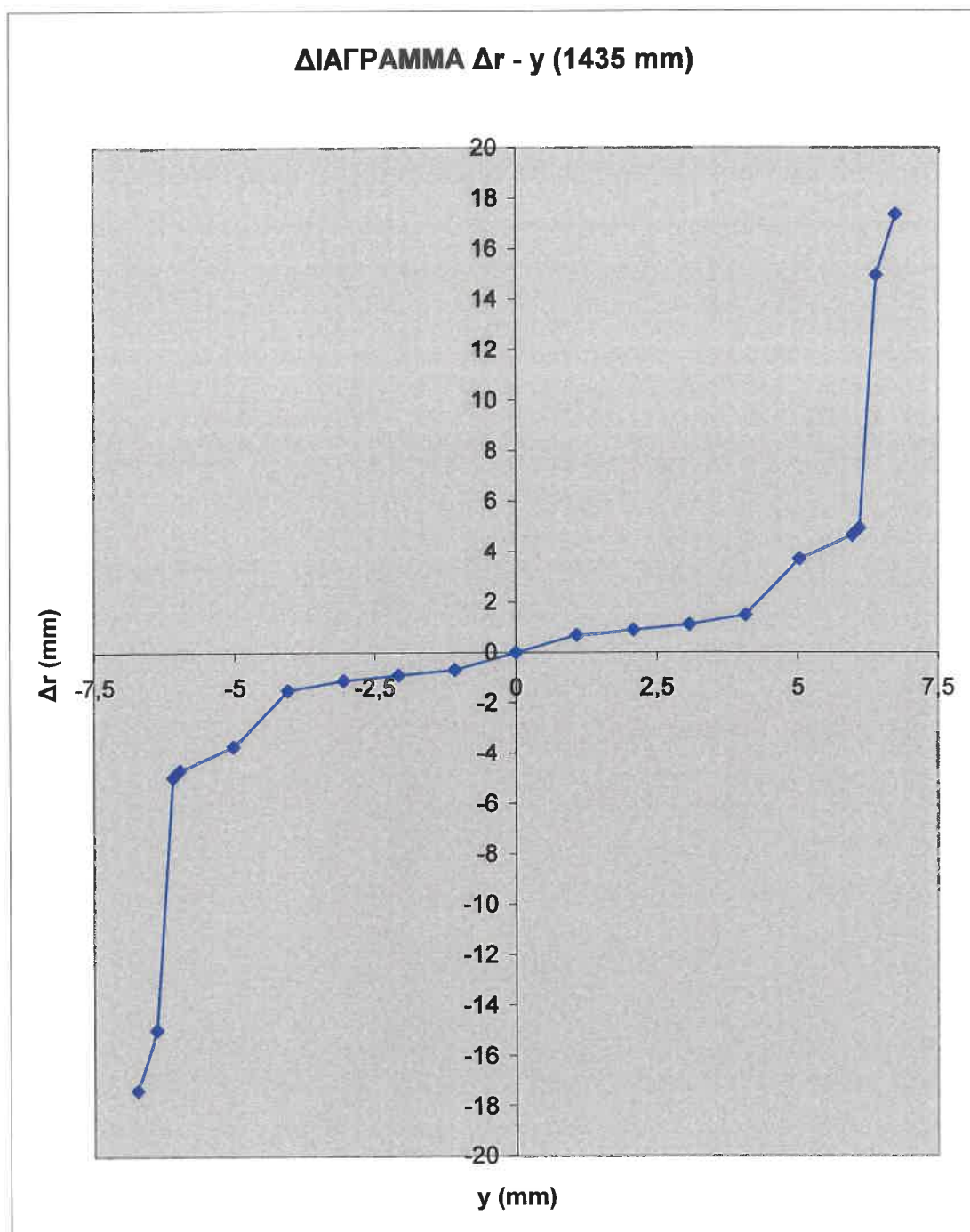


Σχήμα 5.29: Διάγραμμα r – y για την περίπτωση του εύρους γραμμής των 1432mm και για ακτίνα τροχού 430mm

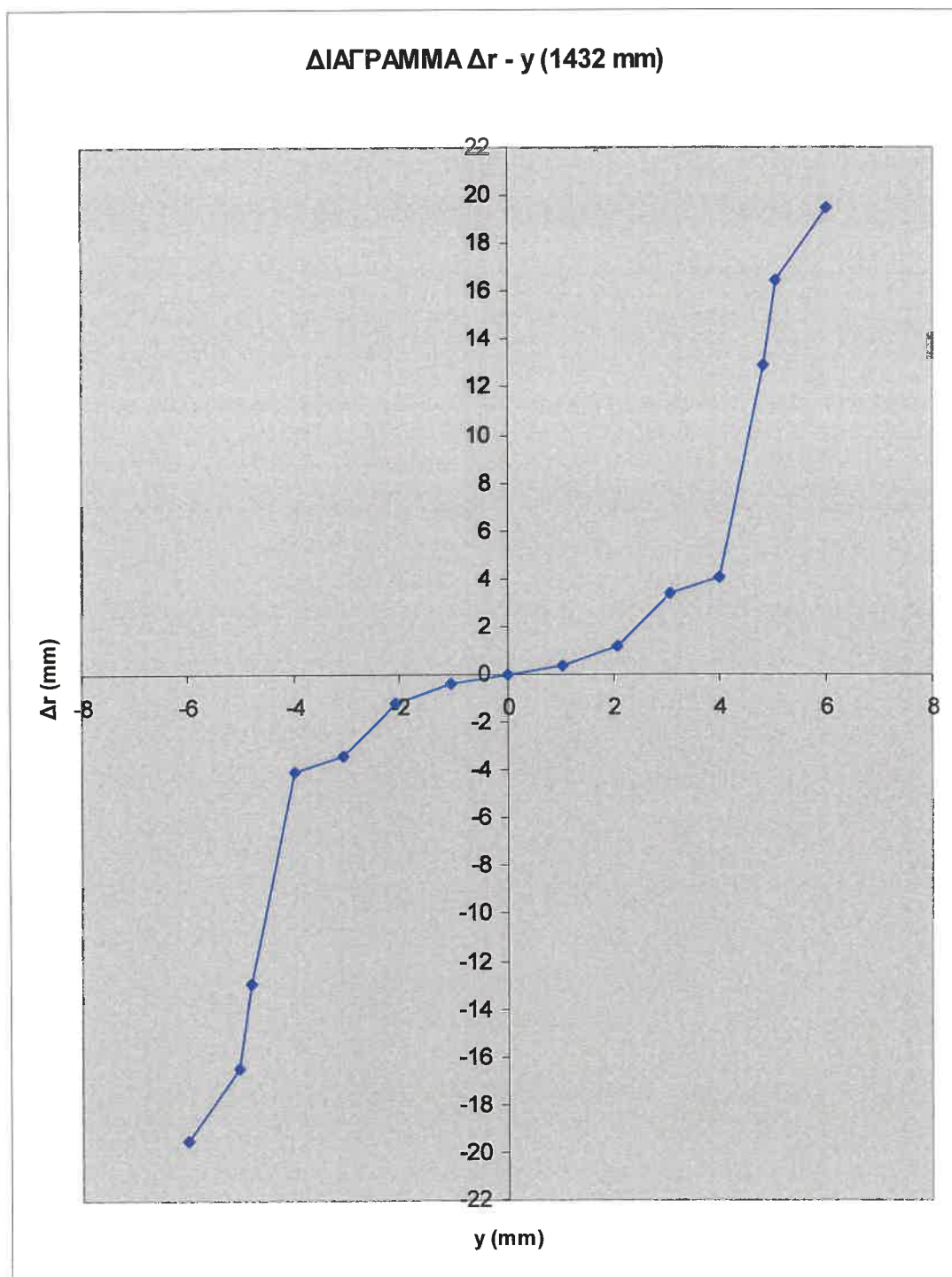


Σχήμα 5.30: Διάγραμμα r – y για την περίπτωση του εύρους γραμμής των 1435mm και για ακτίνα τροχού 550mm [14]

Οι τιμές Δr και y απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Το σχήμα 5.31 αντιστοιχεί σε εύρος γραμμής 1435 mm ενώ το σχήμα 5.32 αντιστοιχεί στα 1432 mm.

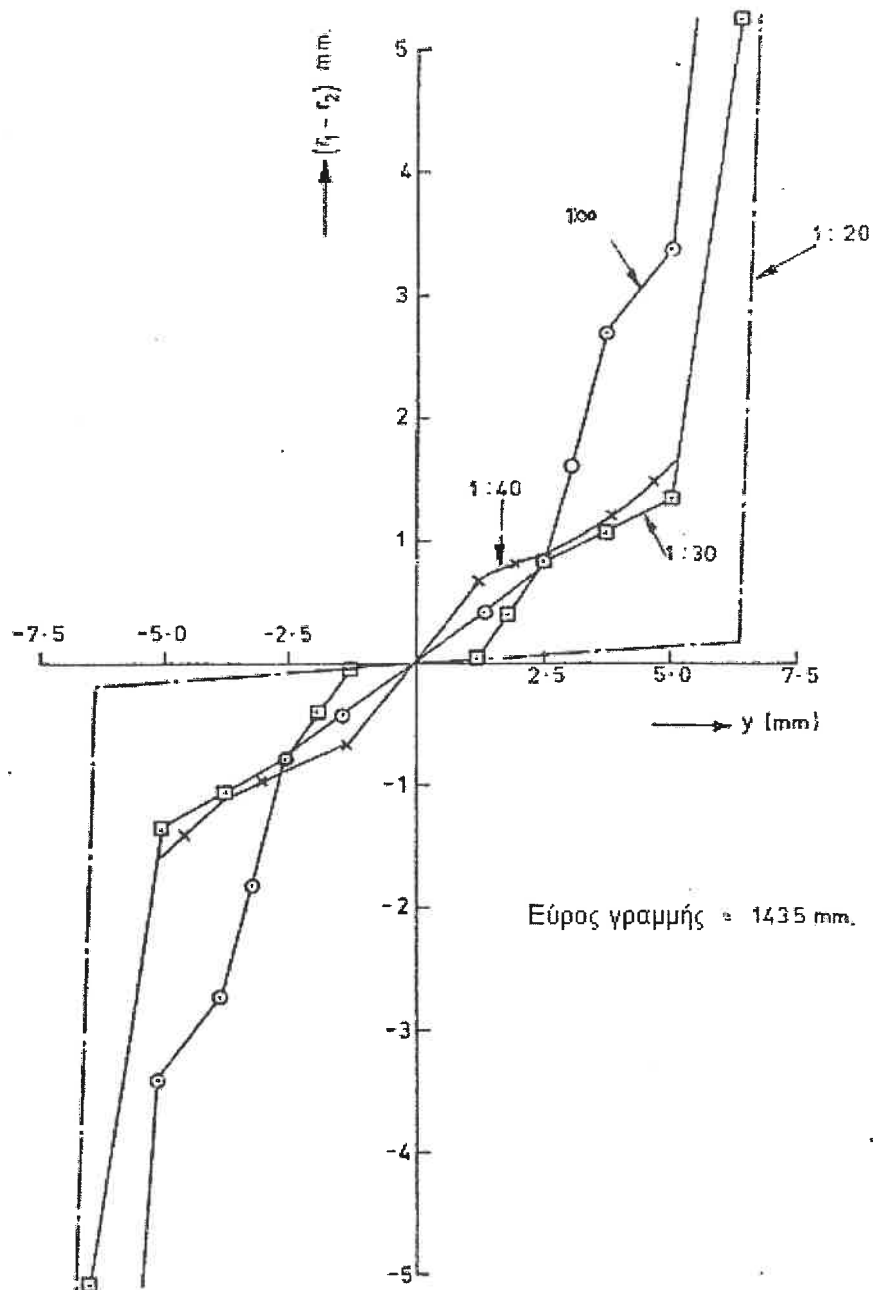


Σχήμα 5.31: Διάγραμμα Δr – y για εύρος γραμμής 1435mm.



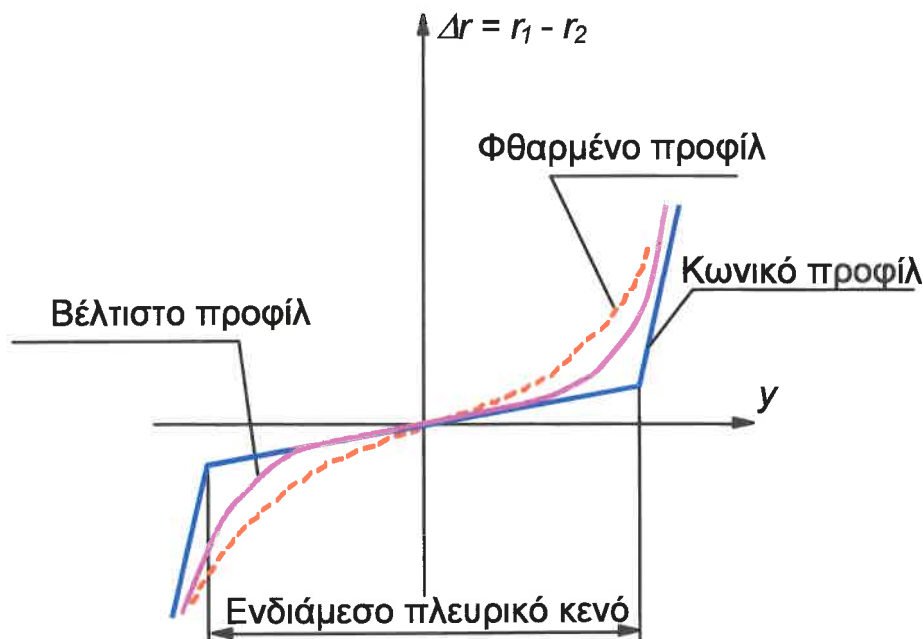
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα $\Delta r - y$ για εύρος γραμμής 1432mm.

Μάλιστα το σχήμα 5.31 που παρουσιάστηκε παραπάνω και στο οποίο έγινε χρήση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τη εφαρμογή στο AutoCAD, ταυτίζεται με το αντίστοιχο διάγραμμα του σχήματος 5.33 του ORE (Office for Research and Experiments) που πραγματοποίησε παρόμοια εργασία.



Σχήμα 5.33: Διάγραμμα $\Delta r - \gamma$ για εύρος γραμμής 1435mm. [6]

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.33 η μορφή του διαγράμματος αλλάζει για διάφορες τιμές της κλίσης των σιδηροτροχιών. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση φθαρμένου τροχού (Σχήμα 5.34)



Σχήμα 5.34: Διάγραμμα $\Delta r - y$ για διάφορα προφίλ τροχών (15)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στο παρόν κεφάλαιο για κάθε μετακίνηση που πραγματοποιήθηκε και επομένως για κάθε θέση επαφής έγινε μέτρηση της γωνίας επαφής (δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η κοινή εφαπτομένη του τροχού και της σιδηροτροχιάς στο σημείο επαφής με την οριζόντιο) και για τους δύο τροχούς. Οι γωνίες αυτές εμπλέκονται άμεσα με την ισοδύναμη κωνικότητα καθώς και με το κριτήριο του Nadal για ασφάλεια έναντι εκτροχιασμού. Έτσι χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι για τον υπολογισμό της οριζόντιας προς την κατακόρυφη δύναμη που μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια το σιδηροδρομικό όχημα:

- $\frac{Y_1}{Q_1} = \frac{\tan \gamma_1 - \mu}{1 + \mu \tan \gamma_1}$ για τον προσπίπτοντα στη σιδηροτροχιά τροχό

- $\frac{Y_2}{Q_2} = \tan(\gamma_2 + \arctan \mu)$ για τον αποκλίνοντα τροχό

όπου Y_1, Y_2 : οι οριζόντιες δυνάμεις που δρουν στο σημείο επαφής

Q_1, Q_2 : τα φορτία για τους τροχούς 1 και 2 αντίστοιχα

γ_1, γ_2 : οι γωνίες επαφής για τους δύο τροχούς

μ : ο συντελεστής τριβής που θεωρείται κοινός για τον τροχό και τη σιδηροτροχιά καθώς και για τους δύο τροχούς

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακες 5.3 έως 5.6) φαίνονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι γωνίες επαφής που μετρήθηκαν και ο τελικός υπολογισμός του μέτρου καθοδήγησης του τροχού (Y/Q) για τα δύο εύρη που μελετούνται, για τους δύο τροχούς και για διάφορους συντελεστές τριβής μ . Στη συνέχεια στα σχήματα 5.35 έως 5.38 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα για το κριτήριο εκτροχιασμού του Nadal.

1435 mm – Προσπίπτων τροχός

y (mm)	γ_1 (deg)	γ_1 (rad)	$\tan \gamma_1$	μ	Y/Q
0	1,4321	0,0249949	0,025	0,1	-0,07481
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	0,1	-0,02451
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	0,1	-0,01165
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	0,1	-0,0007
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	0,1	0,027711
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	0,1	0,207509
5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	0,1	0,332576
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	0,1	0,375218
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	0,1	2,076317

y (mm)	γ_1 (deg)	γ_1 (rad)	$\tan \gamma_1$	μ	Y/Q
0	1,4321	0,0249949	0,025	0,2	-0,17413
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	0,2	-0,12285
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	0,2	-0,10982
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	0,2	-0,09875
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	0,2	-0,07014
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	0,2	0,107287

5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	0,2	0,227131
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	0,2	0,267344
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	0,2	1,643688

0	1,4321	0,0249949	0,025	0,3	-0,27295
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	0,3	-0,21973
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	0,3	-0,2063
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	0,3	-0,1949
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	0,3	-0,16557
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	0,3	0,012818
5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	0,3	0,130006
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	0,3	0,168749
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	0,3	1,341352

0	1,4321	0,0249949	0,025	0,4	-0,37129
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	0,4	-0,3152
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	0,4	-0,30113
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	0,4	-0,28922
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	0,4	-0,25868
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	0,4	-0,07638
5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	0,4	0,040253
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	0,4	0,078284
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	0,4	1,118152

0	1,4321	0,0249949	0,025	0,5	-0,46914
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	0,5	-0,40929
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	0,5	-0,39436
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	0,5	-0,38175
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	0,5	-0,34955
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	0,5	-0,16074
5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	0,5	-0,04294
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	0,5	-0,00502
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	0,5	0,946614

0	1,4321	0,0249949	0,025	1	-0,95122
1,0716	4,3065	0,0751626	0,075304	1	-0,85994
2,0717	5,0429	0,0880152	0,088243	1	-0,83782
3,0688	5,6705	0,0989689	0,099293	1	-0,81935
4,0648	7,2979	0,1273724	0,128066	1	-0,77295
5,0275	17,4336	0,3042737	0,314025	1	-0,52204
5,9841	24,1065	0,4207378	0,447458	1	-0,38173
6,1092	26,2776	0,4586306	0,493744	1	-0,33892
6,4036	69,9941	1,2216275	2,746597	1	0,466182

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός του μέτρου καθοδήγησης (Y/Q) του προσπίπτοντος τροχού για εύρος γραμμής 1435mm και για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής.

1435 mm – Αποκλίνων τροχός

y (mm)	γ_2 (deg)	γ_2 (rad)	$\tan \gamma_2$	μ	$\text{Arctan} \mu$ (p)	Y/Q
0	1,4321	0,024995	0,025	0,1	0,099669	0,125313
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	0,1	0,099669	0,118864
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	0,1	0,099669	0,114655
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	0,1	0,099669	0,1095
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	0,1	0,099669	0,109156
5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	0,1	0,099669	0,107402
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	0,1	0,099669	0,10838
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	0,1	0,099669	0,109315
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	0,1	0,099669	0,107123
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	0,1	0,099669	0,10692

0	1,4321	0,024995	0,025	0,2	0,197396	0,226131
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	0,2	0,197396	0,219461
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	0,2	0,197396	0,215112
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	0,2	0,197396	0,209791
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	0,2	0,197396	0,209436
5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	0,2	0,197396	0,207628
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	0,2	0,197396	0,208636
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	0,2	0,197396	0,2096
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	0,2	0,197396	0,20734
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	0,2	0,197396	0,207131

0	1,4321	0,024995	0,025	0,3	0,291457	0,327456
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	0,3	0,291457	0,320434
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	0,3	0,291457	0,315862
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	0,3	0,291457	0,310272
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	0,3	0,291457	0,309899
5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	0,3	0,291457	0,308
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	0,3	0,291457	0,309059
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	0,3	0,291457	0,310071
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	0,3	0,291457	0,307698
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	0,3	0,291457	0,307479

0	1,4321	0,024995	0,025	0,4	0,380506	0,429293
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	0,4	0,380506	0,421788
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	0,4	0,380506	0,416905
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	0,4	0,380506	0,410942
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	0,4	0,380506	0,410544
5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	0,4	0,380506	0,40852
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	0,4	0,380506	0,409649
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	0,4	0,380506	0,410728
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	0,4	0,380506	0,408199
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	0,4	0,380506	0,407964

0	1,4321	0,024995	0,025	0,5	0,463648	0,531646
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	0,5	0,463648	0,523522
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	0,5	0,463648	0,518243
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	0,5	0,463648	0,511802
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	0,5	0,463648	0,511372

5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	0,5	0,463648	0,509188
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	0,5	0,463648	0,510406
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	0,5	0,463648	0,511571
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	0,5	0,463648	0,508841
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	0,5	0,463648	0,508588

0	1,4321	0,024995	0,025	1	0,785398	1,051282
1,0716	1,068	0,01864	0,018642	1	0,785398	1,037993
2,0717	0,8301	0,014488	0,014489	1	0,785398	1,029404
3,0688	0,5384	0,009397	0,009397	1	0,785398	1,018973
4,0648	0,5189	0,009057	0,009057	1	0,785398	1,018279
5,0275	0,4196	0,007323	0,007324	1	0,785398	1,014755
5,9841	0,475	0,00829	0,008291	1	0,785398	1,01672
6,1092	0,5279	0,009214	0,009214	1	0,785398	1,018599
6,4036	0,4038	0,007048	0,007048	1	0,785398	1,014196
6,7409	0,3923	0,006847	0,006847	1	0,785398	1,013788

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός του μέτρου καθοδήγησης (Y/Q) του αποκλίνοντος τροχού για εύρος γραμμής 1435mm και για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής.

1432 mm – Προσπίπτων τροχός

y (mm)	γ_1 (deg)	γ_1 (rad)	$\tan \gamma_1$	μ	L/V
0	4,4732	0,0780721	0,078231	0,1	-0,0216
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	0,1	-0,00493
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	0,1	0,009722
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	0,1	0,176847
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	0,1	0,25086
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	0,1	2,081351

0	4,4732	0,0780721	0,078231	0,2	-0,11989
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	0,2	-0,10301
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	0,2	-0,08823
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	0,2	0,077465
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	0,2	0,149152
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	0,2	1,647195

0	4,4732	0,0780721	0,078231	0,3	-0,21668
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	0,3	-0,19929
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	0,3	-0,18411
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	0,3	-0,01675
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	0,3	0,054052
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	0,3	1,344003

0	4,4732	0,0780721	0,078231	0,4	-0,31201
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	0,4	-0,2938
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	0,4	-0,27796
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	0,4	-0,1062
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	0,4	-0,03506
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	0,4	1,120283

0	4,4732	0,0780721	0,078231	0,5	-0,40589
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	0,5	-0,3866
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	0,5	-0,36986
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	0,5	-0,19122
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	0,5	-0,11874
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	0,5	0,948409

0	4,4732	0,0780721	0,078231	1	-0,85489
1,0482	5,4284	0,0947435	0,095028	1	-0,82644
2,0587	6,2676	0,1093903	0,109829	1	-0,80208
3,0539	15,7395	0,2747061	0,281831	1	-0,56027
4,0003	19,7932	0,3454565	0,359888	1	-0,47071
4,8167	70,0483	1,2225735	2,754701	1	0,467334

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός του μέτρου καθοδήγησης (Y/Q) του προσπίπτοντος τροχού για εύρος γραμμής 1432mm και για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής.

1432 mm – Αποκλίνων τροχός

y (mm)	γ_2 (deg)	γ_2 (rad)	$\tan \gamma_2$	μ	$\arctan \mu$	Y/Q
0	4,4732	0,078072	0,078231	0,1	0,099669	0,179636
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	0,1	0,099669	0,171928
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	0,1	0,099669	0,117754
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	0,1	0,099669	0,111958
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	0,1	0,099669	0,111074
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	0,1	0,099669	0,109002
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	0,1	0,099669	0,104116
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	0,1	0,099669	0,103714

0	4,4732	0,078072	0,078231	0,2	0,197396	0,282654
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	0,2	0,197396	0,274596
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	0,2	0,197396	0,218314
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	0,2	0,197396	0,212327
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	0,2	0,197396	0,211415
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	0,2	0,197396	0,209278
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	0,2	0,197396	0,20424
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	0,2	0,197396	0,203826

0	4,4732	0,078072	0,078231	0,3	0,291457	0,387321
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	0,3	0,291457	0,378747
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	0,3	0,291457	0,319228
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	0,3	0,291457	0,312935
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	0,3	0,291457	0,311977
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	0,3	0,291457	0,309732
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	0,3	0,291457	0,304446
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	0,3	0,291457	0,304011

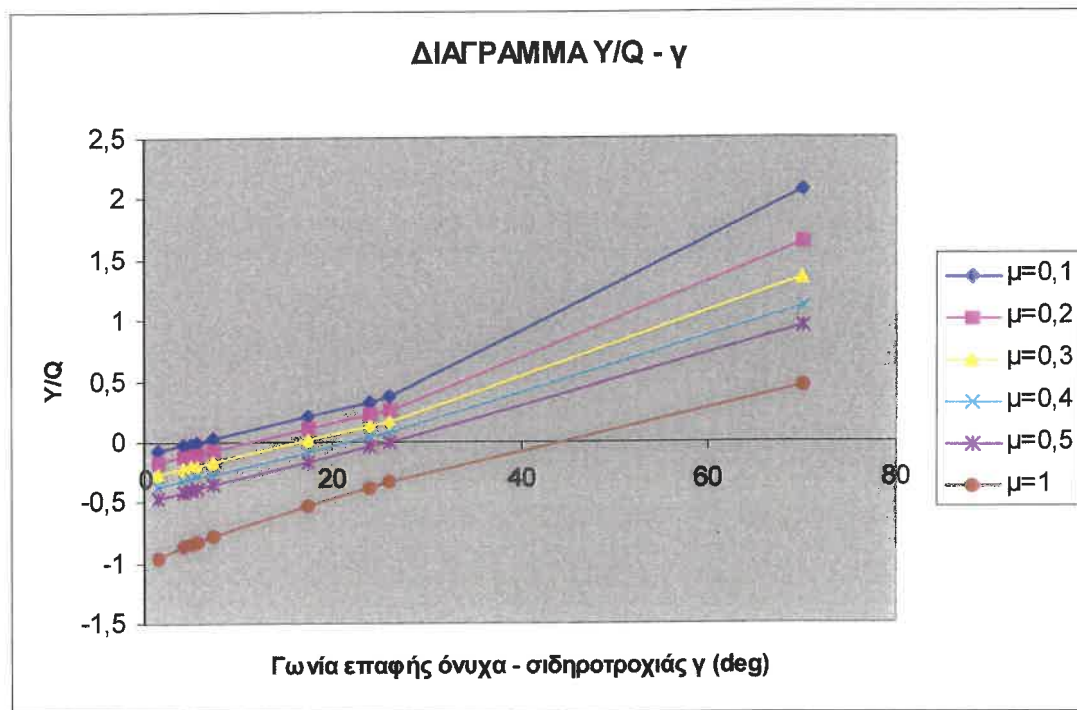
0	4,4732	0,078072	0,078231	0,4	0,380506	0,49368
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	0,4	0,380506	0,484414
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	0,4	0,380506	0,420499
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	0,4	0,380506	0,413782
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	0,4	0,380506	0,412761
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	0,4	0,380506	0,410367
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	0,4	0,380506	0,404733
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	0,4	0,380506	0,40427

0	4,4732	0,078072	0,078231	0,5	0,463648	0,60177
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	0,5	0,463648	0,59163
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	0,5	0,463648	0,522129
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	0,5	0,463648	0,514869
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	0,5	0,463648	0,513766
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	0,5	0,463648	0,511181
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	0,5	0,463648	0,505102
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	0,5	0,463648	0,504603

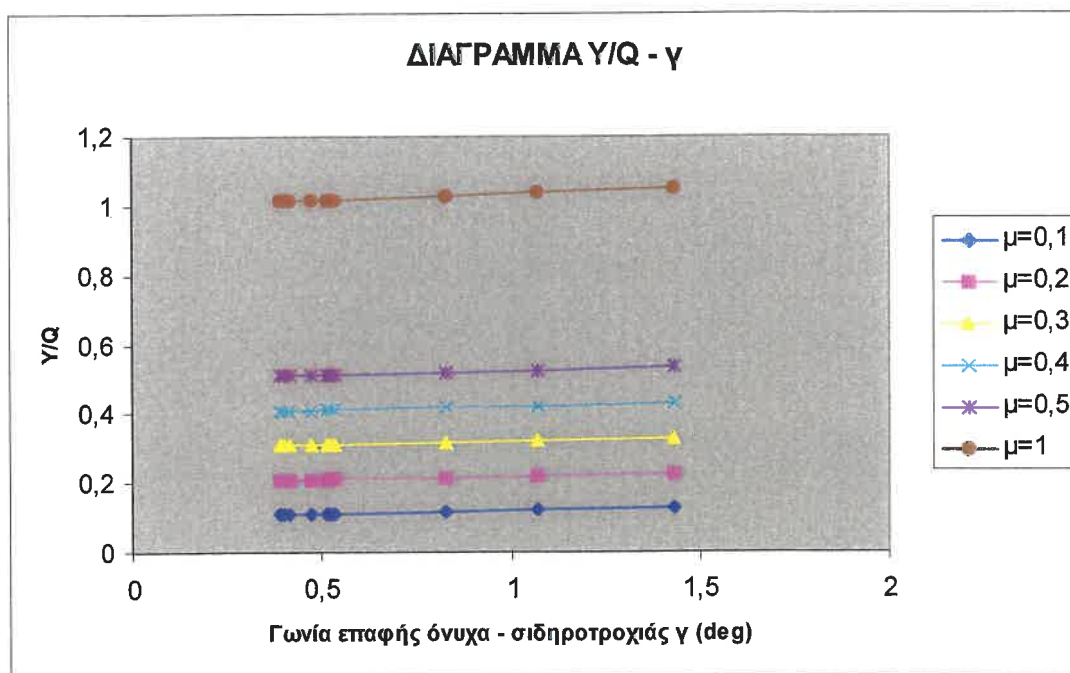
0	4,4732	0,078072	0,078231	1	0,785398	1,169741
1,0482	4,0448	0,070595	0,070713	1	0,785398	1,152187
2,0587	1,0053	0,017546	0,017548	1	0,785398	1,035722
3,0539	0,6775	0,011825	0,011825	1	0,785398	1,023933
4,0003	0,6275	0,010952	0,010952	1	0,785398	1,022147
4,8167	0,5102	0,008905	0,008905	1	0,785398	1,01797
5,0593	0,2334	0,004074	0,004074	1	0,785398	1,008181
5,997	0,2106	0,003676	0,003676	1	0,785398	1,007378

Πίνακας 5.6: Υπολογισμός του μέτρου καθοδήγησης (Y/Q) του αποκλίνοντος τροχού για εύρος γραμμής 1432mm και για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής.

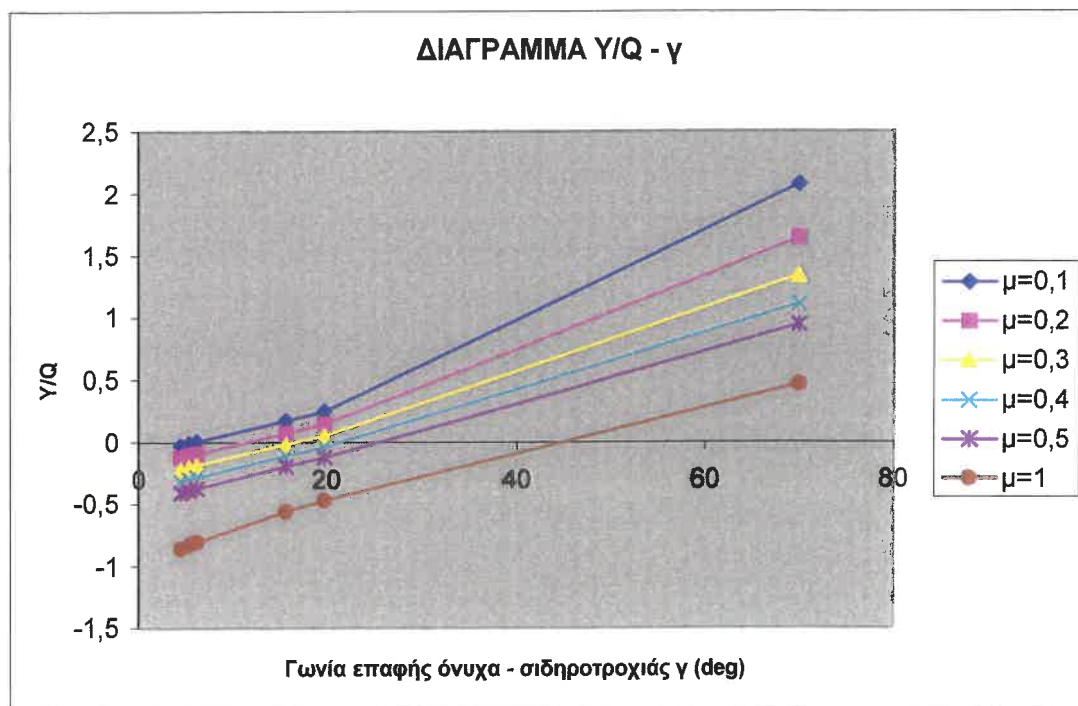
Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα $Y/Q - \gamma$ για τις διάφορες προαναφερθείσες περιπτώσεις καθώς και τα διαγράμματα των διαφορών των εφαπτομένων των γωνιών επαφής σε σχέση με την εγκάρσια μετακίνηση γ (Σχήματα 5.39 και 5.40)



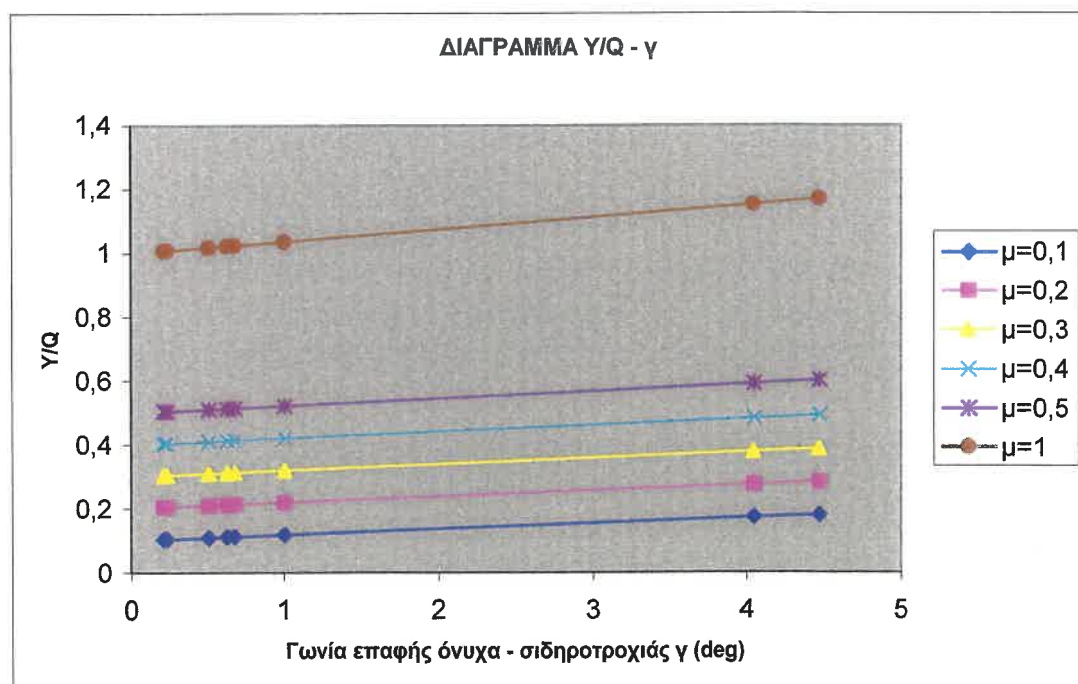
Σχήμα 5.35: Διάγραμμα Y/Q – γ για τον προσπίπτοντα τροχό και για εύρος γραμμής 1435mm .



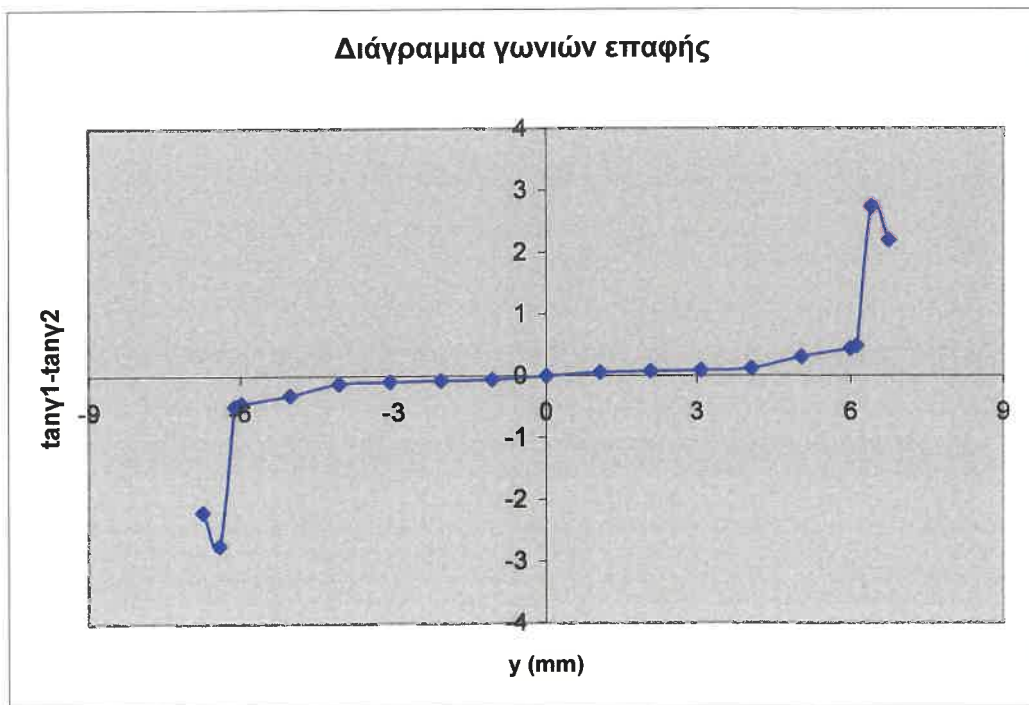
Σχήμα 5.36: Διάγραμμα Y/Q – γ για τον αποκλίνοντα τροχό και για εύρος γραμμής 1435mm .



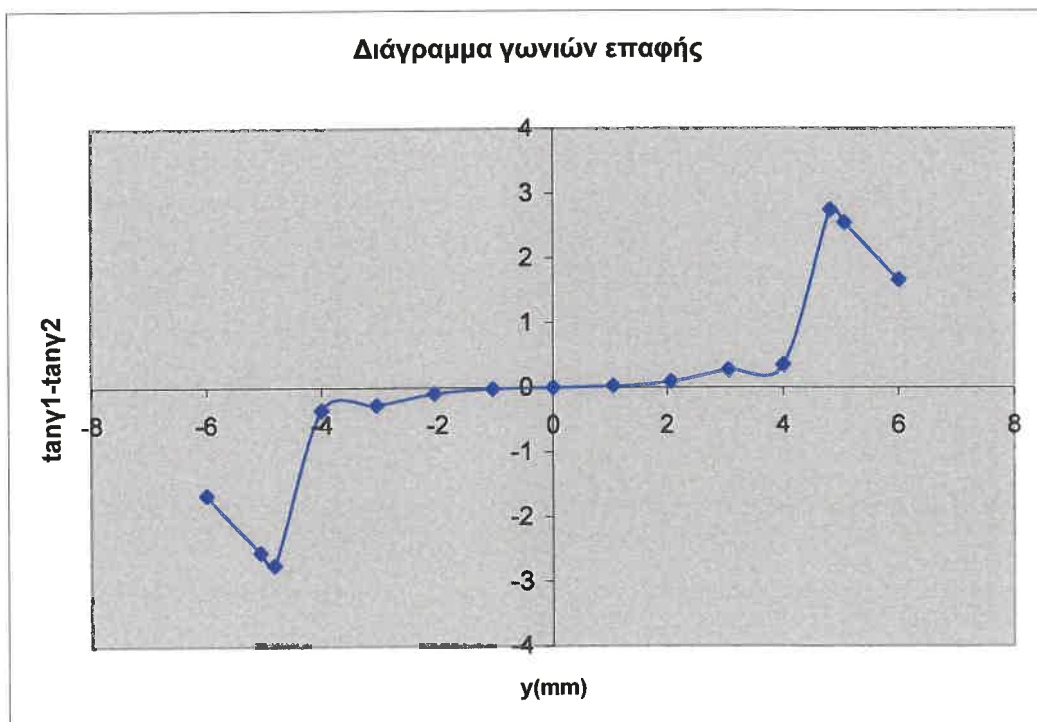
Σχήμα 5.37: Διάγραμμα $Y/Q - \gamma$ για τον προσπίπτοντα τροχό και για εύρος γραμμής 1432mm .



Σχήμα 5.38: Διάγραμμα $Y/Q - \gamma$ για τον αποκλίνοντα τροχό και για εύρος γραμμής 1432mm .

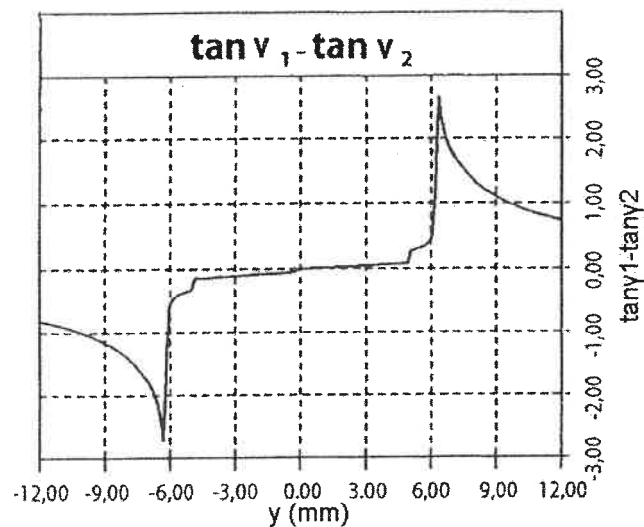


Σχήμα 5.39: Διάγραμμα γωνιών επαφής σε σχέση με την εγκάρσια μετακίνηση (περίπτωση 1435mm)

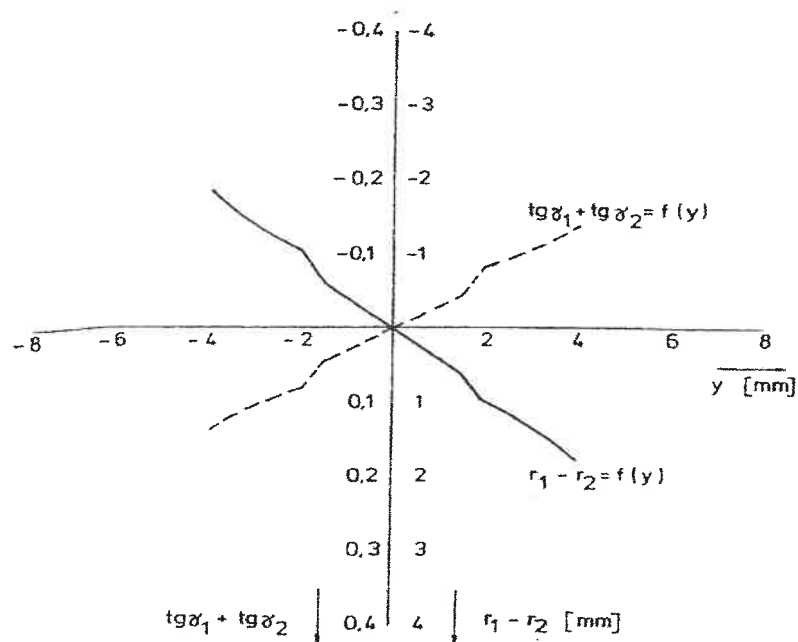


Σχήμα 5.40: Διάγραμμα γωνιών επαφής σε σχέση με την εγκάρσια μετακίνηση (περίπτωση 1432mm)

Ενώ τα σχήματα 5.39 και 5.40 ταυτίζονται με τα αντίστοιχα σχήματα 5.41 και 5.42 της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 5.41: Διάγραμμα γωνιών επαφής σε σχέση με την εγκάρσια μετακίνηση (περίπτωση 1435mm) [14]

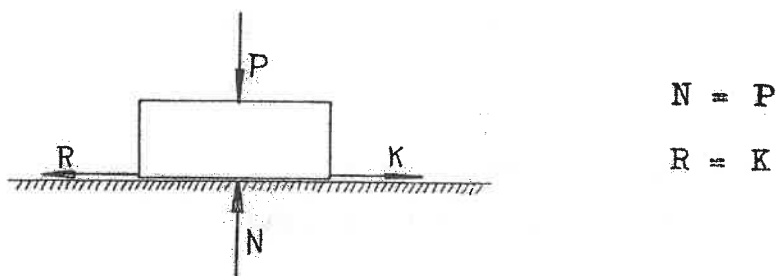


Σχήμα 5.42: Διάγραμμα γωνιών επαφής σε σχέση με την εγκάρσια μετακίνηση (περίπτωση 1432mm) [13]

Έχοντας μετρήσει τις γωνίες επαφής για τις πλευρικές μετατοπίσεις που πραγματοποιήθηκαν και θεωρώντας αυθαίρετα μια τιμή για το κατακόρυφο φορτίο Q είμαστε σε θέση να παραστήσουμε γραφικά τη σχέση ανάμεσα στην οριζόντια δύναμη καθοδήγησης Y και στο φορτίο του τροχού Q . Η απεικόνιση αυτή γίνεται μέσω του σχεδιασμού δυναμοτρίγωνων, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.6.

Βασικό στοιχείο για την απεικόνιση αυτή αποτελεί και η τιμή της γωνίας τριβής ρ , όπου η γεωμετρική της ερμηνεία δίνεται παρακάτω. [1]

Έστω ένα επίπεδο σώμα πάνω σε μία επιφάνεια, το οποίο πιέζεται από μια δύναμη P και κινείται με σταθερή ταχύτητα, δηλαδή χωρίς επιτάχυνση, υπό τη δράση μιας οριζόντιας δύναμης K (Σχήμα 5.43). Λόγω του νόμου δράσης – αντίδρασης εμφανίζεται η αντίδραση N και μια αντίθετη δύναμη από την K , η R γνωστή και ως δύναμη τριβής. (Σχήμα 5.43) Από την ισορροπία των δυνάμεων προκύπτει ότι $N=P$ και $R=K$. Επιπλέον ισχύει ότι η δύναμη K είναι ανάλογη της αντίδρασης N , δηλαδή $K=\mu \cdot N$, όπου μ σταθερό αδιάστατο μέγεθος που ονομάζεται συντελεστής τριβής. Λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία των δυνάμεων προκύπτει τελικά ότι $R=\mu \cdot N$.

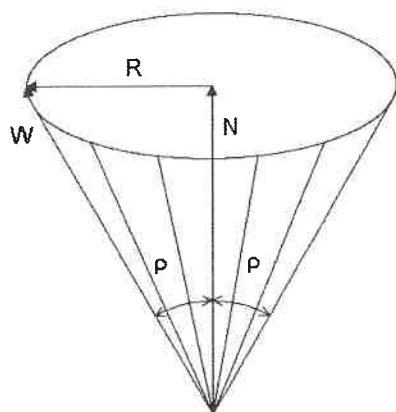


Σχήμα 5.43: Δυνάμεις που δρουν σε σώμα που κινείται με σταθερή ταχύτητα [1]

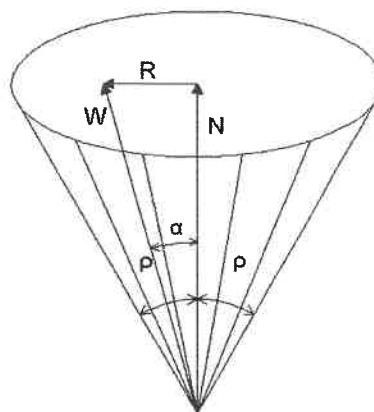
Οι δυνάμεις αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορούν να παρασταθούν και γραφικά. Από την κατακόρυφη δύναμη N και την οριζόντια R προκύπτει η συνισταμένη δύναμη W . Έστω α η γωνία μεταξύ των δυνάμεων N και W (Σχήμα 5.44). Στη συνέχεια αν δεξιά και αριστερά της

κατακόρυφης δύναμης N μετρηθεί η γωνία τριβής ρ (όπου $\rho = \arctan \alpha$) μπορεί να χαραχθεί ο κώνος τριβής (Σχήμα 5.44).

α)



β)

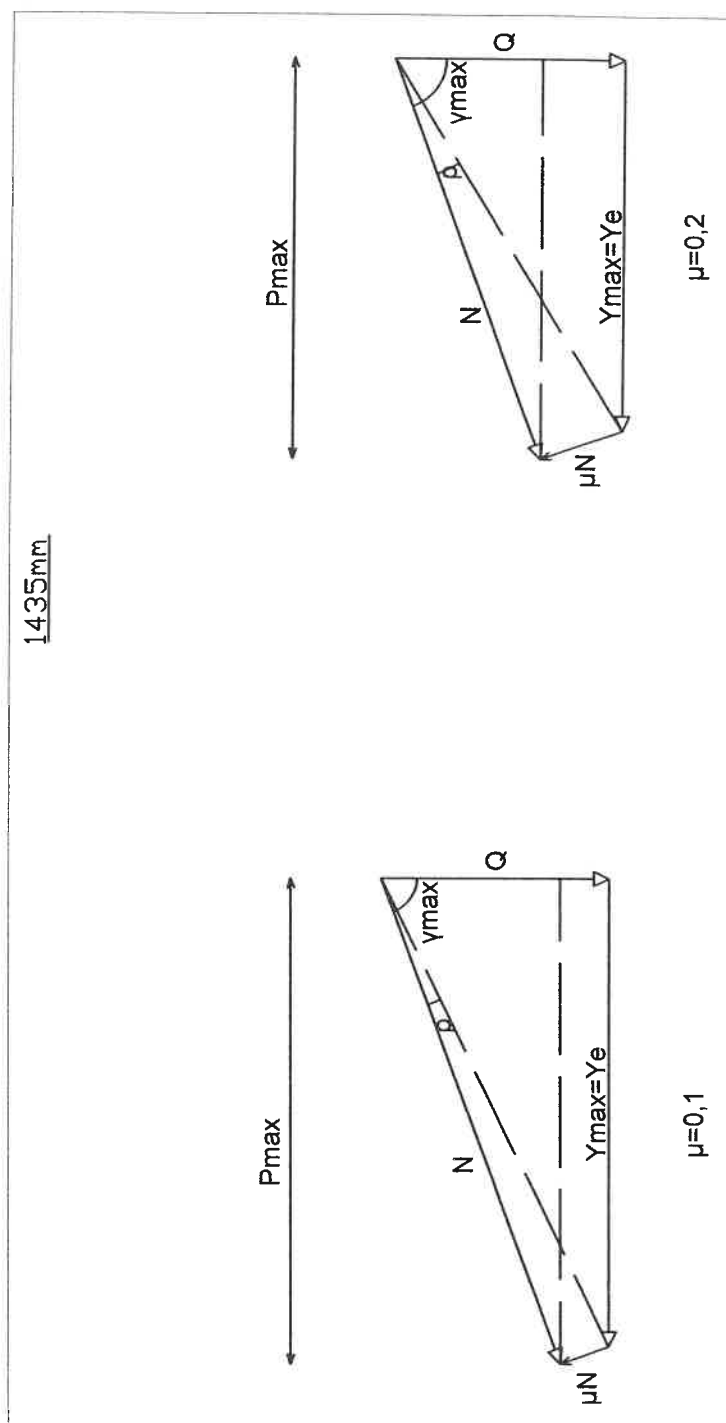


Σχήμα 5.44: Κώνος τριβής σε περίπτωση όπου α) $\rho = \alpha$ και β) $\rho > \alpha$ [1]

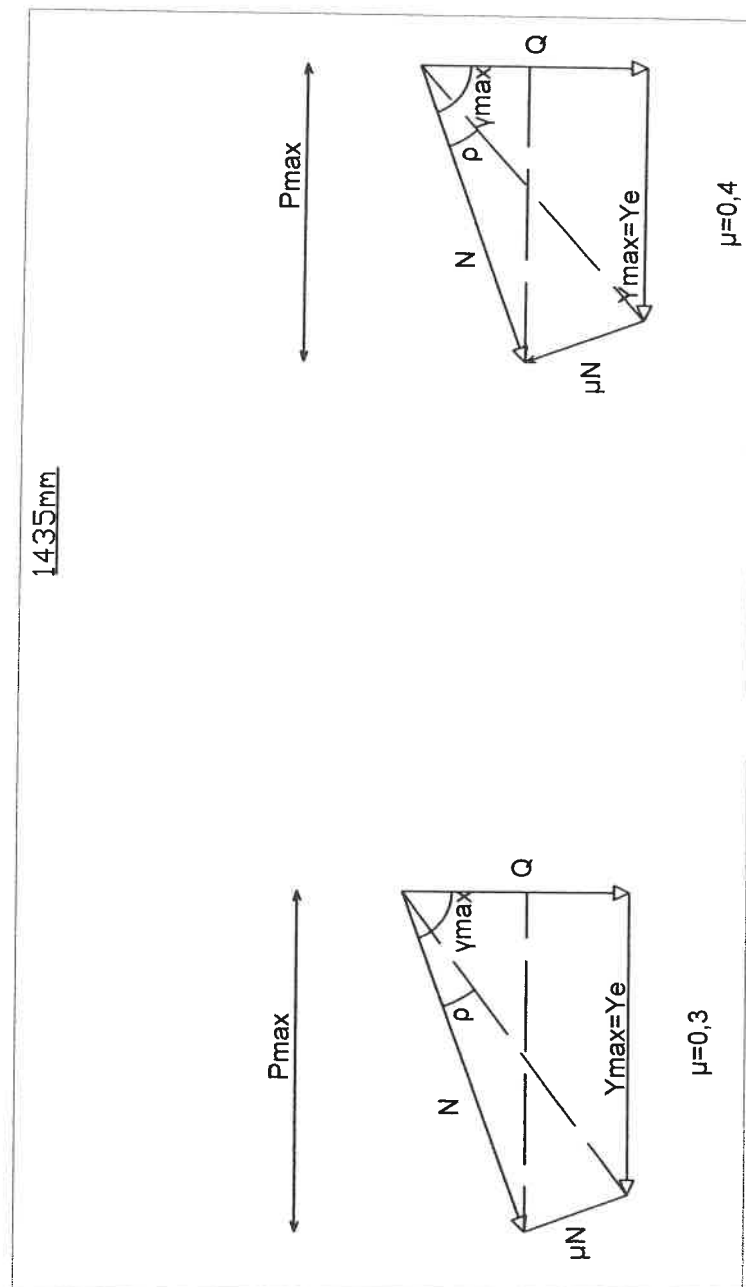
Σε περίπτωση που $\rho = \alpha$ τότε παρουσιάζεται το φαινόμενο της ολίσθησης (Σχήμα 5.44α) ενώ για τιμή της γωνίας τριβής $\rho > \alpha$ η κίνηση παρεμποδίζεται και στην περίπτωση μας αρχίζει να υφίσταται ο κίνδυνος εκτροχιασμού του σιδηροδρομικού οχήματος (Σχήμα 5.44β).

Παρακάτω λοιπόν, στα σχήματα 5.45 έως και 5.50 παρουσιάζονται τα δυναμοτρίγωνα για τις μέγιστες γωνίες επαφής ($\gamma_{\max}$) του προσπίπτοντα τροχού και για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής (μ). Η απεικόνιση γίνεται μόνο για τις μέγιστες γωνίες επαφής, αφού στη θέση αυτή μπορεί να αναληφθεί με ασφάλεια από τον τροχό η μέγιστη δύναμη καθοδήγησης Y , ενώ περαιτέρω αύξησή της οδηγεί σε εκτροχιασμό. Αναλυτικότερα τα σχήματα 5.45 έως 5.47 αφορούν το εύρος γραμμής των 1435mm ενώ τα 5.48 έως 5.50 το εύρος των 1432mm. Συνοπτικά αναφέρονται οι συμβολισμοί του χρησιμοποιούνται και οι οποίοι αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια:

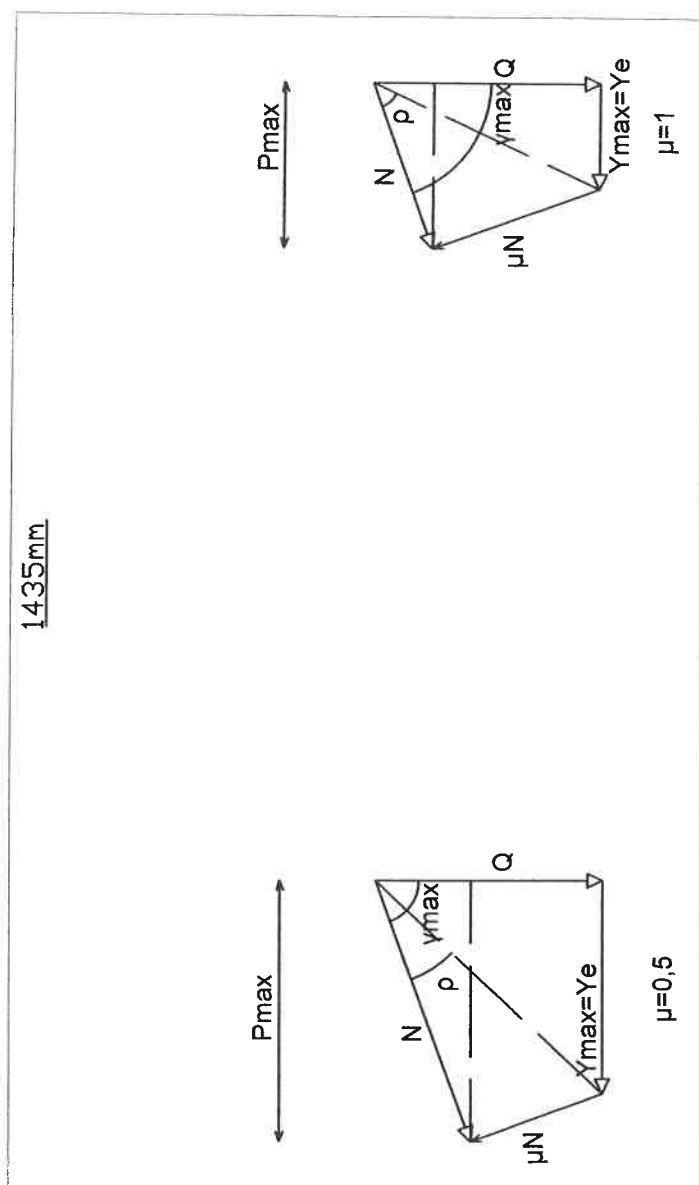
- Y, Q : η δύναμη καθοδήγησης (οριζόντια) και το φορτίο τροχού αντίστοιχα
- P : η κατευθυντήρια δύναμη
- $\gamma_{\max}, \rho$: η μέγιστη γωνία επαφής και η γωνία τριβής αντίστοιχα



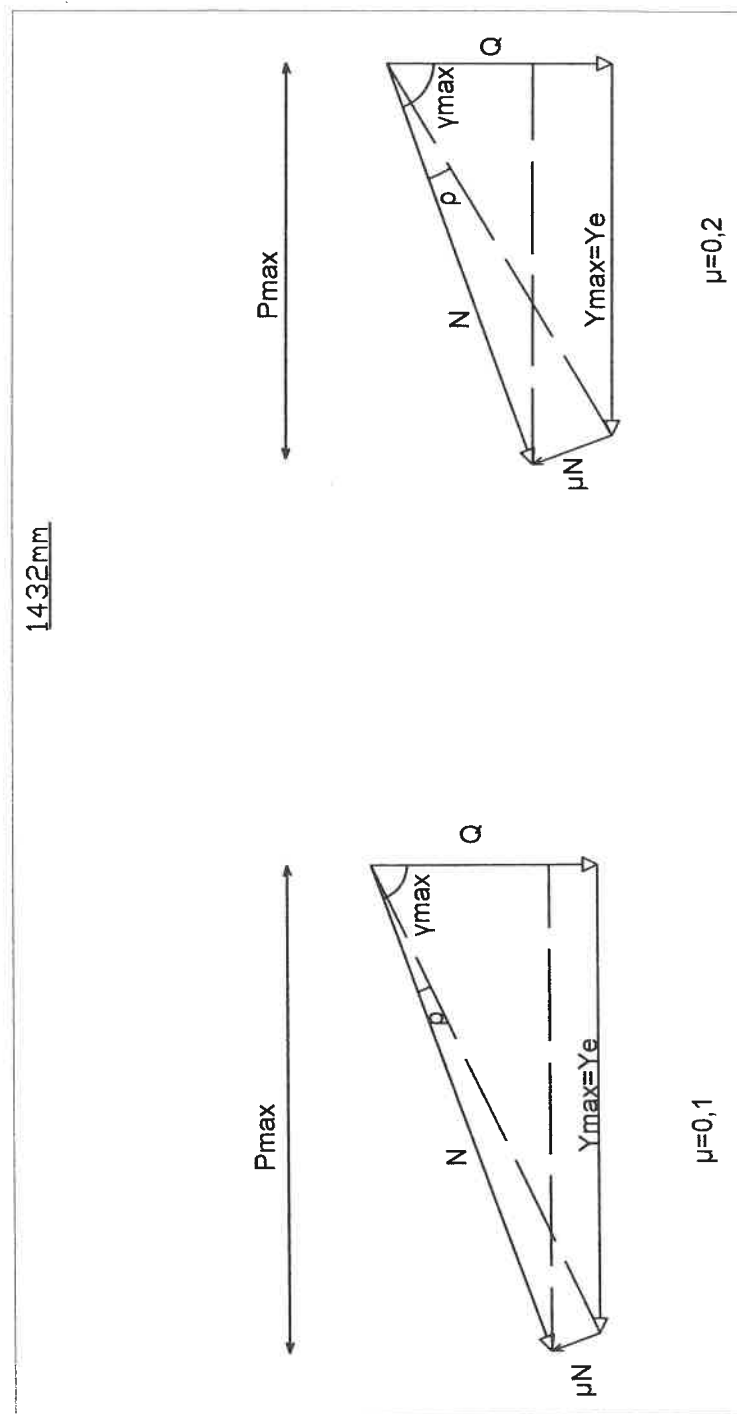
Σχήμα 5.45: Δυναμοτιρίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1435 mm)



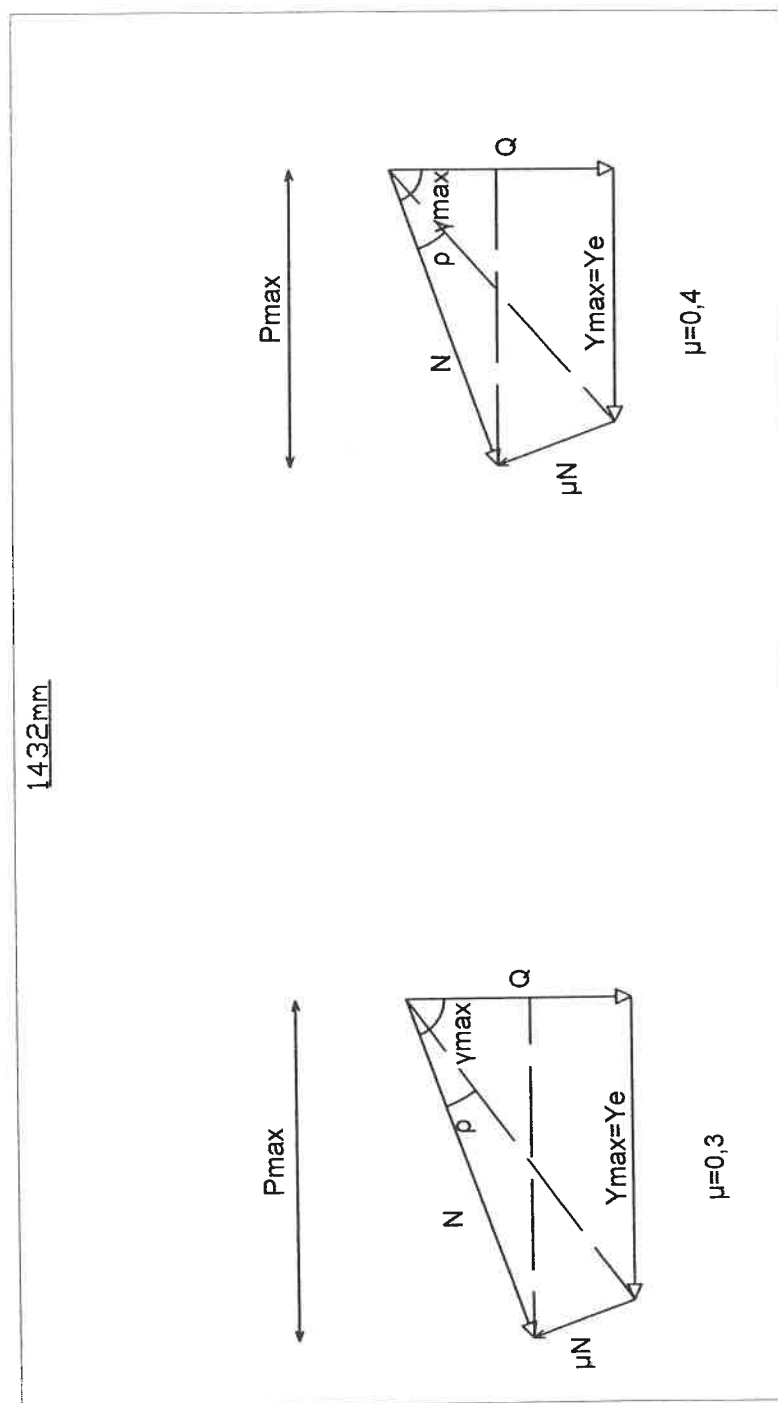
Σχήμα 5.46: Δυναμοιρίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1435 mm)



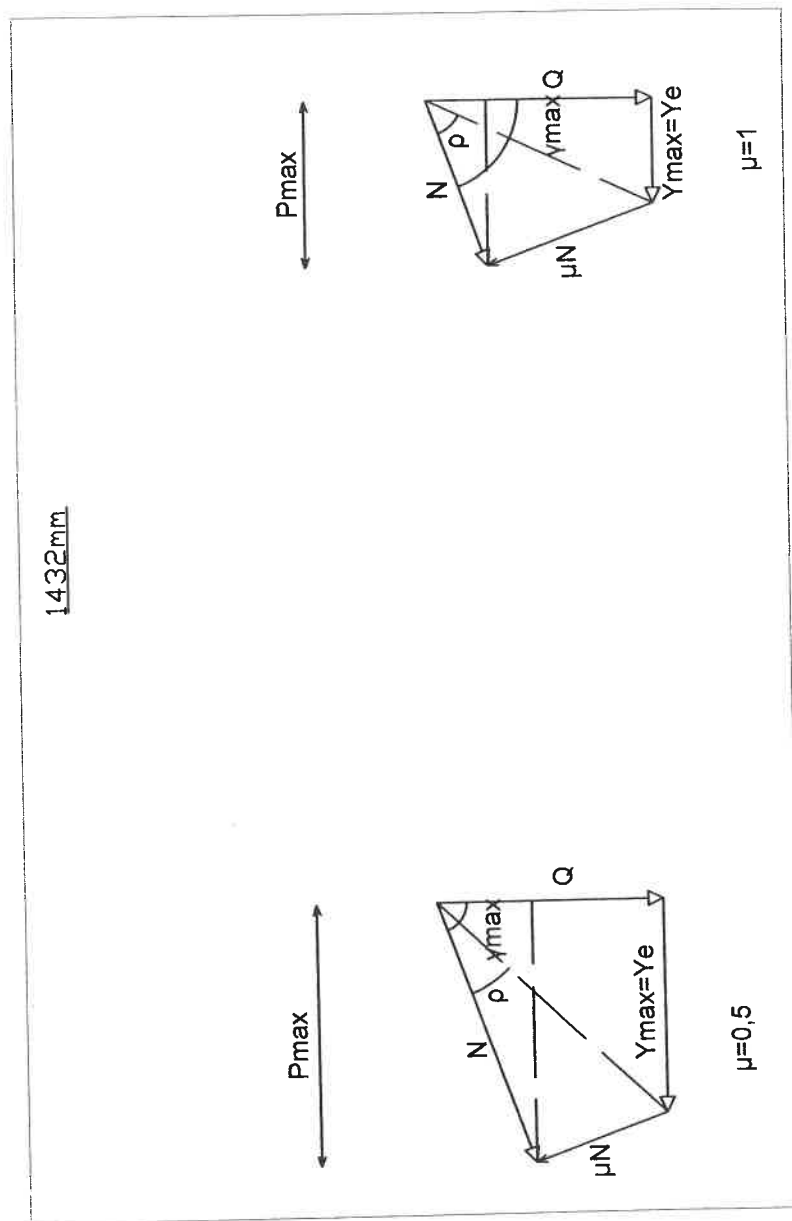
Σχήμα 5.47: Δυναμοστρίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1435 mm)



Σχήμα 5.48: Δυναμοστρίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1432 mm)



Σχήμα 5.49: Δυναμοιρίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1432 mm)



Σχήμα 5.50: Δυναμοτροίγωνα για διάφορους συντελεστές τριβής (1432 mm)

Τέλος εξήχθησαν αποτελέσματα σχετικά με την ισοδύναμη κωνικότητα του τροχού και με το φαινόμενο της οφιοειδούς κίνησης που περιγράφηκε από τον Klingel και παρουσιάστηκε αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο. Έτσι για κάθε πλευρική μετατόπιση που πραγματοποιήθηκε υπολογίστηκε η ισοδύναμη κωνικότητα (γ_e) των τροχών και στη συνέχεια το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή της ισοδύναμης κωνικότητας. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο αυτές μετρήσεις ήταν:

➤ $\gamma_e = \Delta r / 2y$ για την ισοδύναμη κωνικότητα

➤ $L_0 = 2\pi \sqrt{\frac{e_0 r_0}{\varepsilon \phi \gamma_0}}$ για το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης

Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.7 και 5.8 ενώ στη συνέχεια ακολουθούν τα σχήματα 5.51 έως 5.54. Τα σχήματα 5.51 και 5.52 δείχνουν πως μεταβάλλεται η ισοδύναμη κωνικότητα σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση, για μήκος κύματος 1435mm και 1432mm αντίστοιχα. Τα σχήματα 5.53 και 5.54 δείχνουν τη μεταβολή του μήκους κύματος για κάθε μεταβολή της εγκάρσιας μετακίνησης που πραγματοποιήθηκε, για τις δύο τιμές του εύρους που μελετώνται.

1435 mm

y (mm)	γ_e	L (m)
0	-	-
1,0716	0,325401	6,1219612
2,0717	0,217237	7,4940668
3,0688	0,180608	8,2206427
4,0648	0,182998	8,1702729
5,0275	0,370134	5,7596376
5,9841	0,388655	5,6267094

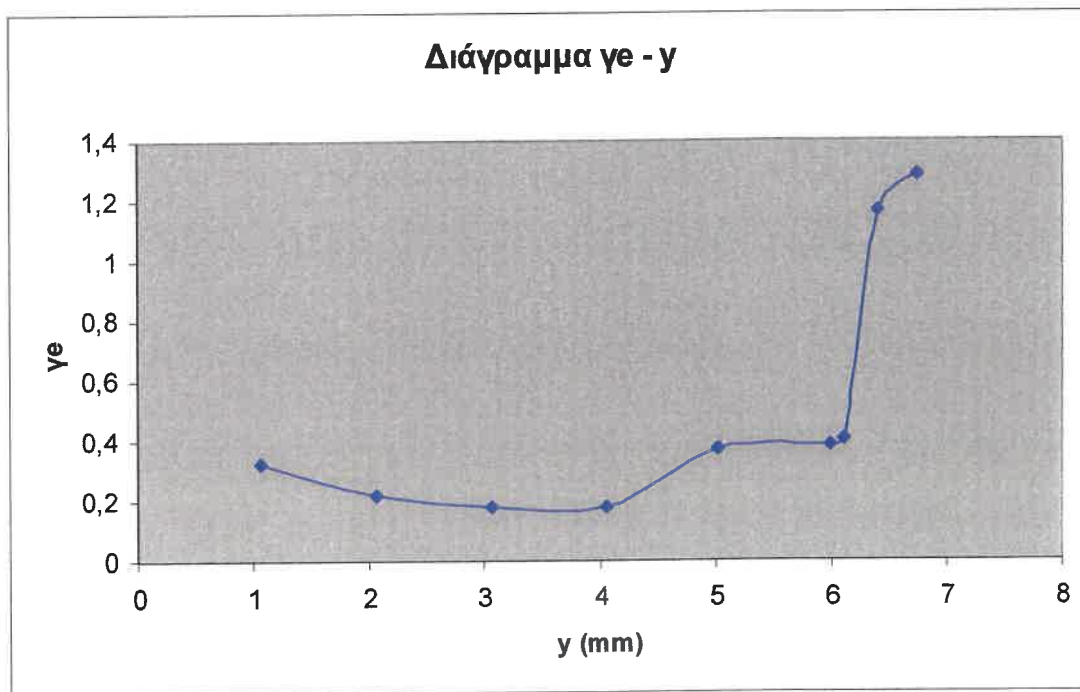
6,1092	0,403531	5,5237916
6,4036	1,168874	3,2827994
6,7409	1,289294	3,1341624

Πίνακας 5.7: Τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας και του μήκους κύματος της οφιοειδούς κίνησης (περίπτωση 1435 mm)

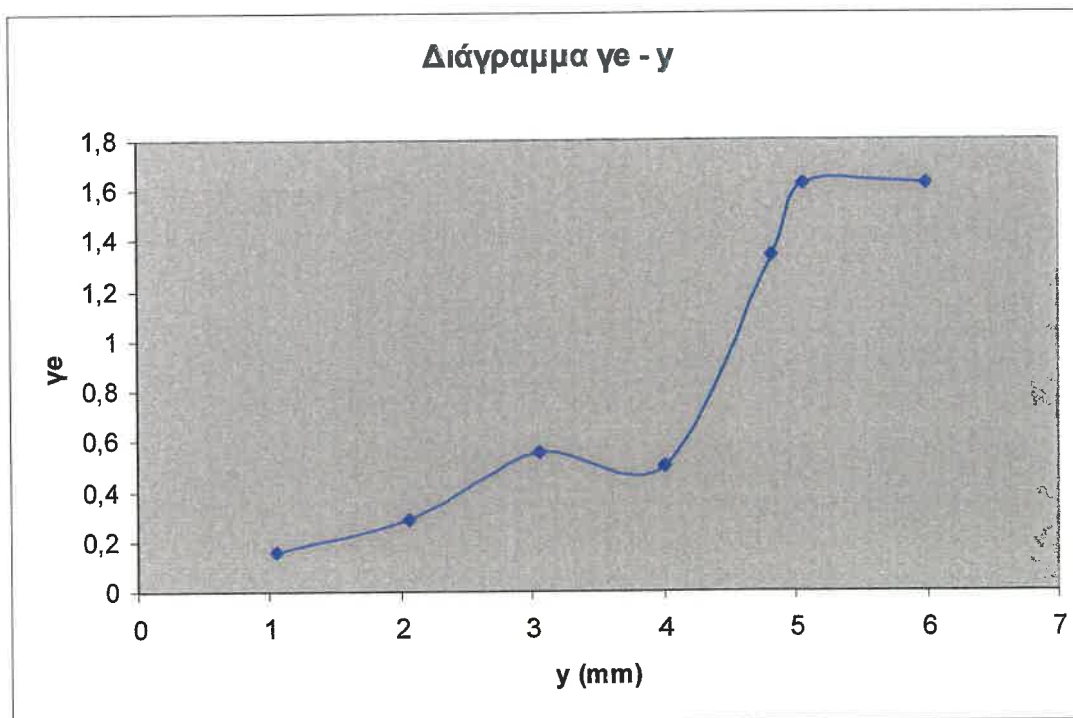
1432 mm

y (mm)	y_e	L (m)
0	-	-
1,0482	0,161563	8,69081
2,0587	0,286249	6,530887
3,0539	0,557304	4,692397
4,0003	0,503425	4,940583
4,8167	1,341676	3,057181
5,0593	1,623377	2,7902
5,997	1,62332	2,799701

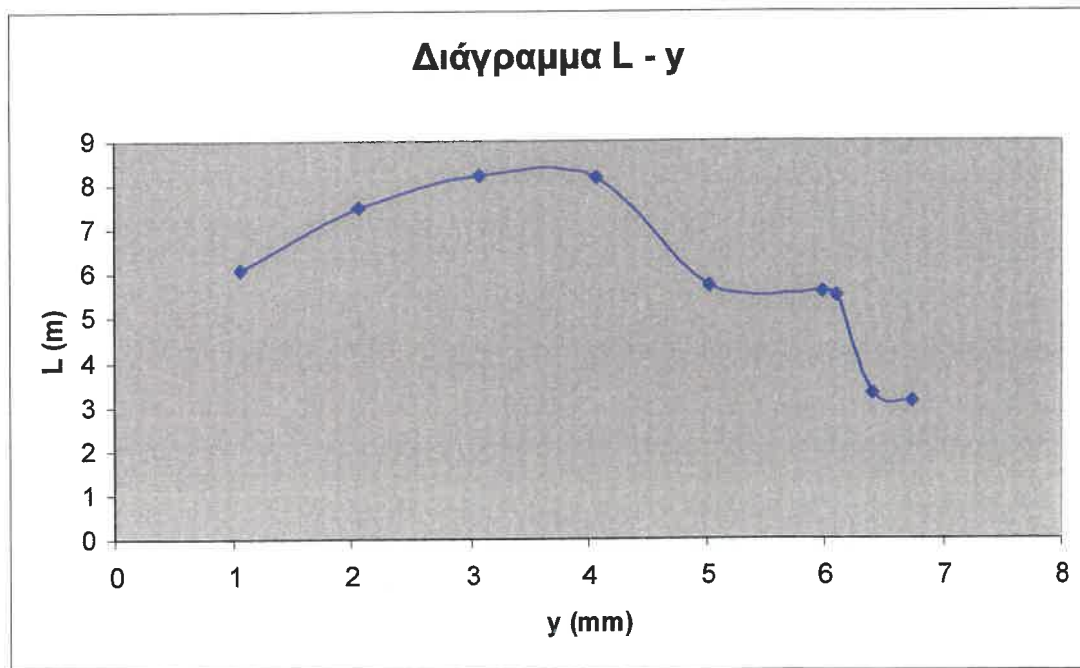
Πίνακας 5.8: Τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας και του μήκους κύματος της οφιοειδούς κίνησης (περίπτωση 1432 mm)



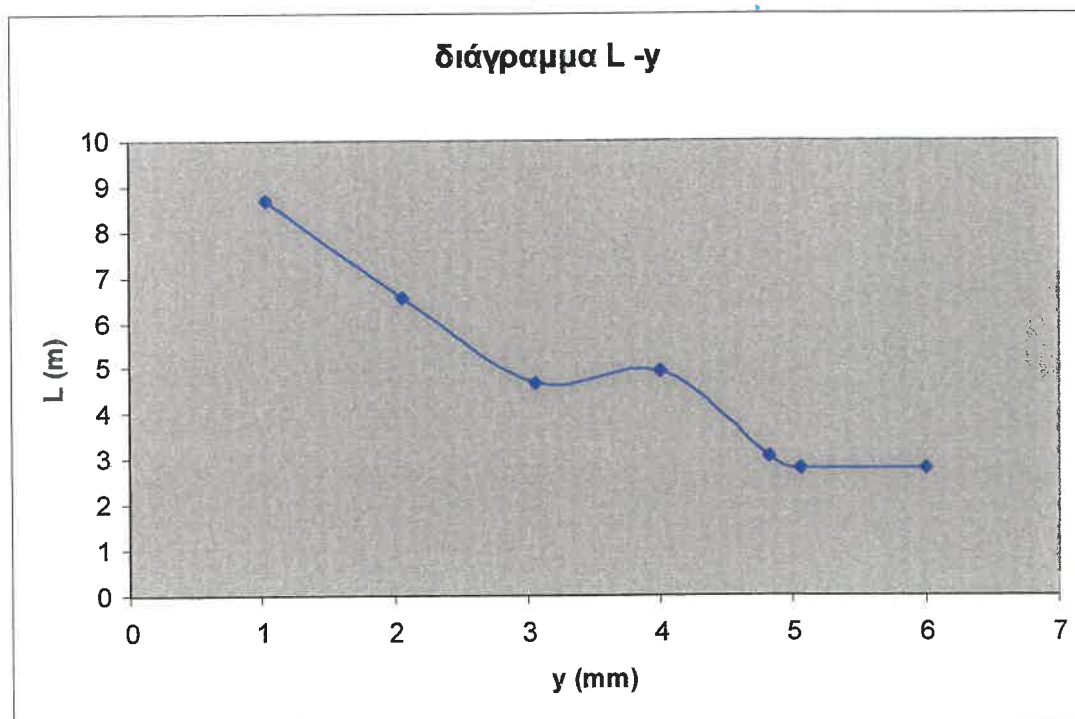
Σχήμα 5.51: Μεταβολή της ισοδύναμης κωνικότητας σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (περίπτωση 1435 mm)



Σχήμα 5.52: Μεταβολή της ισοδύναμης κωνικότητας σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (περίπτωση 1432 mm)



Σχήμα 5.53: Μεταβολή του μήκους κύματος της οφιοειδούς κίνησης σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (περίπτωση 1435 mm)



Σχήμα 5.54: Μεταβολή του μήκους κύματος της οφιοειδούς κίνησης σε σχέση με την εγκάρσια μετατόπιση (περίπτωση 1432 mm)

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με την εφαρμογή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και τη σύγκριση με παρόμοια αποτελέσματα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις για τρεις κατηγορίες αποτελεσμάτων. Η πρώτη αφορά στα αποτελέσματα σχετικά με τα σημεία επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς καθώς και με αυτά που συσχετίζουν την εγκάρσια μετακίνηση y με τις εκάστοτε ακτίνες κύλισης (διαγράμματα $r - y$, $\Delta r - y$). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στη σχέση των εγκάρσιων μετακινήσεων με τις γωνίες επαφής (διαγράμματα $Y/Q - \gamma$, $(\tan \gamma_1 - \tan \gamma_2) - y$, δυναμοτρίγωνα), ενώ η τρίτη κατηγορία εστιάζεται στον υπολογισμό νέων στοιχείων όπως η ισοδύναμη κωνικότητα για κάθε πλευρική μετατόπιση (διάγραμμα $\gamma_e - y$) και κατά συνέπεια στην οφιοειδή

κίνηση που επηρεάζεται άμεσα (διάγραμμα $L - y$). Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι αφού η εργασία αυτή έχει πραγματοποιηθεί για δύο τιμές του εύρους γραμμής (1435mm και 1432mm) είναι χρήσιμο να γίνει και σύγκριση των δύο αυτών χαρακτηριστικών της γραμμής.

Αναλυτικότερα, εστιάζοντας στην **πρώτη ομάδα αποτελεσμάτων** γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Αύξηση της εγκάρσιας μετακίνησης y οδηγεί σε αύξηση της ακτίνας κύλισης r_1 (του προσπίπτοντος τροχού) και σε μείωση (αναλογικά μικρότερη) της ακτίνας του αποκλίνοντος τροχού r_2 . Έτσι παρατηρείται τελικά αύξηση της διαφοράς των ακτίνων κύλισης (Δr). Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς ο τροχοφόρος άξονας μετακινείται κατά ποσότητα y , στον προσπίπτοντα τροχό η επαφή γίνεται στους τομείς C,D,E (Σχήμα 5.1) του όνυχα του τροχού, με αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές της ακτίνας κύλισης, ενώ οι επαφές για τον αποκλίνοντα τροχό περιορίζονται στο επίσωτρο του τροχού χωρίς έτσι ουσιαστική μεταβολή του r_2 .
- Στα σχήματα 5.11 και 5.18 οι επαφές τροχού – σιδηροτροχιάς για τον προσπίπτοντα τροχό βρίσκονται εντός του τομέα E (Σχήμα 5.1), δηλαδή του ευθύγραμμου τμήματος του όνυχα. Η πρακτική σημασία της παρατήρησης αυτής είναι ότι περαιτέρω εγκάρσιες μετακινήσεις οδηγούν σε κίνδυνο εκτροχιασμού. Έτσι κρίσιμες επιτρεπτές μετακινήσεις ορίζονται για τα 1435mm η τιμή $y = 6,4036\text{mm}$ και για τα 1432mm η τιμή $y = 4,8167\text{mm}$.
- Στο σχήμα 5.27 φαίνεται ότι τα σημεία επαφής στον τροχό κατανέμονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τη σιδηροτροχιά. Συγκρίνοντας επίσης τα αποτελέσματα για εύρος γραμμής 1435mm και 1432mm προκύπτει ότι για την περίπτωση των 1435mm οι φθορές του τροχού είναι συγκεντρωμένες σε μικρότερη επιφάνεια απ' ό τι στην περίπτωση των 1432mm.

- Τα διαγράμματα $r - y$ και $\Delta r - y$ (Σχήματα 5.28 έως και 5.32) παρουσιάζουν την ίδια μορφή. Στην περίπτωση των 1435mm παρατηρείται ότι για $y \approx 4 \text{ mm}$ το διάγραμμα γίνεται πιο απότομο ενώ το ίδιο συμβαίνει για $y \approx 2 \text{ mm}$ στην περίπτωση του εύρους των 1432mm. Για το διάγραμμα $\Delta r - y$ αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι αλλάζοντας την κλίση των σιδηροτροχιών αλλάζει και η μορφή του (Σχήμα 5.33). Όσο η κλίση μειώνεται τόσο το διάγραμμα αποκτά πιο απότομη μορφή (δηλαδή για ίδια οριζόντια μετακίνηση αυξάνεται κατά πολύ η τιμή του Δr). Το ίδιο συμβαίνει και για την περίπτωση των φθαρμένων τροχών (Σχήμα 5.34).

Μελετώντας τη **δεύτερη ομάδα αποτελεσμάτων** (μετά δηλαδή και από τις μετρήσεις των γωνιών επαφής) παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Το διάγραμμα $Y/Q - \gamma$ (Σχήματα 5.35 και 5.37) καθώς και τα δυναμοτρίγωνα που σχεδιάστηκαν (Σχήματα 5.45 έως 5.50) οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα. Αναφερόμενοι στον προσπίπτοντα τροχό (καθώς απ' αυτόν κρίνεται ο κίνδυνος εκτροχιασμού) για αύξηση της γωνίας επαφής γ προκύπτει αύξηση του μέτρου καθοδήγησης του τροχού (Y/Q). Το ίδιο συμβαίνει και για μείωση του συντελεστή τριβής μ . Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο καθοδήγησης του τροχού, που δεν πρέπει να ξεπεραστεί για να υπάρχει ασφάλεια, τόσο μεγαλύτερη δύναμη καθοδήγησης μπορεί να παραλάβει ο τροχός με ασφάλεια όταν το κατακόρυφο φορτίο Q παραμένει σταθερό.

- Από τα δυναμοτρίγωνα των σχημάτων 5.45 έως 5.50 γίνεται εμφανές ότι για γωνία επαφής γ μικρότερη της μέγιστης γωνίας $\gamma_{\max}$ (η οποία και είναι ίση με τη γωνία του όνυχα) η δύναμη καθοδήγησης (Y) είναι μικρότερη. Η παρατήρηση αυτή πιστοποιεί το γεγονός ότι η μέγιστη δύναμη καθοδήγησης παραλαμβάνεται με ασφάλεια όταν η γωνία επαφής του όνυχα με τη σιδηροτροχιά φτάσει τη μέγιστη τιμή της ($\gamma_{\max}$).

- Τα σχήματα 5.39 και 5.40 απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στην εγκάρσια μετατόπιση y και τη διαφορά των εφαπτομένων των γωνιών επαφής. Παρατηρείται λοιπόν ότι και στα δύο αυτά σχήματα υπάρχει ένας καθοδικός κλάδος (στην περίπτωση των 1435mm για τιμή του y μεγαλύτερη των 6,4036mm και στην περίπτωση του εύρους των 1432mm για τιμή του y μεγαλύτερη των 4,8167mm. Το σημείο που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή $(\tan\gamma_1 - \tan\gamma_2)$ είναι το κρίσιμο σημείο για εκτροχιασμό (βρίσκεται στο ευθύγραμμο τμήμα Ε) και περαιτέρω μετακίνηση (όπως αυτή που αντιστοιχεί στον καθοδικό κλάδο) οδηγεί σε μεγάλη πιθανότητα εκτροχιασμού.

Τέλος η **τρίτη κατηγορία αποτελεσμάτων** αναφέρεται στο φαινόμενο της οφιοειδούς κίνησης των τροχών πάνω στη σιδηροτροχιά και με την έννοια της ισοδύναμης κωνικότητας των τροχών. Παρατηρώντας τα σχήματα 5.51 έως 5.54 καταλήγουμε στα εξής:

- Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο βασική επιδίωξή μας είναι οι μικρές τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας στην ευθυγραμμία. Μικρές τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας συνδέονται με μικρές τιμές των δυνάμεων βαρύτητας και ψευδο-ολίσθησης, δηλαδή καλύτερη εγκάρσια συμπεριφορά του οχήματος. Επίσης μικρές τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας αντιστοιχούν σε μειωμένες φθορές τροχών, μεγάλη ταχύτητα στην ευθυγραμμία και μεγάλο μήκος κύματος κατά την οφιοειδή κίνηση.

Από τα σχήματα 5.51 και 5.52 παρατηρούμε ότι για τα 1435mm οι τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές για το εύρος των 1432mm.

- Γενικά όσο μικραίνουν οι τιμές της ισοδύναμης κωνικότητας και μεγαλώνουν οι ακτίνες κύλισης r_0 στην κύρια θέση, μεγαλώνει και το μήκος κύματος της οφιοειδούς κίνησης. Επιδίωξη είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερα μήκη κύματος (L), έτσι ώστε η κίνηση στην ευθυγραμμία να είναι ομαλότερη, να αποφεύγεται η επαφή του όνυχας με τη σιδηροτροχιά και να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια των επιβατών.

Δεδομένου όλων των παραπάνω από τα σχήματα 5.53 και 5.54 φαίνεται ότι για εύρος γραμμής 1435mm εμφανίζονται υψηλότερες τιμές του μήκους κύματος L σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση του εύρους των 1432mm. Επομένως μελετώντας το φαινόμενο της κίνησης που περιέγραψε ο Klingel, στην ευθυγραμμία προτιμάται το εύρος των 1435mm.

6.2 Τελικά συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής μπορεί να αναφερθούν ως σημαντικότερα συμπεράσματα τα εξής:

- Προκειμένου το όχημα να μπορεί να αναλάβει με ασφάλεια μεγαλύτερη δύναμη καθοδήγησης Y , προτιμούνται τροχοί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη γωνία όνυχα και συντελεστή τριβής μ όσο γίνεται μικρότερο. Για διατήρηση του συντελεστή τριβής σε μικρές τιμές, συνιστάται λίπανση τροχών.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις τιμές του εύρους γραμμής των 1435mm και των 1432mm προκύπτει ότι στην πρώτη περίπτωση επιτρέπονται μεγαλύτερες εγκάρσιες μετακινήσεις. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα οχήματα παρουσιάζουν καλύτερη ευστάθεια στην ευθυγραμμία, εγγράφονται καλύτερα στις καμπύλες και μπορεί να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία.
- Ο εκτροχιασμός επέρχεται για y μεγαλύτερο των 6,4036mm στην περίπτωση του εύρους των 1435mm, και για y μεγαλύτερο των 4,8167mm στην περίπτωση του εύρους των 1432mm.

➤ Για μειωμένες φθορές και μειωμένες δυνάμεις βαρύτητας και ψευδο-ολίσθησης καθώς και για ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων στην ευθυγραμμία, η ισοδύναμη κωνικότητα πρέπει να έχει μικρές τιμές. Για εύρος γραμμής 1435mm προκύπτουν χαμηλότερες τιμές ισοδύναμης κωνικότητας απ' ότι για αυτό των 1432mm.

6.3 Προτάσεις

Για περαιτέρω διερεύνηση προτείνεται:

- ❖ Η μελέτη της εγκάρσιας συμπεριφοράς του οχήματος σε περίπτωση που υπάρχει φθορά των σιδηροτροχιών και του τροχού.
- ❖ Εφαρμογή για εγγραφή σε καμπύλα τμήματα με σκοπό τον εντοπισμό των επικίνδυνων θέσεων έναντι εκτροχιασμού.
- ❖ Ανάπτυξη μαθηματικών σχέσεων, με πρότυπο τις σχέσεις Klingel, για προφίλ τροχού πιο κοντά στο πραγματικό.

Παράρτημα 1

Πακέτα προσομοίωσης

1.1 Πρόβλεψη εκτροχιασμού

Το πιο σημαντικό από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τα πακέτα εξομοίωσης μέσω υπολογιστών είναι αυτό που σχετίζεται με την ασφάλεια του σιδηροδρομικού οχήματος. Η πιθανότητα εκτροχιασμού επηρεάζεται από την ανάρτηση του οχήματος καθώς επίσης και από την κατάσταση της γραμμής, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση ενός ενδεχόμενου εκτροχιασμού δεν είναι εύκολη.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι εκτροχιασμού συμπεριλαμβανομένων και της αναρρίχησης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς, της ανατροπής του οχήματος καθώς και της εγκάρσιας μετατόπισης της γραμμής. Οι πρώτοι μελετητές (όπως για παράδειγμα ο Nadal) επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους στην αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς λόγω των στατικών

δυνάμεων, αλλά οι μετέπειτα μελετητές συμπεριέλαβαν και τις κινητές δυνάμεις.

Υπό κανονικές συνθήκες η επαφή ενός σημείου συμβαίνει μεταξύ της σιδηροτροχιάς και του πέλματος του τροχού. Ο όνυχας έρχεται σε επαφή με τη σιδηροτροχιά μόνο στιγμιαία κατά την οφιοειδή κίνηση που περιέγραψε ο Klingel και κατά την εγγραφή του φορείου σε καμπύλα τμήματα της γραμμής. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να αρχίσει η αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς με τελικό αποτέλεσμα τον εκτροχιασμό του σιδηροδρομικού οχήματος. Κατά την αναρρίχηση του τροχού δρουν μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις στο σύστημα των τροχών οι οποίες και προκαλούν την αναρρίχηση ενός τροχού πάνω στη σιδηροτροχιά.

Στο σχήμα 1.1 οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες δυνάμεις που δρουν μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς εκφράζονται ως Y και Q αντίστοιχα. Σύμφωνα με τις εξισώσεις κατά Nadal έχουμε: (5)

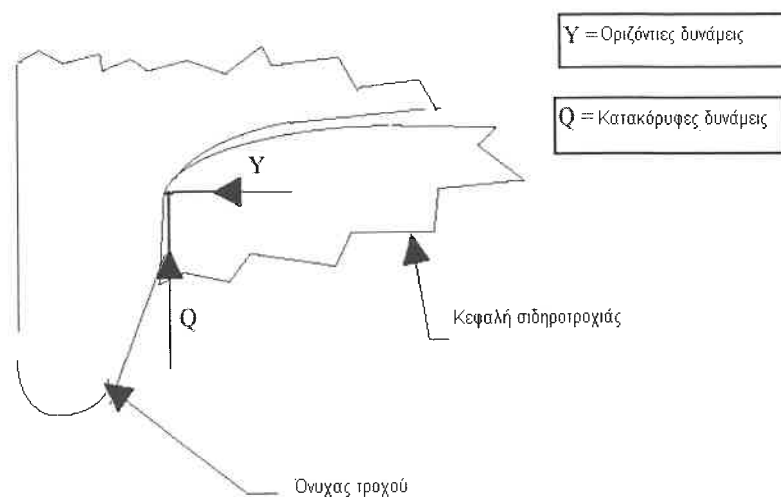
$$Y = N \sin \lambda - \mu N \cos \lambda$$

$$Q = N \cos \lambda + \mu N \sin \lambda$$

όπου: N = η κάθετη δύναμη μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς

λ = η γωνία του όνυχας

μ = ο συντελεστής τριβής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς



Σχήμα 1.1: Επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς (5)

Ο λόγος Y/Q που συνήθως χρησιμοποιείται για τον εκτροχιασμό μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \lambda - \mu}{1 + \mu \tan \lambda}$$

Ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται για την εύρεση της πιθανότητας εκτροχιασμού ενώ ως ασφαλής μέγιστη τιμή ορίζεται η τιμή 1,2.

Όταν οι δυνάμεις που ασκούνται είναι πολύ μικρής διάρκειας έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος από τους Ιαπωνικούς Σιδηροδρόμους (Japanese National Railways) στην οποία τροποποιείται ο λόγος $\frac{Y}{Q}$ ως εξής:

$$\frac{Y_{\max}}{Q} = \frac{0.04}{t_1}$$

όπου:

$Y_{\max}$ = η μέγιστη οριζόντια δύναμη

t_1 = η διάρκεια δράσης της δύναμης

Q = η κατακόρυφη δύναμη

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς μπορούν πλέον να μετρηθούν με τεχνολογικά όργανα στον τροχό. Ο λόγος Y/Q χρησιμοποιείται σαν ένα μέτρο ασφάλειας και εκτιμά την ενδεχόμενη φθορά στη γραμμή. Ο λόγος Y/Q δίνει τη δυνατότητα να υποδηλωθεί αν δεν υπάρχει κίνδυνος εκτροχιασμού του σιδηροδρομικού οχήματος, αλλά μια υπέρβαση του κριτηρίου δε συνεπάγεται απαραίτητα και έναν επικείμενο εκτροχιασμό. Για το λόγο αυτό το κριτήριο του Nadal που παρουσιάστηκε και παραπάνω χρησιμοποιείται κυρίως σε πειραματικές εργασίες. (6)

1.2 Χρήση πακέτων προσομοίωσης.

Κάνοντας χρήση σύγχρονων πακέτων σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, είναι δυνατό να επιτευχθούν ρεαλιστικές προσομοιώσεις της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σιδηροδρομικού οχήματος. Η θεωρητική βάση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται είναι τώρα πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη, ενώ τα προγράμματα που αρχικά είχαν γραφτεί από ερευνητικά ινστιτούτα έχουν εξελιχθεί πλέον σε αποτελεσματικά, αξιόπιστα και φιλικά για το χρήστη πακέτα. Παραδείγματα τέτοιων εξομοιωτικών πακέτων είναι τα εξής: ADAMS/Rail, GENSYS, NUCARS, MEDYNA, A'GEM και VAMPIRE.

Το πρώτο στάδιο για την κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου είναι η εισαγωγή μιας ομάδας εξισώσεων οι οποίες και χαρακτηρίζουν το σιδηροδρομικό όχημα. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται «εξισώσεις της κίνησης» και μπορούν να ετοιμασθούν αυτόματα από το πακέτο εξομοίωσης, ζητώντας από το χρήστη είτε να εισάγει κάποιες παραμέτρους του οχήματος, είτε να εισάγει κάποιες βασικές συντεταγμένες που θα περιγράφουν το σιδηροδρομικό όχημα και τα τμήματα που το αποτελούν. (7)

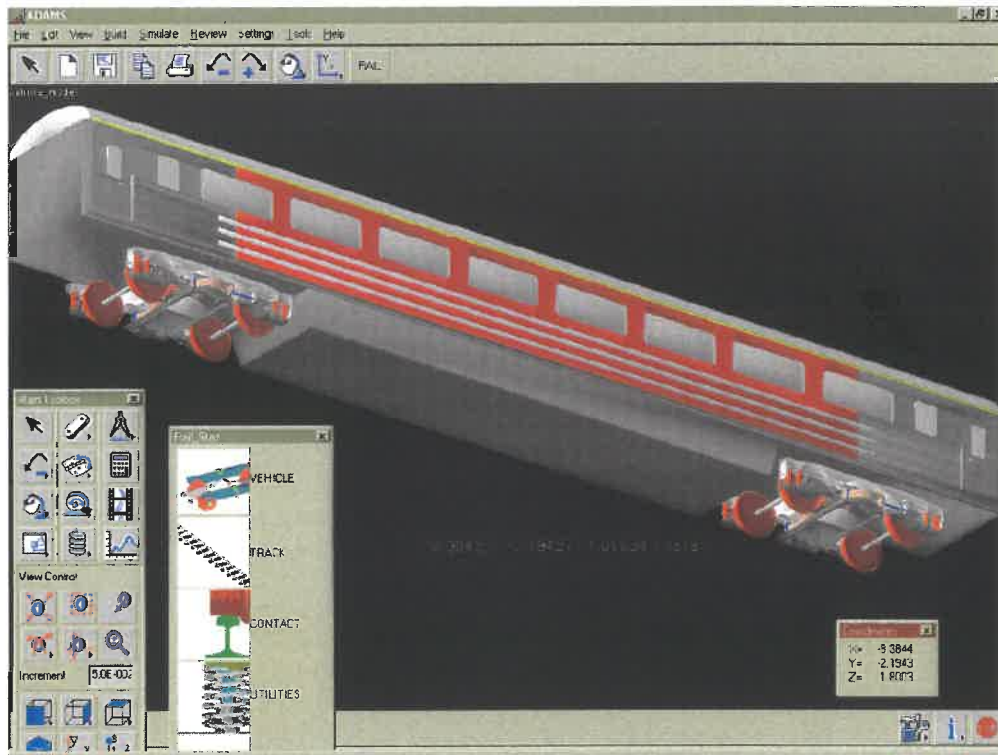
Παρακάτω γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πακέτων που αναφέρθηκαν.

1.2.1 ADAMS/Rail

Το λογισμικό πακέτο ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) χρονολογείται από την αρχή της δεκαετίας του εβδομήντα. Αρχικά το ADAMS επικεντρωνόταν κυρίως σε γραμμική ανάλυση, χωρίς τη δυνατότητα να καλύψει τις απαιτήσεις των βιομηχανιών για μη γραμμικά συστήματα. Στις αρχές του 1990 και με τη βοήθεια των Ολλανδικών Σιδηροδρόμων αναπτύχθηκε το πρόγραμμα ADAMS/Rail, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης σιδηροδρομικών οχημάτων. Στην παρούσα φάση ανάλυση για δύο σημεία επαφής δεν είναι διαθέσιμη. (6)

Παρακάτω στο σχήμα 1.2 δίνεται ένα παράδειγμα εξομοίωσης με χρήση του προγράμματος ADAMS/Rail, ενώ στο σχήμα 1.3 φαίνονται κάποια από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για σιδηροδρομικό όχημα που κινείται δε

καμπύλη ακτίνας 700m και για διάφορους συντελεστές τριβής (0.15, 0.30, 0.45)



Σχήμα 1.2: Τυπική οθόνη του προγράμματος ADAMS/Rail (8)

Mk3 Passenger Coach		Coefficient of friction: 0.15				Coefficient of friction: 0.3				Coefficient of friction: 0.45			
Curve radius: 700m		Wheelset 1		Wheelset 2		Wheelset 1		Wheelset 2		Wheelset 1		Wheelset 2	
Worn P8 + worn BS1134		Outside	Inside / Flange	Outside	Inside / Flange	Outside	Inside / Flange	Outside	Inside / Flange	Outside	Inside / Flange	Outside	Inside / Flange
Cent. deficiency: 0mm													
Lateral displacement	mm	-6.00		-2.75		-7.60		-2.60		-7.60		-2.60	
Vector Sum Creep Force	kN	7.48	7.42	2.60	3.40	15.00	14.14	1.48	4.79	25.99	19.10	1.27	5.93
Contact Patch Area	mm ²	77.00	76.00	65.00	80.00	75.00	80.00	67.00	78.00	78.00	80.00	65.00	77.00
Contact Point position	mm	17.50	2.00	-11.50	-6.75	-17.50	-2.00	7.00	11.50	-17.50	-2.00	-11.50	-7.20
Peak Contact Stress	kN/mm ²	0.97	0.98	1.15	0.92	1.08	0.95	1.14	0.92	0.96	0.95	1.13	0.92
Cent. deficiency: 10mm													
Lateral displacement	mm	-8.00		-4.50		-9.00		-4.00		-8.00		-9.50	
Vector Sum Creep Force	kN	8.06	6.40	2.97	5.70	18.60	12.53	2.73	8.06	17.00	26.93	3.19	9.01
Contact Patch Area	mm ²	80.00	70.00	77.00	71.00	85.00	71.00	73.00	71.00	73.00	80.00	73.00	70.00
Contact Point position	mm	-17.50	-2.00	-12.50	-5.70	-18.00	-2.00	-12.00	-5.00	-2.00	-32.00	-11.70	-6.50
Peak Contact Stress	kN/mm ²	1.09	0.92	1.08	0.81	1.06	0.81	1.23	0.85	0.94	1.03	1.23	0.86
Cent. deficiency: 150mm													
Lateral displacement	mm	-6.00		-6.00		-8.00		-4.50		-6.00		-4.00	
Vector Sum Creep Force	kN	8.00	5.26	5.00	5.52	20.36	12.08	4.74	8.24	17.20	28.30	4.74	9.67
Contact Patch Area	mm ²	81.00	68.00	78.00	70.00	87.00	69.00	78.00	69.00	70.00	85.00	78.00	69.00
Contact Point position	mm	17.50	-2.00	-13.80	-4.00	-18.00	-2.00	-12.10	-5.90	-2.00	-32.00	-11.90	-6.40
Peak Contact Stress	kN/mm ²	1.09	0.89	1.17	0.81	1.03	0.89	1.17	0.83	0.90	1.06	1.10	0.83

Σχήμα 1.3: Αποτελέσματα ανάλυσης για κίνηση σιδηροδρομικού οχήματος σε καμπύλο τμήμα ακτίνας 700m (7)

1.2.2 NUCARS (6)

Το πρόγραμμα NUCARS (New and Untried Car Analytic Regime Simulation) είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης σιδηροδρομικών οχημάτων. Η ευέλικτη δομή του προγράμματος επιτρέπει στο χρήστη να σχεδιάσει με ευκολία κάποιο μοντέλο ενός εκ των υπάρχοντων ή και ενός καινούριου σιδηροδρομικού οχήματος. Πρόσφατες βελτιώσεις καθιστούν το πρόγραμμα αυτό πιο γενικό και κατάλληλο για παγκόσμιο εργαλείο εξομίωσης για δυναμικά συστήματα.

Η έκδοση NUCARS 2.1 περιέχει αυτόματους υπολογισμούς για επαφή δύο σημείων ανάμεσα στον τροχό και τη σιδηροτροχιά, ενώ η τελευταία έκδοση 2.2 περιλαμβάνει και βελτιωμένες προβλέψεις για την αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς.

1.2.3 MEDYNA (6)

Το πρόγραμμα MEDYNA (MEhrkorper DYNAmik) είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα που περιέχει πολλές δυνατότητες. Εγκαθιστά τις εξισώσεις της κίνησης, προσδιορίζει τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης και λύνει τις προκύπτουσες από τα αποτελέσματα εξισώσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Μάλιστα κατά την ανάπτυξη του προγράμματος MEDYNA, η μοντελοποίηση τροχού – σιδηροδρομικού οχήματος ήταν άμεσης προτεραιότητας.

1.2.4 A’GEM (6)

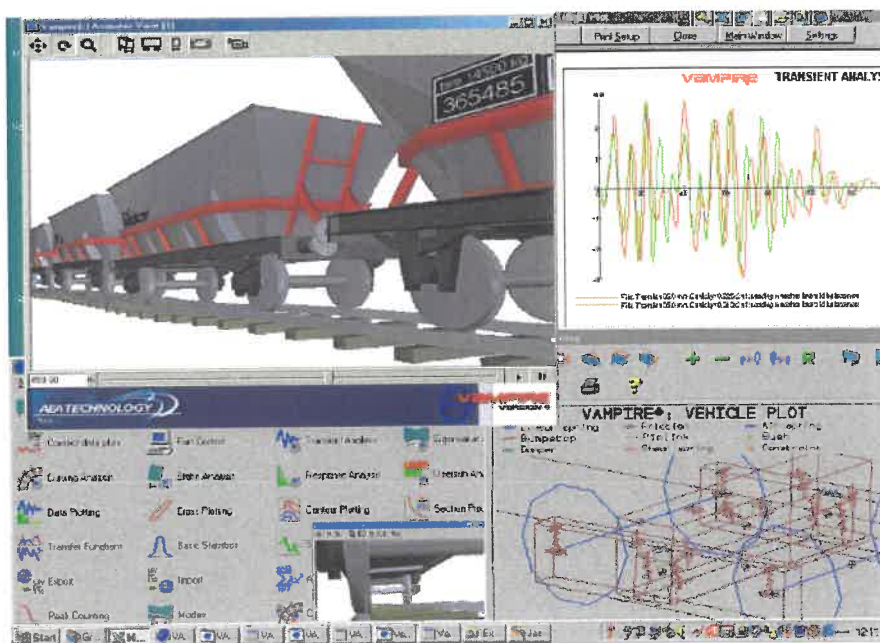
Το πρόγραμμα A’GEM (Automatic Generation of Equation of Motion) αναπτύχθηκε από το τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του πανεπιστημίου του Κίνγκστον στο Οντάριο του Καναδά. Το μοντέλο οχήματος – σιδηροτροχιάς φτιάχνεται χρησιμοποιώντας μια γραφική επιφάνεια του προγράμματος

AutoCad. Το A'GEM λειτουργεί σε περιβάλλον DOS. Ενώ τέλος το λογισμικό περιέχει και μη γραμμική ανάλυση.

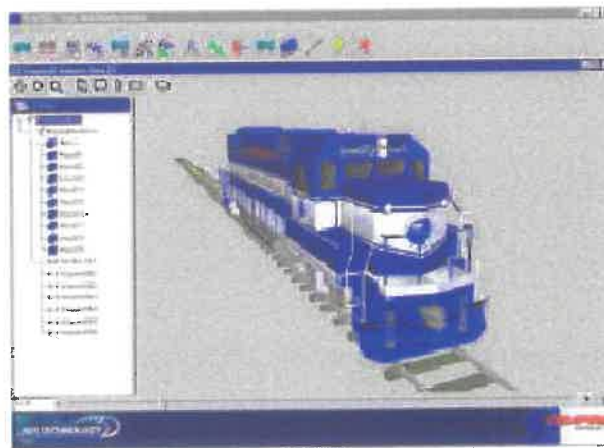
1.2.5 VAMPIRE

Το πρόγραμμα VAMPIRE (Vehicle dynAmic Modeling Package In a Railway Environment) είναι ένα λογισμικό πακέτο το οποίο αναπτύχθηκε από την ομάδα έρευνας των Αγγλικών Σιδηροδρόμων πριν από 25 χρόνια.(6)

Το πρόγραμμα VAMPIRE είναι το πιο χρησιμοποιημένο πρόγραμμα δυναμικής προσομοίωσης σιδηροδρομικού οχήματος στον κόσμο. Το VAMPIRE δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να φτιάξει ένα εικονικό μοντέλο από οποιοδήποτε σιδηροδρομικό όχημα και να το τρέξει, χρησιμοποιώντας πραγματικά μεγέθη στη γεωμετρία της γραμμής (Στα σχήματα 1.4 και 1.5 φαίνεται μια τυπική οθόνη του προγράμματος). Στη συνέχεια στο σιδηροδρομικό μοντέλο που κατασκευάζεται μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα εικονικά όργανα που θα επιτρέψουν τη μελέτη της συμπεριφοράς του οχήματος.



Σχήμα 1.4: Τυπική οθόνη κατά τη χρήση του VAMPIRE (8)



Σχήμα 1.5: Τυπική οθόνη κατά τη χρήση του VAMPIRE (9)

Από τη χρήση αυτών των τέστ προσομοίωσης ο χρήστης είναι σε θέση να εκτιμήσει και τη συμπεριφορά του οχήματος καθώς και τον αντίκτυπο που θα έχει η κίνηση του οχήματος στη σιδηροδρομική γραμμή, χωρίς να χρειαστεί να γίνουν πραγματικά τέστ. Αυτό επιτρέπει στο όχημα και στη γραμμή να βελτιστοποιηθούν, ενώ προβλήματα που προκαλούνται στην πράξη είναι δυνατό να μελετηθούν με χαμηλό κόστος.

Για το πρόγραμμα VAMPIRE έχουν άδεια πελάτες σε όλο τον κόσμο συμπεριλαμβανομένων και των παρακάτω χωρών: Αγγλίας, Γαλλίας, Ισπανίας, Ιταλίας, Γερμανίας, Αυστραλίας, Ιαπωνίας, Κορέας και Αμερικής. Το VAMPIRE χρησιμοποιείται εκτενώς από κατασκευαστές οχημάτων, από συντηρητές της γραμμής και από τους διαχειριστές των σιδηροδρομικών οχημάτων.

Η χρήση του προγράμματος αυτού είναι διπλής σημασίας. Μπορεί να χρησιμεύσει τόσο ως εικονικό τέστ για νέα μοντέλα σιδηροδρομικών οχημάτων (έτσι ώστε να προταθούν αλλαγές), όσο και για να αποκτηθεί καλύτερη αντίληψη για τη συμπεριφορά του οχήματος. Με την εξομοίωση του σιδηροδρομικού οχήματος μέσω του προγράμματος VAMPIRE μπορεί να αποδειχθεί ότι τηρούνται οι απαιτήσεις για:

- Σταθερότητα του οχήματος
- Άνεση και ασφάλεια των επιβατών
- Ικανότητα καλής εγγραφής στα καμπύλα τμήματα
- Μειωμένες φθορές στους τροχούς

- Τις δυνάμεις που αναπτύσσονται
- Τον κίνδυνο έναντι εκτροχιασμού

Η ανάλυση μέσω του VAMPIRE καθιστά τη διαδικασία που ακολουθούν οι κατασκευαστές πιο αξιόπιστη, εξασφαλίζοντας ότι το σιδηροδρομικό όχημα είναι κατασκευασμένο από την αρχή ώστε να είναι συμβατό με τα χαρακτηριστικά της γραμμής στην οποία μετέπειτα θα κινηθεί. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ώστε να υπάρξουν ευκαιρίες για επιπρόσθετα έσοδα, με το να καταδεικνύει τις περιπτώσεις όπου μπορεί το σιδηροδρομικό όχημα να τρέχει γρηγορότερα, με μεγαλύτερα φορτία και πάνω σε χαμηλότερης ποιότητας γραμμές.

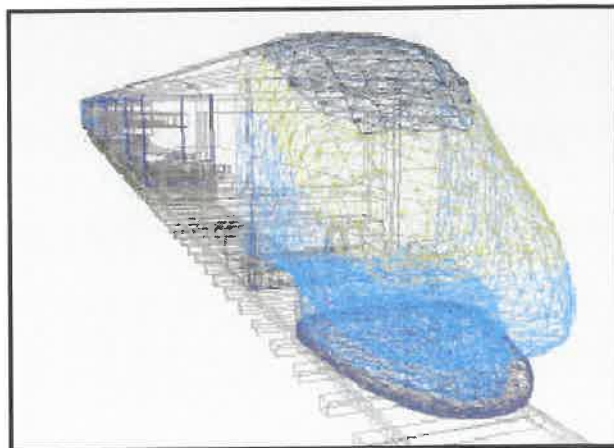
Το VAMPIRE είναι σε θέση να εκδώσει τιμές για διάφορα σιδηροδρομικά οχήματα που κινούνται πάνω σε διάφορες γραμμές, χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό εικονικών σιδηροδρομικών οχημάτων και με δεδομένα για τη γεωμετρία της γραμμής που εισάγει ο ίδιος ο χρήστης. Οι τιμές και κατ' επέκταση οι δείκτες που μπορούν να εξαχθούν από αυτές έχουν άμεση σχέση με :

- Την ασφάλεια και την άνεση των επιβατών
- Τον κίνδυνο έναντι εκτροχιασμού
- Τις φθορές της σιδηροδρομικής γραμμής
- Την προσωρινή άρση του περιορισμού της ταχύτητας.

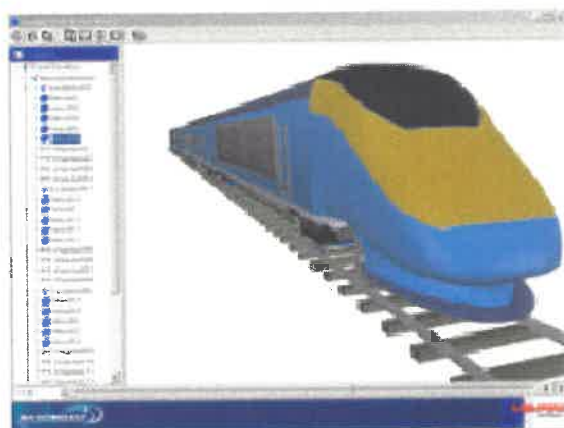
Πρόσθετο πρόγραμμα στο πακέτο του VAMPIRE αποτελεί το Animator Pro (Σχήματα 1.6 και 1.7). Αυτό έχει σχεδιασθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι απλό στη χρήση του και ώστε να δίνει εντυπωσιακά οπτικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση και την ανάλυση. Με τη βοήθεια αυτού του επιπρόσθετου εργαλείου, το VAMPIRE είναι σε θέση να μεταφέρει τεχνικές πληροφορίες σε διευθυντές και λήπτες αποφάσεων που δεν ανήκουν στο τεχνικό κομμάτι.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα VAMPIRE είναι πολύ γρήγορο. Η ταχύτητα της ανάλυσής του μπορεί να υπερβεί ακόμα και εκατό φορές την ταχύτητα άλλων απλών ανταγωνιστικών προϊόντων. Ένα ακόμη πλεονέκτημά του έναντι άλλων αντίστοιχων πακέτων είναι το γεγονός ότι

αφού χρησιμοποιείται και βελτιώνεται από τους Αγγλικούς Σιδηροδρόμους από τη δεκαετία του 1970, διαθέτει πλέον μια μεγάλη βιβλιοθήκη με στοιχεία από διάφορους τύπους σιδηροδρομικών οχημάτων. (9)



Σχήμα 1.6: Εξομοίωση με τη βοήθεια του Animator Pro (9)



Σχήμα 1.7: Εξομοίωση με τη βοήθεια του Animator Pro (9)

Παράρτημα 2

Παρουσίαση ατυχημάτων εκτροχιασμών

2.1 Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου κοντά στην περιοχή Queensland της Αυστραλίας. (10)

2.1.1 Γενικές πληροφορίες – περιγραφή.

Στις 15/11/2004 και 23.55 τοπική ώρα ένα τρένο με ντιζελοκίνητη μηχανή εκτροχιάστηκε 419,493 km από το Μπρισμπέιν (Σχήμα 2.1). Το πρώτο βαγόνι καθώς και τα υπόλοιπα επτά που ακολουθούσαν εκτροχιάστηκαν.

Υπήρχαν 150 επιβάτες, 2 οδηγοί και 5 μέλη του προσωπικού την ώρα του εκτροχιασμού. Παρά το γεγονός ότι δεν υπήρξαν απώλειες ανθρώπινων ζωών, σημειώθηκαν κάποιοι τραυματισμοί μερικοί εκ των οποίων υπήρξαν σοβαροί.



Σχήμα 2.1: Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου κοντά στο Queensland της Αυστραλίας.(10)

2.1.2 Αιτία του εκτροχιασμού και προσομοίωση μέσω προγράμματος.

Έχοντας αποκλείσει σαν πιθανούς παράγοντες που συντέλεσαν στον εκτροχιασμό την κακή κατάσταση της γραμμής και του σιδηροδρομικού οχήματος, προέκυψε τελικά από την ανάλυση που έγινε μετά το ατύχημα ότι πιθανότατα αυτό προκλήθηκε μετά από αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς ή λόγω ανατροπής του οχήματος.

Χαρακτηριστικό είναι μάλιστα ότι γενικά κατά τον εκτροχιασμό λόγω ανατροπής του οχήματος απουσιάζουν οι ζημιές στο σημείο του εκτροχιασμού ενώ οι φθορές στους τροχούς είναι περιορισμένες. Και στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως η απουσία φθορών στο αρχικό βαγόνι ήταν μια ένδειξη ότι ο

εκτροχιασμός προκλήθηκε σαν αποτέλεσμα της ανατροπής του σιδηροδρομικού οχήματος.

Για τον εκτροχιασμό λόγω αναρρίχησης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς ή εξαιτίας ανατροπής του σιδηροδρομικού οχήματος μπορούν να γίνουν υπολογισμοί ή ακόμα και προσομοίωση εάν είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής, χαρακτηριστικές τιμές του σιδηροδρομικού οχήματος καθώς και η ταχύτητα αυτού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα απαιτούμενα δεδομένα για το όχημα, τη γραμμή και την ταχύτητα ήταν γνωστά.

Με τη βοήθεια των προαναφερθέντων δεδομένων και με χρήση του προγράμματος VAMPIRE (το οποίο και αναλύθηκε στο κεφάλαιο 7) έγινε προσομοίωση των συνθηκών του ατυχήματος. Οι μετρήσεις του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη δύναμη (L/V) είχαν σαν αποτέλεσμα μικρές τιμές, τις οποίες και καλύπτει το κριτήριο εκτροχιασμού του Nadal. Έτσι αποκλείστηκε και η περίπτωση εκτροχιασμού λόγω αναρρίχησης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς.

Τελικά λοιπόν αποδείχτηκε ότι ο συγκεκριμένος εκτροχιασμός συνέβη λόγω ανατροπής του πρώτου βαγονιού του σιδηροδρομικού οχήματος.

2.2 Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου στην Τουρκία κοντά στην Κωνσταντινούπολη. (11)

2.2.1 Γενικές πληροφορίες – Περιγραφή

Στις 22 Ιουλίου 2004 ένα επιβατηγό τρένο που εκτελούσε τη διαδρομή Κωνσταντινούπολη – Ανκαρα εκτροχιάστηκε περίπου 184 χιλιόμετρα έξω από την Κωνσταντινούπολη (Σχήμα 8.2). Τη στιγμή εκείνη το τρένο είχε αναπτύξει ταχύτητα 132 km/h ενώ το ανώτατο όριο της επιτρεπτής ταχύτητας ήταν 80 km/h.



Σχήμα 2.2: Εκτροχιασμός επιβατηγού τρένου κοντά στην Κωνσταντινούπολη (11)

2.2.2 Κατάσταση γραμμής

Η γραμμή αποτελούνταν από τσιμεντένιους στρωτήρες και σιδηροτροχιές βάρους 49 kg/m. Κάποιοι από τους στρωτήρες είχαν μικρές φθορές που οφείλονταν σε προηγούμενους εκτροχιασμούς φορτηγών τρένων. Στη θέση του εκτροχιασμού δε βρέθηκαν σημάδια από αναρρίχηση του τροχού, ενώ επειδή σε αυτό το σημείο το δεύτερο βαγόνι βρέθηκε να έχει μετατόπιση 90 cm έξω από τη γραμμή (Σχήμα 2.3), πιθανολογείται ότι οι τροχοί εκτροχιάστηκαν σε προηγούμενο σημείο επί της γραμμής από το αρχικά υπολογισμένο.



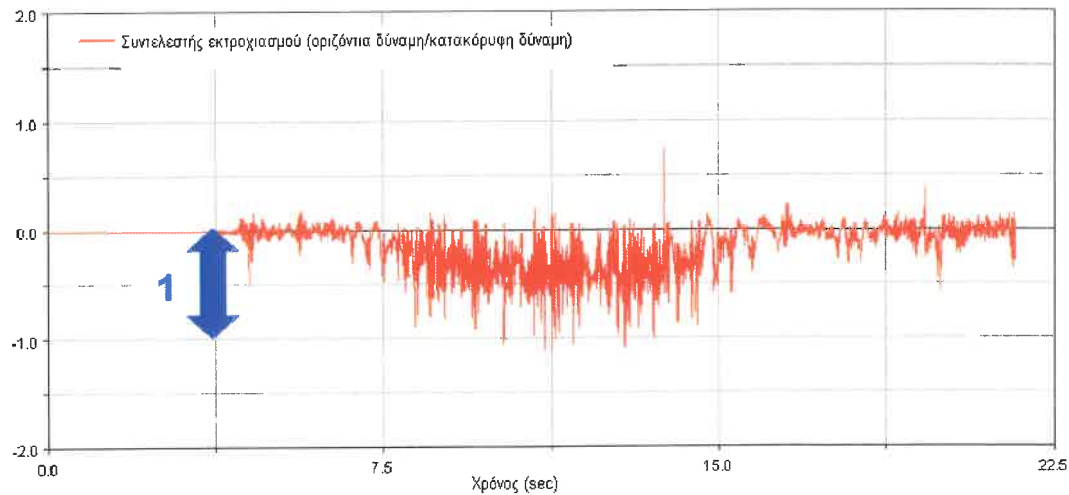
Σχήμα 2.3: Αρχικά υπολογισμένο σημείο εκτροχιασμού (11)

2.2.3 Προσομοίωση του ατυχήματος με το πρόγραμμα ADAMS/Rail

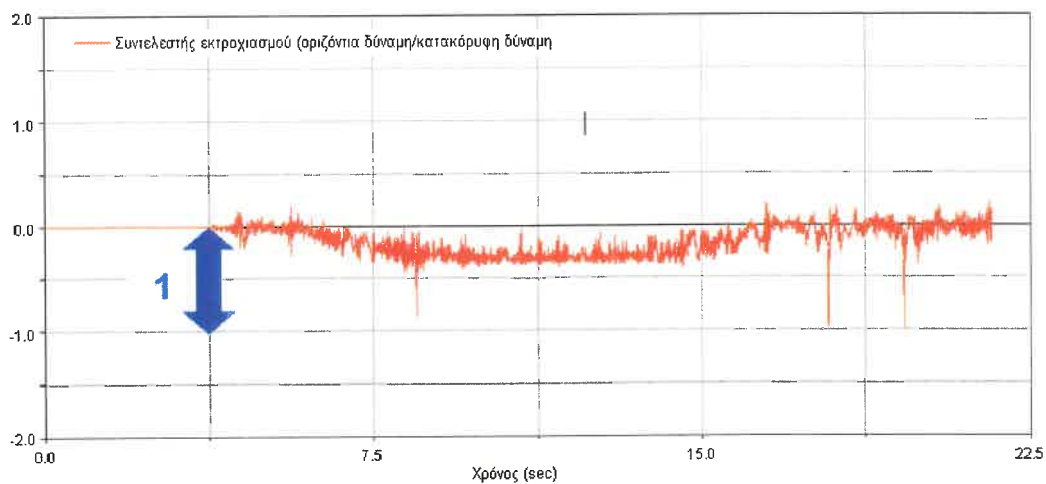
Για την προσομοίωση των συνθηκών του ατυχήματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ADAMS/Rail 2003 με δεδομένα όπως σιδηροτροχιά S49, προφίλ τροχού S1002 και εύρος γραμμής 1435mm. Μετρήσεις έγιναν για τις τρεις ταχύτητες των 22 m/s, 28 m/s και 36 m/s (δηλαδή 79,2 km/h, 100,8 km/h και 129,6 km/h). Επιπλέον στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν και οι φθορές της σιδηροδρομικής γραμμής που είχαν μετρηθεί.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω στα σχήματα 2.4-2.11, για τους δύο από τους τέσσερις τροχούς, όπου φαίνεται ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη δύναμη (συντελεστής εκτροχιασμού) σε συνάρτηση με το χρόνο. Παρατηρείται λοιπόν ότι για ταχύτητα 22 m/s ο συντελεστής εκτροχιασμού είναι σχετικά μεγάλος, μικρότερος όμως από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (1,2) που ορίζει το κριτήριο του Nadal. Για την ταχύτητα 28 m/s ο συντελεστής εκτροχιασμού είναι σχεδόν ίσος με 1,2 ενώ για την ταχύτητα των 36 m/s ξεπερνά κατά πολύ

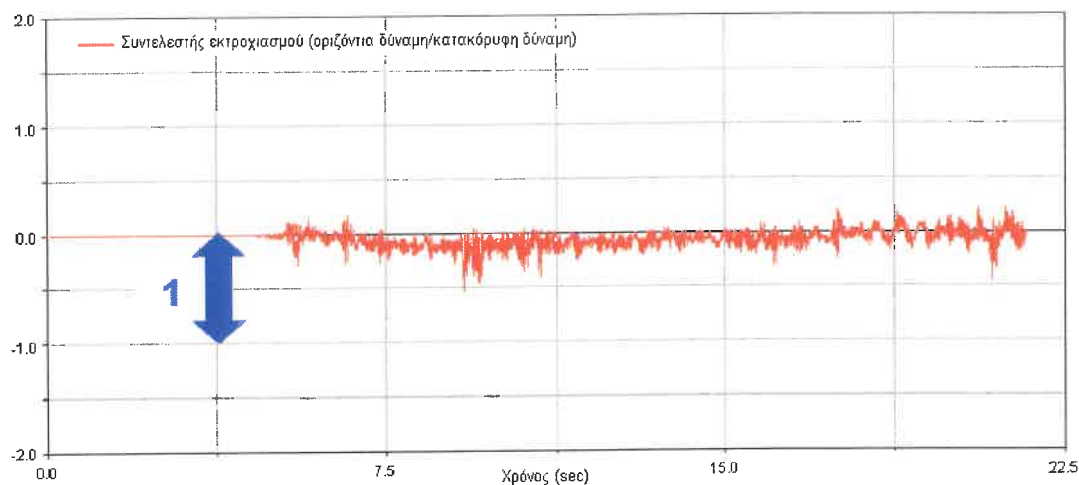
τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή και το όχημα τίθεται πλέον σε αυξημένο κίνδυνο έναντι εκτροχιασμού.



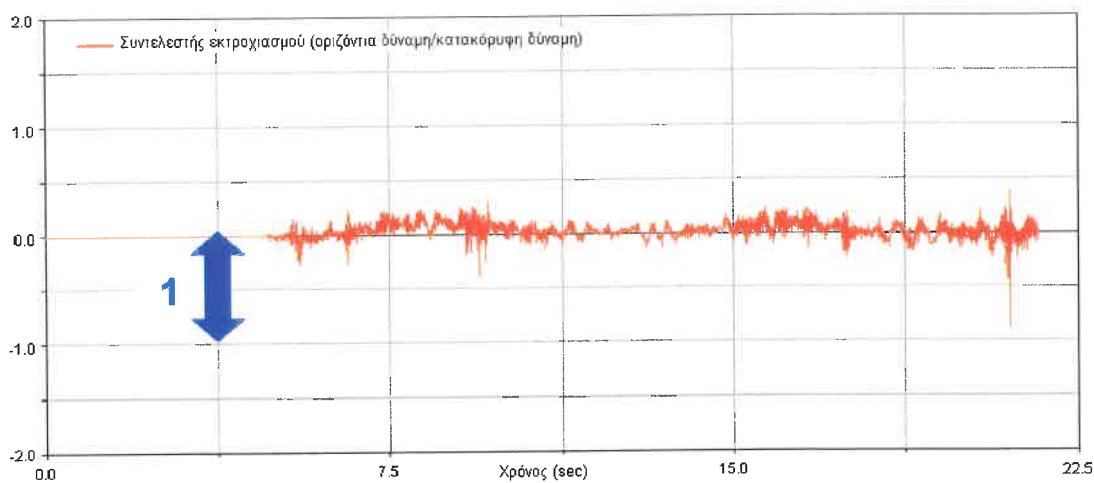
Σχήμα 2.4: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=22\text{m/s}$ (80km/h). 1° σετ τροχών, αριστερός τροχός (11)



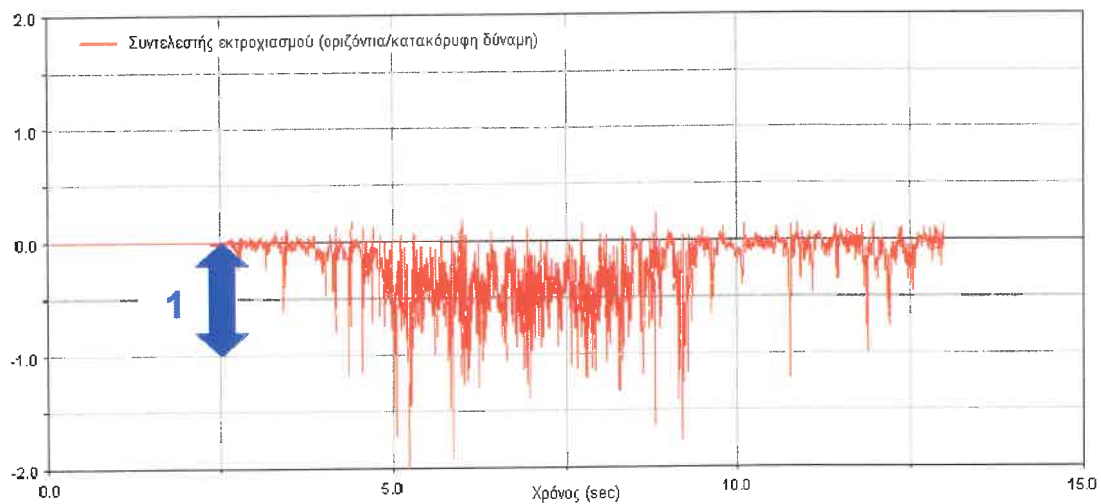
Σχήμα 2.5: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=22\text{m/s}$ (80km/h). 1° σετ τροχών, δεξιός τροχός (11)



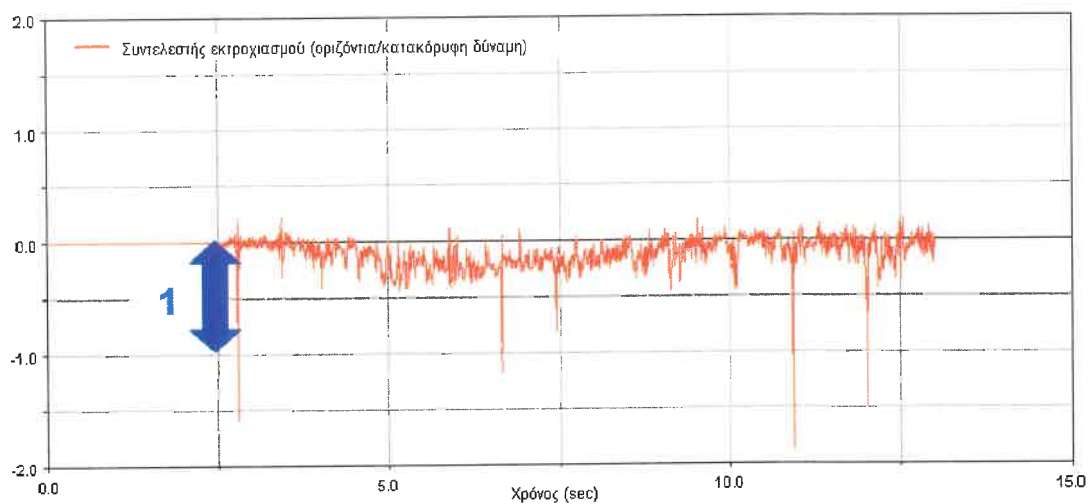
Σχήμα 2.6: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=22\text{m/s}$ (80km/h). 4° σέτ τροχών, αριστερός τροχός (11)



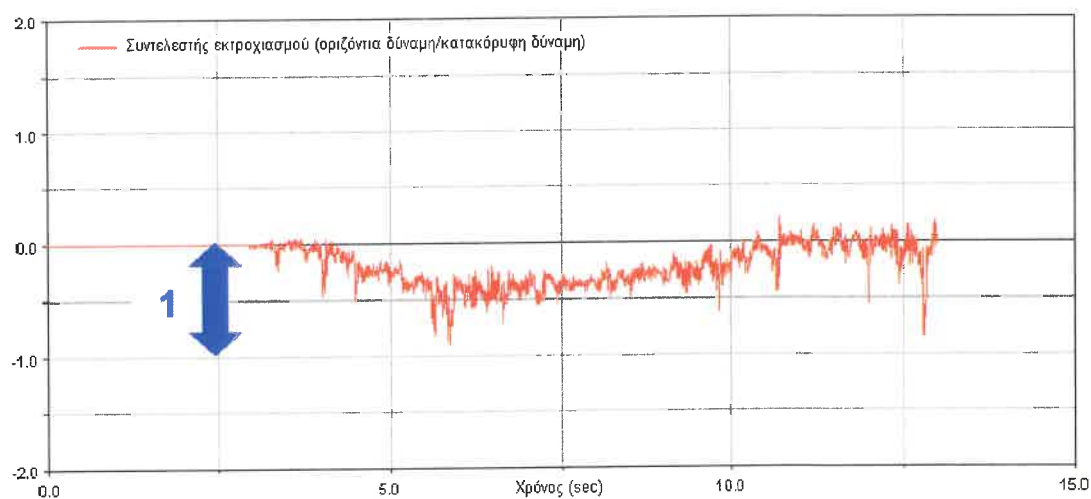
Σχήμα 2.7: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=22\text{m/s}$ (80km/h). 4° σέτ τροχών, δεξιός τροχός (11)



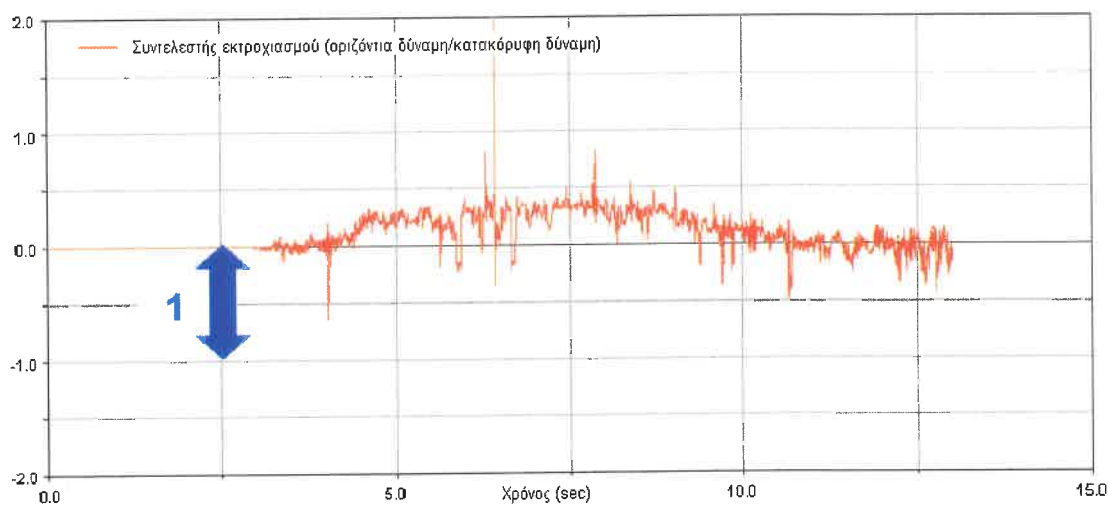
Σχήμα 2.8: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=36\text{m/s}$ (130km/h). 1^ο σετ τροχών, αριστερός τροχός (11)



Σχήμα 2.9: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=36\text{m/s}$ (130km/h). 1^ο σετ τροχών, δεξιός τροχός (11)



Σχήμα 2.10: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=36\text{m/s}$ (130km/h). 4^ο σετ τροχών, αριστερός τροχός (11)



Σχήμα 2.11: Αποτελέσματα για ταχύτητα $V=36\text{m/s}$ (130km/h). 4^ο σετ τροχών, δεξιός τροχός (11)

2.2.4 Αιτία εκτροχιασμού – αποτελέσματα έρευνας

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας έδειξαν τελικά ότι:

- Με ταχύτητα 80 km/h δεν υπήρχε κανένας κίνδυνος εκτροχιασμού
- Με ταχύτητα 100 km/h δε θα συνέβαινε εκτροχιασμός (αν και πρόκειται για οριακή τιμή της ταχύτητας που παρέχει ασφάλεια)
- Με ταχύτητα 130 km/h μπορεί να παρατηρηθεί αναρρίχηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εκτροχιασμό.

2.3 Εκτροχιασμός φορτηγού τρένου κοντά στην περιοχή Camrose του Καναδά (12)

2.3.1 Γενικές πληροφορίες – Περιγραφή

Στις 8 Ιουλίου 2002 και τοπική ώρα 13.28 ένα Καναδικό φορτηγό τρένο εκτροχιάστηκε κοντά στην περιοχή Camrose. Κανένας τραυματισμός δε σημειώθηκε.

Η γραμμή στην οποία κινούνταν το φορτηγό τρένο ήταν μονή, έκτασης 95,1 μιλίων, ενώ η επιτρεπτή ταχύτητα από το 49,2 μέχρι και το 58,4 μίλι είναι 25mph.

2.3.2 Αιτία εκτροχιασμού

Ύστερα από έρευνα σχετικά με τις δυνάμεις που έδρασαν κατά τη διάρκεια του εκτροχιασμού, παρατηρήθηκε ότι ο εκτροχιασμός επήλθε στα άδεια βαγόνια του φορτηγού τρένου. Λόγω του μικρού βάρους των βαγονιών αυτών (κατακόρυφη δύναμη) δεν μπορούσε να αντισταθμιστεί η οριζόντια

δύναμη που δρούσε στο σημείο αυτό με αποτέλεσμα ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη δύναμη (L/V) να ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπτή τιμή που ορίζει το κριτήριο του Nadal για ασφάλεια έναντι εκτροχιασμού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pr. Dr. E. Mettler, "Technische Mechanik I", Institut für Mechanik, Technische Hochschule Karlsruhe
- [2] Κ.Λυμπέρης, «Εφαρμοσμένη σιδηροδρομική», ΕΜΠ, 2004
- [3] Coenraad Esveld, "Modern railway track", TuDelft, 2001
- [4] William Hay, "Railroad engineering", Canada, 1984
- [5] Β.Προφυλλίδης, «Σιδηροδρομική», Θεσσαλονίκη, 1993
- [6] ORE, "Calculations of equivalent conicities for the S 1002 wheel profile on UIC 60 rails", October 1975
- [7] Κ.Αμπακούμκιν - Κ.Λυμπέρης, «Ειδικά θέματα σιδηροδρομικής», Αθήνα, 2001
- [8] Α.Καλτσούνης, «Σιδηροδρομική», Αθήνα, 2000
- [9] Richtlinien für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) – Spurführungs- Richtlinien (SpR) – Köln, 1986
- [10] UIC- KODEX 510-2
- [11] Hans-Ludwig Krugmann, "Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis", Wien 1982
- [12] Νικ.- Ιωαν. Κορωναίος, «Σιδηροδρομική Επιδομή», Θεσσαλονίκη 1963

- [13] Anton Nefzger, "Geometrie der Berührung zwischen Radsatz und Gleis", März 1974
- [14] Roland Müller, "Die problematik der Berührungsgeometrie Rad/Schiene", Bern
- [15] Χρίστος Πυργίδης - Τριαντάφυλλος Μπουσμαλής «Η επιρροή της κατατομής των επισώτρων των τροχών στην εγγραφή των σιδηροδρομικών φορείων στα καμπύλα οριζοντιογραφικά τμήματα γραμμής.»
- [16] Χρίστος Πυργίδης, «Σχεδιασμός και κατασκευή σιδηροδρομικής υποδομής», Θεσσαλονίκη 2003

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- (1) <http://www.survey.ntua.gr/main/labs/roads> («Συνιστώσες της σιδηροδρομικής γραμμής», «Η υποδομή της γραμμής»)
- (2) <http://www.rail.tudelft.nl/downloads/> (Coenraad Esveld, “Session 2- Wheel-rail principles”)
- (3) www.trb.org/publications/tcrp/tcrp_rpt_71a.pdf (Huimin Wu, Nicholas Wilson “Track related research“ Volume 5)
- (4) <http://www.central.tee.gr/publications> (Γιώργος Νίνος, «Τροχός και σιδηροτροχιά» Τεχνικά χρονικά, Ιούλιος- Αύγουστος 2005)
- (5) www.rtu.mmu.ac.uk/pubs (S.D. Iwnicki, “An intelligent track monitoring system”)
- (6) <http://www.fra.dot.gov/> (Federal Railroad Administration, “Safety of railroad passenger vehicle dynamics”)
- (7) <http://www.blackwell-synergy.com/> (S.D. Iwnicki, “Simulation of wheel-rail contact forces”)
- (8) <http://www.rtu.mmu.ac.uk/pubs/> (S.D. Iwnicki, J. Evans, “Vehicle dynamics and the wheel-rail interface”)
- (9) <http://vampire-dynamics.com/> (“Vampire, vehicle dynamic simulation”)
- (10) <http://www.transport.qld.gov.au/> (Australian Transport Safety Bureau, “Derailment of cairns tilt train VCQ5”)
- (11) www.esveld.com (Coenraad Esveld, “Investigation of the train accident on 22 July 2002 near Pamukova, Turkey”)

- (12) www.tsb.gc.ca/en (Transportation Safety Board of Canada, "Railway investigation report R02C0050")

- (13) <http://www.sciencedirect.com/> (Aleksander Sladkowski, "Analysis of wheel-rail interaction using FE software")

- (14) <http://www.rail.tudelft.nl/> (TU Delft, "Shape optimization of railway wheel profile")

- (15) <http://www.sciencedirect.com/> (I. Shevtsov, C. Esveld "Optimal design of wheel profile for railway vehicles")