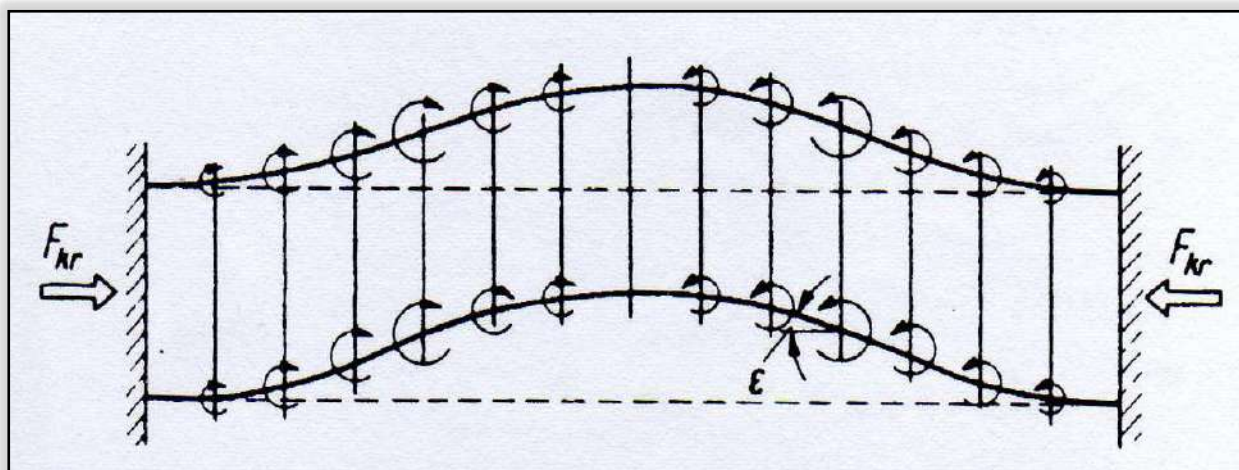




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΕΣΧΑΡΑΣ
-ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ-



ΦΟΙΤΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΗΛ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΛΥΜΠΕΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

ΣΥΝΟΨΗ

Τίτλος: Διερεύνηση της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας σιδηροδρομικής εσχάρας – Θεωρητικός υπολογισμός –
Όνομα: Παρασκευάς Κωνσταντίνος
Επιβλέπων: Λυμπέρης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται μία ανάλυση της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας (IPA) σιδηροδρομικής εσχάρας. Η τιμή της προσδιορίζεται πειραματικά στο εργαστήριο και έτσι οι αβεβαιότητες και το κόστος είναι σημαντικά. Έτσι, αναλύεται και αξιολογείται η πειραματική διαδικασία, ως προς την ορθότητά της. Στη συνέχεια, επιχειρείται ο προσδιορισμός της IPA, με δύο άλλες μεθόδους, μία γεωμετρική και μία με τάσεις, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ύστερα, αξιολογούνται οι δύο μέθοδοι και χρησιμοποιείται η πιο έγκυρη από αυτές, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η IPA διαφόρων σιδηροδρομικών εσχάρων. Οι τιμές που προκύπτουν συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα από το Εργαστήριο Σιδηροδρομικής Επιδομής του Πολυτεχνείου του Μονάχου, καθώς και με τιμές της βιβλιογραφίας.

Λέξεις κλειδιά: Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας, Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά, ακαμψία εσχάρας, πλευρική μετατόπιση, λυγισμός, στρεπτική αντίσταση συνδέσμων

ABSTRACT

Title: Study of the Equivalent Moment of Inertia (EMoE) of railway track – theoretical calculation –
Name: Paraskevas Konstantinos
Supervisor: Liberis Konstantinos, Teacher assistant

In this Master Thesis, an analysis of the Equivalent Moment of Inertia (EMoI) of a railway track is attempted. The value of the EMoI, is determined experimentally in the laboratory, thus the uncertainties and the cost are high. So, the experiment procedure is analysed and evaluated, as far as its accuracy is concerned. After that, the calculation of the EMoI is attempted, through two other methods, one geometrical and one with stresses, which were developed in this present dissertation. Moreover, these two methods are evaluated, and the more accurate one is used, in order to calculate the EMoI, of several railway tracks. These values are compared with the experimental data from the Railway Superstructure Laboratory of the Munich Technical University, and with values from the bibliography.

Key words: Equivalent Moment of Inertia, Continuous Welded Rail, track stiffness, lateral displacement, buckling, fastening torsional resistance

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόθερμα τον Επίκουρο Καθηγητή και Επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, **Κο Κωνσταντίνο Λυμπέρη**, για την καθοδήγησή του και τις χρήσιμες συμβουλές, που μου προσέφερε, καθώς επίσης για το χρόνο που μου αφιέρωσε και το πολύτιμο βιβλιογραφικό υλικό, χωρίς το οποίο δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή, **Κο Γ. Κανελλαΐδη**, για το χρόνο που μου αφιέρωσε, σχετικά με τις παρατηρήσεις του πάνω στη διπλωματική μου εργασία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την συμφοιτήτριά μου, Μαρίνα Σιδέρη, για την αμέριστη βοήθειά της, στη μοντελοποίηση του προβλήματος της κάμψης της σιδηροδρομικής εσχάρας.

Τέλος, ευχαριστώ την αδερφή μου Δήμητρα Παρασκευά, Αρχιτέκτονα Μηχανικό Π.Θ. για τις εικαστικές της παρατηρήσεις, στην τελική μορφή του τεύχους και

Τους γονείς μου, για τη βοήθεια και τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Παρασκευάς Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
Συμβολισμοί.....	2
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ</u>	5
1.1 Σιδηροτροχιά.....	6
1.2 Στρωτήρες – Σύνδεσμοι.....	8
1.3 Έρμα.....	10
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ</u>	13
2.1 Η έννοια του λυγισμού	13
2.2 Ευστάθεια των γραμμών.....	14
2.3 Η Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά (ΣΣΣ)	16
2.4 Παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής..	23
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ</u>	27
3.1 Θεωρία του Meier	27
3.2 Μέθοδος Eisenmann	41
3.3 Μέθοδος Zoba	50
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Η ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ I_E</u>	58
4.1 Γενικότητες	58
4.2 Μέθοδοι υπολογισμού	76
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ</u>	86
5.1 Παραδοχές.....	86
5.2 Ανάλυση της μεθόδου.....	90
5.3 Αποτελέσματα	94
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	126
<u>ΠΡΟΤΕΙΝΕΤΑΙ</u>	129
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>	130
Α. Αυτούσια αποτελέσματα ανάλυσης	131
Β. Κέντρο διάτμησης διατομής σιδηροτροχιάς	159
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	161

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται μία ανάλυση της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας (IPA) σιδηροδρομικής εσχάρας, καθώς επίσης και ο θεωρητικός υπολογισμός της, με μεθόδους που αναπτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας είναι μία έννοια με εξέχουσα σημασία στον υπολογισμό της ευστάθειας της σιδηροδρομικής γραμμής, καθώς είναι μια παράμετρος, που συμπεριλαμβάνεται σε όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ευστάθειας. Υπάρχουν μέθοδοι που λαμβάνουν την παράμετρο αυτή άμεσα, όπως η μέθοδος του Eisenmann, αλλά και μέθοδοι που την λαμβάνουν έμμεσα, όπως η μέθοδος του Zoba. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας επηρεάζει σημαντικά το κατά πόσο μία σιδηροδρομική γραμμή είναι ευσταθής ή όχι.

Η τιμή της, προσδιορίζεται πειραματικά στο εργαστήριο και έτσι οι αβεβαιότητες και το κόστος είναι σημαντικά. Γι αυτό το λόγο, επιχειρείται η θεωρητική προσέγγιση της IPA, έτσι ώστε να υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια και χωρίς ιδιαίτερο κόστος (χρόνο, προσωπικό, χρήμα). Αρχικά, λοιπόν, αναλύεται και αξιολογείται η πειραματική διαδικασία, ως προς την ορθότητά της. Όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, η πειραματική διαδικασία, μπορεί να μην είναι ικανή να αναπαραστήσει τις πραγματικές συνθήκες της σιδηροδρομικής εσχάρας, με αποτέλεσμα να μετρώνται τιμές διαφορετικές από την πραγματικότητα.

Στη συνέχεια, επιχειρείται ο προσδιορισμός της IPA, με δύο άλλες μεθόδους, μία γεωμετρική και μία με τάσεις, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ακολούθως, αξιολογούνται οι δύο μέθοδοι και χρησιμοποιείται η πιο έγκυρη από αυτές, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η IPA διαφόρων σιδηροδρομικών εσχάρων. Η γεωμετρική μέθοδος αποδεικνύεται ανίσχυρη να περιγράψει το φαινόμενο και έτσι απορρίπτεται. Αντίθετα, η μέθοδος των τάσεων, περιγράφει το φαινόμενο πειστικά και με μεγάλη ακρίβεια. Οι υπολογισθείσες τιμές της IPA, παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση με τιμές που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα από το Εργαστήριο Σιδηροδρομικής Επιδομής του Πολυτεχνείου του Μονάχου, καθώς και με τιμές της βιβλιογραφίας. Πέρα, όμως από αυτό, η μέθοδος αυτή, λαμβάνει υπόψη της όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την IPA, και συμφωνεί και με προβλέψεις του Meier, που δεν έχουν αποδειχθεί θεωρητικά.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- Dri: συντελεστής σκληρότητας έρματος
g: βάρος σιδηροτροχιάς [N/m]
E: μέτρο ελαστικότητας σιδηροτροχιάς [$2,1 \times 10^5$ N/mm²]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- F: εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς [mm²]
f_o: υποθετικό αρχικό σφάλμα σιδηροδρομικής γραμμής [mm]
g: βάρος σιδηροτροχιάς [N/m]
i_o: κλίση σφάλματος [‰]
l_o: μήκος τόξου που εμφανίζεται το αρχικό σφάλμα [m]
w: εγκάρσια αντίσταση έρματος [N/mm]
y: εγκάρσια μετατόπιση σιδηροδρομικής γραμμής [mm]
α: θερμικός συντελεστής [$1,15 \times 10^{-5}$ 1/°C]
I_E: ισοδύναμη ροπή αδράνειας σιδηροδρομικής εσχάρας [mm⁴]
λ: συντελεστής αύξησης του μήκους της ράβδου από την παραμόρφωση της γραμμής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- a: απόσταση μεταξύ των κέντρων των στρωτήρων
a_{cr}: παράμετρος που εξαρτώνται από τον τύπο της σιδηροτροχιάς και το επίπεδο της γραμμής.
A_h: έργο ανύψωσης [J]
A_p: έργο θλιπτικής δύναμης P_o [J]
C: συντελεστής στρώσης έρματος [N/mm³]
F₍₂₎: επιφάνεια και των δύο σιδηροτροχιών = 2xF [mm²]
f: αρχικό υποθετικό σφάλμα γραμμής [mm]
F: διατομή της ράβδου [mm²]
f: μέγιστη απομάκρυνση του άξονα της ράβδου από την αρχική τοποθέτηση [mm]
f': κρίσιμο λάθος γραμμής όπου αρχίζει η μετατόπιση [mm]
g: ίδιο βάρος της ράβδου [N/m]
L: μήκος κύματος της ημιτονοειδούς καμπύλης [mm]
R: ακτίνα του άξονα της ράβδου στην μη παραμορφωμένη κατάσταση [m]

w :	πλευρική αντίσταση σε μετακίνηση της ράβδου [N/mm]
α :	θερμικός συντελεστής του χάλυβα $= 1,15 \times 10^{-5}$ [grad ⁻¹]
A_b :	έργο λυγισμού [J]
A_{cr} :	παράμετρος που εξαρτώνται από τον τύπο της σιδηροτροχιάς και το επίπεδο της γραμμής.
A_v :	έργο επιμήκυνσης [J]
A_w :	έργο πλευρικής παραμόρφωση [J]
β :	ιδεατό πλάτος [mm]
Δf :	επιπλέον ελάττωμα εξαιτίας των θλιπτικών τάσεων
Δt :	αύξηση της θερμοκρασίας της γραμμής πάνω από την ουδέτερη θερμοκρασία (εμφανιζόμενη) [°C]
Δt_{krit} :	κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας της γραμμής πάνω από την ουδέτερη θερμοκρασία, κατά την οποία αρχίζει η μετατόπιση [°C]
E :	μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδηροτροχιάς [$2,1 \times 10^5$ N/mm ²]
I :	θεμελιακή τιμή μήκους για την επιδομή [mm]
I_E :	ισοδύναμη ροπή αδράνειας της ράβδου στο επίπεδο κάμψης [mm ⁴]
K_1 :	συντελεστές που μετατρέπουν τα χαρακτηριστικά υπολογισμού στα
K_2 :	χαρακτηριστικά αναφοράς
K_3 :	
λ :	αύξηση του μήκους της ράβδου από την παραμόρφωση της γραμμής κάμψης [mm]
	μονάδα μήκους [N/mm]
ξ_1 :	συντελεστής που εξαρτάται από τις τιμές των n και k
ξ_2 :	συντελεστής που εξαρτάται από τις τιμές των n και k
P_o :	θλιπτική δύναμη στη ράβδο [kN]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

F_{kr} :	η κρίσιμη δύναμη λυγισμού [N]
E :	το μέτρο ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς [N/cm ²]
I :	η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς στην εγκάρσια διεύθυνση [cm ⁴]
L :	το μήκος της ράβδου μεταξύ των σημείων εξασφάλισης [cm]
I_E :	ισοδύναμη ροπή αδράνειας της ράβδου στο επίπεδο κάμψης [mm ⁴]
M_o :	στρεπτική ροπή συνδέσμου [kNm]
θ :	γωνία στροφής σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα [rad]
a :	απόσταση στρωτήρα – σημείο εφαρμογής δύναμης F στην πειραματική διάταξη [m]
b :	απόσταση στρωτήρα – παραμορφοσίμετρο στην πειραματική διάταξη [m]
ε :	ανηγμένη γωνία στροφής σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα
r :	στρεπτική δυσκαμψία συνδέσμου

F :	επιβαλλόμενη δύναμη στην εσχάρα [N]
$I_{yy \text{ tot}}$	η ροπή αδράνειας της εσχάρας κατά τον άξονα y [mm ⁴]
$I_{yy \text{ rail}}$	η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς κατά τον άξονα y [mm ⁴]
$I_{yy \text{ sl}}$	η ροπή αδράνειας του στρωτήρα κατά τον άξονα y [mm ⁴]
h	το βάθος / ύψος του στρωτήρα [m]
L	το μήκος του στρωτήρα [m]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

σ	η αναπτυσσόμενη τάση [kPa]
M	η ροπή που καταπονεί τη διατομή [kNm]
y	η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα [m]

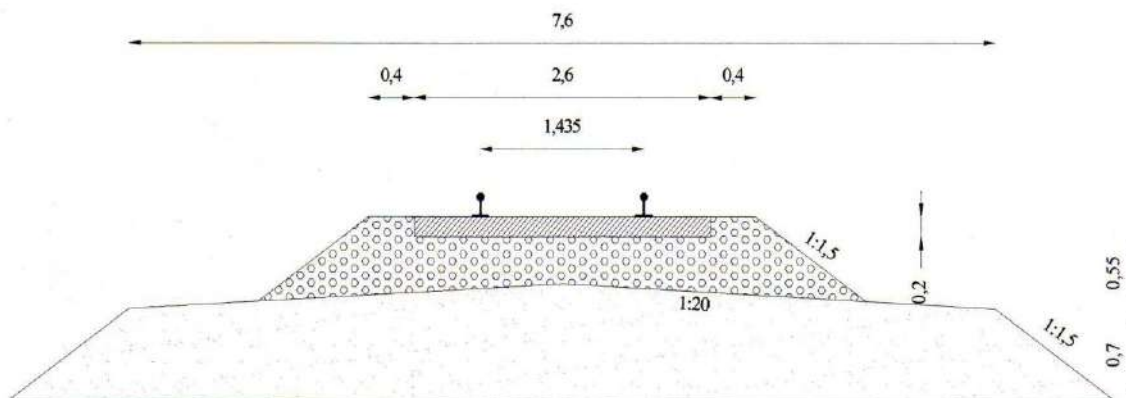
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

Με τον όρο επιδομή εννοούμε το σύνολο των σιδηροτροχιών, στρωτήρων και έρματος, με την έδρασή του επί του εδάφους. Οι σύνδεσμοι συνδέουν τις σιδηροτροχιές με τους στρωτήρες, οι στρωτήρες εγκιβωτίζονται στο έρμα και αυτό στη συνέχεια μεταφέρει τις δυνάμεις στο έδαφος θεμελιώσεως της επιδομής (υποδομή). Οι τυπικές διατομές της επιδομής είναι περίπου ίδιες για όλα τα σιδηροδρομικά δίκτυα, διαφέρουν όμως σε ορισμένα σημεία, από χώρα σε χώρα.

Οι σιδηροτροχιές πρέπει να έχουν μεταξύ τους μια σταθερή απόσταση, η οποία να μην μεταβάλλεται καθ' όλο το μήκος του δικτύου. Η απόσταση αυτή έχει καθιερωθεί στα 1,435m (κανονικό πλάτος - κανονική γραμμή). Επίσης, στα διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα χρησιμοποιούνται και αποστάσεις των 1,676m, 1,672m, 1,600m, 1,524m (μεγάλο πλάτος), ή 1,067m, 1,00m (μικρό πλάτος). Η γραμμή με απόσταση σιδηροτροχιών ίση με 1,00m ονομάζεται μετρική γραμμή. Για αστική κυκλοφορία χρησιμοποιούνται αποστάσεις 1,00m και 0,75m και για γραμμές βιομηχανιών και εργοταξίων πλάτη 0,90m και 0,60m [11].

Παρακάτω φαίνεται μία τυπική διατομή σιδηροδρομικής γραμμής (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1
Τυπική διατομή σιδηροδρομικής γραμμής
Πηγή [11]

Στη συνέχεια, εξετάζονται τα κύρια στοιχεία που συνθέτουν την επιδομή της σιδηροδρομικής γραμμής.

1.1. ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ

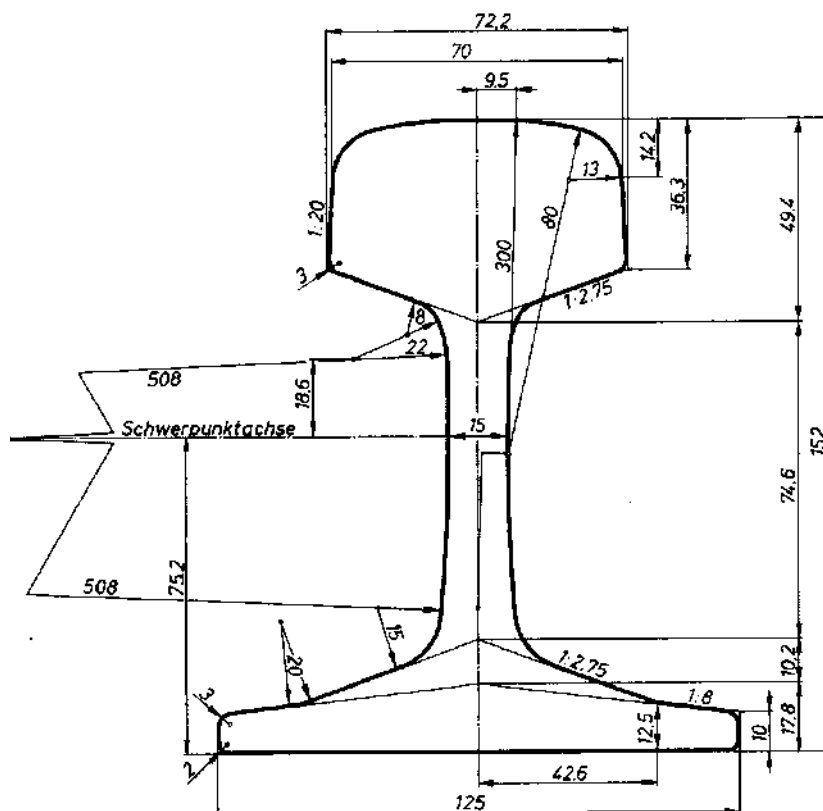
Μαζί με την ανάπτυξη του σιδηροδρόμου επινοήθηκαν και διάφορες διατομές σιδηροτροχιών. Από τον μεγάλο αριθμό των κατά καιρούς χρησιμοποιηθείσων διατομών επικράτησαν σε ευρεία κλίμακα η *σιδηροτροχιά με διπλή κεφαλή, η σιδηροτροχιά με λαιμό* και η *σιδηροτροχιά με πέλμα* ή τύπου "VIGNOLE".

- Η σιδηροτροχιά με διπλή κεφαλή χαρακτηρίζεται από το σχεδόν συμμετρικό σχήμα. Η αρχική ιδέα να χρησιμοποιείται με αντιστροφή της κάτω κεφαλής με την επάνω, όταν φθαρεί, δεν αποδείχθηκε σωστή, διότι με το χρόνο καταστρέφεται και το τεμάχιο που εδράζεται η σιδηροτροχιά. Ο τύπος αυτός της σιδηροτροχιάς, που εγκαταλείφθηκε από το 1938 ακόμη και από τους Άγγλους, που την προτιμούσαν, συναντάται ακόμη σε μερικές παλιές γραμμές του γαλλικού σιδηροδρομικού δικτύου.
- Η σιδηροτροχιά με λαιμό επιτρέπει την τοποθέτηση της γραμμής στη στάθμη της οδού και γι' αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε σιδηροδρομικές γραμμές εντός λιμενικών εγκαταστάσεων.
- Τέλος, η σιδηροτροχιά με πέλμα, ή τύπου "VIGNOLE" (από το όνομα του Άγγλου μηχανικού που συνέστησε τη χρήση της) έχει το χαρακτηριστικό ότι με το πέλμα που διαθέτει στερεώνεται εύκολα στους στρωτήρες, είτε απ' ευθείας, είτε μέσω συνδέσμων. Το σχήμα της καθορίστηκε κυρίως από την ανάγκη συνδέσεως των τεμαχίων μεταξύ τους μέσω ειδικού συνδέσμου, του αμφιδέτη, ο οποίος στερεώνει τα διαδοχικά τεμάχια της γραμμής με στήριξη επί της κεφαλής και του κορμού (ψυχής) της διατομής. Γι' αυτό η κατάργηση του αμφιδέτη στις συγκολλημένες σιδηροτροχιές μεγάλου μήκους είναι δυνατό να οδηγήσει στο μέλλον σε τροποποίηση της καθιερωμένης αυτής διατομής. Η διατομή αυτή έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται με μικρές παραλλαγές, σε όλα τα σιδηροδρομικά δίκτυα του κόσμου.

Οι σιδηροτροχιές κατασκευάζονται από χυτοχάλυβα και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό της τάξεως των 70-90 Kp/mm². Για γραμμές με μεγάλη καταπόνηση, χρησιμοποιείται υψηλότερης αντοχής χυτοχάλυβας των 120 Kp/mm². Το μήκος των σιδηροτροχιών είναι τυποποιημένο σε διάφορες διαστάσεις, των 18μ. (κανονικός τύπος), 24m ή και 30m. Στην περίπτωση των συγκολλημένων σιδηροτροχιών γίνεται σύνδεση με συγκόλληση σε τεμάχια των 45m, των 60m, ή ενίοτε και των 120m, τα οποία και μεταφέρονται και τοποθετούνται επί τόπου στο έργο. Στις καμπύλες τα τεμάχια της εσωτερικής σιδηροτροχιάς πρέπει να είναι λίγο βραχύτερα από αυτά της εξωτερικής, πράγμα που υπολογίζεται εύκολα θεωρητικά. Στην πράξη κατασκευάζονται ειδικές σιδηροτροχιές κατά 5, 10 ή 15cm βραχύτερες των κανονικών, οι οποίες και εξισώνουν κατά διαστήματα τη διαφορά μήκους μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής τροχιάς. Οι σιδηροτροχιές τοποθετούνται με μια μικρή κλίση 1:20 έως 1:40 προς το εσωτερικό, που δίνεται από τα τεμάχια σύνδεσης. Η διάρκεια ζωής των σιδηροτροχιών είναι 20-25 έτη για τα κύρια δίκτυα και 40-50 έτη για τα δευτερεύοντα [11].

Υπάρχουν πολλοί τύποι σιδηροτροχιών. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως ο Γαλλικός τύπος σιδηροτροχιάς UIC 50 (Σχήμα 1.2).

Μήκος κανονικής σιδηροτροχιάς:	18m
Μήκος σιδηροτροχιάς εξισώσεως:	17,95m ή 17,91m
Επιφάνεια σιδηροτροχιάς:	63,92cm ²
Βάρος ανά τρέχον μέτρο:	50,18Kp [11,12]



Σχήμα 1.2
Διατομή σιδηροτροχιάς UIC50
Πηγή [12]

Στην Ευρώπη, οι σιδηροτροχιές που χρησιμοποιούνται κυρίως, στις σιδηροδρομικές γραμμές κανονικού εύρους είναι οι S49 και UIC60.

Στην Αφρική, οι σιδηροτροχιές που χρησιμοποιούνται σε μετρικές γραμμές, είναι οι S30, S40, U33, U36.

Ο τύπος και το μήκος της σιδηροτροχιάς επηρεάζει την ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής. Ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς λαμβάνονται στοιχεία, όπως είναι το βάρος της ανά τρέχον μέτρο, το εμβαδόν της διατομής της, η ακαμψία της, κ.ά. Ενδεικτικά, αναφέρεται, ότι όσο πιο μεγάλο είναι το βάρος της

σιδηροτροχιάς, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που δρουν σε αυτή. Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς, λαμβάνεται ίσο με το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ($E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$).

1.2. ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

1.2.1 Στρωτήρες

Οι στρωτήρες έχουν ως σκοπό να μεταδίδουν τα φορτία των σιδηροτροχιών στο έρμα, να εξασφαλίζουν την απόσταση των δύο σιδηροτροχιών μεταξύ τους και να δίνουν κλίση 1:20 στη συνήθη σιδηροτροχιά (τύπου VIGNOLE) [11]. Όσον αφορά στην ευστάθεια της γραμμής, ο στρωτήρας πρέπει να δίνει επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση, τόσο κατά μήκος της σιδηροτροχιάς όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, πρέπει να εξασφαλίζεται η αντίσταση τριβής της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα, αλλά και του στρωτήρα επί του έρματος. Η αντίσταση τριβής ολίσθησης της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους και το βαθμό συσφίξεως των συνδέσεων (δράση συνδέσμων) και μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη (μπορεί να φτάσει στο οκταπλάσιο) της αντίστασης ολίσθησης των στρωτήρων επί του έρματος [13]. Η τελευταία αυτή αντίσταση εξαρτάται από τον τύπο των στρωτήρων, το βάρος τους, τη μορφή τους και το υλικό κατασκευής τους. Ως υλικό στρωτήρων χρησιμοποιούνται το ξύλο, ο σίδηρος και το σκυρόδεμα. Επειδή ο κίνδυνος ανυψώσεως της σιδηροδρομικής γραμμής εξαρτάται από το βάρος της, με τη χρήση στρωτήρων από σκυρόδεμα αντί για ξύλινους επιτυγχάνουμε καλύτερα αποτελέσματα. Το βάρος g της σιδηροδρομικής γραμμής με ξύλινους στρωτήρες κυμαίνεται περί των $2,6 \text{ kg/cm}$, ενώ στην περίπτωση των στρωτήρων από σκυρόδεμα περί των $4,8 \text{ kg/cm}$ [14]. Παρ' όλ' αυτά, με την πάροδο του χρόνου και μετά από διέλευση κάποιων τόνων κυκλοφορίας, οι αιχμές του έρματος εμπύγνυνται στο ξύλο των στρωτήρων, εξασφαλίζοντας μια πολύ καλή πρόσφυση έρματος-στρωτήρα, προσδίδοντας έτσι αντίσταση κατά την εγκάρσια έννοια. Οι μεταλλικοί στρωτήρες έχουν ειδική μορφή, η οποία τους επιτρέπει να εγκιβωτίζονται στο έρμα, δίνοντας πολύ ικανοποιητική αντίσταση, παρόλο που και αυτοί είναι αρκετά ελαφρότεροι από τους αντίστοιχους από σκυρόδεμα (Υ-μεταλλικοί στρωτήρες).

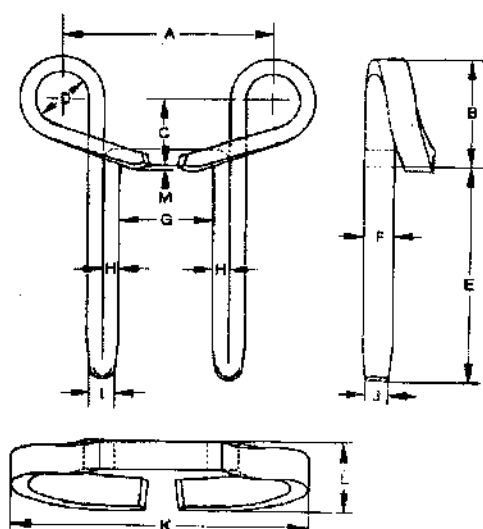
Η εγκάρσια αντίσταση λόγω τριβής ολίσθησης των στρωτήρων από σκυρόδεμα οφείλεται, στο αυξημένο βάρος τους. Η αντίσταση στην εγκάρσια μετακίνηση w της σιδηροδρομικής γραμμής στην περίπτωση ξύλινων στρωτήρων ή από σκυρόδεμα είναι περίπου 8 kg/cm , ενώ στην περίπτωση χαλύβδινων 12 kg/cm , και μπορεί να αυξηθεί με ειδικές διαρρυθμίσεις [14]. Οι γραμμές με Υ-μεταλλικούς στρωτήρες εμφανίζουν 10% έως 30% μεγαλύτερη εγκάρσια αντίσταση απ' ότι οι στρωτήρες από σκυρόδεμα [15]. Το μειονέκτημά τους είναι, ότι κοστίζουν περισσότερο ανά κομμάτι.

1.2.2. Σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι συνδέουν τις σιδηροτροχιές με τους στρωτήρες. Ο σκοπός των συνδέσμων των σιδηροτροχιών είναι να προσφέρουν υψηλή αντίσταση στις οριζόντιες δυνάμεις που τείνουν να μεγαλώσουν την απόσταση των σιδηροτροχιών στη γραμμή. Αυτές οι δυνάμεις επιβάλλονται στη σιδηροτροχιά από τα οχήματα που κινούνται σ' αυτές και μεταφέρονται στους στρωτήρες μέσω των συνδέσμων. Ο σύνδεσμος της σιδηροτροχιάς πρέπει, συνεπώς, να μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική εγκάρσια δυσκαμψία. Επιπλέον, χρειάζεται να έχει ελαστικότητα κατά την εγκάρσια έννοια, έτσι ώστε να απορροφώνται οι κρούσεις που προκαλούνται από τα οχήματα, ενώ θα πρέπει να λειτουργεί σωστά, κάτω από οποιοσδήποτε κλιματολογικές συνθήκες και για οποιαδήποτε ταχύτητα συρμών, τουλάχιστον για 20 με 30 χρόνια από την τοποθέτησή του.

Ο σύνδεσμος πρέπει να εμποδίζει τον «ερπυσμό» της σιδηροτροχιάς πάνω στους στρωτήρες, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μακριών συγκολλημένων σιδηροτροχιών. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν ο σύνδεσμος εξασφαλίζει επαρκή πίεση από την επαφή, στη βάση της σιδηροτροχιάς. Η πίεση επαφής δεν πρέπει να μειώνεται στη διάρκεια ζωής του συνδέσμου. Η αντίσταση στη στροφή πάνω στον στρωτήρα εξαρτάται επίσης από την πίεση επαφής του συνδέσμου πάνω στη βάση της σιδηροτροχιάς και από τον τύπο της εγκάρσιας καθοδήγησης της σιδηροτροχιάς. Σημαντικό είναι, τέλος να εξασφαλίζεται, με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συνδέσμου, εύκολη και οικονομική τοποθέτηση.

Παρακάτω φαίνεται λεπτομερώς ο ελαστικός σύνδεσμος DS 18 για ξύλινους στρωτήρες.



A= 121	110±3	I= 16±1	} Οι διαστάσεις είναι σε mm
B= 62,4±1	130±3	J= 16±1	
C= 37	145±3	K= 171,8±3	
D= 33	18±0,75	L= 40±4	
	52±0,3	M= 4,5±1,5	
H= 8,9±0,5			

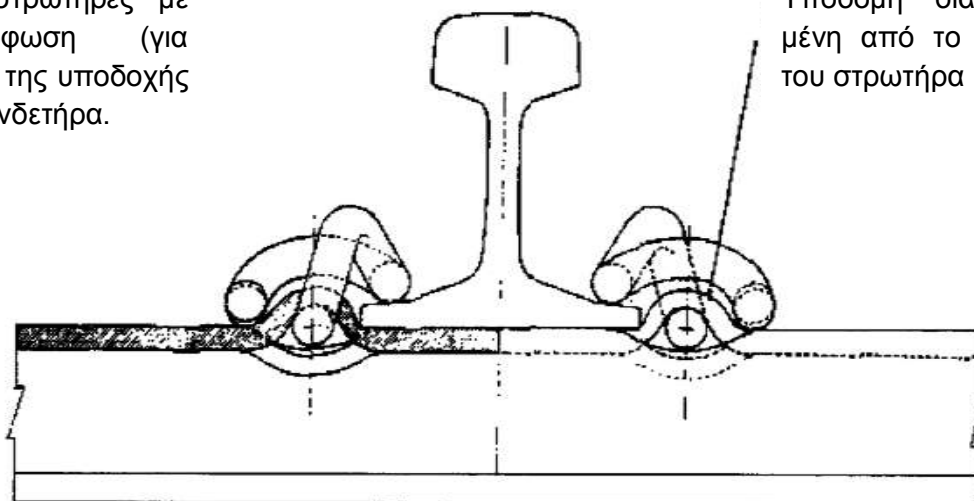
Σχήμα 1.3
Ελαστικός σύνδεσμος DS18
για ξύλινους στρωτήρες
Πηγή [16]

Πολλοί τύποι συνδέσμων έχουν κατασκευαστεί με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις. Έτσι, οι ελαστικοί σύνδεσμοι DS 18, αποτελούνται από ένα και μόνο κομμάτι, γεγονός που κάνει πολύ εύκολη την τοποθέτησή τους, ακόμα και από ανειδίκευτο προσωπικό. Το κομμάτι του συνδέσμου αυτού, με δύο τετραγωνικές αιχμές εμπίγνυται σε κυκλικές οπές ξύλινων εμποτισμένων με κρεόζωτο στρωτήρων, ενώ το πάνω μέρος τους (γέφυρα) ακουμπά στη βάση της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 1.3). Δεν απαιτούν υψηλό κεφάλαιο για την αγορά τους, καθώς δεν χρειάζονται άλλα επιπλέον εξαρτήματα, εκτός από την περίπτωση έντονων καμπύλων ή στρωτήρων από μαλακό ξύλο, όπου γίνεται χρήση πλακών βάσης. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα με χρήση ειδικών εργαλείων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε αλλαγές.

Ένας πιο περίπλοκος σύνδεσμος είναι ο σύνδεσμος Pandrol-e (Σχήμα 1.4), ο οποίος εξασφαλίζει ικανή πίεση, μεγάλη διάρκεια ζωής και οικονομία. Χρησιμοποιείται, κυρίως, με στρωτήρες από σκυρόδεμα.

Νέοι στρωτήρες με διαμόρφωση (για πίεση) της υποδοχής του συνδετήρα.

Υποδομή διαμορφωμένη από το έλασμα του στρωτήρα



Σχήμα 1.4
Σύνδεσμος Pandrol-e
Πηγή [16]

1.3. ΕΡΜΑ

Οι δυνάμεις των οχημάτων μεταφέρονται μέσω των σιδηροτροχιών, των στρωτήρων και του έρματος, απ' όπου καταλήγουν στην υπόβαση και από εκεί στο φυσικό έδαφος. Το έρμα, που αποτελεί το κατώτερο τμήμα της επιδομής, πρέπει να έχει τέτοιες ελαστικές ιδιότητες, ώστε μετά την αποφόρτιση από τα κυκλοφορούντα σιδηροδρομικά οχήματα, η επιδομή να επανέρχεται στην αρχική της θέση. Επιπλέον, το έρμα πρέπει να έχει επαρκή αντίσταση στις οριζόντιες δυνάμεις ώστε να μη μετακινούνται οι στρωτήρες. Η καλή αποστράγγιση του έρματος είναι αναγκαία ώστε να απομακρύνονται γρήγορα τα ύδατα της βροχής και να μη δημιουργείται σήψη των

ξύλινων στρωτήρων ή σκωρίαση των σιδηρών τεμαχίων της επιδομής, καθώς επίσης και να μη δημιουργείται παγετός.

Οι ιδιότητες του καλού έρματος είναι η ελαστικότητα, η ανθεκτικότητα στον παγετό, η αντοχή σε θλίψη, κρούση και θραύση των αιχμών, υλικό γωνιώδες για να προκαλεί καλύτερη διανομή στο υπέδαφος και καθαρά υλικά, χωρίς ανάμιξη με άργιλο, χώμα κλπ ή άλλες χημικές προσμίξεις που θα μπορούσαν να προσβάλουν τα σιδηρά τεμάχια της επιδομής. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σκύρα από φυσικά σκληρά πετρώματα, όπως βασάλτη, γρανίτη, διορίτη ή άλλα συναφή πετρώματα. Δεν συνιστώνται μαλακά ή πλακοειδή πετρώματα. Η άμμος δεν δίνει καλά αποτελέσματα για έδραση, ιδίως ως προς τη διάρκεια ζωής.

Μέσω του έρματος επιτυγχάνεται μια καλή διανομή των δυνάμεων και για να επιτευχθεί μία κατά το δυνατό ομοιόμορφη διανομή στο υπέδαφος, απαιτείται ένα ελάχιστο πάχος έρματος, που εκ πείρας έχει καθορισθεί σε 30cm, κάτω της κατώτερης επιφάνειας έδρασης του στρωτήρα [11]. Η σκληρότητα του έρματος ελέγχεται με τις μεθόδους LOS ANGELES - DEVAL και πρέπει να είναι $D_{ri} > 16$.

1.3.1. Σκοπιμότητα του έρματος

Προορισμός του έρματος είναι να διανέμει στην υποδομή τα συγκεντρωμένα φορτία των τροχών και να συμβάλλει στην εγκάρσια και κατά μήκος ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής. Πέραν των δύο βασικών αυτών ιδιοτήτων, η πείρα απέδειξε ότι το έρμα παίζει σημαντικό ρόλο στην προστασία της υποδομής από την υγρασία. Το έρμα μπορεί να τοποθετείται σε δύο στρώσεις. Η ανώτερη στρώση έχει προορισμό να εγκιβωτίζει τους στρωτήρες -γι' αυτό τα σκύρα πρέπει να είναι γωνιώδη- και να έχει πάχος 15 με 20cm, κάτω της κατώτερης επιφάνειας του στρωτήρα. Η κατώτερη στρώση πρέπει να εξασφαλίζει την αποστράγγιση του ύδατος, αλλά και να διανέμει τις πιέσεις. Πρέπει επίσης να εμποδίζει την άνοδο της αργίλου από το υπέδαφος.

1.3.2. Διατομή του έρματος

Το ελάχιστο συνολικό πάχος του έρματος είναι 35cm. Σε περίπτωση κακού εδάφους θεμελιώσεως, συνιστάται να αφαιρείται το στρώμα εδάφους πάχους 20 cm και να αντικαθίσταται με άμμο. Έτσι, το συνολικό πάχος, έρματος και άμμου, ανέρχεται σε 55cm. Το έρμα τοποθετείται έτσι ώστε να εγκιβωτίζει τους στρωτήρες αλλά να μην τους καλύπτει από την επάνω επιφάνεια. Η πείρα απέδειξε ότι η αντίσταση της γραμμής στις εγκάρσιες κινήσεις οφείλεται κυρίως στη μεγάλη τριβή της κάτω επιφάνειας του στρωτήρα στο έρμα. Επίσης, αντίσταση δημιουργεί και το έρμα που τοποθετείται μετά το άκρο του στρωτήρα (πάγκος έρματος). Στη διατομή των αμερικάνικων σιδηρόδρομων το έρμα προεξέχει του στρωτήρα κατά 15cm μόνο, ενώ στην γαλλική διατομή η διάσταση αυτή κυμαίνεται από 25cm μέχρι 35cm.

Στην περίπτωση των συγκολλημένων σιδηροτροχιών, η επικάλυψη των στρωτήρων με έρμα πάχους 10cm, δίνει μεγαλύτερη αντίσταση στις εγκάρσιες δυνάμεις, από μια προεξοχή του έρματος πέρα από το άκρο του στρωτήρα. Αντίθετα, η χρήση του έρματος μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο στην περίπτωση των

στρωτήρων από σκυρόδεμα, διότι τότε το ίδιο βάρος των στρωτήρων συντελεί στην ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής. Συνήθως, το έρμα αφαιρείται στην περιοχή μεταξύ των σιδηροτροχιών, όταν χρησιμοποιούνται στρωτήρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα ή στρωτήρες με μεταλλικό συνδετήριο στέλεχος [11].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

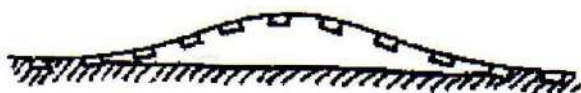
2.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Είναι γνωστό ότι όταν μια ευθύγραμμη ράβδος πρισματικής (σταθερής) διατομής θλίβεται αξονικά, η αύξηση της φόρτισης μέχρι κάποια ορισμένη (κρίσιμη) τιμή, προκαλεί συνεχώς αυξανόμενη αξονική βράχυνση. Είναι γνωστό, επίσης, ότι όταν μια ελαστική ράβδος έχει λυγηρότητα μεγαλύτερη κάποιας ορισμένης (ελάχιστης) τιμής, η ένταση αυτής βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής και η αξονική βράχυνση είναι ανάλογη της φορτίσεως [17]. Αν και τέτοια φόρτιση δεν προκαλεί ροπή κάμψης, είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ανάπτυξη μιας μικρής καμπτικής έντασης, λόγω τις ύπαρξης αρχικών ατελειών [18]. Εάν η φόρτιση υπερβεί την προαναφερθείσα κρίσιμη τιμή, η ράβδος εγκαταλείπει την ευθύγραμμη μορφή (αξονικής) παραμόρφωσης, λαμβάνοντας μια ελαφρώς καμπυλωμένη μορφή λόγω κάμψης. Η συμπεριφορά αυτή της ράβδου είναι γνωστή ως καμπτικός λυγισμός, ο οποίος λαμβάνει χώρα ως προς τον κύριο άξονα της διατομής με τη μικρότερη ροπή αδράνειας (και ως εκ τούτου με τη μεγαλύτερη λυγηρότητα). Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η λυγηρή ή επιμήκης αυτή ράβδος, υποκείμενη στην παραπάνω στατική φόρτιση, ισορροπεί τόσο σε ευθύγραμμη μορφή (για φόρτιση μικρότερη της κρίσιμης), όσο και σε ελαφρώς καμπυλωμένη μορφή (για φόρτιση ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης). Μικρή αύξηση της φόρτισης (πάνω από την κρίσιμη) προκαλεί σημαντικά μεγαλύτερη (δυσανάλογη) καμπτική παραμόρφωση. Σε κάποια δε ορισμένη τιμή της φόρτισης, αρχίζει η διαρροή (στην ακραία ίνα της περισσότερο εντεινόμενης από κάμψη διατομής), η οποία για περαιτέρω αύξηση της φόρτισης επεκτείνεται, οδηγώντας ακολούθως σε ανελαστικό ή πλαστικό λυγισμό. Επειδή για φόρτιση μεγαλύτερη της κρίσιμης τα περιθώρια μεταλυγισμικής αντοχής της ράβδου είναι πρακτικά περιορισμένα, θεωρούμε ότι η κρίσιμη φόρτιση συνδέεται με τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα αξονικά θλιβομένων ράβδων και ως εκ τούτου η φόρτιση αυτή (κατά την οποία λαμβάνει χώρα ελαστικός λυγισμός), αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού. Η αντιστοιχούσα στην παραπάνω φόρτιση κρίσιμη τάση λυγισμού είναι, εν γένει, πολύ μικρότερη της τάσης αναλογίας (ελαστικότητας) του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ράβδος. Και μάλιστα η κρίσιμη τάση λυγισμού είναι τόσο μικρότερη της τάσης αναλογίας, όσο μεγαλύτερη είναι η λυγηρότητα της ράβδου [17].

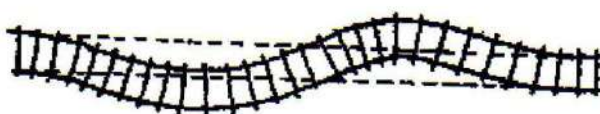
Η σιδηροτροχιά έχει μεγάλη λυγηρότητα, καθώς η διάσταση του μήκους σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις της είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, υπόκειται σε μεγάλες αξονικές δυνάμεις λόγω θερμοκρασίας, γεγονός που την καθιστά επίφοβη για εμφάνιση λυγισμού. Το πρόβλημα γίνεται τόσο πιο σημαντικό όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος της σιδηροτροχιάς και τελικά, για τις ΣΣΣ γίνεται κρίσιμο. Ο λυγισμός της σιδηροτροχιάς γίνεται με ταυτόχρονη στρέψη της ως προς την πλάκα έδρασης. Η πλευρική

μετατόπιση, αυτή, είναι η καταστροφή του άξονα της γραμμής, μέσω μιας περισσότερο ή λιγότερο ξαφνικής εκτόνωσης των θλιπτικών δυνάμεων, που συγκεντρώνονται στη γραμμή [2].

Οι δύο πιθανές μορφές αστοχίας της σιδηροδρομικής γραμμής είναι: η κατακόρυφη αστοχία, με ανύψωση της γραμμής (Σχήμα 2.1.α) και η πλευρική αστοχία (ριπτασμός) (Σχήμα 2.1.β).



Σχήμα 2.1.α
Αστοχία στο κατακόρυφο επίπεδο
Πηγή [14]



Σχήμα 2.1.β
Αστοχία στο οριζόντιο επίπεδο
Πηγή [14]

2.2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

2.2.1. Γενικά

Η σιδηροτροχιά στη γραμμή πρέπει να εδράζει και να καθοδηγεί. Για να πραγματοποιηθούν αυτά με ασφάλεια, πρέπει να έχει εξασφαλιστεί η ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής και στους τρεις άξονες (κατά μήκος, εγκάρσια και κατακόρυφα). Το πρόβλημα της ευστάθειας της γραμμής έχει να κάνει με τις μεταβολές του μήκους της σιδηροτροχιάς, εξαιτίας των μεταβολών της θερμοκρασίας (χειμώνας - καλοκαίρι, μέρα - νύχτα) και τις συνεπαγόμενες, ως αποτέλεσμα της δέσμευσης της γραμμής, εμφανιζόμενες δυνάμεις στη σιδηροτροχιά. Οι δυνάμεις αυτές, που είναι θλιπτικές για άνοδο της θερμοκρασίας και εφελκυστικές για μείωση, εμφανίζονται σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας και είναι σταθερές και ανεξάρτητες από τα φορτία της κυκλοφορίας. Μια γραμμή μπορεί να χάσει την ευστάθειά της και χωρίς να περνά συρμός. Ιδιαίτερα επικίνδυνες για την απώλεια της ευστάθειας είναι οι ΣΣΣ σε κλειστές καμπύλες. Όμως, ακόμα και οι αμφιδετούμενες σιδηροτροχιές δεν εγγυώνται σταθερότητα [15]. Απώλεια της ευστάθειας, σημαίνει εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού και στη συνέχεια στην πλευρική μετατόπιση της σιδηροτροχιάς, δηλαδή στην περιστροφή της γραμμής γύρω από τον οριζόντιο, κατά μήκος άξονά της.

Η ΣΣΣ είναι δυνατό να υποστεί μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις λόγω υψηλών θερμοκρασιών με συνέπεια να δημιουργείται το φαινόμενο της πλευρικής της μετατόπισης. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός η συγκολλημένη γραμμή μπορεί να θεωρηθεί ως δοκός απείρου μήκους, εντεινόμενη αξονικά, αφετέρου η εγκάρσια κίνηση της δοκού αυτής εμποδίζεται λόγω της αντιδράσεως από την ύπαρξη του

έρματος, αλλά και των ελαστικών συνδέσμων σιδηροτροχιάς - στρωτήρων. Η πειραματική έρευνα και η μαθηματική ανάλυση απέδειξαν ότι για να προκληθεί το φαινόμενο της πλευρικής μετατόπισης είναι απαραίτητη η ύπαρξη αρχικών ελαττωμάτων στη γραμμή και ότι η κατάσταση ευστάθειας της γραμμής στο κατακόρυφο επίπεδο είναι συνυφασμένη με την σταθερότητα στο οριζόντιο επίπεδο. Η παραμόρφωση της γραμμής σε κατακόρυφο επίπεδο μπορεί να έχει τη μορφή μιας ημιτονοειδούς καμπύλης, οπότε και η τριβή μεταξύ στρωτήρων και έρματος μπορεί να μειωθεί μέχρι 26% [11].

Η παραμόρφωση της γραμμής στο οριζόντιο επίπεδο προκύπτει κυρίως από ελαττώματα της κατασκευής (ευθυγραμμίας) των σιδηροδρομικών γραμμών, που παίζουν ένα σημαντικό ρόλο και που είναι συνήθως δύο ειδών: ελαττώματα που προσομοιάζουν προς μια ημιτονοειδή γραμμή (οφειλόμενα στην έλαση των εργοστασίων) και ελαττώματα γωνιακά, λόγω κακής συγκολλήσεως. Η επίδρασή τους είναι σημαντική στο οριζόντιο επίπεδο διότι ελαττώνουν την εγκάρσια αντίσταση του έρματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι παρουσιάζεται ελάττωση κατά 20% της εγκάρσιας αντιστάσεως του έρματος για ένα ελάττωμα ημιτονοειδούς μορφής πλάτους 2,5 mm. και μήκους κύματος 10m., ή για ένα ελάττωμα γωνιακό ενός χιλιοστού του ακτινίου [11]. Η ελευθερία κίνησης της σιδηροδρομικής γραμμής είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την κατακόρυφη έννοια προς τα πάνω, παρά κατά την οριζόντια έννοια εγκάρσια προς τη σιδηροδρομική γραμμή, όπου αναπτύσσονται σημαντικές αντιστάσεις λόγω του έρματος [19].

Διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται κυρίως κατά τη στιγμή της διέλευσης των συρμών και όχι όταν η γραμμή είναι αφόρτιστη [19].

2.2.2. Ο κίνδυνος της πλευρικής μετατόπισης

Ο κίνδυνος της πλευρικής μετατόπισης, που συνιστά ένα βασικό περιορισμό για την τοποθέτηση της γραμμής, αποτελεί ουσιαστικά το πρόβλημα της ευστάθειας της σιδηροδρομικής γραμμής. Η πλευρική μετατόπιση υφίσταται, εκτός από πολύ σπάνιες περιπτώσεις κατά το οριζόντιο επίπεδο της γραμμής και όχι κατά το κατακόρυφο. Για τη μελέτη και τον καθορισμό ορίων για την εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης, θεωρείται η εγκάρσια αντίσταση των στρωτήρων επί του έρματος. Η πλευρική μετατόπιση είναι πιο επίφοβη στις καμπύλες, όπου υφίσταται μια προδιάθεση, λόγω μορφής.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος θεωρητικών μελετών, οι οποίες ασχολούνται με το πολύ σημαντικό ερώτημα, αν οι σιδηροδρομικές γραμμές, με μακριές σιδηροτροχιές, προσφέρουν ασφάλεια σε όλο το μήκος τους, μετά από εμφάνιση μεγαλύτερων αξονικών δυνάμεων. Σε μερικές από αυτές τις εργασίες επιδιώκεται η ανάπτυξη απλώς μιας μεθόδου υπολογισμού, ενώ σε άλλες εξετάζεται ιδιαίτερα η ευστάθεια, αλλά για κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις, και τις περισσότερες φορές αναφέρονται στην πλευρική μετατόπιση. Γενικά, ξεκαθαρίστηκε ότι η θεωρητική προσέγγιση της πλευρικής μετατόπισης της γραμμής από τη σκοπιά των εμφανιζόμενων ενεργειών δεν προσφέρει την απαιτούμενη ακρίβεια, κι έτσι είναι

αναγκαία η εκτεταμένη χρήση μαθηματικών και ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονταν έδιναν σχεδόν μόνο τιμές «τάξης μεγέθους» και σε κάθε περίπτωση έπρεπε να θεωρηθούν προσεγγιστικές [2].

Για τη μελέτη της σταθερότητας της γραμμής πρότεινε ο MEIER μια πολύ καλή προσεγγιστική μέθοδο με βάση την ενέργεια, η οποία γρήγορα και χωρίς δυσκολία, για οποιαδήποτε σχέση γραμμής, επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού της ευστάθειας με επαρκή ακρίβεια, και αποτελεί μια πρακτική πρόταση, ώστε να εξασφαλίζεται εύκολα και οικονομικά κάθε σιδηροδρομική γραμμή, ευθεία και καμπυλωμένη, έναντι πλευρικής μετατόπισης [2]. Η προσέγγιση συνίσταται στο ότι για τη γραμμή κάμψης γίνεται η παραδοχή μιας ορισμένης μορφής, η οποία ήδη στην αρχική θέση περιέχει ορισμένου μεγέθους λάθος της θέσης της γραμμής, σε σχέση με την ακριβή γεωμετρική της θέση. Το υποθετικό αυτό υπολογιστικό μέγεθος του σφάλματος γραμμής, εξαρτάται από την κατάσταση της γραμμής. Στην μέθοδο αυτή συγκρίνονται η ενέργεια που απαιτείται για να επέλθει βλάβη στη γραμμή, με την ενέργεια, που απελευθερώνεται κατά την εμφάνιση της βλάβης. Μετατόπιση πραγματοποιείται όταν η ενέργεια που απελευθερώνεται υπερτερεί της απαιτούμενης [15].

Η ουσία του υπολογισμού της ευστάθειας της γραμμής είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης αύξησης της θερμοκρασίας που οδηγεί τη γραμμή σε πλευρική μετατόπιση.

Για τον υπολογισμό της ΣΘΓ (σταθερότητα θέσης γραμμής), οι παράμετροι που υπεισέρχονται αναφέρονται στη σιδηροδρομική γραμμή συνολικά (εσχάρα) και όχι στη σιδηροτροχιά μεμονωμένα. Έτσι, θεωρείται το εμβαδόν της εσχάρας (διπλάσιο εμβαδόν σιδηροτροχιάς), η ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εσχάρας στον κατακόρυφο άξονα, που είναι ανάλογη της ροπής αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών στον κατακόρυφο άξονα, κατά ένα συντελεστή, κτλ. Επίσης, θεωρείται ότι ενεργοποιείται η εγκάρσια αντίσταση της σιδηροδρομικής γραμμής, η οποία εξαρτάται από τον τύπο των στρωτήρων και τον αριθμό τους ανά km γραμμής (ή ισοδύναμα τη μεταξύ τους απόσταση), με την έναρξη της μετακίνησης (ή αν πρόκειται για κατακόρυφο λυγισμό - που είναι σπάνιος - ενεργοποιείται το βάρος της εσχάρας).

Πριν, όμως, αναλυθούν περισσότερο, οι παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια της σιδηροδρομικής γραμμής, θα γίνει μία ανασκόπηση των κυριότερων χαρακτηριστικών της ΣΣΣ, ώστε να κατανοηθούν πληρέστερα. Επιπλέον, οι μέθοδοι υπολογισμού που θα αναπτυχθούν στο Κεφάλαιο 3, αφορά κατά κύριο λόγο τις ΣΣΣ.

2.3. Η ΣΥΝΕΧΩΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ (ΣΣΣ)

2.3.1. Γενικότητες

Η ΣΣΣ βρίσκεται πάντοτε σε κατάσταση συστολής ή διαστολής ολόκληρη ταυτόχρονα ή εν μέρει, πράγμα που είναι δυνατό μόνο λόγω της διπλής συνάφειας και τριβής μεταξύ της σιδηροτροχιάς και του στρωτήρα, καθώς και μεταξύ του στρωτήρα και του έρματος. Η τριβή μεταξύ στρωτήρα και έρματος είναι δυνατό να εξασφαλισθεί κατά ασφαλή τρόπο. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και για την τριβή μεταξύ σιδηροτροχιάς και στρωτήρα εφόσον χρησιμοποιείται ο παλιός τρόπος συνδέσεως με

απλούς ή κοχλιωτούς ήλους. Γι' αυτό το λόγο δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή των ΣΣΣ πριν να τεθούν σε χρήση οι διπλοί ελαστικοί σύνδεσμοι, οι οποίοι έλυσαν το πρόβλημα αυτό. Η χρήση των ΣΣΣ καθυστέρησε επίσης, μέχρις ότου τελειοποιηθεί κατά τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της συγκολλήσεως [11].

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ΣΣΣ, έχουν ως ακολούθως:

α) Πλεονεκτήματα της ΣΣΣ

Η ΣΣΣ θεωρείται πλέον αναγκαία, ιδιαίτερα σε σιδηροδρόμους υψηλών ταχυτήτων. Η γραμμή με μακριά σιδηροτροχιά έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με τη γραμμή σιδηροτροχιάς κανονικού μήκους:

- Μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ των αναγκαίων εργασιών συντήρησης της γραμμής.
- Μικρότερη φθορά των στοιχείων της γραμμής.
- Μικρότερη ταλάντωση των οχημάτων του συρμού και μεγαλύτερη άνεση στην κύλιση.
- Μικρότερη παραγωγή δονήσεων και θορύβου.
- Καλύτερη διαχείριση των φθορών στα οχήματα. [20]

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, για λόγους μειωμένης συντήρησης της γραμμής (μελέτες υποδεικνύουν ότι η συγκόλληση των αρμών αντί για αμφίδεση μειώνει τις δαπάνες συντήρησης κατά 30%), λόγω έλλειψης εργατικού δυναμικού, για προστασία του περιβάλλοντος από την αυξημένη ταχύτητα του τρένου, για μεγαλύτερη άνεση κατά την κίνηση (όχι δόνηση και Θόρυβος) κτλ, είναι ανάγκη να επεκταθούν οι εφαρμογές των ΣΣΣ [21].

β) Μειονεκτήματα της ΣΣΣ

Τα παρακάτω μειονεκτήματα, είναι τεχνικά προβλήματα που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την τοποθέτηση της ΣΣΣ:

- Εξαιτίας των μεταβολών της θερμοκρασίας, η πίεση στην αξονική διεύθυνση της σιδηροτροχιάς αυξάνει, προκαλώντας τον κίνδυνο μιας ξαφνικής εγκάρσιας μετατόπισης. Η ξαφνική, αυτή, εγκάρσια μετατόπιση, που ονομάζεται πλευρική μετατόπιση, είναι ένα πρόβλημα στο οποίο οι μηχανικοί που ασχολούνται με την τοποθέτηση της ΣΣΣ και τη συντήρησή της δίνουν τη μεγαλύτερη προσοχή. Όπως προκύπτει από τις παρατηρήσεις, η μέγιστη μετατόπιση υφίσταται για αρκετά μέτρα (της τάξης των 20m), το οποίο μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην λειτουργία του συρμού.
- Στην περίπτωση που η ΣΣΣ σπάσει από τη χαμηλή θερμοκρασία, το κενό που θα δημιουργηθεί, θα είναι μεγαλύτερο στη σύνδεση από αυτό των αμφιδετούμενων σιδηροτροχιών. Όταν σπάει μια σιδηροτροχιά, το κενό που δημιουργείται από μια εφελκυστική δύναμη, διευρύνεται, ιδιαίτερα το χειμώνα. Είναι απαραίτητο να αυξηθούν αυτές οι δυνάμεις, καθώς το μέγεθος του κενού εξαρτάται από τη δύναμη

σύνδεσης των σιδηροτροχιών με τους στρωτήρες και της δύναμης από το έρμα που ελέγχει την μετατόπιση των στρωτήρων.

- Μια μερική αντικατάσταση της γραμμής της ΣΣΣ εξαιτίας της φθοράς της σιδηροτροχιάς, κτλ απαιτεί μεγαλύτερο όγκο δουλειάς απ' ότι στην αμφιδετούμενη γραμμή. Η φθορά της σιδηροτροχιάς είναι σημαντική, ιδιαίτερα σε καμπύλο τμήμα. Ακόμα και η αντικατάσταση μιας κανονικά συνδεδεμένης σιδηροτροχιάς απαιτεί πολύ δουλειά. Στην περίπτωση της ΣΣΣ, εκτός από τη συνηθισμένη εργασία για την αντικατάσταση της σιδηροτροχιάς, απαιτείται και άλλη μια, που ονομάζεται απελευθέρωση των αξονικών τάσεων της σιδηροτροχιάς, ώστε να εξαλειφθεί η ανομοιομορφία στην κατανομή των τάσεων που προκαλείται από το κόψιμο της σιδηροτροχιάς. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι, όταν η σιδηροτροχιά κόβεται, το κομμάτι που μένει άτμητο μπορεί να διαστέλλεται και να συστέλλεται ελεύθερα, οδηγώντας σε μια διαφοροποίηση στην κατανομή της αξονικής δύναμης, το οποίο, με τη σειρά του, προκαλεί μια μερικώς αυξημένη αξονική δύναμη μετά την επανασυγκόλληση.

Επιπλέον, στην αλλαγή δύο γραμμές ενώνονται σε μια. Έτσι, πριν και μετά την αλλαγή, προκύπτει μια δύναμη που δεν εξισορροπείται. Αυτό συμβαίνει καθώς οι σιδηροτροχιές υποχρεώνονται από δύο γραμμές να γίνουν μία. Αυτό προκαλεί τα παρακάτω προβλήματα:

- Στο μέρος που συγκλίνει, δηλαδή στο κομμάτι κοντά στην Αρχή της Αλλαγής, δρα μια επιπλέον αξονική δύναμη, κάνοντας την αξονική δύναμη στην σιδηροτροχιά μεγαλύτερη απ' ότι στην κανονική ΣΣΣ.
- Η κατά μήκος μετατόπιση της βελόνας μεγαλώνει, υποθετικά απειλώντας να κάνει την αλλαγή δύσκολη.

Στο μεταξύ, σε σημεία καμπύλης η ακτίνα της σιδηροτροχιάς είναι μικρή, έχοντας ως αποτέλεσμα το παρακάτω πρόβλημα:

- Η κατά μήκος δύναμη τείνει να προκαλέσει μια μεγάλη εγκάρσια παραμόρφωση της γραμμής.

Όλα τα προβλήματα, επιδρούν σημαντικά στην ασφαλή λειτουργία του συρμού. Η υπάρχουσα κατάσταση είναι τέτοια, ώστε η αλλαγή και η ΣΣΣ απομονώνονται μηχανικά η μια απ' την άλλη στον αρμό διαστολής, ενώ η χρήση της ΣΣΣ αποφεύγεται σε τμήματα με πολύ μικρές ακτίνες [21]. Στα παρακάτω μελετάται το πρόβλημα, που αφορά στην εμφάνιση της πλευρικής μετατόπισης, τόσο στην ευθεία, όσο και στην καμπύλη.

2.3.2. Γενικές συνθήκες της χρήσης της ΣΣΣ

Οι σιδηροτροχιές της σιδηροδρομικής γραμμής έρχονται από τα εργοστάσια σε κομμάτια συγκεκριμένου μήκους (πχ. στη Γαλλία σε μήκος 18μ.) για ευκολία στη μεταφορά και επεξεργασία τους. Συνεπώς, οι συνδέσεις γίνονται στη γραμμή ανά

διαστήματα μήκους όσο το μήκος του τεμαχίου. Η συνολική περιοχή σύνδεσης για δύο χαλύβδινα ελάσματα (ή αμφιδέτες) στις δύο πλευρές της γραμμής είναι σχεδόν η ίδια όπως και για τη γραμμή. Η αντίσταση στην κάμψη δύο ελασμάτων, όταν υπόκεινται σε κατακόρυφη δύναμη, ανέρχεται μόνο στο ένα τρίτο της αντίστοιχης της σιδηροτροχιάς [22]. Κατά συνέπεια, όταν ο συρμός περνά πάνω από το σημείο σύνδεσης, αναπτύσσεται θλίψη, προκαλώντας ένα δυνατό τίναγμα, που με τη σειρά του, θλίβει τη σιδηροτροχιά και επιταχύνει τη φθορά, με αποτέλεσμα να μειώνεται η άνεση στην κύλιση. Ένα μεγάλο ποσοστό των έργων συντήρησης της γραμμής επικεντρώνεται στις συνδέσεις, όπως προαναφέρθηκε.

Η ΣΣΣ με συγκολλημένους αρμούς δεν προκαλεί μεγάλο επίπεδο θορύβου και δόνησης, έχοντας ως αποτέλεσμα την άνεση κατά την κύλιση, μειωμένα ελαττώματα γραμμής και μικρότερο όγκο έργων συντήρησης. Έτσι, θεωρείται ως μια από τις πιο πρωτοποριακές τεχνολογίες που έχει επιτύχει ο τομέας των σιδηροδρόμων [20].

2.3.3. Περιορισμοί κατά την εγκατάσταση της ΣΣΣ

Παρακάτω είναι οι περιορισμοί για την εγκατάσταση των μακρινών σιδηροτροχιών:

- **Ευθύγραμμη οριζοντιογραφία**

Οι μακριές σιδηροτροχιές, καλό είναι να τοποθετούνται όσο γίνεται σε ευθεία γραμμή. Στην περίπτωση καμπύλης η εφαρμογή μπορεί να είναι επικίνδυνη για την ευστάθεια της γραμμής στις περιοχές πολύ απότομων καμπυλών (μικρές οριζοντιογραφικές καμπύλες). Ο υπολογισμός της σταθερότητας της γραμμής στις απότομες καμπύλες είναι επιβεβλημένος [20].

- **Κατασκευή της γραμμής**

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σύσταση και στις διαστάσεις του έρματος. Το πάχος, και γενικώς οι διαστάσεις του έρματος παίζουν σπουδαιότερο ρόλο παρά στην περίπτωση των κοινών σιδηροτροχιών. Πρέπει ιδίως να επικαλύπτονται οι στρωτήρες με ένα πάχος έρματος περίπου 10cm, διότι τα πειράματα απέδειξαν ότι αυτό είναι πιο σημαντικό από μια επέκταση του έρματος στο οριζόντιο επίπεδο [20].

Σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ευστάθειας της γραμμής παίζει η εγκάρσια αντίσταση στη μετακίνηση των στρωτήρων επί του έρματος, η οποία για στρωτήρες από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι περίπου διπλάσια από ότι για τους ξύλινους. Για στρωτήρες από οπλισμένο σκυρόδεμα, μήκους 2,4m, σε απόσταση μεταξύ τους 60cm και «πάγκο» έρματος 40cm, η στατική τιμή (χωρίς διέλευση συρμού) της εγκάρσιας αντίστασης w για μετατόπιση $y=2\text{mm}$, είναι 14N/mm και για μήκος στρωτήρα 2,6m, 15N/mm. Μετά από αναμόχλευση του έρματος πέφτει η εγκάρσια αντίσταση κατ' αρχήν στο 55% και αυξάνει στη συνέχεια μετά από συμπύκνωση και διέλευση συρμών περίπου 200000 Brt στην αρχική τιμή. Με τη διέλευση συρμού, η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης μειώνεται (στατική τιμή), λόγω της ανύψωσης της γραμμής, εξαιτίας της μορφής της γραμμής κάμψης (γραμμή κάμψης Zimmermann) και λόγω της δόνησης από την κίνηση του συρμού. Η μείωση είναι της τάξης του 40-60% της στατικής τιμής της εγκάρσιας αντίστασης [15].

Τέλος, πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκής ακαμψία της εσχάρας, με ισχυρή σύνδεση των σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων, μέσω των συνδέσμων. Η ακαμψία της εσχάρας εκφράζεται με την ισοδύναμη ροπή αδράνειας $I_E = 2,5 \cdot I_{YY}$ (όπου I_{YY} η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς ως προς τον κατακόρυφο άξονα) [15].

- Συγκόλληση των σιδηροτροχιών

Οι σιδηροτροχιές συγκολλούνται μεταξύ τους με αργιλοθερμική μέθοδο, ηλεκτρική συγκόλληση με αντίσταση, αυτογενή συγκόλληση και με ηλεκτρική συγκόλληση με βολταϊκό τόξο [20].

- Θερμοκρασία τοποθέτησης των σιδηροτροχιών

Η θερμοκρασία τοποθέτησης των μακρών σιδηροτροχιών πρέπει να είναι μέσα σε κάποια όρια, σύμφωνα με τις αναμενόμενες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες των σιδηροτροχιών και ανάλογα με το χάσμα του αρμού [20]. Εκλέγεται μια θερμοκρασία μηδενικής εντατικής κατάστασης, που να βρίσκεται περίπου στο μέσο των αναμενόμενων ακραίων θερμοκρασιών και λίγο παραπάνω (μετά από υπολογισμό και ανάλογα και με το χάσμα αρμού). Η θερμοκρασία αυτή επιτυγχάνεται με κατάλληλη θέρμανση της γραμμής κατά τη φάση της απελευθέρωσης των τάσεων, που ακολουθεί την τοποθέτηση της γραμμής. Η «απελευθέρωση των τάσεων», πραγματοποιείται μετά τη σταθεροποίηση της γραμμής, δηλαδή όταν οι κατά μήκος και οι εγκάρσιες αντιστάσεις που δημιουργούνται από το έρμα, λάβουν μια επαρκή τιμή. Για το σκοπό αυτό, η απελευθέρωση των τάσεων γίνεται μόνο όταν περάσει πάνω από την γραμμή που έχει πρόσφατα τοποθετηθεί, κυκλοφορία κατ' ελάχιστο 100.000 τόνων [11].

- Άλλα

- Οι μακριές σιδηροτροχιές πρέπει να τοποθετούνται με αρμούς διαστολής.
- Στην περίπτωση γέφυρας, χωρίς έρμα, μήκους μεγαλύτερου των 50m, όπου εδράζεται μια μακριά σιδηροτροχιά, η σιδηροτροχιά πρέπει να σχεδιάζεται ως μακριά σιδηροτροχιά επάνω σε γέφυρα, με όλες τις απαραίτητες προβλέψεις για την διαστολή και ανατολή του καταστρώματος της γέφυρας.
- Σε γραμμή επάνω σε πλάκα κτλ, η κανονική αντίσταση στον ερπυσμό της σιδηροτροχιάς από τη συσκευή αμφίδεσης των σιδηροτροχιών πρέπει να είναι 5 KN/m ώστε να αποφευχθεί ο επηρεασμός της κατασκευής [20].

2.3.4. Συγκόλληση και μεταφορά των σιδηροτροχιών

- Συγκόλληση μακρών σιδηροτροχιών

Η συγκόλληση των σιδηροτροχιών πρέπει να γίνεται ως εξής:

- Πρώτο στάδιο της συγκόλλησης
Οι σιδηροτροχιές πρέπει να συγκολλούνται μεταξύ τους στα συνεργεία των σιδηροδρόμων με συσκευή ηλεκτροσυγκόλλησης (με ηλεκτρική αντίσταση), σχηματίζοντας μια σιδηροτροχιά μήκους 300m.
- Δεύτερο στάδιο της συγκόλλησης

Πριν να τοποθετηθούν ή να αντικατασταθούν οι μακριές σιδηροτροχιές των 300m που μεταφέρθηκαν, πρέπει να συγκολληθούν μεταξύ τους στο απαιτούμενο μήκος με αργιλοθερμική μέθοδο.

➤ Τρίτο στάδιο συγκόλλησης

Για την τοποθέτηση ή αντικατάσταση μακρών σιδηροτροχιών, πρέπει να συγκολληθούν και στα δύο άκρα με τις προσαρμοσμένες σιδηροτροχιές με μέθοδο φωτοβολταϊκού τόξου ή με θερμική συγκόλληση [20].

- Μεταφορά των μακρών σιδηροτροχιών

Οι σιδηροτροχιές που έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους σε μήκη 300m πρέπει να μεταφερθούν στο σημείο τοποθέτησης πάνω σε ένα ειδικό συρμό (rail-carrying train) [20].

2.3.5. Διαχείριση και συντήρηση των μακρών σιδηροτροχιών

- Συνθήκες διαχείρισης των μακρών σιδηροτροχιών

Για τη διαχείριση των γραμμών με μακριές σιδηροτροχιές, σε αντίθεση με τα συνηθισμένα τμήματα με σιδηροτροχιές κανονικού μήκους, πρέπει να δοθεί προσοχή στη θερμοκρασία τοποθέτησης των σιδηροτροχιών, στο ιδιαίτερο ιστορικό των έργων συντήρησης, στον ερπυσμό της σιδηροτροχιάς, στις κατασκευές της γραμμής, στην κατάσταση του έρματος, κτλ [20].

- Περιορισμοί στα έργα συντήρησης των μακρών σιδηροτροχιών

Για τα τμήματα, όπου τοποθετούνται μακριές σιδηροτροχιές, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στα έργα συντήρησης της γραμμής, όσον αφορά στις θερμοκρασίες σιδηροτροχιάς ώστε να εμποδιστεί ο λυγισμός της γραμμής σε υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι και στην εσωτερική πλευρά των σιδηροτροχιών σε καμπύλα τμήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες τον χειμώνα. Οι κανονισμοί συντήρησης της γραμμής επιβάλλουν, όπως αποφεύγονται οι εργασίες που τείνουν να χαλαρώσουν τη συνοχή του έρματος, ιδίως κατά τις θερμές περιόδους, οπότε η θερμοκρασία της γραμμής είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία απελευθέρωσης των τάσεων. Σημαντική είναι επίσης η επιτήρηση του έρματος και των πιθανών ελαττωμάτων ευθυγράμμισης των σιδηροτροχιών [20].

2.3.6. Εφαρμογή της ΣΣΣ σε ειδικά τμήματα της γραμμής (αλλαγή, καμπύλη, γέφυρα)

Στην αλλαγή δύο γραμμές ενώνονται σε μία, έτσι ώστε πριν και μετά την αλλαγή να προκύπτει μια δύναμη που δεν εξισορροπείται. Γενικά, μια ράβδος που έχει από πριν καμπυλωθεί δεν εμφανίζει λυγισμό, αλλά καθώς το αξονικό φορτίο που εφαρμόζεται στην καμπύλη αυξάνει, η παραμόρφωση της ράβδου (που εμποδίζεται από τους στρωτήρες και το έρμα) αυξάνεται μονόπλευρα. Αν η σιδηροτροχιά ήταν ελεύθερη θα υπήρχε μια σταθερή ισορροπία, προκαλώντας μια μεγάλης κλίμακας παραμόρφωση. Δεδομένου ότι υφίσταται αντίσταση μπορεί ακόμα και στο

καμπυλωμένο τμήμα να εμφανιστεί πλευρική μετατόπιση [20]. Τέλος, στην περίπτωση που μια μακριά σιδηροτροχιά τοποθετείται επάνω σε γέφυρα, η διαστολή και συστολή του καταστρώματος της γέφυρας που προκαλούνται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, ασκούν μια επιπλέον δύναμη στο κατάστρωμα της γέφυρας και στη σιδηροτροχιά κατά την αξονική της κατεύθυνση [21]. Όλα τα παραπάνω συνιστούν ιδιαίτερα σημεία που πρέπει να σχεδιαστούν και υπολογιστούν προσεκτικά, όταν χρησιμοποιείται η ΣΣΣ.

2.3.7. Χρησιμοποίηση των ΣΣΣ

Σχεδόν σε όλες τις χώρες, για τις νέες γραμμές χρησιμοποιούνται οι ΣΣΣ. Οι υφιστάμενες γραμμές έχουν αρχίσει να αντικαθίστανται επίσης με ΣΣΣ [11].

Η επιδομή στη Γαλλία αποτελείται από σιδηροτροχιές μήκους κυμαινόμενου περί των 800m. Οι σιδηροτροχιές βάρους συνήθως 50kg/m και μήκους 18m, συγκολλούνται μεταξύ τους στα συνεργεία των σιδηροδρόμων μέχρι μήκους 300m (περίπου 288m) με ηλεκτρική συγκόλληση, και στη συνέχεια μεταφέρονται στη σιδηροδρομική γραμμή με ειδικό συρμό και συγκολλούνται μεταξύ τους με αργιλοθερμική μέθοδο μέχρι μήκος περίπου 800m. Ο αρμός τους έχει ειδική μορφή και επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση των άκρων των συγκολλημένων σιδηροτροχιών. Δεδομένου ότι οι στρωτήρες είναι εγκιβωτισμένοι στο έρμα και οι σιδηροτροχιές είναι στερεωμένες στους στρωτήρες με τις ελαστικές συνδέσεις, μόνο στα άκρα της σιδηροτροχιάς γίνεται να δημιουργηθούν μετακινήσεις, ενώ το κεντρικό τμήμα παραμένει αμετακίνητο. Απαιτείται μια ορισμένη απόσταση, δηλαδή ένα ορισμένο μήκος γραμμής, ώστε το άθροισμα των αντιστάσεων των στρωτήρων εντός του έρματος να εξισορροπεί τις κατά μήκος δυνάμεις, που προκαλούνται λόγω των μεταβολών θερμοκρασίας. Αρκεί λοιπόν, οι υπόψη αρμοί να μπορούν να επιτρέψουν την κίνηση των σιδηροτροχιών ενός ορισμένου μήκους. Οι αρμοί διαστολής, επειδή έρχονται από το συνεργείο πλήρως κατασκευασμένοι, φέρονται πάντοτε επί ξύλινων στρωτήρων. Είναι με τέτοιο τρόπο κατασκευασμένοι ώστε και τα δύο άκρα των εκατέρωθεν σιδηροτροχιών να εδράζονται επί των ίδιων στρωτήρων, και επιτρέπουν μια μετακίνηση κατά μήκος των σιδηροτροχιών κατά 180mm [14].

Έχει διαπιστωθεί εκ πείρας ότι η οικονομία συντήρησης μειώνεται κατά 30% εφόσον χρησιμοποιούνται ΣΣΣ. Και αυτό διότι στην κλασσική γραμμή με τις βραχείες σιδηροτροχιές, τα ελαττώματα της οριζοντίωσης στην περιοχή ιδίως των αρμών, επιδεινώνονται ταχύτατα εάν δεν διορθωθούν εγκαίρως, πράγμα που δεν συμβαίνει στις ΣΣΣ. Η οικονομία αυτή είναι δύο ειδών:

α. συντήρηση της οριζοντίωσης (είναι πολύ συχνή στις κλασσικές γραμμές και γίνεται πιο επιτακτική και απαραίτητη όταν το ελάττωμα αρχίζει να εκδηλώνεται. Τα μειονεκτήματα αυτά δεν υπάρχουν στις ΣΣΣ) και

β. Διατήρηση του υλικού (εκτός της πλήρους καταργήσεως του υλικού συνδέσεως των αρμών στις ΣΣΣ δεν γίνεται καταπόνηση του υλικού της σιδηροτροχιάς στην περιοχή των αρμών, εφόσον αυτοί έχουν καταργηθεί. Συνεπώς και η φθορά και αντικατάσταση των σιδηροτροχιών είναι πολύ πιο μικρή στην περίπτωση χρησιμοποίησης των ΣΣΣ) [11].

2.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

Οι παράγοντες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της σταθερότητας της γραμμής με ΣΣΣ είναι οι εξής:

- μέτρο ελαστικότητας,
- θερμικός συντελεστής,
- εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς,
- εγκάρσια ακαμψία της σιδηροτροχιάς και ισοδύναμη ακαμψία γραμμής,
- μήκος σιδηροτροχιάς,
- εγκάρσια αντίσταση της γραμμής στην μετακίνηση εντός του έρματος (στρωτήρων επί του έρματος),
- σφάλμα χάραξης της γραμμής.
- διερχόμενος συρμός.

2.4.1. Μέτρο ελαστικότητας – Θερμικός συντελεστής

Το μέτρο ελαστικότητας στους παρακάτω υπολογισμούς λαμβάνεται ίσο με το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα τη σιδηροτροχιάς ($=2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$). Ο θερμικός συντελεστής α είναι ίσος με $1,15 \cdot 10^{-5}$.

2.4.2. Εμβαδόν διατομής

Όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν F της διατομής της σιδηροτροχιάς, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που δρουν σε αυτήν. Για ίδιας ποιότητας χάλυβα, με ίδιο βάρος ανά m^2 σιδηροτροχιάς, το εμβαδόν της διατομής είναι ανάλογο της δύναμης που αναλαμβάνει η σιδηροτροχιά.

2.4.3. Βάρος σιδηροτροχιάς

Όσο μεγαλύτερο είναι το βάρος g της σιδηροτροχιάς, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που δρουν σε αυτήν. Για ίδια ποιότητα χάλυβα, το βάρος είναι ανάλογο του εμβαδού της σιδηροτροχιάς.

2.4.4. Ισοδύναμη ακαμψία εσχάρας

Η οριζόντια ακαμψία της εσχάρας εκφράζεται με την ισοδύναμη ροπή αδράνειας I_E . Η ισοδύναμη ακαμψία γραμμής (εσχάρας) είναι ανάλογη της ακαμψίας κατά τον κατακόρυφο άξονα της σιδηροτροχιάς.

Περισσότερα για αυτήν την παράμετρο επιρροής της ευστάθειας της σιδηροδρομικής γραμμής, παρατίθενται στα Κεφάλαια 4 και 5.

2.4.5. Εγκάρσια αντίσταση της γραμμής στην μετακίνηση εντός του έρματος (στρωτήρων επί του έρματος).

Η αντίσταση αυτή εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του στρωτήρα και σε πρώτη προσέγγιση από το βάρος του. Έτσι, από άποψη βάρους, ο στρωτήρας από σκυρόδεμα πλεονεκτεί, ενώ ο ξύλινος στρωτήρας, λόγω του ότι είναι ελαφρύτερος αναμένεται να εμφανίσει μικρή αντίσταση στην ολίσθηση. Παρόλ' αυτά, με την πάροδο

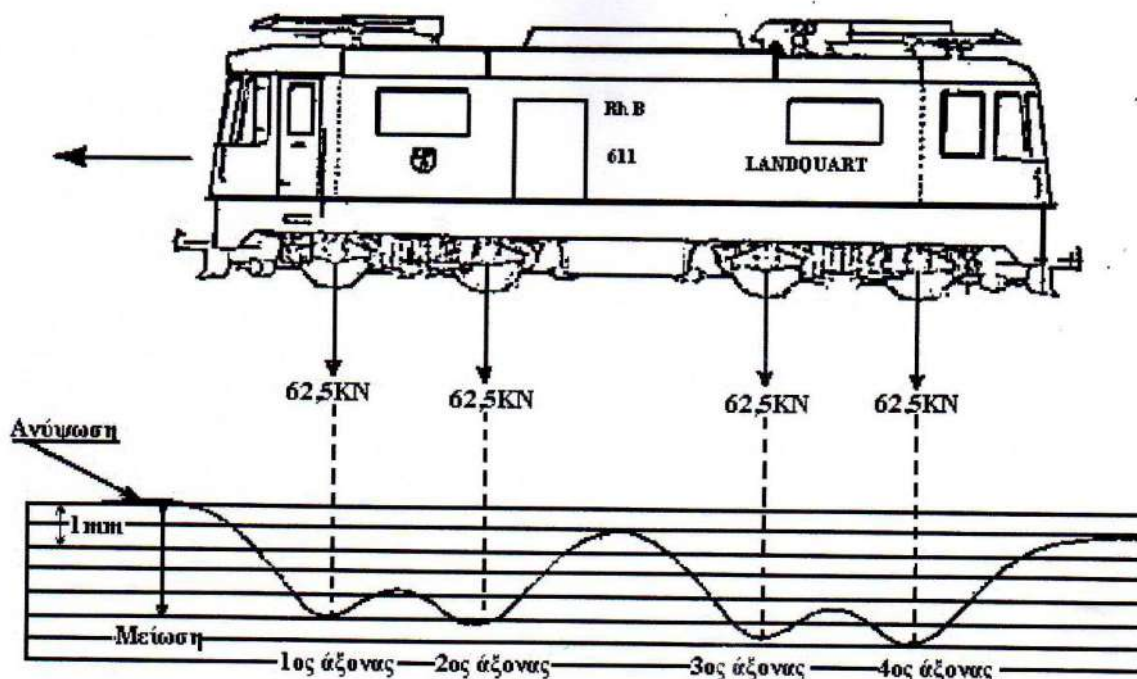
του χρόνου και μετά από διέλευση κάποιων τόνων κυκλοφορίας, οι αιχμές του έρματος εμπύγνυνται στο ξύλο των στρωτήρων, εξασφαλίζοντας μια πολύ καλή πρόσφυση έρματος-στρωτήρα, προσδίδοντας έτσι αντίσταση κατά την εγκάρσια έννοια. Οι μεταλλικοί στρωτήρες έχουν ειδική μορφή (Υ-στρωτήρες), η οποία τους επιτρέπει να εγκιβωτίζονται στο έρμα, δίνοντας πολύ ικανοποιητική αντίσταση, παρόλο που και αυτοί είναι αρκετά ελαφρύτεροι από τους αντίστοιχους από σκυρόδεμα. Η εγκάρσια αντίσταση στην τριβή ολίσθησης των στρωτήρων από σκυρόδεμα οφείλεται, τέλος, στο αυξημένο βάρος τους. Η αντίσταση στην εγκάρσια μετακίνηση w της σιδηροδρομικής γραμμής στην περίπτωση ξύλινων στρωτήρων ή από σκυρόδεμα είναι περίπου 8kg/cm , ενώ στην περίπτωση χαλύβδινων 12kg/cm , και μπορεί να αυξηθεί με ειδικές διαρρυθμίσεις [13] (Υ-μεταλλικοί στρωτήρες, οι οποίοι, όμως, είναι δαπανηροί).

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής στη μετακίνηση εντός του έρματος είναι ένας βασικός παράγοντας της ευστάθειας της ΣΣΣ κατά την οριζόντια διεύθυνση. Για τη μετρική γραμμή, έχουν γίνει πειραματικές μελέτες στην Ιαπωνία, αλλά τα αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί, εννοείται ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιβάλλον διαφορετικό από τη συγκεκριμένη χώρα.

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής εξαρτάται και από τον τύπο του έρματος. Το κριτήριο που προσδιορίζει την αντίσταση της γραμμής εξαρτάται από τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται. Σε μερικές μεθόδους, γίνεται παραδοχή σταθερής τιμής αντίστασης (μέθοδος MEIER, EISENMANN). Σε άλλες, εξετάζονται δύο περιοχές: μια γραμμική περιοχή, όπου η αντίσταση είναι ανάλογη της y μετατόπισης και μια πλαστική περιοχή, όπου η αντίσταση είναι σταθερή (μέθοδος ZOBA) [9].

Σύμφωνα με πειράματα των Ελβετικών Σιδηροδρόμων (παραδοχή σταθερής τιμής κατά τον υπολογισμό της ευστάθειας της γραμμής), η εγκάρσια αντίσταση με στρωτήρες από ωπλισμένο σκυρόδεμα είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη με ξύλινους στρωτήρες.

Κατά τη διέλευση, όμως, των συρμών, παρατηρείται ανύψωση της γραμμής προ των αξόνων (γραμμή κάμψης Zimmerman), και δόνηση κάτω από τους κυλιόμενους άξονες, με αποτέλεσμα η χρησιμοποιούμενη δυναμική τιμή για τον υπολογισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας να είναι μειωμένη κατά 40-60% της αντίστοιχης της στατικής. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα από μετρήσεις της IvT , σε επιδομή χωρίς έρμα σε σήραγγα. Η ανύψωση προ του οχήματος είναι σχετική. Στην περιοχή που εμφανίζεται αυτή η ανύψωση της σιδηροτροχιάς, η εγκάρσια αντίσταση είναι σχεδόν το ένα τρίτο (δυναμική τιμή), της εύκολα μετρούμενης, στατικής τιμής [15].



Σχήμα 2.2

Απόσπασμα από επίσημες μετρήσεις: υποχώρηση της σιδηροτροχιάς υπό όχημα RhB-Lok Ge 4/4" με $V=90\text{Km/h}$ σε επιδομή χωρίς έρμα, στρωτήρες επάνω σε πλάκα από καουτσούκ, ευθεία γραμμή

Πηγή [15]

2.4.6 Σφάλμα χάραξης γραμμής

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή, το σφάλμα χάραξης της γραμμής είναι ένα μέγεθος το οποίο εισήγαγε ο MEIER, για τον υπολογισμό της σταθερότητας θέσης της γραμμής (ΣΘΓ), με την ενεργειακή μέθοδο. Το υποθετικό αυτό υπολογιστικό μέγεθος του λάθους της γραμμής, εξαρτάται από την κατάσταση της γραμμής. Για καλή κατάσταση γραμμής θεωρείται ίσο με 15-20mm και για κακή κατάσταση 20-25mm. Το υποθετικό λάθος εισάγεται στους υπολογισμούς είτε αυτό καθ' εαυτό, είτε με τη μορφή της κλίσης σφάλματος (μέθοδος υπολογισμού της ΣΘΓ Σιδηροδρόμων Κονγκό [9]). Στην πρώτη περίπτωση συνιστώμενη τιμή υπολογισμών είναι τα 20mm [13], [15], [16], ενώ για την περίπτωση της μέσης κλίσης του αρχικού ελαττώματος σε ουδέτερο επίπεδο γραμμής προτείνεται η τιμή 4% [9], για την οποία υποτίθεται ότι η γραμμή περιέχει το αρχικό σφάλμα επιπεδότητας στην ουδέτερη κατάσταση. Το σφάλμα θεωρείται ότι μπορεί να φτάσει τα 20 mm για μια χορδή ίση με 10m μήκος που αντιστοιχεί σε κλίση:

$$i_0 = 2f_0/l_0 = 2 \cdot 2/1000 = 4\%$$

Παρατηρήσεις

Στη μέθοδο των Σιδηροδρόμων του Κονγκό, δεν λαμβάνονται απ' ευθείας οι τιμές της εγκάρσιας αντίστασης και της αντίστασης αμφίδεσης, αλλά η επιρροή τους στο φαινόμενο λαμβάνεται υπόψη μέσω κάποιων συντελεστών. Πράγματι, οι τιμές των

συντελεστών αυτών εξαρτώνται από τον τύπο των στρωτήρων, από την απόσταση μεταξύ τους (αριθμός στρωτήρων ανά km γραμμής) και από τις συνθήκες αμφίδεσης. Έτσι, αποφεύγεται ο δυσχερής υπολογισμός των τιμών αντίστασης, γεγονός με ιδιαίτερη σημασία σε Σιδηροδρόμους που δεν έχουν πειραματικές μετρήσεις επί των δικτύων τους.

Επίσης, παλιότερα είχε προταθεί και ο συντελεστής λ , ο οποίος εκφράζει την αύξηση του μήκους της ράβδου από την παραμόρφωση της γραμμής κάμψης. Κρίθηκε, όμως, ότι το σφάλμα f προσφέρει καλύτερη εμποπτεία [2].

2.4.7 Επίδραση συρμών στη σιδηροδρομική γραμμή

Η επίδραση των συρμών στη γραμμή πραγματοποιείται με τους παρακάτω τρόπους

- ταλαντώσεις από τους συρμούς και την επιδομή,
- γραμμή κάμψης της σιδηροδρομικής γραμμής,
- πρόσθετες αξονικές δυνάμεις από την επιτάχυνση και πέδηση των συρμών
- πλευρικές δυνάμεις από τους συρμούς [23].

Για τη μελέτη της πλευρικής μετατόπισης της γραμμής, σημαντική είναι η επίδραση των συρμών τόσο λόγω της ανύψωσης της γραμμής κάμψης (γραμμή κάμψης Zimmermann), όσο και λόγω των ταλαντώσεων των συρμών και της επιδομής. Οι δύο αυτές επιδράσεις μειώνουν την τιμή της εγκάρσιας αντίστασης σε μετακίνηση της εσχάρας της γραμμής και καθιστούν αναγκαία τη θεώρηση μιας προσεγγιστικής τιμής. Παρακάτω, η υπολογισμένη με πειράματα στατική τιμή της αντίστασης σε εγκάρσια μετακίνηση της εσχάρας, μειώνεται κατά ένα συντελεστή κατάλληλο και προκύπτει, έτσι, η δυναμική τιμή της, στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των συρμών.

Σημαντικές είναι, επίσης, και οι πλευρικές δυνάμεις στη γραμμή από τους συρμούς, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν τη γραμμή σε πλευρική μετατόπιση για μικρότερη τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης, αν εφαρμοστούν κατάλληλα. Και πάλι, λόγω των δυσκολιών να βρεθεί και να περιγραφεί ποσοτικά η ακριβής επίδραση των πλευρικών δυνάμεων, αυτές λαμβάνονται υπόψη προσεγγιστικά, με θεώρηση για τη φορά τους και το σημείο εφαρμογής τους. Το μέτρο της πλευρικής αυτής δύναμης λαμβάνεται προσεγγιστικά, εξαιτίας της δυσκολίας μελέτης λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος (φαινόμενα ταλαντώσεων, τριβών, κτλ), ως ποσοστό της κατακόρυφης δύναμης από τους συρμούς και μειώνεται σύμφωνα με το νόμο του PRUD'HOMME [15]. Τελικά, θεωρείται η συνολική επίδραση όλων των αξόνων του συρμού, καταλήγοντας σε τιμές υπολογισμού 10kN (για ευθεία και καμπύλη) [8].

Οι μέχρι τώρα αναπτυχθείσες μέθοδοι λάμβαναν υπόψη το συρμό, μειώνοντας την τιμή της εγκάρσιας αντίστασης κατά ένα ποσοστό, αγνοούσαν την επίδρασή του στον υπολογισμό και τέλος, θεωρούσαν συντελεστή ασφάλειας, ώστε να εξασφαλίσουν τη γραμμή και για την περίπτωση διέλευσης συρμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ **ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ**

Για τη μελέτη της ευστάθειας της θέσης γραμμής αρχικά αναπτύχθηκαν μέθοδοι, οι οποίες είτε προσέγγιζαν το ζήτημα εμπειρικά, είτε ασχολούνταν μόνο με συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ο ΜΕΙΕΡ εισήγαγε μια ενεργειακή μέθοδο, η οποία στηρίζεται σε μια παραδοχή, που αποτελεί πολύ καλή προσέγγιση. Με βάση τη μέθοδο του ΜΕΙΕΡ, προέκυψαν συγκεκριμένες σχέσεις για τον έλεγχο της ΣΘΓ. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο μέθοδοι, του EISENMANN και του ZOBA. Η πρώτη είναι γενική και βρίσκει εφαρμογή για την κανονική και τη μετρική γραμμή, ενώ η δεύτερη βρίσκει εφαρμογή μόνο για τη μετρική γραμμή. Βέβαια, πρώτα αναπτύσσεται η μέθοδος του ΜΕΙΕΡ, ώστε να γίνει ευκολότερα κατανοητή η μέθοδος του EISENMANN.

3.1. ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΜΕΙΕΡ

Με τη βοήθεια της ενεργειακής μεθόδου, έγινε μια πολύ καλή θεώρηση, που έχει το πλεονέκτημα μεγάλης βεβαιότητας. Η παραδοχή συνίσταται στο ότι σε μια ράβδο που κάμπτεται, εμφανίζεται λυγισμός, ο οποίος πραγματοποιείται με μια πλήρως προσδιορισμένη μορφή της γραμμής κάμψης. Θεωρούμε αυτή την κάμψη της ράβδου ως απόκλιση από την αρχική της γεωμετρική μορφή. Η παραδοχή της γραμμής κάμψης προέκυψε από την εμπειρία και από παρατηρήσεις της φυσικής και προσεγγίζει πολύ την πραγματική μορφή. Μετά τα παραπάνω, παραμένουν προς σύγκριση μόνο ενεργειακές τιμές. Η ενέργεια, που απαιτείται για την παραμόρφωση, συγκρίνεται με την ενέργεια, που απελευθερώνεται από τη θλιπτική δύναμη που προκαλεί την παραμόρφωση. Ο λυγισμός εμφανίζεται όταν η απελευθερούμενη ενέργεια της θλιπτικής δύναμης γίνει μεγαλύτερη από την απορροφούμενη ενέργεια για την κάμψη της ράβδου.

Για λόγους κατανόησης, παρουσιάζονται παρακάτω οι σχέσεις για τη σταθερότητα σε μια πεπερασμένου μήκους ράβδο, συγκεκριμένου μήκους. Από εκεί και μετά δεν είναι, πλέον, δύσκολο να παρουσιαστούν οι σχέσεις αντίστοιχα για τη συνεχή, απείρου μήκους γραμμή.

3.1.1. Η ευστάθεια της ράβδου πεπερασμένου μήκους

Συμβολισμοί:

P_0 = θλιπτική δύναμη στη ράβδο,

L = μήκος λυγισμού,

E = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδηροτροχιάς,

I_E = ισοδύναμη ροπή αδράνειας της ράβδου στο επίπεδο κάμψης,

F = διατομή της ράβδου,

g = ίδιο βάρος της ράβδου,

w = πλευρική αντίσταση σε μετακίνηση της ράβδου,

R = ακτίνα του άξονα της ράβδου στην μη παραμορφωμένη κατάσταση,

λ = αύξηση του μήκους της ράβδου από την παραμόρφωση της γραμμής κάμψης,

f = μέγιστη απομάκρυνση του άξονα της ράβδου από την αρχική τοποθέτηση.

A) Επιλογή γραμμής κάμψης

- Γραμμή κάμψης 1

Η «πραγματική μορφή» της γραμμής κάμψης για τον κατακόρυφο λυγισμό της ευθύγραμμης ή της καμπυλωμένης, στο κατακόρυφο επίπεδο, ράβδου και για τον οριζόντιο λυγισμό, σε οριζόντιο επίπεδο, της καμπυλωμένης ράβδου είναι η απλή ημιτονοειδής μορφή, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Στο σχήμα παρουσιάζεται η γενική περίπτωση της καμπυλωμένης ράβδου, ενώ για την ευθύγραμμη ράβδο ισχύει $R = \infty$. Για τον υπολογισμό της αύξησης του μήκους λ , ισχύουν οι παρακάτω ισότητες:

$$y_1 = \frac{x(x-L)}{2R}, y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L}\right) \quad (3.1)$$

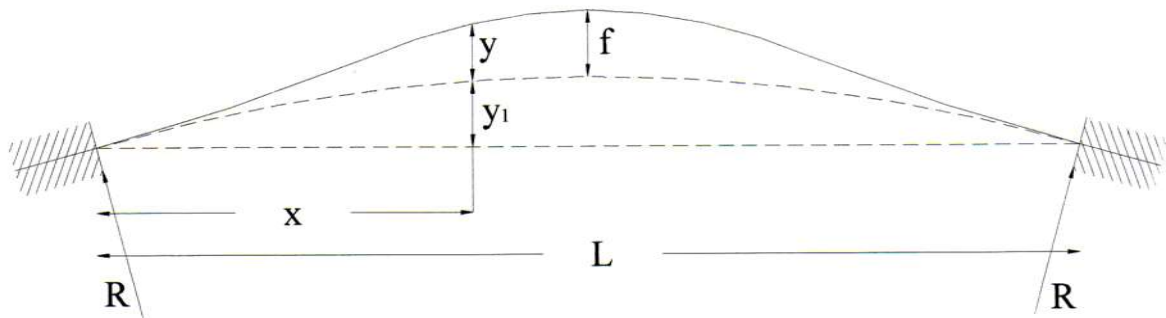
$$\bar{y} = y_1 + y$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{d\bar{y}}{dx}\right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 dx \Rightarrow$$

και με αντικατάσταση των παραπάνω στην τελευταία εξίσωση έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 + 2 \frac{dy_1}{dx} \frac{dy}{dx} + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 \right] dx \Rightarrow \\ \lambda &= \frac{1}{2} \int_0^L \left[2 \frac{dy_1}{dx} \frac{dy}{dx} + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \right] dx = \frac{1}{2} \int_0^L \left[2 \cdot \frac{(L-2x)}{2R} \frac{f\pi}{2L} \sin \frac{2\pi x}{L} + \frac{f^2 \pi^2}{4L^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{L} \right] dx \Rightarrow \\ \lambda &= \frac{f^2 \pi^2}{4L} + \frac{fL}{2R} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Η γραμμή κάμψης σε αυτήν την περίπτωση έχει τη μορφή του Σχήματος 3.1



Σχήμα 3.1
Γραμμή κάμψης 1
Πηγή [2]

- Γραμμή κάμψης 2

Η «πραγματική μορφή» της γραμμής κάμψης για τον οριζόντιο λυγισμό της ευθύγραμμης ράβδου είναι μια γραμμή, που για το μισό μήκος καμπυλώνεται προς τα δεξιά και για το άλλο μισό προς τα αριστερά. Η μελέτη υπέδειξε και πάλι μια ημιτονοειδή γραμμή (Σχήμα 3.2), η οποία παρουσιάζεται ως γραμμή κάμψης 2 Ισχύουν:

$$x=0 \text{ έως } x=\frac{L}{3} \quad y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{L}\right)$$

$$x=\frac{L}{3} \text{ έως } x=\frac{2}{3}L \quad y = -f \cos \frac{3\pi x}{L}$$

$$x=\frac{2}{3}L \text{ έως } x=L \quad y = -\frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{3\pi x}{L}\right).$$

$$\text{Ισχύει: } \lambda = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx = \frac{1}{2} \left[\int_0^{L/3} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx + \int_{L/3}^{2L/3} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx + \int_{2L/3}^L \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \right]$$

$$x=0 \text{ έως } x=\frac{L}{3} \quad \frac{dy}{dx} = \frac{3f\pi}{2L} \sin \frac{3\pi x}{L}$$

$$x=\frac{L}{3} \text{ έως } x=\frac{2}{3}L \quad \frac{dy}{dx} = \frac{3f\pi}{L} \sin \frac{3\pi x}{L}$$

$$x=\frac{2}{3}L \text{ έως } x=L \quad \frac{dy}{dx} = -\frac{3f\pi}{2L} \sin \frac{3\pi x}{L}.$$

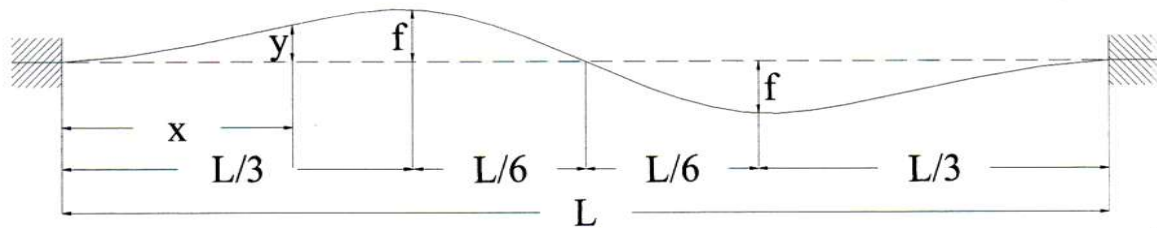
Άρα:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[\int_0^{L/3} \left[\frac{9f^2\pi^2}{8L^2} (1 - \cos \frac{6\pi x}{L}) \right] dx + \int_{L/3}^{2L/3} \left[\frac{9f^2\pi^2}{2L^2} (1 - \cos \frac{6\pi x}{L}) \right] dx - \int_{2L/3}^L \left[\frac{9f^2\pi^2}{8L^2} (1 - \cos \frac{6\pi x}{L}) \right] dx \right] \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[\left[\frac{9f^2\pi^2}{8L^2} x \right]_0^{L/3} + \frac{1}{2} \left[\frac{9f^2\pi^2}{2L^2} x \right]_{L/3}^{2L/3} - \frac{1}{2} \left[\frac{9f^2\pi^2}{8L^2} x \right]_{2L/3}^L \right] \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{9}{8} \frac{f^2\pi^2}{L} \quad (3.3)$$

Η γραμμή κάμψης σε αυτήν την περίπτωση έχει τη μορφή του Σχήματος 3.2



Σχήμα 3.2
Γραμμή κάμψης 2
Πηγή [2]

B) Έργα των δυνάμεων

Για να καμφθεί η ράβδος και να παρουσιάσει τις παραπάνω γραμμές κάμψης, πρέπει να απορροφήσει κάποιο έργο, το οποίο μοιράζεται στα εξής επί μέρους έργα:

$$1. A_b = \text{έργο λυγισμού}, \quad A_b = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI_E} dx \quad (3.4)$$

$$2. A_h = \text{έργο ανύψωσης}, \quad A_h = g \int_0^L y dx \quad (3.5)$$

$$A_w = \text{έργο πλευρικής παραμόρφωσης}, \quad A_w = w \int_0^L y dx \quad (3.6)$$

$$3. A_v = \text{έργο επιμήκυνσης}, \quad A_v = \frac{1}{2} \lambda \frac{EI_E}{L} \lambda \quad (3.7)$$

Αυτά τα έργα αποθηκεύονται στη ράβδο σαν πιθανές ενέργειες (στην οριζόντια κάμψη το έργο A_w χάνεται σαν έργο τριβής).

Σε αντίθεση με αυτά τα έργα που πρόκειται το καθένα να χαθεί, υπάρχει και η ενέργεια που προσφέρεται για τον λυγισμό.

$$A_p = \text{έργο θλιπτικής δύναμης } P_o, \quad A_p = P_o \cdot \lambda \quad (3.8)$$

Σε αυτή την ισότητα το P_o παραμένει σταθερό. Η ενέργεια για τη διαστολή $\Delta P = (E \cdot I_E / L) \cdot \lambda$ θεωρείται σαν έργο επιμήκυνσης A_v .

Η ισότητα των ενεργειών γράφεται:

$$A_b + A_h + A_v - A_p = E \quad (3.9)$$

Στον κατακόρυφο λυγισμό, στη θέση A_w , εμφανίζεται ο όρος A_h .

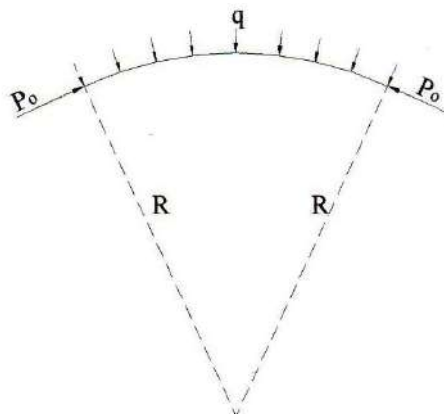
Στον Πίνακα 3.1, φαίνονται για τις δύο γραμμές κάμψης οι σχέσεις για τα έργα, τα οποία προέκυψαν με εφαρμογή των παραπάνω ισοτήτων).

	Γραμμή κάμψης 1	Γραμμή κάμψης 2
A_b	$\frac{4\pi^2 EI_E}{L^2} \frac{f^2 \pi^2}{4L} = K_1 \frac{f^2 \pi^2}{4L}$	$\frac{9\pi^2 EI_E}{L^2} \frac{9\pi^2 f^2}{8L} = K_2 \frac{9\pi^2 f^2}{8L}$
A_w	$w \frac{Lf}{2}$	$wLf \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{1}{\pi} \right) = 0,545 w_L Lf$
A_h	$g \frac{Lf}{2}$	-
A_v	$\left(\frac{f^2 \pi^2}{4L} + \frac{fL}{2R} \right)^2 \frac{EF}{2L}$	$\left(\frac{9\pi^2 f^2}{8L} \right)^2 \frac{EF}{2L}$
A_p	$P_o \frac{f^2 \pi^2}{4L} + \frac{P_o}{R} \frac{fL}{2}$	$P_o \frac{9\pi^2 f^2}{8L}$

Πίνακας 3.1
Εκφράσεις των ενεργειών
Πηγή [2]

Γ) Η τιμή P_o/R

Αν μια καμπυλωμένη ράβδος φορτιστεί με μια αξονική δύναμη P_o (kg), μπορεί να διατηρήσει το σχήμα της μόνο όταν εμφανιστεί μια ακτινικά εφαρμοζόμενη δύναμη q (kg/cm), η οποία, για σταθερή ακτίνα της μορφής της ράβδου, κατανέμεται ομοιόμορφα πάνω στη ράβδο (Σχήμα 3.3).

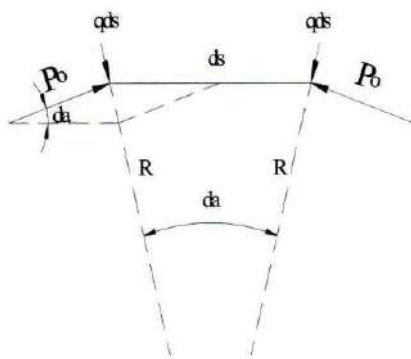


Σχήμα 3.3
Ακτινική δύναμη P
Πηγή [2]

Αν πρόκειται για οριζόντιο επίπεδο, η q αντιστοιχεί στην πλευρική αντίσταση σε παραμόρφωση w . Στο κατακόρυφο επίπεδο πρέπει να ληφθεί το ίδιο βάρος της ράβδου g σαν δύναμη q .

Στο Σχήμα 3.4, αν ληφθούν απειροστά τμήματα της καμπυλωμένης ράβδου, τα οποία, λόγω του απειροστού τους μήκους, μπορούν να θεωρηθούν ευθύγραμμα, προκύπτει χωρίς περαιτέρω έλεγχο:

$$\frac{P}{qds} = \frac{R}{ds} \Rightarrow \frac{P}{R} = q.$$



Σχήμα 3.4
Στοιχειώδες τμήμα τόξου ακτίνας R
και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό
Πηγή [2]

Στις παραπάνω σχέσεις στο A_p εμφανίζεται η τιμή P_0/R . Δηλαδή, ορίζει η τιμή αυτή, μια ακτινικά εμφανιζόμενη δύναμη αντίδρασης, της φύσης της πλευρικής αντίστασης σε παραμόρφωση ή του ίδιου βάρους.

Αν είναι $P_0/R > w$, τότε δεν μπορεί η ράβδος να διατηρήσει τη μορφή της.

Εκτονώνεται με την σταδιακή αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Αν η ράβδος είναι ικανά μακριά και άκαμπτη, δεν εμφανίζεται κάμψη, παρά μόνο μια πλευρική παραμόρφωση και μια δύναμη, που για θλίψη είναι προς τα έξω και για εφελκυσμό προς τα μέσα.

Αντίστοιχα, ισχύουν θεωρητικά και όταν $P_0/R > g$

Δ) Το κρίσιμο σφάλμα f'

Κατά τη μελέτη της ευστάθειας, ελέγχεται αν για μια συγκεκριμένη σχέση της ράβδου, μπορεί να συμβεί λυγισμός και αν αυτό ισχύει, πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η παραμόρφωση, από την οποία είναι δυνατό να ξεκινήσει ανεξάρτητος λυγισμός. Πρόκειται ασφαλώς για πεπερασμένες τιμές αυτών των παραμορφώσεων. Σαν μέτρο της παραμόρφωσης μπορεί να ληφθεί το f ή το λ . Επιλέγεται το f , για καλύτερη εποπτεία. Τα έργα, τώρα, των δυνάμεων αναμορφώνονται λαμβάνοντας υπόψη το f . Για την πεπερασμένη ράβδο, που μελετάται, το L είναι σταθερό (για την απείρου

μήκους ράβδου, το μήκος λυγισμού είναι άγνωστο και αλλάζει στην πορεία του φαινομένου).

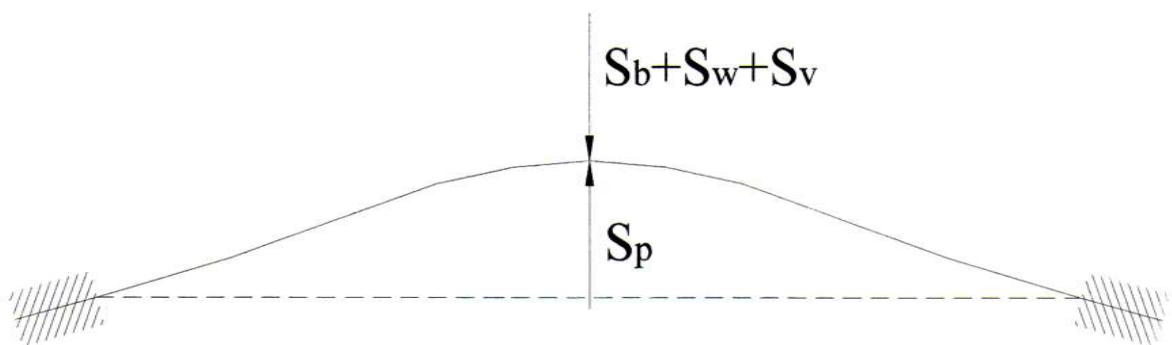
Το κρίσιμο σφάλμα f' ορίζει την παραμόρφωση, στην οποία ξεκινά ο λυγισμός.

Το f' δεν υπολογίζεται αν τεθεί στην ισότητα των ενεργειών $E = 0$. Από τις μελέτες σταθερότητας προέκυψε ότι δεν εξαρτάται από το μέγεθος της E , αλλά από την εκάστοτε μεταβολή του E με την πορεία της παραμόρφωσης.

Εκτιμάται από την τιμή dE/df .

Η διαδικασία απλοποιείται αν ο διαφορικός όρος του κάθε έργου dA/df , θεωρηθεί ως δύναμη S , η οποία υπολογίζεται στη θέση του f . Είναι $dA = S df$. Η εξίσωση ενέργειας απλοποιείται σε μια εξίσωση δυνάμεων (Σχήμα 3.5).

$$S_b + S_w + S_v - S_p = S_r \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.5
Ισοδύναμες δυνάμεις στη σιδηροτροχιά
Πηγή [2]

Στα παρακάτω προσδιορίζεται η παραμόρφωση f , για τις διάφορες περιπτώσεις, που προκύπτουν από τη σύγκριση: $S_b + S_w \pm S_v - S_p > \acute{\eta} < S_r$.

$S_b + S_w + S_v > S_p$: S_r θετικό. Για την περαιτέρω παραμόρφωση πρέπει να δράσει μια επιπλέον εξωτερική δύναμη, η οποία να είναι κατά τι μεγαλύτερη από την S_r .

$S_b + S_w + S_v < S_p$: S_r αρνητικό. Η κατάσταση του λυγισμού είναι υπαρκτή. Το S_r καθορίζει το μέρος (υπόλοιπο) του S_p , το οποίο χρησιμοποιείται για μετακίνηση.

$S_b + S_w + S_v = S_p$: αυτή είναι η κρίσιμη κατάσταση, όπου $S_r = 0$ και $E = E_{\max}$. Αυτή είναι μια κατάσταση ισορροπίας. Η ισορροπία έχει αδιάφορο χαρακτήρα: για τον κατακόρυφο λυγισμό (S_h στη θέση του S_w) και προς τις δύο κατευθύνσεις, για τον οριζόντιο λυγισμό, μόνο προς τα έξω (για επιστροφή στην προηγούμενη κατάσταση δρα το S_w όπως το S_r).

Το κρίσιμο μέτρο παραμόρφωσης f' εκτιμάται λοιπόν, από την ισότητα

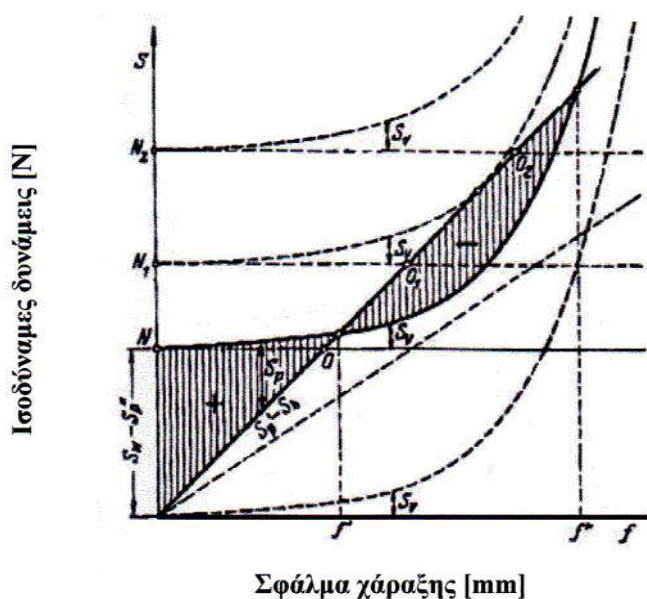
$$S_b + S_w + S_v = S_p$$

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται για τις δύο γραμμές κάμψης οι σχέσεις για τις υποκατάστατες δυνάμεις.

	Γραμμή κάμψης 1	Γραμμή κάμψης 2
S_b	$K_1 \frac{\pi^2}{2L} f$	$K_2 \frac{9\pi^2}{4L} f$
S_w	$w \frac{L}{2}$	$0,545wL$
S_h	$g \frac{L}{2}$	-
S_v	$\frac{EF}{2L} \left(\frac{\pi^4}{4L^2} f^3 + \frac{3\pi^2}{4R} f^2 + \frac{L}{2R} f \right)$	$\frac{EF}{2L} \frac{81\pi^4}{16L^2} f^2$
S_p	$P_o \frac{\pi^2 f}{2L} + \frac{P_o}{R} \frac{L}{2}$	$P_o \frac{9\pi^2}{4L} f$
	$S_p' + S_p''$	

Πίνακας 3.2
Εκφράσεις των ισοδύναμων δυνάμεων
Πηγή [2]

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η σχέση μεταξύ των υποκατάστατων δυνάμεων και του μέτρου της παραμόρφωσης f , για τις σχέσεις της γραμμής κάμψης 1 (για τη γραμμή κάμψης 2 το διάγραμμα είναι αντίστοιχο). Είναι δεδομένο ότι $S_w > S_p''$ και $S_p > S_b$.



Σχήμα 3.6
Διάγραμμα ισοδύναμων δυνάμεων S
σε συνάρτηση με την παραμόρφωση f
Πηγή [2]

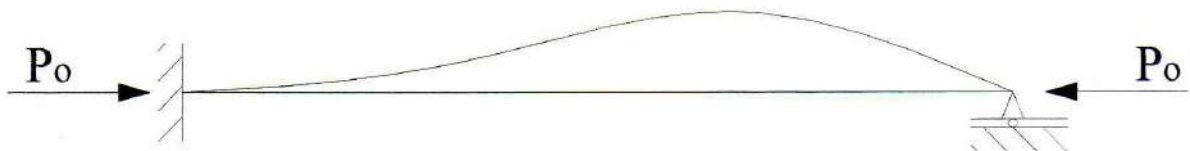
Η επίδραση της μεταβολής του w στο διάγραμμα (αντίστοιχα του g) φαίνεται από τα παρακάτω.

Αρχικά, αύξηση του w σε w_1 ή σε w_2 : με αύξηση του w αυξάνει και το S' . Το σημείο N του διαγράμματος ανεβαίνει στο $N1$ ή στο $N2$. Η καμπύλη που παράγεται μέσω του S' , δεν τέμνει την κεκλιμένη γραμμή πλέον για $w=w_2$. Το S_r μένει πάντοτε θετικό. Υπάρχει τότε σχέση «απόλυτης ασφάλειας λυγισμού». Για $w=w_1$ η καμπύλη τέμνεται. Έχουμε να κάνουμε τότε με μια αμφίβολη περίπτωση. Η «απόλυτη ασφάλεια λυγισμού» προκύπτει και με μεταβολή του P_o και του I_E . Στο σχήμα 3.6, αυτό σημαίνει μια μεταβολή στην κλίση της κεκλιμένης γραμμής.

Κατά δεύτερον, μείωση της τιμής του w στην τιμή P_o/R σημαίνει ότι $S_w=S_p$. Το σημείο N πέφτει στην αρχή των συντεταγμένων. Όταν $S_p>S_b$, αυτό σημαίνει $P_o>K$, εμφανίζεται για την παραμικρή ατέλεια λυγισμός.

Μέχρι στιγμής, η μελέτη της ευστάθειας αφορούσε πάντα στην πεπερασμένου μήκους ράβδο, στην οποία οι θέσεις εκτόνωσης ήταν στέρεες και σταθερές.

Τώρα, πρέπει να εξεταστεί και μια μικρή περίπτωση, στην οποία κάποια θέση εκτόνωσης μπορεί να μετακινηθεί στη διεύθυνση επίδρασης της P_o (Σχήμα 3.7). Για αυτές τις περιπτώσεις είναι, χωρίς επιπλέον μελέτη, $A_v=0$ και από αυτό $S_v=0$. Δεν εμφανίζεται καμία εκτόνωση. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.7, ο κίνδυνος λυγισμού είναι μεγαλύτερος. Το f' είναι μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση. Η θεωρητική περίπτωση της «απόλυτης ασφάλειας λυγισμού» δεν ισχύει πλέον. Για $P_o>K$, παραμένει σταθερό ένα σημείο τομής (0) και το αντίστοιχο σ' αυτό f' . Δεν υπάρχει πλέον κατάσταση ισορροπίας μετά τον λυγισμό και η ράβδος παραμορφώνεται.



Σχήμα 3.7
Γραμμή κάμψης για ράβδο με ένα άκρο ελεύθερο
να μετακινείται
Πηγή [2]

Για την περίπτωση της ευστάθειας της πεπερασμένου μήκους ράβδου, με ένα ελεύθερα μετακινούμενο άκρο, προκύπτουν εύκολα οι παρακάτω σχέσεις για το f' :

$$f' = \left(w - \frac{P_o}{R} \right) \frac{L^2}{\pi^2} \quad \text{για τη γραμμή κάμψης 1} \quad (3.11)$$

$$f' = \frac{0,0245 w L^2}{P_o - K_2} \quad \text{για τη γραμμή κάμψης 2} \quad (3.12)$$

Ε) Παρατηρήσεις

Για την κατάρτιση του Πίνακα 3.2 και την κατασκευή του Σχήματος 3.6, για κάθε περίπτωση ευστάθειας της πεπερασμένου μήκους ράβδου, με ελεύθερα μετακινούμενο άκρο, μπορούν να σημειωθούν τα παρακάτω (για την πεπερασμένου μήκους ράβδο με δύο σταθερά άκρα μπορεί να γίνει η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση).

- Ευθεία ράβδος χωρίς τριβή

Υπάρχουν μόνο οι δύο ισοδύναμες δυνάμεις S_b και S_p' . Ο λυγισμός εμφανίζεται ξαφνικά, όταν αυξηθεί ο όρος P_o της τιμής S_p' και γίνει μεγαλύτερος από το S_b (για $P_o=K$, η μορφή του λυγισμού κατά Euler).

- Καμπυλωμένη ράβδος χωρίς τριβή

Υπάρχουν μόνο οι δυνάμεις S_b , S_p' και S_p'' . Αρχικά για μικρή τιμή P_o το S_p' είναι μικρότερο του S_b . Επειδή το S_p'' , εμφανίζεται χωρίς να απαιτείται κάμψη και είναι ανεξάρτητο από το f , πραγματοποιείται κάμψη, η οποία για κάθε f' δίνει μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας. Με την αύξηση του P_o η παραμόρφωση γίνεται πολύ μεγαλύτερη και για $S_p''=S_b$ είναι θεωρητικά άπειρη.

Για καμπυλωμένη ράβδο χωρίς τριβή (ή χωρίς ίδιον βάρος) δεν εμφανίζεται αιφνίδιος λυγισμός, αλλά μια σταδιακή αύξηση, η οποία είναι η ίδια από την αρχή της εμφάνισης του P_o .

- Ευθεία ράβδος με τριβή

Υπάρχουν οι ισοδύναμες δυνάμεις S_b , S_w , και S_p' . Το S_p' είναι ήδη μεγαλύτερο από το S_b . Η ράβδος είναι αρχικά σταθερή. Είναι απαραίτητη μια τεχνητή παραμόρφωση f' , για να πραγματοποιηθεί ο λυγισμός. Με την αύξηση του P_o αυξάνεται μόνο το S_p' : για $P_o=\infty$ θα ήταν $f'=0$.

- Καμπυλωμένη ράβδος με τριβή

Υπάρχουν οι ισοδύναμες δυνάμεις S_b , S_w , S_p' και S_p'' . Εδώ πρέπει να θεωρήσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

Η ισοδύναμες δυνάμεις S_b και S_w είναι ανεξάρτητες του P_o . Αν το P_o της τιμής $P_o/R=w$ μεγαλώσει και τελικά $S_p''=S_w$, πρέπει ακόμα να ελεγχθεί αν $S_p'<S_b$.

Για $S_p'<S_b$, δηλαδή $P_o<K$, τότε για περαιτέρω αύξηση του P_o , προκύπτει σταδιακός λυγισμός της ράβδου.

Για $S_p'>S_b$, δηλαδή $P_o>K$, τότε προκύπτει για την ελάχιστη ατέλεια, ξαφνικός λυγισμός της ράβδου. Ήδη για μικρότερες τιμές του P_o , δηλαδή του $P_o/R<w$, μπορεί να προκληθεί λυγισμός της ράβδου μέσω τεχνητής παραμόρφωσης.

Η ανίσωση $P_o<K$ μπορεί να προκύψει, για σταθερό L στην πρώτη γραμμή, μέσω του μεγέθους της I_E .

Για μεγάλο I_E = σταδιακός λυγισμός.

Για μικρό I_E = ξαφνικός λυγισμός ($I_E=0$, όταν η ράβδος αντικαθίσταται μέσω μιας αλυσίδας).

3.1.2. Η ευστάθεια της ράβδου απείρου μήκους

A) Ακριβής μέθοδος υπολογισμού

Ο υπολογισμός της ράβδου απείρου μήκους διαφέρει από τον αντίστοιχο της πεπερασμένου μήκους, κατ' αρχάς, στο ότι δεν είναι γνωστό το μήκος λυγισμού L . Το μήκος λυγισμού αλλάζει στην πορεία του φαινομένου. Για την απείρου μήκους ράβδο, είναι απαραίτητη, όσον αφορά στην εκτόνωση της θλιπτικής δύναμης P_0 , μια επιπλέον παραδοχή.

Έτσι, έγινε η παραδοχή ότι η P_0 , σε όλο το μήκος του λυγισμού, μειώνεται ομοιόμορφα από μια τιμή P_0 , ευθύγραμμα, ανάλογα με το μέγεθος της κατά μήκος αντίστασης σε μετακίνηση. Στη συνέχεια μελετήθηκε η μεταβολή στο μήκος L . Για την συνεχή, θεωρήθηκαν πολλές περιπτώσεις ακατάλληλης παραμόρφωσης (που οδηγεί σε πλευρική μετατόπιση), στις οποίες τέθηκε η «αρχή της κατάλληλης αντίστασης» (ώστε να αποφευχθεί η πλευρική μετατόπιση). Η πορεία του υπολογισμού είχε γενικά ως εξής:

Σαν μέτρο της παραμόρφωσης επιλέχθηκε το λ . Για ένα καθορισμένο λ , προσδιοριζόταν το L μέσω υπολογισμών και διαγραμμάτων, για το οποίο το έργο ήταν ελάχιστο. Προέκυπτε για πολλά λ η σχέση $\varphi(\lambda, L)$ των ακατάλληλων παραμορφώσεων. Αυτή η $\varphi(\lambda, L)$ μόνη της σχετιζόταν με την καμπύλη της ενέργειας. Αφού βρισκόταν το $E_{\max}$, προέκυπταν τα αντίστοιχα κρίσιμα μεγέθη (λ', f', L'). Η πορεία της καμπύλης της ενέργειας είχε συγκεκριμένα άκρα για κάποια σχέση της γραμμής και για διαφορετική επιρροή δυνάμεων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η μέθοδος υπολογισμού είναι πολύ επίπονη. Εφαρμοζόταν, για έναν αριθμό περιπτώσεων, για τη συνεχώς συγκολλημένη γραμμή, βασιζόμενοι στη γραμμή κάμψης 1.

Σε μια άλλη μέθοδο, με την ίδια παραδοχή για την κατανομή του P_0 , η κρίσιμη παραμόρφωση προέκυπτε από την ισότητα:

$$\frac{\partial A}{\partial f} = 0, \frac{\partial A}{\partial L} = 0$$

Και σε αυτή τη μέθοδο ο υπολογισμός είναι πολύ επίπονος.

B) Απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού

- **Αμελείται η εκτόνωση της θλιπτικής δύναμης**

Όσον αφορά στην εκτόνωση, οι σχέσεις της απείρου μήκους ράβδου, όπως εύκολα φαίνεται, βρίσκονται μεταξύ των δύο περιπτώσεων, οι οποίες αναλύθηκαν για την πεπερασμένου μήκους ράβδο. Στις απείρου μήκους ράβδους, μπορεί να θεωρηθεί το άκρο του μήκους λυγισμού και ως στερεή, αμετακίνητη (πακτωμένη) θέση εκτόνωσης, αλλά είναι πιθανή και μια ελεύθερη μετακίνηση υπό την επίδραση της δύναμης P_0 . Το μέγεθος της εκτόνωσης, όπως έχει εκτεταμένα εξηγηθεί, καθορίζεται

από την τιμή S_v : στην απείρου μήκους ράβδο, υπεισέρχεται κι άλλη μια τιμή S_1 . Η S_1 , είναι η ισοδύναμη δύναμη του έργου από τη σύνδεση των γραμμών. Ουσιαστικά, ορίζεται ως εξής:

Στη μελέτη της ευστάθειας της γραμμής του σιδηρόδρομου, δεν έχει λογική, να υπολογιστεί η σχέση παραμόρφωσης (f, L) με τυχαία μεγέθη. Έπρεπε να αναζητηθούν τα πιθανά στην πράξη μέγιστα μεγέθη και να εισαχθούν σαν όρια. Αυτό, όπως αναλύεται παρακάτω, μπόρεσε να συμβεί. Στην ορισμένη περιοχή των παρατηρήσεων, στην οποία αντιστοιχούν οι πραγματικές σχέσεις, οι τιμές των S_v και S_1 , είναι τόσο μικρές σε σχέση με τις τιμές των S_w και S_b , ώστε οι S_v και S_1 , μπορούν να αμεληθούν, χωρίς σοβαρό σφάλμα. Η παράλειψη αυτή, είναι προς την ασφάλεια.

• Αμελείται η μεταβολή της διαδρομής του λυγισμού στην πορεία του φαινομένου

Η ευστάθεια μελετάται για διαφορετικό, αλλά σταθερό κάθε φορά μήκος λυγισμού. Η τιμή του L που αντιστοιχεί κάθε φορά σε μια τιμή του κρίσιμου f' είναι μέση τιμή. Η διαδικασία του υπολογισμού απλοποιείται αρκετά με αυτή την παραδοχή. Σύγκριση με ακριβέστερες μεθόδους, έδειξε μια μικρή μόνο αύξηση.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, γίνεται ο παρακάτω εύκολος υπολογισμός: λαμβάνεται το f' από τον Πίνακα 3.3 και τίθεται $= 0$, όπου το L είναι μέση τιμή (Πίνακας 3.3).

	Γραμμή κάμψης 1	Γραμμή κάμψης 2
L	$2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}}$	$3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}}$
f'	$(w - \frac{P_o}{R}) \frac{16EI_E}{P_o^2}$	$8,7w \frac{EI_E}{P_o^2}$

Πίνακας 3.3
 $f'_{\min}$ για μακριά σιδηροτροχιά
 Πηγή [2]

Πλέον το f' αναφέρεται στο κρίσιμο σφάλμα της συνεχούς γραμμής. Είναι φανερό, ότι για την ευθεία γραμμή, στη γραμμή κάμψης 1, ο οριζόντιος λυγισμός, επέρχεται σχεδόν στη διπλάσια τιμή του f' (για $R \rightarrow \infty$).

Αυτές οι σχέσεις ισχύουν για τις συνηθισμένες περιπτώσεις, όπου $w > P_o/R$.

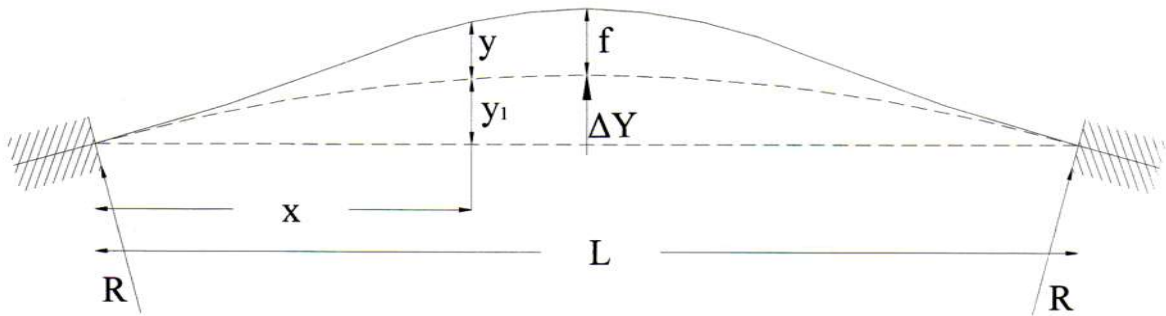
Για $w = P_o/R$ δεν υπάρχει πλέον μέσο μήκος λυγισμού. Η ράβδος σ' αυτή την περίπτωση προσπαθεί, μόνο να παραμερίσει, χωρίς ουσιαστικά να παραμορφώνεται η ίδια, ώστε να καταφέρει να παραχθεί το έργο παραμόρφωσης. Αυτό ισχύει, επίσης, όταν η ράβδος είναι κατάλληλα μακριά. Αν ο αντίστοιχος παραμερισμός της ράβδου εμποδίζεται, υπάρχει μια σχέση όπως και για την πεπερασμένου μήκους ράβδου. Το μέγεθος της ισοδύναμης ροπής αδράνειας είναι πολύ σημαντικό [2].

- Η επίδραση μιας εξωτερικής δύναμης ΔY

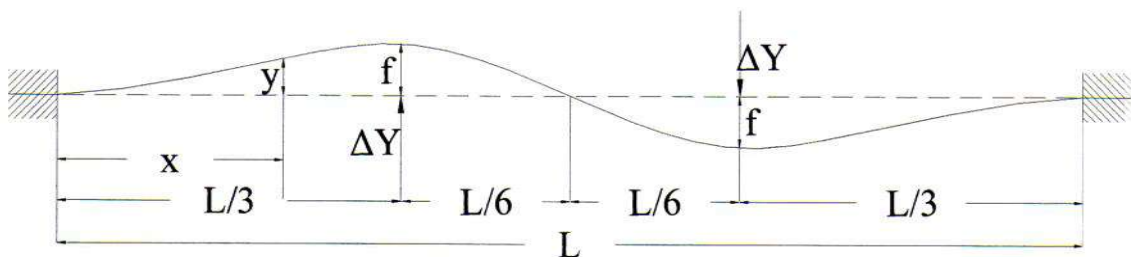
Η μέχρι τώρα προσέγγιση, αφορούσε μόνο στον «ανεξάρτητο λυγισμό». Στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη στον οριζόντιο λυγισμό και η επίδραση μιας οριζόντιας, σταθερής δύναμης ΔY , η οποία δρα στη θέση εμφάνισης της μεγαλύτερης τιμής σφάλματος και έχει φορά προς το εξωτερικό, κάθετα στο άξονα της ράβδου.

Η ΔY επιδρά, όπως και οι ισοδύναμες δυνάμεις.

Για την γραμμή κάμψης 1, η διάταξη της ΔY είναι σαφής (Σχήμα 3.8). Για τη γραμμή κάμψης 2, υποθέτουμε, ότι η ΔY , όπως και οι ισοδύναμες δυνάμεις, δρα σαν ζεύγος δύο δυνάμεων, μέτρου $\Delta Y/2$ η καθεμιά, με σημεία εφαρμογής τις θέσεις των μέγιστων απομακρύνσεων, με την ίδια φορά, τη φορά της απομάκρυνσης (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8
Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 1
Πηγή [2]



Σχήμα 3.9
Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 2
Πηγή [2]

Η ΔY λαμβάνεται κατά προσέγγιση, στην εξίσωση με τις ισοδύναμες δυνάμεις. Η νέα κρίσιμη κατάσταση για την περίπτωση αυτή παραμόρφωσης, εκτιμάται από την παρακάτω ισότητα:

$$S_b + S_w - S'_p - S''_p - \Delta Y = 0 \quad (3.13)$$

Για την πεπερασμένου μήκους ράβδο, με ένα ελεύθερα μετακινούμενο άκρο, μπορεί να εξαχθεί εύκολα η σχέση για το κρίσιμο f' .

Για παράδειγμα, είναι για τη γραμμή κάμψης 1:

$$f' = \frac{\left(w - \frac{P_o}{R}\right) \frac{L^2}{\pi^2} - \Delta Y \frac{2L}{\pi^2}}{P_o - K_1} \quad (3.14)$$

Για την απείρου μήκους ράβδο, με χρήση της απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού, υπολογίζεται το μέσο μήκος λυγισμού από τη διαφορική εξίσωση: $df'/dL = 0$, από όπου το λαμβάνεται το L .

Για παράδειγμα, για τη γραμμή κάμψης Ι προκύπτει το ακόλουθο:

$$L = 2\pi a \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}} \quad (3.15) \quad \text{όπου,} \quad a = \sqrt{\frac{\left(w - \frac{P_o}{R}\right)L - 1,5\Delta Y}{\left(w - \frac{P_o}{R}\right)L - \Delta Y}} \quad \text{για } \Delta Y=0, \alpha=1$$

Η ακριβής θεώρηση του συντελεστή α δυσκολεύει πάρα πολύ τον περαιτέρω υπολογισμό. Για τις περιπτώσεις της γραμμής του σιδηροδρόμου, στην πράξη, παρατηρήθηκε, ότι το ΔY από μόνο του είναι χονδρική εκτίμηση, και έχει μικρή σημασία να συνυπολογιστεί η επίδρασή του στο μήκος λυγισμού. Θέτουμε τελικά $\alpha=1$ και χρησιμοποιούμε και τις δύο γραμμές κάμψης την ίδια σχέση για το μήκος λυγισμού L , όπως δίνονται στον πίνακα 3.3.

Θεωρούμε και για κάθε γραμμή κάμψης:

$$\Delta Y = w_q L / 2 \quad (3.16) \quad \text{ή}$$

$$\Delta Y = 0,545 w_g L \quad (3.17),$$

αντίστοιχα και τελικά οι ισοδύναμες δυνάμεις S_w, S''_p και ΔY δίνουν τις εκφράσεις:

για τη γραμμή κάμψης 1: $(w - w_r - w_q) L / 2$, με $w_r = P_o / R$

για τη γραμμή κάμψης 2: $0,545(w - w_g)L$

Οι σχέσεις για την κρίσιμη παραμόρφωση είναι [2]:

<u>Γραμμή κάμψης 1</u>	$f' = \bar{w} \frac{16EI_E}{P_o^2}$	$\bar{w} = w - \frac{P_o}{R} - \frac{2\Delta Y}{L}$
<u>Γραμμή κάμψης 2</u>	$f' = \bar{w} \frac{8,7EI_E}{P_o^2}$	$\bar{w} = w - \frac{\Delta Y}{0,545L}$

Πίνακας 3.4

f' για μακριά σιδηροτροχιά με επίδραση συρμού

Πηγή [2]

3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ EISENMANN

Στην επιδομή του Σιδηροδρόμου, η σιδηροτροχιά αναλαμβάνει την έδραση και την καθοδήγηση των οχημάτων των συρμών. Για να πραγματοποιηθούν σωστά οι παραπάνω δύο λειτουργίες, πρέπει να εξασφαλιστεί τόσο η ικανότητα της γραμμής να εδράζει, όσο και να διατηρεί τη θέση της. Για την εξασφάλιση της διατήρησης της θέσης της γραμμής ή της Σταθερότητας Θέσης Γραμμής (ΣΘΓ), η ικανότητα σε έδραση της σιδηροτροχιάς είναι σημαντική, αλλά πλέον όχι κρίσιμη. Για τη διατήρηση της θέσης της γραμμής κρίσιμη είναι η επίδραση τον παρακάτω φαινομένου:

Πρόκειται για τη μεταβολή μήκους των σιδηροτροχιών υπό την επήρεια θερμοκρασίας (Καλοκαίρι-Χειμώνας, Μέρα-Νύχτα) και τις δυνάμεις που εμφανίζονται τελικά στις δεσμευμένες σιδηροτροχιές. Αυτές οι δυνάμεις, που για αύξηση της θερμοκρασίας είναι θλιπτικές, ενώ για μείωση της θερμοκρασίας εφελκυστικές, εμφανίζονται πάντα για κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας. Είναι σταθερές και ανεξάρτητες από τα φορτία της κυκλοφορίας. Αυτό σημαίνει ότι μια γραμμή μπορεί για μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας να χάσει τη σταθερότητά της, ακόμα και χωρίς να κινείται εκείνη τη στιγμή συρμός επάνω της. Ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι κλειστές καμπύλες με Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές. Παρόλ' αυτά, και οι αμφιδετούμενες σιδηροτροχιές δεν προσφέρουν καμία εγγύηση για μια σταθερή γραμμή.

Οι αξονικές δυνάμεις που επιβάλλονται από τους συρμούς στη σιδηροτροχιά, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, είναι μικρές και βρίσκονται στην γραμμική (ελαστική) περιοχή της κατά μήκος αντίστασης για μια ΣΣΣ, έτσι ώστε τελικά, οι αξονικές δυνάμεις, εκτός από αυτές που προκαλούνται από τη θερμοκρασία, να μπορούν να μελετηθούν.

Η ευστάθεια της γραμμής πρέπει να εξασφαλιστεί και στους τρεις άξονες (κατά μήκος, εγκάρσιος και κατακόρυφος).

Το πρόβλημα που εκτέθηκε εδώ συνοπτικά, αντιμετωπίζεται από όλους τους Σιδηρόδρομους, με κανονική ή μετρική γραμμή. Για τους λόγους, που έχουν ήδη αναφερθεί, της άνεσης στην κύλιση και της μειωμένης φθοράς, όλο και περισσότερο εφαρμόζονται οι ΣΣΣ (στους Ελβετικούς Σιδηρόδρομους πάνω από 90%). Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι στις ΣΣΣ οι δυνάμεις ή οι τάσεις στη σιδηροτροχιά εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς οι εσωτερικές αυτές δυνάμεις στη σιδηροτροχιάς είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν και πολλές φορές δεν μπορεί να προβλεφθεί η εμφάνισή τους. Στις σύγχρονες γραμμές μπορούν να προκαλέσουν την καταστροφή της εσχάρας [15].

3.2.1. Η ΣΣΣ

Α) Γενικά

Περίπου πριν από 50 χρόνια ξεκίνησε η συγκόλληση των σιδηροτροχιών σε μεγάλα μήκη. Οι πρώτες μελέτες των Ελβετικών Σιδηροδρόμων με συγκολλημένες σιδηροτροχιές, για τη διαστολή τους, έδειξαν ότι μόνο ένα σχετικά μικρό τμήμα του

άκρου της σιδηροτροχιάς εμφάνιζε ελεύθερη μετακίνηση. Το μεγαλύτερο τμήμα της σιδηροτροχιάς συμπεριφερόταν όπως η συγκολλημένη, χωρίς αρμούς. Από το παραπάνω γεγονός προέκυψε το πρακτικό συμπέρασμα, ότι η σιδηροτροχιά που δεν μεταβάλλει το μήκος της θεωρείται συνεχώς συγκολλημένη. 'Η αλλιώς: συνεχώς συγκολλημένη σιδηροτροχιά θεωρείται η μακριά σιδηροτροχιά, της οποίας το μήκος είναι τόσο μεγάλο, ώστε στο μεσαίο τμήμα της, τουλάχιστον ένα σημείο, να μην μετακινείται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας. Το οριακό μήκος της σιδηροτροχιάς, για το οποίο αρχίζει να θεωρείται ως συνεχώς συγκολλημένη κυμαίνεται από 60 έως 100μ. Για μήκη σιδηροτροχιάς μεγαλύτερα του οριακού, η μεταβολή των τάσεων στο κεντρικό αμετακίνητο τμήμα της σιδηροτροχιάς είναι απ' ευθείας ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι δυνάμεις, συνεπώς, και αντίστοιχα η ΣΘΓ (Σταθερότητα Θέσης Γραμμής) είναι ανεξάρτητες του μήκους της σιδηροτροχιάς. Έτσι, αν θεωρηθεί το οριακό μήκος της σιδηροτροχιάς ως επιτρεπόμενο, αντίστοιχα είναι επιτρεπτά και μεγαλύτερα μήκη σιδηροτροχιάς, δηλαδή, είναι δυνατό να συγκολληθούν σιδηροτροχιές σε απεριόριστο μήκος.

Εξάλλου, πρέπει να θεωρηθούν και κάποια άλλα στοιχεία της τοποθέτησης της γραμμής. Έτσι, για τη μελέτη της ΣΘΓ μιας συνεχώς συγκολλημένης σιδηροτροχιάς, θεωρούνται και τα εξής:

- η σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τους στρωτήρες μέσω των συνδέσμων, με ικανοποιητική αντοχή στις επιβαλλόμενες δυνάμεις και ροπές, εξασφαλίζει μια μεγάλη ακαμψία της εσχάρας (γραμμής),
- ένα σωστά στρωμένο έρμα, εξασφαλίζει μια απόλυτη σταθερότητα της θέσης της γραμμής και αποτρέπει τις ασυνέχειες. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση του πλάτους και του ύψους του έρματος πέρα από το άκρο του στρωτήρα αυξάνει την αντίσταση τριβής στη μετακίνηση ολόκληρης της εσχάρας επί του έρματος,
- μια σταθερή υπόβαση: συστολή ή μετακίνηση της επιδομές, μπορεί να επηρεάσουν τις δυνάμεις στη συνεχώς συγκολλημένη σιδηροτροχιά, ώστε να κινδυνεύσει η ΣΘΓ,
- θέσεις, όπως οι σιδηροδρομικές διαβάσεις, οι γέφυρες, οι αλλαγές του προφίλ της γραμμής (με στρωτήρες/χωρίς στρωτήρες), πριν από τις οποίες μπορεί να υφίσταται συγκέντρωση δυνάμεων, θεωρούνται κρίσιμες και πρέπει να μελετώνται επισταμένα. Οι αλλαγές, κανονικά, δεν αποτελούν κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα, εφόσον απομονώνονται με ειδικά τεμάχια (κρίσιμη είναι η εξασφάλιση σε πλευρική μετατόπιση της περιοχής πριν την αλλαγή).

Αν προσεχθούν ιδιαίτεως τα παραπάνω στοιχεία, μπορεί η γραμμή να είναι πολύ καλή και να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Εκτός από την βελτίωση της άνεσης στην κύλιση, που είναι σημαντική και ανεξάρτητη της ταχύτητας των συρμών, οι συγκολλημένες σιδηροτροχιές παρουσιάζουν και το χαρακτηριστικό της μείωσης του περιοδικού θορύβου στους αρμούς και των ταλαντώσεων των βαγονιών.

Β) Αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση και ροπή αδράνειας

Δύο πολύ σημαντικά στοιχεία που επηρεάζουν τη ΣΘΓ για τις ΣΣΣ παρουσιάζονται παρακάτω. Χονδρικά αναφέρεται ότι υπέρ της ασφάλειας δρουν:

- μεγάλη εγκάρσια αντίσταση της γραμμής εντός του έρματος (γραμμές με σταθερές επιδομές είναι μη κρίσιμες),
- μεγάλη ροπή αδράνειας της γραμμής ή αντίστοιχα μεγάλη αντίσταση στη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τον στρωτήρα, από τον σύνδεσμο.

Αυτές οι παράμετροι, που εξαρτώνται από την επιδομή, επηρεάζουν την κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας, στην οποία μπορεί να εμφανιστεί η απώλεια της σταθερότητας της γραμμής, δηλαδή επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια έναντι οριζόντιου λυγισμού (πλευρική μετατόπιση) της γραμμής. Κατακόρυφος λυγισμός, σε αυτή την περίπτωση αυξημένου βάρους της γραμμής, εμφανίζεται πολύ σπάνια.

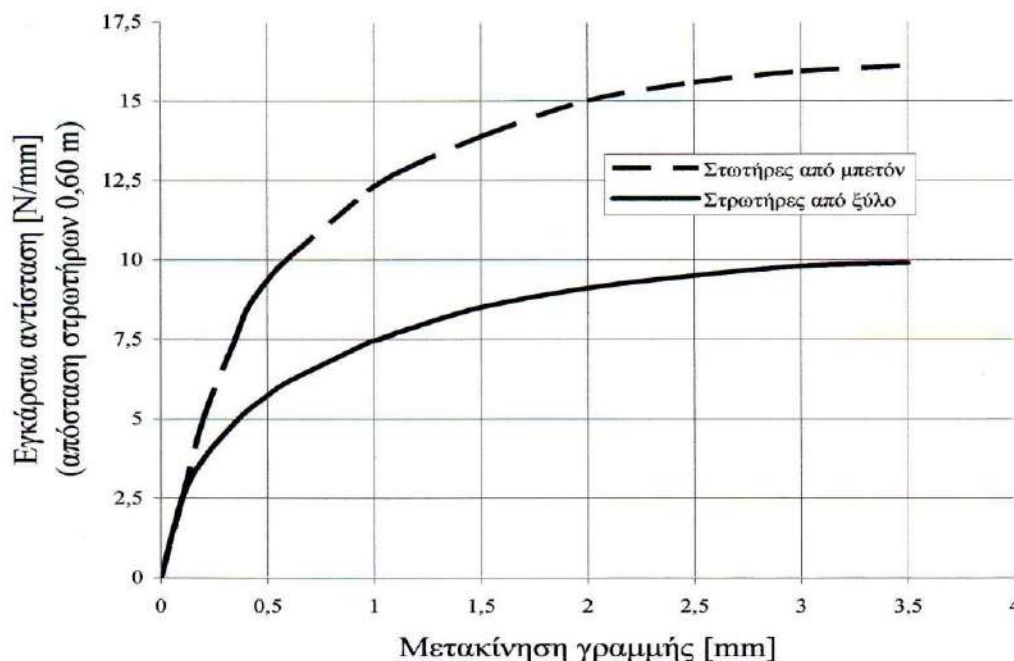
Εγκάρσια αντίσταση στη μετακίνηση τα γραμμής εντός του έρματος

Η εγκάρσια αντίσταση για τους στρωτήρες από μπετόν είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη των ξύλινων στρωτήρων (Σχήμα 3.10). Για μήκος στρωτήρων από σκυρόδεμα 2,4m, με μεταξύ τους απόσταση 60cm και πλάτος έρματος 40cm από την άκρη του στρωτήρα, η στατική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης w , δηλαδή χωρίς κυκλοφορία συρμών, για μετατόπιση $f=2\text{mm}$ είναι χοντρικά:

$w = 14\text{N/mm}$ μήκους σιδηροτροχιάς,

ενώ για μήκος στρωτήρων από σκυρόδεμα λαμβάνουμε:

$w = 15\text{N/mm}$ μήκους σιδηροτροχιάς.

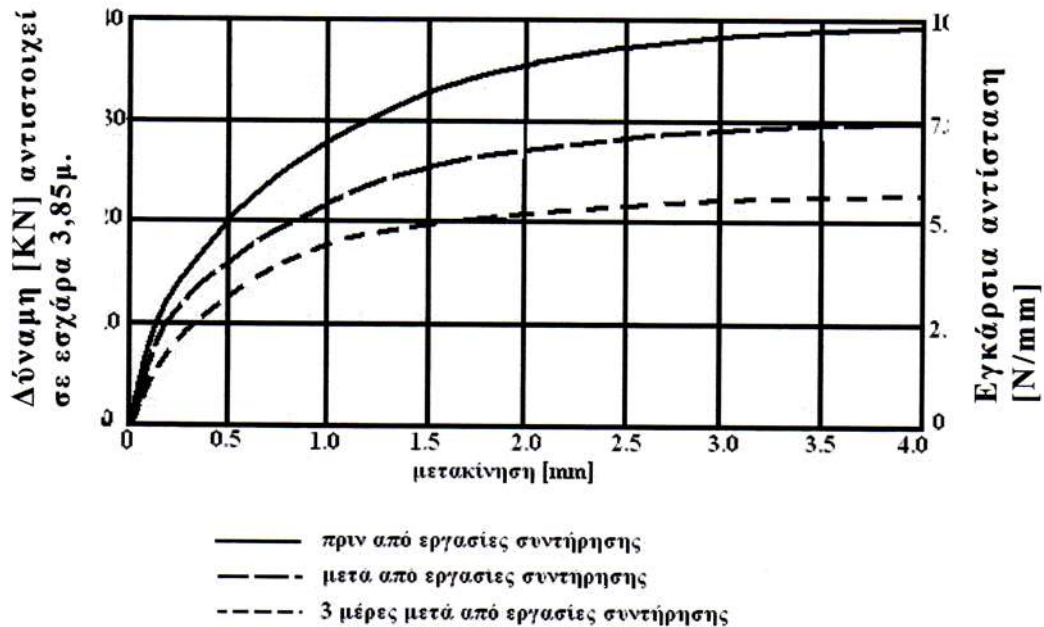


Σχήμα 3.10

Εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση πριν από εργασίες συντήρησης για στρωτήρες από μπετόν και ξύλο (στατική τιμή: χωρίς επίδραση συρμού)

Πηγή [15]

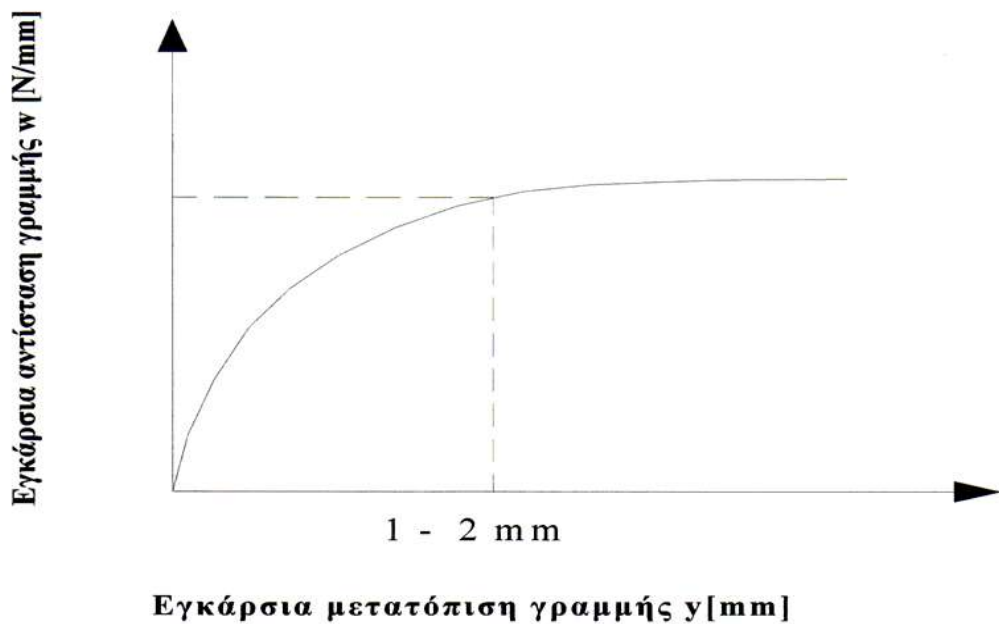
Μετά από εργασίες συντήρησης της γραμμής, όπου γίνεται αναμόχλευση του έρματος, πέφτει η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης περίπου κατά 55% και στη συνέχεια αυξάνεται εξαιτίας της συμπύκνωσης που γίνεται από την κυκλοφορία των συρμών επάνω στη γραμμή. Μετά από διέλευση φορτίων κυκλοφορίας περίπου 200000Brt, λαμβάνει και πάλι την αρχική της τιμή. Αυτά μελετήθηκαν σε γραμμή με ξύλινους στρωτήρες (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11

Διάγραμμα που προέκυψε από πειράματα: εγκάρσια αντίσταση μετακίνησης για γραμμή με ξύλινους στρωτήρες πριν και μετά τις εργασίες συντήρησης

Πηγή [15]



Σχήμα 3.12

Παραδοχή για την εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση w

Πηγή [8]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, πριν και μετά το σημείο επαφής του τροχού με τη σιδηροτροχιά, παρατηρείται μια ανύψωση, δηλαδή η κάμψη της σιδηροτροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο (γραμμή κάμψης) σε μια απόσταση x από το σημείο εφαρμογής του κατακόρυφου φορτίου Q λαμβάνει αρνητική τιμή. Τότε, η σιδηροτροχιά λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (γραμμή κάμψης Zimmermann), όπου είναι:

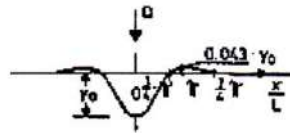
$$l = \sqrt[4]{\frac{4EI}{\beta C}} [mm] \quad (3.17), \text{ όπου:}$$

l = θεμελιακή τιμή μήκους για την επιδομή [mm]

E, I = μέτρο ελαστικότητας, ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς

$\beta = F_d/a$ = ιδεατό πλάτος [mm]

C = συντελεστής στρώσης έρματος [N/mm³]



Σχήμα 3.13

Γραμμή κάμψης της σιδηροτροχιάς με ανύψωση υπό τη φόρτιση ενός κατακόρυφου φορτίου (Zimmermann)

Πηγή [15]

Για τη συνολική μείωση της δυναμικής τιμής υπάρχουν δύο λόγοι: αφ' ενός μειώνεται δραστικά η επιφάνεια επαφής μεταξύ των στρωτήρων και του έρματος κάτω από το σημείο της ανύψωσης (20 - 40 %), αφ' ετέρου διαταράσσεται η σταθερότητα της γραμμής εξαιτίας της δόνησης, που προκαλείται από τον διερχόμενο συρμό (10 - 20 % μείωση). Τελικά, για τον υπολογισμό της κρίσιμης αύξησης της θερμοκρασίας, λαμβάνεται μικρότερη τιμή της αντίστασης από τη στατική τιμή της. Λαμβάνεται η δυναμική τιμή, η οποία είναι μειωμένη της αντίστοιχης στατικής κατά 40 - 60 %.

Για τη μετρική γραμμή ισχύουν σε γενικές γραμμές τα παραπάνω. Παρόλ' αυτά, καθώς η απόσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών είναι μικρότερη, εμφανίζονται κατά κάποιες μικρότερες τιμές. Για το γεγονός αυτό παίζουν ρόλο οι μικρότερες επιφάνειες επαφής των στρωτήρων με το έρμα, τα μικρότερα μέτωπα των μικρότερων και λεπτότερων στρωτήρων που χρησιμοποιούνται στις μετρικές γραμμές. Σαν ενδεικτική τιμή εγκάρσιας αντίστασης για τη μετρική γραμμή μπορεί να ληφθεί η αντίστοιχη τιμή της κανονικής γραμμής, με μείωση κατά 10%. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, πρέπει να γίνουν επιπλέον μελέτες για τη μετρική γραμμή.

Η εμπειρία, επίσης, δίδαξε ότι οι μετατοπίσεις της σιδηροτροχιάς εμφανίζονται κατά τη διέλευση συρμού, και ενώ δεν εμφανίστηκαν κατά τη διέλευση του πρώτου άξονα, εμφανίστηκαν κατά τη διέλευση του τελευταίου.

Οι γραμμές με Υ-μεταλλικούς στρωτήρες έχουν εφαρμοστεί πολύ λίγο, αλλά οι μελέτες έδειξαν ότι προσφέρουν μια εγκάρσια αντίσταση 10-20% μεγαλύτερη αυτής των στρωτήρων από σκυρόδεμα. Οι Υ-μεταλλικοί στρωτήρες βρίσκονται υπό δοκιμή σε πολλούς Σιδηροδρόμους. Το μειονέκτημά τους είναι ότι κοστίζουν αρκετά ανά κομμάτι, σε σχέση με τους άλλους στρωτήρες [15].

Ροπή αδράνειας της εσχάρας της γραμμής

Εξασφαλισμένες ή όχι, οι συνδέσεις της σιδηροτροχιάς με τους στρωτήρες, μειώνουν τη ροπή αδράνειας της εσχάρας. Για την οριζόντια ροπή αδράνειας έχει εκτιμηθεί από μελέτες ότι για την εσχάρα, με ελαστικούς συνδέσμους, για κανονική γραμμή, με απόσταση μεταξύ στρωτήρων 60-65cm και υπό την επενέργεια δονήσεων (δυναμική τιμή), η υποκατάστατη ροπή αδράνειας της εσχάρας σε κάθε σύνδεση είναι ίση με δύο έως τρεις φορές την οριζόντια ροπή αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών.

Για τη μετρική γραμμή δεν υφίστανται ακόμα, αποτελέσματα μελετών. Στην περίπτωση αυτή, η ροπή αδράνειας της εσχάρας δεν εξαρτάται άμεσα από την απόσταση των σιδηροτροχιών μεταξύ τους. Σε πρώτη προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ανάλογα με την κανονική γραμμή, δηλαδή ότι η ροπή αδράνεια της εσχάρας εξαρτάται, γενικά, από το προφίλ της σιδηροτροχιάς και έτσι για τις συμβατικές συνδέσεις, μπορεί να ληφθεί η ίδια σχέση με την κανονική γραμμή. Το αν η παραπάνω προσέγγιση είναι ρεαλιστική, υπόκειται σε περαιτέρω μελέτες.

Οι γραμμές με τους καινούργιους Υ-μεταλλικούς στρωτήρες, όπως προέκυψε από μελέτες, προσφέρουν μια περίπου 10 φορές μεγαλύτερη ροπή αδράνειας εσχάρας, σε σχέση με τις γραμμές με συμβατικούς ξύλινους στρωτήρες. Την αυξημένη ροπή αδράνειας, προσφέρουν οι Υ-μεταλλικοί στρωτήρες, εξαιτίας του ιδιαίτερου τρόπου που τοποθετούνται [15].

Το θέμα της ροπής αδράνειας της σιδηροδρομικής εσχάρας, αναλύεται περισσότερο στα Κεφάλαια 4 και 5 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Γ) Μέθοδος υπολογισμού της ΣΘΓ

Ο υπολογισμός της κρίσιμης θερμοκρασίας Δt , στην οποία εμφανίζεται η οριζόντια πλευρική μετατόπιση της γραμμής, μπορεί να γίνει με τη μέθοδο του Meier, που έχει αναπτυχθεί εδώ και 50 χρόνια. Παρά τις απλουστευτικές υποθέσεις που υιοθετεί αυτή η μέθοδος, όπως για παράδειγμα η παραδοχή ότι η ροπή αδράνειας της εσχάρας παραμένει σταθερή, καθώς και η παραδοχή ότι η πλευρική αντίσταση σε μετακίνηση της γραμμής παραμένει η ίδια, επιτρέπει τον ικανοποιητικά ακριβή υπολογισμό στην πράξη.

Καθαρά από τη μεριά της φυσικής, η συνεχής σιδηροτροχιά αντιστοιχεί σε μια απείρου μήκους ράβδο, που εδράζεται μετά τριβής και στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, όπως το βάρος, οι διαστάσεις, η ροπή αδράνειας, οι δυνάμεις τριβής και οι θλιπτικές δυνάμεις πρέπει να είναι γνωστά.

Από τη μεριά του λυγισμού σε μια απλοποιημένη ράβδο υπό θλίψη, η έναρξη του φαινομένου, συνεπάγεται μια κατακόρυφη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς, που

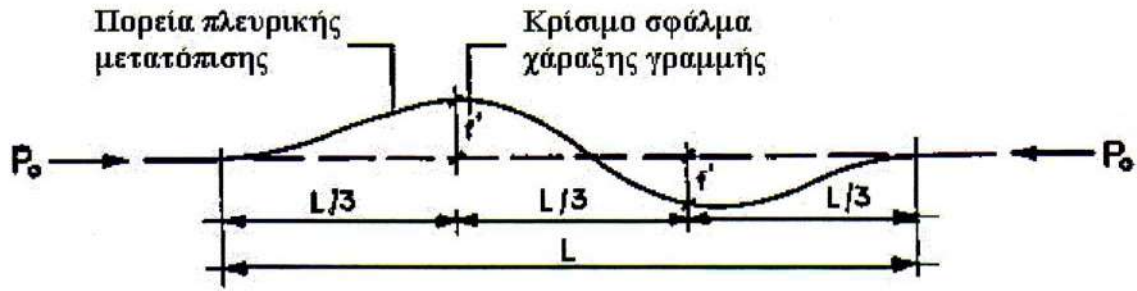
ενεργοποιεί το βάρος της και μια οριζόντια μετακίνηση, που ενεργοποιεί την παθητική εγκάρσια αντίσταση στη μετακίνηση της εσχάρας, εντός του έρματος. Το μήκος της γραμμής, που συμβαίνει η πλευρική μετατόπιση είναι άγνωστο και μπορεί να μεταβληθεί καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται. Ο ακριβής υπολογισμός του κινδύνου της πλευρικής μετατόπισης σε μια συγκεκριμένη «ράβδο» προϋποθέτει την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης, της οποίας η λύση προκύπτει μετά από αρκετές παραδοχές που πρέπει να γίνουν στην πορεία και τελικά τα αποτελέσματα απλώς πλησιάζουν στην πραγματικότητα.

Ο Meier, με τη βοήθεια ενεργειακών μεθόδων, κατέληξε σε μια πολύ καλή προσέγγιση. Η προσέγγιση αφορά στο ότι για να λάβει η γραμμή κάμψης μια ορισμένη μορφή, εμφανίζεται ένα ορισμένο σφάλμα κατά μήκος της γραμμής σε σχέση με την ακριβή γεωμετρική της θέση (Σχήμα 3.14). Αυτό το υποθετικό σφάλμα υπολογισμού f εξαρτάται από την κατάσταση της γραμμής: για καλή κατάσταση γραμμής μπορεί να είναι: $f=15-20\text{mm}$ και για κακή κατάσταση γραμμής μπορεί να λάβει τιμές: $f=20-25\text{mm}$.

Στη μέθοδο αυτή συγκρίνονται η ενέργεια που απαιτείται για να επέλθει βλάβη στη γραμμή με την ενέργεια, που ελευθερώνεται κατά την εμφάνιση της βλάβης. Μετατόπιση εμφανίζεται όταν η ενέργεια υπερτερεί της απαιτούμενης για τη βλάβη.

Στην συνέχεια παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού όπου για οριζοντιογραφική ακτίνα $R \geq 1000\text{m}$, η γραμμή θεωρείται ευθύγραμμη. Ως πιθανότερη γραμμή κάμψης οριζοντιογραφικά λαμβάνεται η ημιτονοειδής γραμμή. Τα παρακάτω μεγέθη απαιτούνται για τον υπολογισμό κατά Meier:

- Δ_{tkrit} = κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας της γραμμής πάνω από την ουδέτερη θερμοκρασία, κατά την οποία αρχίζει η μετατόπιση [$^{\circ}\text{C}$]
- Δt = αύξηση της θερμοκρασίας της γραμμής πάνω από την ουδέτερη θερμοκρασία (εμφανιζόμενη) [$^{\circ}\text{C}$]
- P_o = κρίσιμη θλιπτική δύναμη στη γραμμή [N]
- L = μήκος κύματος της ημιτονοειδούς καμπύλης [mm]
- f = αρχικό υποθετικό σφάλμα γραμμής [mm]
- f' = κρίσιμο λάθος γραμμής όπου αρχίζει η μετατόπιση [mm]
- E = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα = $2,1 \times 10^5$ [N/mm²]
- $F_{(2)}$ = επιφάνεια και των δύο σιδηροτροχιών = $2 \times F$ [mm²]
- α = θερμικός συντελεστής του χάλυβα = $1,15 \times 10^{-5}$ [grad⁻¹]
- I_E = ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εσχάρας [mm⁴]
- w = εγκάρσια αντίσταση έναντι μετατόπισης της εσχάρας στο έρμα ανά μονάδα μήκους [N/mm]
- R = οριζοντιογραφική ακτίνα της γραμμής [mm]



Σχήμα 3.14
Παραδοχή γραμμής κάμψης για ευθεία γραμμή
Πηγή [15]

Οι σχέσεις για τις κρίσιμες τιμές, στις οποίες αρχίζει η πλευρική μετατόπιση, είναι:

$$P_0 = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F_{(2)} \text{ [N]} \quad (3.18)$$

$$L = 3 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_0}} \text{ [mm]} \quad (3.19)$$

$$f' = 8,7 \cdot w \cdot \frac{EI_E}{P_0^2} \text{ [mm]} \quad (3.20)$$

και για την κρίσιμη άνοδο της θερμοκρασίας ισχύει:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_E \cdot w}{a^2 \cdot F_{(2)}^2 \cdot E \cdot f}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.21)$$

Ο έλεγχος έναντι πλευρικής μετατόπισης είναι:

$$\frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \geq 2$$

Ισχύει για ευθυγραμμία και καμπύλη. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 2 (συντελεστής ασφάλειας) προκειμένου να αντιμετωπισθούν οι εκάστοτε δυνάμεις, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη στην μέθοδο ΜΕΙΕΡ. Παρακάτω, μελετάται και η επίδραση των οριζοντίων δυνάμεων στην ευθυγραμμία.

Σε καμπύλη

Αντίστοιχα με την ευθεία γραμμή, για την καμπύλη γραμμή ισχύουν οι σχέσεις:

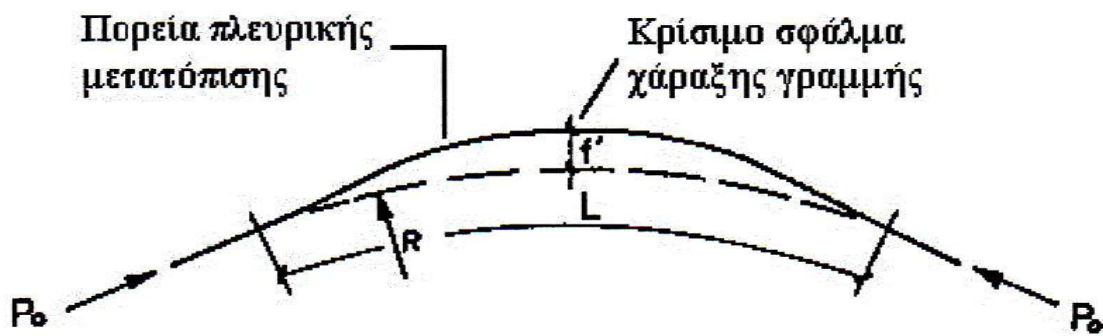
$$P_0 = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F_{(2)} \quad [\text{N}] \quad (3.18)$$

$$L = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_0}} \quad [\text{mm}] \quad (3.22)$$

$$f' = \left(w - \frac{P_0}{R} \right) \cdot \frac{16EI_E}{P_0^2} \quad [\text{mm}] \quad (3.23)$$

και για την κρίσιμη άνοδο της θερμοκρασίας ισχύει:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot I_E}{a \cdot F_{(2)} \cdot R \cdot f} \right)^2 + \frac{16 \cdot I_E \cdot w}{a^2 \cdot F_{(2)}^2 \cdot E \cdot f}} - \frac{8 \cdot I_E}{a \cdot F_{(2)} \cdot R \cdot f} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.24)$$



Σχήμα 3.15
Παραδοχή γραμμής κάμψης για καμπύλη γραμμή
Πηγή [15]

Στην καμπύλη γραμμή το Δt_{krit} και από αυτό και οι σχέσεις της ασφάλειας έναντι πλευρικής μετατόπισης είναι εξαρτημένες από την ακτίνα R της καμπύλης. Η ασφάλεια μειώνεται για μικρότερες ακτίνες.

Κανόνας: αν η θερμοκρασιακή κατάσταση ασφάλειας ($\Delta t_{krit} - \Delta t$) είναι μόνο 10°C , πρέπει οι συρμοί να διέρχονται από την καμπύλη με ελαττωμένη ταχύτητα. Γενικά, αυτή η διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να είναι $40-50^\circ\text{C}$, όπου η Δt λαμβάνεται πάνω από τη θερμοκρασία τοποθέτησης [15].

3.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΖΟΒΑ

3.3.1. Γενικά

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή στις μετρικές γραμμές των Σιδηροδρόμων του Κονγκό. Παρακάτω αναπτύσσονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον καθορισμό των μηχανικών παραγόντων της ευστάθειας της γραμμής, και η πρόταση μιας μεθόδου για τον υπολογισμό της ευστάθειας της ΣΣΣ στις μετρικές γραμμές.

3.3.2. Μηχανικές παράμετροι της οριζόντιας ευστάθειας της σιδηροδρομικής γραμμής

Οι μηχανικές παράμετροι που υπεισέρχονται είναι οι εξής:

- εγκάρσια ακαμψία της γραμμής
- πλευρική αντίσταση της γραμμής στην μετακίνηση εντός του έρματος
- αντίσταση των συνδέσμων στην περιστροφή της σιδηροτροχιάς σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα στα άκρα των στρωτήρων

Εγκάρσια ακαμψία της γραμμής

Αυτός είναι ένας απλός και πολύ γνωστός παράγοντας που είναι ίσος με $2EI$, όπου E I είναι η εγκάρσια ακαμψία της σιδηροτροχιάς (το E είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδηροτροχιάς, το I η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς ως προς τον κατακόρυφο άξονα που περνά από το κέντρο βαρύτητας του δεξιού τμήματος).

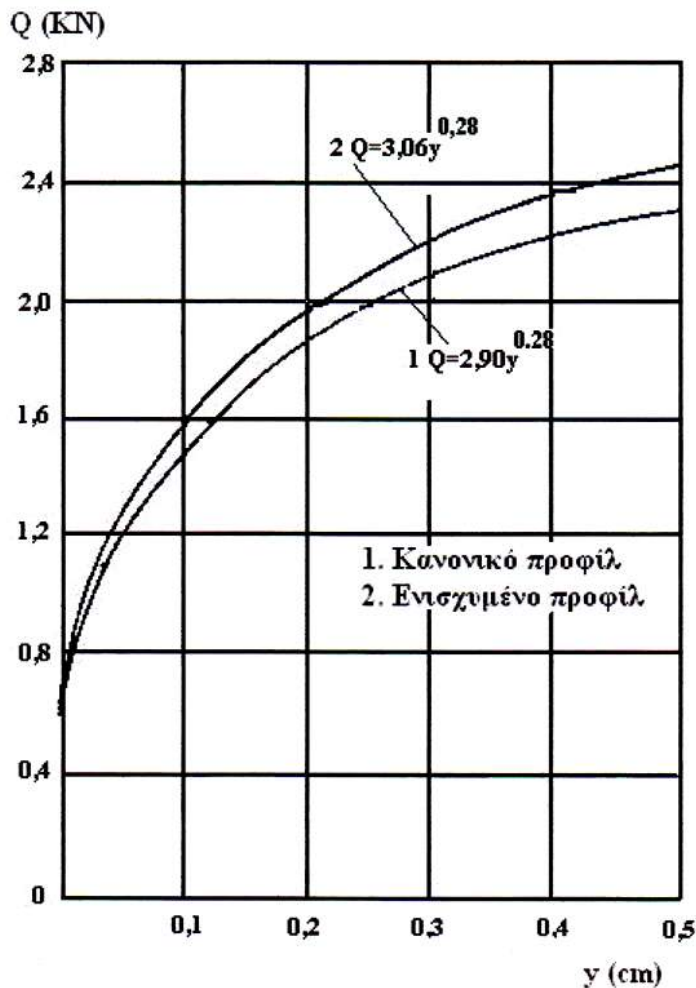
Πλευρική αντίσταση της γραμμής

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής στη μετακίνηση εντός του έρματος είναι ένας βασικός παράγοντας της ευστάθειας της ΣΣΣ κατά την οριζόντια διεύθυνση. Για τη μετρική γραμμή, έχουν γίνει πειραματικές μελέτες στην Ιαπωνία, αλλά τα αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί, εννοείται ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιβάλλον διαφορετικό από τη συγκεκριμένη χώρα.

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής εξαρτάται από τον τύπο του έρματος, τον βαθμό συμπίκνωσής του, τη διατομή του, τον τύπο, το σχήμα και τη διάταξη του έρματος. Πάνω σ' αυτό το υπόβαθρο, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύμφωνα με τις ιδιαίτερες συνθήκες των γραμμών του Κονγκό πάνω σε ξύλινους στρωτήρες. Τα αποτελέσματά τους αναλύθηκαν σε σχέση με μεγέθη αντοχής - έντασης με βάση μαθηματικές στατιστικές μεθόδους.

Χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο "PEARSON" χ^2 για να καθοριστεί το εάν οι συνηθισμένες GAUSS κατανομές περιγράφουν όλες τις κατανομές των αντοχών - εντάσεων.

Οι καμπύλες των μέσων τιμών αντιστάσεων ανάλογα με τους στρωτήρες, όπως προέκυψαν από τα ως άνω πειράματα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.16. Αυτές οι καμπύλες προκύπτουν για μη σταθεροποιημένη γραμμή, που ανταποκρίνεται στη βασική υπόθεση για τη μελέτη της ευστάθειας της ΣΣΣ.



Σχήμα 3.16
Εγκάρσια αντίσταση της γραμμής
για ξύλινους στρωτήρες
Πηγή [9]

Το κριτήριο που προσδιορίζει την αντίσταση της γραμμής εξαρτάται από τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται. Σε μερικές μεθόδους, γίνεται παραδοχή σταθερής τιμής αντίστασης. Σε άλλες, εξετάζονται δύο περιοχές: μια γραμμική περιοχή, όπου η αντίσταση είναι ανάλογη της Y μετατόπισης και μια πλαστική περιοχή, όπου η αντίσταση είναι σταθερή.

Η πιο αντιπροσωπευτική έκφραση της αντίστασης φαίνεται να είναι η παρακάτω:

$Q=Q_0 y^n$ (3.25), όπου Q_0 και n είναι παράμετροι που μπορούν να καθοριστούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων: με $n<1$, οι τιμές των Q_0 και n δίνονται για αυτή τη μελέτη στο Σχήμα 3.16.

Αντίσταση των συνδέσμων στην περιστροφή της σιδηροτροχιάς σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα στα άκρα των στρωτήρων

Για τους σκοπούς της μελέτης της σταθερότητας της γραμμής, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη σχέση μεταξύ της ροπής αντίστασης M που προσφέρεται από τον σύνδεσμο στην περιστροφή των σιδηροτροχιών στον κατακόρυφο άξονα από τα άκρα των στρωτήρων, σε εξάρτηση από τη γωνία στροφής της σιδηροτροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο β , σε ακτίνια. Αυτός ο παράγοντας μπορεί επίσης να καθοριστεί πειραματικά.

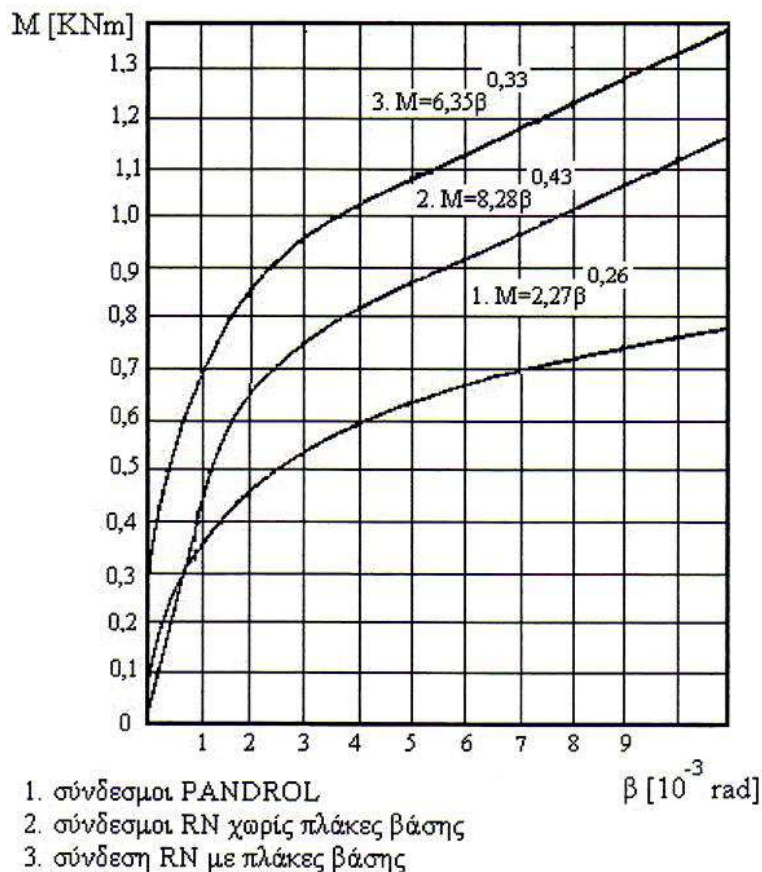
Το κριτήριο με το οποίο θα καθοριστεί αυτή η αντίσταση εξαρτάται επίσης από τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται. Και εδώ, γίνονται δεκτές δύο περιοχές: η

γραμμική και η πλαστική περιοχή. Οι καμπύλες στο Σχήμα 3.17 μπορούν και αυτές να εκφραστούν με μια συνάρτηση της ακόλουθης μορφής:

$$M = M_0 \beta^k \quad (3.26), \quad \text{όπου } k < 1.$$

Οι σύνδεσμοι RN και οι PANDROL χρησιμοποιούνται από το Congo Ocean Railway (CFCO).

Το Σχήμα 3.17 δείχνει τις καμπύλες για συνδέσμους RN, καθώς επίσης και αυτές που προέκυψαν για τους συνδέσμους PANDROL, για μικρές τιμές του β .



Σχήμα 3.17
Αντίσταση συνδέσμων στην
περιστροφή της σιδηροτροχιάς
ως προς τον στρωτήρα, για
μικρές τιμές του β
Πηγή [9]

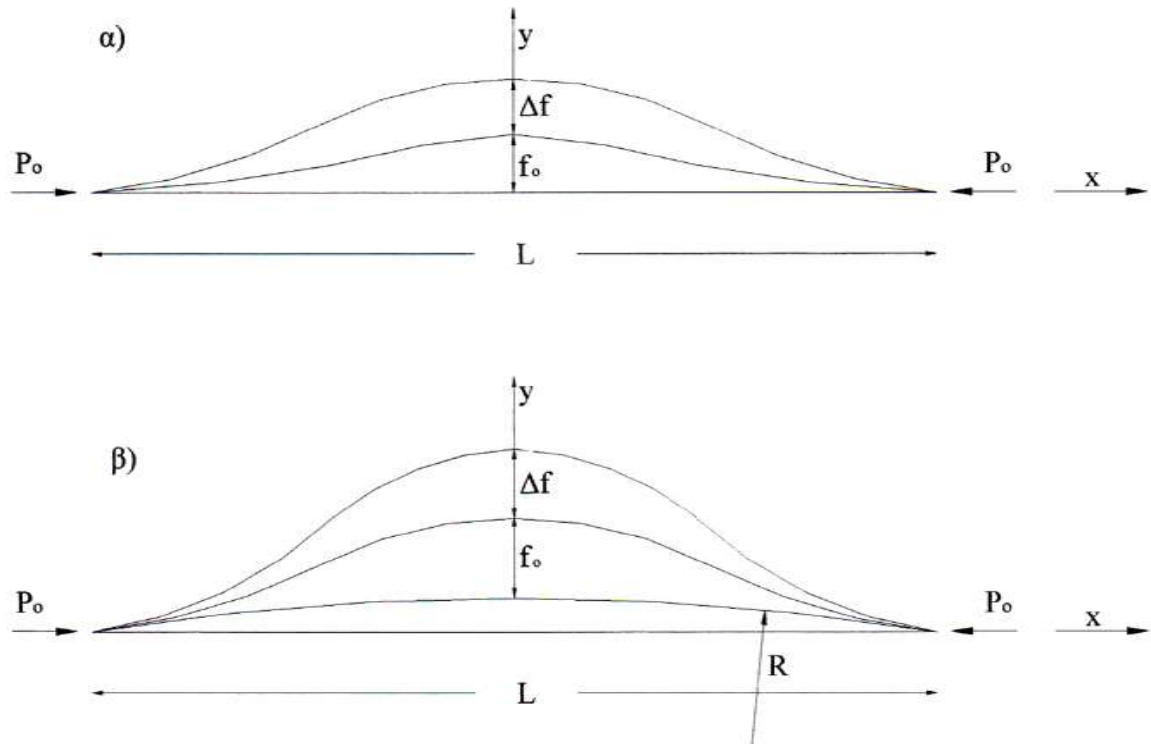
3.3.3. Πρακτική μέθοδος για τον υπολογισμό της ευστάθειας της ΣΣΣ

Βασική υπόθεση

Θα υποθέσουμε ότι η γραμμή παρουσιάζει ένα αρχικό ελάττωμα επιπεδότητας (ελάττωμα στην οριζοντίωση), το οποίο έχει εμφανιστεί πριν την εμφάνιση των θλιπτικών τάσεων από τη θερμότητα - συμβολίζεται με f_0 στις σιδηροτροχίες.

Η εμφάνιση αυτών των τάσεων προκαλεί μεγαλύτερο ελάττωμα κατά Δf , εκκινώντας έτσι τη διαδικασία του λυγισμού.

Το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της ελάχιστης θλιπτικής δύναμης που προκαλεί τον λυγισμό της γραμμής και που ακολουθεί την ελαστική γραμμή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18. Οι συνθήκες ισορροπίας προσδιορίζονται με ενεργειακές μεθόδους.



Σχήμα 3.18
Παραδοχή γραμμής κάμψης: μέθοδος Zoba
α) ευθεία γραμμή β) καμπύλη γραμμή
Πηγή [9]

Οι εντός της γραμμής αξονική θλιπτική τάση σε σχέση με τους μηχανικούς παράγοντες και το επίπεδο της γραμμής καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \left[48,466 \frac{EI \Delta f}{L^2} + 0,078 l^2 \xi_1 \frac{Q_0}{a} \Delta f^n + \frac{2m_0}{a} \xi_2 L \left(\frac{\Delta f}{L} \right)^k \right] \times \frac{1}{\Delta f + f_0 + 0,078 \frac{L^2}{R}} \quad (3.27)$$

όπου:

- EI ακαμψία της γραμμής στον κάθετο άξονα (ίση με την ακαμψία των δύο σιδηροτροχιών)
- f_0 αρχικό ελάττωμα επιπεδότητας
- Δf επιπλέον ελάττωμα εξαιτίας των θλιπτικών τάσεων
- L μήκος του ελαττώματος*
- ξ_1 και ξ_2 συντελεστές που εξαρτώνται από τις τιμές των n και k
- a απόσταση μεταξύ των κέντρων των στρωτήρων
- R καμπυλότητα της γραμμής.

Οι άλλες παράμετροι είναι ήδη γνωστοί.

* όταν η θερμοκρασία αυξάνει, το μήκος του αρχικού ελαττώματος επιπέδου θεωρείται ότι παραμένει σταθερό. Μόνο η απόκλιση από το ελάττωμα αλλάζει από f_0 σε $f_0 + \Delta f$.

Η τάση θλίψης P που προκύπτει από τη σχέση (3.27) είναι ένας παράγοντας απόκλισης Δf και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της για μια συγκεκριμένη τιμή του τελευταίου. Μεταβάλλοντας το μήκος l του ελαττώματος, προκύπτει μια σειρά τιμών $\max l$, μεταξύ των οποίων επιλέγεται η ελάχιστη. Το πρόβλημα συνεπώς συνίσταται στον καθορισμό του μήκους $\max P$, που είναι η επιθυμητή, ελάχιστη, κρίσιμη, θλιπτική τάση.

Πρακτική μέθοδος για το καθορισμό των ελάχιστων, κρίσιμων, θλιπτικών τάσεων

Η σχέση (3.27) είναι αρκετά δύσχρηστη για υπολογισμούς με το χέρι. Γι' αυτό αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα υπολογισμού. Βάσει επεξεργασμένων στοιχείων από πολλούς υπολογισμούς σε διαφορετικές περιπτώσεις εξοπλισμού γραμμής, προέκυψε μια πρακτική μέθοδος για τον καθορισμό της ελάχιστης κρίσιμης θλιπτικής τάσης για μετρική γραμμή σε σχέση με διάφορους παράγοντες και παραμέτρους:

$$P_{cr} = \frac{9,81 A_{cr}}{i_0^{a_{cr}}} K_1 K_2 K_3 \text{ σε KN}, \quad (3.28)$$

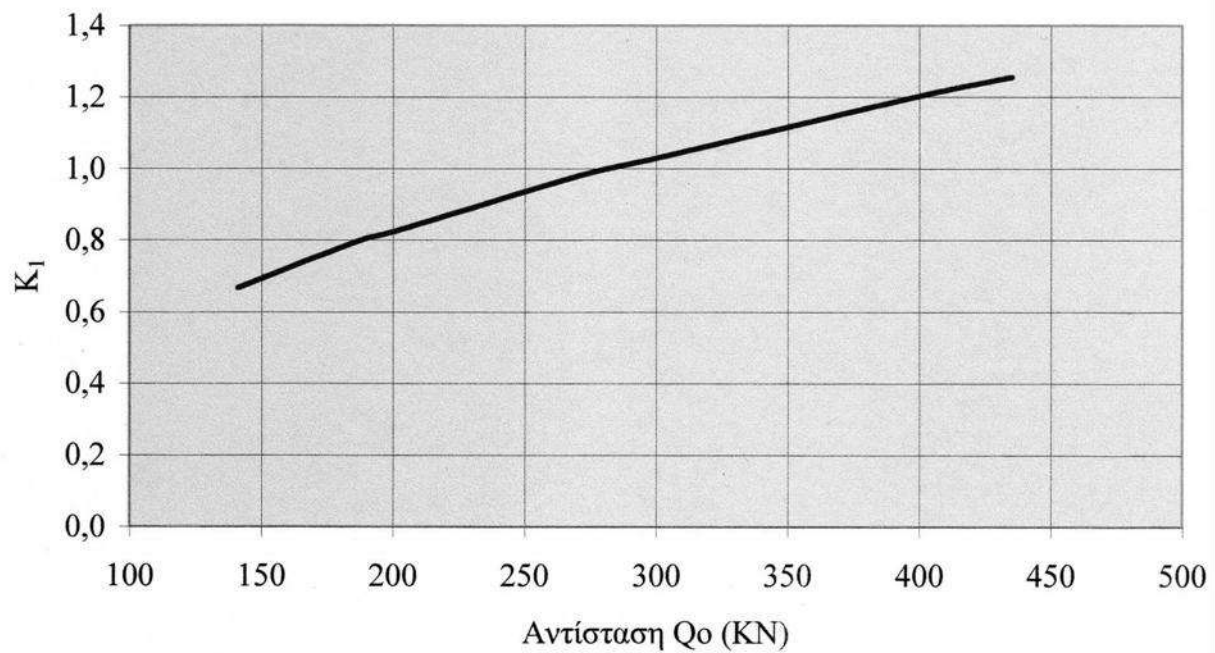
όπου:

- | | |
|-----------------------|---|
| A_{cr} και a_{cr} | παράμετροι που εξαρτώνται από τον τύπο της σιδηροτροχιάς και το επίπεδο της γραμμής. Οι τιμές A_{cr} και a_{cr} φαίνονται στον Πίνακα 3.5 |
| i_0 | η μέση κλίση του αρχικού ελαττώματος σε ουδέτερο(*) επίπεδο γραμμής, ίσο με 4‰ |
| K_1, K_2, K_3 | συντελεστές που μετατρέπουν τα χαρακτηριστικά υπολογισμού στα χαρακτηριστικά αναφοράς (**). Οι τιμές των K_1 και K_2 προσδιορίζονται από τα διαγράμματα των Σχημάτων 3.19, 3.20. Επιπλέον το K_1 εξαρτάται από την αντίσταση Q_0 του στρωτήρα στην εγκάρσια μετακίνηση εντός του έρματος, για μετακίνηση ίση με 1 cm.
Για παράδειγμα, σε μια στερεή διατομή $K_1 = 1,03$, σε μια οπλισμένη διατομή 75/10 $K_1 = 1,03$. Το K_2 εξαρτάται από τον αριθμό των στρωτήρων ανά χιλιόμετρο και είναι ίσο με 0,95, 1,00, 1,11 για 1611, 1722 και 2000 στρωτήρες ανά χιλιόμετρο αντίστοιχα. Το K_3 εξαρτάται από τον τύπο της σύνδεσης και είναι ίσο με 0,92 για PANDROL συνδέσμους, 1,0 για συνδέσμους RN χωρίς πλάκες βάσης και 1,03 για RN συνδέσμους με πλάκες βάσης. Για συνδέσμους Skl (σε στρωτήρες από σκυρόδεμα) λαμβάνεται $K_3=1,15$. |

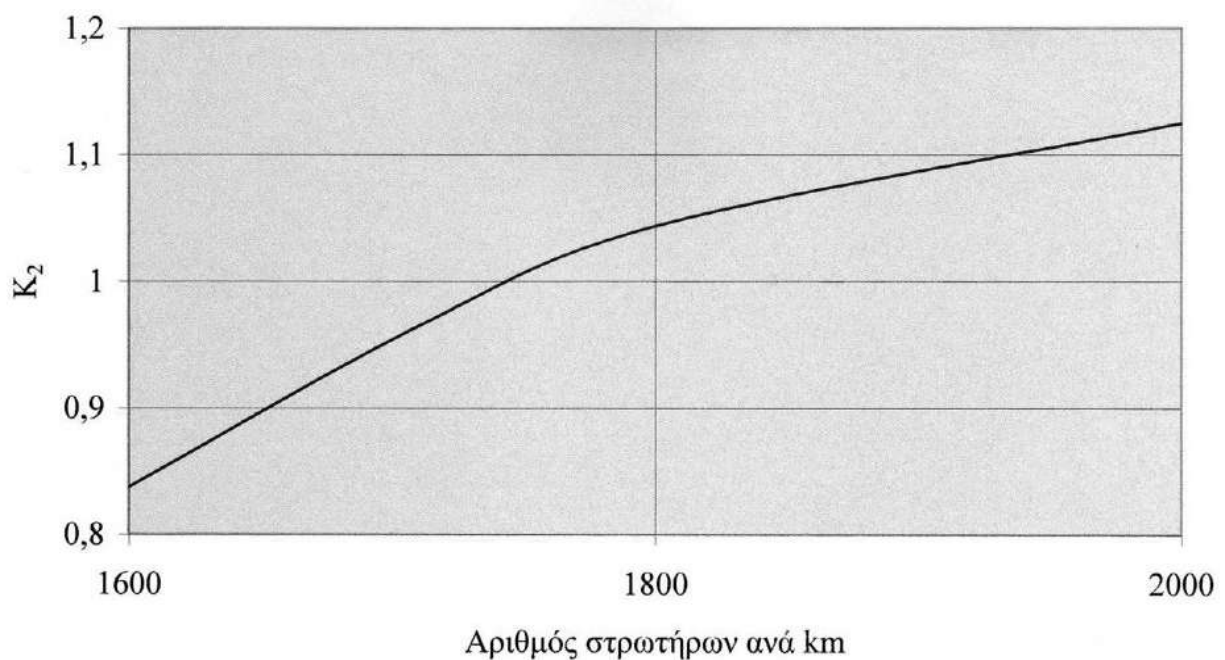
(*) Όπως αναφέρθηκε στην (3.27) υποτίθεται ότι η γραμμή περιέχει το αρχικό σφάλμα επιπεδότητας στην ουδέτερη κατάσταση. Αυτό το ελάττωμα χαρακτηρίζεται από το σφάλμα f_0 . Αυτό το σφάλμα θεωρείται ότι μπορεί να φτάσει τα 2mm για μια χορδή ίση με 10m μήκος, που αντιστοιχεί σε κλίση 4‰ (Σχήμα 3.21).

(**) Σαν πρώτη προσέγγιση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τιμές των παραμέτρων K_1 και K_3 για τους άλλους τύπους στρωτήρων:

- χαλύβδινοι στρωτήρες: $K_1 = 1,25$
- στρωτήρες από σκυρόδεμα: $K_1 = 1,4$
- συνηθισμένοι αμφιδέτες για χαλύβδινους στρωτήρες: $K_3 = 0,9$



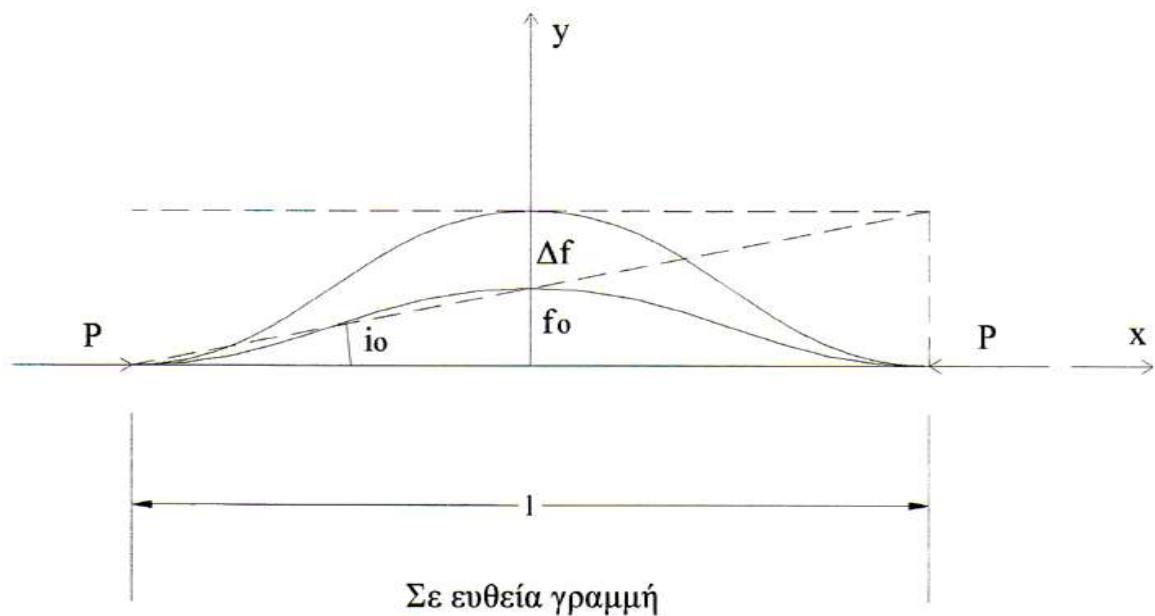
Σχήμα 3.19
Τιμές συντελεστή K_1
Πηγή [9]



Σχήμα 3.20
Τιμές συντελεστή K_2
Πηγή [9]

Ακτίνα καμπύλης(m)	S30 (30kg/m)		S40 (36kg/m)		U33 (46kg/m)		U36(50kg/m)	
	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}
150	85	0,156	91	0,147	100	0,143	105	0,125
200	100	0,198	106	0,178	117	0,165	120	0,155
300	121	0,251	131	0,235	144	0,210	151	0,199
500	150	0,316	162	0,299	181	0,276	192	0,264
1000	182	0,385	200	0,368	229	0,351	244	0,343
∞	230	0,472	257	0,462	310	0,460	355	0,458

Πίνακας 3.5
Τιμές συντελεστών A_{cr} και a_{cr} της μεθόδου Zoba
Πηγή [9]



Σχήμα 3.21
Παράσταση της κλίσης i_0 , της μεθόδου Zoba (ποιοτικά)
Πηγή [24]

Τα θεωρητικά αποτελέσματα των ελαχίστων κρίσιμων θλιπτικών τάσεων που λαμβάνονται από τη σχέση (3.28) ταιριάζουν τέλεια με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στην Ιαπωνία με την μελέτη λυγισμού στη μετρική γραμμή σε πρόσφατα στρωμένους ξύλινους στρωτήρες. Συνεπώς, προτείνεται η χρήση της σχέσης αυτής για τις πρακτικές εφαρμογές.

Υπολογισμός της σταθερότητας της γραμμής

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των ΣΣΣ συνίσταται στον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας K_s , ο οποίος είναι ο λόγος της ελάχιστης κρίσιμης θλιπτικής τάσης P_{cr} (η οποία προκαλεί το λυγισμό της γραμμής στο οριζόντιο επίπεδο) προς την επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από τη θερμοκρασία P_α :

$$K_s = P_{cr} / P_\alpha \quad (3.29)$$

Η επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από θερμοκρασία P_α καθορίζεται από την παρακάτω κλασσική φόρμουλα:

$$P_\alpha = 2 E \alpha S \Delta t \quad (3.18), \text{ όπου}$$

$E =$ μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδ/χιάς ίσο με 20601 kN/cm^2

$\alpha =$ γραμμικός συντελεστής διαστολής του χάλυβα της γραμμής ίσος με $0,000011 \text{ ανά } ^\circ\text{C}$

$2F =$ επιφάνεια των δύο σιδ/χιών, σε cm^2

$\Delta t =$ διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με την ουδέτερη θερμοκρασία (θερμοκρασία αμφίδεσης της ΣΣΣ)

Η γραμμή θεωρείται «θερμικά» σταθερή όταν ο K_s είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 2.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, το πρόβλημα είναι να ελεγχθεί η ευστάθεια για ένα συγκεκριμένο εξοπλισμό της γραμμής. Στην πραγματικότητα, κάποιες φορές το Δt - και συνεπώς ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας τοποθέτησης - είναι αυτό που ψάχνουμε να καθορίσουμε. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η προσέγγιση γίνεται ως εξής. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.29), και λαμβάνοντας σαν πρώτη προσέγγιση $K_s = 2$, λαμβάνουμε την επιτρεπτή θλιπτική τάση P_α :

$$P_\alpha = P_{cr} / 2 \quad (3.30)$$

Η επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας Δt πάνω από τη θερμοκρασία τοποθέτησης της ΣΣΣ βρίσκεται από τη σχέση (3.24), ως εξής:

$$\Delta t = P_\alpha / 2 E \alpha F \quad (3.31)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ I_E

4.1. ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

4.1.1. Η έννοια της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας I_E

Για τον υπολογισμό της ευστάθειας και της κατάστασης ασφαλείας μιας σιδηροδρομικής εσχάρας (σιδηροτροχιές και στρωτήρες), έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς πολλές και ποικίλες θεωρίες και μέθοδοι, όπως του Meier, του Chatkeo και του Gallati. Όλες τους συμφωνούν σε ένα πολύ βασικό σημείο. Στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ευστάθεια της γραμμής. Επιγραμματικά, οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Η εγκάρσια αντίσταση στην εσχάρα w (N/mm) από το περιβάλλον έρμα
- Η ακαμψία της εσχάρας εκφραζόμενη δια της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας (IPA) της εσχάρας I_E (cm⁴)
- Το πιθανό οριζοντιογραφικό σφάλμα f (mm) της γραμμής

Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από τον τύπο της επιδομής και επηρεάζουν άμεσα την κρίσιμη θερμοκρασία $T_{\text{κρις}}$, κατά την οποία εμφανίζεται απώλεια ευστάθειας της γραμμής. Ως εκ τούτου συμβάλλουν απευθείας στην ασφάλεια έναντι οριζόντιας μετατόπισης της εσχάρας [1].

Τόσο η εγκάρσια αντίσταση του έρματος όσο και το πιθανό οριζοντιογραφικό σφάλμα έχουν συζητηθεί και αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Αντίθετα, η ακαμψία της σιδηροδρομικής εσχάρας, δηλαδή η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνείας της, είναι ένα χαρακτηριστικό, του οποίου ο θεωρητικός υπολογισμός εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες, που προέρχονται από τις ιδιότητες των υλικών που την συνθέτουν. Λόγω αυτού η τιμή της εκτιμάται πειραματικά. Επιπλέον, η σημασία της IPA είναι ξεκάθαρη και από το γεγονός ότι σε όλες τις μεθόδους, για τον υπολογισμό της ευστάθειας της εσχάρας, η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική. Βέβαια, υπάρχουν και μέθοδοι, όπως αυτή του Zoba, που έχει απαλλαγεί από τον άμεσο υπολογισμό της IPA, και χρησιμοποιεί συντελεστές για να τον έμμεσο προσδιορισμό της. Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορούμε να πούμε ότι η IPA δεν χρησιμοποιείται στη μέθοδο αυτή.

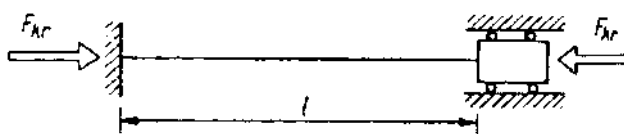
Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της IPA, με θεωρητική προσέγγιση, τα αποτελέσματα της οποίας θα συγκριθούν με τις μέχρι τώρα μετρήσεις του εργαστηρίου Σιδηροδρομικής Επιδομής του Πολυτεχνείου του Μονάχου.

Σύμφωνα με τον Meier η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας μιας σιδηροδρομικής εσχάρας ορίζεται ως: **η ροπή αδράνειας μιας υποθετικής σιδηροτροχιάς, η οποία για το ίδιο μήκος και το ίδιο φορτίο καταπόνησης με την πραγματική εσχάρα, έχει την ίδια μετατόπιση με την τελευταία** [2].

Προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η έννοια της IPA θα προσομοιωθεί η εσχάρα ως ένα μηχανικό σύστημα και θα εξετασθεί τι συμβαίνει κατά τη θλίψη της και κατά το λυγισμό της. Θεωρώντας, λοιπόν, την εσχάρα ως μία ευθύγραμμη ελαστική ράβδο, ομογενή με σταθερή διατομή, και με την ύπαρξη διαξονικής πλευρικής εξασφάλισης (Σχήμα 4.1), το κρίσιμο φορτίο λυγισμού Euler, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (4.1)$$

όπου: F_{kr} η κρίσιμη δύναμη λυγισμού (N)
 E το μέτρο ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς (N/cm²)
 I η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς στην εγκάρσια διεύθυνση (cm⁴)
 L το μήκος της ράβδου μεταξύ των σημείων εξασφάλισης (cm)

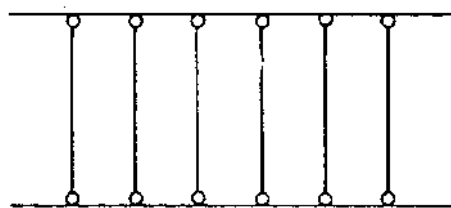


Σχήμα 4.1
 Μηχανικό σύστημα εσχάρας
 υπό θλίψη
 Πηγή [3]

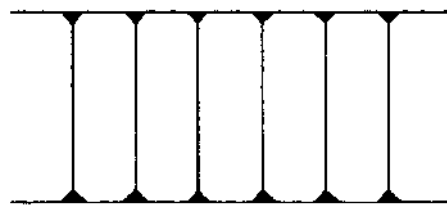
Επίσης, η εσχάρα (όπως και η ιδεατή, ελαστική, εύκαμπτη ράβδος) έχει ένα όριο ευστάθειας, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί σε υψηλές τιμές θλίψης. Έτσι, η εσχάρα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ασταθή ισορροπία, όταν για μία δεδομένη γεωμετρική ανωμαλία, ακόμα και η ελάχιστη επιπλέον θλιπτική δύναμη μπορεί να προκαλέσει ριπτασμό της γραμμής. Το πρόβλημα λυγισμού είναι πολύ πιο περίπλοκο από την παραδοχή την ελαστικής ράβδου, ομογενούς διατομής [3]. Η περιπλοκότητα χαρακτηρίζεται από τα εξής φαινόμενα:

- Η ροπή αδράνειας της εσχάρας προκύπτει τόσο από τη διατομή της σιδηροτροχιάς, όσο και από τους συνδέσμους και την απόσταση των στρωτήρων, ενώ δεν είναι σταθερή και έχει δύο ακραίες τιμές σε δύο ακραίες περιπτώσεις (Σχήμα 4.2).
 Στην περίπτωση (α) (κάτω ακραία τιμή) οι σύνδεσμοι είναι αρθρωτά συνδεδεμένοι με τους στρωτήρες και η καμπτική δυσκαμψία της εσχάρας ισούται με $2 \cdot E \cdot I_{yy}$ (όπου I_{yy} είναι η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς κατά τον κατακόρυφο άξονα y).

Στην περίπτωση (β) (άνω ακραία τιμή) οι σύνδεσμοι είναι άκαμπτα συνδεδεμένοι με τους στρωτήρες. Τώρα, η εσχάρα είναι ένα σύστημα το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί με την στατικά αόριστη εσχάρα Vierendeel [3].



Σχήμα 4.2.α
Αρθρωτή εσχάρα
Πηγή [3]

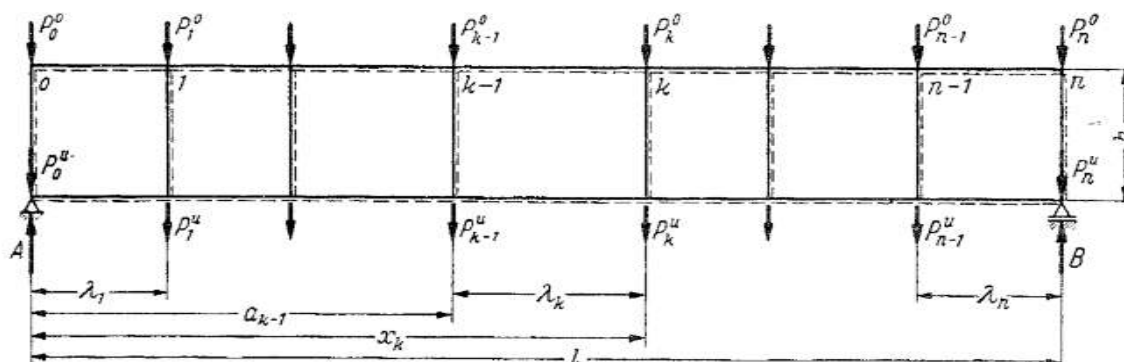


Σχήμα 4.2.β
Άκαμπτη εσχάρα (Vierendeel)
Πηγή [3]

Υπενθυμίζεται ότι η εσχάρα Vierendeel είναι ένας φορέας που αποτελείται από:

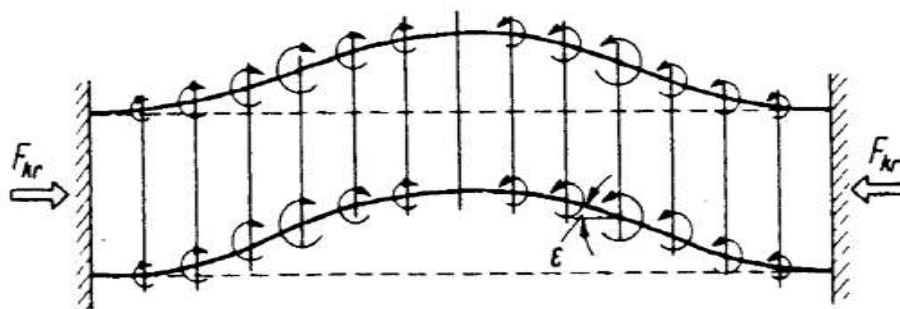
- Δύο παράλληλα στοιχεία «μεγάλου μήκους» και
- Στοιχεία, που συνδέονται με πλήρη πάκτωση, με τα δύο προηγούμενα, κάθετα και στα δύο

και έτσι σχηματίζεται η εσχάρα Vierendeel. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται μία τέτοια εσχάρα με την πιο συνήθη φόρτίσή της.



Σχήμα 4.3
Εσχάρα Vierendeel
Πηγή [4]

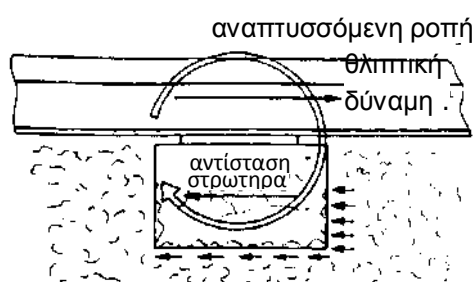
Στην πράξη, βέβαια, η πλευρικά εξασφαλισμένη σιδηροτροχιά έχει μία ελαστική σύνδεση με τους στρωτήρες, και έτσι η δυσκαμψία της βρίσκεται μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων περιπτώσεων. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.4) φαίνεται η καμπτόμενη εσχάρα, καθώς και οι γωνίες και οι ροπές μεταξύ των στρωτήρων και των σιδηροτροχιών [3].



Σχήμα 4.4
Στρεπτικές ροπές και γωνίες στρώσης
σε εσχάρα υπό θλίψη
Πηγή [3]

Η διαδικασία του ριπτασμού της γραμμής, λόγω της αυξανόμενης θλιπτικής δύναμης είναι ως ακολούθως:

Πρώτα, η γραμμή ανυψώνεται ελάχιστα λόγω της εκκεντρότητας μεταξύ της σιδηροτροχιάς (όπου εφαρμόζεται η κατά μήκος θλιπτική δύναμη) και του στρωτήρα. Πιο λεπτομερώς, αυτό προκύπτει λόγω της «οδόντωσης» του έρματος από το στρωτήρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5. Έτσι, η συνισταμένη των δυνάμεων τριβής που ασκούνται στον στρωτήρα, έχει μια απόσταση από το κέντρο βάρους της σιδηροτροχιάς (όπου ασκείται η κατά μήκος θλιπτική δύναμη), με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ροπής στο επίπεδο xy , που ανασηκώνει τη γραμμή και την βγάζει εκτός του οριζόντιου επιπέδου (Σχήμα 4.6). Εκτεταμένες έρευνες περιπτώσεων αστοχίας λόγω λυγισμού, αποδεικνύουν ότι μόνο το 1,2% των περιπτώσεων συμβαίνουν στο κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό το χαμηλό ποσοστό παρατηρείται κυρίως λόγω της μεγάλης καμπτικής δυσκαμψίας $2 \cdot E \cdot I_x$ περί τον άξονα z , αλλά και λόγω του μεγάλου βάρους της εσχάρας [3].

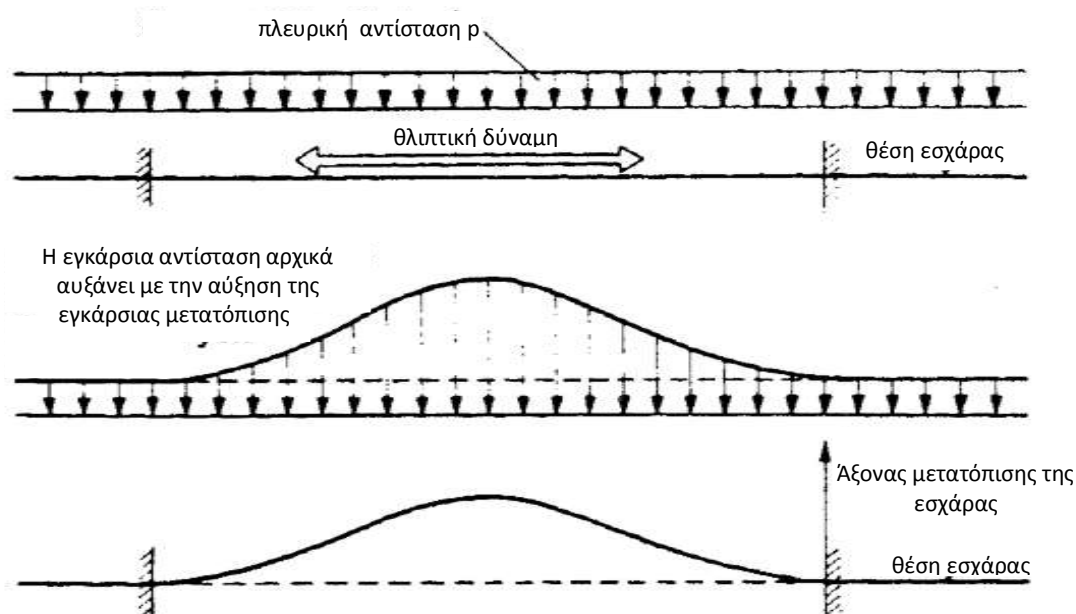


Σχήμα 4.5
Λεπτομέρεια «οδόντωσης» του έρματος
Πηγή [3]



Σχήμα 4.6
Ανύψωση λόγω εκκεντρότητας
Πηγή [3]

- Η εσχάρα σταθεροποιείται εντός του έρματος ελαστικά και με τριβή. Αυτό παρατηρείται ιδιαίτερα, όταν ο οριζόντιος λυγισμός προσπαθεί να στείλει την εσχάρα εκτός του έρματος. Σε αυτήν την περίπτωση οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες και άρα η πλευρική αντίσταση φτάνει κοντά στην οριακή της τιμή (Σχήμα 4.7). Επίσης, η όποια απόκλιση από την ιδανική ράβδο, πρέπει να ληφθεί υπόψη [3].

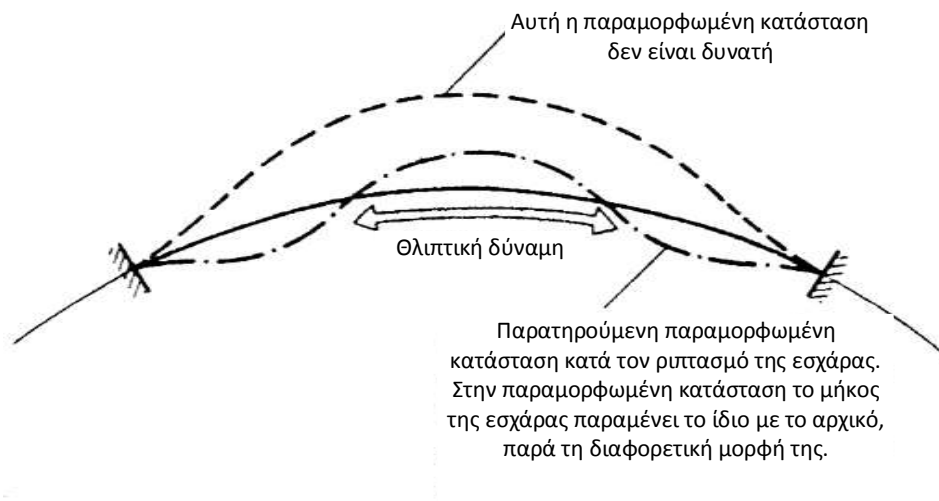


Σχήμα 4.7

Αύξηση της πλευρικής αντίστασης σε σχέση με την αύξηση της εγκάρσιας μετατόπισης

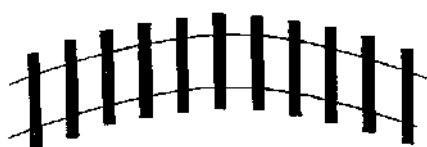
Πηγή [3]

- Άλλη μία διαφορά της πραγματικότητας από την ιδεατή ράβδο, είναι το γεγονός ότι στην εσχάρα δεν μεταφέρονται κατά μήκος δυνάμεις από τη μια σιδηροτροχιά στην άλλη. Εάν όλη η εσχάρα κάμπτεται από κατά μήκος δυνάμεις στο οριζόντιο επίπεδο, αυτό ποτέ δεν συμβαίνει με διαφορετικές αλλαγές μήκους των σιδηροτροχιών. Δηλαδή, η εσχάρα υπό τη δράση θλιπτικών δυνάμεων δεν μπορεί να μετατοπιστεί στο οριζόντιο επίπεδο λαμβάνοντας το σχήμα ενός τόξου δεδομένης ακτίνας. Και αυτό διότι στην νέα παραμορφωμένη κατάσταση οι δύο σιδηροτροχιές θα είχαν διαφορετικές επιμηκύνσεις, πράγμα άτοπο. Έτσι η πραγματική παραμορφωμένη κατάσταση είναι ένας ημιτονοειδής κυματισμός [3] (Σχήμα 4.8).

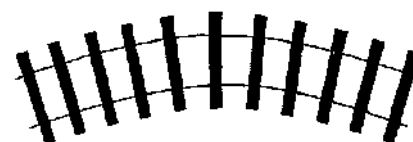


Σχήμα 4.8
Λυγισμός εσχάρας σε καμπύλη
Πηγή [3]

- Μία ακόμα διαφοροποίηση από την ιδεατή ράβδο είναι το γεγονός ότι ο υπολογισμός της κρίσιμης θλιπτικής δύναμης Euler γίνεται για μία ευθύγραμμη ράβδο. Αυτή η παραδοχή όμως δεν ισχύει απόλυτα ούτε καν για μία ευθύγραμμη εσχάρα. Ακόμα και σε μία καινούρια στρωμένη γραμμή η ύπαρξη μικρών σφαλμάτων τοποθέτησης είναι δεδομένη, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται αποκλίσεις κατά τον υπολογισμό την κρίσιμης δύναμης λυγισμού Euler [3].
- Τέλος, να σημειωθεί ότι η τιμή της IPA δεν είναι σταθερή κατά το λυγισμό, διότι οι στρωτήρες ούτε παραμένουν παράλληλοι μεταξύ τους (Σχήμα 4.9.α), αλλά ούτε και κάθετοι στις σιδηροτροχιές (Σχήμα 4.9.β). Αντίθετα λαμβάνουν μία ενδιάμεση θέση η οποία είναι διαφορετική για κάθε μετατόπιση της εσχάρας. Συνεπώς, για διαφορετικές μετατοπίσεις παρατηρούνται και διαφορετικές τιμές της IPA [6].



Σχήμα 4.9.α
Οι στρωτήρες παραμένουν
παράλληλοι μεταξύ τους
Πηγή [6]



Σχήμα 4.9.β
Οι στρωτήρες παραμένουν
κάθετοι στις σιδηροτροχιές
Πηγή [6]

Βέβαια, παρά όλες τις παραπάνω παραδοχές και απροσδιοριστίες που υπεισέρχονται στην κατανόηση και στον υπολογισμό της IPA, η γενική αρχή που ισχύει είναι ότι: *Μία εσχάρα με υψηλή εγκάρσια ροπή αδράνειας (IPA) έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή ευστάθεια, καθώς έχει αυξημένο μήκος λυγισμού, το οποίο συμβάλλει στον δυσχερέστατο ριπτασμό της εσχάρας* [6].

Τέλος, θα δοθούν κάποιες ενδεικτικές τιμές της IPA προκειμένου να φανεί μία γενική εικόνα της τάξης μεγέθους των τιμών της. Να σημειωθεί εδώ, ότι οι μεγάλες διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται, είναι απόρροια των παραπάνω παραδοχών και απλοποιήσεων και ειδικά της πρώτης, όπου διαφορετικός βαθμός σύσφιξης των συνδέσμων, έχει ως αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά όλης της εσχάρας.

Έτσι, σύμφωνα με τη μέθοδο του Meier, για ακτίνες $R \leq 400\text{m}$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση: $I_E = 2,5 \cdot 2 \cdot I_{y-y}$ (mm^4), όπου I_{y-y} η ροπή αδράνειας μιας ενιαίας σιδηροτροχιάς, ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Για μεγαλύτερες ακτίνες, ενδείκνυται η χρήση της θεωρίας του Chatkeo, όπου πρέπει να υπολογιστεί το μήκος κάμψης της εσχάρας [1]. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1) δίνεται η IPA I_E , για δύο από τους πιο συνήθεις τύπους σιδηροτροχιών.

A/A	Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας I_E (cm^4)		
Σύσφιξη συνδέσμου- σιδ/χιας- στρωτήρα	Τύπος επιδομής (σιδ/χιά, σύνδεσμος, στρωτήρας)		
	S 49 Σύνδεσμος K Ξύλινος στρωτήρας	UIC 60 Σύνδεσμος K Ξύλινος στρωτήρας	UIC 60 Σύνδεσμος W Μπετονένιος στρωτήρας
Χαλαρή	638	1026	1026
Ισχυρή	1100	1400	1400
Άκαμπτη	1600	2600	2600

Πίνακας 4.1
Τιμές Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας
για τρεις τύπους επιδομής
Πηγή [1,5]

4.1.2. Παράμετροι που επηρεάζουν την Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας I_E

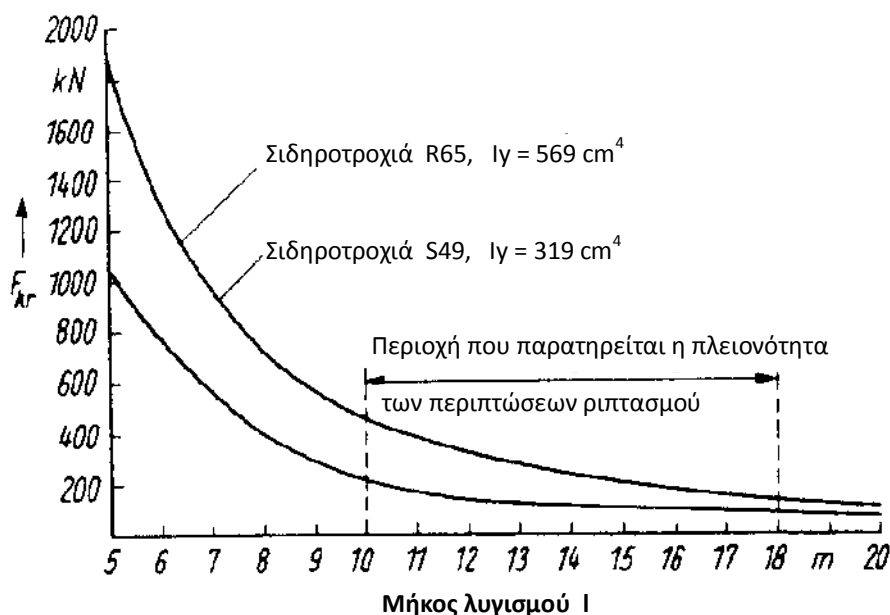
Αφού αναλύθηκε η έννοια της IPA, τώρα θα εξετασθούν αναλυτικά οι παράμετροι που την επηρεάζουν και καθορίζουν την τιμή της. Ονομαστικά είναι οι ακόλουθοι:

- Τύπος σιδηροτροχιάς
- Είδος συνδέσμων και βαθμός σύσφιξής τους
- Απόσταση των στρωτήρων

4.1.2.1. Τύπος σιδηροτροχιάς

Στην έννοια «τύπος της σιδηροτροχιάς» περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα στοιχεία τα οποία τη χαρακτηρίζουν, όπως διαστάσεις, εμβαδόν, ροπές αδράνειας, ροπές αντίστασης κ.τ.λ. Αυτά τα στοιχεία είναι αποτέλεσμα του τρόπου κατασκευής της σιδηροτροχιάς και δίνονται έτοιμα σε πίνακες από τον εκάστοτε κατασκευαστή (π.χ. Voest – Alpine).

Τα χαρακτηριστικά της σιδηροτροχιάς που μας ενδιαφέρουν κυρίως, στην εύρεση της IPA της εσχάρας, είναι το εμβαδόν της διατομής της σιδηροτροχιάς και η ροπή αδράνειάς της, ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4.1), θεωρώντας την εσχάρα ως μία και μόνο ελαστική, ιδεατή ράβδο, τότε η αποφασιστικής σημασίας επιρροή της καμπτικής δυσκαμψίας $E \cdot I_y$ ή $E \cdot I_x$ είναι ξεκάθαρη [3] (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10

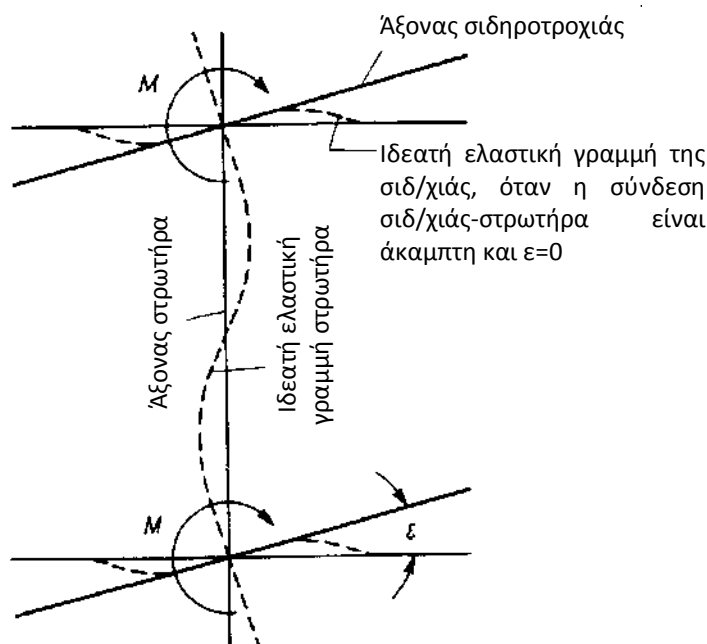
Κρίσιμη δύναμη λυγισμού F_{kr} αγνοώντας αντιστάσεις στην εσχάρα
Πηγή [3]

4.1.2.2. Είδος συνδέσμων και βαθμός σύσφιξής τους

Η στροφή μιας σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα, εμποδίζεται κυρίως από τη στρεπτική δυσκαμψία των συνδέσμων. Τυπικοί σύνδεσμοι, που ασφαλίζουν τη σιδηροτροχιά στο στρωτήρα, προσφέρουν αυξημένη στρεπτική αντίσταση της εσχάρας. Εν γένει, όταν παρατηρούνται μικρές στροφές, η IPA της εσχάρας είναι ελάχιστα αυξημένη, σε σχέση με τη συνολική ροπή αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών. Καθώς, όμως, οι στροφές αυξάνονται, η IPA αυξάνει και αυτή και μπορεί μέχρι και να 15πλασιαστεί. Σύνδεσμοι που προσφέρουν μεγάλη

δυστρεψία, πλεονεκτούν έναντι εκείνων που προσφέρουν μικρή, καθώς αυξάνουν το μήκος λυγισμού κατά Euler και έτσι καθιστούν την εσχάρα πιο δύσκαμπτη σε λυγισμό [6].

Συνεπώς, το είδος των συνδέσμων που υπάρχουν σε μία εσχάρα, αλλά και ο βαθμός σύσφιξής τους, είναι ίσως ο κυριότερος παράγοντας επιρροής της IPA. Όπως θα φανεί και παρακάτω, οι σύνδεσμοι μπορούν να αλλάξουν εντελώς τη συμπεριφορά μιας εσχάρας και μπορούν να πολλαπλασιάσουν τη δυσκαμψία της, σε κάμψη επί του οριζοντίου επιπέδου. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα 4.11, όπου φαίνεται η παραμορφωμένη εκ κάμψης κατάσταση, ενός στρωτήρα και δύο σιδηροτροχιών. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η ιδεατή ελαστική γραμμή – παραμόρφωση που παρατηρείται σε πλήρως άκαμπτη εσχάρα (φορέας Vierendeel)– και με συνεχή γραμμή φαίνεται η πραγματική παραμόρφωση –για μερική σύσφιξη των συνδέσμων– [3]. Η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων είναι προφανής.



Σχήμα 4.11
Στροφή μεταξύ σιδ/χιάς και στρωτήρα
Πηγή [3]

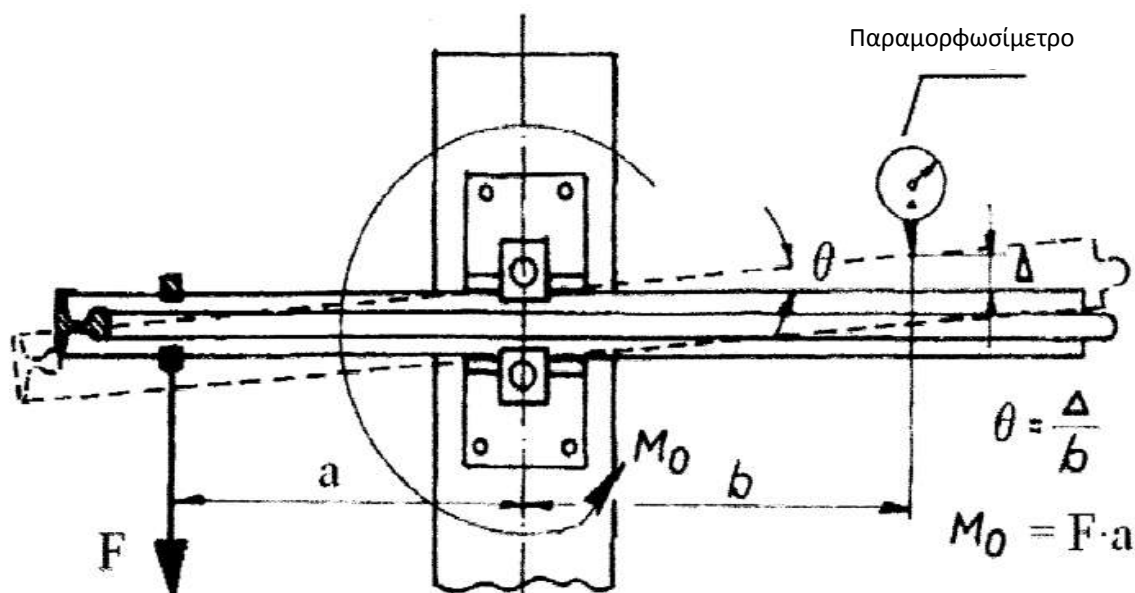
Τώρα, όσον αφορά ολόκληρη την εσχάρα, από το σχήμα 4.4 φαίνεται ξεκάθαρα ότι μία μετατόπισή της στο οριζόντιο επίπεδο, συνεπάγεται τη δημιουργία γωνιών στροφής μεταξύ των αξόνων των στρωτήρων και των σιδηροτροχιών. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέχρι την υπερνίκηση της στρεπτικής αντίστασης, η οποία επηρεάζεται από το είδος της πλευρικής εξασφάλισης της εσχάρας. Έτσι, η στρεπτική δυσκαμψία όλων των συνδέσμων μαζί με την καμπτική δυσκαμψία των δύο σιδηροτροχιών, συνθέτουν τη συνολική δυσκαμψία

της εσχάρας. Το μέγεθος της στρεπτικής δυσκαμψίας μπορεί να καθοριστεί εργαστηριακά.

Στο πλέον συνηθισμένο πείραμα, ένας στρωτήρας συνδέεται ισχυρά με μία σιδηροτροχιά μικρού μήκους. Εν συνεχεία, η σιδηροτροχιά φορτίζεται σταδιακά με ένα σημειακό φορτίο F , εγκάρσια στον κατά μήκος της άξονα, σε απόσταση a από τον άξονα του συνδέσμου και μετράται η παρατηρούμενη γωνία στροφής θ . Η μέγιστη γωνία στροφής που προκαλείται είναι περίπου $1^\circ - 1,5^\circ$. Ένα παραμορφωσίμετρο βρίσκεται σε απόσταση b από τον άξονα του συνδέσμου και μετρά την μετατόπιση Δ της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 4.12). Το πείραμα αυτό, έχει τυποποιηθεί και περιγράφεται αναλυτικά στο European Standard DIN EN 13146-2.

Οι εξισώσεις για την εύρεση της στρεπτικής ροπής που αναπτύσσει ο σύνδεσμος είναι:

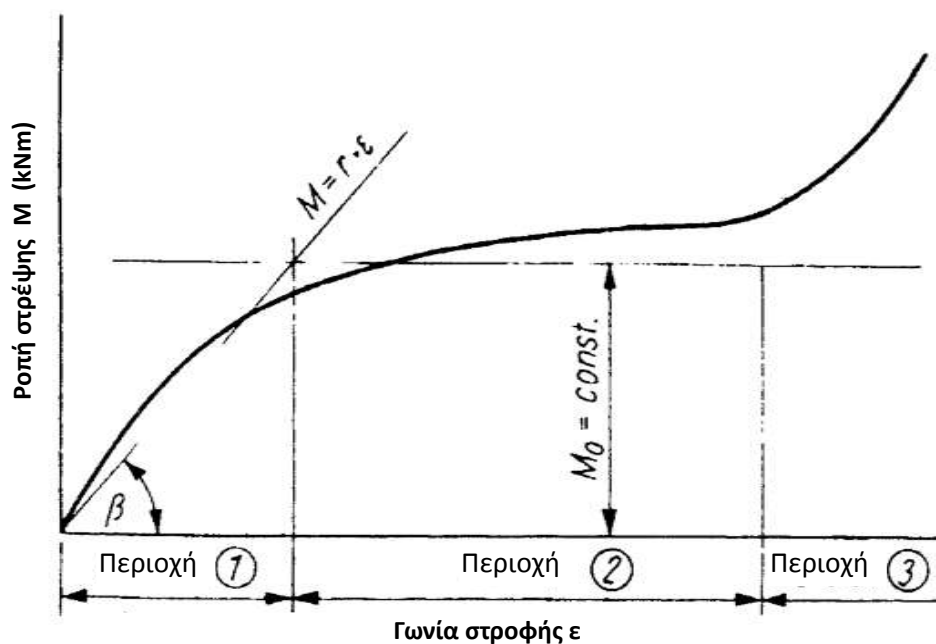
$$\theta = \Delta/b \text{ και } M_o = F \cdot a$$



Σχήμα 4.12

Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό
της στρεπτικής αντίστασης συνδέσμου
Πηγή [7]

Για κάθε παρατηρούμενη γωνία σημειώνεται και η αναπτυσσόμενη ροπή στο σύνδεσμο. Έτσι, μπορούμε να βρούμε τη σχέση μεταξύ της γωνίας στροφής και της αναπτυσσόμενης ροπής, για διάφορες τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου. Το διάγραμμα ροπής στρέψης (M_o) – γωνίας στροφής (θ), καλείται χαρακτηριστική καμπύλη του συνδέσμου και μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, αναλόγως τη σχετική θέση της σιδηροτροχιάς ως προς το σύνδεσμο [7]. Αυτή η παράμετρος θα εξετασθεί στη συνέχεια. Στη γενική του, πάντως, μορφή η χαρακτηριστική καμπύλη έχει την παρακάτω μορφή (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13
Διάγραμμα ροπής στρέψης – γωνίας στρόφης
Πηγή [3]

Στο παραπάνω διάγραμμα, σχηματίζονται τρεις χαρακτηριστικές περιοχές.

- **Περιοχή 1**

Στην περιοχή των μικρών γωνιών στρόφης (Περιοχή 1), η αναπτυσσόμενη ροπή είναι γραμμική συνάρτηση της γωνίας στρόφης. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει:

$$M = r \cdot \epsilon$$

όπου τα β και r (βλ. Σχήμα 4.12) είναι σταθερά και εξαρτώνται από την επιδομή.

- **Περιοχή 2**

Για μεγαλύτερες γωνίες ϵ , η αναπτυσσόμενη ροπή M μπορεί να θεωρηθεί με αρκετή ακρίβεια σταθερή (Περιοχή 2):

$$M = M_0 = \text{σταθερή}$$

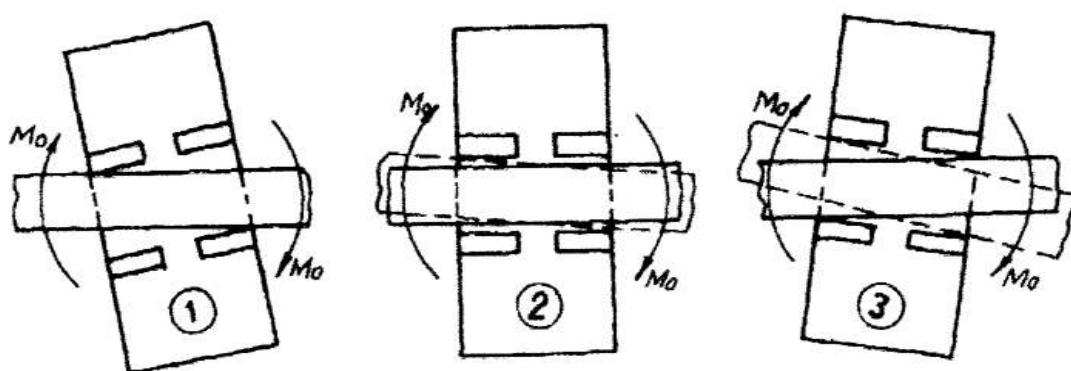
- **Περιοχή 3**

Αυξάνοντας τη γωνία στρόφης ακόμα παραπάνω από τη Περιοχή 2, η σιδηροτροχιά ακινητοποιείται μεταξύ των πλευρών των πλακών βάσης και έτσι η στρεπτική ροπή αυξάνεται ραγδαία (Περιοχή 3).

Γενικότερα, η εξίσωση $M = f(\varepsilon)$ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα εξής [3]:

- Επιδομή
- Σταθερότητα των στοιχείων της επιδομής
- Δράση των μέσων σύνδεσης
- Κατάσταση της γραμμής

Όπως προαναφέρθηκε, η χαρακτηριστική καμπύλη του συνδέσμου μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, αναλόγως τη σχετική θέση της σιδηροτροχιάς ως προς το σύνδεσμο. Πιο αναλυτικά, η σιδηροτροχιά μπορεί να λάβει τρεις πιθανές τέτοιες θέσεις (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14

Οι τρεις πιθανές σχετικές θέσεις της σιδ/χιάς
ως προς τη βάση του συνδέσμου

Πηγή [8]

• Σχετική θέση 1

Εάν η σιδηροτροχιά είναι πλάγια τοποθετημένη (Σχήμα 4.14.1), τότε ανάμεσα σ' αυτήν και στις πλευρές του συνδέσμου δεν υπάρχουν καθόλου κενά. Έτσι, υπάρχει επαφή μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων (όπως για παράδειγμα μία έμμεση σύνδεση τύπου K), με αποτέλεσμα ο σύνδεσμος να εμποδίζει τη στροφή της σιδηροτροχιάς, έως ότου επέλθει η αστοχία των στοιχείων του συνδέσμου (πλευρές, βάση, κ.τ.λ.). Σε αυτήν την περίπτωση η χαρακτηριστική καμπύλη είναι γραμμική [7] (Σχήμα 4.15.1).

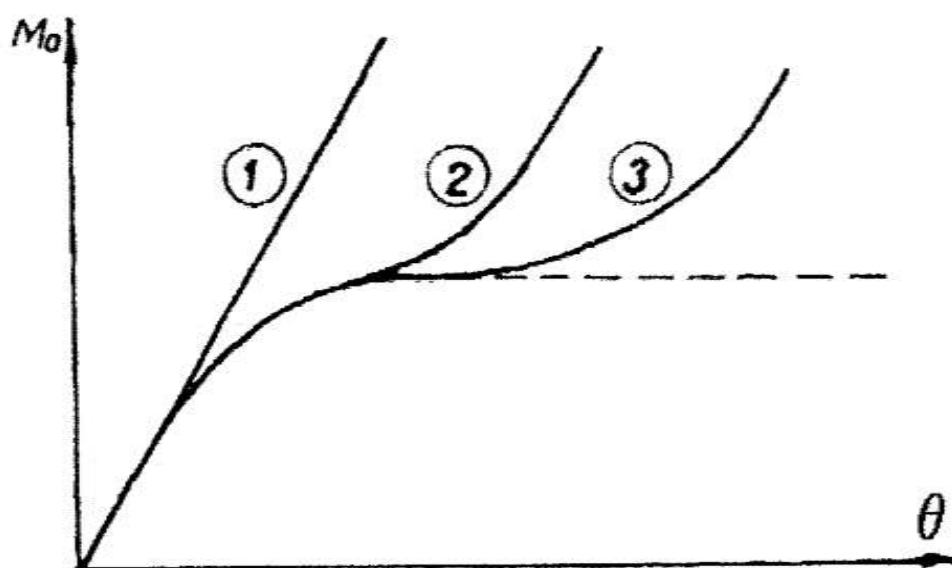
• Σχετική θέση 2

Εάν η σιδηροτροχιά είναι σε κανονική θέση ως προς το σύνδεσμο (Σχήμα 4.14.2), τότε ανάμεσα σ' αυτήν και στις πλευρές του συνδέσμου υπάρχουν ίσα κενά και από τις δύο μεριές. Για μικρές στροφές ενεργοποιείται η στρεπτική αντίσταση λόγω τριβών, τόσο μεταξύ της βάσης της σιδηροτροχιάς και της βάσης του συνδέσμου, όσο και μεταξύ της πρώτης και του ίδιου του συνδέσμου. Έτσι, η

καμπύλη είναι περίπου γραμμική. Όταν, όμως, οι παραπάνω αντιστάσεις υπερνικηθούν, τότε προκύπτουν μεγάλες στροφές για μικρές αυξήσεις της στρεπτικής ροπής, μέχρι τα κενά μεταξύ της σιδηροτροχιάς και των πλευρών του συνδέσμου μηδενιστούν. Για αυτό το στάδιο, η χαρακτηριστική καμπύλη είναι περίπου σταθερή (οριζόντια). Στη συνέχεια, και αφού η σιδηροτροχιά σταθεροποιηθεί από τις πλευρές του συνδέσμου, η στροφή θα περιορίζεται έως ότου επέλθει η αστοχία των στοιχείων του συνδέσμου (πλευρές, βάση, κ.τ.λ.). Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη θα είναι και πάλι γραμμική. Συνολικά, λοιπόν, η χαρακτηριστική καμπύλη θα έχει τρεις κλάδους. Αρχικά γραμμικό, στη συνέχεια σταθερό και μετά πάλι γραμμικό [7] (Σχήμα 4.15.2).

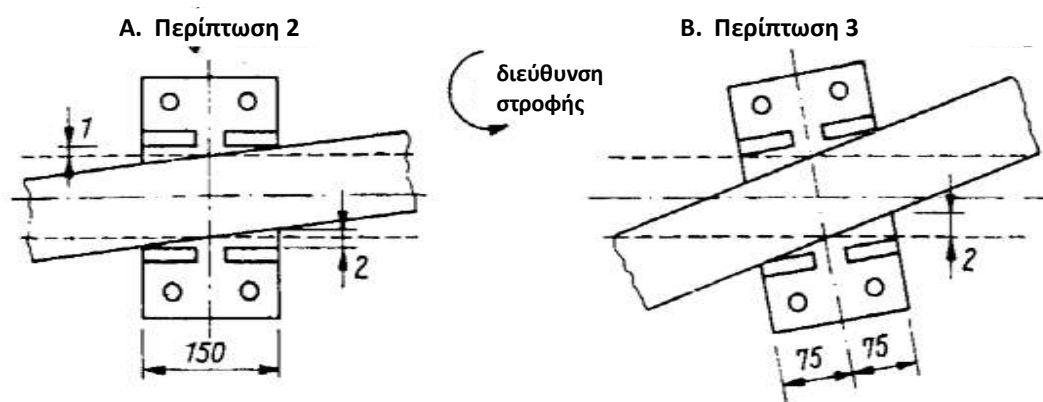
• Σχετική θέση 3

Το μέγεθος του κλάδου, όπου η ροπή στρέψης παραμένει σταθερή, εξαρτάται από το μέγεθος των κενών μεταξύ της σιδηροτροχιάς και των πλευρών του συνδέσμου. Συνεπώς, εάν η στροφή της σιδηροτροχιάς την οδηγεί από την πλάγια στην κανονική θέση, τότε ο κλάδος αποκτά το μέγιστο «μήκος» για την περίπτωση που η σιδηροτροχιά βρίσκεται στην αντίθετη θέση από την περίπτωση 1. Δηλαδή, η σιδηροτροχιά εφάπτεται σε εκείνες τις πλευρές του συνδέσμου, οι οποίες δεν μπορούν να εμποδίσουν άμεσα τη στροφή της (Σχήμα 4.14.3). Σε αυτήν την περίπτωση η χαρακτηριστική καμπύλη του συνδέσμου είναι παρόμοια με τη μορφή της περίπτωσης 2, απλά με επιμηκυμένο τον σταθερό κλάδο [7] (Σχήμα 4.15.3).



Σχήμα 4.15
Χαρακτηριστική καμπύλη συνδέσμου
για τρεις σχετικές θέσεις σιδ/χιάς - στρωτήρα
Πηγή [8]

Για να γίνει πιο αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο, η περίπτωση 3 έχει πιο επιμηκυμένο οριζόντιο κλάδο από την περίπτωση 2, παραθέτουμε το ακόλουθο αριθμητικό παράδειγμα [3] (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.16
Γωνία στροφής της σιδηροτροχιάς
ως προς τη βάση του υποθέματος
Πηγή [3]

Από το παραπάνω σχήμα, για τις περιπτώσεις 2 και 3 του σχήματος 4.13, η ανηγμένη γωνία στροφής της σιδηροτροχιάς ως προς τη βάση του συνδέσμου (υποθέματος) είναι:

- Περίπτωση 2 (Σχετική θέση 2)

$$\varepsilon_{\max} = 2/150 = 13 \cdot 10^{-3}$$

- Περίπτωση 3 (Σχετική θέση 3)

$$\varepsilon_{\max} = 2/75 = 26 \cdot 10^{-3}$$

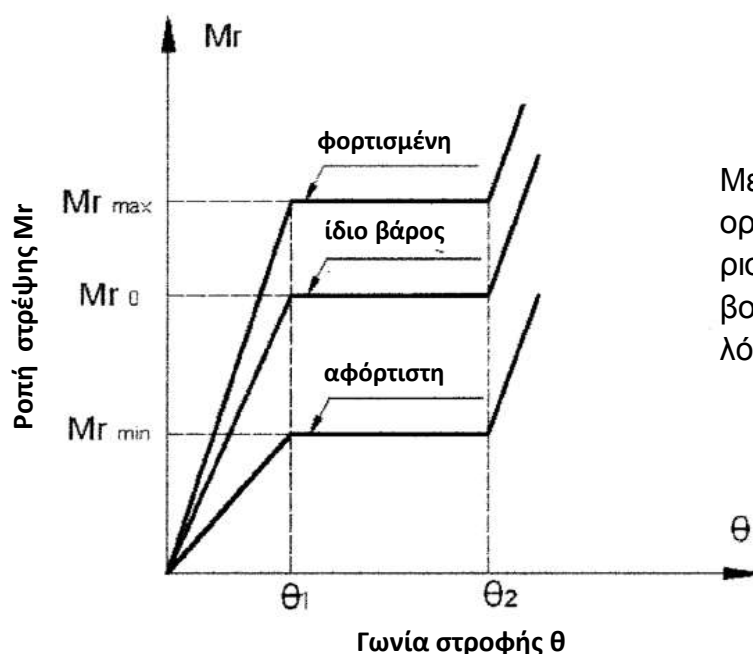
Έτσι, αποδεικνύεται ότι η σχετική θέση 3 μπορεί να αναπτύξει στροφές διπλάσιες της σχετικής θέσης 2, πράγμα που δικαιολογεί την επιμήκυνση του οριζόντιου κλάδου της σχετικής θέσης 3.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθούν τρεις παρατηρήσεις πάνω στο διάγραμμα ροπής στρέψης – γωνιάς στροφής (Σχήμα 4.13).

- ✓ Πρώτον, η αρχική στροφή της σιδηροτροχιάς σε σχέση με τη βάση του συνδέσμου επηρεάζει άμεσα την μετάβαση από την Περιοχή 2 στην Περιοχή 3. Αυτό είναι άμεσο αποτέλεσμα των κατασκευαστικών συνθηκών της εσχάρας και μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό από το παραπάνω αριθμητικό παράδειγμα (η αρχική γωνία στροφής καθορίζει το μήκος του οριζόντιου κλάδου).

- ✓ Δεύτερον, εάν η σιδηροτροχιά «μπει» στην Περιοχή 3, τότε θα προκύψουν τέτοιες στροφές, ώστε επέρχεται ριπτασμός. Αυτό το συμπέρασμα είναι καθαρά εμπειρικό, ύστερα από παρατηρήσεις πολλών περιπτώσεων ριπτασμού.
- ✓ Τρίτον, η περιοχή 1 χρησιμοποιείται από την επιπλέον μετατόπιση της εσχάρας λόγω της κυκλοφορίας, και έτσι ουσιαστικά η περιοχή πρακτικής μελέτης είναι η περιοχή 2 [3].

Πέρα από το μήκος του οριζόντιου κλάδου, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει και η τιμή του. Η τιμή της στρεπτικής αντίστασης M_0 , για την οποία η χαρακτηριστική καμπύλη του συνδέσμου είναι σταθερή, εξαρτάται από την κατακόρυφη δύναμη με την οποία ο σύνδεσμος πιέζει το πέλμα της σιδηροτροχιάς πάνω στη βάση του, μέσω των στοιχείων του. Αυτή η δύναμη είναι ευθέως ανάλογη με το μέγεθος της κατακόρυφης δύναμης σύσφιξης [7]. Παράδειγμα αυτής της περίπτωσης, είναι η κατακόρυφη δύναμη που μεταφέρεται στη σιδηροτροχιά και στο σύνδεσμο, κατά τη διέλευση ενός συρμού. Πιο συγκεκριμένα, το βάρος του συρμού κατανέμεται στους άξονες και στους τροχούς του, και εν συνεχεία περνά στις σιδηροτροχιές. Αυτή η πρόσθετη κατακόρυφη δύναμη αυξάνει την τριβή μεταξύ του πέλματος της σιδηροτροχιάς και της βάσης του συνδέσμου, γεγονός που καταλήγει στην αύξηση της τιμής του σταθερού κλάδου της χαρακτηριστικής καμπύλης (Σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17
Μεταβολή της τιμής του οριζόντιου κλάδου της χαρακτηριστικής καμπύλης για μεταβολή της κατακόρυφης επιβαλλόμενης (στη σιδ/χιά) δύναμης
Πηγή [7]

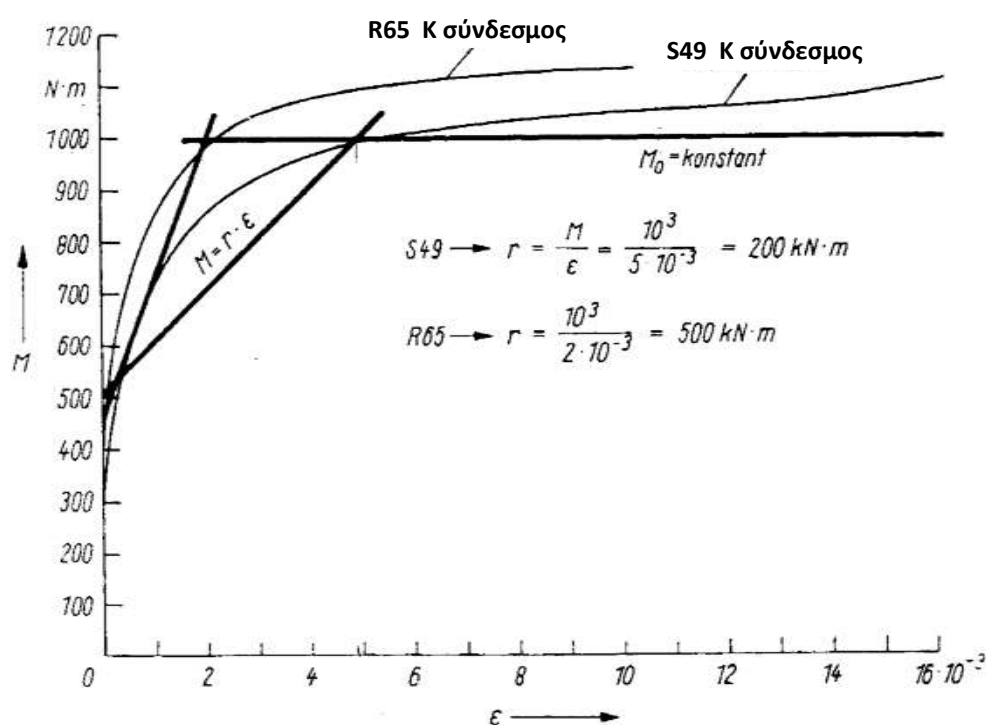
Οι κανονισμοί και κάποιοι συγγραφείς, θεωρούν μία γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη του συνδέσμου, η οποία προκύπτει με γραμμικοποίηση του πρώτου κλάδου της πειραματικής χαρακτηριστικής καμπύλης. Ο λόγος για αυτήν την υπόθεση, είναι το γεγονός, ότι για τις επιτρεπόμενες τιμές της απόκλισης, η

στροφή της σιδηροτροχιάς δεν ξεπερνά τις χαρακτηριστικές τιμές του πρώτου κλάδου της πειραματικής χαρακτηριστικής καμπύλης [7].

Αφού έχουν αναλυθεί και διερευνηθεί όλες οι παράμετροι, με τις οποίες οι σύνδεσμοι και ο βαθμός σύσφιξής τους, επηρεάζουν την IPA μιας εσχάρας, μπορούν πλέον, να παρουσιαστούν κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες συνδέσμων, που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

❖ Γερμανικοί σιδηρόδρομοι

Η χαρακτηριστική καμπύλη για δύο διαδεδομένους τύπους σιδηροτροχιάς (S49 και R65) και για K τύπο συνδέσμου είναι:



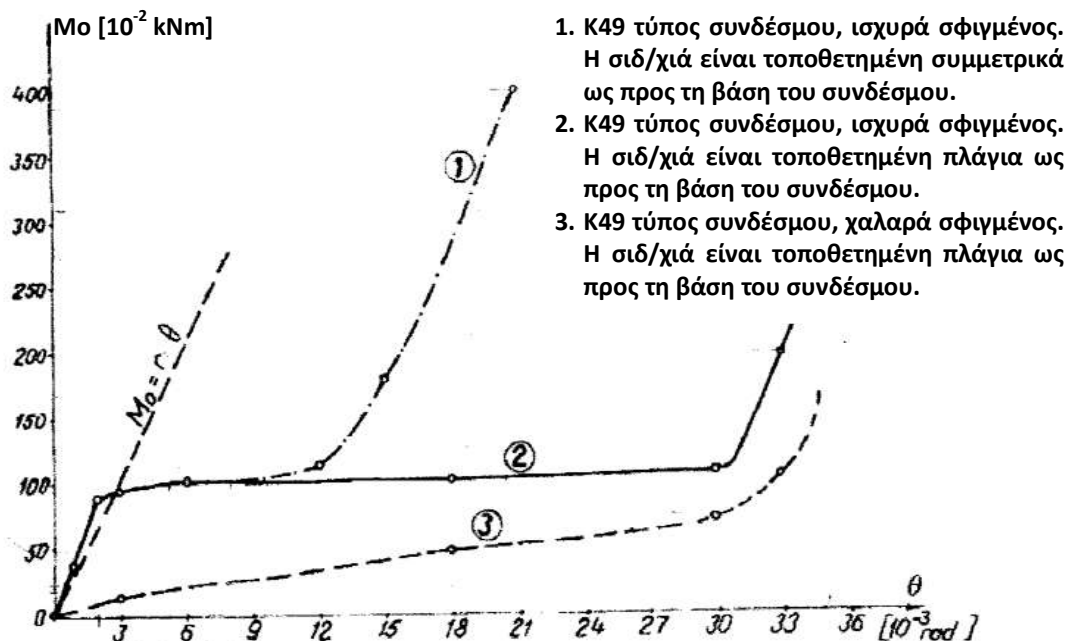
Σχήμα 4.18
Διάγραμμα στρεπτικής αντίστασης
Πηγή [3]

Στο παραπάνω διάγραμμα τα σημεία όπου οι δύο ευθείες $M = r \cdot \epsilon$ τέμνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες της R65 και της S49, σηματοδοτούν το τέλος της Περιοχής 1 και την έναρξη της Περιοχής 2.

Εάν σε ακραίες περιπτώσεις, δεν υπάρχουν άλλες μετρήσεις, τότε ως M_0 , με συνδέσμους K και με τη θεώρηση “μέσης” συντήρησης της εσχάρας, θεωρείται η τιμή 1.000Nm [3].

❖ Ρουμανικοί σιδηρόδρομοι

Για τον πιο διαδεδομένο τύπο συνδέσμου (Κ τύπος) που χρησιμοποιείται στη Ρουμανία, η πλέον κατάλληλη χαρακτηριστική καμπύλη, που περιγράφει πιστότερα τη συμπεριφορά του συνδέσμου, είναι τρι-γραμμική.



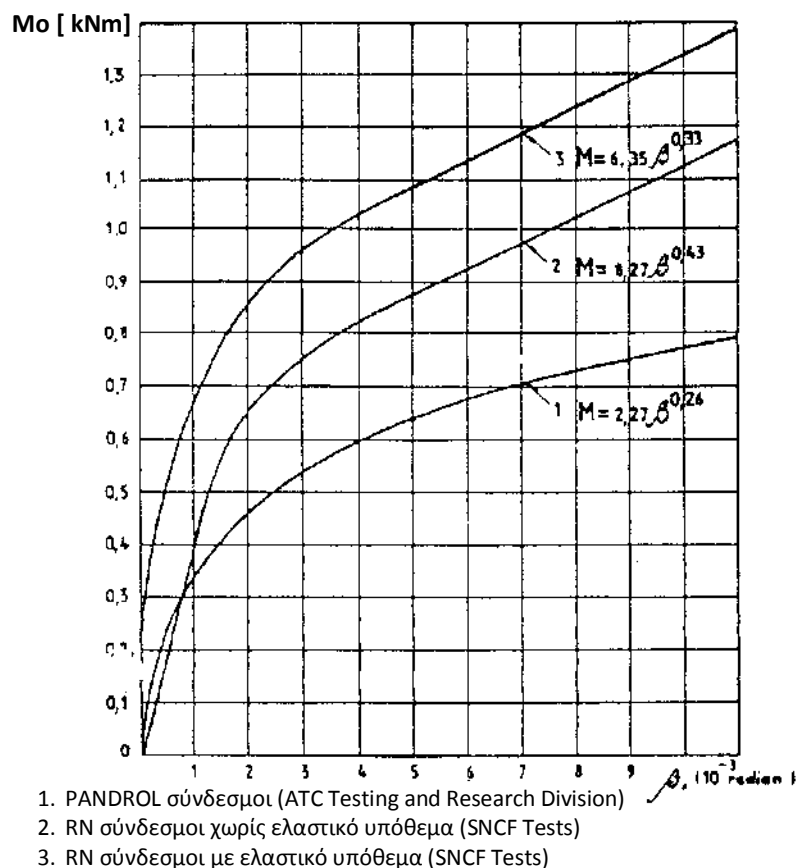
Σχήμα 4.19
Χαρακτηριστικές καμπύλες Κ49 επιδομής
Πηγή [7]

❖ Σιδηρόδρομοι του Κονγκό

Οι δύο ευρέως διαδεδομένοι τύποι συνδέσμων μετρικής γραμμής, που χρησιμοποιούνται στο Κονγκό είναι οι RN και οι PANDROL.

Τα κριτήρια για την εύρεση της στρεπτικής αντίστασης των δύο αυτών συνδέσμων, βασίζονται στη μέθοδο υπολογισμού της. Εδώ, η μέθοδος Prud'Homme και η μέθοδος Janin, θεωρούν δύο περιοχές: την ελαστική και την πλαστική. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες στο σχήμα 4.20, μπορούν και να προσεγγιστούν, από τη σχέση:

$$M = m\alpha\beta^k ; k < 1$$



Σχήμα 4.20
 Στρεπτική αντίσταση των στρωτήρων
 (χαρακτηριστική καμπύλη)
 Πηγή [9]

4.1.2.3. Απόσταση των στρωτήρων

Η απόσταση των στρωτήρων είναι η τελευταία παράμετρος που επηρεάζει την IPA της εσχάρας. Ωστόσο, η παράμετρος αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως «έμμεση», αφού δεν είναι η ίδια που επηρεάζει άμεσα την IPA της εσχάρας.

Πιο συγκεκριμένα, μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των στρωτήρων, έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη περισσότερων συνδέσμων στο ίδιο μήκος εσχάρας. Αυτό με την σειρά του, αυξάνει την επιρροή των συνδέσμων και όλων των μηχανισμών που αναφέραμε παραπάνω, στην εσχάρα, καταλήγοντας στην αύξηση της IPA της. Με το ίδιο σκεπτικό, μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των στρωτήρων, οδηγούν στη μείωση της IPA της εσχάρας.

4.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Αφού εξετάσθηκε η έννοια της IPA μιας εσχάρας, η σημασία της στην ευστάθεια της ίδιας της εσχάρας, καθώς επίσης και οι παράμετροι που την επηρεάζουν και καθορίζουν την τιμή της, μπορούν πλέον να αναλυθούν οι μέθοδοι υπολογισμού της.

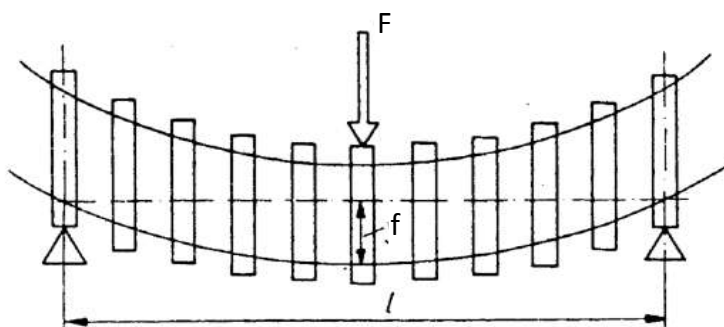
Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι πειραματική και θα αναλυθεί παρακάτω. Κύριο μειονέκτημά της είναι η απαίτηση ειδικού εξοπλισμού, χώρου και μεγάλου κόστους για την διεξαγωγή του πειράματος. Έτσι, στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, γίνεται προσπάθεια εύρεσης μεθόδων υπολογισμού, οι οποίες είναι θεωρητικές, δεν εμπεριέχουν εκτενή χρήση πειραμάτων και πόρων και οι οποίες να είναι αρκετά ακριβείς, ώστε να μπορούν να υιοθετηθούν για έναν αδρό ή και λεπτομερή υπολογισμό της IPA μιας οποιαδήποτε εσχάρας. Αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας είναι: η εύρεση μίας γεωμετρικής μεθόδου υπολογισμού, η οποία όπως θα αναλυθεί είναι πεπερασμένης χρήσης, και η εύρεση μιας μεθόδου υπολογισμού με τάσεις, η οποία αποδεικνύεται πολύ ακριβής.

Έτσι, συνολικά οι μέθοδοι που θα παρουσιάσουμε είναι:

- Πειραματική μέθοδος
- Γεωμετρική μέθοδος
- Μέθοδος των τάσεων

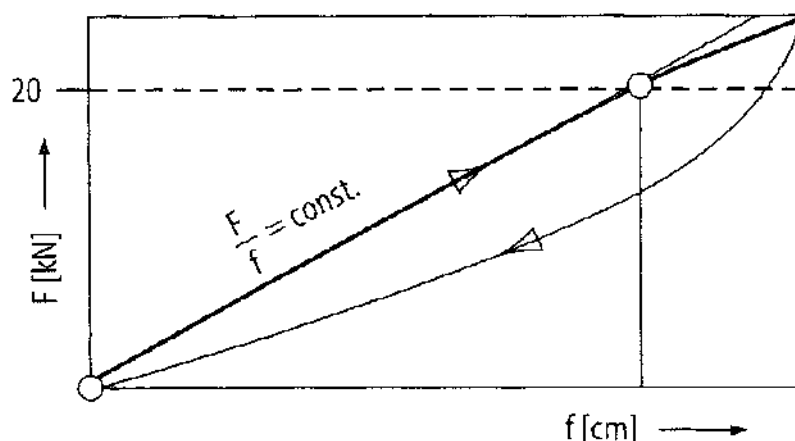
4.2.1. Πειραματική Μέθοδος

Η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας I_E , προσδιορίζεται πειραματικά, με μία εσχάρα μήκους τουλάχιστον 11 στρωτήρων (περίπου 6,30m), η οποία καταπονείται στο οριζόντιο επίπεδο με ένα φορτίο F περίπου 20 kN (Σχήμα 4.21). Για την εγκυρότητα του πειράματος, ο λόγος της επιβαλλόμενης δύναμης F προς το βέλος κάμψης f της εσχάρας, στο μέσο της, θα πρέπει να είναι σταθερός (Σχήμα 4.22). Κατά την κάμψη της εσχάρας δημιουργούνται στροφές μεταξύ των στρωτήρων και των σιδηροτροχιών που, με τη σειρά τους, προκαλούν τη δημιουργία στρεπτικών ροπών στους συνδέσμους (Σχήμα 4.23).

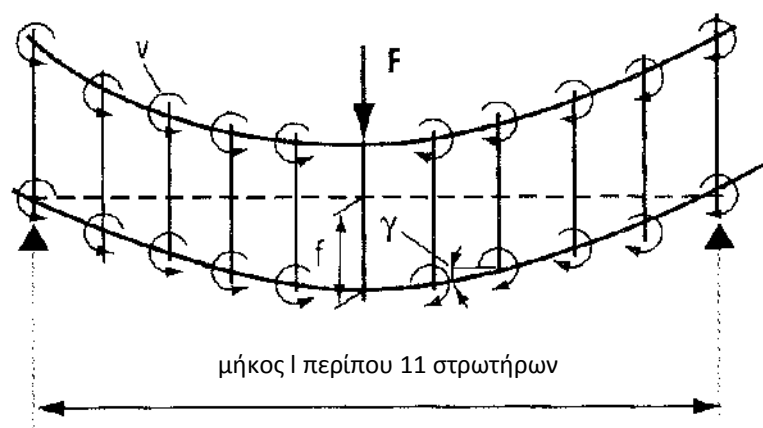


Σχήμα 4.21

Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας εσχάρας
Πηγή [3]



Σχήμα 4.22
Διάγραμμα Φορτίου (F) – Βέλους κάμψης (f)
κατά την κάμψη της εσχάρας
Πηγή [10]



Σχήμα 4.23
Αναπτυσσόμενες στροφές και ροπές
κατά την κάμψη της εσχάρας
Πηγή [10]

Ο υπολογισμός της IPA είναι δυνατός, από τον γνωστό τύπο της Στατικής:

$$I_E = \frac{l^3}{48 \cdot E} \cdot \frac{F}{f} \text{ [cm}^4\text{]} \quad (4.2)$$

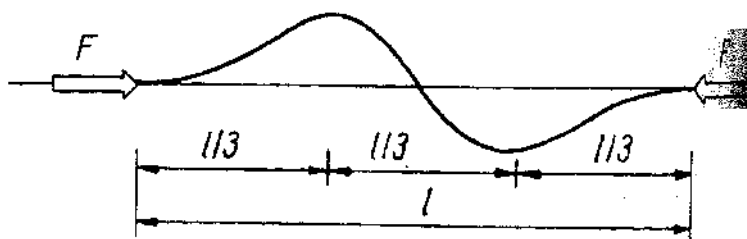
όπου:	I_E	Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας	(cm ⁴)
	F	Επιβαλλόμενο φορτίο επί της εσχάρας	(kN)
	l	Μήκος εσχάρας	(cm)

f	Βέλος κάμψης στο μέσο της εσχάρας	(cm)
E	Μέτρο ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς	(kN/cm ²)

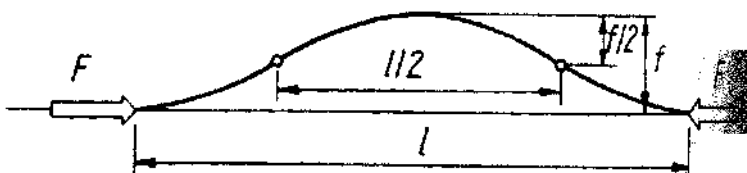
Η παραπάνω εξίσωση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι η σχέση μεταξύ των F , f και E είναι γνωστή. Σαν καθοδηγητική γραμμή για την Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας εσχάρας, ισχύει [3]:

για σύνδεσμο K και σιδ/χιά S 49 με κανονική σύσφιξη	$I=1350 \text{ cm}^4$
για σύνδεσμο K και σιδ/χιά S 49 με χαλαρότατη σύσφιξη	$I=638 \text{ cm}^4$
για σύνδεσμο K και σιδ/χιά R 65 με κανονική σύσφιξη	$I=1850 \text{ cm}^4$
για σύνδεσμο K και σιδ/χιά R 65 με χαλαρότατη σύσφιξη	$I=1138 \text{ cm}^4$

Παρόλο που η μορφή αστοχίας της εσχάρας και ο ριπτασμός της, μπορούν να έχουν ποικίλες μορφές, αυτή που εξετάζεται είναι μόνο η ημιτονοειδής μορφή σφάλματος (Σχήμα 4.24.α), η οποία απλοποιείται σε μία μορφή «μονόπλευρου κύματος» (Σχήμα 4.24.β).



Σχήμα 4.24.α
Ημιτονοειδής μορφή
κύματος λυγισμού
Πηγή [3]



Σχήμα 4.24.β
Απλοποιημένη μορφή
κύματος λυγισμού
Πηγή [3]

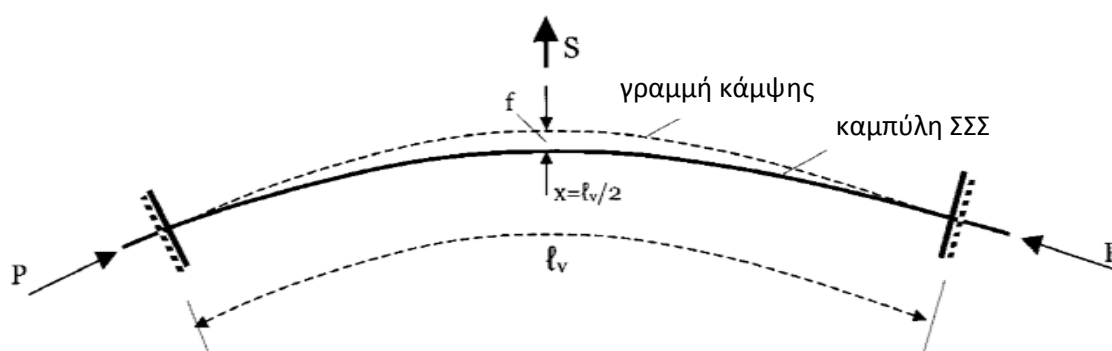
Η πρακτική σημασία της παραπάνω απλοποίησης είναι η εξής:

Στην πράξη, ο λυγισμός που συμβαίνει, έχει ένα μήκος κύματος ℓ περίπου 12 μέτρα, ενώ η μορφή του κύματος είναι ημιτονοειδής (Σχήμα 4.24.α). Αυτό το μήκος είναι αποτέλεσμα παρατηρήσεων, πραγματικών περιπτώσεων ριπτασμού. Απλοποιώντας, όμως, αυτή τη μορφή κύματος σε ένα «μονόπλευρο» κύμα (Σχήμα 4.24.β), μπορεί να εξετασθεί, πειραματικά στο εργαστήριο, μια εσχάρα μήκους, ίση με το μισό του πραγματικού μήκους κύματος (μήκος $\ell = 12\text{m}$), και να εξαχθούν τα ίδια αποτελέσματα. Γι αυτό το λόγο κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της IPA μιας εσχάρας, το απαιτούμενο μήκος της, είναι τα 6 περίπου μέτρα.

Βλέποντας το παραπάνω σχήμα και γνωρίζοντας ότι οι θλιπτικές κατά μήκος δυνάμεις είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο μία γραμμή οδηγείται στον ριπτασμό,

εύκολα αναρωτιέται κανείς γιατί κατά το πείραμα, η εσχάρα φορτίζεται με ένα σημειακό φορτίο εγκάρσια στον κατά μήκος της άξονα, και όχι με ένα ζεύγος θλιπτικών κατά μήκος δυνάμεων.

Η απάντηση βρίσκεται στη θεωρία της ενεργειακής μεθόδου του Meier. Επιγραμματικά, ο Meier θεωρεί ένα αρχικό υποθετικό σφάλμα στην οριζοντιογραφία της γραμμής, το οποίο προκύπτει κατά τη στρώση της γραμμής και βρίσκεται εντός των ορίων παραλαβής της. Αυτό το σφάλμα, μπορεί να εξελιχθεί κατά τη λειτουργία σε μεγαλύτερες τιμές. Η τιμή του υποθετικού σφάλματος, λαμβάνεται μέγιστα 20-25 cm. Έτσι, παρόλο, που μία εσχάρα μπορεί να φαίνεται ευθύγραμμη, στη πραγματικότητα εμπεριέχεται ένα οριζοντιογραφικό σφάλμα, που οδηγεί στην ελαφρά καμπύλωση της γραμμής. Αυτή η καμπύλωση έχει σαν αποτέλεσμα, οι κατά μήκος θλιπτικές δυνάμεις P που ασκούνται στη γραμμή, να μην είναι πλέον συνευθειακές. Αντίθετα, δημιουργείται μία γωνία μεταξύ τους, που οδηγεί στη εμφάνιση μίας εγκάρσιας σημειακής δύναμης S στο οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 4.25). Αυτή η δύναμη είναι η συνισταμένη των θλιπτικών δυνάμεων και είναι ακριβώς αυτή η δύναμη που οδηγεί τη γραμμή στο ριπτασμό. Γι αυτό το λόγο, λοιπόν, το πείραμα χρησιμοποιεί απευθείας μία εγκάρσια δύναμη και όχι κατά μήκος.



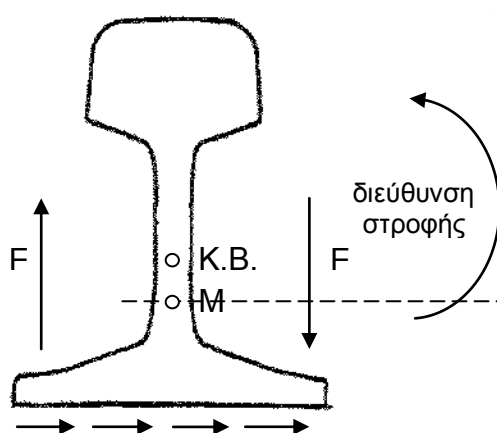
Σχήμα 4.25
Δυνάμεις στη ΣΣΣ σε καμπύλη
Πηγή [1]

Αυτή η ανάλυση, όμως, της εμφάνισης της εγκάρσιας δύναμης, μας οδηγεί σε ένα σχολιασμό της διαδικασίας που ακολουθείται κατά το πείραμα. Πιο συγκεκριμένα, τόσο στο Σχήμα 4.21, όσο και στο Σχήμα 4.23, παρατηρούμε ότι η εγκάρσια δύναμη ασκείται πάνω στο μεσαίο στρωτήρα. Αυτό, όμως, δεν συνάδει με την ανάλυση που έγινε παραπάνω, αφού η εγκάρσια δύναμη S , προκύπτει από τις κατά μήκος θλιπτικές δυνάμεις που ασκούνται στον κεντροβαρικό άξονα των σιδηροτροχιών. Έτσι, η συνισταμένη τους θα πρέπει να ασκείται και αυτή στο κέντρο βάρους της μεσαίας διατομής της κάθε σιδηροτροχιάς.

Αυτή η παρατήρηση, μπορεί να παίζει μεγάλο ρόλο στα εξαγόμενα αποτελέσματα, αφού η ροή των δυνάμεων στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις είναι τελείως διαφορετική.

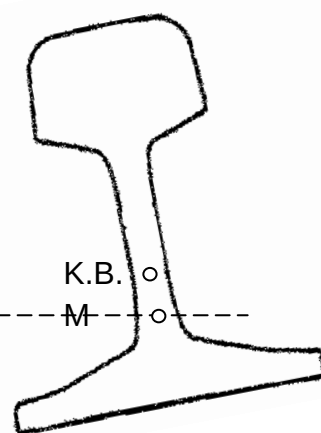
- Η δύναμη ασκείται στον στρωτήρα

Όταν η δύναμη S ασκείται στον στρωτήρα, τότε, η ένταση μεταφέρεται από τον στρωτήρα στις σιδηροτροχιές μέσω του πέλματος αυτών. Έτσι, προκαλείται διάτμηση, λόγω τριβής, μεταξύ του στρωτήρα και των σιδηροτροχιών, με αποτέλεσμα οι σιδηροτροχιές να φορτίζονται στο πέλμα τους και να αναπτύσσεται στροφή. Ως γνωστόν, η στροφή αυτή αναπτύσσεται περί το Κέντρο Διάτμησης M της σιδηροτροχιάς. Επίσης, υποθέτουμε ότι η κατεύθυνση της εγκάρσιας δύναμης, που ασκείται στην εσχάρα είναι οριζόντια και προς τα δεξιά και έτσι η στροφή της σιδηροτροχιάς έχει αντιωρολογιακή φορά (Σχήμα 4.26.α).



Σχήμα 4.26.α

Δυνάμεις ασκούμενες επί της σιδ/χιάς κατά τη μετάβαση διατμητικής δύναμης από το στρωτήρα στο πέλμα της σιδ/χιάς [Παρασκευάς Κ.]



Σχήμα 4.26.β

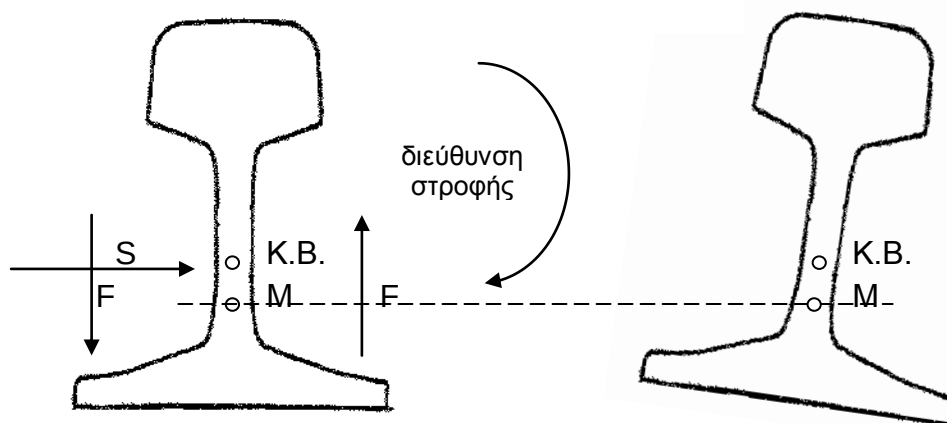
Στροφή της σιδ/χιάς απουσία συνδέσμων και στρωτήρων [Παρασκευάς Κ.]

Αυτή η στροφή, εμποδίζεται στην πράξη από την ύπαρξη των συνδέσμων και του ίδιου του στρωτήρα. Τα δύο αυτά στοιχεία της επιδομής, ασκούν ένα ζεύγος δυνάμεων F (Σχήμα 4.26.α), το οποίο αντιστέκεται στη στροφή που προκύπτει από τις διατμητικές δυνάμεις στο πέλμα της σιδηροτροχιάς. Σε περίπτωση που απουσιάζουν οι σύνδεσμοι και οι στρωτήρες, η σιδηροτροχιά θα ανέπτυξε μία αντιωρολογιακή στροφή περί το σημείο M (Σχήμα 4.26.β).

- Η δύναμη ασκείται στο Κέντρο Βάρους της σιδηροτροχιάς

Όταν η δύναμη S ασκείται απευθείας εγκάρσια στο κέντρο βάρους της σιδηροτροχιάς, τότε τα παρατηρούμενα φαινόμενα αλλάζουν άρδην. Πιο συγκεκριμένα, δεν παρατηρείται η ροή της δύναμης που υπήρχε στην προηγούμενη περίπτωση. Αντίθετα, η σιδηροτροχιά, κάμπτεται απευθείας από τη δύναμη που της ασκείται και όχι από διατμητικές δυνάμεις στη βάση της

(Σχήμα 4.27.α). Επίσης, επειδή το κέντρο βάρους της διατομής της σιδηροτροχιάς, βρίσκεται υψηλότερα από το κέντρο διάτμησης (βλ. Παράρτημα), παρατηρείται το φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και η αναπτυσσόμενη στροφή θα είναι ωρολογιακή (Σχήμα 4.27.β), αντίθετη δηλαδή από την προηγούμενη περίπτωση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι κατακόρυφες δυνάμεις F να αλλάζουν φορά και έτσι οι στρωτήρες και οι σύνδεσμοι να καταπονούνται διαφορετικά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 4.27.α

Δυνάμεις ασκούμενες επί της σιδ/χιάς κατά τη φόρτισή της με εγκάρσια δύναμη S επί του οριζοντίου επιπέδου στο κέντρο βάρους της [Παρασκευάς Κ.]

Σχήμα 4.27.β

Στροφή της σιδ/χιάς απουσία συνδέσμων και στρωτήρων [Παρασκευάς Κ.]

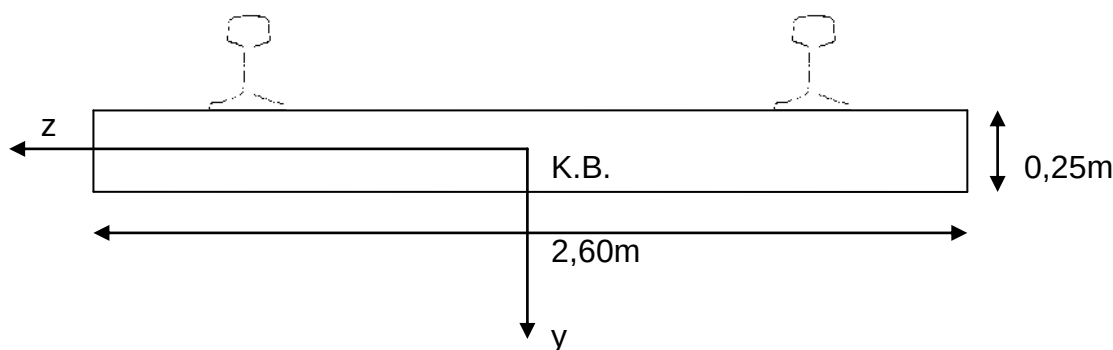
Ύστερα από τα παραπάνω, είναι προφανές, ότι η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της IPA μιας εσχάρας, έχει ορισμένες απροσδιοριστίες, οι οποίες δημιουργούν διαφορετική συμπεριφορά της εσχάρας από την πραγματική και μπορεί να καταλήγουν σε ελαφρά λάθος τιμές της IPA. Παρόλαυτά, οι τιμές που εξάγονται είναι αρκετά ακριβείς ώστε η παραπάνω πειραματική διαδικασία να χρησιμοποιείται κατά κόρον ως η κύρια μέθοδος προσδιορισμού της IPA μιας εσχάρας.

4.2.2. Γεωμετρική μέθοδος

Η γεωμετρική μέθοδος υπολογισμού, είναι η πρώτη μέθοδος που εξετάσθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τον προσδιορισμό της IPA μιας εσχάρας. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της μεθόδου αυτής είναι ο υπολογισμός της IPA, βάσει γεωμετρικών στοιχείων.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.4, όπου φαίνεται η κάμψη της εσχάρας κατά το λυγισμό της, λόγω θλιπτικών κατά μήκος δυνάμεων, η ροπή αδράνειας που καλούμαστε να υπολογίσουμε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- η διατομή, όπου υπολογίζεται η ροπή αδράνειας, προκύπτει από την τομή της εσχάρας με ένα κατακόρυφο επίπεδο που είναι κάθετο στον διαμήκη άξονά της (Σχήμα 4.28)
- ο άξονάς της είναι επί του παραπάνω επιπέδου και η διεύθυνσή του είναι προς τα κάτω. Βέβαια, η διεύθυνση του άξονα δεν έχει καμία σημασία στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά αναφέρεται για να συνάδει με τις συμβάσεις των κατασκευαστών των σιδηροτροχιών. Ονομάζουμε τον παραπάνω άξονα, άξονα $y-y$.



Σχήμα 4.28
Τομή της εσχάρας με το επίπεδο zy
[Παρασκευάς Κ.]

Σημειώνεται εδώ, ότι η παραπάνω τομή της εσχάρας, δεν είναι σταθερή καθόλο το μήκος της. Αντίθετα, στα σημεία όπου υπάρχει στρωτήρας η τομή είναι αυτή του Σχήματος 4.28, ενώ όπου απουσιάζει ο στρωτήρας η τομή αποτελείται απλά από τις δύο σιδηροτροχιές, στις αποστάσεις που φαίνονται παραπάνω.

Στις θέσεις όπου δεν έχουμε κάποιο στρωτήρα, τα πράγματα είναι απλά, καθώς η συνολική ροπή αδράνειας είναι το άθροισμα των ροπών αδράνειας των σιδηροτροχιών.

$$I_{yy \text{ tot}} = 2 \cdot I_{yy \text{ rail}} \quad (4.3)$$

όπου: $I_{yy \text{ tot}}$ η ροπή αδράνειας της εσχάρας κατά τον άξονα y
 $I_{yy \text{ rail}}$ η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς κατά τον άξονα y

$$I_{yy \text{ rail}} = \int z^2 dA \quad (4.4)$$

Η $I_{yy \text{ rail}}$, δίνεται από τους πίνακες των κατασκευαστών

Ο λόγος για τον οποίο δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί το θεώρημα Steiner, ως προς κάποιο σημείο είναι ο εξής: όπως προαναφέρθηκε, για να εξετασθεί η εσχάρα ευκολότερα, προσομοιάζεται με μία ελαστική, ιδεατή ράβδο (Σχήμα 4.1). Αυτή η ράβδος έχει ροπή αδράνειας ίση με την IP_A της εσχάρας. Συνεπώς, πρέπει σε αυτήν την ιδεατή ράβδο να συμπεριληφθεί το άθροισμα των ροπών αδράνειας των δύο

σιδηροτροχιών. Επιπλέον, στα σημεία όπου δεν υπάρχει κάποιος στρωτήρας, οι δύο σιδηροτροχιές κάμπτονται χωρίς η μία να επηρεάζει την άλλη, αφού δεν ενώνονται με κάποιο τρόπο μεταξύ τους. Έτσι, είναι λογικό, απλά να προστεθούν οι ροπές αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών χωρίς την εφαρμογή του θεωρήματος του Steiner.

Στις θέσεις, τώρα, που υπάρχει και στρωτήρας, τα πράγματα γίνονται πιο περίπλοκα, καθώς δεν είναι γνωστός ο βαθμός σύσφιξης των συνδέσμων, με αποτέλεσμα να μην είναι σίγουρο αν η διατομή μας μπορεί να θεωρηθεί μονολιθική (και ως εκ τούτου να εφαρμόσουμε τη θεωρήμα Steiner), ή αρθρωτή (κάθε τμήμα είναι ξεχωριστό από το άλλο και δεν μεταφέρονται ροπές μεταξύ τους). Για αρχή εξετάζεται η δεύτερη περίπτωση, κατά την οποία η IPA είναι σίγουρα μικρότερη απ'ότι στην πρώτη περίπτωση.

Όταν, λοιπόν, τα μέλη της εσχάρας ενώνονται αρθρωτά μεταξύ τους, τότε πάλι δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί το θεώρημα Steiner για να υπολογιστεί η IPA, αλλά απλή πρόσθεση των ροπών αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών και του στρωτήρα. Οι ροπές αδράνειας των σιδηροτροχιών είναι γνωστές από πίνακες, ενώ για το στρωτήρα ισχύει:

$$— (4.5)$$

όπου: $I_{yy\ sl}$ η ροπή αδράνειας του στρωτήρα κατά τον άξονα y
 h το βάθος / ύψος του στρωτήρα
 L το μήκος του στρωτήρα

Έτσι, συνολικά ισχύει:

$$— (4.6)$$

Ακολουθεί ένα αριθμητικό παράδειγμα, προκειμένου να συγκριθούν οι τιμές που υπολογίστηκαν με τις πραγματικές. Θεωρείται εσχάρα, η οποία αποτελείται από δύο σιδηροτροχιές S49 και στρωτήρες μήκους $L = 2,6m$ και βάθους $h = 25cm$. Επιπλέον, θεωρείται ότι η σύνδεση μεταξύ των σιδηροτροχιών και του στρωτήρα είναι μέσης δυσκαμψίας, δηλαδή ούτε άκαμπτη, ούτε και πλέον χαλαρή. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, τον τύπο (4.6), στο παράδειγμα έχουμε:

$$I_{yy\ tot} = 2 I_{yy\ rail} + I_{yy\ sl} = 2 \cdot 321 + 1/12 \cdot 25 \cdot 260^3 = 642 + 36.616.666 = 36.617.308\ cm^4$$

Από αυτό το παράδειγμα βλέπουμε ότι:

- ✓ Η ροπή αδράνειας της εσχάρας που υπολογίστηκε, είναι πολλές τάξεις μεγέθους (έως 4 φορές) μεγαλύτερη από την αναμενόμενη ($\sim 1.000\ cm^4$). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος που εφαρμόστηκε δεν μπορεί να περιγράψει την IPA πειστικά.

- ✓ Η IPA είναι τόσο μεγάλη, λόγω της τεράστιας ροπής αδράνειας του στρωτήρα. Αυτό είναι απολύτως λογικό, διότι οι διαστάσεις του στρωτήρα είναι εμφανώς μεγαλύτερες από αυτές των σιδηροτροχιών. Έτσι, οι ροπή αδράνειας των σιδηροτροχιών, είναι μηδενικής σημασίας μπροστά στην ροπή αδράνειας του στρωτήρα. Αυτό μας οδηγεί στο επόμενο συμπέρασμα.
- ✓ Ο στρωτήρας έχει τόσο μεγάλη δυσκαμψία στο επίπεδο xz, που ουσιαστικά δεν κάμπτεται σε αυτό το επίπεδο. Συνεπώς, δεν συμμετέχει στην κάμψη της εσχάρας και συνεπώς στην IPA της.
- ✓ Συνεχίζοντας αυτόν τον συλλογισμό, το είδος του στρωτήρα και τα χαρακτηριστικά του, δεν επηρεάζουν άμεσα την IPA της εσχάρας. Ο τρόπος με τον οποίο την επηρεάζουν, είναι έμμεσος. Πιο συγκεκριμένα, οι στρωτήρες, καθορίζουν το είδος των χρησιμοποιούμενων συνδέσμων και το βαθμό σύσφιξής τους, στοιχεία που όπως εξετάστηκε και αναλύθηκε παραπάνω, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την IPA της εσχάρας.
- ✓ Τέλος, με όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι, οι στρωτήρες κρατούν σταθερή την απόσταση μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών και βοηθούν την εσχάρα στην ευστάθειά της, μέσω των τριβών τους με το έρμα και μέσω του βάρους τους. Όμως στην IPA της εσχάρας δεν έχουν κανένα ρόλο.

Το παραπάνω παράδειγμα, έχει σαν δεδομένα ένα συγκεκριμένο τύπο σιδηροτροχιάς και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στρωτήρα. Για οποιοδήποτε, όμως, συνδυασμό των παραπάνω δύο στοιχείων, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν παραμένουν τα ίδια, αφού οι διαστάσεις των στρωτήρων, συνεπώς και η ροπή αδράνειάς τους, είναι παρόμοιες. Έτσι, τα παραπάνω συμπεράσματα, μπορούν να γενικευτούν για όλους τους τύπους στρωτήρων και σιδηροτροχιών.

Επιπλέον, τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν όταν οι στρωτήρες είναι άκαμπτα συνδεδεμένοι με τις σιδηροτροχιές, δηλαδή όταν οι σύνδεσμοι είναι πλήρως σφιγμένοι. Σε αυτήν την περίπτωση η προκύπτουσα IPA με τη γεωμετρική μέθοδο θα είναι ακόμη μεγαλύτερη, αφού η νέα ροπή αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών θα υπολογίζεται ως προς το κέντρο συμμετρίας του στρωτήρα (Κ.Β. εγκάρσιας τομής xz), με χρήση του θεωρήματος Steiner και θα είναι:

(4.7)

όπου: F_{rail} το εμβαδόν της διατομής της σιδηροτροχιάς
 α η απόσταση της σιδηροτροχιάς από το μέσο του στρωτήρα (η μισή απόσταση των δύο σιδηροτροχιών)

Έτσι, η συνολική IPA, είναι:

— (4.8)

Είναι προφανές ότι η τιμή της IPA μιας οποιασδήποτε εσχάρας, χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.8), είναι κατάτι μεγαλύτερη από το να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (4.6). Συνεπώς, χωρίς καμία αμφιβολία τα παραπάνω συμπεράσματα, μπορούν να γενικευτούν και γι αυτήν την περίπτωση με επιτυχία.

Τέλος, σαν μία αποτίμηση της γεωμετρικής μεθόδου, μπορεί να ειπωθεί ότι δεν είναι επαρκής για τον υπολογισμό της IPA μιας εσχάρας, αφού δεν μπορεί να συμπεριλάβει το είδος των συνδέσμων και το βαθμό σύσφιξής τους. Αυτό είναι απολύτως λογικό, διότι οι σύνδεσμοι αναπτύσσουν τη στρεπτική τους αντίσταση και αυξάνουν την IPA της εσχάρας, καθώς η εσχάρα φορτίζεται. Αυτή ακριβώς η παράμετρος είναι που δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη γεωμετρικά και συνεπώς καθιστά τη γεωμετρική μέθοδο εύρεσης της IPA μιας εσχάρας, ανεπαρκή.

4.2.3. Μέθοδος των τάσεων

Η μέθοδος των τάσεων, είναι μία θεωρητική προσέγγιση που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και έχει σαν σκοπό το θεωρητικό υπολογισμό της IPA μιας εσχάρας. Κύριο μέλημά, είναι να αποφευχθεί η πειραματική διάταξη της πρώτης μεθόδου που παρουσιάστηκε και να προσδιοριστεί η IPA, σε λίγο χρόνο, χωρίς μεγάλη χρήση πόρων και, προφανώς, να είναι μία αρκετά ακριβής προσέγγιση.

Η μέθοδος των τάσεων παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η μέθοδος των τάσεων, είναι μία θεωρητική προσέγγιση που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και έχει σαν σκοπό το θεωρητικό υπολογισμό της IPA μιας εσχάρας. Κύριο μέλημά, είναι να αποφευχθεί η πειραματική διάταξη της πρώτης μεθόδου που παρουσιάστηκε και να προσδιοριστεί η IPA, σε λίγο χρόνο, χωρίς μεγάλη χρήση πόρων και, προφανώς, να είναι μία αρκετά ακριβής προσέγγιση. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης αυτής, θα συγκριθούν με τις μέχρι τώρα μετρήσεις του εργαστηρίου Σιδηροδρομικής Επιδομής του Πολυτεχνείου του Μονάχου, για να διαπιστωθεί η ακρίβειά της.

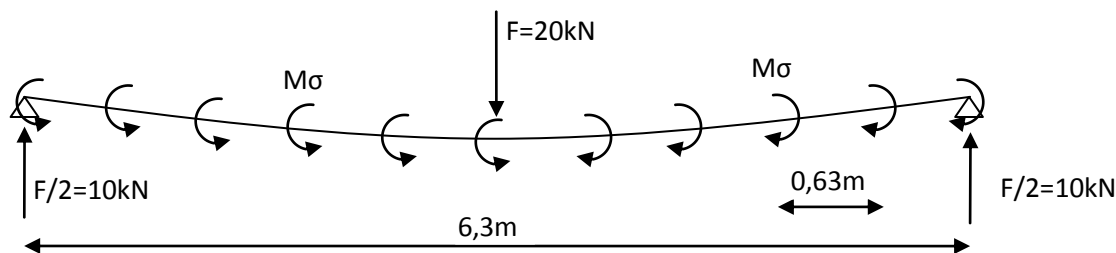
Η μέθοδος στηρίζεται στον ορισμό του Meier, για την IPA, που ορίζει: ***η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας μιας σιδηροδρομικής εσχάρας ορίζεται ως, η ροπή αδράνειας μιας υποθετικής σιδηροτροχιάς, η οποία για το ίδιο μήκος και το ίδιο φορτίο καταπόνησης με την πραγματική εσχάρα, έχει την ίδια μετατόπιση με την τελευταία.***

5.1. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Για να υπολογιστεί η IPA θα χρησιμοποιηθεί ως κύρια ιδέα, η πειραματική μέθοδος προσδιορισμού της. Πιο συγκεκριμένα, στη μέθοδό μας, θα επαναλάβουμε, τον τρόπο φόρτισης της εσχάρας, κατά την πειραματική διαδικασία, ώστε να προσδιοριστεί η IPA. Επειδή όμως, θεωρητικά, δεν μπορεί να προσομοιωθεί απόλυτα, η εντατική κατάσταση μιας εσχάρας, φορτιζόμενης με ένα σημειακό εγκάρσιο φορτίο (όπως στην πειραματική μέθοδο), γίνονται οι εξής παραδοχές:

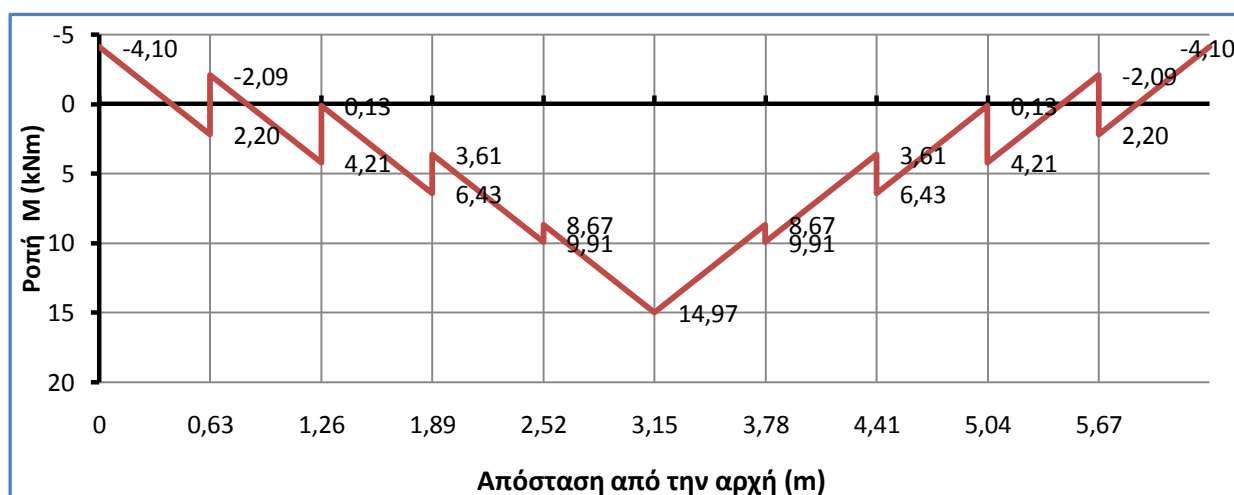
Έστω μία σιδηροτροχιά, η οποία στα εξής θα ονομάζεται «πραγματική», και η οποία φορτίζεται από τα πραγματικά φορτία του πειράματος. Αναλυτικότερα, η σιδηροτροχιά αυτή, φορτίζεται στο μέσο της από ένα σημειακό, εγκάρσιο και οριζόντιο φορτίο $F=20\text{kN}$, που έχει σαν αποτέλεσμα την κάμψη της, ενώ στηρίζεται στα άκρα της με αρθρώσεις. Η σιδηροτροχιά, αυτή, είναι ίδιου τύπου με τις σιδηροτροχιές που υπάρχουν στην εσχάρα, της οποίας την IPA θέλουμε να υπολογίσουμε. Επιπλέον, θεωρούνται κάποιοι υποθετικοί στρωτήρες, οι οποίοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και βρίσκονται στις ίδιες θέσεις με τους στρωτήρες της εσχάρας που θέλουμε να μελετήσουμε. Αυτοί οι στρωτήρες, δεν έχουν φυσική υπόσταση και δεν συνδέονται με την πραγματική σιδηροτροχιά, αλλά αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η θέση τους στην εσχάρα. Στις θέσεις αυτές, λοιπόν, θεωρείται η ύπαρξη στροφικών ελατηρίων, τα οποία προσομοιάζουν τη λειτουργία των συνδέσμων στην εσχάρα. Τα ελατήρια αυτά έχουν μία ορισμένη δυσκαμψία K , η οποία υπολογίζεται από τη χαρακτηριστική

καμπύλη των συνδέσμων της εσχάρας, και αναπτύσσουν στρεπτικές ροπές M σ κατά την κάμψη της πραγματικής σιδηροτροχιάς. Όπως και στο πείραμα, η σιδηροτροχιά είναι μήκους 6,3m, ενώ τα στροφικά ελατήρια είναι σε αποστάσεις 0,63m. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των ελατηρίων είναι 11 και ως εκ τούτου ο φορέας είναι 11 φορές υπερστατικός. Το παραπάνω στατικό μοντέλο, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



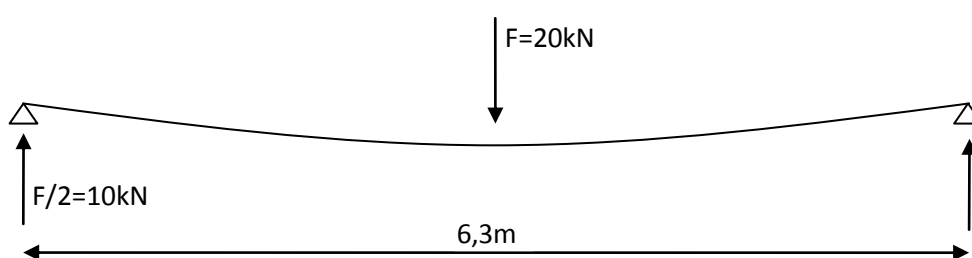
Σχήμα 5.1
Στατικό προσομοίωμα της πραγματικής
σιδηροτροχιάς
[Παρασκευάς Κ.]

Όπως φαίνεται και στο στατικό προσομοίωμα, λόγω της φόρτισης F , η σιδηροτροχιά κάμπτεται και αναπτύσσονται στα άκρα της αντιδράσεις, ίσες με $F/2$. Αυτό, είναι εύκολα κατανοητό λόγω της συμμετρίας του φορέα, παρόλο που αυτός είναι 11 φορές υπερστατικός. Τέλος, να σημειωθεί ότι, στο μεσαίο στροφικό ελατήριο, η στρεπτική ροπή που αναπτύσσεται είναι απειροστά μικρή και αμελητέα σε σχέση με τις υπόλοιπες, αφού στο μέσο (που είναι το σημείο φόρτισης), η κλίση του βέλους κάμψης της σιδηροτροχιάς είναι μηδέν και έτσι δεν αναπτύσσεται καμιά στροφή. Σαν αποτέλεσμα, το μεσαίο στροφικό ελατήριο, αναπτύσσει στρεπτικές ροπές, μόνο λόγω αποκλίσεων του σημείου επιβολής του φορτίου F , από το μέσο της σιδηροτροχιάς. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η ροπή αυτή είναι μικρή και δεν έχει καμία ουσιαστική σημασία. Στο Σχήμα 5.1, απεικονίζεται αντιωρολογιακή, χωρίς αυτό να έχει κάποια σημασία. Με βάση τα παραπάνω, ένα τυπικό διάγραμμα ροπών της παραπάνω σιδηροτροχιάς φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

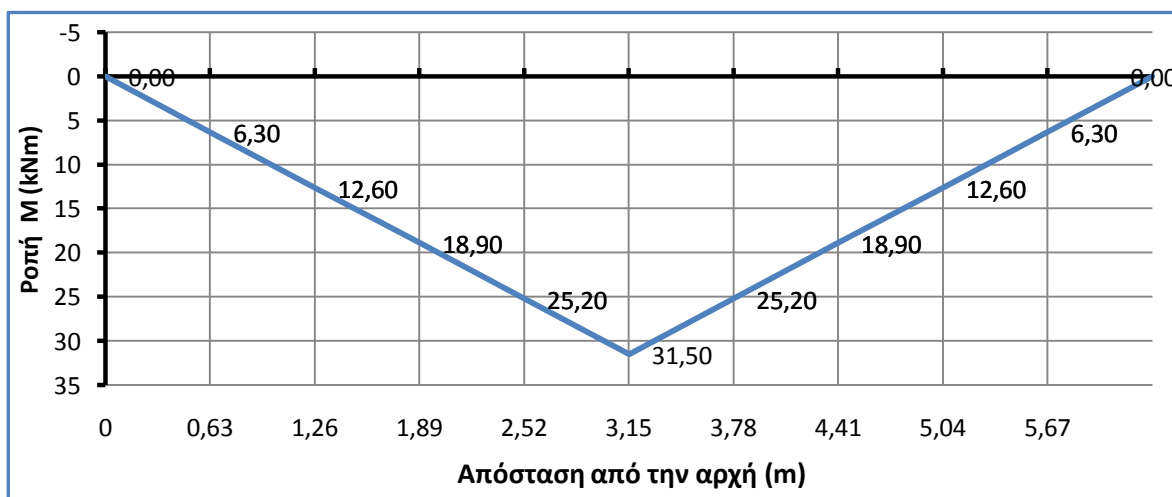


Σχήμα 5.2
Διάγραμμα ροπών πραγματικής σιδηροτροχιάς
[Παρασκευάς Κ.]

Πέρα από την πραγματική σιδηροτροχιά, θεωρείται και μία «ισοδύναμη», η οποία φορτίζεται, όπως και η πρώτη, με ένα σημειακό, εγκάρσιο αι οριζόντιο φορτίο $F=20\text{ kN}$, στο μέσο της. Κύριο χαρακτηριστικό της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς είναι ότι, δεν έχει καθόλου στροφικά ελατήρια στο σώμα της, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται καθόλου στρεπτικές ροπές, ενώ πέρα από αυτό, έχει αυξημένη ροπή αδράνειας I_E , η οποία ξεπερνάει σε τιμή τη ροπή αδράνειας I , της πραγματικής σιδηροτροχιάς. Ο λόγος για τον οποίο η I_E έχει μεγαλύτερη τιμή από την I , θα φανεί παρακάτω. Όσον αφορά, τώρα, στις στηρίξεις, η ισοδύναμη σιδηροτροχιά είναι ίδια με την πραγματική σιδηροτροχιά. Δηλαδή, είναι αμφιαρθρωτή. Έτσι, το διάγραμμα ροπών της είναι απλό τριγωνικό. Το στατικό μοντέλο της, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3, ενώ το διάγραμμα ροπών της, φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.3
Στατικό προσομοίωμα της ισοδύναμης
σιδηροτροχιάς
[Παρασκευάς Κ.]



Σχήμα 5.4
Διάγραμμα ροπών ισοδύναμης σιδηροτροχιάς
[Παρασκευάς Κ.]

5.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η κύρια ιδέα της μεθόδου είναι η εξής: Αν με κάποιο τρόπο να βρεθεί μία σχέση μεταξύ της πραγματικής και της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς, τότε θα βρεθεί άλλη μία μεταξύ της I και της I_E . Βρίσκοντας την I_E και πολλαπλασιάζοντάς την επί 2, βρίσκουμε την I_{PA} της υπό μελέτη εσχάρας.

Από τη Μηχανική είναι γνωστό ότι, η σχέση που διέπει τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε μία διατομή λόγω κάμψης από ροπή M , είναι:

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad (5.1)$$

όπου:	σ	η αναπτυσσόμενη τάση (kPa)
	M	η ροπή που καταπονεί τη διατομή (kNm)
	I	η ροπή αδράνειας της διατομής (m ⁴)
	y	η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα (m)

Εφαρμόζοντας τη σχέση (5.1) μία φορά για την πραγματική και μία για την ισοδύναμη σιδηροτροχιά έχουμε:

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad \sigma = \frac{M y}{I_E}$$

Προκειμένου η ισοδύναμη σιδηροτροχιά να είναι εντατικά ισοδύναμη με την πραγματική, θα πρέπει για το ίδιο y , να αναπτύσσονται οι ίδιες τάσεις σ . Δηλαδή, παρόλο που η ισοδύναμη σιδηροτροχιά δέχεται μεγαλύτερες ροπές, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 5.2 και 5.4, θα πρέπει μέσω της ροπής αδράνειάς της να αναπτύσσει τις ίδιες τάσεις με την πραγματική σιδηροτροχιά. Πρακτικά, αυτό σημαίνει, ότι ουσιαστικά, «ενσωματώνει» τη δυσκαμψία των συνδέσμων στο κύριο σώμα της και έτσι αυξάνει τη συνολική της δυσκαμψία. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η I_E είναι μεγαλύτερη από τη I . Έτσι, ισχύει:

$$I_E = 2 I$$

$$I_E = 2 I \quad (5.2)$$

Η παραπάνω σχέση, εκφράζει τη ροπή αδράνειας της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς, ως προς τη ροπή αδράνειας της πραγματικής και το λόγο της ροπής της ισοδύναμης

προς τη ροπή της πραγματικής. Φαίνεται, ξεκάθαρα, ότι η ροπή αδράνειας I_E , είναι ευθέως ανάλογη με το λόγο M_E/M_{real} , πράγμα που καταδεικνύει ότι η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς δεν είναι σταθερή κατά μήκος αυτής. Πριν, όμως, παρουσιαστεί ο ποσοτικός υπολογισμός της I_E , θα αναλυθεί η σχέση (5.2) για μία διατομή της σιδηροτροχιάς, σε απόσταση x από την αρχή.

Η ροπή αδράνειας I_{real} , είναι γνωστή από πίνακες και δεν χρήζει περαιτέρω ανάλυσης. Η αναπτυσσόμενη ροπή M_E , είναι και αυτή γνωστή, αφού σε κάθε περίπτωση (διαφορετική σιδηροτροχιά ή/και σύνδεσμοι), η ροπή αυτή παραμένει σταθερή και ίση με:

$$M_E = M_{real} \cdot \frac{I_E}{I_{real}}$$

Τα πράγματα, όμως, περιπλέκονται κατά τον υπολογισμό της ροπής M_{real} , της πραγματικής σιδηροτροχιάς. Πιο συγκεκριμένα, η αναπτυσσόμενη ροπή στη θέση x της σιδηροτροχιάς είναι:

$$M_{real} = M_{si} + M_{el}$$

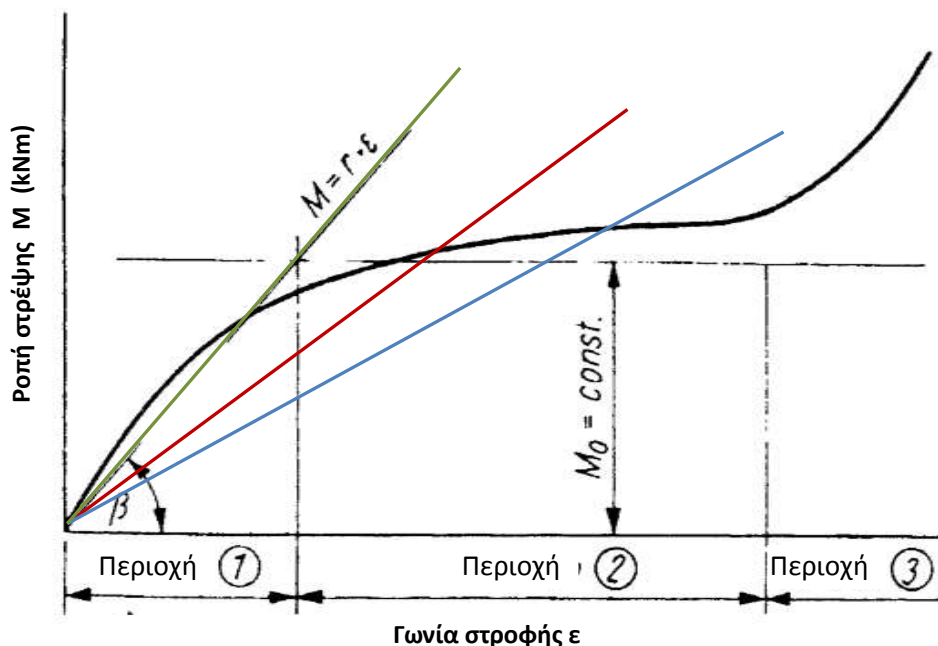
όπου, M_{si} η στρεπτική ροπή αντίστασης κάθε στρωτήρα i . Ο αριθμός 6 τέθηκε, διότι οι σύνδεσμοι (συνεπώς και τα στροφικά ελατήρια) από τη μία άκρη έως και το μέσο, είναι 6 σε αριθμό. Αυτό, βέβαια, ισχύει για το συγκεκριμένο πείραμα. Σε περίπτωση που υπήρχαν περισσότεροι σύνδεσμοι, τότε ο αριθμός 6 θα άλλαζε αναλόγως.

Στην εξίσωση (5.4), όμως, υπάρχει πάλι ένας άγνωστος. Η στρεπτική ροπή M_{si} σε κάθε στροφικό ελατήριο. Για να υπολογιστεί αυτός ο παράγοντας θα γίνει χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών των συνδέσμων της υπό μελέτη εσχάρας, καθώς επίσης και ενός προγράμματος στατικής επίλυσης δοκών. Πιο συγκεκριμένα, η στρεπτική ροπή των στροφικών ελατηρίων, αναπτύσσεται καθώς η γωνία στροφής του βέλους κάμψης αυξάνεται και αντίστροφα. Δηλαδή, η στρεπτική ροπή εξαρτάται από την κλίση του βέλους κάμψης, η οποία (κλίση), εξαρτάται από τη στρεπτική ροπή. Αυτή η αμφίδρομη σχέση, εξηγείται από την ύπαρξη της στρεπτικής δυσκαμψίας των συνδέσμων-ελατηρίων, η οποία ευθύνεται για την σταδιακή ανάπτυξη της στρεπτικής αντίστασης. Έτσι, προκειμένου να προσδιοριστούν αυτές οι ροπές-αντιστάσεις, αλλά και να επιλυθεί ο υπερστατικός φορέας, πρέπει να προσομοιώσουμε σε ένα πρόγραμμα H/Y, επίλυσης στατικών προβλημάτων, το στατικό μοντέλο του σχήματος 5.1, με τις στρεπτικές δυσκαμψίες των ελατηρίων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για αυτό το σκοπό είναι το BEAM! 2D NTUA Edition του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Έτσι, λοιπόν, εισάγεται το στατικό προσομοίωμα, με τις διαστάσεις που έχουν δοθεί, ώστε να υπολογιστούν οι στρεπτικές ροπές. Προκειμένου, όμως, το προσομοίωμα να είναι ακριβές, θα πρέπει να δωθεί προσοχή στις στρεπτικές δυσκαμψίες των ελατηρίων. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.18,

4.19, 4.20, τα ελατήρια έχουν μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Αρχικά στην Περιοχή 1, η συμπεριφορά τους είναι ελαστική, ενώ όσο προχωρούν μέσα στην Περιοχή 2, η συμπεριφορά τους γίνεται πλαστική. Τέλος, στην Περιοχή 3 φαίνεται ότι και πάλι έχουν ελαστική συμπεριφορά. Αυτή η αλλαγή συμπεριφοράς, λοιπόν, δείχνει ότι ελατήρια με διαφορετικές στροφές, έχουν διαφορετικές δυστρεψίες. Ελατήρια στην Περιοχή 1 έχουν μεγαλύτερη δυστρεψία από αυτά στην Περιοχή 2. Επίσης, ελατήρια στην Περιοχή 1 έχουν περίπου την ίδια δυστρεψία μεταξύ τους. Αυτές όλες οι μεταβολές, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν από το πρόγραμμα χωρίς κάποιες τροποποιήσεις.

Αυτό που έπρεπε να γίνει ήταν το εξής: Δίνεται αρχικά μία ορισμένη, μέση, δυστρεψία στα ελατήρια, η οποία υπολογίζεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη των συνδέσμων, της υπό μελέτη εσχάρας. Επιλύεται στατικά το προσομοίωμα και ελέγχεται αν για κάθε ελατήριο, το ζεύγος στρεπτική ροπή-στροφή, ταιριάζει με τη χαρακτηριστική καμπύλη. Αν ταιριάζει, τότε η δυστρεψία που έχει δοθεί στο ελατήριο είναι σωστή. Αλλιώς, υπολογίζεται και εισάγεται άλλη δυστρεψία στο ελατήριο. Μικρότερη, αν το ζεύγος στρεπτική ροπή-στροφή είναι πάνω από τη χαρακτηριστική καμπύλη και μεγαλύτερη, αν το ίδιο ζεύγος είναι κάτω από τη καμπύλη. Αφού έχουν υπολογιστεί όλες οι δυστρεψίες των ελατηρίων με την παραπάνω διαδικασία, επιλύεται ξανά το προσομοίωμα και επιβεβαιώνονται τα παραπάνω ζεύγη τιμών. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται οπτικά στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5

Χαρακτηριστική καμπύλη συνδέσμου και δυστρεψίες
ελατηρίων για τρεις περιπτώσεις αρχικής εκτίμησης
[Παρασκευάς Κ.]

Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την αρχική, «μέση», δυσκαμψία των ελατηρίων. Η μπλε γραμμή απεικονίζει τη δυσκαμψία που δίνεται στο ελατήριο όταν η αρχική

εκτίμηση δίνει ζεύγη στρεπτικών ροπών-στροφής άνω της χαρακτηριστικής καμπύλης, ενώ η πράσινη καμπύλη απεικονίζει το ίδιο μέγεθος, όταν η αρχική μας εκτίμηση δίνει ζεύγη τιμών κάτω από τη χαρακτηριστική καμπύλη.

Αφού έχουν ολοκληρωθεί όλες τις παραπάνω διαδικασίες, ο φορέας είναι έτοιμος για την οριστική στατική επίλυση. Έτσι, υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες στρεπτικές ροπές στις θέσεις των ελατηρίων και με αυτές, μέσω της σχέσης (5.4), σχηματίζεται το διάγραμμα ροπών της πραγματικής σιδηροτροχιάς. Όλα, πλέον, τα απαραίτητα μεγέθη είναι υπολογισμένα, ώστε να προσδιοριστεί η I_E . Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.2), προσδιορίζεται σε κάθε σημείο της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς, η ροπή αδράνειάς της και στη συνέχεια με έναν απλό πολλαπλασιασμό ($\cdot 2$), υπολογίζεται η Ισοδύναμη Ροπή Αδράνειας, της υπό μελέτη εσχάρας.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας, για 2 τύπους σιδηροτροχιάς (S49 και UIC60) και 1 τύπο συνδέσμου (K) σε 3 βαθμούς σύσφιξης (ισχυρά, μέτρια, χαλαρά) για γραμμή κανονικού εύρους, φαίνονται παρακάτω. Η χαρακτηριστική καμπύλη για αυτόν τον σύνδεσμο φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Επίσης, τα ίδια αποτελέσματα έχουν παραχθεί και φαίνονται παρακάτω, για ένα τύπο σιδηροτροχιάς (U33) και 3 τύπους συνδέσμου (Pandrol, RN με ελαστικό υπόθεμα, RN χωρίς ελαστικό υπόθεμα) για μετρική γραμμή. Η χαρακτηριστική καμπύλη για αυτόν τον σύνδεσμο φαίνεται στο Σχήμα 4.20.

Πέρα από τους πίνακες που ομαδοποιούν όλη την παραπάνω περιγραφείσα διαδικασία, παραθέτονται και δύο τύποι διαγραμμάτων. Πρώτον, παραθέτονται σε αντιπαράθεση, για σύγκριση, τα διαγράμματα ροπών της πραγματικής και της ισοδύναμης σιδηροτροχιάς. Δεύτερον, παραθέτονται τα διαγράμματα του λόγου I_E/I , σε κάθε θέση της σιδηροτροχιάς, έτσι ώστε να οπτικοποιηθεί η μεγάλη διαφοροποίηση της IPA κατά μήκος της εσχάρας.

Τα στοιχεία – δεδομένα για κάθε περίπτωση επίλυσης (σιδηροτροχιά, σύνδεσμος, βαθμός σύσφιξης), δίνονται στο πορτοκαλί πλαίσιο κάθε πίνακα.

5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΕΠΙΛΥΣΗ 1

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

RN με ελαστικό υπόθεμα

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	331,9

Σιδ/χιά	U33
Σύνδεσμος	RN με ελ. υπόθ.
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

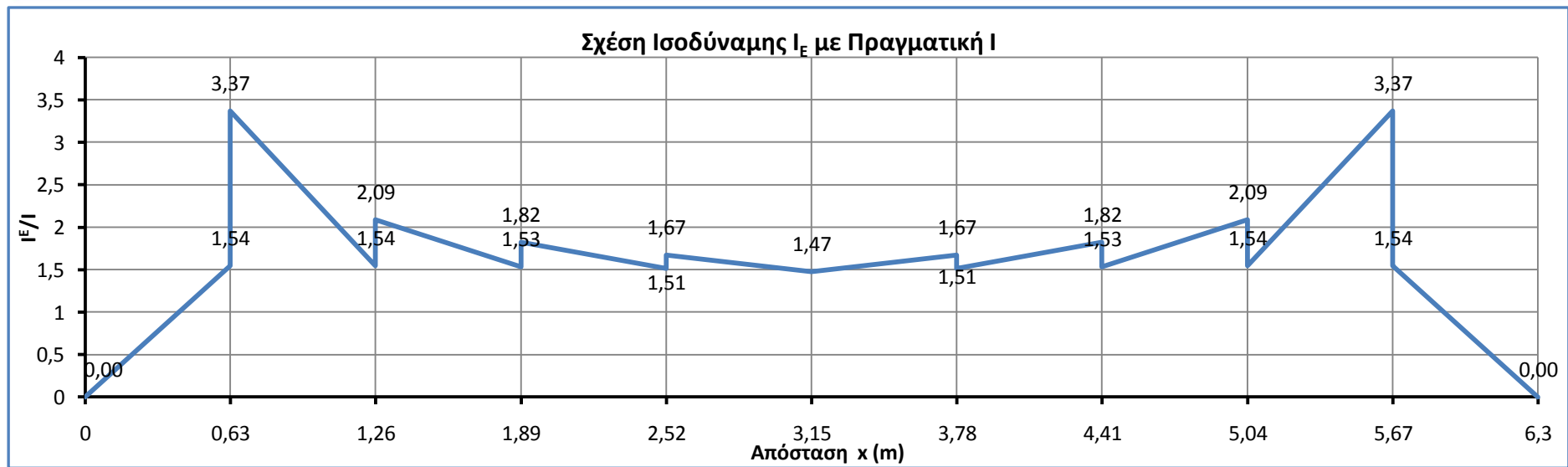
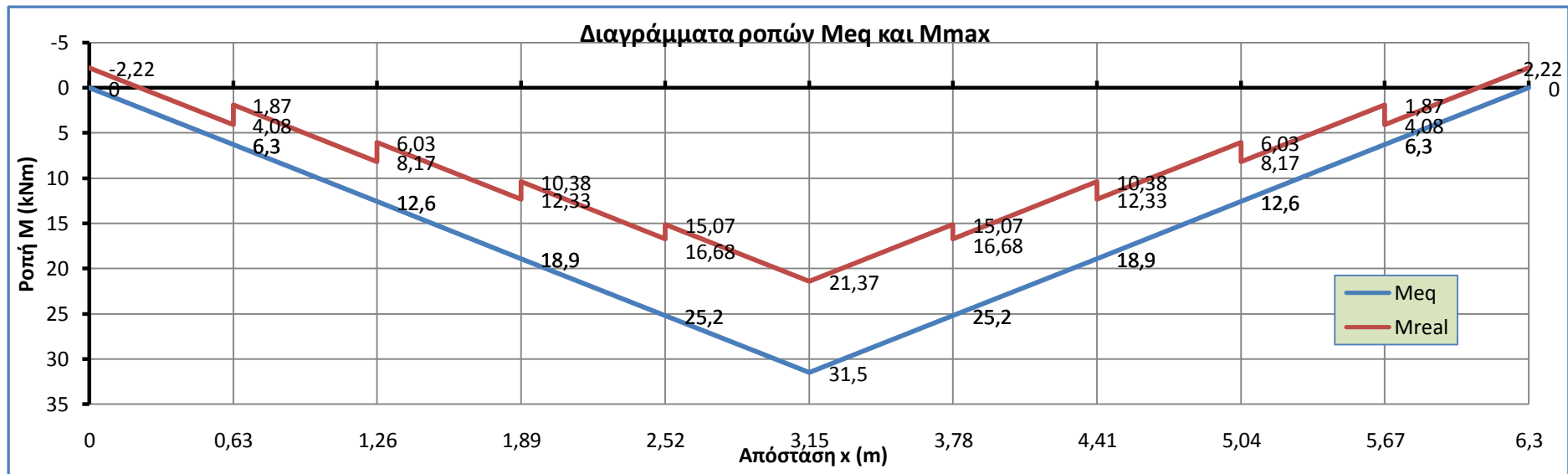
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		2,216	42,38	0	-2,22	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	41,54	6,3	4,08	1,54	512,0
0,63	μετά	2,213	41,54	6,3	1,87	3,37	1117,5
1,26	πριν	0,00	37,00	12,6	8,17	1,54	511,8
1,26	μετά	2,139	37,00	12,6	6,03	2,09	693,3
1,89	πριν	0,00	28,70	18,9	12,33	1,53	508,7
1,89	μετά	1,954	28,70	18,9	10,38	1,82	604,4
2,52	πριν	0,00	16,47	25,2	16,68	1,51	501,5
2,52	μετά	1,604	16,47	25,2	15,07	1,67	554,8
3,15	-	0,00	0,00	31,5	21,37	1,47	489,1
3,78	πριν	0,00	16,47	25,2	15,07	1,67	554,8
3,78	μετά	1,604	16,47	25,2	16,68	1,51	501,5
4,41	πριν	0,00	28,70	18,9	10,38	1,82	604,4
4,41	μετά	1,954	28,70	18,9	12,33	1,53	508,7
5,04	πριν	0,00	37,00	12,6	6,03	2,09	693,3
5,04	μετά	2,139	37,00	12,6	8,17	1,54	511,8
5,67	πριν	0,00	41,54	6,3	1,87	3,37	1117,5
5,67	μετά	2,213	41,54	6,3	4,08	1,54	512,0
6,3		2,216	42,38	0	-2,22	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	21,37

I _E (cm ⁴)	I _E total (cm ⁴)
489,1	978,2

Παρακάτω παραθέτονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 2ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

RN χωρίς ελαστικό υπόθεμα

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
200000	331,9

Σιδ/χιά	U33
Σύνδεσμος	RN χωρίς ελ. υπόθ.
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

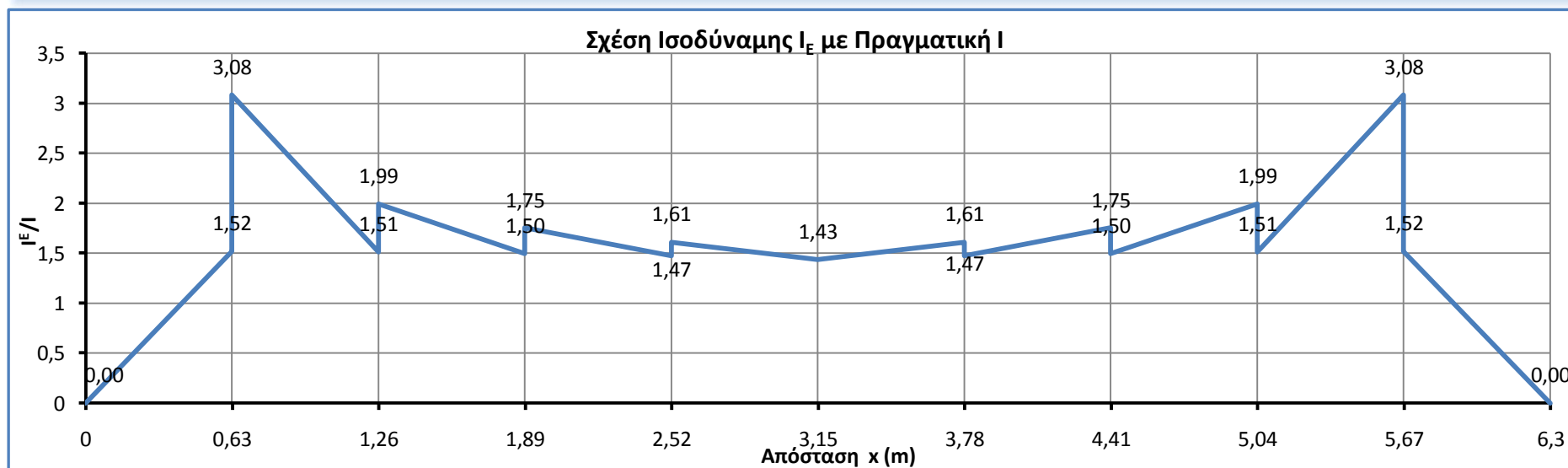
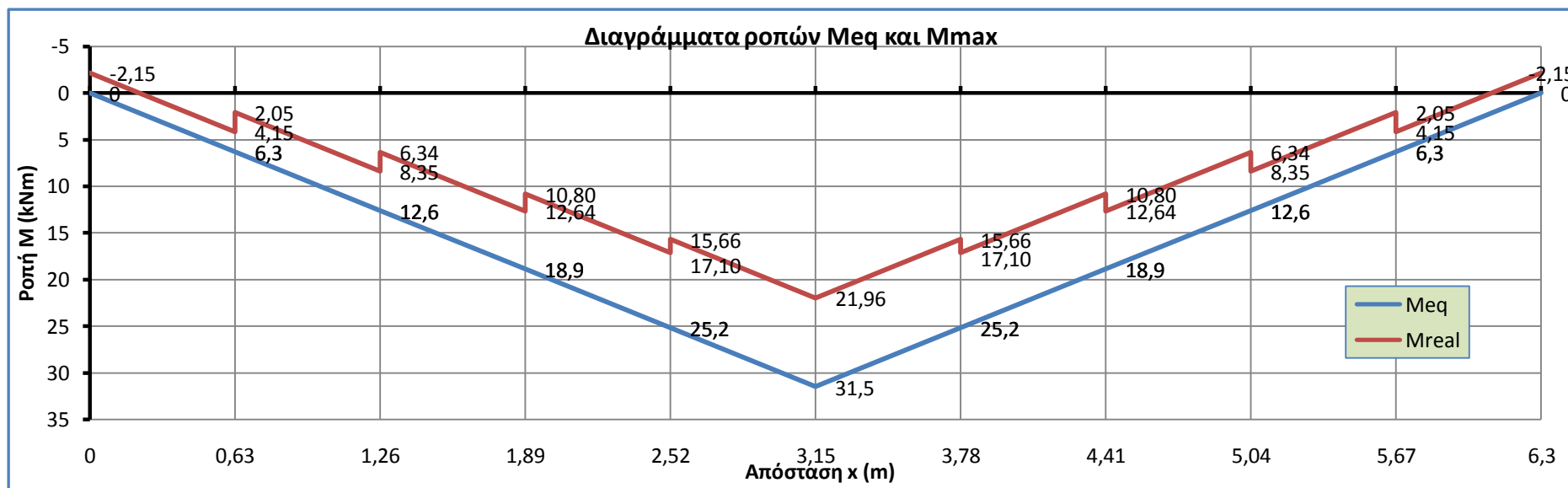
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		2,150	43,79	0	-2,15	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	42,88	6,3	4,15	1,52	503,8
0,63	μετά	2,105	42,88	6,3	2,05	3,08	1022,3
1,26	πριν	0,00	38,19	12,6	8,35	1,51	501,1
1,26	μετά	2,007	38,19	12,6	6,34	1,99	659,8
1,89	πριν	0,00	29,61	18,9	12,64	1,50	496,3
1,89	μετά	1,842	29,61	18,9	10,80	1,75	581,0
2,52	πριν	0,00	17,00	25,2	17,10	1,47	489,2
2,52	μετά	1,434	17,00	25,2	15,66	1,61	534,0
3,15	-	0,00	0,00	31,5	21,96	1,43	476,0
3,78	πριν	0,00	17,00	25,2	15,66	1,61	534,0
3,78	μετά	1,434	17,00	25,2	17,10	1,47	489,2
4,41	πριν	0,00	29,61	18,9	10,80	1,75	581,0
4,41	μετά	1,842	29,61	18,9	12,64	1,50	496,3
5,04	πριν	0,00	38,19	12,6	6,34	1,99	659,8
5,04	μετά	2,007	38,19	12,6	8,35	1,51	501,1
5,67	πριν	0,00	42,88	6,3	2,05	3,08	1022,3
5,67	μετά	2,105	42,88	6,3	4,15	1,52	503,8
6,3		2,150	43,79	0	-2,15	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	21,96

I _E (cm ⁴)	I _E total (cm ⁴)
476,0	952,1

Παρακάτω παραθέτονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 3ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

PANDROL

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	331,9

Σιδ/χιά	U33
Σύνδεσμος	PANDROL
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

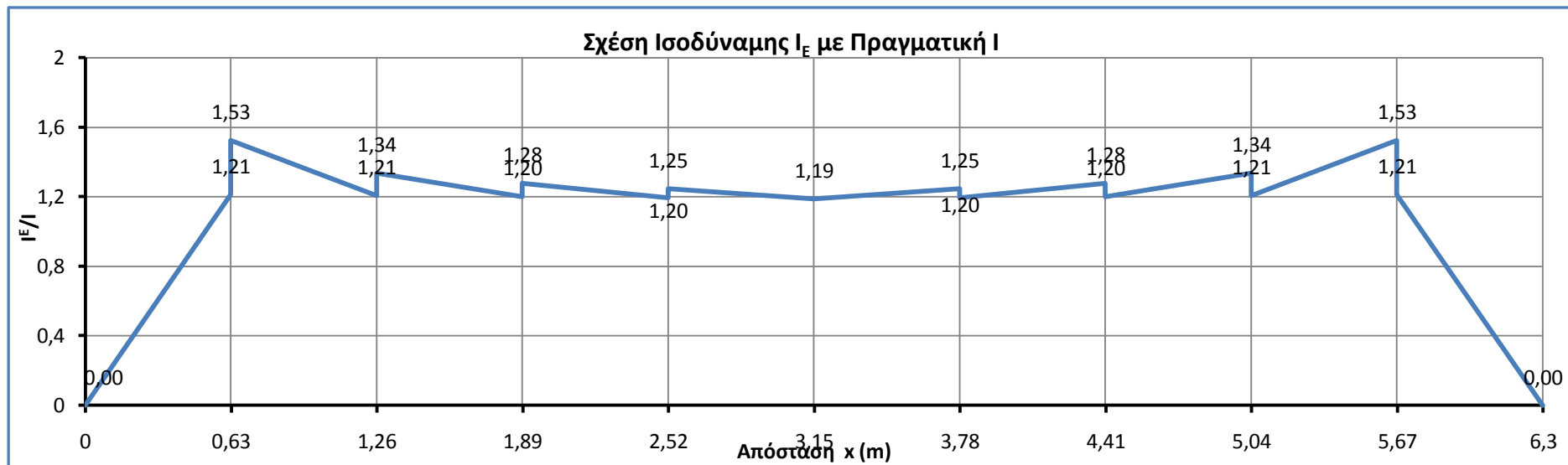
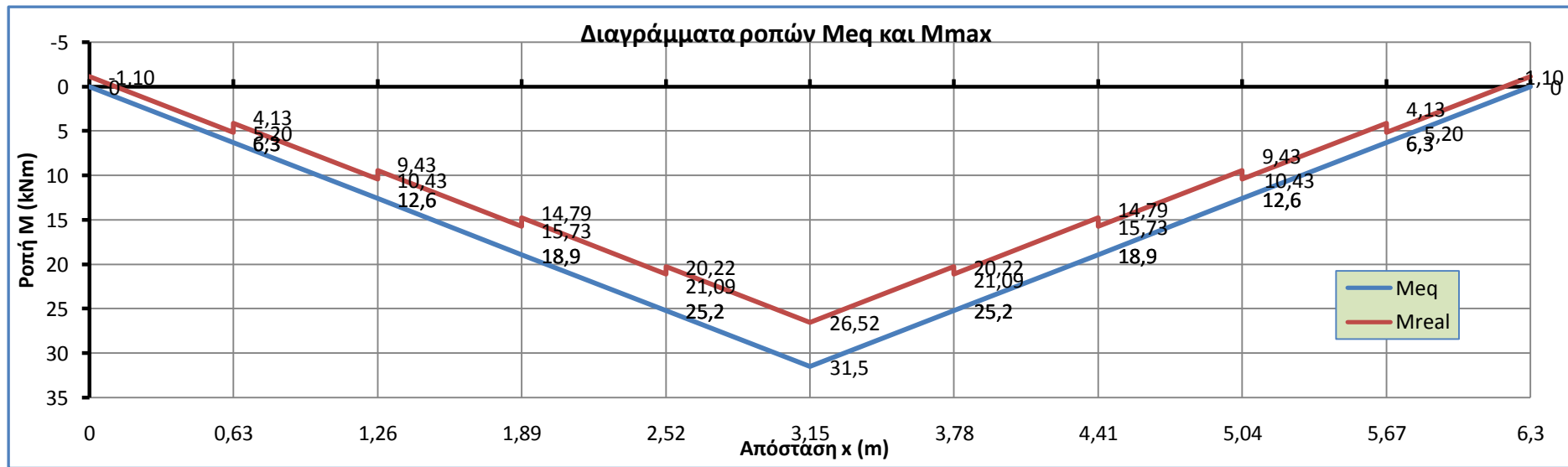
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	Φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		1,103	57,14	0	-1,10	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	55,29	6,3	5,20	1,21	402,3
0,63	μετά	1,067	55,29	6,3	4,13	1,53	506,3
1,26	πριν	0,00	48,71	12,6	10,43	1,21	400,9
1,26	μετά	1,000	48,71	12,6	9,43	1,34	443,5
1,89	πριν	0,00	37,34	18,9	15,73	1,20	398,8
1,89	μετά	0,943	37,34	18,9	14,79	1,28	424,2
2,52	πριν	0,00	21,13	25,2	21,09	1,20	396,6
2,52	μετά	0,866	21,13	25,2	20,22	1,25	413,6
3,15	-	0,00	0,00	31,5	26,52	1,19	394,2
3,78	πριν	0,00	21,13	25,2	20,22	1,25	413,6
3,78	μετά	0,866	21,13	25,2	21,09	1,20	396,6
4,41	πριν	0,00	37,34	18,9	14,79	1,28	424,2
4,41	μετά	0,943	37,34	18,9	15,73	1,20	398,8
5,04	πριν	0,00	48,71	12,6	9,43	1,34	443,5
5,04	μετά	1,000	48,71	12,6	10,43	1,21	400,9
5,67	πριν	0,00	55,29	6,3	4,13	1,53	506,3
5,67	μετά	1,067	55,29	6,3	5,20	1,21	402,3
6,3		1,103	57,14	0	-1,10	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	26,52

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
394,2	788,4

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 4

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Ισχυρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	11

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	321

Σιδ/χιά	S49
Σύνδεσμος	K ισχυρά σφιγμενος
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

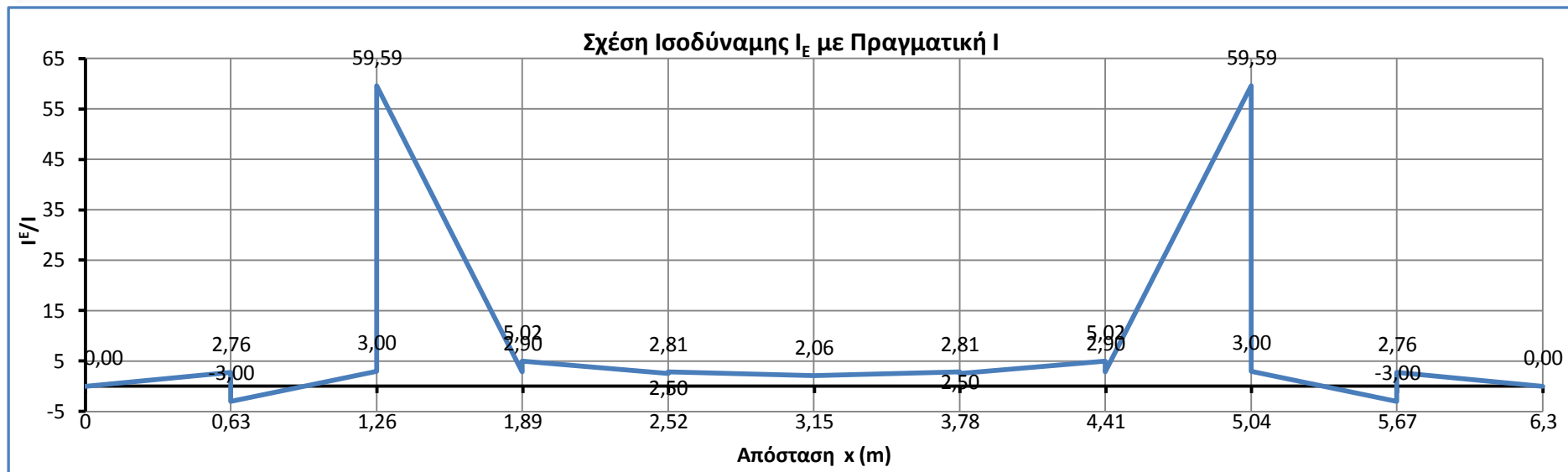
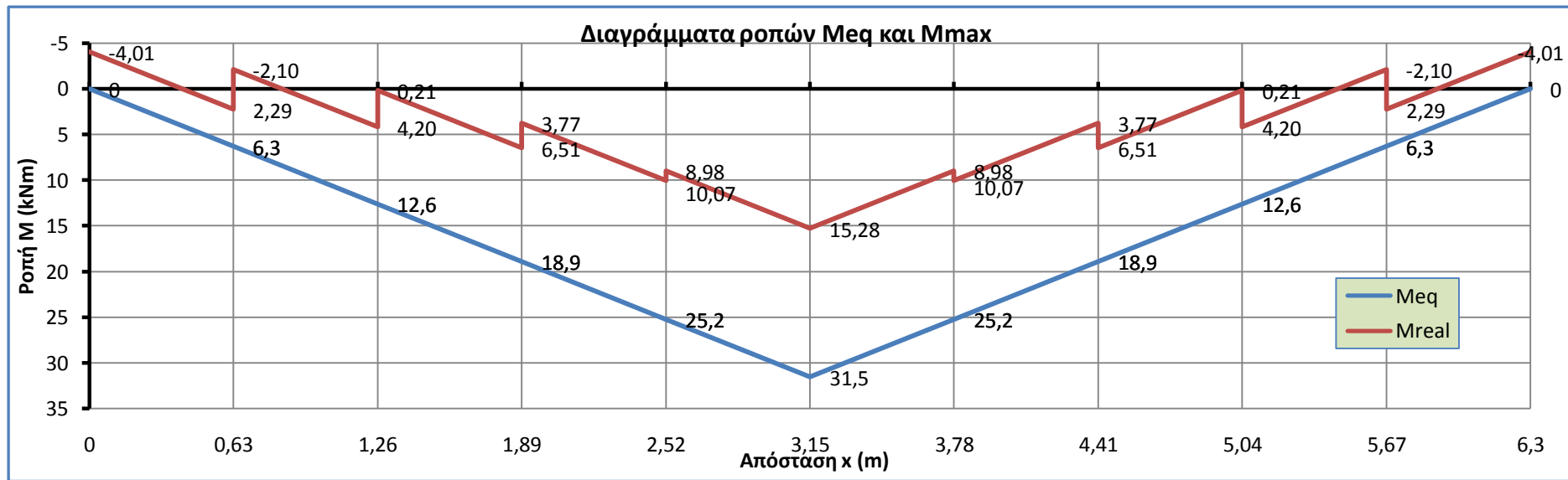
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		4,015	21,11	0	-4,01	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	21,92	6,3	2,29	2,76	884,9
0,63	μετά	4,385	21,92	6,3	-2,10	-3,00	-963,2
1,26	πριν	0,00	20,94	12,6	4,20	3,00	962,9
1,26	μετά	3,989	20,94	12,6	0,21	59,59	19128,8
1,89	πριν	0,00	17,80	18,9	6,51	2,90	931,7
1,89	μετά	2,746	17,80	18,9	3,77	5,02	1611,2
2,52	πριν	0,00	11,34	25,2	10,07	2,50	803,7
2,52	μετά	1,084	11,34	25,2	8,98	2,81	900,6
3,15	-	0,00	0,00	31,5	15,28	2,06	661,7
3,78	πριν	0,00	11,34	25,2	8,98	2,81	900,6
3,78	μετά	1,084	11,34	25,2	10,07	2,50	803,7
4,41	πριν	0,00	17,80	18,9	3,77	5,02	1611,2
4,41	μετά	2,746	17,80	18,9	6,51	2,90	931,7
5,04	πριν	0,00	20,94	12,6	0,21	59,59	19128,8
5,04	μετά	3,989	20,94	12,6	4,20	3,00	962,9
5,67	πριν	0,00	21,92	6,3	-2,10	-3,00	-963,2
5,67	μετά	4,385	21,92	6,3	2,29	2,76	884,9
6,3		4,015	21,11	0	-4,01	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	15,28

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
661,7	1323,3

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 5

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	321

Σιδ/χιά	S49
Σύνδεσμος	K μέτρια σφικγμένος
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

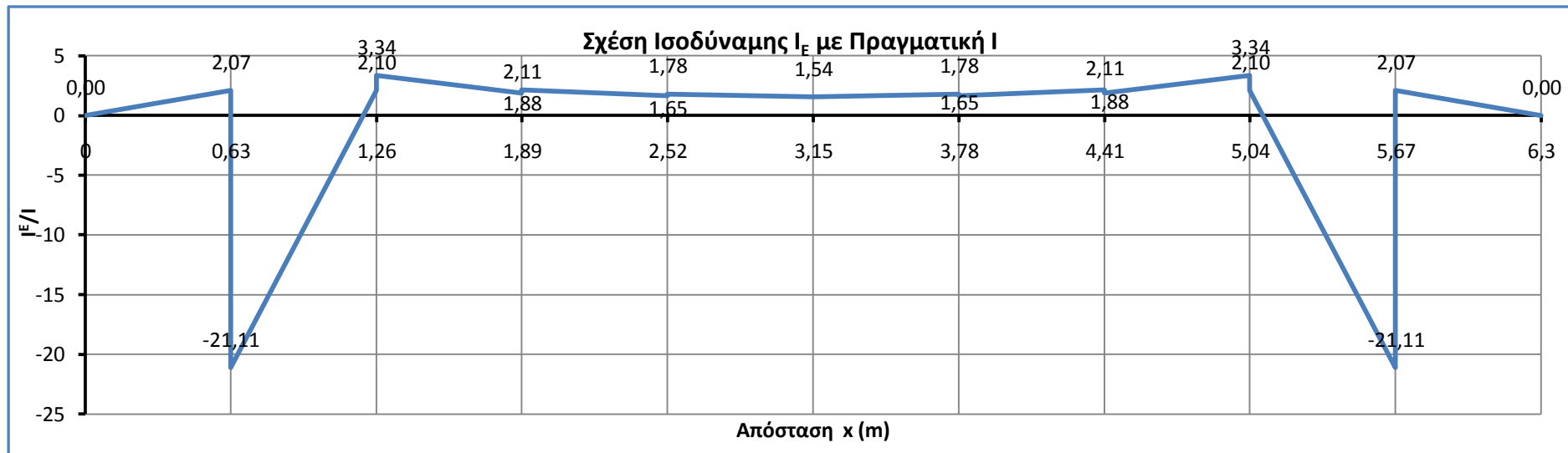
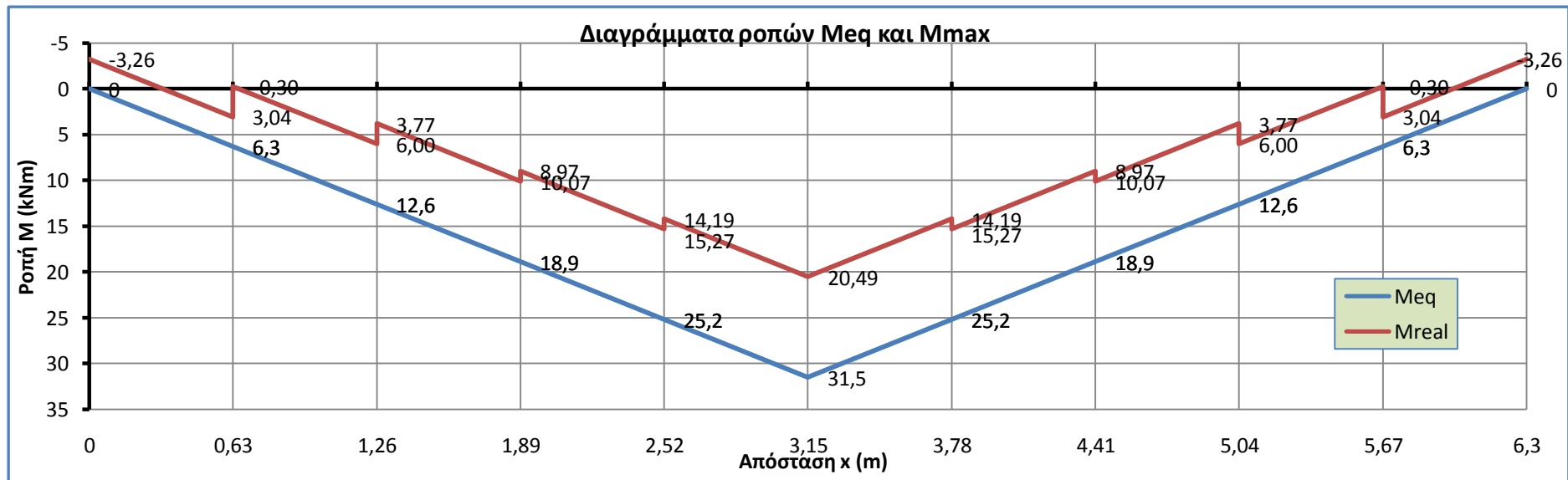
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		3,260	36,25	0	-3,26	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	36,35	6,3	3,04	2,07	665,3
0,63	μετά	3,338	36,35	6,3	-0,30	-21,11	-6775,1
1,26	πριν	0,00	33,73	12,6	6,00	2,10	673,9
1,26	μετά	2,228	33,73	12,6	3,77	3,34	1071,8
1,89	πριν	0,00	27,35	18,9	10,07	1,88	602,3
1,89	μετά	1,107	27,35	18,9	8,97	2,11	676,6
2,52	πριν	0,00	16,12	25,2	15,27	1,65	529,9
2,52	μετά	1,075	16,12	25,2	14,19	1,78	570,0
3,15	-	0,00	0,00	31,5	20,49	1,54	493,4
3,78	πριν	0,00	16,12	25,2	14,19	1,78	570,0
3,78	μετά	1,075	16,12	25,2	15,27	1,65	529,9
4,41	πριν	0,00	27,35	18,9	8,97	2,11	676,6
4,41	μετά	1,107	27,35	18,9	10,07	1,88	602,3
5,04	πριν	0,00	33,73	12,6	3,77	3,34	1071,8
5,04	μετά	2,228	33,73	12,6	6,00	2,10	673,9
5,67	πριν	0,00	36,35	6,3	-0,30	-21,11	-6775,1
5,67	μετά	3,338	36,35	6,3	3,04	2,07	665,3
6,3		3,260	36,25	0	-3,26	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	20,49

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
493,4	986,9

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 6

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Χαλαρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	321

Σιδ/χιά	S49
Σύνδεσμος	K χαλαρά σφιγμένος
Δυσκαμψία	K = 27.154 Nm/rad

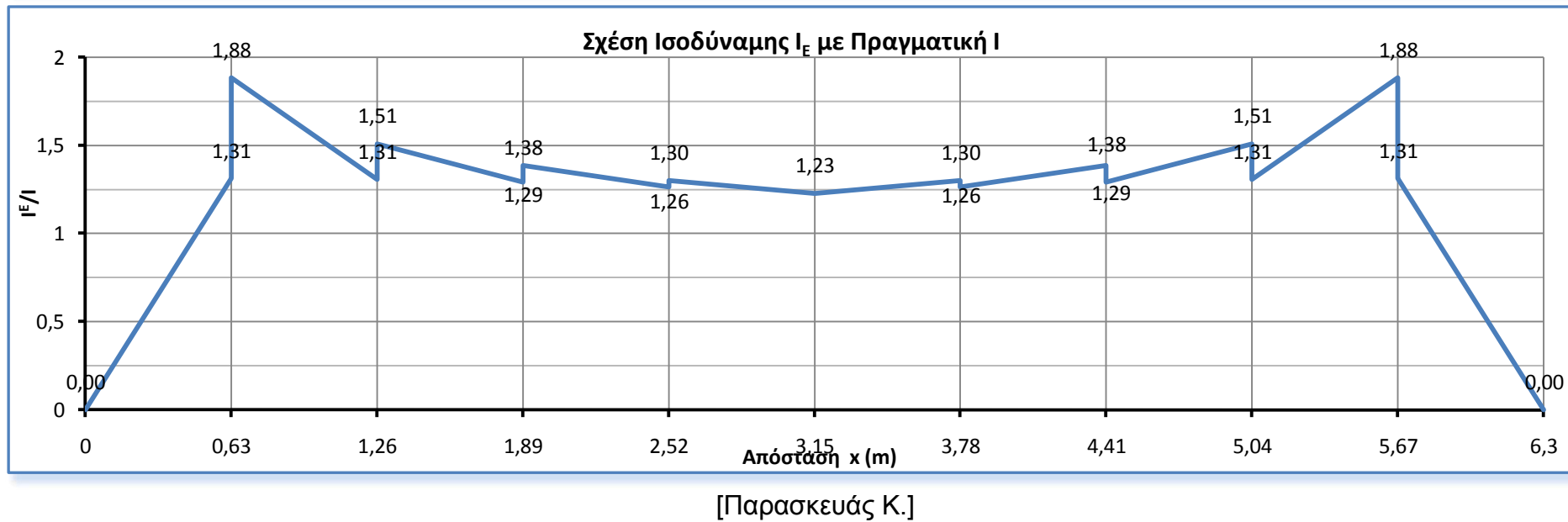
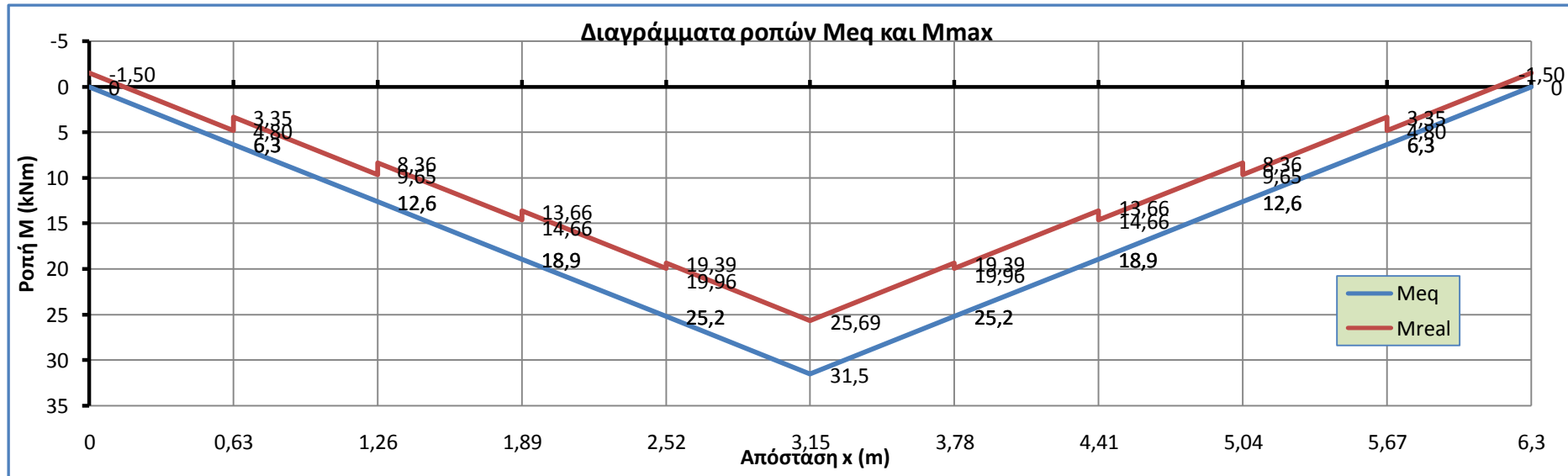
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		1,497	55,14	0	-1,50	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	53,60	6,3	4,80	1,31	421,0
0,63	μετά	1,455	53,60	6,3	3,35	1,88	604,1
1,26	πριν	0,00	47,53	12,6	9,65	1,31	419,2
1,26	μετά	1,291	47,53	12,6	8,36	1,51	484,0
1,89	πριν	0,00	36,77	18,9	14,66	1,29	413,9
1,89	μετά	0,999	36,77	18,9	13,66	1,38	444,2
2,52	πριν	0,00	21,06	25,2	19,96	1,26	405,3
2,52	μετά	0,572	21,06	25,2	19,39	1,30	417,3
3,15	-	0,00	0,00	31,5	25,69	1,23	393,6
3,78	πριν	0,00	21,06	25,2	19,39	1,30	417,3
3,78	μετά	0,572	21,06	25,2	19,96	1,26	405,3
4,41	πριν	0,00	36,77	18,9	13,66	1,38	444,2
4,41	μετά	0,999	36,77	18,9	14,66	1,29	413,9
5,04	πριν	0,00	47,53	12,6	8,36	1,51	484,0
5,04	μετά	1,291	47,53	12,6	9,65	1,31	419,2
5,67	πριν	0,00	53,60	6,3	3,35	1,88	604,1
5,67	μετά	1,455	53,60	6,3	4,80	1,31	421,0
6,3		1,497	55,14	0	-1,50	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	25,69

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
393,6	787,3

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



ΕΠΙΛΥΣΗ 7

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	UIC60
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Ισχυρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	512,9

Σιδ/χιά	UIC 60
Σύνδεσμος	K ισχυρά σφικγμένος
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

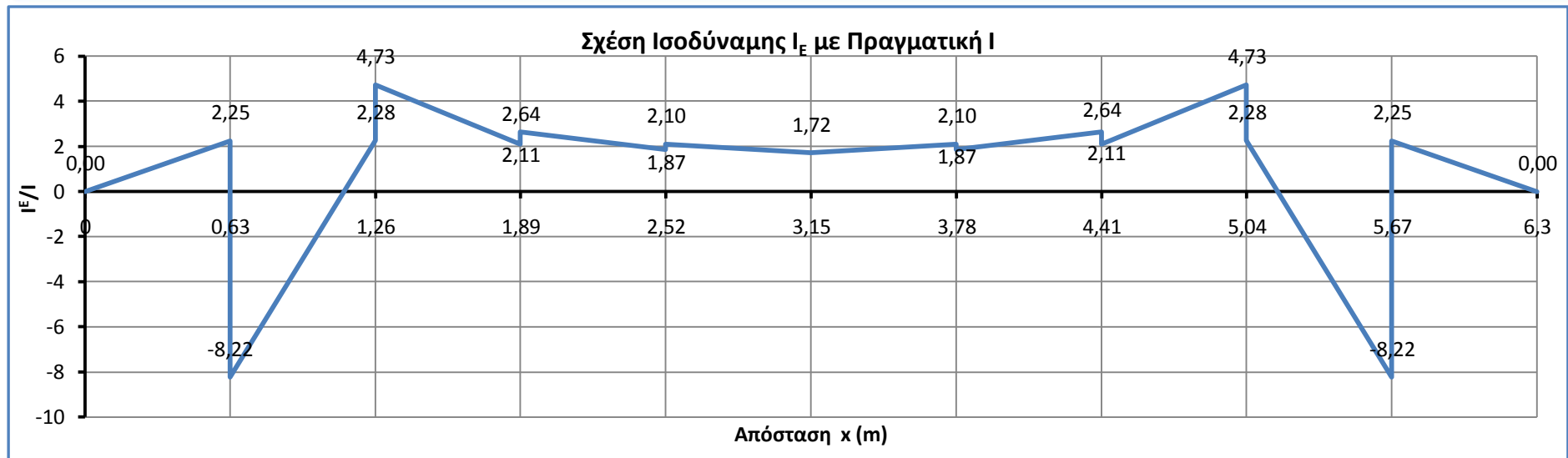
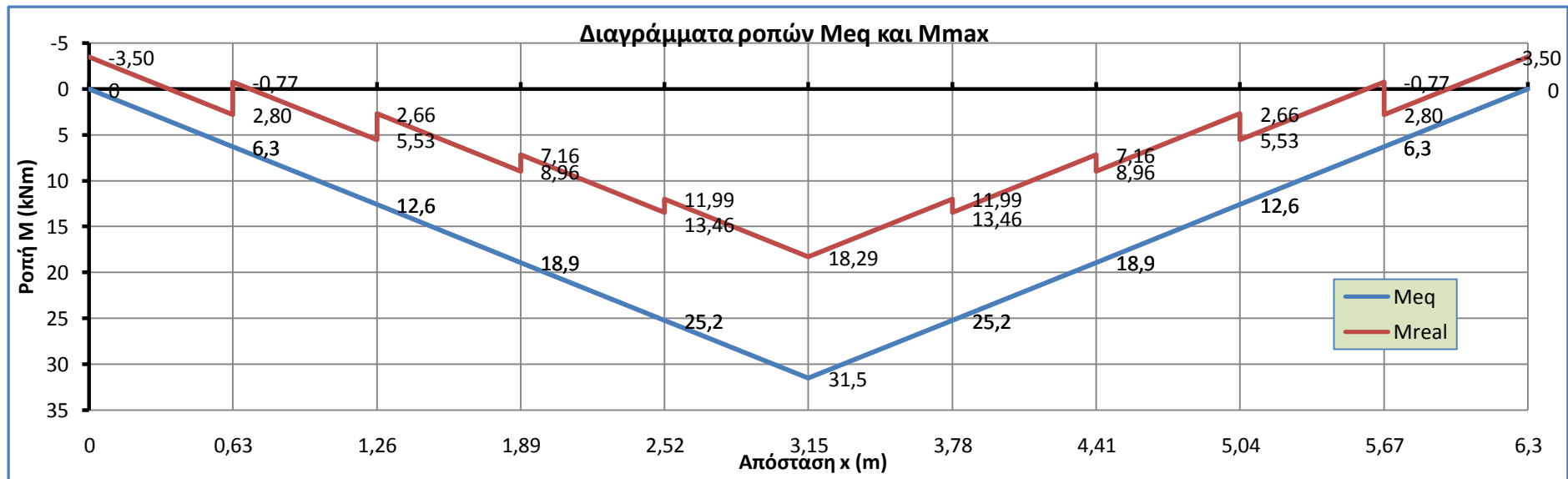
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		3,505	19,47	0	-3,50	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	19,68	6,3	2,80	2,25	1156,0
0,63	μετά	3,562	19,68	6,3	-0,77	-8,22	-4214,6
1,26	πριν	0,00	18,28	12,6	5,53	2,28	1167,9
1,26	μετά	2,872	18,28	12,6	2,66	4,73	2428,3
1,89	πριν	0,00	14,89	18,9	8,96	2,11	1081,7
1,89	μετά	1,806	14,89	18,9	7,16	2,64	1354,8
2,52	πριν	0,00	8,86	25,2	13,46	1,87	960,6
2,52	μετά	1,461	8,86	25,2	11,99	2,10	1077,6
3,15	-	0,00	0,00	31,5	18,29	1,72	883,1
3,78	πριν	0,00	8,86	25,2	11,99	2,10	1077,6
3,78	μετά	1,461	8,86	25,2	13,46	1,87	960,6
4,41	πριν	0,00	14,89	18,9	7,16	2,64	1354,8
4,41	μετά	1,806	14,89	18,9	8,96	2,11	1081,7
5,04	πριν	0,00	18,28	12,6	2,66	4,73	2428,3
5,04	μετά	2,872	18,28	12,6	5,53	2,28	1167,9
5,67	πριν	0,00	19,68	6,3	-0,77	-8,22	-4214,6
5,67	μετά	3,562	19,68	6,3	2,80	2,25	1156,0
6,3		3,505	19,47	0	-3,50	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	18,29

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
883,1	1766,3

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 8

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	UIC60
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	Κ
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	512,9

Σιδ/χιά	UIC 60
Σύνδεσμος	Κ μέτρια σφιγμένος
Δυσκαμψία	Μεταβαλλόμενη

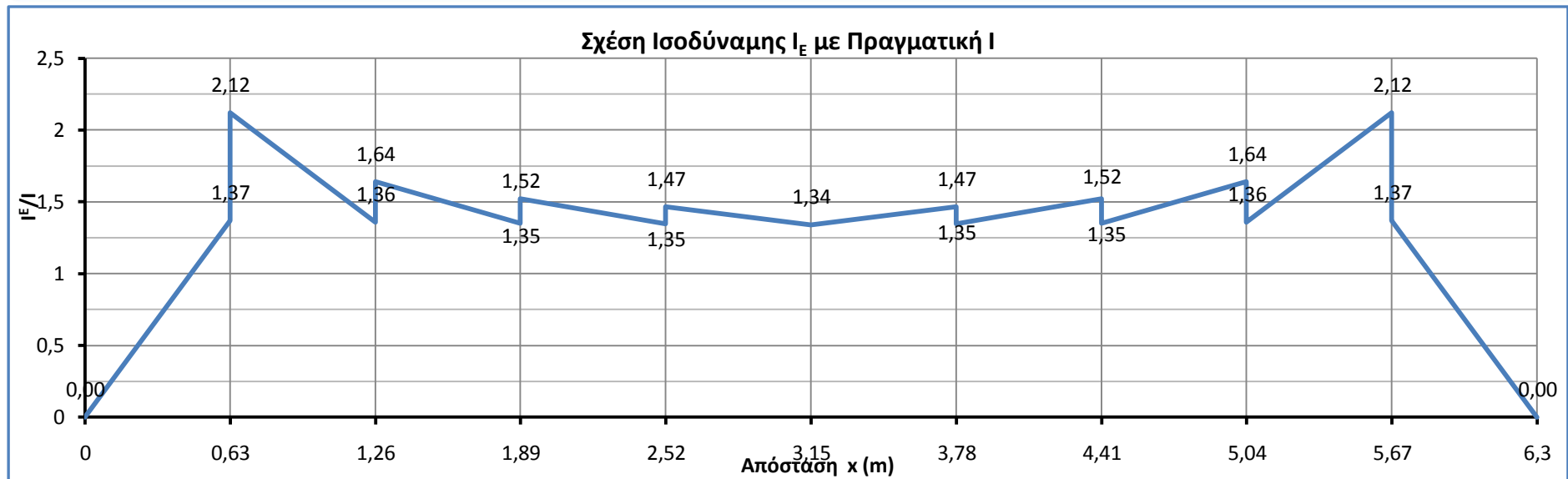
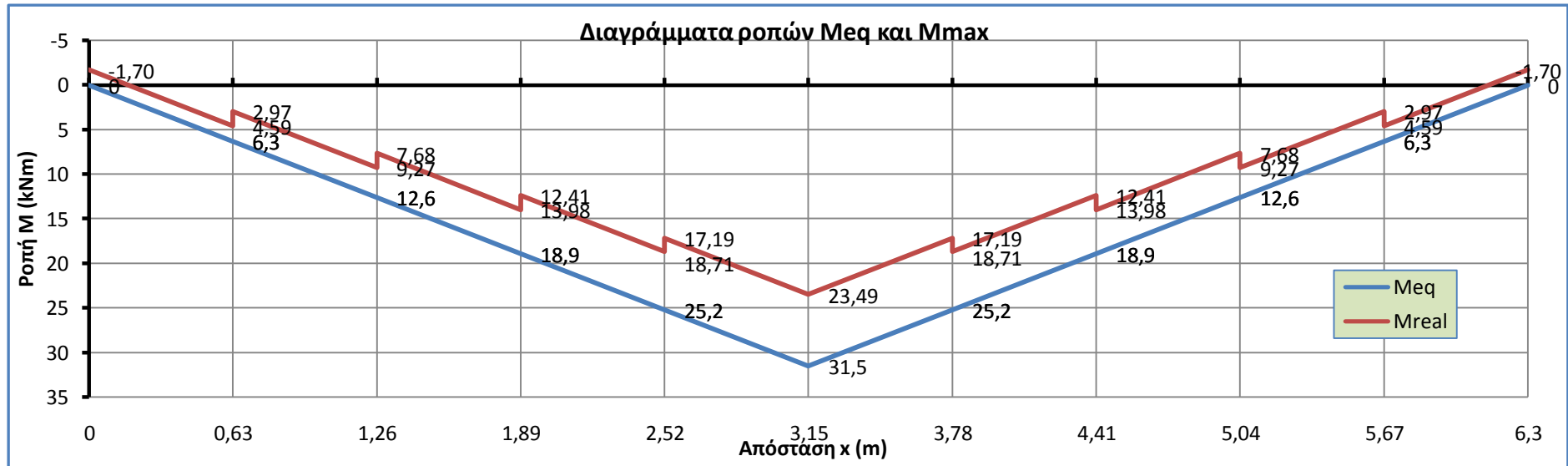
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		1,705	31,76	0	-1,71	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	30,91	6,3	4,60	1,37	703,2
0,63	μετά	1,626	30,91	6,3	2,97	2,12	1088,3
1,26	πριν	0,00	27,33	12,6	9,27	1,36	697,2
1,26	μετά	1,586	27,33	12,6	7,68	1,64	841,1
1,89	πριν	0,00	21,00	18,9	13,98	1,35	693,2
1,89	μετά	1,575	21,00	18,9	12,41	1,52	781,2
2,52	πριν	0,00	11,90	25,2	18,71	1,35	690,9
2,52	μετά	1,517	11,90	25,2	17,19	1,47	751,8
3,15	-	0,00	0,00	31,5	23,49	1,34	687,8
3,78	πριν	0,00	11,90	25,2	17,19	1,47	751,8
3,78	μετά	1,517	11,90	25,2	18,71	1,35	690,9
4,41	πριν	0,00	21,00	18,9	12,41	1,52	781,2
4,41	μετά	1,575	21,00	18,9	13,98	1,35	693,2
5,04	πριν	0,00	27,33	12,6	7,68	1,64	841,1
5,04	μετά	1,586	27,33	12,6	9,27	1,36	697,2
5,67	πριν	0,00	30,91	6,3	2,97	2,12	1088,3
5,67	μετά	1,626	30,91	6,3	4,60	1,37	703,2
6,3		1,705	31,76	0	-1,71	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	23,49

I _E (cm ⁴)	I _E total (cm ⁴)
687,8	1375,5

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



[Παρασκευάς Κ.]

ΕΠΙΛΥΣΗ 9ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

UIC60

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

K

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Χαλαρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

P (kN)	L (m)	a (m)	k
20	6,3	0,63	5

E (MPa)	I (cm ⁴)
210000	512,9

Σιδ/χιά	UIC 60
Σύνδεσμος	Κ χαλαρά σφιγμένος
Δυσκαμψία	K = 27.154 Nm/rad

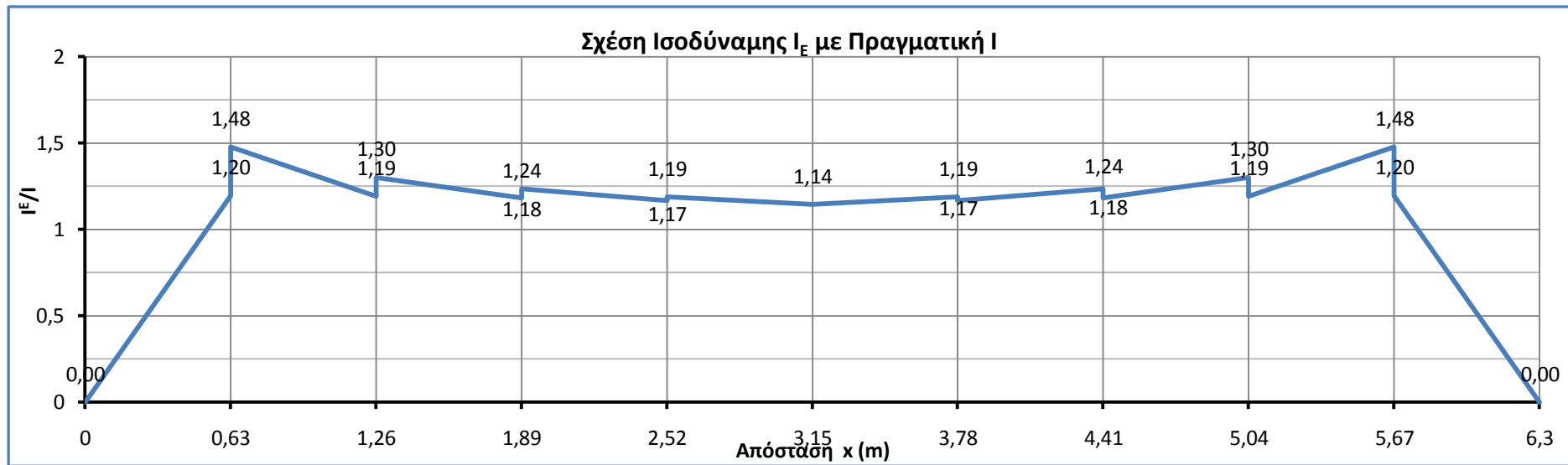
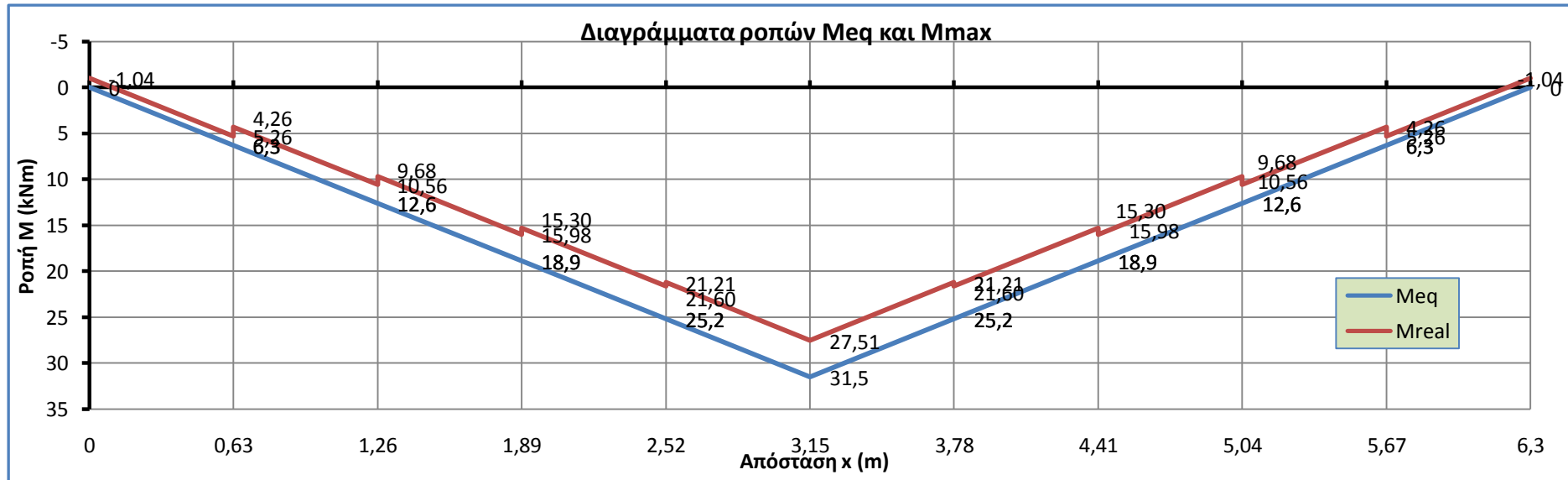
Διάγραμμα ροπών σιδηροτροχιάς

x (m)		Mσ (kNm)	φ (10 ⁻³ rad)	Meq (kNm)	Mreal (kNm)	Meq /Mreal	I _E (cm ⁴)
0		1,035	38,12	0	-1,04	0,00	0,0
0,63	πριν	0,00	36,88	6,3	5,26	1,20	613,7
0,63	μετά	1,002	36,88	6,3	4,26	1,48	757,9
1,26	πριν	0,00	32,55	12,6	10,56	1,19	611,8
1,26	μετά	0,884	32,55	12,6	9,68	1,30	667,6
1,89	πριν	0,00	25,04	18,9	15,98	1,18	606,6
1,89	μετά	0,680	25,04	18,9	15,30	1,24	633,6
2,52	πριν	0,00	14,25	25,2	21,60	1,17	598,4
2,52	μετά	0,387	14,25	25,2	21,21	1,19	609,3
3,15	-	0,00	0,00	31,5	27,51	1,14	587,2
3,78	πριν	0,00	14,25	25,2	21,21	1,19	609,3
3,78	μετά	0,387	14,25	25,2	21,60	1,17	598,4
4,41	πριν	0,00	25,04	18,9	15,30	1,24	633,6
4,41	μετά	0,680	25,04	18,9	15,98	1,18	606,6
5,04	πριν	0,00	32,55	12,6	9,68	1,30	667,6
5,04	μετά	0,884	32,55	12,6	10,56	1,19	611,8
5,67	πριν	0,00	36,88	6,3	4,26	1,48	757,9
5,67	μετά	1,002	36,88	6,3	5,26	1,20	613,7
6,3		1,035	38,12	0	-1,04	0,00	0,0

Mmax (eq)	Mmax (real)
31,5	27,51

I _E (cm ⁴)	I _{E total} (cm ⁴)
587,2	1174,5

Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



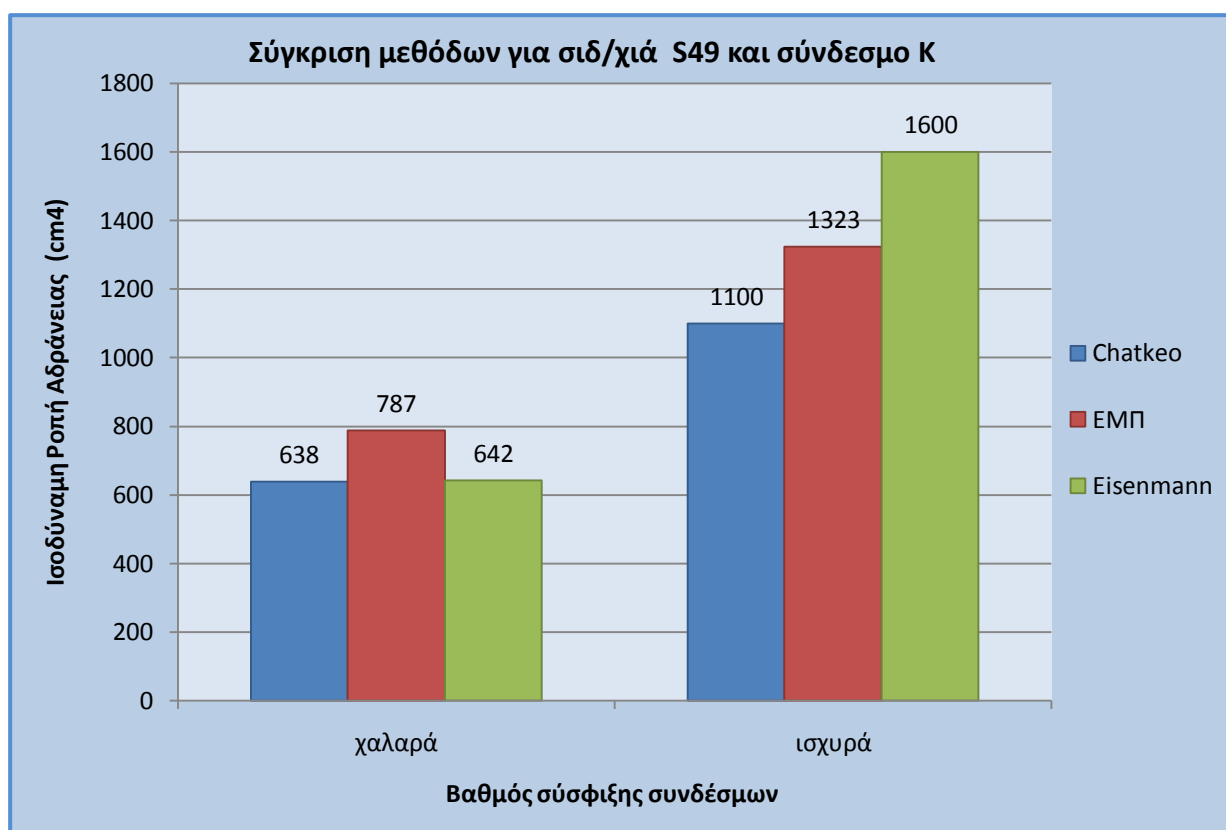
[Παρασκευάς Κ.]

Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται ομαδοποιημένα στα παρακάτω διαγράμματα.

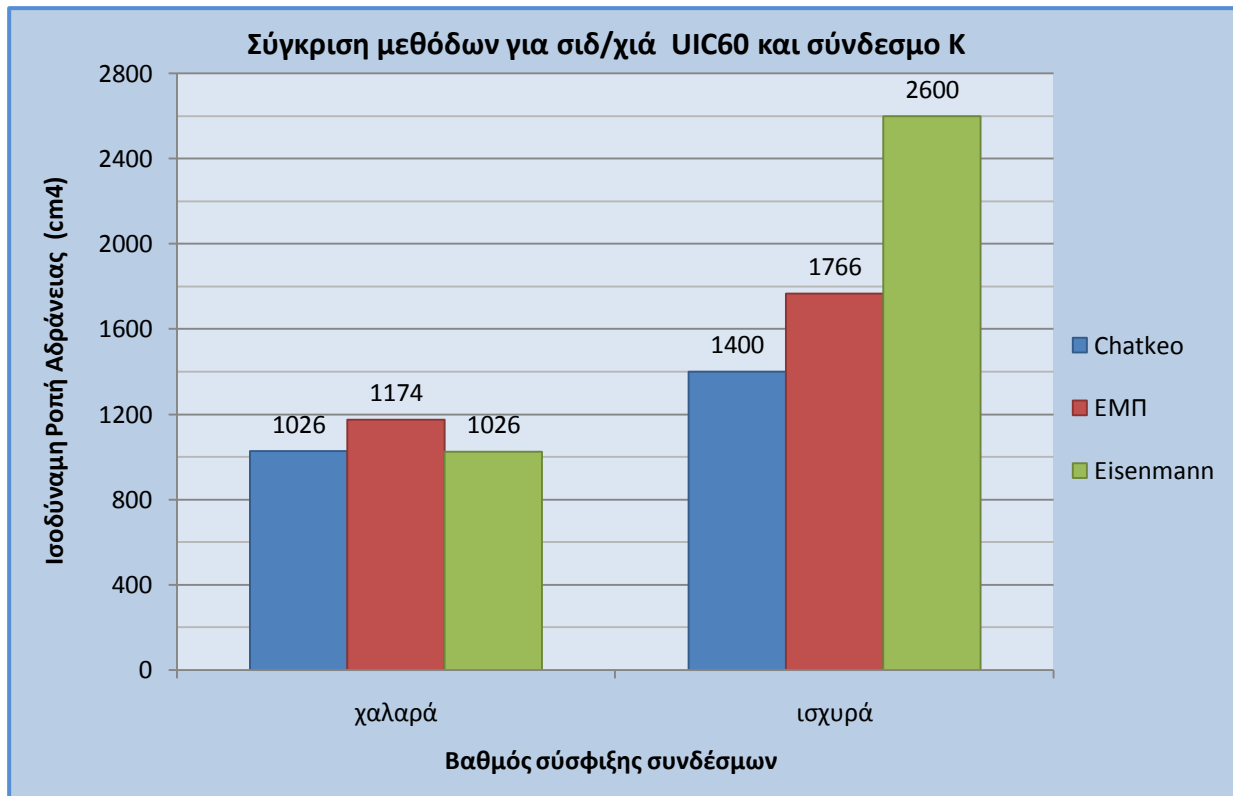
Πιο αναλυτικά, συγκρίνονται οι τιμές των IPA που προσδιορίστηκαν παραπάνω, με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά, από το εργαστήριο Σιδηροδρομικής Επιδομής του Πολυτεχνείου του Μονάχου (Eisenmann), καθώς επίσης και από τον Chatkeo (Σχήμα 5.6). Οι συγκρίσεις έχουν γίνει για δύο τύπους σιδηροτροχιών (S49 και UIC60) και για δύο διαφορετικούς βαθμούς σύσφιξης των συνδέσμων Κ (χαλαρά και ισχυρά). Έτσι, φαίνονται οι όποιες διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, απεικονίζονται και οι μεταβολές της IPA, σε σχέση με το διαφορετικό βαθμό σύσφιξης των συνδέσμων (Σχήμα 5.7). Η σύγκριση γίνεται και πάλι για τις σιδηροτροχιές S49 και UIC60.

Τέλος, συγκρίνονται οι διαφορετικές τιμές της IPA, σε σχέση με τη χρήση διαφορετικών συνδέσμων επί της ίδιας σιδηροτροχιάς (Σχήμα 5.8). Η σιδηροτροχιά που εξετάζεται είναι η U33 και οι τρεις διαφορετικοί σύνδεσμοι είναι οι: Pandrol, RN με ελαστικό υπόθεμα και RN χωρίς ελαστικό υπόθεμα.



Σχήμα 5.6.α
Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού IPA
για σιδ/χιά S49 και σύνδεσμο Κ
[Παρασκευάς Κ.]



Σχήμα 5.6.β
Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού IPA
για σιδ/χιά UIC60 και σύνδεσμο Κ
[Παρασκευάς Κ.]

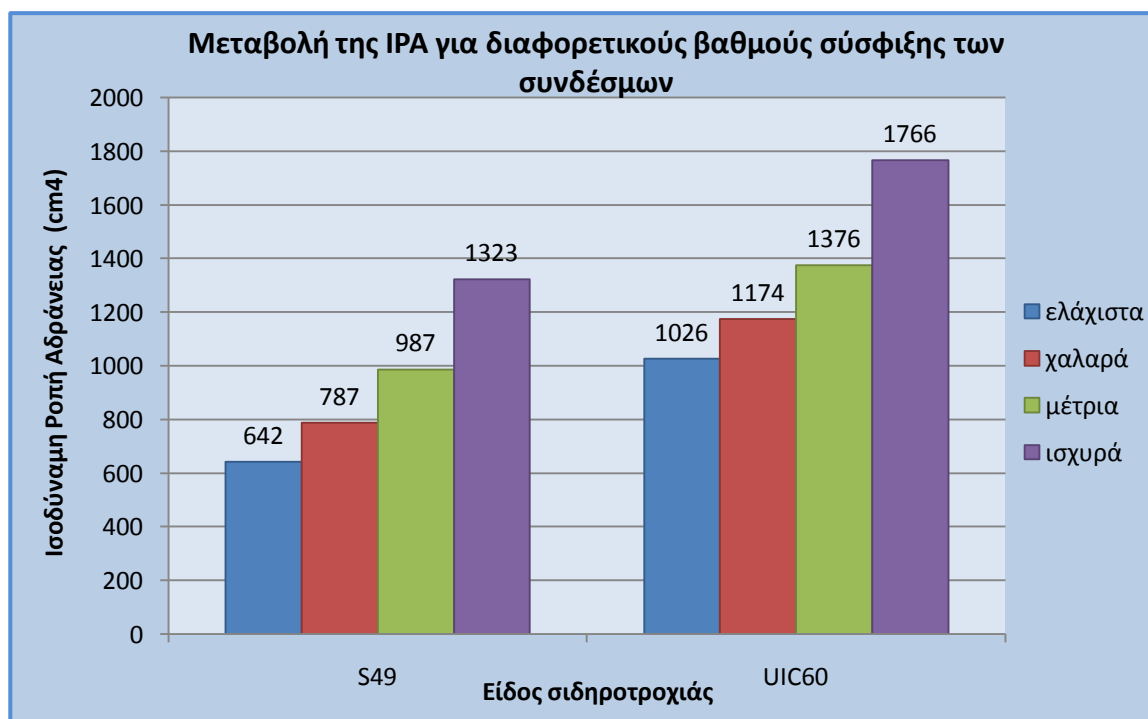
Από τα δύο παραπάνω γραφήματα, φαίνεται ξεκάθαρα, ότι η μέθοδος των τάσεων που χρησιμοποιήθηκε, στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι πολύ ακριβής, καθώς προσδιορίζει με μεγάλη ακρίβεια, την IPA τόσο για τη σιδηροτροχιά S49, όσο και για την UIC60.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά στη σιδηροτροχιά S49, βλέπουμε ότι:

- Όταν οι σύνδεσμοι είναι χαλαροί, η IPA που υπολογίστηκε, είναι κατά 22% μεγαλύτερη, από την IPA που υπολογίζει ο Eisenmann και ο Chatkeo. Αυτή η διαφορά, αν και φαίνεται σημαντική, δεν είναι, καθώς η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο των τάσεων, δεν λαμβάνει συνδέσμους τελείως χαλαρούς, (όπως ο Chatkeo και ο Eisenmann), αλλά χαλαρούς με κάποια υπάρχουσα δυστρεψία. Αυτή η δυστρεψία είναι η αιτία που η υπολογισμένη IPA, είναι μεγαλύτερη από την IPA, των άλλων δύο μεθόδων.
- Όταν οι σύνδεσμοι είναι ισχυρά σφιγμένοι, η IPA που υπολογίστηκε είναι εντός των δύο τιμών, που προσδιορίζονται από τις άλλες δύο μεθόδους. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται και πάλι στις διαφορετικές αρχικές συνθήκες που έχουν ληφθεί στις τρεις μεθόδους.

Όσον αφορά στη σιδηροτροχιά UIC60, τα συμπεράσματα είναι τα ίδια με αυτά για τη σιδηροτροχιά S49, με τη μόνη διαφορά ότι τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας συμφωνούν περισσότερο με τα αποτελέσματα της θεωρίας του Chatkeo.

Παρακάτω απεικονίζονται οι μεταβολές της IPA, σε σχέση με το διαφορετικό βαθμό σύσφιξης των συνδέσμων.



Σχήμα 5.7
Μεταβολή της IPA, σε σχέση με τους διαφορετικούς
Βαθμούς σύσφιξης των συνδέσμων
[Παρασκευάς Κ.]

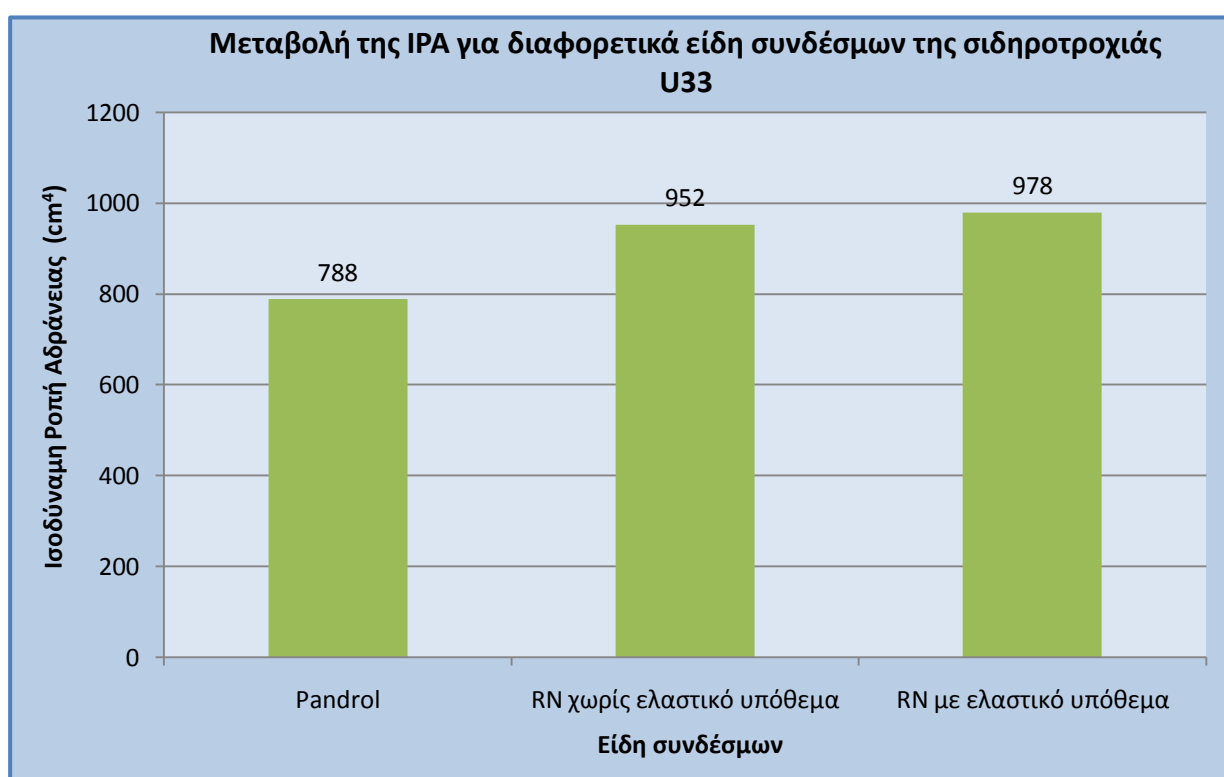
Στο παραπάνω γράφημα, φαίνεται ποσοτικά η αύξηση της IPA των σιδηροτροχιών S49 και UIC60, καθώς αυξάνεται ο βαθμός σύσφιξης των συνδέσμων, από τον πλέον χαλαρό μέχρι τον πολύ ισχυρό.

Στην περίπτωση της σιδηροτροχιάς S49, η αύξηση είναι σχεδόν 100% (από 642cm^4 σε 1323cm^4), ενώ στην περίπτωση της UIC60, η αύξηση είναι 72% (από 1026cm^4 σε 1766cm^4). Αυτό που επίσης είναι εμφανές, είναι η απότομη αύξηση της IPA, καθώς μεταβαίνουμε από τον μέτρια στον ισχυρά σφιγμένο σύνδεσμο. Αυτή η αύξηση δεν έχει τον ίδιο ρυθμό στις μεταβάσεις μεταξύ των λιγότερο ισχυρά σφιγμένων συνδέσμων. Δηλαδή, η επιπλέον δυσκαμψία που αποκτά η σιδηροδρομική εσχάρα, καθώς οι σύνδεσμοι από χαλαρά σφιγμένοι, γίνονται μέτρια σφιγμένοι, είναι

μικρότερη από την αντίστοιχη δυσκαμψία, κατά τη μετάβαση από μέτρια σφιγμένους συνδέσμους, σε ισχυρά σφιγμένους. Έτσι, γίνεται ξεκάθαρος ο σπουδαίος ρόλος των συνδέσμων στην IPA της εσχάρας, καθώς μπορούν να τη μετατρέψουν από μία απλή αρθρωτή εσχάρα (Σχήμα 4.2.α), σε μία άκαμπτη εσχάρα Vierendell (Σχήμα 4.2.β).

Επιπλέον, εύκολα διακρίνεται και ο ρόλος της ροπής αδράνειας της σιδηροτροχιάς. Χαρακτηριστικά, η IPA εσχάρας, με σιδηροτροχιές S49 και μέτρια σφιγμένους συνδέσμους τύπου K, είναι περίπου ίση με την IPA εσχάρας, με σιδηροτροχιές UIC60 και συνδέσμους ελάχιστα σφιγμένους.

Παρακάτω απεικονίζονται οι μεταβολές της IPA, σε σχέση με το διαφορετικό είδος συνδέσμου που χρησιμοποιείται, για σιδηροτροχιά U33.



Σχήμα 5.8
Μεταβολή της IPA, σε σχέση με τα
διαφορετικά είδη συνδέσμων
[Παρασκευάς Κ.]

Από το παραπάνω γράφημα, φαίνεται ξεκάθαρα, ότι εκτός από το βαθμό σύσφιξης των συνδέσμων, και το είδος του ίδιου του συνδέσμου, επηρεάζει την IPA μιας σιδηροδρομικής εσχάρας. Αυτό, οφείλεται στη διαφορετική χαρακτηριστική καμπύλη που έχει ο κάθε σύνδεσμος, γεγονός που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη ή μικρότερη δυστρεψία, για την ίδια στροφή. Αναλυτικότερα, σύνδεσμοι με υψηλότερη

χαρακτηριστική καμπύλη, δίνουν μεγαλύτερη δυσκαμψία στην εσχάρα, από συνδέσμους με χαμηλότερη χαρακτηριστική καμπύλη.

Έτσι, οι σύνδεσμοι Pandrol, δίνουν μικρότερη δυσκαμψία στην εσχάρα, από τους συνδέσμους RN, γεγονός που συμφωνεί με το Σχήμα 4.20, όπου η χαρακτηριστική καμπύλη των συνδέσμων Pandrol, βρίσκεται χαμηλότερα από την αντίστοιχη των συνδέσμων RN.

Επιπλέον, φαίνεται και ο ρόλος που έχει η χρήση ελαστικών υποθεμάτων. Χαρακτηριστικά, φαίνεται ότι, η χρήση συνδέσμων RN με ελαστικό υπόθεμα, έχει σαν αποτέλεσμα, αυξημένη IPA της εσχάρας, σε σχέση με τη χρήση των ίδιων συνδέσμων, απουσία ελαστικού υποθέματος.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, συμφωνούν απόλυτα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.1.2, όπου περιγράφονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την IPA μιας σιδηροδρομικής εσχάρας. Αυτό, επιβεβαιώνει το γεγονός ότι **η μέθοδος των τάσεων που χρησιμοποιήθηκε, είναι ικανή να περιγράψει και να υπολογίσει με θεωρητικό τρόπο την IPA μιας εσχάρας, αφού λαμβάνει υπόψη της, το είδος της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 5.6 και Σχήμα 5.7), το είδος του χρησιμοποιούμενου συνδέσμου (Σχήμα 5.8), το βαθμό σύσφιξής του (σχήμα 5.7), αλλά και κατ' επέκταση την απόσταση των στρωτήρων μεταξύ τους (βλ. αιτιολόγηση Κεφάλαιο 4.1.2.3).**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης της IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας. Έτσι, προκύπτουν τα παρακάτω:

- Κατά τη γεωμετρική προσέγγιση

- ✓ Εξετάζοντας την IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας γεωμετρικά, προέκυψε ότι, η ανάλυση αυτή δεν είναι ικανή να περιγράψει και να προσδιορίσει την IPA, αλλά αντίθετα, έχει μεμονωμένη χρήση. Η χρήση αυτή, περιορίζεται στον υπολογισμό των ροπών αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών, στην περίπτωση δηλαδή, που οι σύνδεσμοι της εσχάρας είναι ελάχιστα σφιγμένοι. Σε αυτήν την ακραία περίπτωση, η IPA όλης της εσχάρας είναι περίπου ίση με το άθροισμα των ροπών αδράνειας (κατά τον άξονα yy) των δύο σιδηροτροχιών, γι αυτό και η γεωμετρική προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί εδώ. Στην περίπτωση που οι σύνδεσμοι είναι περισσότερο σφιγμένοι, η σιδηροδρομική εσχάρα, συμπεριφέρεται διαφορετικά, από ότι πριν, κατά τη φόρτισή της και έτσι η IPA της δεν μπορεί να προσδιοριστεί γεωμετρικά, αφού η δυστρεψία των συνδέσμων δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη με γεωμετρική προσέγγιση.
- ✓ Επιπλέον, προσπαθώντας να προσδιοριστεί η IPA της εσχάρας γεωμετρικά, έγινε αντιληπτό ότι, η γεωμετρία των στρωτήρων της εσχάρας, δεν παίζει απολύτως κανένα ρόλο στην IPA της. Πιο αναλυτικά, οι στρωτήρες έχουν διαστάσεις, που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των σιδηροτροχιών. Αυτό, καθιστά τους στρωτήρες πρακτικά άκαμπτους κατά τον πλευρικό λυγισμό της εσχάρας, με αποτέλεσμα, η τιμή της υπολογισθείσας IPA να είναι μεγαλύτερη από την πειραματική, κατά 10.000 περίπου. Επίσης, αφού οι στρωτήρες είναι άκαμπτοι κατά τη φόρτιση της εσχάρας με δύναμη επί του άξονα yy, δεν έχει λογική συνέπεια να συνυπολογίζονται στην συνολική IPA, αφού από το σχήμα 4.1, φαίνεται ότι μόνο τα στοιχεία της εσχάρας που μπορούν να προσομοιωθούν με μία ελαστική, ιδανική, ευθύγραμμη ράβδο, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της IPA της.
Όμως, παρόλο που η γεωμετρία των στρωτήρων δεν παίζει κανένα ρόλο στην IPA της εσχάρας, το είδος τους (μπετονένιοι, ξύλινοι, κτλ), έχει μεγάλη σημασία. Πιο συγκεκριμένα, το είδος των στρωτήρων, καθορίζει και το είδος του συνδέσμου που μπορεί να εφαρμοστεί. Έτσι, στρωτήρες που υποστηρίζουν συνδέσμους με μεγάλη δυστρεψία, προσδίδουν στην εσχάρα μεγαλύτερη

δυσκαμψία, άρα και IPA, σε σχέση με στρωτήρες που υποστηρίζουν συνδέσμους με μικρότερη δυστρεψία. Υπό το πρίσμα αυτό, οι στρωτήρες επηρεάζουν την IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας έμμεσα (μέσω των συνδέσμων) και όχι άμεσα.

• **Κατά την προσέγγιση με τη μέθοδο των τάσεων**

- ✓ Εξετάζοντας την IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας, με τη μέθοδο των τάσεων, προέκυψαν αποτελέσματα, που είναι πολύ κοντά με τα πειραματικά. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, **η έννοια της IPA, πρέπει να εξετάζεται και να προσδιορίζεται με μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη τους τις εντάσεις που δημιουργούνται.** Έτσι, το πρόβλημα της γεωμετρικής μεθόδου, που δεν μπορούσε να συμπεριλάβει τη συμπεριφορά των συνδέσμων, απαλείφεται, αφού μέθοδοι που εκμεταλλεύονται τις αναπτυσσόμενες τάσεις, μπορούν να περιγράψουν πλήρως τη δυστρεψία των συνδέσμων και κατ' επέκταση τη δυσκαμψία που αυτοί προσδίδουν στην εσχάρα. Έτσι, η μέθοδος των τάσεων, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπόρεσε με επιτυχία να περιγράψει και να υπολογίσει την IPA σιδηροδρομικής εσχάρας.
- ✓ Επιπλέον, από τα διαγράμματα I_E/I , που παρατέθηκαν παραπάνω, φαίνεται ξεκάθαρα ότι: **η IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας, δεν είναι σταθερή κατά το μήκος της.** Αυτό είναι απολύτως λογικό, αφού οι σύνδεσμοι αντιστέκονται στη στροφή της σιδηροτροχιάς ως προς το στρωτήρα, ασκώντας στρεπτικές ροπές, οι οποίες μειώνουν την ένταση της σιδηροτροχιάς τοπικά, και έτσι παρατηρείται η αντίστοιχη **τοπική αύξηση της δυσκαμψίας της εσχάρας.** Γι αυτό το λόγο η IPA μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο παρουσιάζοντας «άλματα», στις θέσεις που υπάρχουν σύνδεσμοι. Αξίζει να αναφερθεί, ότι το συμπέρασμα αυτό, έχει διατυπωθεί από τον Meier, χωρίς όμως να έχει αποδειχθεί θεωρητικά, ούτε και να έχει ποσοτικοποιηθεί, όπως έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- ✓ Επιπροσθέτως, από τα διαγράμματα I_E/I , βγαίνει το συμπέρασμα ότι **οι σύνδεσμοι που βρίσκονται στα άκρα της εσχάρας υπό λυγισμό, αναπτύσσουν τη μεγαλύτερη τοπική δυσκαμψία σε σχέση με τους υπόλοιπους. Αντίθετα, ο μεσαίος σύνδεσμος είναι αυτός που προσδίδει τη μικρότερη τοπική δυσκαμψία στην εσχάρα.** Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η αναπτυσσόμενη στροφή σε κάθε σημείο της εσχάρας. Πιο συγκεκριμένα, στα άκρα, η στροφή της εσχάρας είναι η μέγιστη που παρατηρείται, συνεπώς, οι σύνδεσμοι εκεί αναπτύσσουν τις μέγιστες παρατηρούμενες στρεπτικές ροπές. Αντίθετα, στο μέσο, η κλίση του βέλους κάμψης της εσχάρας είναι ουσιαστικά μηδέν, έχοντας σαν αποτέλεσμα η στροφή μεταξύ σιδηροτροχιάς και στρωτήρα να είναι και αυτή μηδέν. Άρα ο μεσαίος σύνδεσμος δεν αναπτύσσει ουσιαστικά καμιά ροπή.

- ✓ Συνεπώς, καθίσταται σαφές ότι το πιο αδύναμο σημείο της εσχάρας είναι το μέσο της, αφού εκεί συνυπάρχει η μικρότερη τοπική δυσκαμψία της εσχάρας και η μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη ροπή. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι η εσχάρα έχει ομοιόμορφη IPA, ίση με την τοπική IPA στο μέσο, είναι υπέρ της ασφαλείας, αλλά μπορεί ορισμένες φορές να είναι αντισοικονομική θεώρηση.
- ✓ Τέλος, κατά τον προσδιορισμό της IPA σύμφωνα με τη μέθοδο των τάσεων, δεν ελήφθη πουθενά υπόψη το πλάτος της σιδηροδρομικής γραμμής. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που βρέθηκαν, συμφωνούν πολύ καλά με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, το πλάτος της σιδηροδρομικής γραμμής δεν παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας. Οποιοσδήποτε διαφορές μεταξύ σιδηροδρομικών γραμμών κανονικού και μετρικού εύρους, οφείλονται αποκλειστικά στο γεγονός ότι, οι χρησιμοποιούμενες σιδηροτροχιές, στις παραπάνω δύο περιπτώσεις, είναι διαφορετικές. Έτσι, οι διαφορετικές σιδηροτροχιές είναι που διαφοροποιούν την IPA της σιδηροδρομικής εσχάρας και όχι το εύρος της.

ΠΡΟΤΕΙΝΕΤΑΙ

- Η διερεύνηση της μεταβολής της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας της σιδηροδρομικής εσχάρας σε σχέση με τη μεταβολή της θλιπτικής δύναμης που δρα σε αυτή. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται να διερευνηθεί, εάν και κατά πόσο η μεταβολή της δύναμης των 20kN, επηρεάζει την τιμή της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας της σιδηροδρομικής εσχάρας. Σπουδαίο ρόλο σε αυτή την κατεύθυνση παίζει η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των συνδέσμων.
- Η διερεύνηση της μεταβολής της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας της σιδηροδρομικής εσχάρας σε σχέση με τη μεταβολή του εύρους της. Αναλυτικότερα, στη μέθοδο των τάσεων δεν συμπεριλήφθηκε ο παράγοντας «εύρος της εσχάρας», καθώς αντικαταστάθηκε, εμμέσως, από τον τύπο της σιδηροτροχιάς. Όμως, κάτι τέτοιο έχει περιθώριο σφάλματος, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι και η διεθνής βιβλιογραφία δεν έχει βρει λύση σε αυτό το πρόβλημα.
- Όπως αναλύθηκε, η σιδηροτροχιά καθώς φορτίζεται από το εγκάρσιο σημειακό φορτίο των 20kN, υπόκειται σε στρεπτοκαμπτικό λυισμό. Αυτή η στρέψη δεν έχει ληφθεί υπόψη, συνεπώς προτείνεται η επιρροή της στην τιμή της Ισοδύναμης Ροπής Αδράνειας της εσχάρας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΥΤΟΥΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά τις στατικές αναλύσεις την σιδηροδρομικής εσχάρας. Εκεί, φαίνονται τα δεδομένα (φορτίσεις, ροπές αδράνειας, εμβαδόν διατομής, μέτρο ελαστικότητας, βαθμοί ελευθερίας κόμβων, δυσκαμψίες ελατηρίων), οι προκύπτουσες μετακινήσεις (μετακινήσεις κατά y και στροφές κατά z), καθώς επίσης και οι αναπτυσσόμενες στα ελατήρια ροπές.

ΕΠΙΛΥΣΗ 1

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

RN με ελαστικό υπόθεμα

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,005898	0,000003319

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			52279
2	0,63	3				53279
3	1,26	3				57810,8
4	1,89	3				68069
5	2,52	3				97358,8
6	3,15	3				97358,8
7	3,78	3				97358,8
8	4,41	3				68069
9	5,04	3				57810,8
10	5,67	3				53279
11	6,3	3	οχο			52279

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	Fx (N)	Fy (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	Fx (N)	Fy (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-4,24E-02
2	0	-2,67E-02	-4,15E-02
3	0	-5,18E-02	-3,70E-02
4	0	-7,28E-02	-2,87E-02
5	0	-8,73E-02	-1,65E-02
6	0	-9,28E-02	-4,65E-10
7	0	-8,73E-02	1,65E-02
8	0	-7,28E-02	2,87E-02
9	0	-5,18E-02	3,70E-02
10	0	-2,67E-02	4,15E-02
11	0	0	4,24E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	2215,77
2			2213,16
3			2139,04
4			1953,65
5			1603,79
6			0,00
7			-1603,79
8			-1953,65
9			-2139,04
10			-2213,16
11		10000	-2215,77

ΕΠΙΛΥΣΗ 2

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

RN χωρίς ελαστικό υπόθεμα

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,005898	0,000003319

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	K _x (Nm/rad)	K _y (Nm/rad)	K _z (Nm/rad)
1	0	3	οχο			49091
2	0,63	3				49091
3	1,26	3				52564
4	1,89	3				62207
5	2,52	3				84353
6	3,15	3				84353
7	3,78	3				84353
8	4,41	3				62207
9	5,04	3				52564
10	5,67	3				49091
11	6,3	3	οχο			49091

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	F _x (N)	F _y (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	F _x (N)	F _y (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-4,38E-02
2	0	-2,67E-02	-4,29E-02
3	0	-5,34E-02	-3,82E-02
4	0	-7,51E-02	-2,96E-02
5	0	-9,01E-02	-1,70E-02
6	0	-9,57E-02	-4,43E-10
7	0	-9,01E-02	1,70E-02
8	0	-7,51E-02	2,96E-02
9	0	-5,34E-02	3,82E-02
10	0	-2,67E-02	4,29E-02
11	0	0	4,38E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	2149,51
2			2105,12
3			2007,20
4			1841,93
5			1434,33
6			0,00
7			-1434,33
8			-1841,93
9			-2007,20
10			-2105,12
11		10000	-2149,51

ΕΠΙΛΥΣΗ 3

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

U33

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

PANDROL

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,005898	0,000003319

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			19298
2	0,63	3				19298
3	1,26	3				20529
4	1,89	3				25250
5	2,52	3				41000
6	3,15	3				25250
7	3,78	3				41000
8	4,41	3				25250
9	5,04	3				20529
10	5,67	3				19298
11	6,3	3	οχο			19298

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα Ε,Α,Ι
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	Fx (N)	Fy (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	Fx (N)	Fy (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-5,71E-02
2	0	-3,57E-02	-5,53E-02
3	0	-6,88E-02	-4,87E-02
4	0	-9,62E-02	-3,73E-02
5	0	-1,12E-01	-2,11E-02
6	0	-1,22E-01	-2,49E-10
7	0	-1,12E-01	2,11E-02
8	0	-9,62E-02	3,73E-02
9	0	-6,88E-02	4,87E-02
10	0	-3,57E-02	5,53E-02
11	0	0	5,71E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	1102,71
2			1066,99
3			999,96
4			942,80
5			866,13
6			0,00
7			-866,13
8			-942,80
9			-999,96
10			-1066,99
11		10000	-1102,71

ΕΠΙΛΥΣΗ 4

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Ισχυρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,006298	0,00000321

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			190114
2	0,63	3				200000
3	1,26	3				190476
4	1,89	3				154256
5	2,52	3				95575
6	3,15	3				95575
7	3,78	3				95575
8	4,41	3				154256
9	5,04	3				190476
10	5,67	3				200000
11	6,3	3	οχο			190114

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	F _x (N)	F _y (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	F _x (N)	F _y (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-2,11E-02
2	0	-1,38E-02	-2,19E-02
3	0	-2,76E-02	-2,09E-02
4	0	-4,01E+02	-1,78E-02
5	0	-4,96E-02	-1,13E-02
6	0	-5,35E-02	-6,01E-10
7	0	-4,96E-02	1,13E-02
8	0	-4,01E+02	1,78E-02
9	0	-2,76E-02	2,09E-02
10	0	-1,38E-02	2,19E-02
11	0	0	2,11E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	4014,56
2			4384,91
3			3989,09
4			2745,95
5			1083,65
6			0,00
7			-1083,65
8			-2745,95
9			-3989,09
10			-4384,91
11		10000	-4014,56

ΕΠΙΛΥΣΗ 5

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,006298	0,00000321

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			89950
2	0,63	3				93082
3	1,26	3				67540
4	1,89	3				40476
5	2,52	3				66667
6	3,15	3				66667
7	3,78	3				66667
8	4,41	3				40476
9	5,04	3				67540
10	5,67	3				93082
11	6,3	3	οχο			89950

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	F _x (N)	F _y (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	F _x (N)	F _y (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-3,63E-02
2	0	-2,32E-02	-3,64E-02
3	0	-4,56E-01	-3,37E-02
4	0	-6,51E-02	-2,74E-02
5	0	-7,91E-02	-1,61E-02
6	0	-8,45E-02	-3,69E-10
7	0	-7,91E-02	1,61E-02
8	0	-6,51E-02	2,74E-02
9	0	-4,56E-01	3,37E-02
10	0	-2,32E-02	3,64E-02
11	0	0	3,63E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	3260,70
2			3383,87
3			2278,24
4			1107,07
5			1074,50
6			0,00
7			-1074,50
8			-1107,07
9			-2278,24
10			-3383,87
11		10000	-3260,70

ΕΠΙΛΥΣΗ 6

<u>ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:</u>	S49
<u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:</u>	K
<u>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:</u>	Χαλαρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,006298	0,00000321

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			27154
2	0,63	3				27154
3	1,26	3				27154
4	1,89	3				27154
5	2,52	3				27154
6	3,15	3				27154
7	3,78	3				27154
8	4,41	3				27154
9	5,04	3				27154
10	5,67	3				27154
11	6,3	3	οχο			27154

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	Fx (N)	Fy (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	Fx (N)	Fy (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-5,51E-02
2	0	-3,46E-02	-5,36E-02
3	0	-6,67E-02	-4,75E-02
4	0	-9,36E-02	-3,68E-02
5	0	-1,12E-01	-2,11E-02
6	0	-1,19E-01	-2,86E-10
7	0	-1,12E-01	2,11E-02
8	0	-9,36E-02	3,68E-02
9	0	-6,67E-02	4,75E-02
10	0	-3,46E-02	5,36E-02
11	0	0	5,51E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	1497,32
2			1455,38
3			1290,49
4			998,47
5			571,92
6			0,00
7			-571,92
8			-998,47
9			-1290,49
10			-1455,38
11		10000	-1497,32

ΕΠΙΛΥΣΗ 7

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

UIC60

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

K

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Ισχυρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,007687	0,000005129

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	K _x (Nm/rad)	K _y (Nm/rad)	K _z (Nm/rad)
1	0	3	οχο			180000
2	0,63	3				181000
3	1,26	3				157067
4	1,89	3				121325
5	2,52	3				164929
6	3,15	3				111111
7	3,78	3				164929
8	4,41	3				121325
9	5,04	3				157067
10	5,67	3				181000
11	6,3	3	οχο			180000

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	F _x (N)	F _y (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	F _x (N)	F _y (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-1,95E-02
2	0	-1,25E-02	-1,97E-02
3	0	-2,47E-02	-1,83E-02
4	0	-3,53E-02	-1,49E-02
5	0	-4,30E-02	-8,86E-03
6	0	-4,60E-02	-3,09E-10
7	0	-4,30E-02	8,86E-03
8	0	-3,53E-02	1,49E-02
9	0	-2,47E-02	1,83E-02
10	0	-1,25E-02	1,97E-02
11	0	0	1,95E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	3504,84
2			3561,88
3			2871,95
4			1806,02
5			1460,95
6			0,00
7			-1460,95
8			-1806,02
9			-2871,95
10			-3561,88
11		10000	-3504,84

ΕΠΙΛΥΣΗ 8

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

UIC60

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

K

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Μέτριος

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,007687	0,000005129

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			53697
2	0,63	3				52599
3	1,26	3				58016
4	1,89	3				74993
5	2,52	3				127547
6	3,15	3				127547
7	3,78	3				127547
8	4,41	3				74993
9	5,04	3				58016
10	5,67	3				52599
11	6,3	3	οχο			53697

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	F _x (N)	F _y (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	F _x (N)	F _y (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-3,18E-02
2	0	-1,99E-02	-3,09E-02
3	0	-3,85E-02	-2,73E-02
4	0	-5,39E-02	-2,10E-02
5	0	-6,44E-02	-1,19E-02
6	0	-6,84E-02	-2,46E-02
7	0	-6,44E-02	1,19E-02
8	0	-5,39E-02	2,10E-02
9	0	-3,85E-02	2,73E-02
10	0	-1,99E-02	3,09E-02
11	0	0	3,18E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	1705,30
2			1625,98
3			1585,80
4			1574,68
5			1517,49
6			0,00
7			-1517,49
8			-1574,68
9			-1585,80
10			-1625,98
11		10000	-1705,30

ΕΠΙΛΥΣΗ 9

ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ:

UIC60

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ:

K

ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ:

Χαλαρός

ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ομάδες	E (Pa)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,1E+11	0,007687	0,000005129

Κόμβοι	x (m)	y (m)	Δεσμεύσεις	Kx (Nm/rad)	Ky (Nm/rad)	Kz (Nm/rad)
1	0	3	οχο			27154
2	0,63	3				27154
3	1,26	3				27154
4	1,89	3				27154
5	2,52	3				27154
6	3,15	3				27154
7	3,78	3				27154
8	4,41	3				27154
9	5,04	3				27154
10	5,67	3				27154
11	6,3	3	οχο			27154

Στοιχεία	Κόμβος αρχής i	Κόμβος πέρατος j	Τύπος	Ομάδα E,A,I
1	1	2	P2	1
2	2	3	P2	1
3	3	4	P2	1
4	4	5	P2	1
5	5	6	P2	1
6	6	7	P2	1
7	7	8	P2	1
8	8	9	P2	1
9	9	10	P2	1
10	10	11	P2	1

Συγκ.	Κόμβος	Fx (N)	Fy (N)	M (Nm)
1	6		-20000	

Ομοιόμ.	Στοιχείο	Fx (N)	Fy (N)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κόμβος	Μετατόπιση κατά x (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Στροφή περί z (rad)
1	0	0	-3,81E-02
2	0	-2,38E-02	-3,69E-02
3	0	-4,59E-02	-3,25E-02
4	0	-6,42E-02	-2,50E-02
5	0	-7,68E-02	-1,43E-02
6	0	-8,15E-02	-1,26E-10
7	0	-7,68E-02	1,43E-02
8	0	-6,42E-02	2,50E-02
9	0	-4,59E-02	3,25E-02
10	0	-2,38E-02	3,69E-02
11	0	0	3,81E-02

Κόμβος	Δύναμη Fx (N)	Δύναμη Fy (N)	Ροπή M (Nm)
1		10000	1035,08
2			1001,49
3			883,74
4			679,97
5			386,94
6			0,00
7			-386,94
8			-679,97
9			-883,74
10			-1001,49
11		10000	-1035,08

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ**

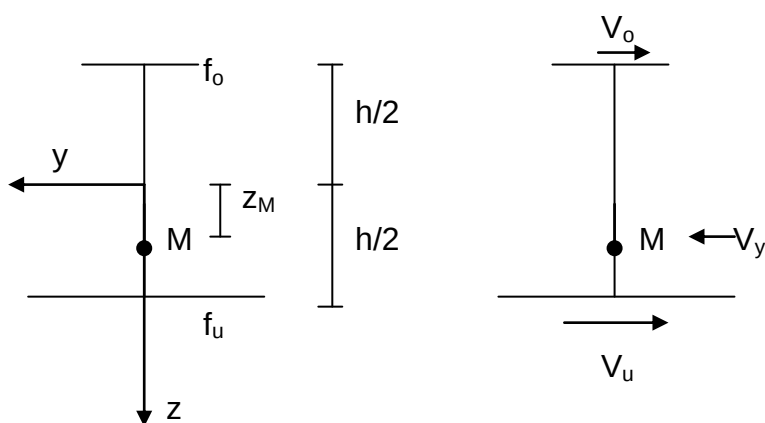
Όπως προαναφέρθηκε, το κέντρο διάτμησης της διατομής μιας σιδηροτροχιάς είναι κάτω από το κέντρο βάρους της. Αναλυτικότερα,

Μία τέμνουσα δύναμη πρέπει να διέρχεται από ένα ορισμένο σημείο της διατομής, το ονομαζόμενο κέντρο διάτμησης, ώστε να μην προκαλείται στρέψη. Οι αποστάσεις του κέντρου διάτμησης M από το κέντρο βάρους, ως προς τους κύριους άξονες προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

όπου w είναι η μοναδιαία στρέβλωση ως προς το κέντρο βάρους, δηλαδή δεν έχει υποστεί καθαρισμό ώστε: $\int w \, dA = 0$ [25].

Για τις συνήθεις διατομές είναι δυνατός ο προσδιορισμός του κέντρου διάτμησης από την εξέταση των συνθηκών ισορροπίας δυνάμεων και ροπών, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες της διατμητικής ροής. Έτσι, σε διατομές διπλά συμμετρικές, το κέντρο διάτμησης βρίσκεται στην τομή των δύο αξόνων συμμετρίας.

Όσον αφορά στη διατομή της σιδηροτροχιάς, αυτή μπορεί να προσομοιωθεί με το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα Π1
Απλουστευμένη διατομή σιδηροτροχιάς
Πηγή [25]

Λόγω συμμετρίας, το κέντρο διάτμησης βρίσκεται πάνω στον άξονα z . Απομένει ο προσδιορισμός της θέσης του ως προς τον άξονα y . Προς τούτο εφαρμόζεται μία δύναμη $V_y = V$ σε απόσταση z_M από την αρχή των αξόνων, η οποία προκαλεί δυνάμεις στα δύο πέλματα. Η κατανομή της V στα δύο πέλματα είναι για ελαστική συμπεριφορά ανάλογη της δυσκαμψίας τους. Επομένως:

— —

Ισορροπία ροπών ως προς άξονα της δύναμης V :

— —
— —

Και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ V_o και V_u προκύπτει τελικώς:

— —

Παρατηρείται ότι, όπως και το κέντρο βάρους, το κέντρο διάτμησης βρίσκεται προς την πλευρά του ισχυρότερου πέλματος [25].

Έτσι, για 6 γνωστούς τύπους σιδηροτροχιάς έχουμε:

	z_M (mm)
30 E1	7,08
33 E1	12,13
49 E1	7,88
50 E4	3,58
54 E1	20,43
60 E1	27,34

Συνεπώς, το κέντρο διάτμησης M , βρίσκεται όντως κάτω από το κέντρο βάρους. Έτσι, η ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας που έγινε παραπάνω είναι αληθής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) Αναφορές στο κείμενο

- [1] Λυμπέρης Κ., «Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές», Τόμος II, 2009, Εκδόσεις Συμμετρία
- [2] Meier, “Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung”, 1937
- [3] Dr-Ing. Gunther Führer, “Oberbauberechnung”, 1978, transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin
- [4] Hirschfeld, “Baustatik”, 3 Aufl, 1969, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York
- [5] Yiemchai Chatkeo, “Die Stabilität des Eisenbahngleises im bogen mit engen Halbmessern bei hohen Axialdruckkräften”, Promotion 1985, Institut für Bauingenieurwesen VI Lehrstuhl und Prüfamτ für Bau von Landverkehrswegen Technische Universität München
- [6] Lindsay D, “The stability of long welded railway track”, British Railways Research Dept., Derby
- [7] Valentin-Vasile Ungureanu, Adam Dósa, “Parametrical study of the effect of the torsional resistance of the fastenings on the stability of continuous welded rail”, 2007, Intersections/Intersecții, Vol 4, No 1, Transp. Infrastr. Engrg., Department of civil engineering, TRANSILVANIA UNIVERSITY, Braşov, Romania
- [8] Franz Josef Gallati, “Stabilitätsprobleme Lückenloser Meterspurgleise in engen radien und in Übergangsbögen”, Diss ETH Nr. 13319, Zürich
- [9] Zoba B., “Stability of continuous welded rails on metre-gauge track”, 1989, Rail International
- [10] Lothar Fendrich, «Handbuck Eisenbahninfrastruktur», 2007, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [11] Γιώτης Απ., «Σιδηροδρομική», 1981, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [12] Voest-Alpine, «Oberbauprofile»

- [13] ΟΣΕ, “Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.”
- [14] Κορωναίος Νικ-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», 1963, Θεσσαλονίκη
- [15] ΕΤΗ, “Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen”, Stufe 1, Band 2, 1984, Zürich
- [16] Αμπκούμκιν Κ.Γ., «Σιδηρόδρομοι», 2000, Εκδόσεις Συμμετρία
- [17] Κουνάδης Αντώνιος, «Ελαστική ευστάθεια», Εκδόσεις Συμεών
- [18] Κουνάδης Αντώνιος, «Σιδηρές ΙΙ», Εκδόσεις Συμεών
- [19] Blatt, «Διατομές σιδηροτροχιών»
- [20] Shigeru Miura, Hideaki Yanagawa, “Extended Applicability of Continuous Welded Rail – Its application to turnout and sharp curve-”, 1992, Japanese Railway Engineering No.120
- [21] Shunici Suzuki, “Application of Long Rails in Japan”, 1987, Japanese Railway Engineering No104
- [22] William W. Hay, “Railroads Engineering”, 1982
- [23] Peter Lätsch, “Untersuchungen des Einflusses der Züge auf die Sisherheit gegen Gleisverwerfungen”, 1971, Deutsche Eisenbahntechnik, No19
- [24] Λάγιου Μ. “Διερεύνηση των μεθόδων σύνδεσης σιδηροτροχιών ως προς την εξασφάλιση της σταθερότητας της γραμμής έναντι πλευρικής μετατόπισης”, Διπλωματική εργασία 2003, ΕΜΠ
- [25] Βάγιας Ι. Κ., «Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση», 2009, Εκδόσεις Κλειδάριθμος

2) Βιβλιογραφία που εξετάστηκε

- [26] Λυμπέρης Κ., «Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές», Τόμος Ι, 2009, Εκδόσεις Συμμετρία
- [27] Δρ Π. Α. Βουθούνης, «Τεχνική μηχανική Αντοχή των Υλικων», Ζ έκδοση, 2002, Αθήνα

- [28] Βαρδουλάκης Ι., «Μηχανική ΙΙ», 1999, Εκδόσεις Συμμετρία
- [29] Γκαρούτσος Γ. Β., «Μηχανική Παραμορφώσιμου Στερεού Ι», Εκδόσεις Spin
- [30] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα», 2008, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [31] Prof Dr-Ing J. Eisenmann, Dr-Ing L Mattner, “Gleisverwerfung, Großversuche im Gleis und theoretische Analyse”, Heft 52, 1988
- [32] “Lateral Track Stability 1991”, TRB No 1289
- [33] Arnold D. Kerr, Michael L. Accorsi, “Numerical validation of the new track equations for static problems”, 1986, Int. J. Mech. Sci, Vol 29, No 1
- [34] Mark G. Donley, Arnold D. Kerr, “Thermal buckling of curved railroad tracks”, 1986, Int. J. Non-linear Mechanics, Vol 22, No 3
- [35] Grissom G. T., Arnold D. Kerr, “Analysis of lateral track buckling using new frame-type equations”, 2005, International Journal of Mechanics Sciences 48
- [36] A. D. Kerr, “Analysis of thermal track buckling in the lateral plane”, 1976, Acta Mechanica 30, Springer-Verlag 1978
- [37] A. D. Kerr, A. M. Zarembski, “The response equations for a cross-tie track”, 1980, Acta Mechanica, 40, Springer-Verlag 1981
- [38] Sung Wen-pei, Shih Ming-hsiang, Lin Cheng-I, Go Cheer Germ, “The critical loading for lateral buckling of continuous welded rail”, 2005, Journal of Zhejiang University SCIENCE