

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ**



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ
ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ
ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΑΓΙΟΥ Ι. ΜΑΡΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΥΜΠΕΡΗΣ
ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π**

ΑΘΗΝΑ , ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2003

ΣΥΝΟΨΗ

Τίτλος: «Διερεύνηση των μεθόδων σύνδεσης σιδηροτροχιών ως προς την εξασφάλιση της σταθερότητας της γραμμής έναντι πλευρικής μετατόπισης»

Όνομα: Λάγιου Μαρία

Επόπτης: Λυμπέρης Κωνσταντίνος, Λέκτορας
2003

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται μια ανάλυση των ενεργειακών μεθόδων που προσεγγίζουν το θέμα της εξασφάλισης της σταθερότητας της γραμμής έναντι πλευρικής μετατόπισης (που είναι πιο επίφοβη στις Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές, κυρίως στις καμπύλες), λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του συρμού με ένα συντελεστή ασφάλειας. Μετά από σύγκριση των δύο ενεργειακών μεθόδων, επιχειρείται επέμβαση σε αυτή με την ευρύτερη εφαρμογή, ώστε να εισαχθεί η επίδραση του συρμού και διερευνάται η ορθότητα της επιλογής της τιμής του συντελεστή ασφάλειας. Επιχειρείται μια πρώτη εξέταση της τιμής του νέου συντελεστή ασφάλειας, για διάφορες μεταβολές των κρίσιμων μεγεθών. Τέλος, προσεγγίζεται το πρόβλημα της απώλειας της σταθερότητας της γραμμής, με εφαρμογή της θεωρίας ελαστικής ευστάθειας, θεωρώντας ένα στατικό μοντέλο, με την επίδραση συρμού, αμελώντας την αρχική ατέλεια στη χάραξη της γραμμής.

Λέξεις κλειδιά: Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά, πλευρική μετατόπιση, λυγισμός, μεταβολή θερμοκρασίας, αξονική δύναμη, σφάλμα χάραξης, καμπύλη, συντελεστής ασφάλειας, επίδραση συρμού, εσχάρα γραμμής, στατικό μοντέλο

ABSTRACT

Title: "Study of methods of laying rails considering the stability of the track"

Name: Lagiou Maria

Supervisor: Liberis Konstantinos
2003

In the present dissertation an analysis is attempted of the energetic methods which calculate the stability of the track (crucial for Continuously Welded Rails, mainly in curves) and which propose a safety coefficient to take into consideration the effect of the train. After the comparison of the two energetic methods, it is attempted to interfere into the one which is mostly applied, so as to directly consider the effects of the train and evaluate the proposed value of the safety coefficient. A primary examination of the value of the new safety coefficient is attempted for various changes of the values of the factors concerned. Finally, the problem of the stability of the track is considered from the static point of view, using the theory of the Elastic Stability. A static model is accepted without an initial deflection and in the calculations the effect of the train is taken into consideration.

Key words: Continuously Welded Rail, lateral displacement, buckling, change of temperature, axial force, deflection, curve, safety coefficient, train effect, track grillage, static model

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των τρόπων σύνδεσης της σιδηροτροχιάς ως προς το πώς εξασφαλίζεται η σταθερότητα την εσχάρας της γραμμής έναντι πλευρικής μετατόπισης. Η πλευρική μετατόπιση εμφανίζεται για υψηλές τιμές αξονικής δύναμης λόγω θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με την ύπαρξη αρχικής ατέλειας (σφάλματος στη χάραξη της γραμμής) και είναι ιδιαίτερα πιθανή στις καμπύλες, όπου υπάρχει η προδιάθεση να μετατοπιστεί η γραμμή. Από άποψη μήκους, κρίσιμες είναι οι συνεχώς συγκολλημένες σιδηροτροχιές, στο κεντρικό αμετακίνητο τμήμα τους.

Οι μέθοδοι, που αναπτύχθηκαν για την περιγραφή του φαινομένου, συγκρίνουν ενεργειακά μεγέθη, ώστε να καταλήξουν στα κρίσιμα (κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης ή αντίστοιχη δύναμη), στα οποία αρχίζει η πλευρική μετατόπιση. Για να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς δε λαμβάνουν υπόψη άμεσα την επίδραση διερχόμενου συρμού, αλλά έμμεσα, εισάγοντας ένα συντελεστή που συγκρίνει τα κρίσιμα μεγέθη με τα μέγιστα αναμενόμενα και απαιτούν να είναι τουλάχιστον ίσος με δύο. Από σύγκριση του συντελεστή ασφάλειας για τις δύο ενεργειακές μεθόδους (EISENMANN και ZOBA) προέκυψε ότι αυτός είναι παρόμοιος, παρόλο που η διαδικασία υπολογισμού των κρίσιμων μεγεθών είναι διαφορετική.

Πέρα από την ανάλυση των ενεργειακών μεθόδων, γίνεται και διερεύνηση της τιμής του συντελεστή ασφάλειας, με επέκτασή τους, εισάγοντας στους υπολογισμούς και την επίδραση του συρμού, ώστε να γίνει σύγκριση των κρίσιμων μεταβολών θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης (ουδέτερης θερμοκρασίας). Με κατάλληλες διορθώσεις των μεγεθών από τα οποία εξαρτάται η σταθερότητα της θέσης της γραμμής, προκύπτουν τα νέα κρίσιμα μεγέθη. Από σύγκριση των μεγεθών χωρίς και με την επίδραση του συρμού, προέκυψε ότι η τιμή συντελεστή ασφάλειας ίση με δύο, υπερεκτιμά την επίδραση του συρμού και μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση της γραμμής. Ένας νέος συντελεστής εισάγεται, που συγκρίνει το κρίσιμο μέγεθος με την επίδραση συρμού με το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος και θα πρέπει να υπολογίζεται κοντά στη μονάδα. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από πολλά μεγέθη, πέρα της μεταβολής θερμοκρασίας, που λαμβάνουν κρίσιμες τιμές τη στιγμή της πλευρικής μετατόπισης. Διαπιστώνεται ότι ο ίδιος συντελεστής ασφάλειας μπορεί να προκύψει για διάφορους συνδυασμούς κρίσιμων μεγεθών, ώστε να μπορεί να συγκριθεί διαφορετικό κρίσιμο μέγεθος, σε κάθε περίπτωση.

Τέλος, προσεγγίζεται το πρόβλημα της σταθερότητας της γραμμής με τη θεωρία της ελαστικής ευστάθειας (στατική δευτέρου βαθμού), ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από την ενεργειακή μέθοδο. Και σε αυτή την προσέγγιση λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του συρμού. Στο στατικό μοντέλο που επιλύθηκε, δεν συνυπολογίστηκε η επιρροή του αρχικού σφάλματος (ατέλεια) της γραμμής, και τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε άπειρη φόρτιση της γραμμής, με εμφάνιση άπειρου σφάλματος κατά τη στιγμή του λυγισμού. Προτείνεται η εκ νέου επίλυση του στατικού μοντέλου, με παρουσία αρχικής ατέλειας, ώστε να προκύψουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα της ενεργειακής μεθόδου με επίδραση συρμού..

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

α : θερμικός συντελεστής $=1,15 \times 10^{-5} [1/^{\circ}C]$

I. Χαρακτηριστικά διατομής σιδηροτροχιάς

E : μέτρο ελαστικότητας $=2,10 \times 10^5 [N/mm^2]$
 I_{yy} : ροπή αδράνειας διατομής ως προς κατακόρυφο άξονα $[mm^4]$
 F : εμβαδόν διατομής $[mm^2]$
 L_S : μήκος σιδηροτροχιάς $[mm]$
 g : βάρος σιδηροτροχιάς $[N/mm]$
 a : απόσταση κέντρου οπής σιδηροτροχιάς από το άκρο $[mm]$
 b : απόσταση των δύο οπών της σιδηροτροχιάς $[mm]$
 c : απόσταση κέντρου ακραίας οπής αμφιδέτη από τη γειτονική $[mm]$
 d : απόσταση κέντρων των δύο μεσαίων οπών του αμφιδέτη $[mm]$
 ΦB : διάμετρος βλήτρου αμφίδεσης $[mm]$
 ΦR : διάμετρος οπής σιδηροτροχιάς $[mm]$
 ΦE : διάμετρος οπής αμφιδέτη $[mm]$

II. Χαρακτηριστικά γραμμής

I_E : ισοδύναμη ροπή αδράνειας εσχάρας $[mm^4]$
 $F_{(2)}$: διπλάσιο εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς $[mm^2]$
 R : ακτίνα καμπύλης $[mm]$

III. Θερμοκρασία

t : θερμοκρασία $[^{\circ}C]$
 t_V : θερμοκρασία τοποθέτησης (ουδέτερη) $[^{\circ}C]$
 t_u : ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία $[^{\circ}C]$
 t_Z : θερμοκρασία που το χάσμα αρμού γίνεται μέγιστο $[^{\circ}C]$
 t_L : θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός $[^{\circ}C]$
 t_o : μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία $[^{\circ}C]$
 Δt : μεταβολή θερμοκρασίας $[^{\circ}C]$
 Δt_{gr} : μεταβολή θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ακραίων τιμών $[^{\circ}C]$
 Δt_{max} : μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης $[^{\circ}C]$
 Δt_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης $[^{\circ}C]$
 $\Delta t_{krit,Q}$: κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας με την επίδραση συρμού $[^{\circ}C]$
 Δt_w : μεταβολή θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης τριβής έρματος στρωτήρα $[^{\circ}C]$

Δt_R : μεταβολή θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης
αμφίδεσης [$^{\circ}C$]

IV. Αρμός

ℓ : χάσμα αρμού [mm]
 ℓ_V : χάσμα τοποθέτησης [mm]
 ℓ_u : χάσμα αρμού στη μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία [mm]
 ℓ_Z : μέγιστο χάσμα αρμού, το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση [mm]
 ℓ_L : μηδενικό χάσμα αρμού [mm]
 ℓ_o : χάσμα αρμού στην ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία [mm]
 $\Delta\ell$: μεταβολή χάσματος αρμού [mm]
 μ : ελαστική μετακίνηση σιδηροτροχιάς [mm]
 $\Delta\ell_w$: πραγματική μεταβολή χάσματος αρμού για υπερνίκηση αντίστασης
τριβής στρωτήρα – έρματος [mm]
 L_V : αναπνέον μήκος σιδηροτροχιάς [mm]
 $\epsilon\phi\delta$: κλίση διαγράμματος ελεύθερης σιδηροτροχιάς

V. Αντιστάσεις

R_L : αντίσταση αμφίδεσης [N]
 w_L : κατά μήκος αντίσταση τριβής στρωτήρα – έρματος [N/mm]
 w_D : αντίσταση συνδέσμων [N/mm]
 w : εγκάρσια αντίσταση τριβής στρωτήρων – έρματος [N/mm]
 w_r : τιμή απομείωσης εγκάρσιας αντίστασης από επιρροή καμπύλης
[N/mm]
 $\bar{w}$: απομείωση τιμής εγκάρσιας αντίστασης κατά MEIER [N/mm]
 w_T : τιμή απομείωσης εγκάρσιας αντίστασης από ταλαντώσεις επιδομής
[N/mm]
 w_q : τιμή απομείωσης εγκάρσιας αντίστασης από πλευρικές δυνάμεις
συρμού [N/mm]
 w_{qi} : τιμή απομείωσης εγκάρσιας αντίστασης από πλευρικές δυνάμεις και
ανύψωση εξαιτίας της διέλευσης του συρμού [N/mm]
 w_{red} : απομειωμένη τιμή εγκάρσιας αντίστασης εξαιτίας της επίδρασης
του συρμού [N/mm]
 w_{rest} : εναπομένουσα τιμή εγκάρσιας αντίστασης μετά την απομείωση της
εγκάρσιας αντίστασης εξαιτίας της επίδρασης συρμού [N/mm]
 Q : δύναμη εγκάρσιας αντίστασης κατά ZOBA [N]
 M : ροπή αντίστασης συνδέσμων κατά ZOBA [Nmm]
 W : δύναμη εγκάρσιας αντίστασης κατά EISENMANN [N]

VI. Τάσεις – Δυνάμεις

σ : τάση στη σιδηροτροχιά [N/mm^2]
 σ_P : θλιπτική τάση στη σιδηροτροχιά [N/mm^2]

σ_z	: εφελκυστική τάση στη σιδηροτροχιά [N/mm^2]
P	: θλιπτική αξονική δύναμη στη γραμμή [N]
Z	: εφελκυστική αξονική δύναμη στη γραμμή [N]
Q_T	: κατακόρυφο φορτίο τροχού [N]
H	: οριζόντιο φορτίο τροχού [N]
H_a	: οριζόντιο φορτίο από τον άξονα [N]
ΔY	: πλευρικό φορτίο από συρμό [N]

VII. Γραμμή κάμψης

x	: τετμημένη γραμμή κάμψης [mm]
y_1	: τεταγμένη γραμμής κάμψης σε καμπύλη [mm]
y	: μετατόπιση γραμμής κάμψης [mm]
$\bar{y}$	: συνολική μετατόπιση γραμμής κάμψης ($= y + y_1$) [mm]
λ	: αύξηση μήκους ράβδου από την παραμόρφωση της γραμμής [mm]
f	: σφάλμα χάραξης γραμμής [mm]
f_o	: αρχικό σφάλμα χάραξης γραμμής [mm]
f'	: κρίσιμο σφάλμα γραμμής, για εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης [mm]
i_o	: κλίση σφάλματος
Δf	: επιπλέον σφάλμα [mm]
P_o	: αξονική αναμενόμενη δύναμη [N]
P_{krit}	: κρίσιμη θλιπτική δύναμη [N]
P_{cr}	: κρίσιμη θλιπτική δύναμη κατά ZOBA [N]
$P_{o,Q}$	: αξονική δύναμη με επίδραση συρμού [N]
$M(x)$	: ροπή σε κάθε σημείο της γραμμής κάμψης [Nmm]
L	: μήκος λυγισμού γραμμής [mm]
L^*	: μήκος ράβδου στατικού προσομοιώματος ($= \frac{L}{2}$) [mm]
l	: θεμελιακή τιμή μήκους για επιδομή [mm]
β^*	: ιδεατό πλάτος [mm]
n	: συντελεστής ZOBA, στη σχέση υπολογισμού εγκάρσιας αντίστασης
Q_o	: εγκάρσια αντίσταση κατά ZOBA, για $n=0$ [N]
k	: συντελεστής ZOBA, στη σχέση υπολογισμού αντίστασης συνδέσμων
M_o	: ροπή αντίστασης συνδέσμων κατά ZOBA, για $k=0$ [Nmm]
β	: γωνία στροφής σιδηροτροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο
ξ_1, ξ_2	: συντελεστές που εξαρτώνται από τα n, k του ZOBA
A_{cr}	: συντελεστής κατά ZOBA
a_{cr}	: συντελεστής κατά ZOBA
K_1	: συντελεστής κατά ZOBA, για εγκάρσια αντίσταση
K_2	: συντελεστής κατά ZOBA για αριθμό στρωτήρων ανά χμ
K_3	: συντελεστής κατά ZOBA για τύπο συνδέσμων
A	: έργο [Joule]

- A_b : έργο λυγισμού [Joule]
 A_h : έργο ανύψωσης [Joule]
 A_w : έργο πλευρικής παραμόρφωσης [Joule]
 A_v : έργο επιμήκυνσης [Joule]
 A_p : έργο αξονικής δύναμης [Joule]
 S : ισοδύναμη δύναμη [N]
 S_b : ισοδύναμη δύναμη που αντιστοιχεί στο έργο λυγισμού [N]
 S_h : ισοδύναμη δύναμη που αντιστοιχεί στο έργο ανύψωσης [N]
 S_w : ισοδύναμη δύναμη που αντιστοιχεί στο έργο πλευρικής παραμόρφωσης [N]
 S_v : ισοδύναμη δύναμη που αντιστοιχεί στο έργο επιμήκυνσης [N]
 S_p : ισοδύναμη δύναμη που αντιστοιχεί στο έργο αξονικής δύναμης [N]
 S_r : απομένουσα ισοδύναμη δύναμη μέχρι το λυγισμό [N]
 k_1 : συντελεστής για γραμμή κάμψης 1
 k_2 : συντελεστής για γραμμή κάμψης 2
 k_p : συντελεστής μείωσης της συνολικής οριζόντιας δύναμης των τροχών του συρμού, για να ληφθεί υπόψη η οφιοειδής κίνηση και η θέση του φορείου κατά PRUD' HOMME

VIII. Εφαρμογή θεωρίας ελαστικής ευστάθειας

- $M_{\sigma\sigma}$: εσωτερική ροπή [Nmm]
 $M_{\sigma\xi}$: εξωτερική ροπή [Nmm]
 $k = \frac{P^2}{EI_E} [1/m]$
 A : σταθερά ολοκλήρωσης [mm]
 B : σταθερά ολοκλήρωσης [mm]
 $\bar{A}$: σταθερά ολοκλήρωσης [mm]
 $\bar{B}$: σταθερά ολοκλήρωσης [mm]
 $\bar{M}_A$: ροπή πάκτωσης [Nmm]
 V_A : κατακόρυφη αντίδραση πάκτωσης [N]
 V_B : κατακόρυφη αντίδραση ελεύθερου άκρου [N]
 V_{AL} : κατακόρυφη αντίδραση πάκτωσης ισοδύναμου φορέα [N]
 V_{BL} : κατακόρυφη αντίδραση ελεύθερου άκρου ισοδύναμου φορέα [N]
 V_{A1} : κατακόρυφη αντίδραση πάκτωσης από μοναδιαία φόρτιση [N]
 V_{B1} : κατακόρυφη αντίδραση ελεύθερου άκρου από μοναδιαία φόρτιση [N]
 x : οριζόντια απόσταση από πακτωμένο άκρο [mm]
 $\bar{x}$: οριζόντια απόσταση από ελεύθερο άκρο [mm]
 $\beta = L^* \sqrt{\frac{P}{EI_E}}$

- ξ : συντελεστής αναλογίας απόστασης κατακόρυφης δύναμης από
ελεύθερο άκρο
 A' : συντελεστής υπολογισμού ροπής πάκτωσης
 B' : συντελεστής υπολογισμού ροπής πάκτωσης
 C' : συντελεστής υπολογισμού ροπής πάκτωσης
 L^*_{krit} : κρίσιμο μήκος ράβδου στο οποίο εμφανίζεται λυγισμός [mm]
 L_{krit} : κρίσιμο μήκος γραμμής στο οποίο εμφανίζεται λυγισμός ($=2 \times L^*_{krit}$)
 $[mm]$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση των μεγεθών, τα οποία υπεισέρχονται και επηρεάζουν τη συμπεριφορά της σιδηροτροχιάς ανάλογα με τη μέθοδο σύνδεσής της και καθίστανται κρίσιμα για συγκόλληση των σιδηροτροχιών μεταξύ τους σε μεγάλα μήκη, οπότε και τίθεται πλέον ζήτημα εξασφάλισης της σταθερότητας της γραμμής, έναντι πλευρικών μετατοπίσεων. Το σημείο σύνδεσης της σιδηροτροχιάς αποτελεί ένα ιδιαίτερα αδύνατο σημείο της σιδηροδρομικής γραμμής, καθιστώντας αναγκαίο ένα μεγάλο όγκο εργασιών συντήρησης και δημιουργώντας ταυτόχρονα θόρυβο και δόνηση κατά την κίνηση του συρμού [2]. Με την εισαγωγή της τεχνικής της συγκόλλησης του αρμού, αφ' ενός αντιμετωπίστηκαν τα παραπάνω προβλήματα σε μεγάλο βαθμό, αφ' ετέρου χρειάζεται να επιλυθούν άλλα, που σχετίζονται με την εφαρμογή της Συνεχώς Συγκολλημένης Σιδηροτροχιάς (ΣΣΣ). Αυτά έχουν σχέση κυρίως με την εξασφάλιση της σταθερότητας της γραμμής σε όλο το μήκος της χάραξής της, ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα στοιχεία της οριζοντιογραφίας της, με ή χωρίς την δυναμική επίδραση του διερχόμενου συρμού. Ιδιαίτερως κρίσιμη είναι η καμπύλη, η οποία, λόγω διαμόρφωσης, έχει την προδιάθεση να «πετάξει» τη γραμμή και να οδηγήσει σε πλευρική μετατόπιση. Διερευνάται ιδίως η επίδραση του συρμού, την οποία οι υπάρχουσες ενεργειακές μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη άμεσα, αλλά έμμεσα με ένα συντελεστή ασφάλειας. Τέλος, εφαρμόζεται η θεωρία της γραμμικής ελαστικής ευστάθειας, για την περιγραφή του φαινομένου. Στη συνέχεια αναλύονται τα στοιχεία της επιδομής και πώς αυτά επηρεάζουν τη σταθερότητα της γραμμής.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ

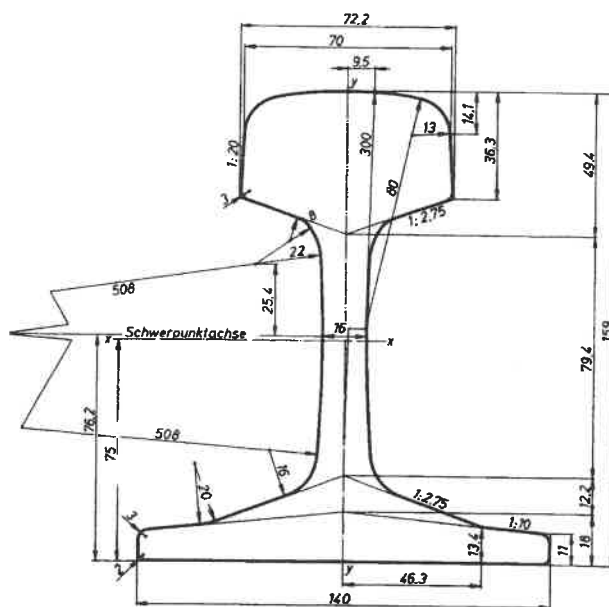
Με τον όρο επιδομή εννοούμε το σύνολο των σιδηροτροχιών, στρωτήρων και έρματος, με την έδρασή του επί του εδάφους. Οι σύνδεσμοι συνδέουν τις σιδηροτροχιές με τους στρωτήρες, οι στρωτήρες εγκιβωτίζονται στο έρμα, και αυτό στη συνέχεια μεταφέρει τις δυνάμεις στο έδαφος θεμελιώσεως της επιδομής (υποδομή). Οι τυπικές διατομές της επιδομής είναι περίπου οι 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,

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 επιπόνηση 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 [1].



Σχήμα 2
Σιδηροτροχιά UIC 54
Πηγή [3]

Υπάρχουν πολλοί τύποι σιδηροτροχιών. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως ο Γαλλικός τύπος σιδηροτροχιάς UIC 50:

Μήκος κανονικής σιδηροτροχιάς	18m
Μήκος σιδηροτροχιάς εξισώσεως	17,95 ή 17,91m
Επιφάνεια σιδηροτροχιάς	63,93 cm ²
Βάρος ανά τρέχον μέτρο	50,18 Kp [1]

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη διάφορων τύπων σιδηροτροχιών:

Πίνακας 1:

Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών

Τύπος σιδηροτροχιάς	Βάρος σιδηροτροχιάς (kg/m)	Εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς (mm ²)	Ροπή αδράνειας διατομής σιδ/χιάς (mm ⁴)
S30	30,00	3645	132×10 ⁴
S40	36,54	4655	200×10 ⁴
U33	46,30	5930	351×10 ⁴
U36	50,56	6450	420×10 ⁴

Πηγή [4]

Ο τύπος και το μήκος της σιδηροτροχιάς επηρεάζει τη σταθερότητα της γραμμής. Ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς λαμβάνονται στοιχεία, όπως είναι το βάρος της, το εμβαδόν της διατομής της, η ακαμψία της. Τα παραπάνω στοιχεία είναι σημαντικά για τον υπολογισμό της σταθερότητας της γραμμής. 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 ($E = 2,1 \times 10^5$ N/mm²).

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) [1]. Όσον αφορά στη σταθερότητα της γραμμής, ο στρωτήρας πρέπει να δίνει επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση, τόσο κατά μήκος της σιδηροτροχιάς όσο και εγκάρσια στη γραμμή. 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 [5]. Η τελευταία αυτή αντίσταση εξαρτάται από τον τύπο των στρωτήρων, το βάρος τους, τη μορφή τους, 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 2,6χλγ/εκ., ενώ στην

περίπτωση των στρωτήρων από σκυρόδεμα περί των 4,8χλγ/εκ [6]. 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 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 8χλγ/εκ., ενώ στην περίπτωση χαλύβδινων 12 χλγ/εκ., και μπορεί να αυξηθεί με ειδικές διαρρυθμίσεις [6]. Οι γραμμές με Υ-μεταλλικούς στρωτήρες εμφανίζουν 10% έως 30% μεγαλύτερη εγκάρσια αντίσταση απ' ότι οι στρωτήρες από σκυρόδεμα [7]. Το μειονέκτημά τους είναι, ότι κοστίζουν περισσότερο ανά κομμάτι.

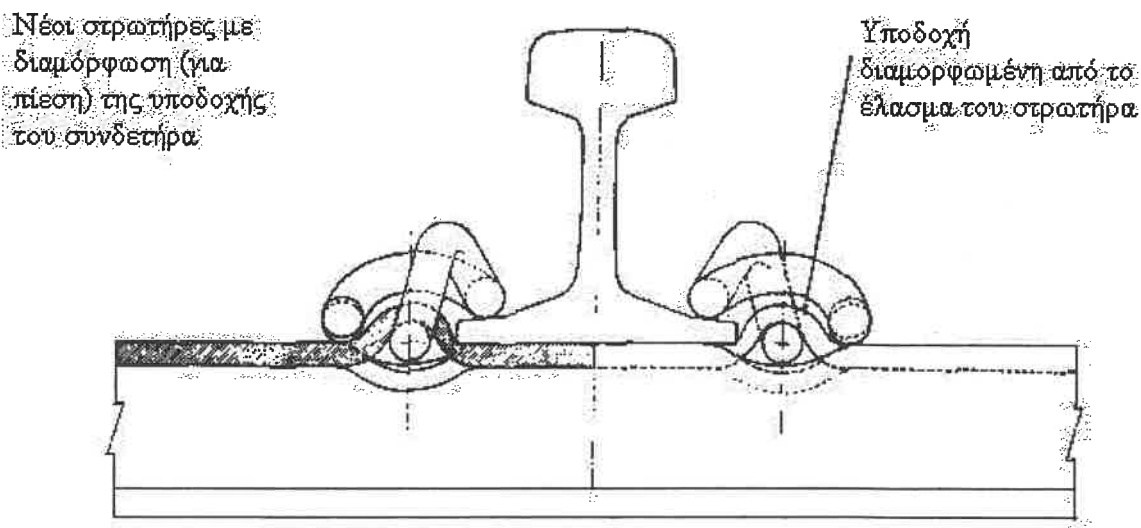
1.2.2 Σύνδεσμοι

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 ακαμψία. Επιπλέον, χρειάζεται να έχει ελαστικότητα κατά την εγκάρσια έννοια, έτσι ώστε να απορροφώνται οι κρούσεις που προκαλούνται από τα οχήματα. Ο σύνδεσμος πρέπει να λειτουργεί σωστά, κάτω από οποιεσδήποτε 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.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 ανειδίκεντο προσωπικό. Το κομμάτι του συνδέσμου αυτού, με δύο τετραγωνικές αιχμές εμπήγνυται σε κυκλικές οπές ξύλινων εμποτισμένων με κρεόζωτο στρωτήρων, ενώ το πάνω μέρος τους (γέφυρα) ακουμπά στη βάση της σιδηροτροχιάς (σχ. 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.



Σχήμα 5
Σύνδεσμος PADROL-e
Πηγή [8]

Οι Vossloh Sk114 αποτελούνται από τρία εξαρτήματα: τον σύνδεσμο, την πλάκα έδρασης που τοποθετείται υπό κλίση επάνω στον στρωτήρα από σκυρόδεμα, και τον κοχλία (σχ. 4). Η πλάκα έδρασης, τοποθετείται υπό κλίση, επιτρέποντας στις τάσεις να εφαρμόζονται απ' ευθείας στο εσωτερικό του στρωτήρα και τελικά ο κοχλίας δεν καταπονείται σε διάτμηση. Όλα τα εξαρτήματα της σύνδεσης, είναι ήδη από το εργοστάσιο συναρμολογημένα πάνω στον στρωτήρα, γεγονός που εξασφαλίζει εύκολη τοποθέτηση. Η απαραίτητη πίεση εξασφαλίζεται με το σφίξιμο του κοχλίου, έτσι ώστε να μην χρειάζονται έργα συντήρησης. Η εξισορρόπηση των τάσεων από τη θερμοκρασία γίνεται με χαλάρωση του κοχλίου. Για τη γρήγορη αντικατάσταση των σιδηροτροχιών οι σύνδεσμοι επαναφέρονται στην κατάσταση πριν την τελική τους συναρμολόγηση. Σημαντικό είναι ότι μεταξύ του μεσαίου τμήματος του συνδέσμου και του πόδα της σιδηροτροχιάς, υπάρχει ένα κενό περίπου 1,5mm. Έτσι, απορροφάται η ενέργεια από το ανασήκωμα της σιδηροτροχιάς, μετά το πέρασμα του συρμού, με το που ο πόδας της σιδηροτροχιάς ακουμπήσει στον σύνδεσμο. Πολλά πλεονεκτήματα παρουσιάζει και ο σύνδεσμος PANDROL -e, που εξασφαλίζει κι αυτός ικανή

πίεση, μεγάλη διάρκεια ζωής και οικονομία (σχ. 5). Χρησιμοποιείται κυρίως με στρωτήρες από σκυρόδεμα.

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 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 μια κατά το δυνατό ομοιόμορφη διανομή στο υπέδαφος, απαιτείται ένα ελάχιστο πάχος έρματος, που εκ πείρας έχει καθορισθεί σε 30εκ. κάτω της κατώτερης επιφάνειας έδρασης του στρωτήρα [1]. Η σκληρότητα του έρματος ελέγχεται με τις μεθόδους LOS ANGELES – DEVAL και πρέπει να είναι $D_{ri} \geq 16$.

α) Σκοπιμότητα του έρματος

Προορισμός του έρματος είναι να διανέμει στην υποδομή τα συγκεντρωμένα φορτία των τροχών και να συμβάλλει στην εγκάρσια και κατά μήκος σταθερότητα της 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 20εκ. 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.

β) Διατομή του έρματος

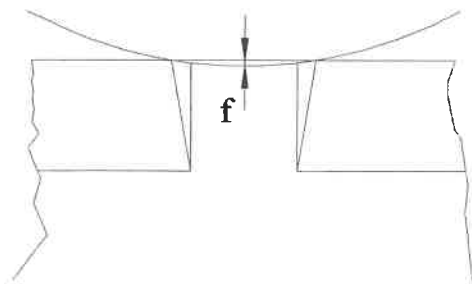
Το ελάχιστο συνολικό πάχος του έρματος είναι 35εκ. Σε περίπτωση κακού εδάφους θεμελιώσεως, συνιστάται να αφαιρείται το στρώμα εδάφους πάχους 20 εκ. και να αντικαθίσταται με άμμο. Έτσι, το συνολικό πάχος, έρματος και άμμου, ανέρχεται σε 55εκ. Το έρμα τοποθετείται έτσι ώστε να εγκιβωτίζει τους στρωτήρες 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. Στη διατομή των αμερικάνικων σιδηρόδρομων το έρμα προεξέχει του στρωτήρα κατά 15εκ. μόνο, ενώ στην γαλλική διατομή η διάσταση αυτή κυμαίνεται από 25εκ. μέχρι 35εκ.

Στην περίπτωση των συγκολλημένων σιδηροτροχιών, η επικάλυψη των στρωτήρων με έρμα πάχους 10εκ. 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 στη σταθερότητα της γραμμής. Συνήθως, το έρμα αφαιρείται στην περιοχή μεταξύ των σιδηροτροχιών, όταν χρησιμοποιούνται στρωτήρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα ή στρωτήρες με μεταλλικό συνδετήριο στέλεχος [1].

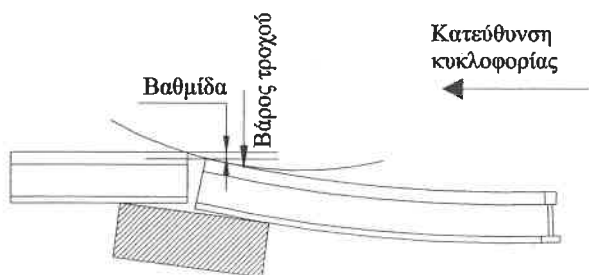
2. ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ

Οι σιδηροτροχιές έρχονται από το εργοστάσιο σε τυποποιημένα μήκη, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη σύνδεσή τους. Επίσης, λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών οι σιδηροτροχιές υφίστανται μεταβολές στο μήκος τους, και τελικά, για τη διαστολή τους, πρέπει να αφήνονται μεταξύ των τμημάτων των σιδηροτροχιών κενά διαστήματα. Στις θέσεις αυτές οι σιδηροτροχιές συνδέονται μεταξύ τους με τα διάφορα μέσα σύνδεσης, τα οποία επιτρέπουν τη μεταβολή του μήκους τους, διαμορφώνοντας έτσι τον λεγόμενο αρμό των σιδηροτροχιών. Στους αρμούς των σιδηροτροχιών προκαλείται κρούση των τροχών επί των σιδηροτροχιών, η οποία οφείλεται στο υπάρχον διάκενο μεταξύ των δύο τμημάτων των σιδηροτροχιών και στη δημιουργία γόνατος ή υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των άνω επιφανειών των εκατέρωθεν σιδηροτροχιών κατά την κύλιση των οχημάτων(σχ.6, σχ.7, σχ.8, σχ.9). Με τα μέσα σύνδεσης επιδιώκουμε την καλή σύνδεση των σιδηροτροχιών μεταξύ τους, ώστε αφ' ενός να ανθίστανται καλά και στη θέση του αρμού, στα επενεργούντα κατακόρυφα και εγκάρσια φορτία, αφ' ετέρου να εκλείπουν τα παραπάνω αίτια, τα οποία δημιουργούν τις κρούσεις των τροχών στις θέσεις αυτές.

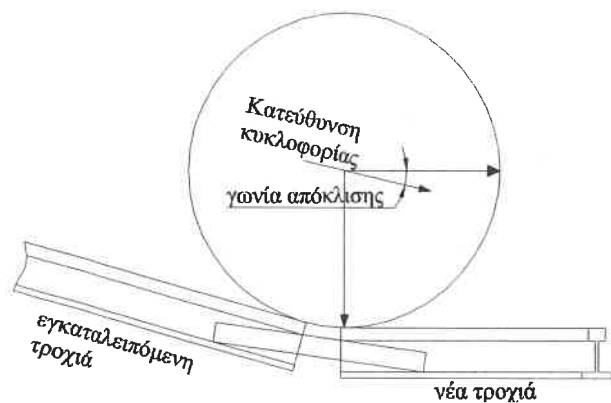
ΕΙΣΑΓΩΓΗ



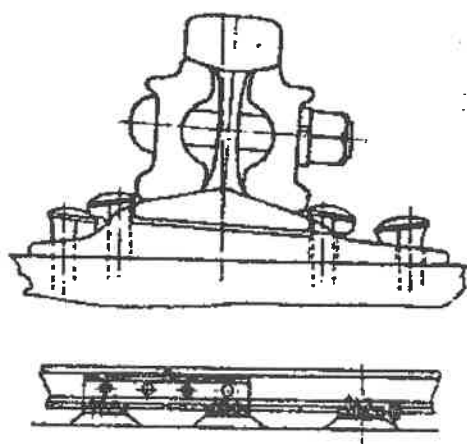
Σχήμα 6
Ύψος πτώσης του τροχού στο
διάκενο του αρμού
Πηγή [6]



Σχήμα 7
Σχηματισμός βαθμίδας στον
αρμό
Πηγή [6]



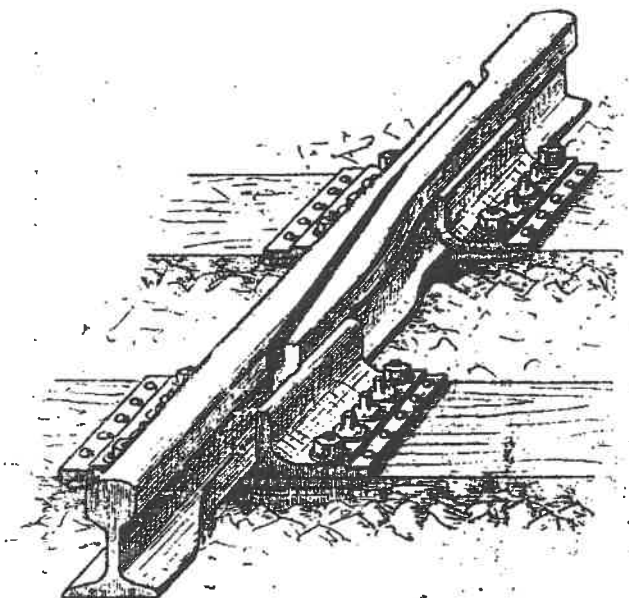
Σχήμα 8
Δημιουργία γόνατος
Πηγή [6]



Σχήμα 9
Διαμόρφωση του αρμού
Πηγή [6]

Πολλές διατάξεις και μέσα επινοήθηκαν για την αντιμετώπιση των παραπάνω μειονεκτημάτων, τα οποία μπορεί εν μέρει να παρουσιάζουν οι ως άνω συνδέσεις. Αυτές διακρίνονται σε: i) εκείνες, οι οποίες παρεμποδίζουν σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία γόνατος και υψομετρικής διαφοράς και ii) εκείνες, οι οποίες εξουδετερώνουν το διάκενο του αρμού. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ελάσματα υπό το πέλμα, σφήνες, αρμοί γέφυρες και ο προεντεταμένος αρμός και στη δεύτερη κατηγορία ελάσματα με επιφάνεια κύλισης, αρμοί με διπλή σιδηροτροχιά και αρμοί κατά μήκος. Πολύ επιτυχή αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με τις συγκολλημένες σιδηροτροχιές (συγκολλημένοι αρμοί). Για τις σιδηροτροχιές μεγάλου μήκους ή στις γέφυρες, κτλ, χρησιμοποιούνται ειδικής διάταξης αρμοί (σχ.10), οι οποίοι επιτρέπουν μετατοπίσεις μεγάλου μεγέθους (αρμοί διαστολής) [6] (φωτ.1).

Έτσι, η σύνδεση της σιδηροτροχιάς γίνεται με δύο τρόπους: με τον αμφιδέτη και με τη συγκόλληση των σιδηροτροχιών. Ο αμφιδέτης συνδέει δύο συνεχόμενες σιδηροτροχιές ώστε να συμπεριφέρονται σαν μια συνεχής δοκός ευθυγραμμισμένη και οριζοντιωμένη, εμφανίζει αντίσταση στην παραμόρφωση, όση περίπου διαθέτουν οι δύο συνδεόμενες σιδηροτροχιές, εμποδίζει τις κατακόρυφες ή οριζόντιες μετακινήσεις των άκρων των σιδηροτροχιών της μιας σε σχέση με την άλλη, επιτρέποντας όμως την διαστολή, είναι κατά το δυνατό απλής μορφής και αποτελείται από ένα ελάχιστο αριθμό στοιχείων. Απ' την άλλη, χαρακτηριστικό των Συνεχώς Συγκολλημένων Σιδηροτροχιών (ΣΣΣ) είναι η απουσία αμφιδέτη σε μικρά διαστήματα, μεταξύ των σιδηροτροχιών, δεδομένου ότι δεν υπάρχει και αρμός [1].



Σχήμα 10

Διαμόρφωση της σύνδεσης (αρμού) σιδηροτροχιών μεγάλου μήκους –
αρμός διαστολής.

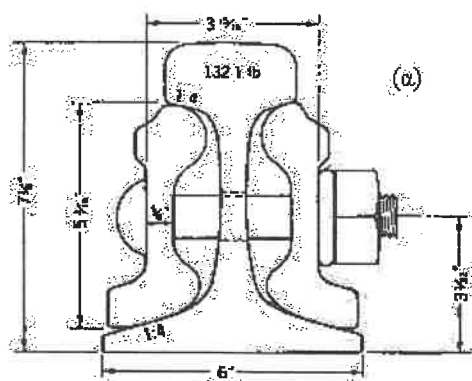
Πηγή [6]

2.1 ΑΜΦΙΔΕΤΗΣ

Οι πρώτοι αμφιδέτες ήταν απλώς ένα χαλύβδινο έλασμα, το οποίο βιδωνόταν στους κορμούς των υπό σύνδεση σιδηροτροχιών. Βελτιωμένοι σχεδιασμοί έδιναν μεγαλύτερη ακαμψία με τον αμφιδέτη να ακουμπά στο κάτω μέρος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και στη βάση της. Αργότερα επιτεύχθηκε μεγαλύτερη αντοχή, εις βάρος της συμμετρίας της διατομής, με την προσθήκη μετάλλου στη βάση του αμφιδέτη, διαμορφώνοντας έτσι ένα νύχι [10].

α) Καταπόνηση του αμφιδέτη

Ο αμφιδέτης συμπεριφέρεται σαν μια απλή δοκός. Το φορτίο εφαρμόζεται στο μέσο του αμφιδέτη από την κάτω μεριά της κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Οι αντιδράσεις στο πάνω μέρος των πελμάτων της σιδηροτροχιάς εφαρμόζονται στο κάτω μέρος και στις άκρες του αμφιδέτη. Η βύθιση της σιδηροτροχιάς συνοδεύεται και από μια ανύψωση (αντίθετη παραμόρφωση), το βέλος της οποίας είναι περίπου το μισό από το αντίστοιχο της βύθισης. Κατά την ανύψωση τα φορτία αντιστρέφονται και έχουν μικρότερες τιμές. Η αντίσταση στην κάμψη δύο ελασμάτων, όταν υπόκεινται σε κατακόρυφη δύναμη, ανέρχεται μόνο στο ένα τρίτο της αντίστοιχης της σιδηροτροχιάς. 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 (κρούση τροχού). Ένα μεγάλο ποσοστό των έργων συντήρησης της γραμμής επικεντρώνεται στις συνδέσεις [10].

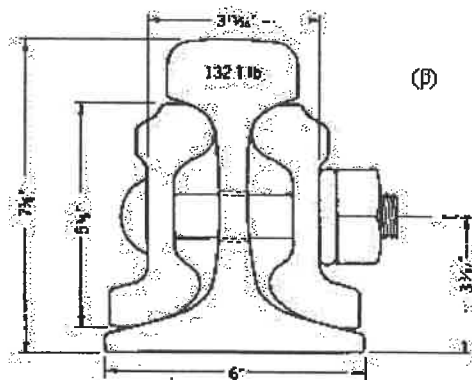


Σχήμα 11

(α) Επαφή της κεφαλής της σιδηροτροχιάς και σύνδεση του αμφιδέτη

(β) Επαφή του κορμού της σιδηροτροχιάς και σύνδεση αμφιδέτη

Πηγή [10]

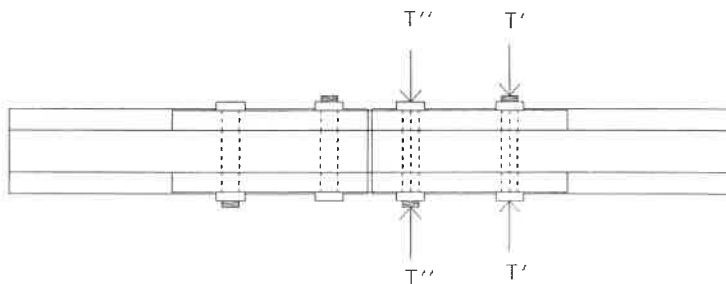


β) Αντίσταση αμφίδεσης

▪ Σε ευθεία

Ο αμφιδέτης αντιστέκεται στη μεταβολή του μήκους της σιδηροτροχιάς, που προκαλείται από τις διάφορες θερμοκρασιακές μεταβολές ΔT (διαστολή και συστολή σιδηροτροχιάς). Η αντίσταση αμφίδεσης R_L επηρεάζεται από τη ροπή τάνυσης των κοχλιών σύνδεσης του αμφιδέτη με τη σιδηροτροχιά, από τη φθορά λόγω λειτουργικού φορτίου και καιρικών συνθηκών και από την μορφή των επιφανειών μετάδοσης της πίεσης μεταξύ του αμφιδέτη και της σιδηροτροχιάς [7].

Στο Σχήμα 12 φαίνεται μια σύνδεση της σιδηροτροχιάς και οι δυνάμεις τάνυσης των βλήτρων T' (εσωτερικά βλήτρα) και T'' (εξωτερικά βλήτρα).



Σχήμα 12

Εγκάρσιες δυνάμεις στην αμφίδεση
Πηγή [10]

Με την τάνυση των βλήτρων ο αμφιδέτης πιέζεται επάνω στη σιδηροτροχιά εμποδίζοντας την εγκάρσια μετακίνησή της. Παράλληλα, με την πίεσή του επάνω στη σιδηροτροχιά εμφανίζεται δύναμη τριβής που εμποδίζει τη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς κατά μήκος. Η δύναμη αυτή είναι η αντίσταση αμφίδεσης R_L . Η R_L είναι ανάλογη, κατά τα γνωστά, της συνολικής δύναμης τάνυσης ($T' + T''$). Επειδή η δύναμη τάνυσης ασκείται εκατέρωθεν της σιδηροτροχιάς, λαμβάνουμε διπλάσια τιμή του συντελεστή τριβής.

▪ Σε καμπύλη

Στην περίπτωση που ο αρμός βρίσκεται σε καμπύλη η επιφάνεια επαφής αμφιδέτη – σιδηροτροχιάς είναι μικρότερη, για τον εξωτερικό αμφιδέτη. Ο εξωτερικός αμφιδέτης πιέζεται επάνω στη σιδηροτροχιά από τους κοχλίες και υποχρεώνεται να παραμορφωθεί λαμβάνοντας καμπυλωμένο σχήμα αντίστοιχο της σιδηροτροχιάς. Το ακριανό τμήμα, όμως, μετά τον τελευταίο κοχλία, συμπεριφέρεται ως πρόβολος δεσμευμένος από τον ακραίο κοχλία. Τελικά, το άκρο του εξωτερικού αμφιδέτη απομακρύνεται από τη σιδηροτροχιά και δεν εφάπτεται σε αυτή. Το βέλος στο σημείο αυτό είναι μικρό, σχετικά με την ακτίνα της καμπύλης, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας επαφής αμφιδέτη – σιδηροτροχιάς και τελικά, τη μείωση της αντίστασης αμφίδεσης σε σχέση με την τιμή, που αυτή έχει, στην ευθεία.

Στην καμπύλη, τα άκρα του εξωτερικού αμφιδέτη δεν εφάπτονται στην σιδηροτροχιά, ενώ ο εσωτερικός αμφιδέτης εφάπτεται σε όλο το μήκος του. Έτσι η ασκούμενη εγκάρσια δύναμη στη σιδηροτροχιά από τον εσωτερικό αμφιδέτη στα άκρα του δεν εξισορροπείται από το αντίστοιχο τμήμα του εξωτερικού, όπως συμβαίνει στην ευθεία. Αυτό το «πλεόνασμα» δύναμης τείνει να μετατοπίσει τη σιδηροτροχιά προς το εξωτερικό της καμπύλης. Παρόλ' αυτά, μετά την πάροδο κάποιου μικρού χρονικού διαστήματος, ο αμφιδέτης, που είναι κατασκευασμένος από ελατό υλικό, λαμβάνει μόνιμη παραμόρφωση στην καμπυλωμένη μορφή και παύει τελικά να πιέζει προς τα έξω τη σιδηροτροχιά.

γ) Επιλογή τύπου αμφιδέτη

Η επιλογή του καταλληλότερου αμφιδέτη εξαρτάται από τα εξής στοιχεία: μορφή του αμφιδέτη (επίπεδος, γωνιακός, μορφής U, Z) με χαρακτηριστικό τη συμμετρία, το μέγεθος και τον τύπο της σιδηροτροχιάς, το μήκος του αμφιδέτη και τις οπές των κοχλιών που περιλαμβάνει, την τοποθέτηση των οπών πάνω στον αμφιδέτη (όχι πολύ κοντά οι κεντρικές, όσο γίνεται κοντά στα άκρα οι εξωτερικές, χωρίς κίνδυνο να σπάσει το έλασμα). Γενικά ο σχεδιασμός του αμφιδέτη πρέπει να συνδυάζει ικανή ποσότητα και κατανομή μετάλλου ώστε να δίνει αντοχή και ακαμψία, ικανοποιητική συμμετρία τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα, σχήμα που να επιτρέπει εύκολη επεξεργασία και τέλεια επαφή με τις επιφάνειες της σιδηροτροχιάς που φορτίζονται. Οι επικρατέστεροι τύποι αμφιδέτη είναι ο γαλλικός τύπος (κυματοειδούς μορφής) και ο αμερικάνικος τύπος (αμφιδέτης με ελεύθερη κεφαλή) [10].

δ) Κοχλίες, ένταση των κοχλιών

Χρησιμοποιούνται τανυόμενοι κοχλίες, οι κεφαλές των οποίων τοποθετούνται εναλλάξ εσωτερικά και εξωτερικά των ελασμάτων, ώστε να εμποδιστεί η αποκόλληση όλων των παξιμαδιών από τους κοχλίες στην περίπτωση εκτροχιασμού. Η προένταση των κοχλιών είναι ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό των συνδέσεων, την τοποθέτηση και τη συντήρηση. Πρέπει να εξασφαλίζεται ικανή τάση των κοχλιών ώστε να πιεστεί ο αμφιδέτης όσο το δυνατό πιο πολύ πάνω στα κοίλα τμήματα της σιδηροτροχιάς, εξασφαλίζοντας καλή επαφή και μείωση της κατακόρυφης μετακίνησης μεταξύ της σιδηροτροχιάς και του αμφιδέτη και τελικά να αποτρέψει τη στροφή και την κάμψη της σιδηροτροχιάς. Επίσης, μετά την τοποθέτηση των αμφιδετών υπάρχει η ανάγκη για μια ή περισσότερες συσφίξεις των κοχλιών, καθώς οι δοκιμές και η εμπειρία έδειξαν ότι η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή φορτίων (από την κυκλοφορία) μετακινεί τον αμφιδέτη πιο κοντά στη σιδηροτροχιά, με χαλάρωση των κοχλιών [10].

ε) Στοιχεία εγκατάστασης

Είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί επαρκής τριβή ανάμεσα στον αμφιδέτη και τη σιδηροτροχιά, να τοποθετηθεί σωστά ο αμφιδέτης (ευθεία και όχι υπό κλίση), να ενταθούν οι κοχλίες με τη σωστή σειρά (πρώτα οι κεντρικοί, μετά

οι εξωτερικοί) και να γίνεται λίπανση ώστε να μην κολλούν τα ελάσματα πάνω στις σιδηροτροχιές [10].

στ) Φθορά και συντήρηση αμφιδετών

Η φθορά που υφίσταται στο μέσο σύνδεσης και στις κοίλες επιφάνειες επιτρέπει στους αμφιδέτες να μετακινηθούν προς τα μέσα και πιο κοντά στον κορμό των σιδηροτροχιών και μπορεί να συνεχίσει μέχρις ότου ο αμφιδέτης να εφάπτεται στον κορμό. Οι φθαρμένες επιφάνειες μπορούν να επιδιορθωθούν με προσθήκη επιπλέον μετάλλου με συγκόλληση και επεξεργασία ώστε να έρθουν στην κατάλληλη μορφή είτε επί τόπου είτε στο εργοστάσιο. Παράλληλα, πρέπει να βελτιώνεται και η σιδηροτροχιά. Μπορεί να είναι αναγκαία, μετά από κάποιο διάστημα, η εξ ολοκλήρου αλλαγή του αμφιδέτη. Η συντήρηση των αμφιδετούμενων σημείων σύνδεσης απαιτεί μεγάλο όγκο έργων [10].

ζ) Ειδικές μορφές αμφιδετών

Χρησιμοποιούνται ειδικοί τύποι αμφιδετών για πχ. συνδέσεις διαφορετικών μορφών σιδηροτροχιών ή μονωτικοί αμφιδέτες, κτλ [10].

2.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΜΟΥ

Επειδή με τη σύνδεση των σιδηροτροχιών με την παραπάνω μέθοδο δεν επιτυγχάνεται η τέλεια εξάλειψη των αναφερθέντων μειονεκτημάτων εφαρμόστηκε η συγκόλληση των σιδηροτροχιών στη θέση του αρμού. Έτσι, αποφεύγεται το διάκενο στον αρμό και η δημιουργία γόνατος και υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των επιφανειών κύλισης των δύο εκατέρωθεν σιδηροτροχιών [6]. Από μια άποψη η απουσία αμφιδέτη σε μικρά διαστήματα, μεταξύ των σιδηροτροχιών, δεδομένου ότι δεν υπάρχει αρμός, απλοποιεί τον υπολογισμό της ΣΣΣ έναντι των σιδηροτροχιών μικρού μήκους. Από πλευράς ελάχιστου μήκους, ως συνεχώς συγκολλημένη σιδηροτροχιά (ΣΣΣ) θεωρείται η σιδηροτροχιά της οποίας το μήκος είναι επαρκές ώστε τουλάχιστον ένα σημείο της να μένει σταθερό, με οποιοσδήποτε μεταβολές της θερμοκρασίας [1].

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 [1].

α) Πλεονεκτήματα της ΣΣΣ

Η ΣΣΣ μπορεί να θεωρηθεί 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. [2]

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 [9].

β) Προβλήματα με τη ΣΣΣ

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

- (1) Εξαιτίας των μεταβολών της θερμοκρασίας, η πίεση στην αξονική διεύθυνση της σιδηροτροχιάς αυξάνει, προκαλώντας τον κίνδυνο μιας ξαφνικής εγκάρσιας μετατόπισης, όπως περιγράφεται παρακάτω.
- (2) 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.
- (3) Μια μερική αντικατάσταση της γραμμής της ΣΣΣ εξαιτίας της φθοράς της σιδηροτροχιάς, κτλ απαιτεί μεγαλύτερο όγκο δουλειάς απ' ότι στην αμφιδετούμενη γραμμή.

Η ξαφνική εγκάρσια μετατόπιση στο (1), 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. Περαιτέρω αναλύεται παρακάτω (βλ. σταθερότητα της γραμμής).

Όταν σπάει μια σιδηροτροχιά, όπως αναφέρεται στο (2), 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.

Η φθορά της σιδηροτροχιάς που περιγράφεται στο (3) 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:

- (4) 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' ό,τι στην κανονική ΣΣΣ.
- (5) 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:

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

Όλα τα προβλήματα από το (4) μέχρι το (6) 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 [9]. Στα παρακάτω μελετάται το πρόβλημα, που αφορά στην εμφάνιση της πλευρικής μετατόπισης, τόσο στην ευθεία, όσο και στην καμπύλη.

γ) 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 [10]. 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 [2].

δ) Περιορισμοί για την εγκατάσταση ΣΣΣ

Παρακάτω είναι οι περιορισμοί για την εγκατάσταση των μακρίων σιδηροτροχιών:

(1) Ευθύγραμμη οριζοντιογραφία

Οι μακριές σιδηροτροχιές, καλό είναι να τοποθετούνται όσο γίνεται σε ευθεία γραμμή. Στην περίπτωση καμπύλης η εφαρμογή μπορεί να είναι επικίνδυνη για τη σταθερότητα της γραμμής στις περιοχές πολύ απότομων καμπυλών (μικρές οριζοντιογραφικές καμπύλες). Ο υπολογισμός της σταθερότητας της γραμμής στις απότομες καμπύλες είναι επιβεβλημένος [2].

(2) 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 10εκ., διότι τα πειράματα απέδειξαν ότι αυτό είναι πιο σημαντικό από μια επέκταση του έρματος στο οριζόντιο επίπεδο [2].
- Σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της σταθερότητας 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 2,4μ., 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 μήκος γραμμής και για μήκος στρωτήρα 2,6μ. 15N/mm μήκος γραμμής. Μετά από αναμόχλευση του έρματος πέφτει η εγκάρσια αντίσταση κατ' αρχήν στο 55% και αυξάνει στη συνέχεια μετά από συμπίκνωση 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 [7].
- 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 $I_E=2 \times 2,5 \times I_{YY}$ (όπου I_{YY} η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς ως προς τον κατακόρυφο άξονα) [7].

(3) Συγκόλληση των σιδηροτροχιών

- Οι σιδηροτροχιές συγκολλούνται μεταξύ τους με αργιλοθερμική μέθοδο, ηλεκτρική συγκόλληση με αντίσταση, αυτογενή συγκόλληση, ηλεκτρική συγκόλληση με βολταϊκό τόξο [2].

(4) Θερμοκρασία τοποθέτησης σιδηροτροχιών

- Η θερμοκρασία τοποθέτησης των μακριών 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 [2]. 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 [1].

(5) Άλλα

- Οι μακριές σιδηροτροχιές πρέπει να τοποθετούνται με αρμούς διαστολής.
- Στην περίπτωση γέφυρας, χωρίς έρμα, μήκους μεγαλύτερου των 50μ, 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 συστολή 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 [2].

ε) Συγκόλληση και μεταφορά των σιδηροτροχιών

(1) Συγκόλληση μακριών 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 300μ.

- Δεύτερο στάδιο της συγκόλλησης

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

- Τρίτο στάδιο συγκόλλησης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την τοποθέτηση ή αντικατάσταση μακριών σιδηροτροχιών, πρέπει να συγκολληθούν και στα δύο άκρα με τις προσαρμοσμένες σιδηροτροχιές με μέθοδο φωτοβολταϊκού τόξου ή με θερμική συγκόλληση [2].

(2) Μεταφορά των μακριών σιδηροτροχιών

Οι σιδηροτροχιές που έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους σε μήκη 300μ πρέπει να μεταφερθούν στο σημείο τοποθέτησης πάνω σε ένα ειδικό συρμό (rail-carrying train) [2].

στ) Διαχείριση και συντήρηση των μακριών σιδηροτροχιών

(1) Συνθήκες διαχείρισης των μακριών 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 [2].

(2) Περιορισμοί στα έργα συντήρησης των μακριών 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 [2].

ζ) 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 εμφανίσει πλευρική μετατόπιση [2]. 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 [9]. Όλα τα παραπάνω συνιστούν ιδιαίτερα σημεία που πρέπει να σχεδιαστούν και υπολογιστούν προσεκτικά, όταν χρησιμοποιείται η ΣΣΣ.

η) 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 [1].

Η επιδομή στη Γαλλία αποτελείται από σιδηροτροχιές μήκους κυμαινόμενου περί των 800μ. Οι σιδηροτροχιές βάρους συνήθως 50χλγ/μ και μήκους 18μ., συγκολλούνται μεταξύ τους στα συνεργεία των σιδηροδρόμων μέχρι μήκους 300μ. (περίπου 288μ.) με ηλεκτρική συγκόλληση, και στη συνέχεια μεταφέρονται στη σιδηροδρομική γραμμή με ειδικό συρμό και συγκολλούνται μεταξύ τους με αργιλοθερμική μέθοδο μέχρι μήκος περίπου 800μ. 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 [6].

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 οριζοντιώσεως 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 οριζοντιώσεως (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) [1].

II. ΧΑΣΜΑΤΑ ΑΡΜΩΝ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΘΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. ΧΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΡΜΩΝ

Όπως αναφέρθηκε, κατά την τοποθέτηση των σιδηροτροχιών στη γραμμή είναι απαραίτητη η διαμόρφωση αρμού, τόσο λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τα τυποποιημένα μήκη των σιδηροτροχιών, όπως αυτές κατασκευάζονται στο εργοστάσιο, όσο και λόγω του ότι πρέπει να αφεθούν κενά διαστήματα μεταξύ των σιδηροτροχιών, για να επιτραπεί η μετακίνηση των άκρων τους εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών. Η περιοχή σύνδεσης συνιστά μια κρίσιμη περιοχή προβλημάτων για τη γραμμή. Η σύνδεση των σιδηροτροχιών μεταξύ τους μπορεί να γίνει με αμφίδεση και με συγκόλληση στον αρμό.

Έτσι, για την τοποθέτηση της γραμμής είναι απαραίτητος και ο υπολογισμός του μεγέθους του διακένου στον αρμό, κυρίως για να μελετηθούν ολοκληρωμένα οι συνθήκες τοποθέτησης της γραμμής, καθώς και η θερμοκρασία τοποθέτησης της γραμμής (ουδέτερη θερμοκρασία). Με βάση τα δύο αυτά μεγέθη και δεδομένων των συνθηκών θερμοκρασίας, σύνδεσης και έδρασης, μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα χάσματος – μεταβολής θερμοκρασίας. Με τη βοήθεια αυτού του διαγράμματος, διαχωρίζονται οι σιδηροτροχιές, ανάλογα με το μήκος τους σε βραχείες, μακριές και συνεχείς (ή Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές).

1.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Για τη μελέτη της κλίμακας των χάσμάτων αρμού κατά την αρχική τοποθέτηση σιδηροτροχιών και για την επίτευξη των ευμενέστερων αποτελεσμάτων ευστάθειας και καταπόνησης των σιδηροτροχιών λαμβάνονται υπόψη:

- α) οι κλιματολογικές συνθήκες διακυμάνσεως της θερμοκρασίας στο τμήμα γραμμής που πρόκειται να εφαρμοστεί η σύνδεση,
- β) ο τύπος της σιδηροτροχιάς,
- γ) το μήκος της σιδηροτροχιάς στην αμφιδετούμενη γραμμή,
- δ) οι συνθήκες αμφίδεσης και σύνδεσης σιδηροτροχιάς και στρωτήρα, μέσω των ελαστικών συνδέσμων και εδράσεως των στρωτήρων επί του έρματος,
- ε) η θερμοκρασία και το αντίστοιχο χάσμα τοποθέτησης.

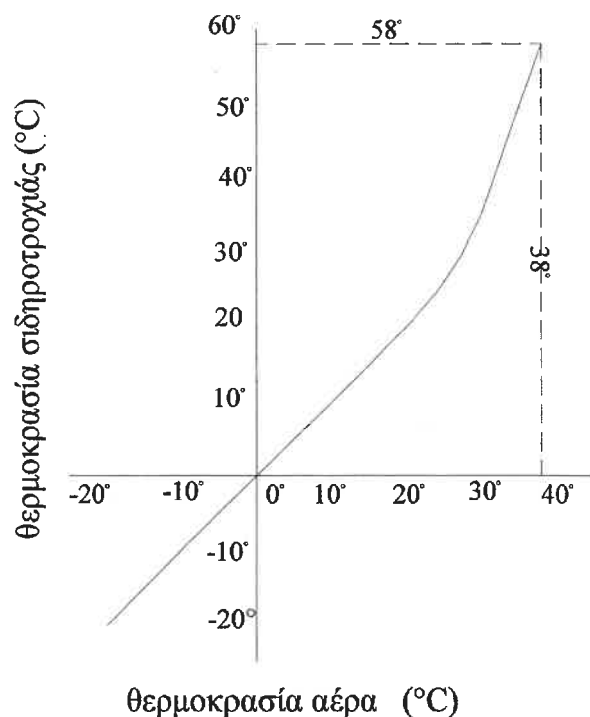
1.1.1 Κλιματολογικές συνθήκες και όρια διακύμανσης της θερμοκρασίας

Το χάσμα του αρμού λόγω της εκάστοτε διαφοράς θερμοκρασίας αυξομειώνεται και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι δυνατό να φθάσει το όριο το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατό να κλείσει τελείως ο αρμός. Ενδιαφέρει συνεπώς να γνωρίζουμε τα όρια θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών, αφ' ενός κατά τον δριμύτερο παγετό του χειμώνα, αφ' ετέρου κατά το μεγαλύτερο καύσωνα του καλοκαιριού. Απαιτούνται στοιχεία απ' ευθείας μετρήσεων των διακυμάνσεων της

θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών. Είναι γνωστό ότι οι θερμοκρασίες αυτές, όπως και του εδάφους, δεν είναι οι ίδιες με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα, δεδομένου ότι απορροφάται διαφορετικό ποσό θερμότητας από την ακτινοβολία και ανέρχεται η θερμοκρασία.

Από πειράματα σε διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα (βλ. A.J.C. XIII^e Session Paris 1937 Rapport YAMADA σελίδα 1439/237) η σύγκριση περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα και της υποκείμενης σιδηροτροχιάς δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα (σχ.13), σύμφωνα με το οποίο από θερμοκρασία αέρα $+20^{\circ}$ και κάτω η αντίστοιχη θερμοκρασία της σιδηροτροχιάς παραμένει περίπου η ίδια, ενώ για θερμοκρασία άνω των $+20^{\circ}$ υφίσταται διαφορά θερμοκρασίας επί πλέον για τη σιδηροτροχιά. Η διαφορά αυτή αυξάνει βαθμιαία, αλλά όχι κατ' ευθύ λόγο. Έτσι για θερμοκρασία 38° του ατμοσφαιρικού αέρα αντιστοιχεί θερμοκρασία σιδηροτροχιάς 58° .

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν απ' ευθείας μετρήσεις της θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών και των ορίων διακυμάνσεως αυτής είναι δυνατό να ζητηθούν ενδεικτικά από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα και εδάφους, εφόσον υφίστανται, για το συγκεκριμένο τμήμα. Κατά προσέγγιση μπορούμε να δεχθούμε τη θερμοκρασία σιδηροτροχιών ίση προς τη θερμοκρασία εδάφους ή και λίγο μεγαλύτερη [4].



Σχήμα 13

Διάγραμμα σύγκρισης θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα και σιδηροτροχιά
Πηγή [5]

1.1.2 Τύπος σιδηροτροχιάς

Ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς, λαμβάνονται στοιχεία χρήσιμα για τους υπολογισμούς, όπως είναι το βάρος και το εμβαδόν της διατομής της σιδηροτροχιάς. Όσο βαρύτερη είναι η σιδηροτροχιά, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που δρουν σε αυτή.

1.1.3 Αντιστάσεις κατά την μετακίνηση της σιδηροτροχιάς

Κατά την μετακίνηση των άκρων της σιδηροτροχιάς, εμφανίζονται τριβές αντίστασης, οι οποίες οφείλονται τόσο στην αμφίδεση (αντίσταση αμφίδεσης), όσο και στην αντίσταση στην κατά μήκος μετακίνηση της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα και του στρωτήρα επί του έρματος [5].

Για τους υπολογισμούς, οι δυνάμεις αυτές είναι απαραίτητο να προσδιορισθούν. Εάν υφίστανται παρατηρήσεις λαμβάνονται οι τιμές τους σύμφωνα με αυτές, ενώ αν δεν υφίστανται μπορούμε να στηριχθούμε στις παρατηρήσεις άλλων σιδηροδρομικών δικτύων, με κατάλληλες προσαρμογές για τις τοπικές συνθήκες.

Έτσι, η αντίσταση αμφίδεσης R_L επηρεάζεται από τη ροπή τάνυσης των κοχλιών σύνδεσης του αμφιδέτη με τη σιδηροτροχιά, από τη φθορά λόγω λειτουργικού φορτίου και καιρικών συνθηκών και από την μορφή των επιφανειών μετάδοσης της πίεσης μεταξύ του αμφιδέτη και της σιδηροτροχιάς. Παρατηρούνται στην πράξη αντιστάσεις τριβής αμφίδεσης από 50 – 200 KN. Για αντιστάσεις του αμφιδέτη μικρότερες των 50KN, παρατηρείται το φαινόμενο της παραμόρφωσης των κοχλιών και του θρυμματισμού ακμών του αμφιδέτη κατά την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων. Κατά την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων παρατηρείται το φαινόμενο της συσώρευσής τους στον αρμό. Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται μια τιμή υπολογισμού της R_L των 100KN [7].

Η αντίσταση τριβής ολισθήσεως της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους και του βαθμού σύσφιξης των συνδέσεων και μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη (μπορεί να φτάσει και το οκταπλάσιο) της αντίστασης ολισθήσεως των στρωτήρων επί του έρματος [5]. Ο σύνδεσμος πρέπει να εμποδίζει τον «ερπυσμό» της σιδηροτροχιάς πάνω στους στρωτήρες, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μακρών συγκολλημένων σιδηροτροχιών. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν ο σύνδεσμος εξασφαλίζει επαρκή πίεση από την επαφή, στη βάση της σιδηροτροχιάς. Σήμερα, με την κατασκευή ποικιλίας τύπων συνδέσμων, εξασφαλίζονται οι παραπάνω απαιτήσεις για τη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τους στρωτήρες, ώστε η εμφανιζόμενη αντίσταση στη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων να μην είναι κρίσιμη.

1.1.4 Θερμοκρασία και αντίστοιχο χάσμα τοποθέτησης

Για τις Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές, αναφέρεται η ουδέτερη θερμοκρασία ή η θερμοκρασία απελευθέρωσης των τάσεων, η οποία επιλέγεται σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και το υψόμετρο εδάφους πάνω από τη θάλασσα, καθώς και από την οριζοντιογραφία της

χάραξης. Το χάσμα τοποθέτησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία τοποθέτησης και από το μήκος της σιδηροτροχιάς [7].

Όπως αναπτύσσεται και παρακάτω, τα στοιχεία αυτά της τοποθέτησης, εκλέγονται ανάλογα με τις μέγιστες δυνάμεις που υπολογίζεται ότι θα δράσουν επί της σιδηροτροχιάς και επί άλλων στοιχείων της γραμμής, ώστε να υφίστανται τελικά, οι ευμενέστερες συνθήκες κατά τη λειτουργία της γραμμής.

1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Η μεταβολή μήκους της σιδηροτροχιάς (διαστολή ή συστολή), που οφείλεται σε μεταβολή της θερμοκρασίας και οι αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται στη σιδηροτροχιά μπορούν να υπολογιστούν, αν θεωρηθεί ότι αντιστοιχούν στα πραγματοποιούμενα μεγέθη μιας ελεύθερης σιδηροτροχιάς και μιας πλήρως δεσμευμένης. Πρακτικά, η εντός των ορίων χάσματος του αρμού ελεύθερη διαστολή ή συστολή της σιδηροτροχιάς είναι στην πραγματικότητα ανέφικτη, λόγω των αντιδράσεων αμφίδεσης και κατά μήκος τριβής, που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Επίσης, πλήρως δεσμευμένη σιδηροτροχιά αντιστοιχεί σε σιδηροτροχιά στην οποία αποκλείεται κάθε μετακίνηση κατά μήκος, συνθήκες τοποθέτησης οι οποίες εφαρμόζονται κατά τη συνεχή συγκόλληση των σιδηροτροχιών [7]. Παρ' ολ' αυτά, ακόμα και οι ΣΣΣ έχουν ορισμένο μήκος (πχ. 800μ) και διαμορφώνεται ο λεγόμενος αρμός διαστολής, ώστε τελικά να μην πραγματοποιούνται πρακτικά οι συνθήκες πλήρους δέσμευσης.

Στα αμφιδετούμενα χάσματα αρμών, με σταθερή σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τον στρωτήρα και με τον εγκιβωτισμό των στρωτήρων εντός του έρματος, εμφανίζονται στη σιδηροτροχιά, όπως ακριβώς και στον συγκολλημένο αρμό, αξονικές δυνάμεις. Αυτές οι δυνάμεις, μεταφέρονται μέσω των συνδέσμων και των στρωτήρων στην υποδομή, έτσι ώστε, να πραγματοποιείται μόνο ένα μέρος της θεωρητικής μεταβολής του χάσματος του αρμού, που προκύπτει για την ελεύθερη σιδηροτροχιά. Αυτό σημαίνει, ότι και η αμφιδετούμενη σιδηροτροχιά συμπεριφέρεται, για μια συγκεκριμένη περιοχή μεταβολής της θερμοκρασίας, όπως και η αντίστοιχη χωρίς αρμό και μόνο σε ένα τμήμα του άκρου της σιδηροτροχιάς πραγματοποιείται μια ελεύθερη μεταβολή μήκους [7].

Η διακύμανση της θερμοκρασίας έχει ως επακόλουθο την μεταβολή του χάσματος του αρμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, η οποία καθορίζεται γραφικά, θέτοντας τη θερμοκρασία επί του οριζοντίου άξονα και τα χάσματα του αρμού επί του κατακόρυφου άξονα.

1.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΕΩΝ ΚΑΙ ΜΑΚΡΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ

Η πορεία του διαγράμματος γίνεται εντός των οριακών τιμών μέγιστης και ελάχιστης εμφανιζόμενης θερμοκρασίας και των οριακών τιμών του μέγιστου και του ελάχιστου χάσματος. Οι οριακές εμφανιζόμενες τιμές της θερμοκρασίας μπορεί να συμπίπτουν ή όχι με τις θερμοκρασίες στις οποίες επιτυγχάνονται η μέγιστη τιμή χάσματος (επίτευξη μέγιστου δυνατού χάσματος, το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση) ή η ελάχιστη (μηδενική) τιμή.

Έτσι, γίνεται διαχωρισμός βραχέων και μακρίων σιδηροτροχιών, ανάλογα με το αν εξαντλούνται τα όρια χάσματος εντός της περιοχής διακύμανσης της θερμοκρασίας, για κάποιο μήκος σιδηροτροχιάς. Στις βραχείες σιδηροτροχιές, το χάσμα δε φτάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή του για την ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία, ούτε και την ελάχιστη (μηδενική) τιμή του για τη μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία και οι εμφανιζόμενες δυνάμεις εκτονώνονται πλήρως. Στις μακριές σιδηροτροχιές, αντίθετα, επιτυγχάνονται και τα δύο όρια χάσματος, πριν πραγματοποιηθούν οι ακραίες θερμοκρασίες. Μετά το κλείσιμο του αρμού και μέχρι την πραγματοποίηση της μέγιστης εμφανιζόμενης θερμοκρασίας, η σιδηροτροχιά καταπονείται από θλιπτικές δυνάμεις, ενώ μετά το πλήρες άνοιγμα του αρμού (μέγιστο δυνατό χάσμα) και μέχρι την ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία, η σιδηροτροχιά καταπονείται από εφελκυστικές δυνάμεις.

Ορίζεται, τελικά, ως όριο μακρίων και βραχέων σιδηροτροχιών το μήκος σιδηροτροχιάς, για το οποίο στη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία, επιτυγχάνεται το μέγιστο χάσμα αρμού (οριακά) και στην ελάχιστη θερμοκρασία, το χάσμα κλείνει τελείως (οριακά). Το όριο αυτό είναι διαφορετικό, ανάλογα με το αν πρόκειται για μήκος ελεύθερης σιδηροτροχιάς ή δεσμευμένης. Παρακάτω προκύπτει και ένα επιπλέον μήκος διαχωρισμού μακρίων σιδηροτροχιών και συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών.

Στις βραχείες σιδηροτροχιές, όπου το χάσμα του αρμού δε φτάνει στις ακραίες θερμοκρασίες τα όριά του, δεν εμφανίζονται κρίσιμες δυνάμεις, που μπορεί να καταστρέψουν τη γραμμή. Αντίθετα, στις μακριές σιδηροτροχιές, είναι δυνατό, για μεγάλη ανύψωση της θερμοκρασίας, να εμφανιστούν μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις, που τείνουν να προκαλέσουν την πλευρική μετατόπιση της γραμμής, ενώ, για μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας, κινδυνεύει να σπάσει η σιδηροτροχιά στην περιοχή του αρμού, εξαιτίας των μεγάλων εφελκυστικών δυνάμεων. Η κρίσιμη κατάσταση αντιμετωπίζεται με την επιλογή της θερμοκρασίας και του αντίστοιχου χάσματος τοποθέτησης, ώστε να μην πραγματοποιούνται μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας από την ουδέτερη θερμοκρασία (στην οποία η σιδηροτροχιά θεωρείται άτονη).

1.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ

Αρχικά, υποτίθεται ελεύθερη διαστολή και συστολή της σιδηροτροχιάς, χωρίς αξονική καταπόνηση, και θεωρείται μια θερμοκρασία τοποθέτησης, με αντίστοιχο χάσμα αρμού. Το χάσμα, σ' αυτή την περίπτωση, είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας και το διάγραμμα είναι ευθύγραμμο. Αν πρόκειται για βραχεία σιδηροτροχιά, το διάγραμμα αποτελείται από ένα κεκλιμένο ευθύγραμμο τμήμα, ενώ για μακριά σιδηροτροχιά, το διάγραμμα αποτελείται από μια τεθλασμένη γραμμή: οριζόντιο τμήμα από την ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να κλείνει ο αρμός, κεκλιμένο ευθύγραμμο τμήμα μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία κλείνει τελείως ο αρμός και οριζόντιο τμήμα μέχρι τη μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία.

1.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εντός των ορίων χάσματος του αρμού ελεύθερη διαστολή ή συστολή της σιδηροτροχιάς είναι στην πραγματικότητα ανέφικτη, λόγω των δυνάμεων τριβής αντίστασης. Ανάλογα με τις υποθέσεις για την κατανομή των αντιστάσεων (η αντίσταση αμφίδεσης θεωρείται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα), προκύπτει η τελική μορφή του διαγράμματος για τις δεσμευμένες σιδηροτροχιές. Το χάσμα αρμού εκτελεί μια κλειστή πορεία εντός των οριακών τιμών του, γύρω από τη θερμοκρασία και το αντίστοιχο χάσμα τοποθέτησης, διαγράφοντας ένα κύκλο υστέρησης.

1.6 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΩΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ

Κατά τη μετατόπιση των άκρων της μακριάς σιδηροτροχιάς, παρατηρήθηκε ότι ένα σχετικά μικρό τμήμα της, που πρόσκειται στα άκρα της μετακινείται, ενώ το κεντρικό τμήμα της παραμένει αμετακίνητο. Το παραπάνω δικαιολογήθηκε και υπολογιστικά. Έτσι, συνεχώς συγκολλημένες σιδηροτροχιές θεωρούνται οι μακριές σιδηροτροχιές, των οποίων το μήκος είναι επαρκές ώστε τουλάχιστον ένα σημείο τους (στο κέντρο) να μένει σταθερό, με οποιεσδήποτε μεταβολές θερμοκρασίας [1]. Στις ΣΣΣ, οι τάσεις μεταβάλλονται στο μεσαίο τμήμα, απ' ευθείας ανάλογα με τη μεταβολή θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, το μήκος των σιδηροτροχιών, σε σχέση με τις κατά μήκος δυνάμεις και την πραγματοποίηση πλευρικής μετατόπισης είναι αδιάφορο.

Όπως αναφέρθηκε, στις μακριές σιδηροτροχιές εμφανίζονται δυνάμεις, ανάλογα με την περιοχή της θερμοκρασίας, οι οποίες είναι δυνατό να έχουν μικρές, μη κρίσιμες τιμές, με την κατάλληλη επιλογή χαρακτηριστικών τοποθέτησης. Αντίθετα, στις ΣΣΣ δεν υπάρχει η δυνατότητα της επιλογής των χαρακτηριστικών τοποθέτησης στον αρμό, αφού πλέον οι σιδηροτροχιές

συγκολλούνται σε μεγάλα μήκη. Έτσι, στο μεσαίο τμήμα των ΣΣΣ, οι δυνάμεις λαμβάνουν τέτοιες τιμές, ώστε να είναι ικανές, με την ύπαρξη κάποιας αρχικής ατέλειας στη γραμμή, να προκαλέσουν την πλευρική μετατόπιση της γραμμής. Έτσι, είναι φανερό η σημασία του χαρακτηρισμού της σιδηροτροχιάς ως βραχεία, μακριά ή συνεχής, ώστε να ελέγχονται και να αντιμετωπίζονται οι κρίσιμες καταστάσεις, που εμφανίζει κάθε μια κατηγορία.

1.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΧΩΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑΣ

Το διάγραμμα χάσματος της ΣΣΣ είναι και αυτό κλειστό διάγραμμα, γύρω από τη θερμοκρασία και το αντίστοιχο χάσμα τοποθέτησης, όπως για τη δεσμευμένη σιδηροτροχιά, αλλά δεν περιλαμβάνει ευθύγραμμο κεκλιμένο τμήμα, παρά μόνο αποτελείται από δύο παραβολές, για τις θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται τα όρια χάσματος. Στις ΣΣΣ το χάσμα τοποθέτησης στο αμετακίνητο κομμάτι θεωρείται μηδενικό σε οποιαδήποτε θερμοκρασία τοποθέτησης χωρίς τάσεις.

1.8 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Το διάγραμμα χασμάτων αρμού – θερμοκρασίας επηρεάζεται, τελικά από το προφίλ της σιδηροτροχιάς (βάρος, εμβαδόν διατομής), το μήκος της σιδηροτροχιάς, την αντίσταση αμφίδεσης, την αντίσταση στην κατά μήκος μετακίνηση της σιδηροτροχιάς που οφείλεται στη σύνδεση της με τους στρωτήρες και στον εγκιβωτισμό των στρωτήρων εντός του έρματος, τη θερμοκρασία τοποθέτησης και το αντίστοιχο χάσμα αρμού και από τις μέγιστες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

1.9 ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις, που εμφανίζονται αντίστοιχα για τη χαμηλή και την υψηλή περιοχή της θερμοκρασίας, δρουν στο αμετακίνητο κεντρικό τμήμα της συνεχούς σιδηροτροχιάς. Όπως για την κατάρτιση των διαγραμμάτων, έτσι και για τον υπολογισμό των παραπάνω δυνάμεων, απαιτείται η αρχική εκλογή αφετηρίας υπολογισμού χασμάτων, δηλαδή η εκλογή της θερμοκρασίας και του αντίστοιχου χάσματος τοποθέτησης (για τις βραχείες και τις μακριές σιδηροτροχιές). Για τις συνεχείς σιδηροτροχιές επιλέγεται μόνο η θερμοκρασία απελευθέρωσης των τάσεων (θερμοκρασία τοποθέτησης).

Όσον αφορά στην εκλογή των χαρακτηριστικών τοποθέτησης, λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί που προκύπτουν από τη δράση τόσο των εφελκυστικών όσο και των θλιπτικών δυνάμεων στη σιδηροτροχιά. Πράγματι, όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη εφελκυσμού (εξάντληση μέγιστου δυνατού χάσματος), τόσο επιβαρύνονται οι οπές της ψυχής από τις διατμητικές δυνάμεις, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη θλίψης, τόσο πιο επίφοβη είναι η εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης στη γραμμή. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς εκλέγεται τελικά η αφετηρία. Με τη χρήση των αρμών διαστολής στις ΣΣΣ, δεν είναι κρίσιμες οι εφελκυστικές δυνάμεις, παρά μόνο οι θλιπτικές, οι οποίες τείνουν να λυγίσουν εγκάρσια την εσχάρα της γραμμής (πλευρική μετατόπιση).

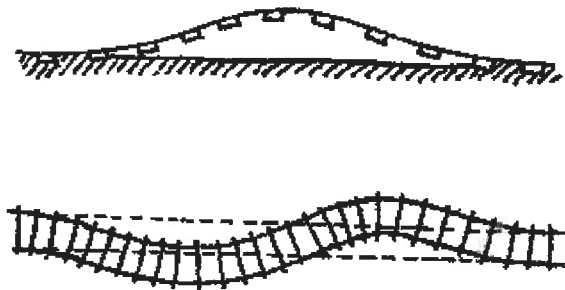
2. Η ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

2.1 Ο ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΓΕΝΙΚΑ

Είναι γνωστό ότι όταν μια ευθύγραμμη ράβδος πρισματικής (σταθερής) διατομής θλίβεται αξονικά, η αύξηση της φόρτισης μέχρι κάποιας ορισμένης (κρίσιμης) τιμής 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 [11]. Αν και τέτοια φόρτιση δεν προκαλεί ροπή κάμψης, είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ανάπτυξη μιας μικρής καμπτικής έντασης, λόγω τις ύπαρξης πάντοτε αρχικών ατελειών [12]. 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 [11].

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 [13].



Σχήμα 14

Πάνω: Ανύψωση της σιδηροδρομικής γραμμής

Κάτω: μετακίνηση της σιδηροδρομικής γραμμής εγκάρσια και οριζόντια
Πηγή [6]

2.2 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ 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 σταθερότητα της γραμμής και στους τρεις άξονες (κατά μήκος, εγκάρσια και κατακόρυφα). Το πρόβλημα της σταθερότητας 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 (αντιστάσεις στην κίνηση), 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 τη

σταθερότητά της και χωρίς να περνά συρμός. Ιδιαίτερα επικίνδυνες για την απώλεια της σταθερότητας είναι οι ΣΣΣ σε κλειστές καμπύλες. Όμως, ακόμα και οι αμφιδετούμενες σιδηροτροχιές δεν εγγυώνται σταθερότητα [7]. Απώλεια της σταθερότητας, 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 σταθερότητας 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% [1].

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 χλστ. και μήκους κύματος 10μ., ή για ένα ελάττωμα γωνιακό ενός χιλιοστού του ακτινίου [1]. 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 [3].

Διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται κυρίως κατά τη στιγμή της διέλευσης των συρμών και όχι όταν η γραμμή είναι αφόρτιστη [3].

2.2.2 Ο κίνδυνος πλευρικής μετατόπισης

Ο κίνδυνος πλευρικής μετατόπισης, που συνιστά ένα βασικό περιορισμό για την τοποθέτηση της γραμμής, αποτελεί ουσιαστικά το πρόβλημα της σταθερότητας της 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 σταθερότητα, 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 [13].

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 σταθερότητας με επαρκή ακρίβεια, και αποτελεί μια πρακτική πρόταση, ώστε να εξασφαλίζεται εύκολα και οικονομικά κάθε γραμμή, ευθεία και καμπυλωμένη, έναντι πλευρικής μετατόπισης [13]. 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 [7].

Η ουσία του υπολογισμού της σταθερότητας 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 παράγοντες που υπεισέρχονται αναφέρονται στη 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 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).

2.2.3 Γενικές αρχές της μεθόδου του MEIER

Ως πλευρική μετατόπιση, θεωρείται η καταστροφή μέρους της γραμμής, μέσω μιας λιγότερο ή περισσότερο αιφνίδιας εκτόνωσης των θλιπτικών δυνάμεων, που μπορούν να συγκεντρωθούν στη σιδηροτροχιά. Μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις εμφανίζονται κυρίως το καλοκαίρι, με θέρμανση της σιδηροτροχιάς, ενώ εμποδίζεται η διαστολή της σιδηροτροχιάς. Η εμπειρία έδειξε, ότι πρέπει να γίνει διαχωρισμός μεταξύ μιας «ανεξάρτητης πλευρικής μετατόπισης της

γραμμής» και μιας «πλευρικής μετατόπισης της γραμμής υπό διερχόμενο συρμό». Η θεωρητική διασαφήνιση για τον πρώτο θεωρούμενο πιθανό τρόπο πλευρικής μετατόπισης είναι επαρκώς ακριβής. Για τον δεύτερο, δεν υπάρχουν σίγουρες τιμές για την επίδραση των δυνάμεων των διερχόμενων συρμών. Είμαστε, λοιπόν, αναγκασμένοι, να πάρουμε πολλές χονδρικές εκτιμήσεις. Οι μέχρι τώρα εργασίες πάνω στο πρόβλημα της ΣΘΓ, ασχολήθηκαν τελικά με την «ανεξάρτητη πλευρική μετατόπιση». Η «πλευρική μετατόπιση υπό διερχόμενο συρμό» είναι η πιο επικίνδυνη, δηλαδή, η πιο εύκολη στην πράξη. Πρέπει να συμπεριληφθούν και παρατηρήσεις, καθώς τίθεται σαν στόχος των θεωρητικών αποτελεσμάτων να ληφθούν ακριβείς τιμές, που οφείλουν να εξασφαλίζουν τη γραμμή από πλευρική μετατόπιση. Στα παρακάτω μελετάται η «πλευρική μετατόπιση υπό διερχόμενο συρμό», ώστε να εισαχθεί μια γενική θεωρία και τελικά να αντιμετωπιστεί σαν επέκταση της «ανεξάρτητης πλευρικής μετατόπισης».

Θέλουμε εδώ, να ασχοληθούμε μόνο με τη συνεχή γραμμή. Κι αυτό γιατί η εξέταση είναι πιο εύκολη απ' ό,τι για αμφιδετούμενες γραμμές. Η ροπή αδράνειας της εσχάρας της γραμμής, που υπόκειται σε απομάκρυνση του αρμού, δεν διακόπτεται, και οι επικίνδυνες αξονικές δυνάμεις στη σιδηροτροχιά μπορούν κατά κανόνα να θεωρηθούν ότι κατανέμονται ομοιόμορφα σε πλάτος. Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν για τη συνεχή γραμμή επιτρέπουν την επέκταση για μεγάλες μάζες και στις αμφιδετούμενες γραμμές.

Θεωρούμε στην παρακάτω μελέτη ότι η πλευρική μετατόπιση της γραμμής είναι ένας καθαρά ελαστικός λυγισμός. Φυσικά, μπορεί μια πλευρική μετατόπιση της γραμμής που βρίσκεται υπό θλίψη, να προκαλέσει καταπόνηση του υλικού της σιδηροτροχιάς πάνω από τα όρια αντοχής του. Η μελέτη αυτής της πιθανότητας πλευρικής μετατόπισης γίνεται, ορίζοντας τη μέγιστη θλιπτική τάση στη σιδηροτροχιά και συγκρίνοντας αυτή την τιμή με το όριο αντοχής του υλικού της σιδηροτροχιάς.

Όσον αφορά στη φύση του λυγισμού, ξεχωρίζουμε μεταξύ κατακόρυφου και οριζόντιου λυγισμού της γραμμής. Σε αντίθεση με τον λυγισμό σε απλή υπό θλίψη ράβδο, όπου είναι γνωστό «μόνο» το ότι η εξωτερικά επιβαλλόμενη θλιπτική δύναμη υπερνίκησε την καμπτική αντοχή της ράβδου (μελέτη του Euler), εμφανίζεται στον λυγισμό της υπό θλίψη γραμμής μια κατακόρυφη ανύψωση, που ενεργοποιεί το βάρος της γραμμής και μια πλευρικά εναλλακτική μετακίνηση, που ενεργοποιεί την αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση της εσχάρας εντός του έρματος. Το ίδιο το μήκος του λυγισμού είναι άγνωστο και μεταβάλλεται με την εξέλιξη του φαινομένου του λυγισμού. Τα γεγονότα αυτά καθιστούν την ακριβή θεωρητική εξήγηση του φαινομένου της πλευρικής μετατόπισης ιδιαίτερα δύσκολη.

Καθαρά από φυσικής πλευράς, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί σε μια ράβδο απείρου μήκους, η οποία εδράζεται με τριβή. Θεωρούμε ότι η έδραση (έρμα) αυτή είναι ακίνητη. Ίδιον βάρος, εμβαδόν, ροπή αδράνειας και αρχική καμπυλότητα της ράβδου, όπως και θλιπτική δύναμη και τιμή τριβής μπορούν το καθένα να εκτιμηθούν. Στην παρακάτω μελέτη λαμβάνονται ως δεδομένα.

Για να μελετηθεί ο κίνδυνος σε πλευρική μετατόπιση μιας συγκεκριμένης ράβδου, πρέπει να προσομοιωθεί η γραμμή κάμψης της ράβδου για την κρίσιμη κατάσταση με τη βοήθεια μιας διαφορικής εξίσωσης (βλ. παρακάτω). Αυτό προϋποθέτει, είτε πρόκειται για τη σταθερότητα στο οριζόντιο είτε στο

κατακόρυφο επίπεδο, τη χρήση λιγότερων ή περισσότερων μαθηματικών, που συνεπάγεται δυσκολία στον υπολογισμό. Η λύση βρίσκεται στην χρήση κάποιας παραδοχής για τη μορφή της γραμμής κάμψης, για κατακόρυφο και οριζόντιο λυγισμό, καθώς και για ευθεία ή καμπύλη.

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 γεωμετρική μορφή της ράβδου. 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.

2.2.3 Παράγοντες

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.

Τέλος, εξετάζεται και η επίδραση του διερχόμενου συρμού.

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 είναι ίσος με $1,15 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Εμβαδόν διατομής

Όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν 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.

Βάρος σιδηροτροχιάς

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

Πίνακας 1:

Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών

Τύπος σιδηροτροχιάς	Βάρος σιδηροτροχιάς $g[kg/m]$	Εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς $F[mm^2]$	Ροπή αδράνειας διατομής σιδηροτροχιάς $I_y[mm^4]$
S30	30,00	3645	132×10^4
S40	36,54	4655	200×10^4
U33	46,30	5930	351×10^4
U36	50,56	6450	420×10^4

Πηγή [4]

Ισοδύναμη ακαμψία γραμμής

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. Λαμβάνεται τουλάχιστον ίση με το διπλάσιο της ακαμψίας της σιδηροτροχιάς ($I_E = 2I_y$ (1)) [5], ενώ σε άλλες μεθόδους υπολογισμού της σταθερότητας της γραμμής, η διπλάσια ακαμψία κατά τον κατακόρυφο άξονα της σιδηροτροχιάς πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή 2,5 ($I_E = 2,5 \cdot 2 \cdot I_y$ (2)) [7]. Τέλος, σε άλλη μέθοδο ορίζεται ως ακαμψία της γραμμής ο πολύ γνωστός παράγοντας $2EI_y$, όπου E I_y είναι η εγκάρσια ακαμψία της σιδηροτροχιάς (το E είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδηροτροχιάς, το I_y η ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς ως προς τον κατακόρυφο άξονα που περνά από το κέντρο βαρύτητας του δεξιού τμήματος) [4]. Χαλαρή σύνδεση των σιδηροτροχιών οδηγεί σε μείωση της ακαμψίας της εσχάρας.

Στους Ελβετικούς Σιδηρόδρομους, για σφιχτά συνδεδεμένες σιδηροτροχιές και απόσταση στρωτήρων 60-65cm, υπολογίζεται η I_E υπό την επίδραση των παλινδρομικών κινήσεων (ταλαντώσεων), λαμβάνοντας, έτσι, τη δυναμική

τιμή, ως το διπλάσιο έως το τριπλάσιο της ροπής αδράνειας I_y των δύο σιδηροτροχιών, ανάλογα με το είδος των συνδέσμων. Από μετρήσεις προκύπτει η I_E της εσχάρας $I_E=2,5 \cdot 2 \cdot I_y$ [7]. Ο EISENMANN υπολόγισε πειραματικά για γραμμή κανονικού εύρους τις παρακάτω τιμές I_E [7]:

Πίνακας 2:

Ισοδύναμη ακαμψία γραμμής κατά EISENMANN

Ισοδύναμη ροπή αδράνειας I_E σε [mm ⁴]	S49 ξύλινοι στρωτήρες	UIC 60 – K ξύλινοι στρωτήρες	UIC 60-70 W Beton στρωτήρες
Χαλαρή σύνδεση	638×10^4	1026×10^4	1026×10^4
Σφιχτή (συσφιγμένη)	2600×10^4	2600×10^4	2200×10^4

Πηγή [7]

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

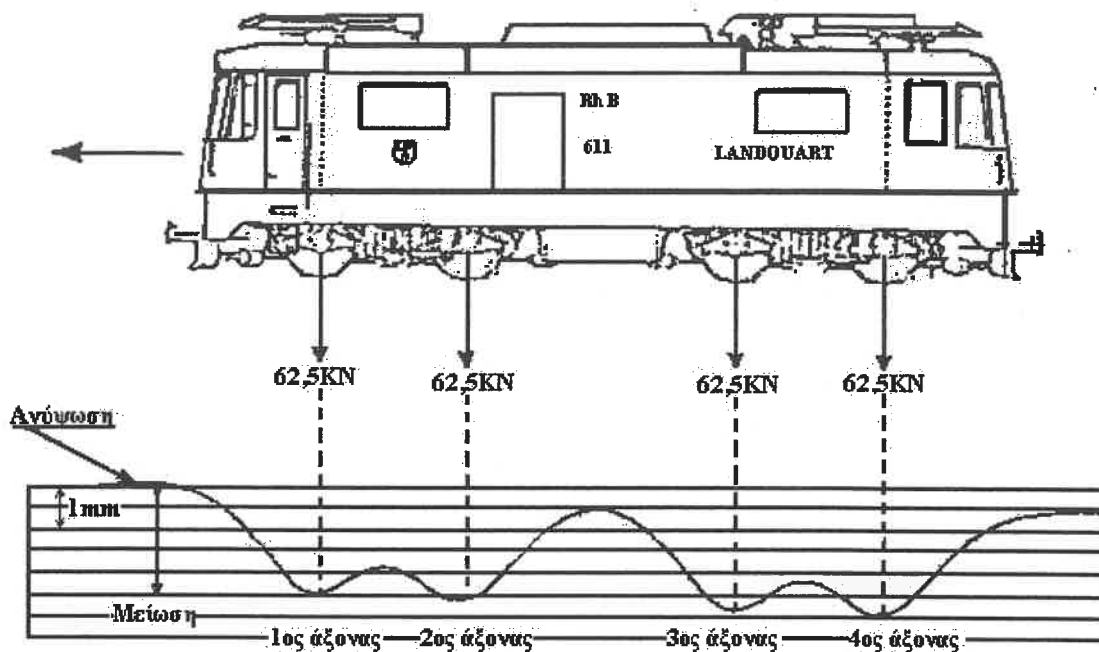
Η αντίσταση αυτή εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του στρωτήρα και σε πρώτη προσέγγιση από το βάρος του. Έτσι, από άποψη βάρους, ο στρωτήρας από σκυρόδεμα πλεονεκτεί, ενώ ο ξύλινος στρωτήρας, λόγω του ότι είναι ελαφρύτερος αναμένεται να εμφανίσει μικρή αντίσταση στην ολίσθηση. Παρόλ' αυτά, με την πάροδο 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 ελαφρότεροι 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 8χλγ/εκ., ενώ στην περίπτωση χαλύβδινων 12 χλγ/εκ., και μπορεί να αυξηθεί με ειδικές διαρρυθμίσεις [5] (Υ-μεταλλικοί στρωτήρες, οι οποίοι, όμως, είναι δαπανηροί).

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής στη μετακίνηση εντός του έρματος είναι ένας βασικός παράγοντας της σταθερότητας 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) [4].

Σύμφωνα με πειράματα των Ελβετικών Σιδηροδρόμων (παραδοχή σταθερής τιμής κατά τον υπολογισμό της σταθερότητας της γραμμής), η εγκάρσια αντίσταση με στρωτήρες από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη με ξύλινους στρωτήρες. Για στρωτήρες από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 2,4m, με απόσταση μεταξύ στρωτήρων 60cm και «πάγκο» έρματος 40cm, η στατική (χωρίς διέλευση συρμού) εγκάρσια αντίσταση, για μετατόπιση 2mm είναι 14N/mm μήκους γραμμής και για μήκος στρωτήρα 2,6m είναι 15N/mm μήκους γραμμής. 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. Αυτό αποδείχθηκε πειραματικά σε γραμμή με ξύλινους στρωτήρες [7].

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 (βλ. παρακάτω για την επίδραση των συρμών στη γραμμή). Το σχήμα 15 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 [7].



Σχήμα 15

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 [7]

Σφάλμα χάραξης της 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 [4]). Στην πρώτη περίπτωση συνιστώμενη τιμή υπολογισμών είναι τα 20mm [5], [7], [8], ενώ για την περίπτωση της μέσης κλίσης του αρχικού ελαττώματος σε ουδέτερο επίπεδο γραμμής προτείνεται η τιμή 4‰ [4], 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: $i_0 = \frac{2f_0}{l_0} = \frac{2 \times 2}{1000} = 4\text{‰}$ (3).

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 εποπτεία [13].

Επίδραση συρμών στη γραμμή

Η επίδραση των συρμών στη γραμμή πραγματοποιείται με τους παρακάτω τρόπους:

- ταλαντώσεις από τους συρμούς και την επιδομή,
- γραμμή κάμψης της γραμμής,
- πρόσθετες αξονικές δυνάμεις από την επιτάχυνση και πέδηση των συρμών
- πλευρικές δυνάμεις από τους συρμούς [14].

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 σε 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, μειώνεται σύμφωνα με το νόμο του PRUD'HOMME [7] και τελικά θεωρείται η συνολική επίδραση όλων των αξόνων του συρμού, καταλήγοντας σε τιμές υπολογισμού 10KN (για ευθεία και καμπύλη) [15].

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. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται μια διαδικασία, στην οποία η επίδραση του συρμού λαμβάνεται άμεσα (βλ. Lättsch, ο οποίος αναφέρει επιμέρους τις επιδράσεις του συρμού [14]) και διερευνάται η τιμή του συντελεστή ασφάλειας των ενεργειακών μεθόδων.

2.2.4 Ορισμός της ασφάλειας έναντι πλευρικής μετατόπισης της γραμμής

Για μεγάλες θερμοκρασίες και για τις εξ' αυτών εμφανιζόμενες θλιπτικές δυνάμεις, η γραμμή τείνει να διασταλεί. Σ' αυτή την τάση της γραμμής αντιστέκονται τα εξής:

- η αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση της γραμμής,
- η στρεπτική αντίσταση ανάμεσα στη σιδηροτροχιά και τους στρωτήρες,
- η αντοχή σε κάμψη των σιδηροτροχιών.

Αρχικά, όταν οι αντιστάσεις αυτές ή οι δυνάμεις εξαιτίας αυτών υπερνικηθούν, εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση. Η ασφάλεια έναντι πλευρικής μετατόπισης της γραμμής, όπως ορίστηκε παραπάνω είναι [14]:

$$k = \frac{P_{krit}}{P} \quad (4)$$

Δηλαδή, συγκρίνεται η κρίσιμη θλιπτική δύναμη P_{krit} (δηλαδή η δύναμη, στην οποία η κατάσταση της γραμμής είναι η κρίσιμη και με την ελάχιστη μεταβολή αυτής της κατάστασης, η γραμμή περνά σε μια ασταθή επικίνδυνη περιοχή) με τη μέγιστη αναμενόμενη θλιπτική δύναμη P . Καθώς η δύναμη είναι ανάλογη της μεταβολής θερμοκρασίας της σιδηροτροχιάς από τη θερμοκρασία τοποθέτησης, μπορεί να συγκριθεί η μεταβολή θερμοκρασίας και ο συντελεστής μπορεί να πάρει τελικά τη μορφή [7]:

$$k = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \quad (5)$$

όπου η Δt_{krit} είναι η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση και Δt είναι η αναμενόμενη μεταβολή θερμοκρασίας.

2.2.5 Μέθοδοι υπολογισμού της ΣΘΓ

Για τη μελέτη της σταθερότητας της θέσης γραμμής αρχικά αναπτύχθηκαν μέθοδοι, οι οποίες είτε προσέγγιζαν το ζήτημα εμπειρικά, είτε ασχολούνταν μόνο με συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ο MEIER εισήγαγε μια ενεργειακή μέθοδο, η οποία στηρίζεται σε μια παραδοχή, που αποτελεί πολύ καλή προσέγγιση. Με βάση τη μέθοδο του MEIER, 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. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση των οριζόντιων δυνάμεων, που οφείλονται στους συρμούς, σαν επέκταση της μεθόδου του EISENMANN. Τέλος, επιχειρείται μια προσέγγιση του θέματος του συνυπολογισμού της επίδρασης του διερχόμενου συρμού από στατικής πλευράς με τη θεωρία της ελαστικής ευστάθειας, καταλήγοντας σε πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

III. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΑΡΜΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΘΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

1. ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΥ

1.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Για τη μελέτη της κλίμακας των χασμάτων αρμού κατά την αρχική τοποθέτηση σιδηροτροχιών μεγάλου μήκους και την επίτευξη των ευμενέστερων αποτελεσμάτων ευστάθειας και καταπόνησης των σιδηροτροχιών λαμβάνονται υπόψη:

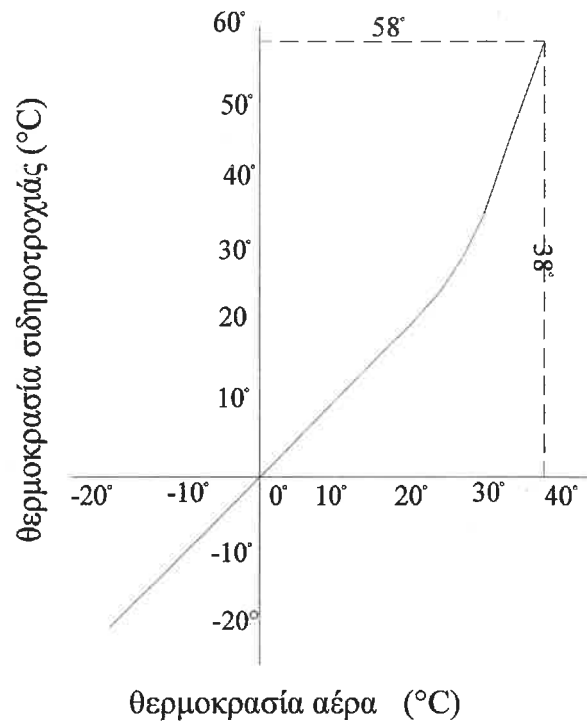
- α) οι κλιματολογικές συνθήκες διακυμάνσεως της θερμοκρασίας στο τμήμα γραμμής που πρόκειται να εφαρμοστεί η συγκολλημένη σιδηροτροχιά και
- β) οι δεδομένες διαστάσεις του τύπου της σιδηροτροχιάς που πρόκειται να συγκολληθεί, οι συνθήκες αμφίδεσης και το περιθώριο χάσματος κατά την αμφίδεση του αρμού, καθώς επίσης και οι συνθήκες συνδέσεως σιδηροτροχιάς και στρωτήρα και εδράσεως των στρωτήρων επί του έρματος.

1.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Το χάσμα του αρμού λόγω της εκάστοτε διαφοράς θερμοκρασίας αυξομειώνεται και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι δυνατό να φθάσει το όριο το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατό να κλείσει τελείως ο αρμός. Ενδιαφέρει συνεπώς να γνωρίζουμε τα όρια θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών, αφ' ενός κατά τον δριμύτερο παγετό του χειμώνα, αφ' ετέρου κατά το μεγαλύτερο καύσωνα του καλοκαιριού. Απαιτούνται στοιχεία απ' ευθείας μετρήσεων των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών. Είναι γνωστό ότι οι θερμοκρασίες αυτές, όπως και του εδάφους, δεν είναι οι ίδιες με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα, δεδομένου ότι απορροφάται διαφορετικό ποσό θερμότητας από την ακτινοβολία και ανέρχεται η θερμοκρασία.

Από πειράματα σε διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα (βλ. A.J.C. XIII^e Session Paris 1937 Rapport YAMADA σελίδα 1439/237) η σύγκριση περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα και της κατακείμενης σιδηροτροχιάς δίνεται από το διάγραμμα (σχ.13), σύμφωνα με το οποίο από θερμοκρασία αέρα +20° και κάτω η αντίστοιχη θερμοκρασία της σιδηροτροχιάς παραμένει περίπου η ίδια, ενώ για θερμοκρασία άνω των +20° υφίσταται διαφορά θερμοκρασίας επί πλέον για τη σιδηροτροχιά. Η διαφορά αυτή αυξάνει βαθμιαία, αλλά όχι κατ' ευθύ λόγο. Έτσι για θερμοκρασία 38° του ατμοσφαιρικού αέρα αντιστοιχεί θερμοκρασία σιδηροτροχιάς 58°.

ΜΕΘΟΔΟΙ



Σχήμα 13

Διάγραμμα σύγκρισης θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα και σιδηροτροχιάς
Πηγή [5]

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν απ' ευθείας μετρήσεις της θερμοκρασίας των σιδηροτροχιών και των ορίων διακυμάνσεως αυτής είναι δυνατό να ζητηθούν ενδεικτικά από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα και εδάφους, εφόσον υφίστανται, για το υπόψιν τμήμα. Κατά προσέγγιση μπορούμε να δεχθούμε τη θερμοκρασία σιδηροτροχιών ίση προς τη θερμοκρασία εδάφους ή και λίγο μεγαλύτερη.

Λαμβάνουμε, έτσι, τη μέγιστη διακύμανση της θερμοκρασίας (περιοχή οριακών θερμοκρασιών) την

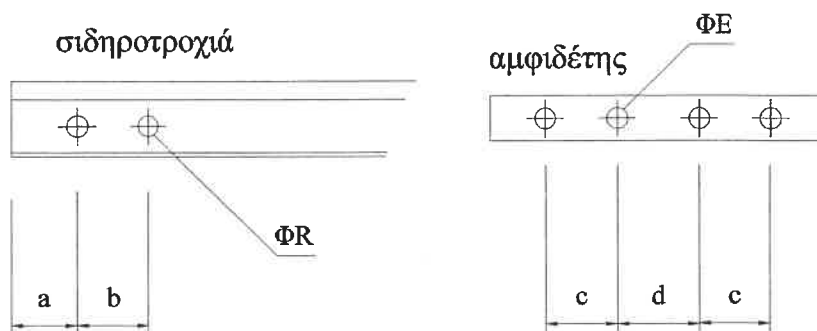
$$\Delta t_{gr} = t_o - t_u \quad (6)$$

όπου t_o = ανώτατο όριο εμφανιζόμενης θερμοκρασίας και
 t_u = κατώτατο όριο εμφανιζόμενης θερμοκρασίας [5]

1.3 ΜΑΚΡΙΕΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΕΙΕΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ

Εξαιτίας της συστολής και της διαστολής των σιδηροτροχιών το χάσμα του αρμού κυμαίνεται μεταξύ του ανώτατου ορίου ℓ_u , που αντιστοιχεί στην κατώτερη οριακή θερμοκρασία t_u , και του κατώτερου ορίου ℓ_0 , που αντιστοιχεί στη μέγιστη οριακή θερμοκρασία t_0 . Το κατώτατο αυτό όριο μπορεί να φτάσει το μηδέν.

Το μέγιστο δυνατό χάσμα ℓ_z είναι το χάσμα το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση και δίνεται από τον τύπο (κατά το Σχήμα 16):



Σχήμα 16
Μέγιστο δυνατό χάσμα αρμού σιδηροτροχιών
Πηγή [5]

$$P = d - 2a + \Phi E + \Phi R - 2\Phi B \quad (7)$$

(βλ. A.J.C. XV^e Session Rome 1950 Rapport Leduc, σελίδα 125/13)

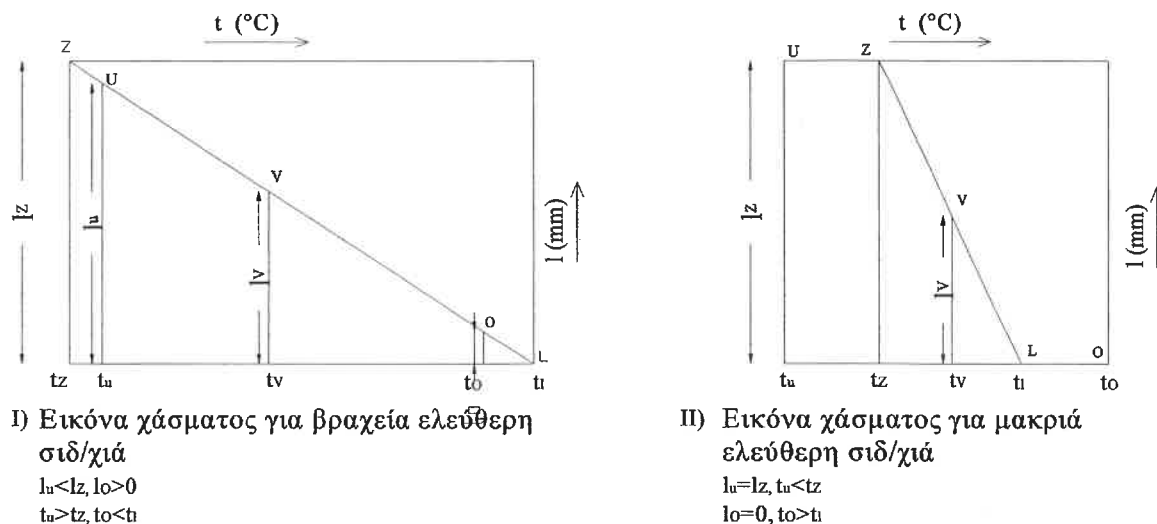
- όπου
- a = απόσταση κέντρου οπής σιδηροτροχιάς από το άκρο
 - b = απόσταση των δύο οπών σιδηροτροχιάς
 - c = απόσταση κέντρου ακραίας οπής αμφιδέτη από τη γειτονική
 - d = απόσταση κέντρων των δύο μεσαίων οπών του αμφιδέτη
 - ΦB = διάμετρος βλήτρου αμφίδεσης
 - ΦR = διάμετρος οπής σιδηροτροχιάς
 - ΦE = διάμετρος οπής αμφιδέτη

Ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και τη μορφή του αμφιδέτη προκύπτει το $P = \ell_z$. Το όριο αυτό της αμφίδεσης δεν είναι πάντοτε απαραίτητο να εξαντληθεί κατά τη συστολή της σιδηροτροχιάς, δεδομένου ότι οι συνθήκες εκμεταλλεύσεως επιβάλλουν όσο το δυνατό μικρότερο χάσμα αρμού. Έτσι διακρίνουμε σιδηροτροχιές βραχείες και μακριές. Στις βραχείες δεν εξαντλείται το όριο χάσματος ℓ_z για την κατώτατη εφικτή θερμοκρασία, δηλαδή $\ell_0 < \ell_z$, ενώ στις μακριές το όριο αυτό εξαντλείται πλήρως. Αντίστοιχα στις βραχείες σιδηροτροχιές το ελάχιστο όριο αρμού μπορεί να είναι $\ell_0 > 0$, ενώ στις μακριές $\ell_0 = 0$ [5].

1.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΥ

Η διακύμανση της θερμοκρασίας έχει ως επακόλουθο την μεταβολή του χάσματος αρμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, η οποία καθορίζεται γραφικά. Αν λάβουμε τη θερμοκρασία επί του άξονα των x και τα χάσματα του αρμού επί του άξονα των y προκύπτουν οι παρακάτω εικόνες χάσματος.

1.4.1 Εικόνα χάσματος για ελεύθερη σιδηροτροχιά (έδραση και αμφίδραση χωρίς τριβή)



Σχήμα 17

Παράσταση χασμάτων ελεύθερων σιδηροτροχιών
 Πηγή [5]

Αν υποθεθεί ελεύθερη διαστολή και συστολή (χωρίς αξονική καταπόνηση της σιδηροτροχιάς) και ξεκινήσουμε από κάποια θερμοκρασία τοποθέτησης t_v με αντίστοιχο χάσμα αρμού l_v , τότε το χάσμα αρμού l για τη θερμοκρασία t δίνεται από τον τύπο:

$$l = l_v - (t - t_v)\alpha L_s \quad (8)$$

$$\text{και } \epsilon\phi\delta = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \alpha L_s \quad (9)$$

όπου α = συντελεστής θερμικής αντίστασης της σιδηροτροχιάς
 L_s = μήκος σιδηροτροχιάς

Κατά την εξίσωση αυτή η πορεία του χάσματος είναι ευθύγραμμη.

Για τις βραχείες σιδηροτροχιές το διάγραμμα μεταξύ των οριακών θερμοκρασιών t_v και t_o δίνεται από το ευθύγραμμο τμήμα UO εντός των οριακών δυνατών χασμάτων l_z και $l_o = 0$ (Σχ.17).

Για τις μακριές σιδηροτροχιές (Σχ.17), εφόσον τα περιθώρια χάσματος εξαντλούνται πριν η θερμοκρασία φθάσει στα ακρότατα όρια, το διάγραμμα παριστάνεται από την τεθλασμένη γραμμή UZLO. Προφανώς στην περίπτωση των μακρών σιδηροτροχιών πέραν των ορίων θερμοκρασίας στις οποίες εξαντλούνται τα όρια χάσματος l_z και $l_L = 0$ (οπότε δεν ισχύει ο τύπος (8)) καθίστανται πλέον δεσμευμένες, υφιστάμενες αξονικές δυνάμεις, εφελκυσμού

για τις θερμοκρασίες από t_z μέχρι t_u και θλίψεως από τις θερμοκρασίες t_L μέχρι t_0 [5].

1.4.2 Διαχωρισμός βραχέων και μακριών σιδηροτροχιών για ελεύθερες σιδηροτροχιές

Το οριακό μήκος για το διαχωρισμό μεταξύ βραχέων και μακριών τροχιών βρίσκεται όταν έχουμε συγχρόνως $t_u = t_z$ και $t_l = t_0$, δηλαδή (10) $\ell_z = \Delta t_{gr} \times \epsilon\phi\delta = \Delta t_{gr} \alpha L_s$. Τελικά, το μήκος διαχωρισμού προκύπτει: $L_s = \frac{\ell_z}{\Delta t_{gr} \cdot \alpha}$ (10α)

[5].

1.4.3 Εικόνα χάσματος για δεσμευμένη σιδηροτροχιά (έδραση και αμφίδεση με τριβή)

Η εντός των ορίων χάσματος του αρμού ελεύθερη διαστολή ή συστολή της σιδηροτροχιάς είναι στην πραγματικότητα ανέφικτη, λόγω της αντιδράσεως, αφ' ενός της τριβής αμφιδέσεως της σιδηροτροχιάς στα άκρα της, αφ' ετέρου της αντιστάσεως στην κατά μήκος μετακίνηση της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα και του στρωτήρα επί του έρματος.

α) Αντιστάσεις κατά την μετακίνηση της σιδηροτροχιάς

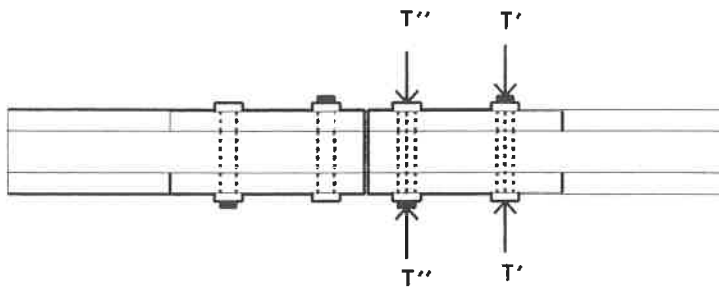
Σκοπός, λοιπόν είναι να υπολογιστούν οι παραπάνω δυνάμεις. Εάν υφίστανται παρατηρήσεις λαμβάνονται οι τιμές τους σύμφωνα με αυτές, ενώ αν δεν υφίστανται μπορούμε να στηριχθούμε στις παρατηρήσεις άλλων σιδηροδρομικών δικτύων.

Αντίσταση αμφιδετών στη μετατόπιση των άκρων της σιδηροτροχιάς

▪ Σε ευθεία

Ο αμφιδέτης αντιστέκεται στη μεταβολή του μήκους της σιδηροτροχιάς, που προκαλείται από τις διάφορες θερμοκρασιακές μεταβολές ΔT (διαστολή και συστολή σιδηροτροχιάς). Η αντίσταση αμφίδεσης R_L επηρεάζεται από τη ροπή τάνυσης των κοχλιών σύνδεσης του αμφιδέτη με τη σιδηροτροχιά, από τη φθορά λόγω λειτουργικού φορτίου και καιρικών συνθηκών και από την μορφή των επιφανειών μετάδοσης της πίεσης μεταξύ του αμφιδέτη και της σιδηροτροχιάς [6].

Στο Σχήμα 12 φαίνεται μια σύνδεση της σιδηροτροχιάς και οι δυνάμεις τάνυσης των βλήτρων T' (εσωτερικά βλήτρα) και T'' (εξωτερικά βλήτρα).



Σχήμα 12
Εγκάρσιες δυνάμεις στην αμφίδεση
Πηγή [10]

Με την τάνυση των βλήτρων ο αμφιδέτης πιέζεται επάνω στη σιδηροτροχιά εμποδίζοντας την εγκάρσια μετακίνησή της. Παράλληλα, με την πίεσή του επάνω στη σιδηροτροχιά εμφανίζεται δύναμη τριβής που εμποδίζει τη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς κατά μήκος. Η δύναμη αυτή είναι η αντίσταση αμφίδεσης R_L . Η R_L είναι ανάλογη, κατά τα γνωστά, της συνολικής δύναμης τάνυσης ($T' + T''$). Επειδή η δύναμη τάνυσης ασκείται εκατέρωθεν της σιδηροτροχιάς, λαμβάνουμε διπλάσια τιμή του συντελεστή τριβής:

$$R_L = (2 \times n) \times (T' + T'') \quad (11)$$

όπου n ο συντελεστής τριβής μεταξύ σιδηροτροχιάς και αμφιδέτη. Αν ληφθεί συντελεστής τριβής ίσος με τον συντελεστή τριβής μεταξύ επιφανειών χάλυβα – χάλυβα (OHANIAN, Πιν. 6.2, σελ. 145 [16]), δηλαδή ίσος με 0,6 και θεωρήσουμε ότι η δύναμη τάνυσης (τυπική τιμή) είναι από 90 – 135 KN [9], τότε προκύπτει τιμή αντίστασης αμφίδεσης $R_L = 216 - 324$ KN.

Παρατηρούνται στην πράξη αντιστάσεις τριβής αμφίδεσης από 50 – 200 KN. Για την τάνυση των κοχλιών απαιτείται μια ροπή 250Nm. Για αντιστάσεις του αμφιδέτη μικρότερες των 50KN, παρατηρείται το φαινόμενο της παραμόρφωσης των κοχλιών και του θρυμματισμού ακμών του αμφιδέτη κατά την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων. Κατά την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων παρατηρείται το φαινόμενο της συσσώρευσής τους στον αρμό. Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται μια τιμή υπολογισμού της R_L των 100KN [7].

▪ Σε καμπύλη

Στην περίπτωση που ο αρμός βρίσκεται σε καμπύλη η επιφάνεια επαφής αμφιδέτη – σιδηροτροχιάς είναι μικρότερη, για τον εξωτερικό αμφιδέτη. Ο εξωτερικός αμφιδέτης πιέζεται επάνω στη σιδηροτροχιά από τους κοχλίες και υποχρεώνεται να παραμορφωθεί λαμβάνοντας καμπυλωμένο σχήμα αντίστοιχο της σιδηροτροχιάς. Το ακριανό τμήμα, όμως, μετά τον τελευταίο κοχλία, συμπεριφέρεται ως πρόβολος δεσμευμένος από τον ακραίο κοχλία. Τελικά, το άκρο του εξωτερικού αμφιδέτη απομακρύνεται από τη σιδηροτροχιά και δεν εφάπτεται σε αυτή. Το βέλος στο σημείο αυτό είναι μικρό σε σχέση με την ακτίνα της καμπύλης, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας

επαφής αμφιδέτη – σιδηροτροχιάς και τελικά, τη μείωση της αντίστασης αμφίδεσης σε σχέση με την τιμή, που αυτή έχει, στην ευθεία.

Ας υποθέσουμε δύο τύπους αμφιδετών: με τέσσερις οπές, μήκους 24 in (60,69 cm) και με έξι οπές, μήκους 40 in (101,6 cm). Ας υποθέσουμε ακόμα διάμετρο βλήτρων 1 in (2,54 cm) και απόσταση ακραίου κοχλίου από το άκρο του αμφιδέτη 3,5 in (8,89 cm). Το μήκος του τμήματος του αμφιδέτη που δεν ακουμπά στη σιδηροτροχιά είναι $2 \times (3,5 - 0,5) = 6$ in (και στα δύο άκρα του αμφιδέτη). Συνεπώς, το μήκος του αμφιδέτη που συμμετέχει στην αντίσταση αμφίδεσης είναι $24 - 6 = 18$ in, για τον ένα τύπο αμφιδέτη και $40 - 6 = 34$ in, για τον άλλο. Αν θεωρήσουμε ότι η επαφή με τη μια επιφάνεια της σιδηροτροχιάς ευθύνεται για την εμφάνιση της μισής αντίστασης αμφίδεσης ($R_L/2$) και η άλλη για την άλλη μισή, τότε προκύπτει στην καμπύλη μείωση της αντίστασης R_L : $(R_L/2) \times 1,0 + (R_L/2) \times (18/24) = 0,875 R_L$ ή $(R_L/2) \times 1,0 + (R_L/2) \times (34/40) = 0,925 R_L$. Δηλαδή, για τον τύπο αμφιδέτη με τις τέσσερις οπές, η τιμή της αντίστασης αμφίδεσης είναι το 87,5% της τιμής σε ευθεία (μείωση κατά ποσοστό 12,5%) και για τον τύπο με τις έξι οπές η τιμή σε καμπύλη είναι το 92,5% της τιμής σε ευθεία (μείωση κατά 7,5%).

Στην καμπύλη, όπως αναφέρθηκε, τα άκρα του εξωτερικού αμφιδέτη δεν εφάπτονται στην σιδηροτροχιά, ενώ ο εσωτερικός αμφιδέτης εφάπτεται σε όλο το μήκος του. Έτσι η ασκούμενη εγκάρσια δύναμη στη σιδηροτροχιά από τον εσωτερικό αμφιδέτη στα άκρα του δεν εξισορροπείται από το αντίστοιχο τμήμα του εξωτερικού, όπως συμβαίνει στην ευθεία. Αυτό το «πλεόνασμα» δύναμης τείνει να μετατοπίσει τη σιδηροτροχιά προς το εξωτερικό της καμπύλης. Παρόλ' αυτά, μετά την πάροδο κάποιου μικρού χρονικού διαστήματος, ο αμφιδέτης, που είναι κατασκευασμένος από ελατό υλικό, λαμβάνει μόνιμη παραμόρφωση στην καμπυλωμένη μορφή και παύει τελικά να πιέζει προς τα έξω τη σιδηροτροχιά.

Αντίσταση των συνδέσμων της σιδηροτροχιάς στην κατά μήκος μετακίνηση της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων

Η αντίσταση τριβής ολισθήσεως της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους και τον βαθμό σύσφιξης των συνδέσεων και μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη (μπορεί να φτάσει και το οκταπλάσιο) της αντίστασης ολισθήσεως των στρωτήρων επί του έρματος [5]. 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. Σήμερα, με την κατασκευή ποικιλίας τύπων συνδέσμων, εξασφαλίζονται οι παραπάνω απαιτήσεις για τη σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τους στρωτήρες, ώστε η εμφανιζόμενη αντίσταση στη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων να μην είναι κρίσιμη. Οι Ελβετικοί Σιδηρόδρομοι προτείνουν τιμές από 15 – 20 N/mm μήκους σιδηροτροχιάς [7].

Κατά μήκος αντίσταση της γραμμής στη μετακίνηση εντός του έρματος (αντίσταση τριβής ολίσθησης στρωτήρων – έρματος) w_L

Αυτή είναι η αντίσταση τριβής κατά τη μετακίνηση των στρωτήρων εντός του έρματος. Εξαρτάται από τον τύπο των στρωτήρων και την κατάσταση στην οποία βρίσκονται, καθώς και από την παλινδρομική κίνηση (ταλάντωση) [14]. Ενδεικτικές τιμές για αυτή την αντίσταση είναι για στρωτήρες από ξύλο ή από σκυρόδεμα, με μεταξύ τους απόσταση 60cm 7-10N/mm μήκους σιδηροτροχιάς, μετά από συνεχή κίνηση 5-8 N/mm μήκους σιδηροτροχιάς [7].

Η αντίσταση της κατά μήκος μετακίνησης της σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα ή του στρωτήρα ως προς το έρμα, κατανέμεται στην πραγματικότητα στους στρωτήρες από το άκρο της σιδηροτροχιάς στον αρμό και προστίθεται καθώς προχωρούμε προς το μέσο της σιδηροτροχιάς. Η παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής επί του αντίστοιχου μήκους σιδηροτροχιάς για κάθε στρωτήρα, χωρίς να δημιουργεί σοβαρή διαφορά, διευκολύνει τον θεωρητικό υπολογισμό [5].

β) Διαγράμματα χασμάτων για δεσμευμένες σιδηροτροχιές

Η αντίσταση w_L της κατά μήκος μετακίνησης της σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα ή του στρωτήρα ως προς το έρμα, κατανέμεται στην πραγματικότητα στους στρωτήρες από το άκρο της σιδηροτροχιάς στον αρμό και προστίθεται καθώς προχωρούμε προς το μέσο της σιδηροτροχιάς. Η παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής επί του αντίστοιχου μήκους σιδηροτροχιάς για κάθε στρωτήρα, χωρίς να δημιουργεί σοβαρή διαφορά, διευκολύνει τον θεωρητικό υπολογισμό. Έτσι, θα δεχτούμε ως αντίσταση κατά μήκος μετακίνησης στη θέση του αρμού 0 (μηδέν) και σε απόσταση από τον αρμό μετρούμενη επί της σιδηροτροχιάς συνολικά:

$$A_w = L_v \cdot w_L$$

Η αντίσταση αυτή ισορροπείται από αντίστοιχη τάση της σιδηροτροχιάς :

$$\sigma = \frac{A_w}{F} = \frac{L_v \cdot w_L}{F}$$

Αν αυτή η τάση είναι σταθερή σε όλο το υπόψη μήκος της σιδηροτροχιάς θα προέκυπτε συνολική ελαστική μετακίνηση : $\mu = L_v \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{L_v^2 \cdot w_L}{E \cdot F}$ η οποία θα

παρεμποδιζόταν αν εφαρμοστεί στο άκρο της σιδηροτροχιάς αντίσταση A_w . Επειδή όμως η αντίσταση είναι κατανεμημένη σε όλο το μήκος αρχίζοντας από μηδέν, υφίσταται συνολική πραγματική μετακίνηση το μισό της παραπάνω, δηλαδή $\frac{1}{2}\mu = \frac{\Delta \ell_w}{2}$. Συνεπώς έχουμε:

$$(12) \quad \frac{\Delta \ell_w}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma}{E} \cdot L_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_v^2 \cdot w_L}{E \cdot F}$$

$$(12a) \quad \Delta \ell_w = \frac{\sigma}{E} \cdot L_v = \frac{L_v^2 \cdot w_L}{E \cdot F}$$

$$(12b) \quad L_v = \sqrt{\frac{EF \cdot \Delta \ell_w}{w_L}}$$

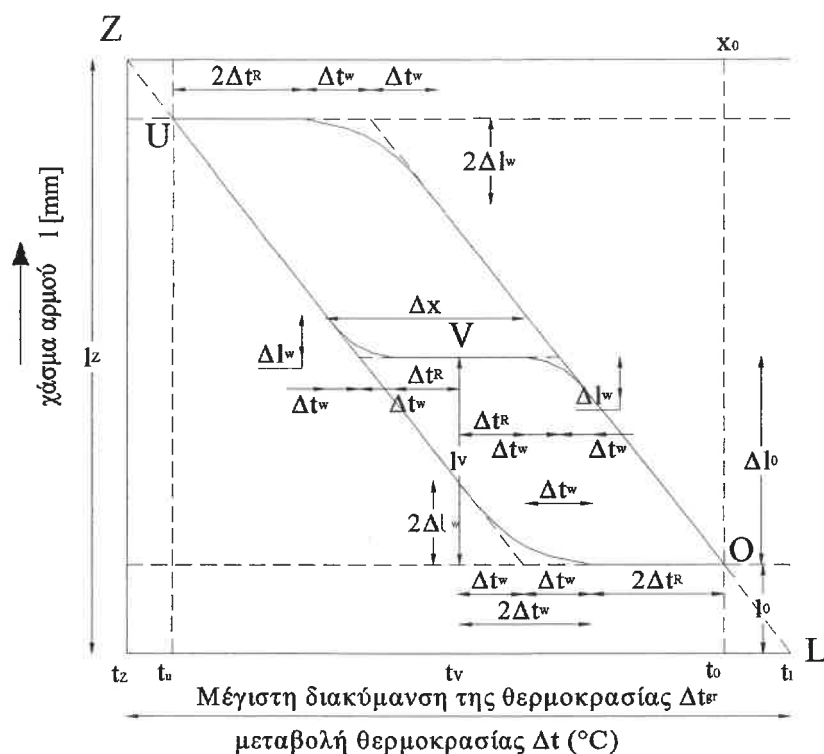
Κατά την παραπάνω εξίσωση (12α) η διαφορά χάσματος αρμού $\Delta\ell_w$ είναι συνάρτηση 2^{ου} βαθμού του υπό ελαστική επιμήκυνση του τμήματος μήκους L_v της σιδηροτροχιάς, ενώ το υπόλοιπο τμήμα εκατέρωθεν του μέσου αυτής παραμένει ακίνητο (βλ. παρακάτω). Εάν για ορισμένη θερμοκρασία t_v της σιδηροτροχιάς χωρίς τάση έχουμε αντίστοιχο χάσμα αρμού ℓ_v , τότε, με υφιστάμενο περιθώριο διαστολής πέρα από ορισμένη ανύψωση της θερμοκρασίας ή περιθώριο συστολής πέρα από ορισμένου υποβιβασμού της, το μετακινούμενο τμήμα της σιδηροτροχιάς προς το μέρος του αρμού είναι:

$$(12\gamma) \quad \begin{cases} L_v \leq \sqrt{\frac{EF\ell_v}{w_L}} & \text{για τη διαστολή} \\ L_v \leq \sqrt{\frac{EF(\ell_z - \ell_v)}{w_L}} & \text{για τη συστολή} \end{cases}$$

Για $L_v = \frac{L_s}{2}$, δηλαδή για αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας και υπερνίκηση της αντίστασης τριβής της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων μέχρι του μέσου της σιδηροτροχιάς, το οποίο παραμένει το μόνο ακίνητο σημείο, και σύμφωνα με την (12γ):

$$(12\delta) \quad \begin{cases} \frac{L_s}{2} \leq \sqrt{\frac{EF\ell_v}{w_L}} & \text{για τη διαστολή} \\ \frac{L_s}{2} \leq \sqrt{\frac{EF(\ell_z - \ell_v)}{w_L}} & \text{για τη συστολή} \end{cases}$$

τότε από την (12α) προκύπτει η εξίσωση: $\Delta\ell_w = \frac{L_s^2 w_L}{4EF} \quad (13)$



Σχήμα 18α

Εικόνα χάσματος
για βραχεία
δεσμευμένη
σιδηροτροχιά

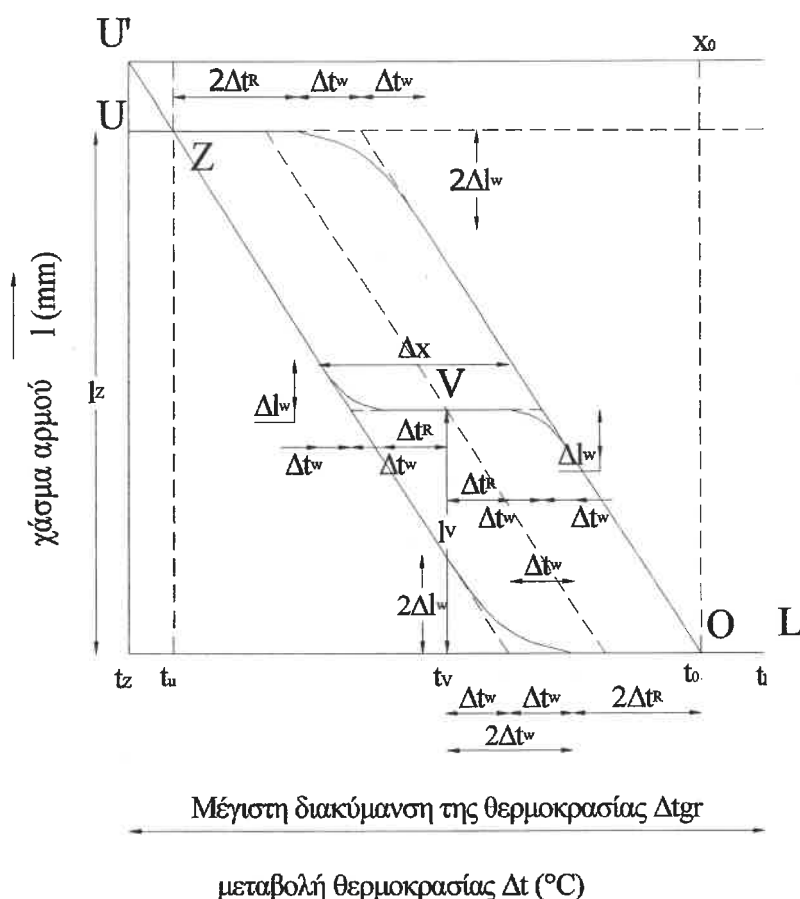
$$l_u < l_z, l_o > 0$$

$$t_u > t_z, t_o < t_l$$

Πηγή [5]

Μετά την υπερνίκηση της αντίστασης τριβής της σιδηροτροχιάς επί όλων των στρωτήρων η διαστολή ή συστολή της ακολουθεί το νόμο της ελεύθερης σιδηροτροχιάς, εφ' όσον εννοείται, υφίσταται ακόμα περιθώριο χάσματος αρμού, κατά τον οποίο η επιμήκυνση είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας κατά τον τύπο (9) $\Delta \ell = \Delta t \cdot \epsilon \phi \delta = \Delta t \cdot \alpha \cdot L_s$.

Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων προκύπτουν τα διαγράμματα θερμοκρασίας - χασμάτων για δεσμευμένες σιδηροτροχιές (σχ.18).



Σχήμα 18β

Εικόνα χάσματος για μακριά δεσμευμένη σιδηροτροχιά

$$l_u = l_z, l_o = 0$$

$$t_u < t_z, t_o > t_i$$

Πηγή [5]

1.4.4 Μήκος μετακινούμενου τμήματος της σιδηροτροχιάς

Για τις σιδηροτροχιές με δεδομένη τιμή δυνατού χάσματος l_z όπου φυσικά $\Delta l_w \leq l_z$, η τιμή του L_v , δηλαδή το μήκος μετακινούμενου τμήματος της σιδηροτροχιάς, δεν είναι δυνατό να υπερβεί ορισμένα όρια. Εάν δεχθούμε ως την πλέον ευνοϊκή τοποθέτηση εκείνη στην οποία η τιμή μετακίνησης στη συστολή είναι η ίδια, πρέπει να θέσουμε $\Delta l_w = \frac{l_z}{2}$, οπότε η τιμή του L_v

γίνεται $L_v = \sqrt{\frac{EF \cdot \Delta l_w}{2w_L}}$. Συνεπώς το μισό της σιδηροτροχιάς πρέπει να είναι

μικρότερο της τιμής αυτής για να υφίσταται σε όλο το μήκος της μετακίνηση. Εάν $L_s/2 > L_v$ τότε το μεσαίο τμήμα $2 \times (L_s/2 - L_v)$ παραμένει ακίνητο, συνεπώς για οποιοδήποτε μήκος σιδηροτροχιάς L_s είναι δυνατό να μετακινούνται μόνο τα άκρα αυτής καθένα κατά την τιμή L_v . Έτσι καταλήγουμε στην περίπτωση των συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών (ΣΣΣ-βλ. παρακάτω) [5].

1.4.5 Διαχωρισμός μακριών και βραχέων σιδηροτροχιών για δεσμευμένες σιδηροτροχιές

Το όριο μεταξύ βραχέων και μακριών σιδηροτροχιών είναι, για τις δεσμευμένες σιδηροτροχιές, προφανώς μεγαλύτερο από τις ελεύθερες, αφού για το ίδιο χάσμα έχουμε μεγαλύτερη διακύμανση θερμοκρασίας. Για την ευμενέστερη περίπτωση στην οποία $\ell_v = \frac{\ell_z}{2}$, πρέπει να έχουμε $t_1=t_0$ και $t_z=t_u$, οπότε προκύπτει η εξίσωση [5]:

$$t_t - t_z = t_0 - t_u = \Delta t_{gr} = \frac{2R_L}{\alpha EF} + \frac{L_S w_L}{2\alpha EF} + \frac{\ell_z}{\alpha S} \quad (14)$$

ή διατάσσοντας ως προς L_S , έχουμε:

$$\frac{w_L}{2\alpha EF} L_S^2 - [\Delta t_{gr} - \frac{2R_L}{\alpha EF}] L_S + \frac{\ell_z}{\alpha} = 0 \quad (14a)$$

1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΧΑΣΜΑΤΟΣ

Έστω η αρχική θερμοκρασία τοποθέτησης t_v με αντίστοιχο χάσμα αρμού ℓ_v και ας υποθέσουμε ότι αρχικά αυξάνεται η θερμοκρασία. Για τη δεσμευμένη σιδηροτροχιά, μέχρι την υπερνίκηση της αντίστασης αμφίδεσης R_L δε θα συμβεί καμία μεταβολή χάσματος. Η υπερνίκηση της αντίστασης αμφίδεσης θα πραγματοποιηθεί για άνοδο της θερμοκρασίας κατά Δt_R , η οποία υπολογίζεται αν εξισωθεί η θερμική επιμήκυνση της ελεύθερης σιδηροτροχιάς που υποβάλλεται στη διαφορά θερμοκρασίας Δt_R , με την ελαστική επιμήκυνση λόγω της δράσεως της αντίστασης R_L :

$$L_S \alpha \Delta t_R = \frac{R_L}{EF} L_S \text{ και τελικά προκύπτει η εξίσωση: } \Delta t_R = \frac{R_L}{\alpha EF} \quad (15)$$

Μέχρι τη στιγμή αυτή το διάγραμμα θερμοκρασίας-χάσματος είναι μια οριζόντια ευθεία. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, μετά την υπερνίκηση της αντίστασης αμφίδεσης, η σιδηροτροχιά αρχίζει να διαστέλλεται προοδευτικά από τα άκρα προς το μέσο της, ενεργοποιώντας έτσι την αντίσταση τριβής της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων. Με την βαθμιαία υπερνίκηση της αντίστασης τριβής, το χάσμα του αρμού μικραίνει, με την προσέγγιση των άκρων των δύο εκατέρωθεν του αρμού σιδηροτροχιών

σύμφωνα με τον τύπο (12α) $\Delta \ell_w = \frac{L_v^2 w_L}{EF}$, μέχρι την οριακή τιμή $\Delta \ell_w = \frac{L_S^2}{4EF} w_L$,

σύμφωνα με τον τύπο (13). Για την παραπάνω υπερνίκηση της αντίστασης τριβής απαιτείται άνοδος της θερμοκρασίας κατά Δt_w . Όπως και για την τριβή αμφίδεσης έτσι σ' αυτή την περίπτωση η διαφορά αυτή θερμοκρασίας υπερνίκησης της αντίστασης τριβής σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων υπολογίζεται αν εξισωθεί η θερμική επιμήκυνση της σιδηροτροχιάς $L_S \alpha \Delta t_w$ με την ελαστική θερμική επιμήκυνσή της υπό τη δράση της συνολικής μέγιστης αντίστασης, η οποία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δίνει επιμήκυνση διπλάσια

ΜΕΘΟΔΟΙ

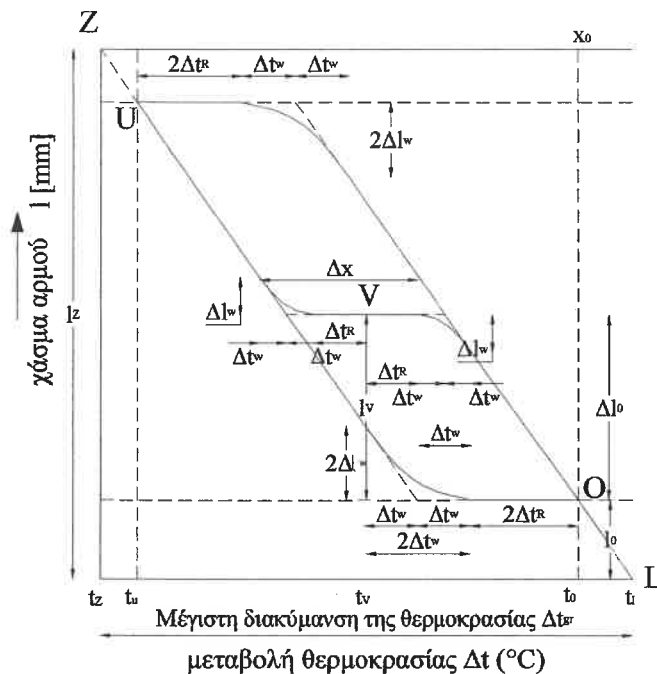
της πραγματικής $\Delta\ell_w$, που αντιστοιχεί σε κατανομή αντιστάσεων από 0 μέχρι $L_S w_L/2$. Συνεπώς έχουμε:

$$L_S \alpha \Delta t_w = 2\Delta\ell_w = \frac{2L_S^2 w_L}{4EF} = \frac{L_S^2 w_L}{2EF} \text{ από την οποία προκύπτει η εξίσωση:}$$

$$\Delta t_w = \frac{L_S w_L}{2\alpha EF} \quad (16)$$

Αν συγκριθούν οι τύποι (13) και (16) παρατηρούμε ότι η μεν διαφορά θερμοκρασίας Δt_w μπορεί να εκφρασθεί ως γραμμική συνάρτηση του μήκους $L_S/2$, αλλά και οι ενδιάμεσες μεταβολές θερμοκρασίας ως γραμμική συνάρτηση των ενδιάμεσων τιμών μήκους μετακινούμενης σιδηροτροχιάς από $L_V = 0$ ως $L_V = L_S/2$, η δε διαφορά χάσματος μπορεί να εκφραστεί με μια εξίσωση δευτέρου βαθμού για τις διάφορες τιμές μήκους μετακινούμενης σιδηροτροχιάς. Κατά συνέπεια, το διάγραμμα θερμοκρασίας – χάσματος ακολουθεί παραβολική πορεία δευτέρου βαθμού.

Με την υπερνίκηση και της αντίστασης τριβής των σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων, το χάσμα μικραίνει πλέον κατ' ευθύ λόγο προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας, όπως στην ελεύθερη σιδηροτροχιά και το διάγραμμα παριστάνεται από την ευθεία γραμμή PO, για τις βραχείες σιδηροτροχιές (όπου το O αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοκρασία) και από την ευθεία PL, για τις μακριές σιδηροτροχιές (όπου το L αντιστοιχεί στη θερμοκρασία, στην οποία κλείνει ο αρμός).



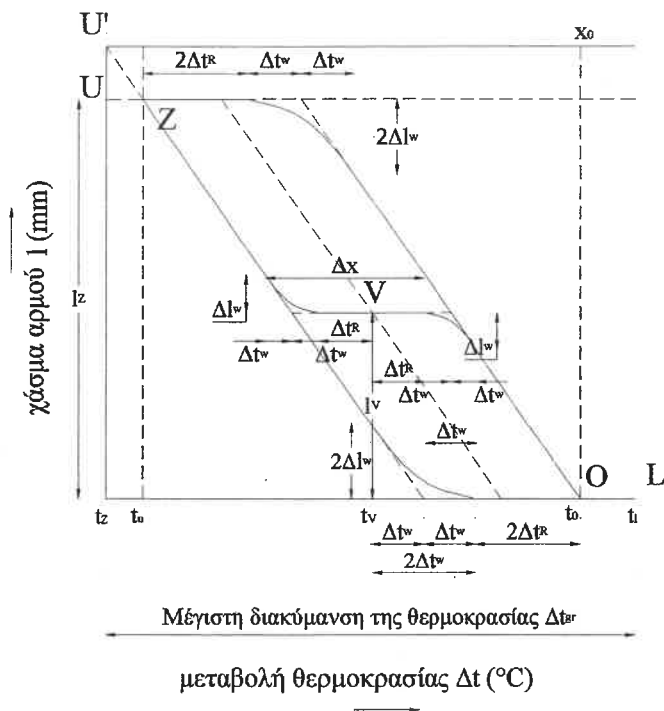
Σχήμα 18α
Εικόνα χάσματος
για βραχεία
δεσμευμένη
σιδηροτροχιά

$$l_u < l_z, l_o > 0$$

$$t_u > t_z, t_o < t_i$$

Πηγή [5]

Με επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας, για τις μακριές σιδηροτροχιές, από τη θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός μέχρι τη μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία, το διάγραμμα ακολουθεί οριζόντια γραμμή, καθώς δεν υπάρχει περιθώριο χάσματος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται συνεχώς οι θλιπτικές τάσεις.



Σχήμα 18β

Εικόνα χάσματος για
μακριά δεσμευμένη
σιδηροτροχιά
 $l_u=l_z, l_0=0$
 $t_u < t_z, t_0 > t_i$

Πηγή [5]

Την αντίστροφη πορεία, με τα ίδια ακριβώς δεδομένα Δt_R , Δt_w και Δl_w ακολουθεί το διάγραμμα για αναχώρηση από τη θερμοκρασία και το χάσμα τοποθέτησης, με βαθμιαία αύξηση του χάσματος, για την περίπτωση υποβιβασμού της θερμοκρασίας. Για τις βραχείες σιδηροτροχιές η πορεία του διαγράμματος είναι από την t_v στην $t_u > t_z$ με $l_u < l_z$ και για τις μακριές στην $t_u < t_z$ με $l_u = l_z$.

Ας επανέλθουμε στην αρχική περίπτωση συνεχούς ανύψωσης της θερμοκρασίας. Αφού η θερμοκρασία, βαθμιαία αυξανόμενη, έφτασε τη μέγιστη θερμοκρασία, υποθέτουμε ότι αρχίζει βαθμιαίος υποβιβασμός της. Το χάσμα παραμένει σταθερό, μέχρις ότου εξαντληθεί η αποθηκευμένη στη σιδηροτροχιά δύναμη θλίψης R_L από την τριβή αμφίδεση, για την οποία απαιτείται υποβιβασμός της θερμοκρασίας κατά Δt_R για τις βραχείες σιδηροτροχιές, ενώ για τις μακριές επιπλέον πτώση κατά $(t_0 - t_i)$. Αφού υπερνικηθεί η αποθηκευμένη αντίσταση αμφίδεσης, από την αρχική ανύψωση της θερμοκρασίας, υπολείπεται να υπερνικηθεί η αντίσταση αμφίδεσης κατά την αντίθετη έννοια της συστολής, με επιπλέον υποβιβασμό της θερμοκρασίας και πάλι κατά Δt_R , με αντίστοιχη δημιουργία εφελκυστικής δύναμης, ενώ το χάσμα παραμένει πάντοτε σταθερό (l_0 για τις βραχείες σιδηροτροχιές και 0 για τις μακριές). Τελικά, η θερμοκρασία πρέπει να κατέβει κατά $2\Delta t_R$ για τις βραχείες σιδηροτροχιές ή κατά $2\Delta t_R + (t_0 - t_i)$ για τις μακριές για να αρχίσει το άνοιγμα του χάσματος του αρμού.

Μέχρι τότε, το διάγραμμα ακολουθεί την οριζόντια γραμμή του σχήματος OD για τις βραχείες ή OLD για τις μακριές. Ο περαιτέρω υποβιβασμός της θερμοκρασίας δημιουργεί δυνάμεις εφελκυσμού, οι οποίες πρέπει να υπερνικήσουν αφ' ενός την θλιπτική τάση που αποταμιεύθηκε από την προηγούμενη άνοδο της θερμοκρασίας κατά Δt_w , αφ' ετέρου τη νέα αντίσταση

τριβής των σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων κατά τη συστολή, με υποβιβασμό της θερμοκρασίας και πάλι κατά Δt_w . Συνολικά, πρέπει να υπερνικηθεί διπλή αντίσταση τριβής σιδηροτροχιών στρωτήρων με αντίστοιχες διαφορές $2\Delta t_w$ και $2\Delta \ell_w$, συνεπώς το διάγραμμα ακολουθεί το παραβολικό τμήμα DE.

Από το σημείο E και πέρα, αφού έχουν υπερνικηθεί όλες οι αντιστάσεις αμφίδεσης και σιδηροτροχιών επί των στρωτήρων, το διάγραμμα είναι ευθύγραμμο, όπως για ελεύθερη σιδηροτροχιά, μέχρι το ανώτατο όριο χάσματος αρμού $\ell_u < \ell_z$ για τις βραχείες σιδηροτροχιές κατά τη γραμμή EU. Αντίστοιχα για τις μακριές σιδηροτροχιές, όπου $t_u < t_z$, το διάγραμμα είναι ευθύγραμμο, όπως για ελεύθερη σιδηροτροχιά, μέχρι το μέγιστο όριο χάσματος $\ell_z = \ell_u$ για το τμήμα EZ, στη συνέχεια, όμως, μη υπάρχοντος περιθωρίου χάσματος, το διάγραμμα είναι οριζόντιο κατά το τμήμα ZU, μέχρι δηλαδή του ελάχιστου ορίου θερμοκρασίας t_u .

Αν από το σημείο U είτε για τις βραχείες είτε για τις μακριές σιδηροτροχιές ανυψωθεί και πάλι η θερμοκρασία, το διάγραμμα θα ακολουθήσει αντίστροφη πορεία με τμήματα κατά σειρά: UH (ή αντίστοιχα UZH για τις μακριές σιδηροτροχιές), HJ και τέλος JO (ή αντίστοιχα JLO για τις μακριές σιδηροτροχιές). Έτσι, κλείνει το διάγραμμα για τις μέγιστες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας από t_u σε t_o [5].

1.6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα δεσμευμένης σιδηροτροχιάς, παρατηρείται ότι σε μια τιμή χάσματος ℓ_v , είναι δυνατό να αντιστοιχούν άπειρες τιμές θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι οι ακραίες τιμές θερμοκρασιών για το ίδιο χάσμα ℓ_u διαφέρουν, στο μεσαίο τουλάχιστον τμήμα, κατά $\Delta x = 2\Delta t_R + \Delta t_w$ και τελικά οι ακραίες τιμές μπορούν να

εκφραστούν με τις σχέσεις $t_{\max} = t + \Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2}$ και $t_{\min} = t_v - (\Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2})$,

όπου t_v είναι η μέση τιμή θερμοκρασίας, που αντιστοιχεί στην κατάσταση της σιδηροτροχιάς χωρίς τάση. Αντιστρόφως, στην ίδια τιμή θερμοκρασίας αντιστοιχούν άπειρες τιμές χάσματος και οι ακραίες διαφέρουν κατά $\Delta y = \Delta x \cdot \epsilon \phi \delta = (2\Delta t_R + \Delta t_w) \cdot \alpha \cdot L_s$.

Αυτά ισχύουν εφόσον $2\Delta \ell_w \leq \ell_v \leq \ell_z - 2\Delta \ell_w$, εκεί δηλαδή όπου δεν εμπίπτουν τα παραβολικά τμήματα του διαγράμματος αλλιώς το Δx ή το Δy είναι κατά κάτι μικρότερα.

Για τις μακριές σιδηροτροχιές, όταν αναχωρούμε από θερμοκρασία t_v με αντίστοιχο χάσμα ℓ_v , οι αντίστοιχες ακραίες θερμοκρασίες για το ελάχιστο ($\ell_0=0$) και μέγιστο (ℓ_z) χάσμα (σημεία Z και L του διαγράμματος) δίνονται από τους τύπους:

$$t_\ell = t_v + \Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2} + \frac{\ell_v}{\epsilon \phi \delta} = t_v + \frac{R_L}{\alpha E F} + \frac{L_s w_L}{4 \alpha E F} + \frac{\ell_v}{\alpha L_s} \quad (17)$$

$$t_z = t_v - \Delta t_R - \frac{\Delta t_w}{2} - \frac{\ell_z - \ell_v}{\varepsilon \phi \delta} = t_v - \frac{R_L}{\alpha E F} - \frac{L_S w_L}{4 \alpha E F} - \frac{\ell_z - \ell_v}{\alpha L_S} \quad (18)$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι εκ πρώτης όψεως, οι τύποι (17) και (18) φαίνεται να ισχύουν μόνο εφ' όσον $\ell_v \geq \Delta \ell_w$ και $\ell_z - \Delta \ell_w \geq \ell_v$.

Πράγματι, για την πρώτη περίπτωση, αν λάβουμε μια θερμοκρασία t_v' με αντίστοιχο χάσμα $\ell_v' < \Delta \ell_w$ και δεχθούμε διακύμανση της θερμοκρασίας αρχικά προς τα πάνω, τότε το χάσμα θα κλείσει για αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta t_w' < \Delta t_w$, με $t_\ell' < t_z$. Αντίστοιχα, για την άλλη περίπτωση, αν λάβουμε θερμοκρασία t_v' με αντίστοιχο χάσμα $\ell_v' > \ell_z - \Delta \ell_w$ και δεχθούμε υποβιβασμό της θερμοκρασίας, επειδή το υπόλοιπο διαθέσιμο χάσμα είναι μικρότερο του $\Delta \ell_w$, θα φθάσουμε στο όριο του χάσματος με μικρότερο υποβιβασμό της θερμοκρασίας, συνεπώς $t_z' > t_z$.

Εάν ακολουθήσουμε αντίστροφη φορά διακύμανσης της θερμοκρασίας, δηλαδή για την περίπτωση $\ell_v' < \Delta \ell_w$, και δεχθούμε υποβιβασμό της θερμοκρασίας, τότε η κατώτερη οριακή τιμή t_z' θα είναι όπως δίνεται από τον τύπο (18). Αν από την τιμή αυτή αρχίσει άνοδος της θερμοκρασίας, εξαντλώντας πάλι όλο το χάσμα, θα φτάσουμε στην τιμή $t_z' = t_z$, όπως δίνεται από τον τύπο (18). Επίσης, για την περίπτωση θερμοκρασίας t_v' με αντίστοιχο χάσμα $\ell_v' < \ell_z - \Delta \ell_w$, αν δεχθούμε όχι υποβιβασμό αλλά αύξησή της, θα φθάσουμε στην $t_\ell' = t_\ell$, όπως δίνεται από τον τύπο (17), ενώ αν από την τιμή αυτή αρχίσει ο υποβιβασμός και ανοίξει όλο το χάσμα, θα φθάσουμε πάλι στη θερμοκρασία $t_z' = t_z$, όπως δίνεται από τον τύπο (18).

Τελικά, οι τύποι (17) και (18), για την ευρύτερη διακύμανση των ορίων θερμοκρασίας και προς τα πάνω και προς τα κάτω, ισχύουν για οποιεσδήποτε τιμές των t_v , ℓ_v , χωρίς καμία επιφύλαξη [5].

1.7 ΣΥΝΕΧΩΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ (ΣΣΣ)

Κατά τη χρήση μακριών σιδηροτροχιών και τώρα πλέον στη συνεχή συγκόλλησή τους για απεριόριστο μήκος, διαπιστώθηκε ότι στη γραμμή, οι σιδηροτροχιές στην πραγματικότητα, σε καμία περίπτωση δεν διαστέλλονται ή συστέλλονται ελεύθερα, αλλά δεσμεύονται από την αντίσταση της τριβής αμφίδεσης και της σύνδεσης με τους στρωτήρες, οι οποίοι με τη σειρά τους, είναι εγκιβωτισμένοι στο έρμα, το οποίο προβάλλει αντίσταση στη μετακίνηση. Εξ' αιτίας αυτού, είναι δυνατό, για το ίδιο το χάσμα αρμού, να διακυμανθεί η θερμοκρασία εκατέρωθεν της αρχικής t_v , κατά την

τοποθέτηση, κατά την ποσότητα $\frac{\Delta t}{2} = \Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2}$ (βλ. διαγράμματα).

Αντιστρόφως, για την ίδια διακύμανση της θερμοκρασίας, είναι δυνατό να αντιστοιχεί χάσμα μικρότερο κατά $\frac{\Delta x}{2} = (\Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2}) \alpha L_S$.

Έτσι, σύμφωνα με τον τύπο (12γ):

$$(12\gamma) \begin{cases} L_{V,I} \leq \sqrt{\frac{EF\ell_V}{w_L}} & \text{για τη διαστολή} \\ L_{V,II} \leq \sqrt{\frac{EF(\ell_z - \ell_V)}{w_L}} & \text{για τη συστολή} \end{cases}$$

διαπιστώνεται ότι μετακινούνται μόνο τα τμήματα $L_{V,I}$ και $L_{V,II}$, που πρόσκεινται στα άκρα των σιδηροτροχιών, προς το μέρος δηλαδή του αρμού της σιδηροτροχιάς και τα οποία πληρούν την ανισότητα (12γ), ενώ το μεσαίο τμήμα (εφ' όσον η σιδηροτροχιά είναι μήκους $L_S > 2L_{V,max}$) παραμένει ακίνητο. Αυτό σημαίνει ότι η σιδηροτροχιά μπορεί να έχει απεριόριστο μήκος, ενώ η θερμική επίδραση εκδηλώνεται, όσον αφορά στη συστολή ή στη διαστολή μόνο στα άκρα της, τα «αναπνέοντα», μήκους $L_{V,I}$ και $L_{V,II}$ αντίστοιχα. Τα $L_{V,I}$ και $L_{V,II}$ δίνονται από τις σχέσεις:

$$(19) \begin{cases} L_{V,I} = \sqrt{\frac{EF\ell_V}{w_L}} & \text{για τη διαστολή} \\ L_{V,II} = \sqrt{\frac{EF(\ell_z - \ell_V)}{w_L}} & \text{για τη συστολή} \end{cases}$$

Για να έχουμε το ίδιο αναπνέον μήκος για τη διαστολή και συστολή, πρέπει να τεθεί $\ell_V = \ell_z - \ell_V \Rightarrow \ell_V = \ell_z/2$, το οποίο δίνει την ευμενέστερη περίπτωση τοποθέτησης των σιδηροτροχιών με το ελάχιστο «αναπνέον» μήκος.

Δεδομένων των παραπάνω, το όριο των μακρών σιδηροτροχιών, στις οποίες το μεσαίο αμετακίνητο τμήμα είναι μηδενικού μήκους, για την ευμενέστερη τοποθέτηση $\ell_V = \ell_z/2$ πρέπει να έχουμε:

$$L_V = \frac{L_S}{2} = \sqrt{\frac{EF\ell_z}{2w_L}} \quad (19a)$$

$$\text{συνεπώς} \quad L_S = \sqrt{\frac{2EF\ell_z}{w_L}} \quad (20)$$

Πέραν του μήκους αυτού L_S , οι σιδηροτροχιές χαρακτηρίζονται ως Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά ή γραμμή χωρίς χάσματα με μεσαίο τμήμα τελείως αμετακίνητο. Είναι ακόμα [5]:

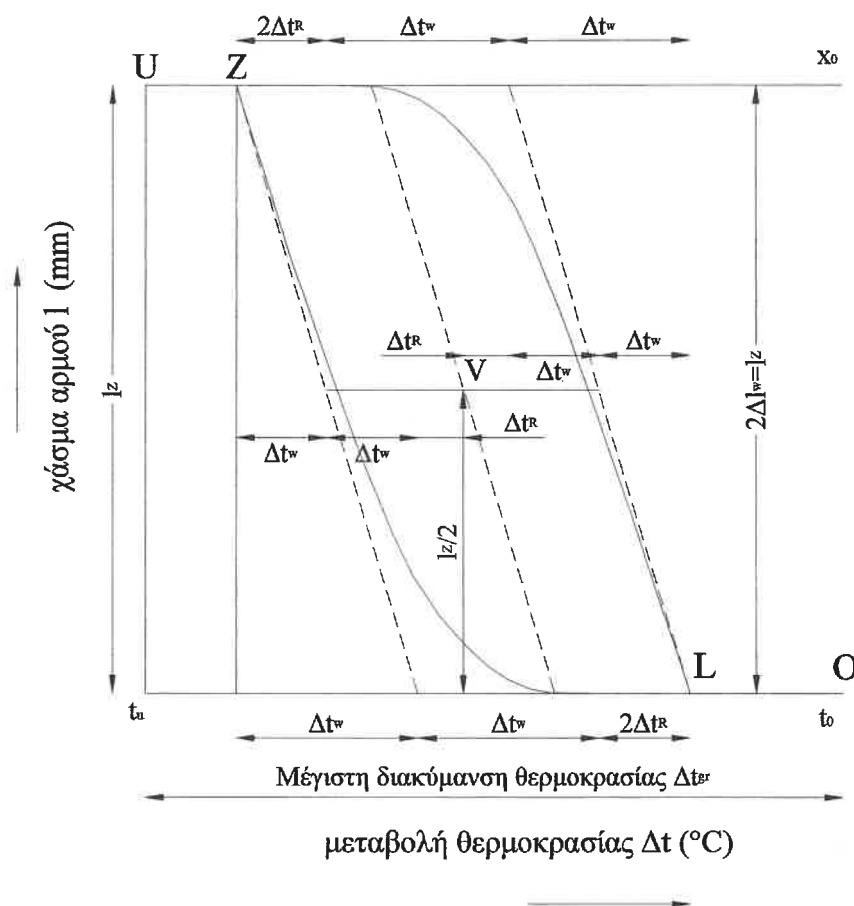
$$\ell_z = \frac{L_S^2 w_L}{2EF} \quad (20a)$$

1.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΣΣ

Συγκρίνοντας την τελευταία εξίσωση (20a) με την εξίσωση (13) έχουμε την εξίσωση για τις ΣΣΣ:

$$\ell_z = 2\Delta\ell_w \quad (21)$$

Από την εξίσωση (21) η εικόνα χάσματος παρουσιάζεται στο σχήμα 19, στο οποίο φαίνονται οι πλάγιες γραμμές του διαγράμματος να είναι μόνο παραβολικές καμπύλες συμμετρικές. Αυτό φυσικά, μόνο εφ' όσον, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι $\ell_V = \ell_Z/2$, διότι αλλιώς η μια πλευρά θα περιλαμβάνει και ένα ευθύγραμμο τμήμα ενώ οι παραβολικές καμπύλες δεν θα είναι του ίδιου μήκους.



Σχήμα 19

Παράσταση χάσματος για
Συνεχώς Συγκολλημένες
Σιδηροτροχιές

Πηγή [5]

1.9 ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΑ

Η μέγιστη αξονική δύναμη (θλίψη) της σιδηροτροχιάς, για την υψηλή περιοχή της θερμοκρασίας, η οποία, όπως αναφέρθηκε, εμφανίζεται στο μέσο της μακριάς σιδηροτροχιάς, όπου δρα ολόκληρη η αντίσταση τριβής της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων είναι:

$$P = R_L + \frac{L_S}{2} w_L + (t_0 - t_\ell) a E F \quad (22)$$

(δηλαδή ισούται με την αντίσταση αμφίδεσης + αντίσταση τριβής σιδηροτροχιάς επί στρωτήρων + συμπίεση λόγω μη υπάρχοντος περιθωρίου διαστολής).

Εάν τεθεί κατά την (17) η τιμή t_ℓ έχουμε:

$$P = \frac{L_s w_L}{4} + (t_0 - t_v) a E F - \ell_v \frac{E F}{L_s} \quad (23)$$

$$\sigma_P = \frac{P}{F} = \frac{L_s w_L}{4F} + (t_0 - t_v) a E - \ell_v \frac{E}{L_s} \quad (24)$$

Στις ΣΣΣ το χάσμα τοποθέτησης $\ell_Z=0$ θεωρείται μηδενικό σε οποιαδήποτε θερμοκρασία τοποθέτησης χωρίς τάσεις και πάντοτε οι μέγιστες τάσεις θλίψης κατά το μεσαίο τμήμα δίνονται από τον τύπο:

$$\sigma_P = (t_0 - t_v) a E \quad (25)$$

Αντίστοιχα, η ελάχιστη αξονική δύναμη (εφελκυσμός) Z και η τάση εφελκυσμού σ_Z , γενικά για τις σιδηροτροχιές δίνεται από τις εξισώσεις:

$$Z = -R_L - \frac{L_s}{2} w_L + (t_u - t_z) a E F \quad (26)$$

(δηλαδή ισούται με την αντίσταση αμφίδεσης + αντίσταση τριβής σιδηροτροχιάς επί στρωτήρων + εφελκυσμός μη υπάρχοντος περιθωρίου χάσματος).

Εάν τεθεί κατά την (18) η τιμή της t_z έχουμε:

$$Z = -\frac{L_s w_L}{4} + (t_u - t_v) a E F + \frac{\ell_z - \ell_v}{L_s} E F \quad (27)$$

$$\sigma_Z = \frac{Z}{F} = -\frac{L_s w_L}{4F} + (t_u - t_v) a E + E \frac{\ell_z - \ell_v}{L_s} \quad (28)$$

Για τη δύναμη Z πρέπει να παρατηρηθεί ότι ο όρος που προέρχεται από την τριβή αμφίδεσης και σιδηροτροχιάς επί στρωτήρων $\Delta = (-R_L - \frac{L_s}{2} w_L)$ μεταδίδεται άνετα για μεγάλες επιφάνειες τριβής της σιδηροτροχιάς, αφ' ενός με τους αμφιδέτες, αφ' ετέρου με τους στρωτήρες. Το υπόλοιπο τμήμα, όμως, $Z - \Delta = (t_u - t_z) a E F$ ενεργεί μέσω των οπών της ψυχής, οι οποίες συμπιέζονται απ' τα βλήτρα αμφίδεσης με τη δύναμη αυτή, με κίνδυνο σύνθλιψης των οπών (σύνθλιψη άντυγας) ή διάτμησης των βλήτρων αμφίδεσης. Ο κίνδυνος αυτός γίνεται τόσο μικρότερος, όσο οι τιμές των R_L και w_L είναι μεγαλύτερες, δηλαδή η δύναμη $(Z - \Delta)$ είναι μικρότερη.

Όσον αφορά στις ΣΣΣ οι μέγιστες τάσεις εφελκυσμού στο μεσαίο τμήμα δίνονται από τον τύπο [5]:

$$\sigma_Z = -(t_u - t_v) a E \quad (29)$$

1.10 ΕΚΛΟΓΗ ΑΦΕΤΗΡΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΑΣΜΑΤΩΝ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Για την κατάρτιση του διαγράμματος θερμοκρασίας - χάσματος αναχωρήσαμε αρχικά από μια δεδομένη θερμοκρασία t_v , με αντίστοιχο χάσμα ℓ_v . Αν η τροχιά θεωρηθεί ελεύθερη, το χάσμα είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά τον τύπο:

$$\frac{\ell_v' - \ell_v}{t_v' - t_v} = \frac{\Delta \ell}{\Delta t} = \epsilon \phi \delta = a L_s \quad (30)$$

(για τις μακριές σιδηροτροχιές ισχύει μόνο μεταξύ των ορίων $t_\ell < t_0$ και $t_z > t_u$, για τις βραχείες ισχύει γενικώς από t_0 μέχρι t_u και για τις ΣΣΣ

προφανώς δεν ισχύει, αφού σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν ελεύθερες)

$$\ell'_V = \ell_V + (t_V - t'_V)aL_S \quad (30\alpha)$$

$$\ell'_V + aL_S t'_V = \ell_V + t_V aL_S = \text{σταθερό} \quad (30\beta)$$

Έτσι, για τις ελεύθερες σιδηροτροχιές, το ζεύγος τιμών θερμοκρασίας και χάσματος είναι απολύτως καθορισμένο μέσω της εξίσωσης (30α), η οποία παριστά ευθεία γραμμή. Αν θελήσουμε να έχουμε το ίδιο διάγραμμα, αναχωρώντας, όμως, από άλλη θερμοκρασία t_V πρέπει αντίστοιχα το χάσμα τοποθέτησης ℓ'_V για τη νέα αυτή αφετηρία, να ορίζεται από τη σχέση (30α).

Στην περίπτωση των δεσμευμένων σιδηροτροχιών, για την ίδια θερμοκρασία, όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, για το χάσμα ορίζονται μόνο οι οριακές τιμές, όπως επίσης, είναι ορισμένες οι τιμές του ζεύγους θερμοκρασίας και χάσματος, όπου η σιδηροτροχιά παραμένει χωρίς τάσεις. Υπό την προϋπόθεση ότι οι τιμές αυτές βρίσκονται εκτός παραβολικού τμήματος του διαγράμματος, όπου δηλαδή είναι: $\ell_V \leq 2\Delta\ell_w \leq (\ell_Z - \ell_V)$ (31), τότε οι οριακές τιμές θερμοκρασίας διαφέρουν κατά τη σταθερή τιμή $\Delta x = 2\Delta t_R + \Delta t_w$. Συνεπώς, για να έχουμε και πάλι το ίδιο διάγραμμα θερμοκρασίας - τάσης, υπό τις ίδιες τιμές αντίστασης R_L και w_L , όταν θεωρήσουμε άλλη θερμοκρασία τοποθέτησης t_V πρέπει το χάσμα τοποθέτησης ℓ'_V να πληρεί τη σχέση (30α) των ελεύθερων σιδηροτροχιών (εφ' όσον οι σιδηροτροχιές κατά την τοποθέτηση θεωρούνται πάντα άτονες), αλλιώς κατά τις εξισώσεις (17) και (18), με $\ell'_V + aL_S t'_V = \ell_V + t_V aL_S$, θα ήταν $t'_L = t_L$ και $t'_Z = t_Z$, δηλαδή θα προέκυπτε μεταβολή του διαγράμματος. Συνεπώς, αν ληφθεί συμβατικά ένα ζεύγος τιμών τοποθέτησης θερμοκρασίας και χάσματος, η μέση γραμμή είναι καθορισμένη και είναι δυνατό να καταρτιστεί πίνακας αντίστοιχων ζευγών τιμών μεταξύ των ορίων χάσματος ℓ_0 και ℓ_Z για τις βραχείες ή μακριές σιδηροτροχιές.

Η εκλογή της συμβατικής θερμοκρασίας αφετηρίας (t_V , ℓ_V) για τον υπολογισμό των ζευγών τιμών θερμοκρασίας και χάσματος, κατά την τοποθέτηση των σιδηροτροχιών χωρίς τάση, υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

- α) Η τάση θλίψης σ_P δεν μπορεί να υπερβαίνει ορισμένα όρια, όχι μόνο για λόγους αντοχής της σιδηροτροχιάς (η οποία άλλωστε υπόκειται και σε άλλες, πρόσθετες καταπονήσεις, λόγω των φορτίων και άλλων αιτιών) σε αξονικές τάσεις οφειλόμενες σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, αλλά πολύ περισσότερο εξαιτίας του δημιουργούμενου σε αυτές λυγισμού. Από τον λυγισμό, κινδυνεύει η γραμμή να υποστεί πλευρική μετατόπιση (βλ. παρακάτω). Γι' αυτό, η σύνδεση της σιδηροτροχιάς επί των στρωτήρων πρέπει να είναι οπωσδήποτε όσο γίνεται ανθεκτική, ακόμα και με διάταξη αντιοδευτικών τεμαχίων αν είναι ανάγκη. Επίσης, κατά κύριο λόγο, πρέπει ο εγκιβωτισμός των στρωτήρων εντός του κατάλληλου έρματος να είναι επιμελημένος, ακόμα και με συμπύκνωση του έρματος μεταξύ των στρωτήρων.
- β) Για τις χαμηλές θερμοκρασίες t_w , οπότε έχει εξαντληθεί και πάλι το περιθώριο χάσματος και έχουν υπερνικηθεί οι αντιστάσεις τριβής αμφίδεσης και σιδηροτροχιάς επί στρωτήρων, η μέγιστη δύναμη που εφαρμόζεται στο μέσο της σιδηροτροχιάς είναι

$$Z = -\frac{L_S w_L}{4} + (t_u - t_v) a E F + \frac{\ell_z - \ell_v}{L_S} E F. \quad \text{Από τη δύναμη αυτή, όπως}$$

αναφέρθηκε, το μέρος $\Delta = (-R_L - \frac{L_S}{2} w_L)$ παραλαμβάνεται από τη σιδηροτροχιά μέσω των επιφανειών τριβής και το υπόλοιπο μέρος $Z - \Delta$ από τις οπές της ψυχής.

Δεχόμαστε κάποιες τιμές για τις R_L και w_L (βλ. παραπάνω) και βρίσκουμε τις εφελκυστικές τάσεις. Αντίστοιχα, υπολογίζουμε την καταπόνηση των βλήτρων αμφίδεσης και των οπών της ψυχής της σιδηροτροχιάς. Στην πραγματικότητα, δεν συμβαίνουν πολύ μικρές τιμές αντιστάσεων τριβής R_L και w_L , οπότε και προκύπτουν μέγιστες τάσεις διάτμησης των βλήτρων αμφίδεσης και σύνθλιψης των οπών. Οπωσδήποτε, συμφέρει, όπως αναφέρθηκε, να έχουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερες τιμές των R_L και κυρίως της w_L , με την τοποθέτηση αντιοδευτικών και τη συμπύκνωση του έρματος μεταξύ των στρωτήρων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εκλέγεται αρχική θερμοκρασία τοποθέτησης και αντίστοιχο χάσμα αρμού. Πάντως, για τις ΣΣΣ, όπως αναφέρθηκε, το χάσμα τοποθέτησης θεωρείται μηδενικό ($\ell_z = \ell_v = 0$) σε οποιαδήποτε θερμοκρασία τοποθέτησης χωρίς τάσεις. Μένει, λοιπόν να εκλεγεί η θερμοκρασία τοποθέτησης σύμφωνα με τους περιορισμούς [5].

Η παραπάνω διαδικασία είχε ως τελικό σκοπό, τον διαχωρισμό των σιδηροτροχιών ανάλογα με το μήκος τους σε βραχείες, μακριές και συνεχείς (ή ΣΣΣ). Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, οι βραχείες σιδηροτροχιές δεν εμφανίζουν κρίσιμα μεγέθη, καθώς εξ ορισμού στις ακραίες θερμοκρασίες δεν έχουν προλάβει να επιτευχθούν οι ακραίες τιμές του χάσματός τους. Στις μακριές σιδηροτροχιές, τα όρια αυτά επιτυγχάνονται και μάλιστα πριν τις οριακές τιμές θερμοκρασίας. Αποτέλεσμα αυτού και για την περιοχή θερμοκρασίας από την επίτευξη της ακραίας τιμής χάσματος, μέχρι την οριακή θερμοκρασία, είναι να αναπτύσσονται δυνάμεις στη σιδηροτροχιά. Οι δυνάμεις αυτές, που είναι εφελκυστικές για τη χαμηλή περιοχή της θερμοκρασίας και θλιπτικές για την υψηλή περιοχή, τείνουν, αντίστοιχα, να σπάσουν τη σιδηροτροχιά στην περιοχή του αρμού ή να προκαλέσουν την απώλεια της σταθερότητας της γραμμής, μέσω πλευρικής μετατόπισης.

Στην περίπτωση των μακρών σιδηροτροχιών, ο μηχανικός μπορεί να επέμβει και διαλέγοντας τα κατάλληλα στοιχεία τοποθέτησης (ουδέτερη θερμοκρασία και αντίστοιχο χάσμα), να μειώσει τις εμφανιζόμενες δυνάμεις, αποτρέποντας την κρίσιμη κατάσταση στη γραμμή. Αντίθετα, στις ΣΣΣ, δεν είναι δυνατό να μειωθούν οι θλιπτικές δυνάμεις, που απουσία αρμού, είναι οι κρίσιμες, ενώ οι εφελκυστικές δυνάμεις δεν ενδιαφέρουν. Στο κεντρικό τμήμα, που παραμένει αμετακίνητο, δεν εκτονώνονται οι τάσεις από θερμοκρασία με διαστολή (ή και συστολή), όπως συμβαίνει με τις μακριές σιδηροτροχιές και τελικά, συγκεντρώνονται. Ακριβώς σ' αυτό το αμετακίνητο τμήμα, οι δυνάμεις είναι τόσο μεγάλες, που μπορούν να προκαλέσουν την πλευρική μετατόπιση της γραμμής. Ζητούμενο τελικά είναι η εξασφάλιση της γραμμής έναντι πλευρικής μετατόπισης, το οποίο αναπτύσσεται στα επόμενα.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

2.1 ΘΕΩΡΙΑ MEIER

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.

2.1.1 Η σταθερότητα της ράβδου πεπερασμένου μήκους

Συμβολισμοί:

P_o = 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.

α) Επιλογή γραμμής κάμψης

Γραμμή κάμψης 1: Η «πραγματική μορφή» της γραμμής κάμψης για τον κατακόρυφο λυγισμό της ευθύγραμμης ή της, στο κατακόρυφο επίπεδο, καμπυλωμένης ράβδου και για τον οριζόντιο λυγισμό, σε οριζόντιο επίπεδο, της καμπυλωμένης ράβδου είναι η απλή ημιτονοειδής μορφή, η οποία φαίνεται στο σχήμα 20. 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:

$$y_1 = \frac{x(x-L)}{2R}, y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L}\right) \quad (32)$$

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

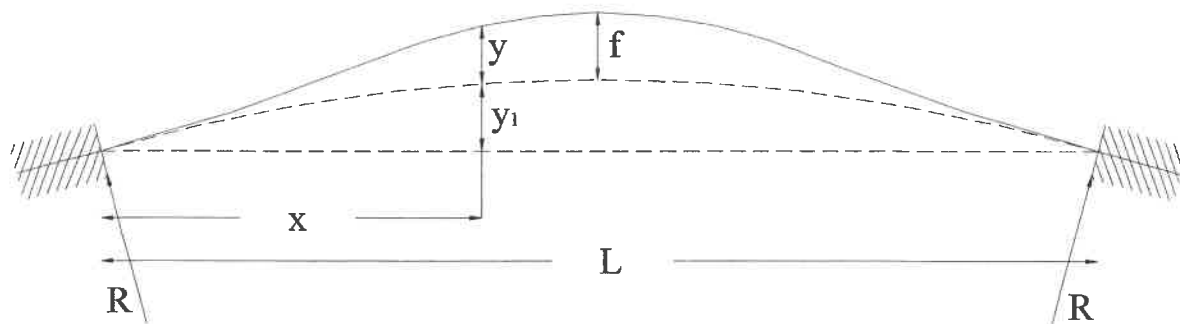
$$\lambda = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{d\bar{y}}{dx}\right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 dx \Rightarrow$$

και με αντικατάσταση των $\bar{y}$ και y_1 προκύπτει:

$$\lambda = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 + 2 \frac{dy_1}{dx} \frac{dy}{dx} + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2 \right] dx \Rightarrow$$

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

$$\lambda = \frac{f^2 \pi^2}{4L} + \frac{fL}{2R} \quad (33).$$



Σχήμα 20
Γραμμή κάμψης 1
Πηγή [13]

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 21), η οποία παρουσιάζεται ως γραμμή κάμψης 2 Ισχύουν:

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

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

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

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

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

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

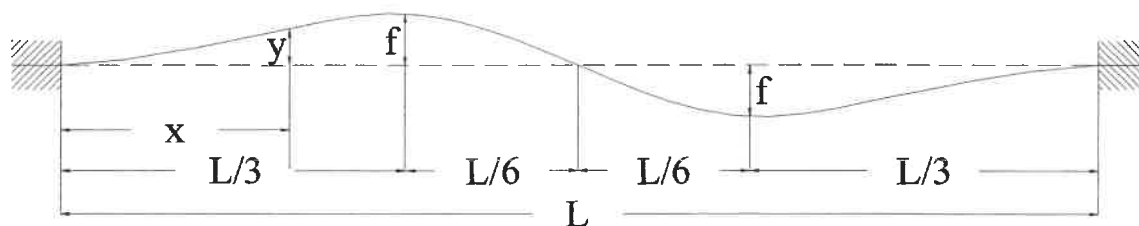
$$x=\frac{2}{3}L \text{ έως } x=L \quad \frac{dy}{dx} = -\frac{3f\pi}{2L} \sin \frac{3\pi x}{L}.$$

Άρα:

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

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

$$\lambda = \frac{9f^2\pi^2}{8L} \quad (34).$$



Σχήμα 21
Γραμμή κάμψης 2
Πηγή [13]

β) 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:

$$1. A_b = \text{έργο λυγισμού}, A_b = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI_E} dx \quad (35\alpha)$$

$$2. A_h = \text{έργο ανύψωσης}, A_h = g \int_0^L y dx \quad (35\beta)$$

$$A_w = \text{έργο πλευρικής παραμόρφωσης}, A_w = w \int_0^L y dx \quad (35\gamma)$$

$$3. A_v = \text{έργο επιμήκυνσης}, A_v = \frac{1}{2} \lambda \frac{EI_E}{L} \lambda \quad (35\delta).$$

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.

$$A_p = \text{έργο της θλιπτικής δύναμης } P_0, A_p = P_0 \cdot \lambda \quad (35\epsilon).$$

(σε αυτή της ισότητα το P_0 παραμένει σταθερό. Η ενέργεια για τη διαστολής

$$\Delta P = \frac{EI_E}{L} \lambda \text{ θεωρείται σαν έργο επιμήκυνσης } A_v). \text{ Η ισότητα των ενεργειών}$$

γράφεται:

$$A_b + A_w + A_v - A_p = E \quad (36).$$

(στον κατακόρυφο λυγισμό στη θέση A_w του εμφανίζεται το A_h).

Στον Πίνακα 3 φαίνονται για τις δύο γραμμές κάμψης οι σχέσεις για τα έργα, τα οποία προέκυψαν με εφαρμογή των παραπάνω ισοτήτων).

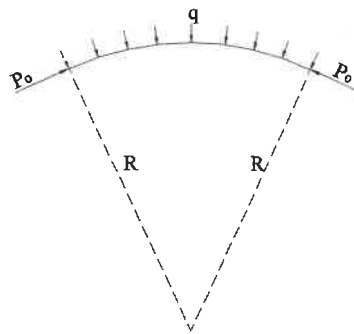
Πίνακας 3
Εκφράσεις των ενεργειών

	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	$P_o \frac{f^2 \pi^2}{4L} + \frac{P_o}{R} \frac{fL}{2}$	$P_o \frac{9\pi^2 f^2}{8L}$

Πηγή [13]

γ) Η τιμή $\frac{P_o}{R}$

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 22).

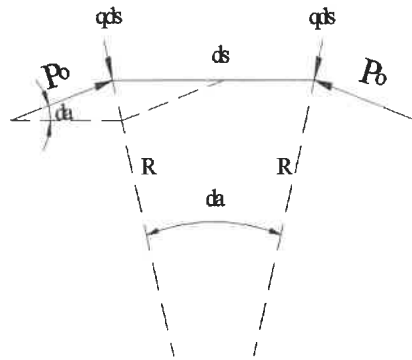


Σχήμα 22
Ακτινική δύναμη q
Πηγή [13]

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 23, 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 23

Στοιχειώδες τμήμα τόξου ακτίνας R και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό
Πηγή [13]

Στις παραπάνω σχέσεις στο A_p εμφανίζεται η τιμή $\frac{P_o}{R}$. Δηλαδή, ορίζει η τιμή αυτή μια ακτινικά εμφανιζόμενη δύναμη αντίδρασης, της φύσης της πλευρικής αντίστασης σε παραμόρφωση ή του ίδιου βάρους.

Αν είναι $\frac{P_o}{R} > w$, 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 $\frac{P_o}{R} > g$.

δ) Το κρίσιμο σφάλμα f'

Κατά τη μελέτη της σταθερότητας, 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 . Επιλέγουμε το f , για καλύτερη εποπτεία. Τα έργα, τώρα, των δυνάμεων αναμορφώνονται λαμβάνοντας υπόψη το f . Για την πεπερασμένη ράβδο, που μελετάμε, το L είναι σταθερό (για την απείρου μήκους ράβδο, το μήκος λυγισμού είναι άγνωστο και αλλάζει στην πορεία του φαινομένου).

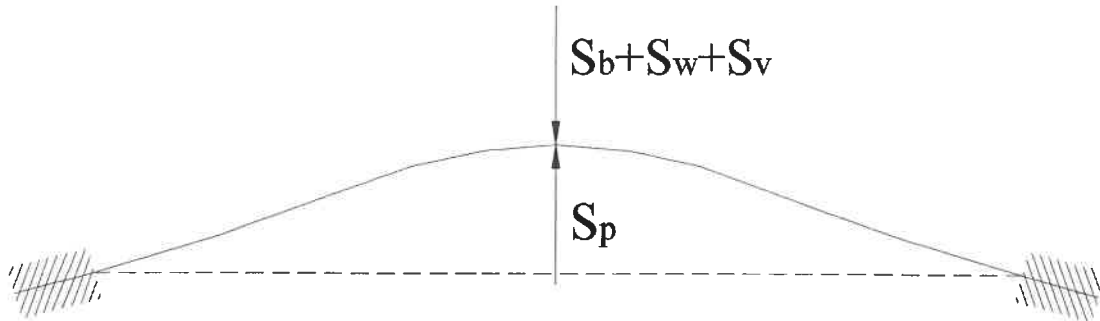
Το κρίσιμο σφάλμα f' ορίζει την παραμόρφωση, στην οποία ξεκινά ο λυγισμός.

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 $\frac{dE}{df}$.

Η διαδικασία απλοποιείται αν ο διαφορικός όρος του κάθε έργου $\frac{dA}{df}$, θεωρηθεί ως δύναμη S , η οποία υπολογίζεται στη θέση του f . Είναι $dA = S \cdot df$. Η εξίσωση ενέργεια απλοποιείται σε μια εξίσωση δυνάμεων (σχήμα 24).

$$S_b + S_w + S_v - S_p = S_r \quad (37).$$



Σχήμα 24
Ισοδύναμες δυνάμεις στη σιδηροτροχιά
Πηγή [13]

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

$S_b + S_w + S_v > S_p : S_r$ 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_b 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_p).

Το κρίσιμο μέτρο παραμόρφωσης f' εκτιμάται λοιπόν, από την ισότητα $S_b + S_w + S_v = S_p$.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται για τις δύο γραμμές κάμψης οι σχέσεις για τις υποκατάστατες δυνάμεις.

Στο σχήμα 25 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 $S_p' > S_b$.

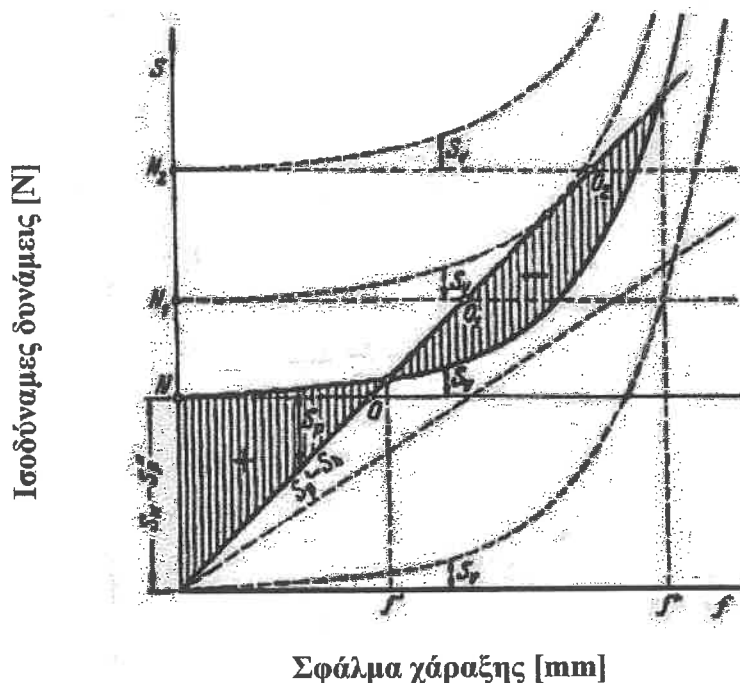
Πίνακας 4

Εκφράσεις των ισοδύναμων δυνάμεων

	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	$P_o \frac{\pi^2 f}{2L} + \frac{P_o L}{R} \frac{1}{2}$	$P_o \frac{9\pi^2}{4L} f$
	$S'_p + S''_p$	

Πηγή [13]

Φαίνεται ξεκάθαρα ότι όσο το $f < f'$, η δύναμη S_r είναι θετική και τελικά δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος πλευρικής μετατόπισης. Απ' την άλλη, για υπέρβαση του f' , η S_r είναι αρνητική και για αυτό η εμφάνιση του λυγισμού είναι δεδομένη. Στο f' εμφανίζεται μια ασταθής κατάσταση ισορροπίας πριν τον λυγισμό. Στο f'' εμφανίζεται μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 25

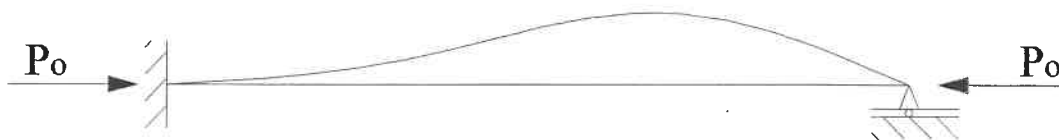
Διάγραμμα ισοδύναμων δυνάμεων S σε συνάρτηση με την παραμόρφωση f
Πηγή [13]

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_w . Το σημείο N του διαγράμματος ανεβαίνει στο N_1 ή στο N_2 . Η καμπύλη που παράγεται μέσω του S_v , δεν κόβει 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 κόβεται. 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 25, αυτό σημαίνει μια μεταβολή στην κλίση της κεκλιμένης γραμμής.

Κατά δεύτερον, μείωση της τιμής του w στην τιμή $\frac{P_o}{R}$ 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 σταθερότητας 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 26). 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 26, ο κίνδυνος λυγισμού είναι μεγαλύτερος. Το f' είναι μικρότερος 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. Η ράβδος παραμορφώνεται.



Σχήμα 26

Γραμμή κάμψης για ράβδο με ένα άκρο ελεύθερο να μετακινείται
Πηγή [13]

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

$$f' = \left(w - \frac{P_o}{R} \right) \frac{L^2}{\pi^2} \quad (38), \text{ για τη γραμμή κάμψης 1}$$

$$f' = \frac{0,0245 w L^2}{P_o - K_2} \quad (39), \text{ για τη γραμμή κάμψης 2}$$

ε) Παρατηρήσεις

Για την κατάρτιση του Πίνακα 4 και την κατασκευή του Σχήματος 25, για κάθε περίπτωση σταθερότητας 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).

(1) *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).

(2) *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 .

(3) *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 $f'=0$.

(4) *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 $\frac{P_o}{R}=w$ μεγαλώσει και τελικά $S_p''=S_w$, πρέπει ακόμα να ελεγχθεί αν $S_p < \text{ή} > S_b$.

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 $\frac{P_o}{R} < w$, μπορεί να προκληθεί λυγισμός της ράβδου μέσω τεχνητής παραμόρφωσης.

Η ανίσωση $P_o < \text{ή} > K$ 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).

2.1.2 Η σταθερότητα της ράβδου απείρου μήκους

α) 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 το 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 την μέθοδο, ο υπολογισμός είναι πολύ επίπονος.

β) Απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού

(1) 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_γ : 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:

ΜΕΘΟΔΟΙ

Στη μελέτη της σταθερότητας 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_l είναι τόσο μικρές σε σχέση με τις τιμές των S_w και S_b , ώστε οι S_v και S_l μπορούν να αμεληθούν, χωρίς σοβαρό σφάλμα. Η παράλειψη αυτή, είναι προς την ασφάλεια.

(2) Αμελείται η μεταβολή της διαδρομής του λυγισμού στην πορεία του φαινομένου

Η σταθερότητα 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.

(3) Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, γίνεται ο παρακάτω εύκολος υπολογισμός: λαμβάνεται το f' από τον Πίνακα 5 και τίθεται $\frac{df}{dL} = 0$, όπου το L είναι μέση τιμή (Πίνακας 5)

Πίνακας 5

$f'_{\min}$ για μακριά σιδηροτροχιά

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

Πηγή [13]

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 $w > \frac{P_o}{R}$.

Για $w = \frac{P_o}{R}$ 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

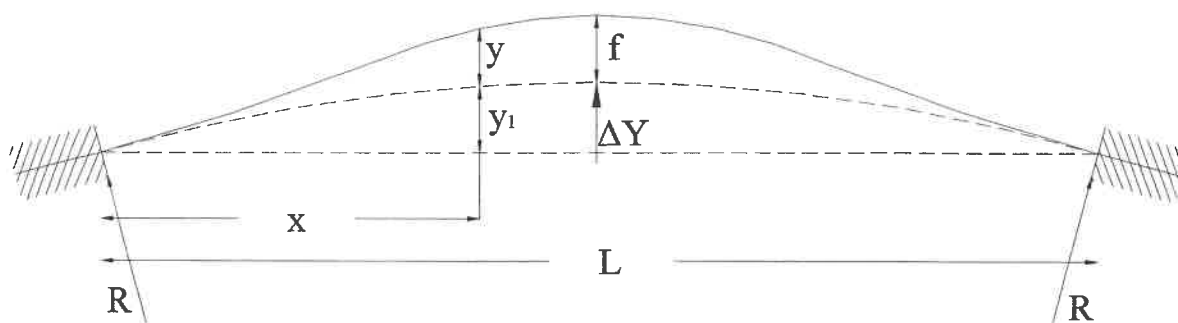
όπως και για την πεπερασμένου μήκους ράβδου. Το μέγεθος της ισοδύναμης ροπής αδράνειας είναι πολύ σημαντικό [13].

(4) 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.

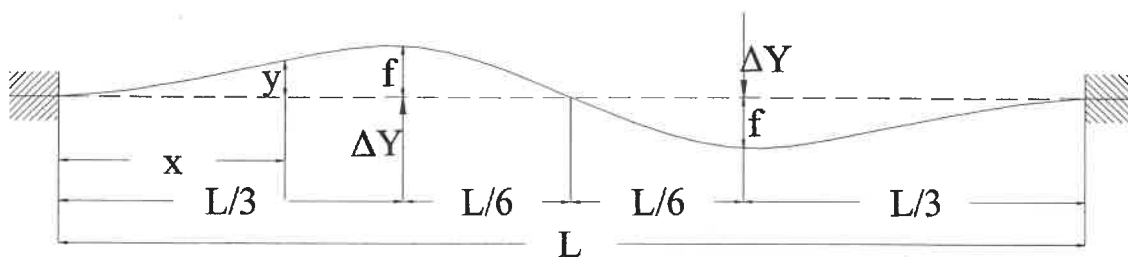
Η ΔY επιδρά, όπως και οι ισοδύναμες δυνάμεις.

Για την γραμμή κάμψης 1, η διάταξη της ΔY είναι σαφής (σχ. 27). Για τη γραμμή κάμψης 2, υποθέτουμε, ότι η ΔY , όπως και οι ισοδύναμες δυνάμεις, δρα σαν ζεύγος δύο δυνάμεων, μέτρου $\frac{\Delta Y}{2}$ η καθεμιά, με σημεία εφαρμογής τις θέσεις των μέγιστων απομακρύνσεων, με την ίδια φορά, τη φορά της απομάκρυνσης (σχ. 28).



Σχήμα 27

Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 1
Πηγή [13]



Σχήμα 29

Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 2
Πηγή [13]

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:

$$S_b + S_w - S'_p - S''_p - \Delta Y = 0 \quad (47).$$

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:

$$f' = \frac{\left(w - \frac{P_o}{R}\right) \frac{L^2}{\pi^2} - \Delta Y \frac{2L}{\pi^2}}{P_o - K_1} \quad (48).$$

Για την απείρου μήκους ράβδο, με χρήση της απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού, υπολογίζεται το μέσο μήκος λυγισμού από τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{df'}{dL} = 0, \text{ από όπου το λαμβάνεται το } L.$$

Για παράδειγμα, για τη γραμμή κάμψης 1 προκύπτει το ακόλουθο:

$$L = 2\pi a \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}} \quad (49), \text{ με } a = \sqrt{\frac{\left(w - \frac{P_o}{R}\right)L - 1,5\Delta Y}{\left(w - \frac{P_o}{R}\right)L - \Delta Y}}, \text{ για } \Delta Y = 0 \text{ είναι } a=1.$$

Η ακριβής θεώρηση του συντελεστή a 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 $a=1$ και χρησιμοποιούμε και τις δύο γραμμές κάμψης την ίδια σχέση για το μήκος λυγισμού L , όπως δίνονται στον πίνακα 5.

Θεωρούμε και για κάθε γραμμή κάμψης:

$$\Delta Y = w_q \frac{L}{2} \quad (50\alpha) \text{ ή } \Delta Y = 0,545 w_q L \quad (50\beta),$$

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

- για τη γραμμή κάμψης 1: $(w - w_r - w_q) \frac{L}{2}$, με $w_r = \frac{P_o}{R}$,
- για τη γραμμή κάμψης 2: $0,545(w - w_q)L$

Οι σχέσεις για την κρίσιμη παραμόρφωση είναι [13]:

Πίνακας 6:

f' για μακριά σιδηροτροχιά με επίδραση συρμού

Γραμμή κάμψης 1	$f' = \bar{w} \frac{16EI_E}{P_o^2}$	$\bar{w} = w - \frac{P_o}{R} - \frac{2\Delta Y}{L}$
Γραμμή κάμψης 2	$f' = \bar{w} \frac{8,7EI_E}{P_o^2}$	$\bar{w} = w - \frac{\Delta Y}{0.545L}$

Πηγή [13]

2.2 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 του 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 σταθερότητάς 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 σταθερότητα 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 σιδηροτροχιά 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 [7].

2.2.1 Η Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά

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 επιδομής, 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 μετατόπισή της περιοχής πριν την αλλαγή).

Αν προσεχθούν ιδιαιτέρως 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 γραμμές εντός του έρματος

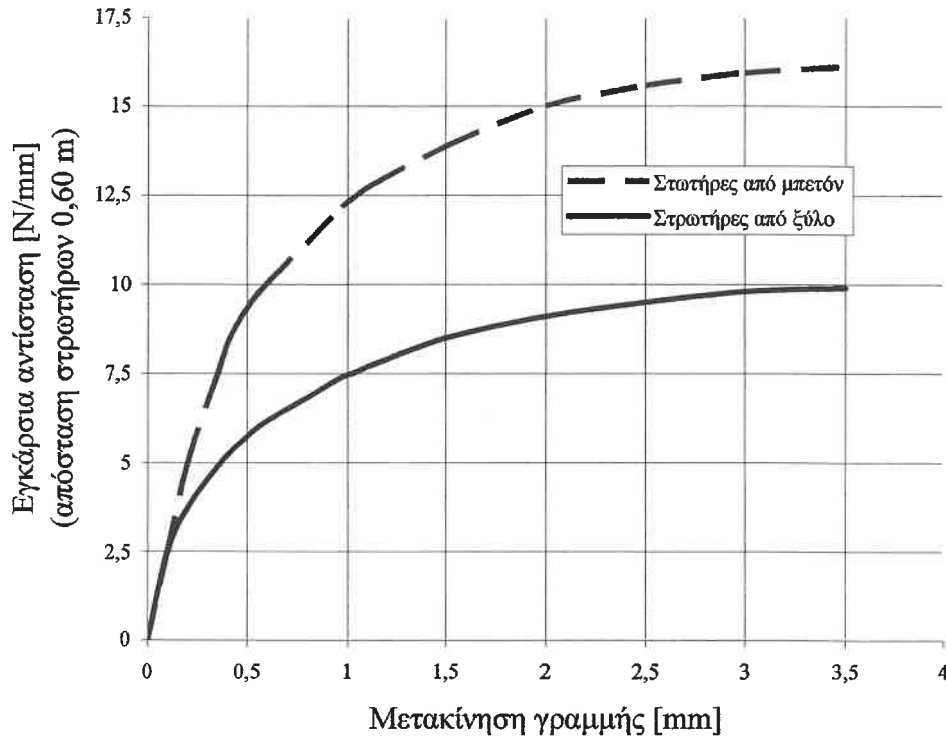
Η εγκάρσια αντίσταση για τους στρωτήρες από μπετόν είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη των ξύλινων στρωτήρων (βλ. σχ. 30). Για μήκος στρωτήρων από σκυρόδεμα 2,4μ, με μεταξύ τους απόσταση 60cm και πλάτος έρματος 40cm από την άκρη του στρωτήρα, η στατική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης w , δηλαδή χωρίς κυκλοφορία συρμών, για μετατόπιση $f=2\text{mm}$ είναι χοντρικά:

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

ενώ για μήκος στρωτήρων από σκυρόδεμα λαμβάνουμε:

ΜΕΘΟΔΟΙ

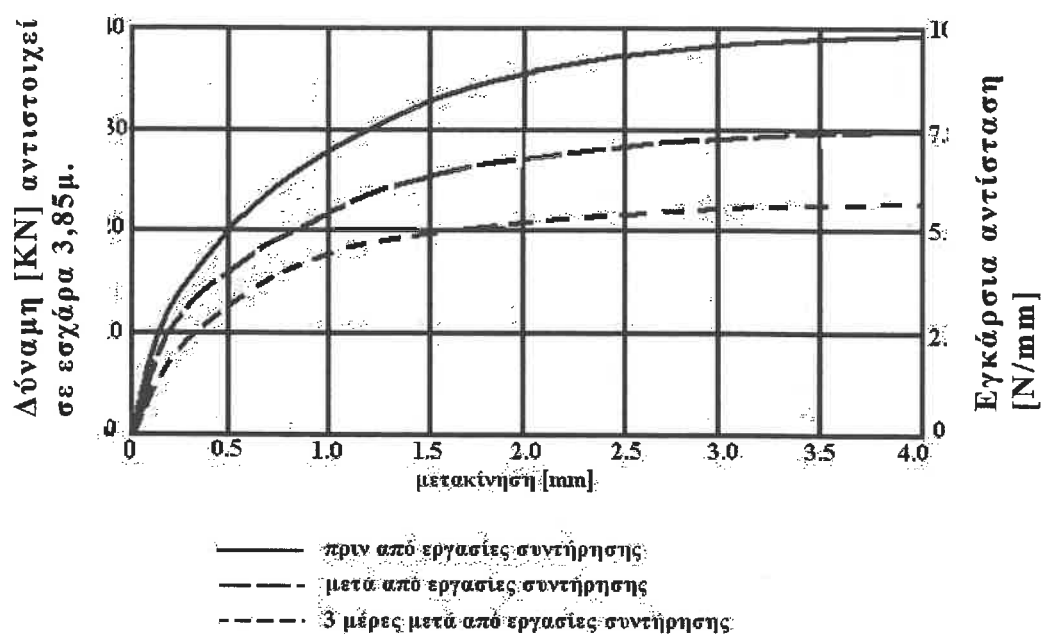
$w = 15\text{N/mm}$ μήκους σιδηροτροχιάς.



Σχήμα 29

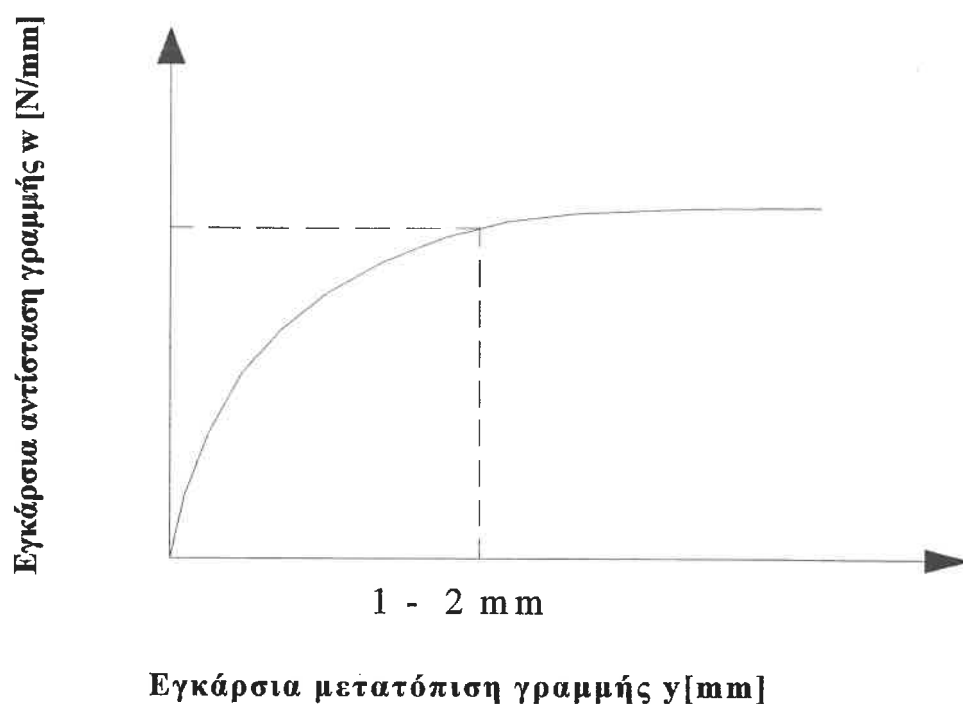
Εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση πριν από εργασίες συντήρησης για στρωτήρες από μπετόν και ξύλο (στατική τιμή: χωρίς την επίδραση του συρμού)
Πηγή [7]

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 (βλ. σχ.30).



Σχήμα 30

Διάγραμμα που προέκυψε από πειράματα: εγκάρσια αντίσταση μετακίνησης για γραμμή με ξύλινους στρωτήρες πριν και μετά εργασιών συντήρησης
 Πηγή [7]



Σχήμα 31

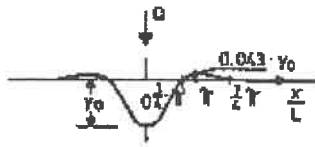
Παραδοχή για την εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση w

Πηγή [15]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 32, 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 15 (γραμμή κάμψης Zimmermann), όπου είναι:

$$l = \sqrt[4]{\frac{4EI}{\beta C}} [mm] \quad (51), \text{ όπου}$$

- l = θεμελιακή τιμή μήκους για την επιδομή [mm]
- E, I = μέτρο ελαστικότητας, ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς
- $\beta = \frac{F_a}{a}$ = ιδεατό πλάτος [mm]
- C = συντελεστής στρώσης έρματος [N/mm^3]



Σχήμα 32

Γραμμή κάμψης της σιδηροτροχιάς με ανύψωση υπό την φόρτιση ενός κατακόρυφου φορτίου (ZIMMERMANN)

Πηγή [7]

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 κάτι 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 [7].

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

ΜΕΘΟΔΟΙ

εσχάρας σε κάθε σύνδεση είναι ίση με δύο έως τρεις φορές την οριζόντια ροπή αδράνειας των δύο σιδηροτροχιών.

Παρακάτω παρατίθεται παράδειγμα για τη σιδηροτροχιά UIC60:

$$I_{yy} \text{ για 1 σιδηροτροχιά} = 512,9 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_{yy} \text{ για 2 σιδηροτροχιές} = 2 \times 512,9 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Από μετρήσεις προέκυψε ότι η υποκατάστατη ροπή αδράνειας της σχάρας της γραμμής μπορεί να ληφθεί ίση με :

$$I_E = 2,5 \times 2 \times I_{yy} = 2,5 \times 2 \times 512,9 \times 10^4 = 2564,5 \times 10^4 \text{ mm}^4.$$

Ο EISENMANN υπολόγισε για τη γερμανική κανονική γραμμή και επιδομή τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 2:

Ισοδύναμη ροπή αδράνειας κατά EISENMANN

Ισοδύναμη ροπή αδράνειας I_E σε [mm ⁴]	Επιδομή		
	S49 ξύλινοι στρωτήρες	UIC 60 – K ξύλινοι στρωτήρες	UIC 60-70 W Beton στρωτήρες
Χαλαρή σύνδεση	638×10^4	1026×10^4	1026×10^4
Σφιχτή (συσφιγμένη)	2600×10^4	2600×10^4	2200×10^4

Πηγή [7]

Για τη μετρική γραμμή δεν υφίστανται ακόμα, αποτελέσματα μελετών. Στην περίπτωση αυτή, η ροπή αδράνειας της σχάρας 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 σχάρας 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 σχάρας, σε σχέση με τις γραμμές με συμβατικούς ξύλινους στρωτήρες. Την αυξημένη ροπή αδράνειας, προσφέρουν οι Υ-μεταλλικοί στρωτήρες, εξαιτίας του ιδιαίτερου τρόπου που τοποθετούνται [7].

γ) Μέθοδος υπολογισμού της ΣΘΓ

Ο υπολογισμός της κρίσιμης θερμοκρασίας Δt_c , 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 σχάρας 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.

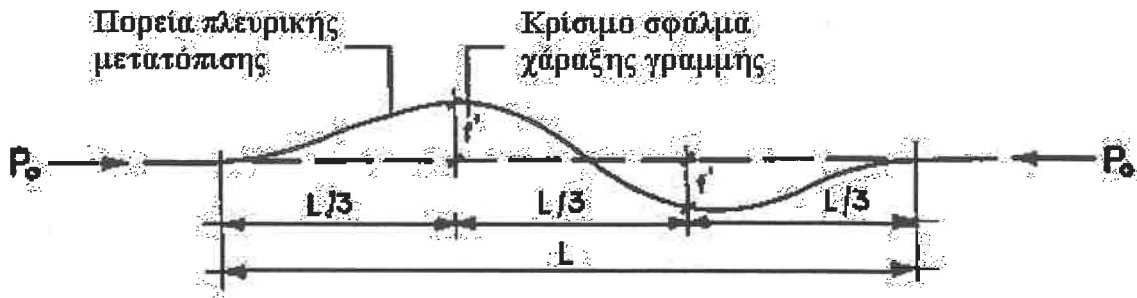
Ο Meier, με τη βοήθεια ενεργειακών μεθόδων, κατέληξε σε μια πολύ καλή προσέγγιση. Η προσέγγιση αφορά στο ότι για να λάβει η γραμμή κάμψης μια ορισμένη μορφή, εμφανίζεται ένα ορισμένο σφάλμα κατά μήκος της γραμμής σε σχέση με την ακριβή γεωμετρική της θέση (σχήμα 33). Αυτό το υποθετικό σφάλμα υπολογισμού 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:

- Δt_{krit} = 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_0 = 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 $= 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
- $F_{(2)}$ = επιφάνεια και των δύο σιδηροτροχιών $= 2 \times F$ [mm^2]
- α = θερμικός συντελεστής του χάλυβα $= 1,15 \times 10^{-5} \text{ grad}^{-1}$
- I_E = ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εσχάρας [mm^4]
- w = εγκάρσια αντίσταση έναντι μετατόπισης της εσχάρας στο έρμα ανά μονάδα μήκους [N/mm]
- R = οριζοντιογραφική ακτίνα της γραμμής [mm]

Σε ευθεία γραμμή



Σχήμα 33

Παραδοχή γραμμής κάμψης για ευθεία γραμμή
Πηγή [7]

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

$$P_0 = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F_{(2)} \text{ [N]} \quad (52)$$

$$L = 3 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_0}} \text{ [mm]} \quad (53)$$

$$f' = 8,7 \cdot w \cdot \frac{EI_E}{P_0^2} \text{ [mm]} \quad (54)$$

και για την κρίσιμη άνοδο της θερμοκρασίας ισχύει:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_E \cdot w}{a^2 \cdot F_{(2)}^2 \cdot E \cdot f}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (55)$$

Ο έλεγχος έναντι πλευρικής μετατόπισης είναι:

$$\frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \geq 2 \quad (5)$$

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

Σε καμπύλη

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

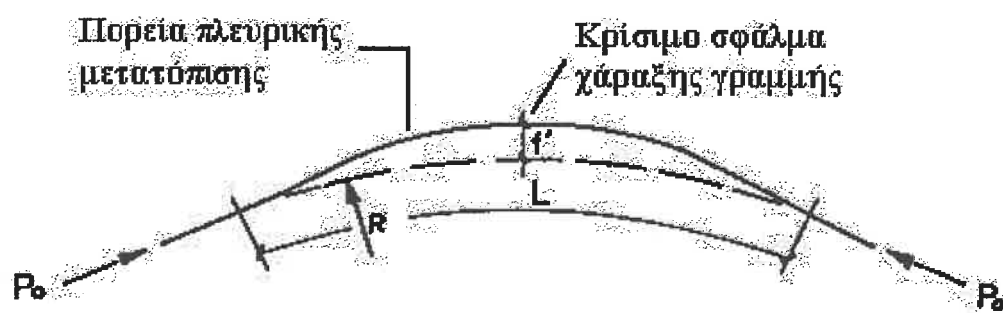
$$P_0 = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F_{(2)} \text{ [N]} \quad (52)$$

$$L = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_0}} \text{ [mm]} \quad (56)$$

$$f' = \left(w - \frac{P_0}{R} \right) \cdot \frac{16EI_E}{P_0^2} \text{ [mm]} \quad (57)$$

και για την κρίσιμη άνοδο της θερμοκρασίας ισχύει:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot I_E}{a \cdot F_{(2)} \cdot R \cdot f} \right)^2 + \frac{16 \cdot I_E \cdot w}{a^2 \cdot F_{(2)}^2 \cdot E \cdot f} - \frac{8 \cdot I_E}{a \cdot F_{(2)} \cdot R \cdot f}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (58)$$



Σχήμα 34

Παραδοχή γραμμής κάμψης για καμπύλη γραμμή
Πηγή [7]

Στην καμπύλη γραμμή το Δt_{krit} και από αυτό και οι σχέσεις της ασφάλειας έναντι πλευρικής μετατόπισης 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 [7].

2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ZOBA (Σιδηρόδρομοι Κονγκό)

2.3.1 Γενικά σχόλια

Παρακάτω αναπτύσσονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον καθορισμό των μηχανικών παραγόντων της σταθερότητας της γραμμής, και η πρόταση μιας μεθόδου για τον υπολογισμό της σταθερότητας της ΣΣΣ στις μετρικές γραμμές.

2.3.2 Μηχανικοί παράγοντες της οριζόντιας σταθερότητας της γραμμής

Οι μηχανικοί παράγοντες 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).

Οι τιμές των E I για τους κύριους τύπους σιδηροτροχιών που χρησιμοποιούνται στις μετρικές γραμμές των Αφρικανικών Σιδηροδρόμων δίνονται στον Πίνακα 1.

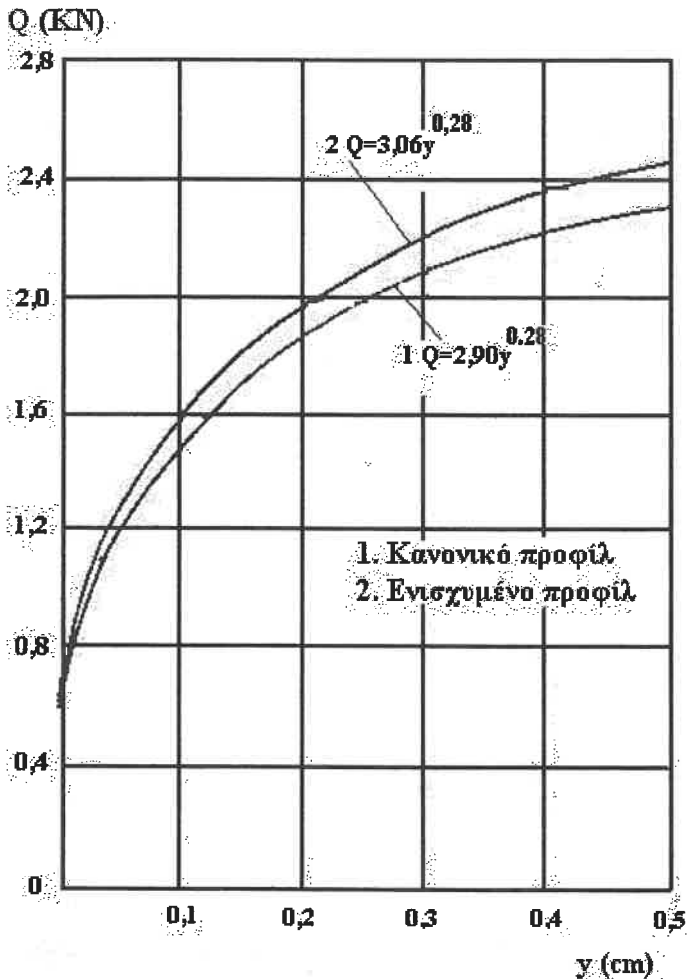
Πλευρική αντίσταση της γραμμής

Η πλευρική αντίσταση της γραμμής στη μετακίνηση εντός του έρματος είναι ένας βασικός παράγοντας της σταθερότητας 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 μέγεθος αντοχής – έντασης με βάση μαθηματικές στατιστικές μεθόδους. Χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο "PEARSON" X^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 36. Αυτές οι καμπύλες προκύπτουν για μη σταθεροποιημένη γραμμή, που

ανταποκρίνεται στη βασική υπόθεση για τη μελέτη της σταθερότητας της ΣΣΣ.



Σχήμα 35
Αντίσταση της γραμμής για
ξύλινους στρωτήρες
Πηγή [4]

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:

$Q = Q_0 \cdot y^n$ (59), 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 35.

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

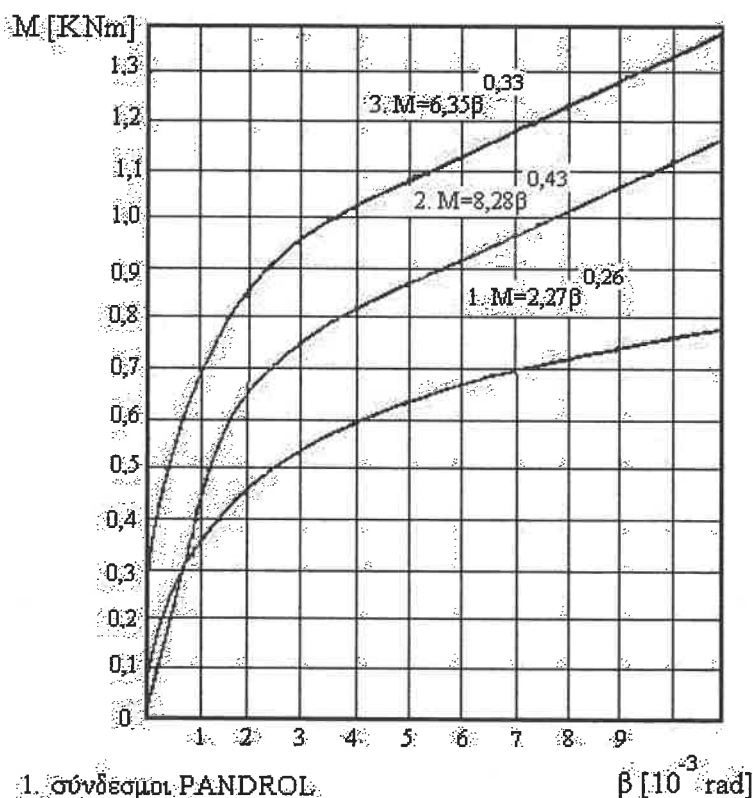
ΜΕΘΟΔΟΙ

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 36 μπορούν και αυτές να εκφραστούν με μια συνάρτηση της ακόλουθης μορφής: $M = M_0 \beta^k$ (60), όπου $k < 1$.

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

Το σχήμα 36 δείχνει τις καμπύλες για συνδέσμους RN, καθώς επίσης και αυτές που προέκυψαν για τους συνδέσμους PANDROL, για μικρές τιμές του β .



1. σύνδεσμοι PANDROL
2. σύνδεσμοι RN χωρίς πλάκες βάσης
3. σύνδεσμοι RN με πλάκες βάσης

Σχήμα 36
Αντίσταση συνδέσμων
στην περιστροφή της
σιδηροτροχιάς ως προς
τον στρωτήρα, για μικρές
τιμές του β .
Πηγή [4]

2.3.3 Πρακτική μέθοδος για τον υπολογισμό της σταθερότητας των ΣΣΣ

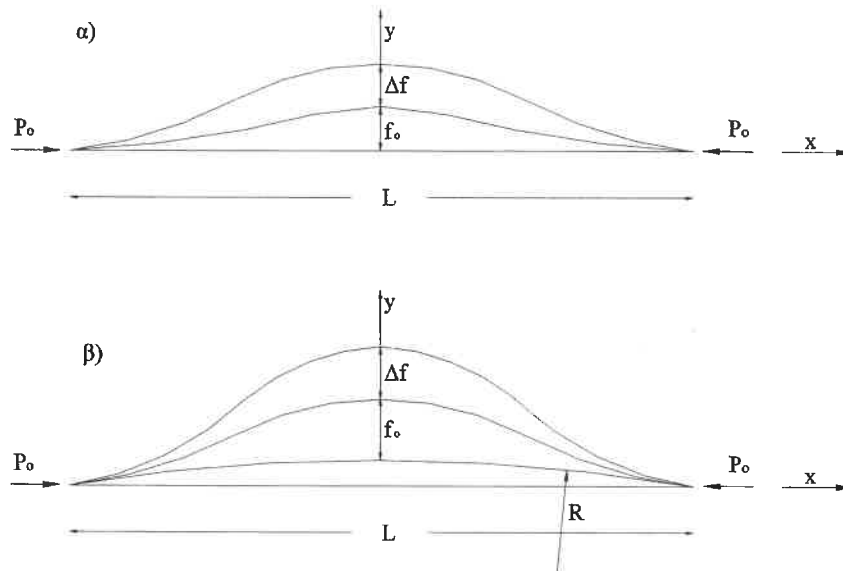
Βασική υπόθεση

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 σιδηροτροχιές.

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

ΜΕΘΟΔΟΙ

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 37. Οι συνθήκες ισορροπίας προσδιορίζονται με ενεργειακές μεθόδους.



Σχήμα 37

Παραδοχή γραμμής κάμψης: μέθοδος ZOBA

- α) ευθεία γραμμή
β) καμπύλη γραμμή
Πηγή [4]

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

$$P = \left[48,466 \frac{EI \Delta f}{L^2} + 0,078 l^2 \xi_1 \frac{Q_0}{a} \Delta f^n + \frac{2m_0}{a} \xi_2 L \left(\frac{\Delta f}{L} \right)^k \right] \times \frac{1}{\Delta f + f_0 + 0,078 \frac{L^2}{R}} \quad (61)$$

όπου:

- EI - ακαμψία της γραμμής στον κάθετο άξονα (ίση με την ακαμψία των δύο σιδ/χιών)
 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 (61) 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 $\min \max P$, που είναι η επιθυμητή, ελάχιστη, κρίσιμη, θλιπτική τάση.

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

Η σχέση (61) 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:

$$P_{cr} = \frac{9,81 A_{cr}}{i_0^{a_{cr}}} K_1 K_2 K_3 \text{ σε KN, (62).}$$

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 7

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 38, 39. επιπλέον το K_1 εξαρτάται από την αντίσταση Q_0 του στρωτήρα στην εγκάρσια μετακίνηση εντός του έρματος, για μετακίνηση ίση με 1 εκ.

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 κα 1,03 για RN συνδέσμους με πλάκες βάσης. Για συνδέσμους Sk1 (σε στρωτήρες από σκυρόδεμα) λαμβάνεται $K_3=1,15$.

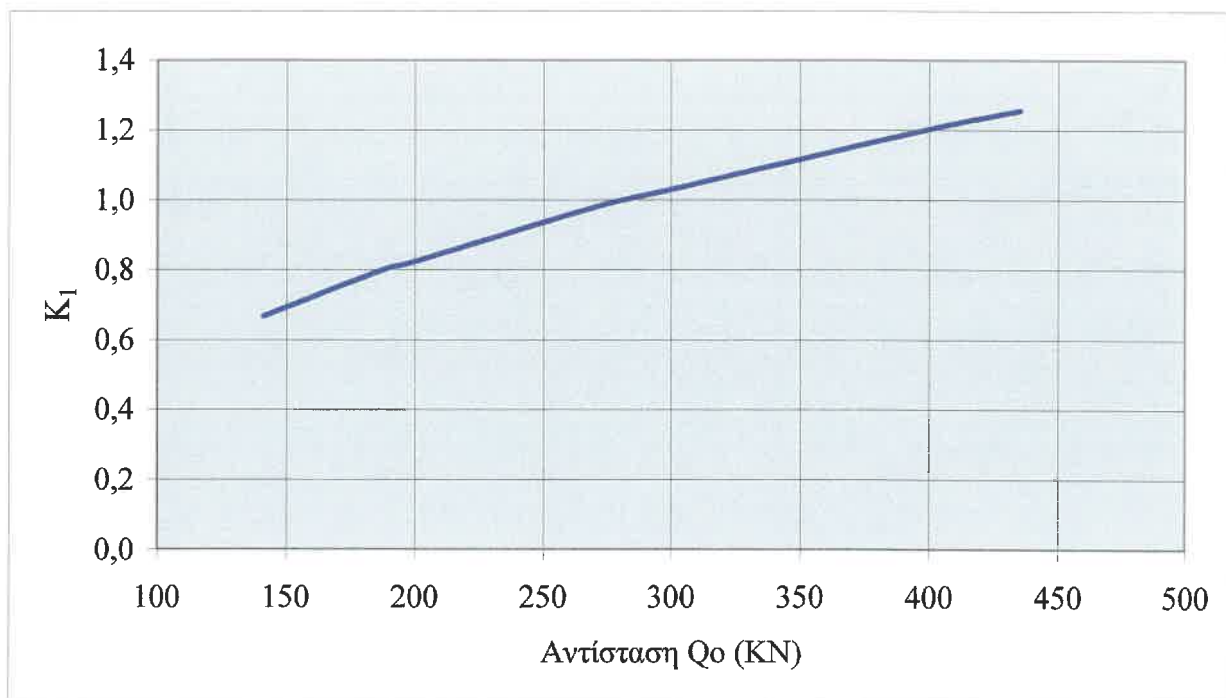
(*) Όπως αναφέρθηκε στην (61) υποτίθεται ότι η γραμμή περιέχει το αρχικό σφάλμα επιπεδότητας στην ουδέτερη κατάσταση. Αυτό το ελάττωμα χαρακτηρίζεται από το σφάλμα f_0 . Αυτό το σφάλμα θεωρείται ότι μπορεί να φτάσει τα 2 μμ για μια χορδή ίση με 10μ μήκος, που αντιστοιχεί σε κλίση:

$$i_0 = \frac{2f_0}{l_0} = \frac{2 \times 2}{1000} = 4\text{‰} \text{ (βλ. Σχήμα 40).}$$

ΜΕΘΟΔΟΙ

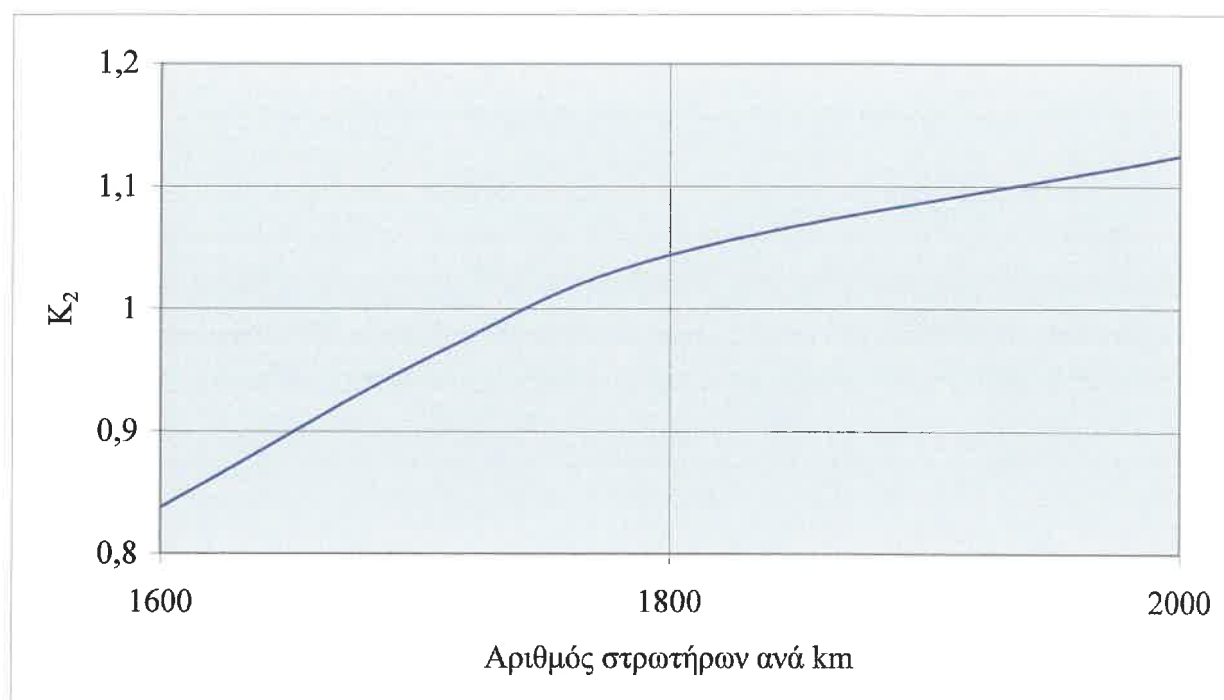
(**) Σαν πρώτη προσέγγιση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τιμές των παραμέτρων K_1 και K_3 για τους άλλους τύπους στρωτήρων:

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



Σχήμα 38
Τιμές συντελεστή K_1
Πηγή [4]

ΜΕΘΟΔΟΙ



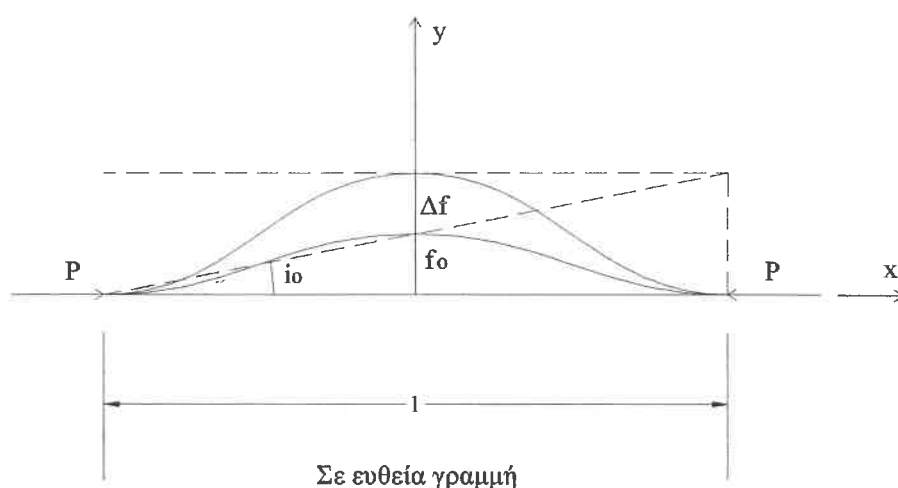
Σχήμα 39
Τιμές συντελεστή K_2
Πηγή [4]

Πίνακας 7:

Τιμές συντελεστών A_{cr} και a_{cr} της μεθόδου ZOBA

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

Πηγή [4]



Σχήμα 40

Παράσταση της κλίσης i_0 , της μεθόδου ZOBA (ποιοτικά)
[Λάγιου Μ.]

Τα θεωρητικά αποτελέσματα των ελαχίστων κρίσιμων θλιπτικών τάσεων που λαμβάνονται από τη σχέση (62) 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 σταθερότητας 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_a :

$$k_s = \frac{P_{cr}}{P_a} \quad (4) .$$

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

$$P_a = 2EaS\Delta t \quad (52), \text{ όπου}$$

E = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδ/χιάς ίσο με 20601 KN/εκ²

a = γραμμικός συντελεστής διαστολής του χάλυβα της γραμμής ίσο με 0,000011 ανά °C

$2F$ = επιφάνεια των δύο σιδ/χιών, σε εκ.²

Δt = 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 σταθερότητα 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 (4), και λαμβάνοντας σαν πρώτη προσέγγιση $K_s = 2$, λαμβάνουμε την επιτρεπτή θλιπτική τάση P_o :

$$P_o = \frac{P_{cr}}{2} \quad (63)$$

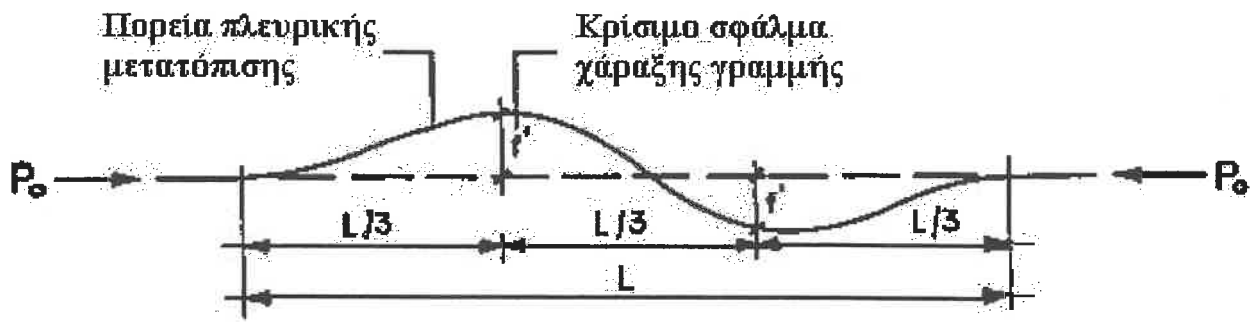
Η επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας Δt πάνω από τη θερμοκρασία τοποθέτησης της ΣΣΣ βρίσκεται από τη σχέση (58), ως εξής:

$$\Delta t = \frac{P_o}{2EaF} \quad (64)$$

IV. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

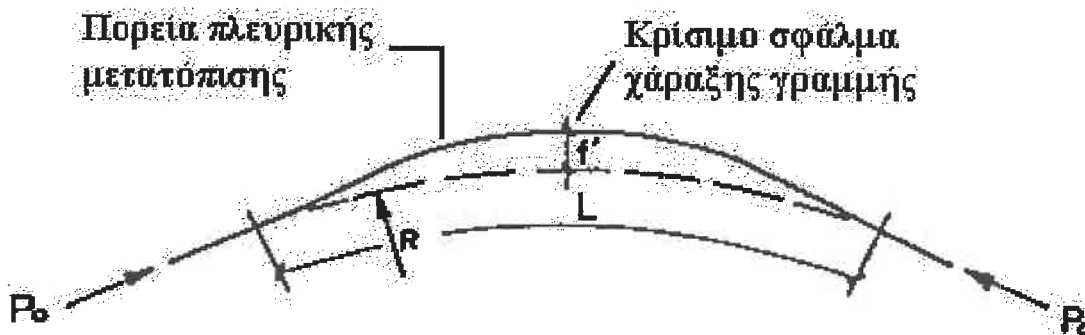
Στα παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο μέθοδοι του EISENMANN και του ZOBA, γίνεται εφαρμογή τους και τελικά συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους. Επίσης, επιχειρείται μια σύγκριση των μεγεθών που χρησιμοποιεί η κάθε μια μέθοδος για την περιγραφή των στοιχείων που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς.

1. ΜΕΘΟΔΟΣ EISENMANN



Σχήμα 33

Παραδοχή γραμμής κάμψης για ευθεία γραμμή
Πηγή [7]



Σχήμα 34

Παραδοχή γραμμής κάμψης για καμπύλη γραμμή
Πηγή [7]

α) Υποκατάστατη ροπή αδράνειας

Η ροπή αδράνειας για την εσχάρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_E = 2,5 \cdot 2 \cdot I_{yy} \quad (1),$$

όπου I_{yy} είναι η ροπή αδράνειας της μίας σιδηροτροχιάς ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Ο συντελεστής 2 προκύπτει για τις δύο σιδηροτροχιές και ο συντελεστής 2,5 αντιστοιχεί στην επιπλέον ακαμψία από τους συνδέσμους, που συνδέουν τις σιδηροτροχιές με τους στρωτήρες, δημιουργώντας έτσι την εσχάρα.

β) Υπολογισμός κινδύνου πλευρικής μετατόπισης

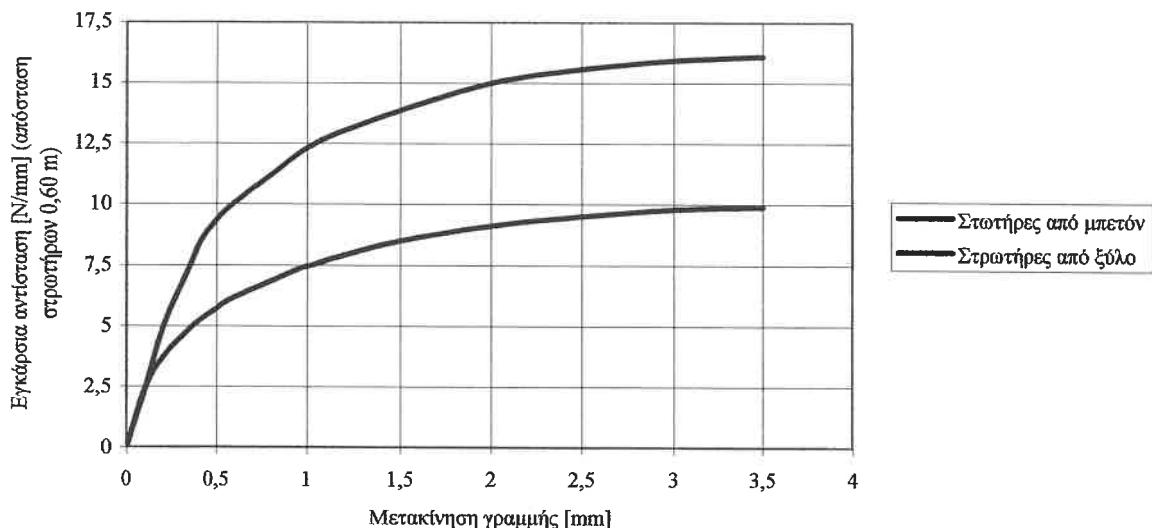
Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με την ενεργειακή μέθοδο του Meier.

γ) Ευθύγραμμη χάραξη

(1) Αρχικό σφάλμα

Επιθυμούμε τον υπολογισμό της κρίσιμης ανόδου της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία τοποθέτησης στην οποία προκύπτει κίνδυνος πλευρικής μετατόπισης. Υπολογίζεται με τη βοήθεια του υποθετικού αρχικού σφάλματος χάραξης της γραμμής f , το οποίο εξαρτάται από την κατάσταση της γραμμής. Συνήθως λαμβάνεται $f = 20mm$.

(2) Εγκάρσια αντίσταση τριβής ολίσθησης



Σχήμα 29

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

Πηγή [7]

Από το Σχήμα 29 προκύπτει η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης τριβής ολίσθησης ανά μήκος σιδηροτροχιάς w , ανάλογα με τον τύπο του στρωτήρα, την κυκλοφορία στη γραμμή και τη μετατόπιση των σιδηροτροχιών.

Η τιμή που προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, απομειώνεται με ένα συντελεστή 40-60%, ώστε από τη στατική τιμή να υπολογιστεί η δυναμική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης. Για ξύλινους στρωτήρες λαμβάνεται 5 N/mm και για στρωτήρες από μπετό 8 N/mm .

(3) Μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας – Κρίσιμη θλιπτική δύναμη

Αν t_v είναι η θερμοκρασία τοποθέτησης (ουδέτερη θερμοκρασία) και t_o η μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία, τότε στις ΣΣΣ είναι $\Delta t = t_o - t_v$. Από την Δt υπολογίζεται η κρίσιμη θλιπτική δύναμη στη σιδηροτροχιά:

$$P_o = \alpha \cdot E \cdot F_{(2)} \cdot \Delta t \quad (52)$$

όπου η $F_{(2)}$ είναι το συνολικό εμβαδόν των δύο σιδηροτροχιών ($F_{(2)} = 2 \times F_{\text{σιδηροτροχίας}}$).

(4) Μήκος σιδηροτροχιάς που μετακινείται

Το μήκος της σιδηροτροχιάς που μετακινείται υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}} \quad (53)$$

(5) Κρίσιμο σφάλμα γραμμής

Το κρίσιμο σφάλμα γραμμής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f' = 8,7w \frac{EI_E}{P_o^2} \quad (54)$$

(6) Κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας

Η κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας πάνω από το ουδέτερο σημείο t_v , στην οποία αρχίζει η πλευρική μετατόπιση, δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_E \cdot w}{\alpha^2 \cdot F_{(2)}^2 \cdot E \cdot f}} \quad (55)$$

(7) Συντελεστής ασφαλείας

Ο συντελεστής ασφαλείας για τον κίνδυνο πλευρικής μετατόπισης της γραμμής είναι:

$$k = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \geq 2 \quad (5)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας σε πλευρική μετατόπιση της γραμμής πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 2.

δ) Καμπύλη χάραξη

Στην καμπύλη ισχύει η υπόθεση για το αρχικό σφάλμα, όπως και για την ευθύγραμμη χάραξη, και οι τιμές της εγκάρσιας τριβής ολίσθησης w , της μέγιστης μεταβολής θερμοκρασίας Δt , της κρίσιμης θλιπτικής δύναμης P_0 και ο συντελεστής ασφαλείας είναι οι ίδιες.

(1) Μήκος σιδηροτροχιάς που μετακινείται

Το μήκος της σιδηροτροχιάς που μετακινείται στην καμπύλη χάραξη είναι (συντελεστής 2 αντί για 3!):

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_0}} \quad (56)$$

(2) Κρίσιμο σφάλμα της γραμμής

Το κρίσιμο σφάλμα της γραμμής για καμπύλη δίνεται από τον τύπο:

$$f' = \left(w - \frac{P_0}{R} \right) \frac{16EI_E}{P_0^2} \quad (57).$$

Στην περίπτωση που εμφανιστεί αρνητική τιμή για το f' , σημαίνει ότι η γραμμή εμφανίζει μεγάλη αντίσταση σε πλευρική μετατόπιση, ώστε να μην παρουσιάζεται σφάλμα σε αυτή. Η αρνητική τιμή προκύπτει όταν:

$$w - \frac{P_0}{R_{op}} = 0 \Rightarrow R_{op} = \frac{P_0}{w}.$$

(3) Κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας

Η κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας στην οποία εμφανίζεται πλευρική μετατόπιση είναι [7]:

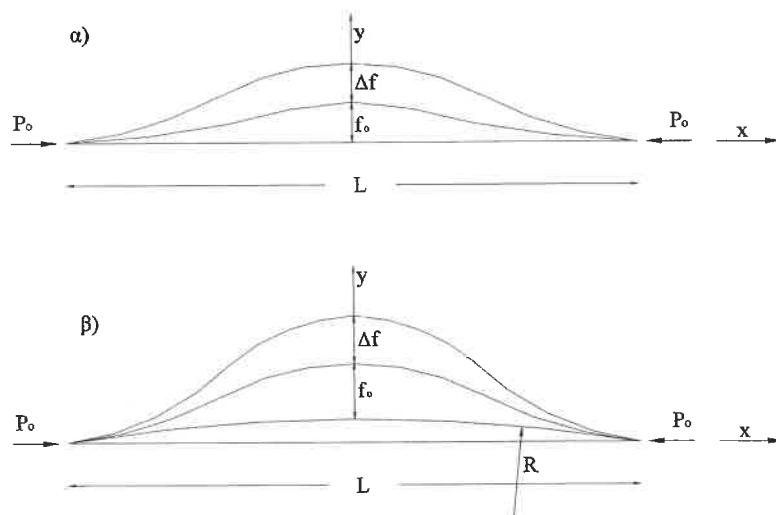
$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}R \cdot f} \right)^2 + \frac{16I_E w}{a^2 F_{(2)}^2 E f}} - \frac{8I_E}{aF_{(2)}R f} \quad (58)$$

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ZOBA

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

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:

$$P_{cr} = \frac{9,81 A_{cr}}{i_0^{a_{cr}}} K_1 K_2 K_3 \text{ σε KN (62)}$$



Σχήμα 37

Παραδοχή γραμμής κάμψης: μέθοδος ZOBA

α) για ευθεία γραμμή

β) για καμπύλη γραμμή

Πηγή [4]

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 7. Ο συντελεστής A_{cr} έχει διαστάσεις μάζας και δίνει τη δύναμη (σε kg) για κλίση 1‰ (σφάλμα 5mm στα 10m), $K_1=1,00$, $K_2=1,00$ (1722 στρωτήρες ανά χιλιόμετρο) και $K_3= 1,00$ (για συνδέσμους RN σε ξύλινους στρωτήρες). Με τον συντελεστή a_{cr} λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική επίδραση του αρχικού σφάλματος (κλίση i_0) στη γραμμή, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της οριζοντιογραφίας (ακτίνα R).

i_0 - η μέση κλίση του αρχικού ελαττώματος σε ουδέτερο επίπεδο

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

(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 2 μm για μια χορδή ίση με 10 μm μήκος, που αντιστοιχεί σε κλίση: $i_0 = \frac{2f_0}{l_0} = \frac{2 \times 20}{10000} = 4\text{‰}$) επίπεδο γραμμής, ίσο

με 4‰ (Σχήμα 40)

K_1, K_2, K_3 -συντελεστές που μετατρέπουν τα χαρακτηριστικά υπολογισμού στα χαρακτηριστικά αναφοράς (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 σύνδεσμοι για χαλύβδινους στρωτήρες: $K_3 = 0,9$). Οι τιμές των K_1 και K_2 προσδιορίζονται από τα διαγράμματα στα σχήματα 38 και 39. Επιπλέον το K_1 εξαρτάται από την αντίσταση Q_0 του στρωτήρα στην εγκάρσια μετακίνηση εντός του έρματος, για μετακίνηση ίση με 1 εκ (σχ.39, 40).

Για παράδειγμα, σε μια κανονική 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 του συνδέσμου 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 $K_3=1,15$).

Τα θεωρητικά αποτελέσματα των ελαχίστων κρίσιμων θλιπτικών τάσεων που λαμβάνονται από τη σχέση (62) ταιριάζουν με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στην Ιαπωνία με την μελέτη πλευρικής μετατόπισης στη μετρική γραμμή σε πρόσφατα στρωμένους ξύλινους στρωτήρες.

Για $i_0 < 1\text{‰}$, με άλλα λόγια στην θεωρητική περίπτωση απουσίας των αρχικών ελαττωμάτων σε ουδέτερη κατάσταση, οι ευθείες γραμμές βρίσκονται σε μια κατάσταση απόλυτης σταθερότητας κάτω από φυσιολογικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, όταν το i_0 , τείνει στο μηδέν, το P_{cr} τείνει σε ιδιαίτερα μεγάλες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

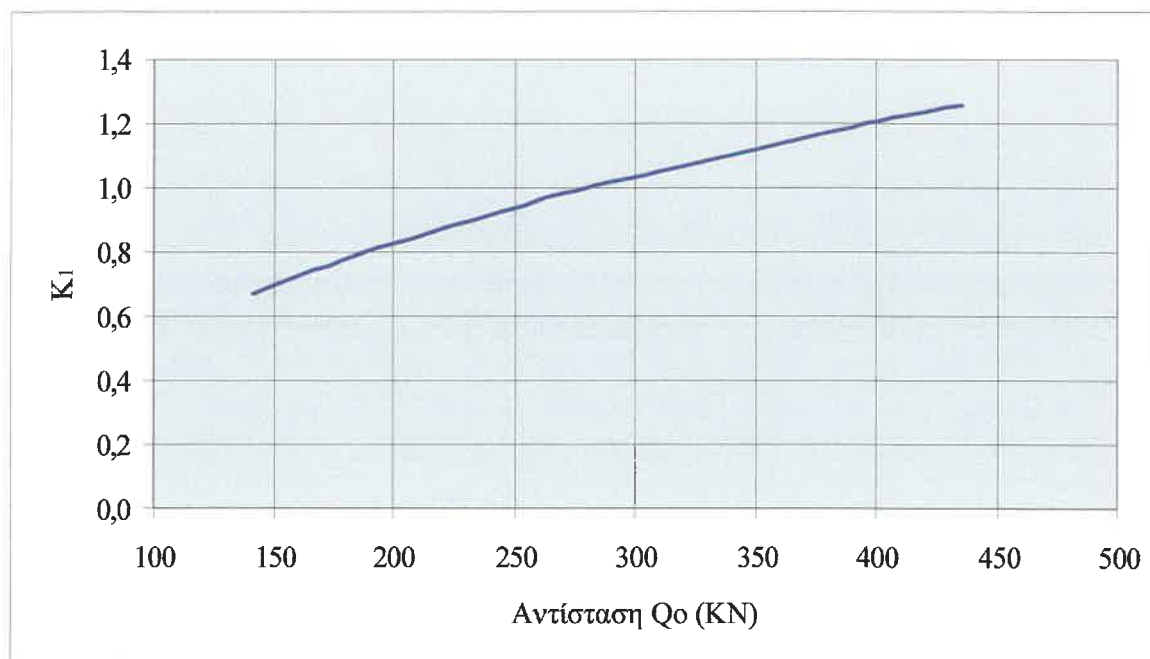
Πίνακας 7

Τιμές συντελεστών A_{cr} και a_{cr} της μεθόδου ZOBA

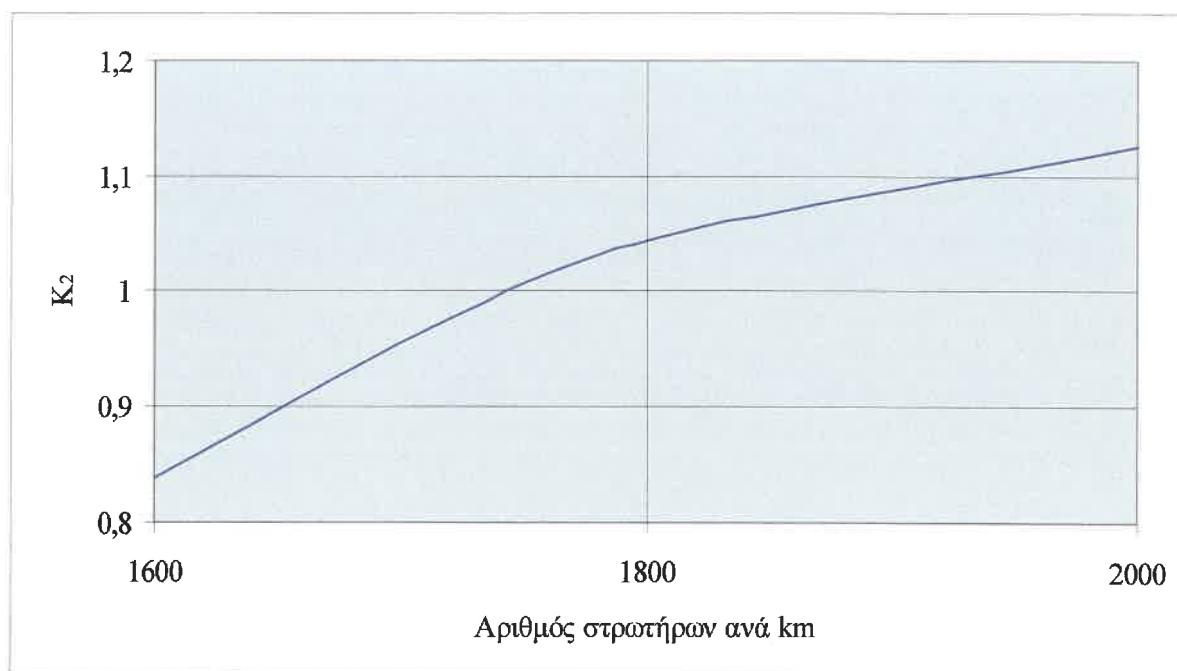
Ακτίνα καμπύλης(m)	S30 (30kg/m)		S40 (36kg/m)		U33 (46kg/m)		U36(50kg/m)	
	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}	A_{cr}	a_{cr}
150	85	0,156	91	0,147	100	0,143	105	0,125
200	100	0,198	106	0,178	117	0,165	120	0,155
300	121	0,251	131	0,235	144	0,210	151	0,199
500	150	0,316	162	0,299	181	0,276	192	0,264
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

Πηγή [4]

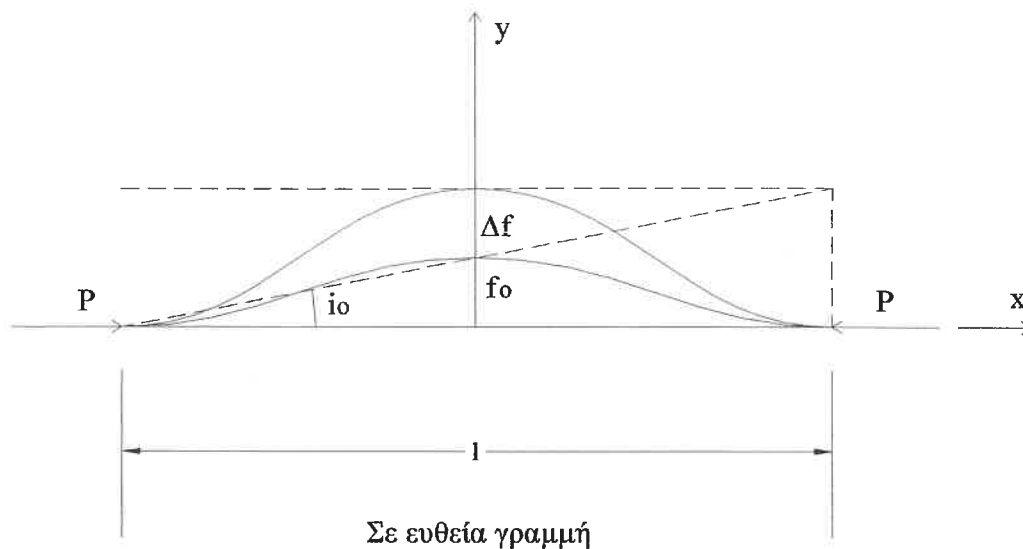
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA



Σχήμα 38
Τιμές συντελεστή K_1
Πηγή [4]



Σχήμα 39
Τιμές συντελεστή K_2
Πηγή [4]



Σχήμα 40

Παράσταση της κλίσης i_0 , της μεθόδου ZOBA (ποιοτικά)
[Λάγιου Μ.]

(3) Υπολογισμός της σταθερότητας της γραμμής

Ο υπολογισμός της σταθερότητας 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 στη γραμμή από τη θερμοκρασία P_0 :

$$k_s = \frac{P_{cr}}{P_0} \quad (4).$$

Η επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από θερμοκρασία P_0 καθορίζεται από την παρακάτω κλασσική σχέση:

$$P_0 = 2Ea\Delta t \quad (52), \text{ όπου}$$

E = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα της σιδηροτροχιάς ίσο με 21000 KN/cm^2

a = γραμμικός συντελεστής διαστολής του χάλυβα της γραμμής ίσο με $0,000015 \text{ ανά } ^\circ\text{C}$

$2F$ = επιφάνεια των δύο σιδηροτροχιών, σε cm^2

Δt = διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με την ουδέτερη θερμοκρασία (θερμοκρασία αμφίδεσης της ΣΣΣ), σε $^\circ\text{C}$

Η γραμμή θεωρείται «θερμικά» σταθερή όταν ο K_s είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 2 [4].

3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Εξετάζεται η περίπτωση ενός τμήματος γραμμής, το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- σιδηροτροχιές U33 (βάρος 46,30 kg/m, επιφάνεια 59,30 cm², εγκάρσια ακαμψία 7,23 × 10⁶ KN/cm²)
- ξύλινοι στρωτήρες
- μέση απόσταση στρωτήρων 1722 στρ/χμ
- PANDROL σύνδεσμοι
- σταθερή διατομή έρματος
- θερμοκρασία τοποθέτησης : 45K
- μέγιστη θερμοκρασία : 60K
- ακτίνα γραμμής 300μ

α) Μέθοδος EISENMANN

(1) Ροπή αδράνειας σιδηροτροχιάς

Είναι $E \cdot I_{yy} = 7,23 \times 10^6 \text{ kN} \times \text{cm}^2 = 7,23 \times 10^6 \times 10^3 \times 10^2 = 7,23 \times 10^{11} \text{ N} \times \text{mm}^2$.

Αρα $I_{yy} = 7,23 \times 10^{11} / (2,1 \times 10^5) \text{ mm}^4 = 344,3 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

(2) Εμβαδόν υπολογισμών

Είναι $F_{(1)} = 59,30 \text{ cm}^2 = 5930 \text{ mm}^2$.

Αρα για τις δύο σιδηροτροχιές $F_{(2)} = 2 \times 5930 \text{ mm}^2 = 11860 \text{ mm}^2$.

(3) Αρχικό σφάλμα

Υποθέτουμε ότι για τις δύο σιδηροτροχιές $f=20\text{mm}$.

(4) Υποκατάσταση ροπή αδράνειας (εσχάρας)

$I_E = 2,5 \times 2 \times 351 \times 10^4 \text{ mm}^4 = 1755 \times 10^4 \text{ mm}^4$

(5) Αντίσταση τριβής ολίσθησης

Η τιμή της αντίστασης w για ξύλινους στρωτήρες, για μετατόπιση 2 mm και μετά από κυκλοφορία κάποιων τόνων (3 ημερών) λαμβάνεται: $w = 5 \text{ N/mm}$.

(6) Μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας – Κρίσιμη θλιπτική δύναμη

Είναι η διαφορά της μέγιστης εμφανιζόμενης θερμοκρασίας από την ουδέτερη θερμοκρασία:

$\Delta t = t_o - t = 60 - 45 = 15^\circ\text{C}$.

Είναι: $P_0 = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F_{(2)} = 1,15 \times 10^{-5} \times 15 \times 2,1 \times 10^5 \times 11860 \text{ N} = 430 \text{ KN}$

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

(7) Μήκος σιδηροτροχιάς που εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση

$$\text{Είναι: } L = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_o}} = 2\pi \sqrt{\frac{2 \times 2,1 \times 10^5 \times 1755 \times 10^4}{430000}} \text{ mm} = 26,00 \text{ m.}$$

(8) Κρίσιμο σφάλμα για πλευρική μετατόπιση

$$f' = \left(w - \frac{P_o}{R} \right) \frac{16EI_E}{P_o^2} \Rightarrow f' = \left(5 - \frac{430000}{300000} \right) \frac{16 \times 2,1 \times 10^5 \times 1755 \times 10^4}{430000^2} \text{ mm} = 1137,5 \text{ mm}$$

(9) Κρίσιμη άνοδος της θερμοκρασίας

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}R_1f} \right)^2 + \frac{16I_E w}{a^2 F_{(2)}^2 E f} - \frac{8I_E}{aF_{(2)}R_1f}}$$

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8 \times 1755 \times 10^4}{1,15 \times 10^{-5} \times 11860 \times 300000 \times 20} \right)^2 + \frac{16 \times 1755 \times 10^4 \times 5}{(1,15 \times 10^{-5})^2 \times 11860^2 \times 2,1 \times 10^5 \times 20} - \frac{8 \times 1755 \times 10^4}{1,15 \times 10^{-5} \times 11860 \times 300000 \times 20}}$$

$$\Rightarrow \Delta t_{krit} = 46,16^\circ \text{C}$$

(10) Συντελεστής ασφάλειας

$$k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \geq 2 \Rightarrow k_s = \frac{46,16}{15} = 3,1 > 2 \Rightarrow \text{Η γραμμή δεν κινδυνεύει από πλευρική μετατόπιση.}$$

β) Μέθοδος ZOBA

(1) Διαφορά θερμοκρασίας

Η διαφορά θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία τοποθετήσεως της ΣΣΣ είναι : $\Delta t = 60 - 45 = 15^\circ$.

(2) Επιτρεπόμενη θλιπτική τάση

Η επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από θερμοκρασία είναι, σύμφωνα με τη σχέση 52, ίση με:

$$P_o = 2Ea\Delta t = 2 \times 2,1 \times 10^5 \times 1,15 \times 10^{-5} \times 5930 \times 15 = 430 \text{ KN για τις τάσεις των δύο σιδηροτροχιών.}$$

(3) Κρίσιμη θλιπτική τάση

Για U33 και R=300m: $A_{cr} = 144$ και $a_{cr} = 0,21$. Επιπλέον, $K_1 = 1,0$ (σταθερή διατομή έρματος), $K_2 = 1,0$ (απόσταση στρωτήρων: 1722 στρ./χμ.), $K_3 = 0,92$ (PANDROL αμφιδέτες), συνεπώς:

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

(3) Κρίσιμη θλιπτική τάση

Για U33 και $R=300m$: $A_{cr} = 144$ και $a_{cr} = 0,21$. Επιπλέον, $K_1 = 1,0$ (σταθερή διατομή έρματος), $K_2 = 1,0$ (απόσταση στρωτήρων: 1722 στρ./χμ.), $K_3 = 0,92$ (PANDROL αμφιδέτες), συνεπώς:

$$P_{cr} = \frac{9,81 A_{cr}}{i_0^{a_{cr}}} K_1 K_2 K_3 = \frac{9,81 \times 144}{4^{0,21}} 1,0 \times 1,0 \times 0,92 = 971 \text{ KN}.$$

(4) Συντελεστής ασφάλειας

$$k_s = \frac{971}{430} = 2,3.$$

Ο συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος από δύο. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι ΣΣΣ είναι θερμικά σταθερές.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

α). Εφαρμογή μεθόδων για στρωτήρες από σκυρόδεμα σε διάφορους τύπους σιδηροτροχιάς

Στα παρακάτω υπολογίζονται τα κρίσιμα μεγέθη, που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους, για διάφορες σιδηροτροχιές και τιμές αντιστάσεων. Ως δεδομένα λαμβάνεται η θερμοκρασία τοποθέτησης $t_v = 45^\circ C$ και η μέγιστη πιθανή θερμοκρασία $t_o = 60^\circ C$, το ελάττωμα γραμμής, $f = 20mm$ και $i_o = 4\%$, για τις δύο μεθόδους και η οριζοντιογραφική ακτίνα $R = 200000mm$. Επίσης, λαμβάνεται απόσταση μεταξύ στρωτήρων ίση με 1722 στρωτήρες ανά χιλιόμετρο ($K_2 = 1,00$). Ο υπολογισμός γίνεται για σιδηροτροχιές S30, S40, U33 και U36, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 1, και για στρωτήρες από σκυρόδεμα χωρίς πλευρικά εξασφαλιστικά και με πλευρικά εξασφαλιστικά για κάθε στρωτήρα, ανά δύο και ανά τρεις στρωτήρες. Η εγκάρσια αντίσταση για στρωτήρες από σκυρόδεμα είναι: $w = 8,0N/mm^2$ (από Σχήμα 29 είναι η στατική τιμή της $w = 15,0N/mm^2$ και η δυναμική, απομειωμένη τιμή είναι: $w = 15,0 \times (40\% \sim 60\%) = 8,0N/mm^2$) και το $K_1 = 1,40$. Στον Πίνακα 8 φαίνεται η αύξηση της τιμής της εγκάρσιας αντίστασης w με τη δράση των πλευρικών εξασφαλιστικών. Για χρήση συνδέσμων Sk1 το K_3 λαμβάνει την τιμή 1,15. Τέλος, για ακτίνα $R = 200m = 200000mm$, τα A_{cr} και a_{cr} της μεθόδου του ZOBA, για κάθε τύπο σιδηροτροχιάς φαίνονται στον Πίνακα 9.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

Πίνακας 1:

Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών

Τύπος σιδηροτροχιάς	Βάρος σιδηροτροχιάς (kg/m)	Εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς (mm ²)	Ροπή αδράνειας διατομής σιδηροτροχιάς (mm ⁴)
S30	30,00	3645	132×10 ⁴
S40	36,54	4655	200×10 ⁴
U33	46,30	5930	351×10 ⁴
U36	50,56	6450	420×10 ⁴

Πηγή [4]

Πίνακας 8:

Τιμή της w , ανάλογα με την τοποθέτηση των πλευρικών εξασφαλιστικών

Κατάσταση:	Χωρίς πλευρικά εξασφαλιστικά	Πλευρικά εξασφαλιστικά για κάθε στρωτήρα	Πλευρικά εξασφαλιστικά για κάθε δεύτερο στρωτήρα	Πλευρικά εξασφαλιστικά για κάθε τρίτο στρωτήρα
% αύξηση	-	20%	40%	90%
$w(N/mm)$	8	9,6	11,2	15,2
K_1	1,40	1,68	1,96	2,66

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 9:

Τιμές των A_{cr} και a_{cr} , ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και για ακτίνα

$R = 200m$

	S30	S40	U33	U36
A_{cr}	100	106	117	120
a_{cr}	0,198	0,178	0,165	0,155

Πηγή [4]

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA

Οι υπολογισμοί για κάθε μέθοδο έγιναν στο Excel και τα αποτελέσματα παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 10:

$\Delta t_{krit} [^{\circ}C]$, για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών κατά EISENMANN

Τύπος σιδηροτροχιών $w(N/mm)$	S30	S40	U33	U36
8	69,82	61,15	50,84	47,39
9,6	81,26	71,65	60,03	56,08
11,2	92,16	81,74	68,97	64,55
15,2	117,47	105,45	90,30	84,86

[Λάγιου Μ.]

$$* \quad \Delta t_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}R \cdot f}\right)^2 + \frac{16I_E w}{a^2 F_{(2)}^2 E f} - \frac{8I_E}{aF_{(2)}R f}} \quad (58),$$

με $I_E = 2 \times 2,5 \times I_{yy}$ και I_{yy} όπως δίνεται από Πίνακα 8, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς,

$F_{(2)} = 2 \times F$ και F : όπως δίνεται από Πίνακα 8, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς,

$$a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$$

$$R = 200000 mm$$

$$f = 20 mm$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 N/mm^2$$

Πίνακας 11:

 P_{cr} [KN] και Δt_{cr} [°C], για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών κατά ZOBA

Τύπος σιδ/χιάς	S30		S40		U33		U36	
K_1	P_{cr} [KN]	Δt_{cr} [°C]	P_{cr} [KN]	Δt_{cr} [°C]	P_{cr} [KN]	Δt_{cr} [°C]	P_{cr} [KN]	Δt_{cr} [°C]
1,40	1200,29	64,63	1308,08	58,18	1470,08	51,33	1528,82	49,07
1,68	1440,35	77,56	1569,70	69,82	1764,10	61,59	1834,59	58,89
1,96	1680,41	90,48	1831,31	81,48	2058,11	71,86	2140,35	68,70
2,66	2280,56	122,80	2485,35	110,54	2793,15	97,52	2904,76	93,24

[Λάγιου Μ.]

$$* P_{cr} = \frac{9,81 A_{cr}}{i_0^2} K_1 K_2 K_3 \quad (67) \text{ και } \Delta t_{cr} = \frac{P_{cr}}{a \cdot E \cdot F_{(2)}} \quad (69), \text{ με}$$

$$a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^\circ\text{C}],$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2,$$

με A_{cr} και a_{cr} , από Πίνακα 10, για $R=200m$, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς,

$F_{(2)}=2 \times F$ και F : όπως δίνεται από Πίνακα 8, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς,

$$K_1 = 1,40$$

$$K_2 = 1,00$$

$$K_3 = 1,15$$

(Θεωρείται αντίστοιχη αύξηση του συντελεστή K_1 , όπως και στη μέθοδο του EISENMANN. Έτσι, ο συντελεστής αυξάνεται κατά 20%- $1,2 \times 1,4=1,68$ -, 40%- $1,4 \times 1,4=1,96$ - και 90%- $1,9 \times 1,4=2,66$ -, για πλευρικά εξασφαλιστικά)

Στον Πίνακα 12 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις δύο μεθόδους.

Πίνακας 13:

Συντελεστής ασφαλείας για τις δύο μεθόδους $k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$ ή $k_s = \frac{\Delta t_{cr}}{\Delta t}$

Τύπος σιδηροτροχιάς w (N/mm)/ K ₁	k _s							
	S30		S40		U33		U36	
	I	II	I	II	I	II	I	II
8,0/1,40	4,96	4,31	4,08	3,88	3,39	3,42	3,16	3,27
9,6/1,68	5,42	5,17	4,78	4,65	4,00	4,11	3,74	3,93
11,2/1,96	6,14	6,03	5,45	5,43	4,60	4,79	4,30	4,58
15,2/2,66	7,83	8,19	7,03	7,37	6,02	6,50	5,66	6,22

* Δt_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά EISENMANN όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 11, για $R = 200m$ και $f = 20mm$,

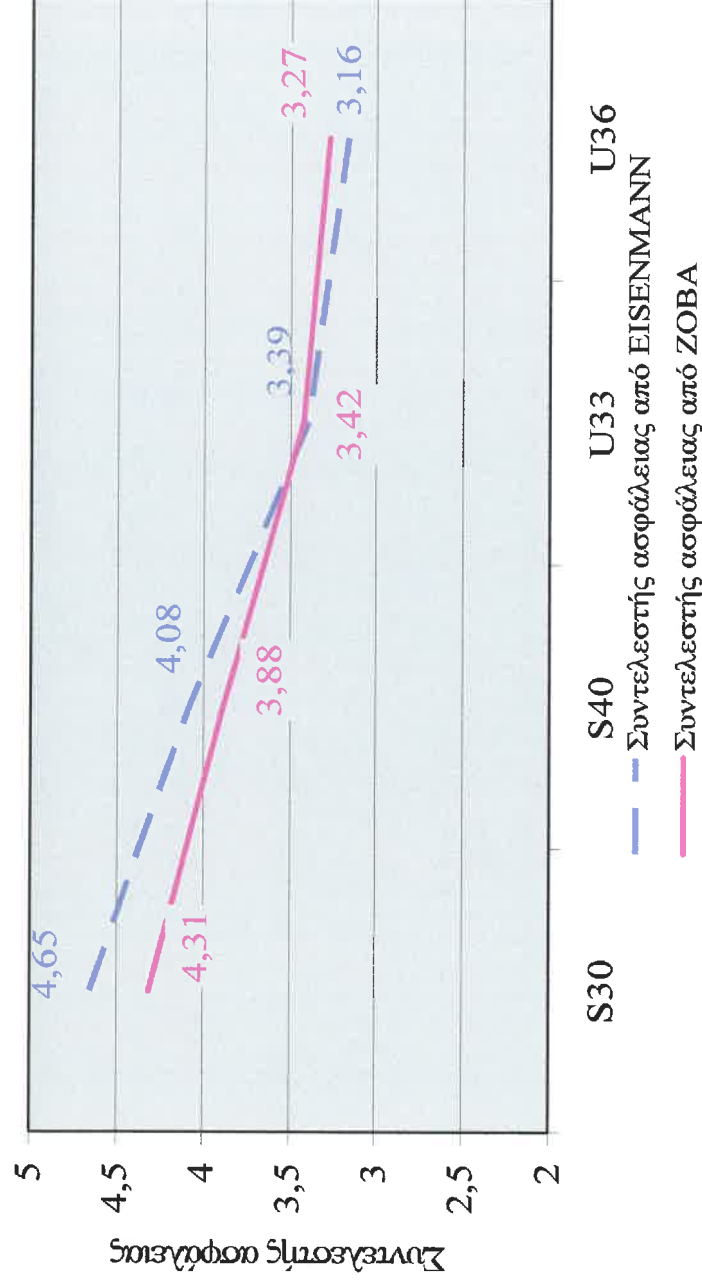
Δt_{cr} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά ZOBA όπως υπολογίστηκε από Πίνακα 12, για $R = 200m$ και $i_o = 4\%$,

$\Delta t = 15^\circ C$: αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας.

- I. συντελεστής EISENMANN
- II. συντελεστής ZOBA
- [Λάγιου Μ.]

Σχήμα 41

Σύγκριση μεθόδων: γραμμή χωρίς πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια (εγκάρσια αντίσταση $w=8\text{N/mm}$, $K_1=1,40$)

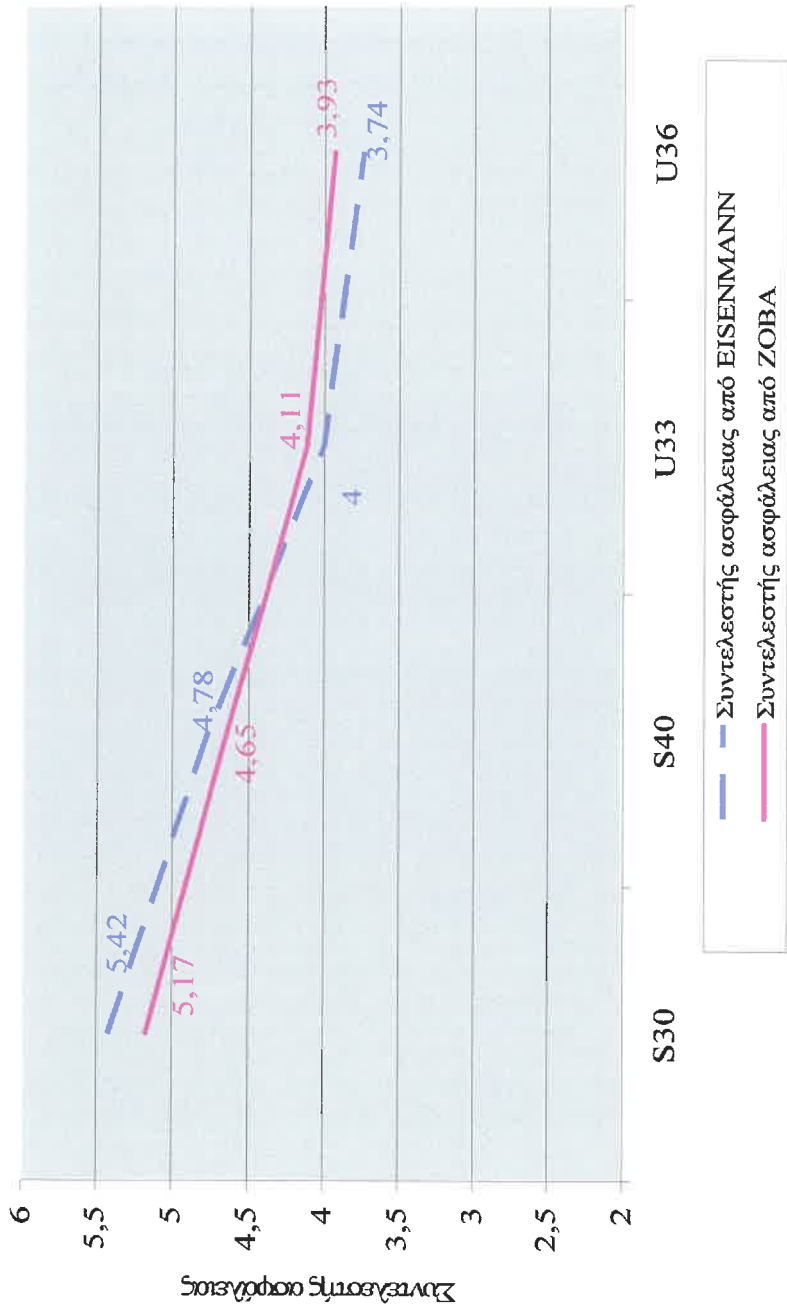


[Λάγιου Μ.]

$k_S = \frac{\Delta T_{krit}}{\Delta T}$ ή $k_S = \frac{\Delta T_{cr}}{\Delta T}$, με ΔT_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά EISENMANN όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 11, για $R = 200m$ και $f = 20mm$, ΔT_{cr} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά ZOBA όπως υπολογίστηκε από Πίνακα 12, για $R = 200m$ και $i_o = 4\%$, $\Delta T = 15^\circ C$: αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας.

Σχήμα 42

Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια ανά 3 στρωτήρες (εγκάρσια αντίσταση $w=9,6\text{N/mm}$, $K_2=1,68$)

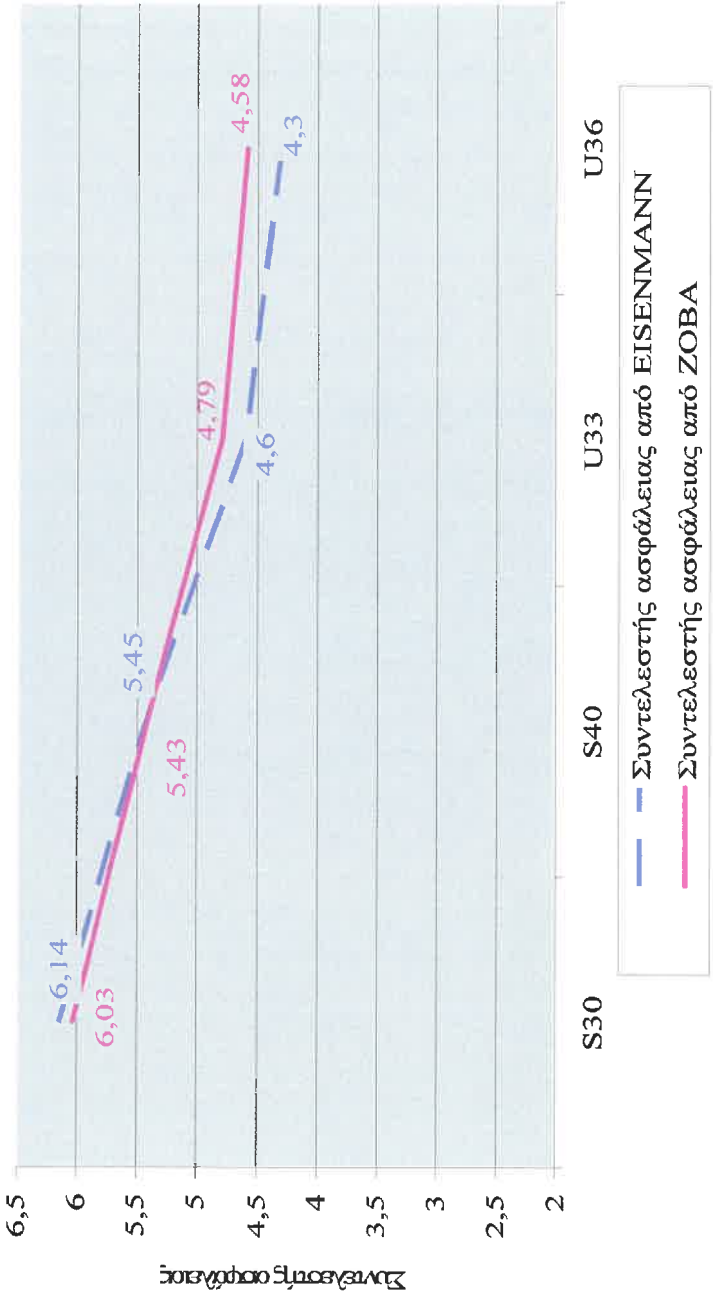


$k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$ ή $k_s = \frac{\Delta t_{cr}}{\Delta t}$, με Δt_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά EISENMANN όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 11, για $R = 200m$ και $f = 20mm$, Δt_{cr} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά ZOBA όπως υπολογίστηκε από Πίνακα 12, για $R = 200m$ και $i_o = 4\%$, $\Delta t = 15^\circ C$: αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας.

[Δάγιου Μ.]

Σχημα 43

Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια ανά 2 στρώτρες (εγκάρσια αντίσταση $w=11,2\text{N/mm}$, $K_2=1,96$)



$k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$ ή $k_s = \frac{\Delta t_{cr}}{\Delta t}$, με Δt_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά EISENMANN όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 11, για $R = 200m$ και $f = 20mm$, Δt_{cr} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά ZOBA όπως υπολογίστηκε από Πίνακα 12, για $R = 200m$ και $i_o = 4\text{‰}$, $\Delta t = 15^\circ C$: αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας.

[Λόγιου Μ.]

Σχήμα 44

Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια σε κάθε στρωτήρα (εγκάρσια αντίσταση $w=15,2\text{N/mm}$, $K_2=2,66$)



[Λάγιου Μ.]

$k_S = \frac{\Delta T_{krit}}{\Delta t}$ ή $k_S = \frac{\Delta T_{cr}}{\Delta t}$, με ΔT_{krit} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά EISENMANN όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 11, για $R = 200m$ και $f = 20mm$, ΔT_{cr} : κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας κατά ZOBA όπως υπολογίστηκε από Πίνακα 12, για $R = 200m$ και $i_o = 4\%$, $\Delta t = 15^{\circ}C$: αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας.

Με την σύγκριση του συντελεστή ασφάλειας που προκύπτει από τη μέθοδο του EISENMANN με τον συντελεστή ασφάλειας από τη μέθοδο του ZOBA, και όπως φαίνεται από τους Πίνακες 10, 11 και 12 και τα σχήματα 41, 42, 43, 44 δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των δύο μεθόδων. Δεδομένου ότι και οι δύο μέθοδοι στηρίζονται σε κάποιες παραδοχές και καμία από αυτές δεν είναι απολύτως ακριβής, είναι λογική η ύπαρξη απόκλισης στις τιμές τους.

Ενδιαφέρον προκαλεί η παρατήρηση, ότι ενώ ο συντελεστής ασφάλειας (αντίστοιχα οι κρίσιμες θερμοκρασίες) μειώνεται με την αύξηση των διαστάσεων της διατομής της σιδηροτροχιάς στη μέθοδο του EISENMANN, στην αντίστοιχη του ZOBA, ο συντελεστής αυξάνεται. Η πιθανή εξήγηση βρίσκεται στο γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ακαμψίας και γενικότερα των διαστάσεων της σιδηροτροχιάς με διαφορετικό τρόπο. Προφανώς και για τις δύο μεθόδους, ο συντελεστής ασφάλειας αυξάνεται με την αύξηση της εγκάρσιας αντίστασης. Όσο αυξάνεται η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης και οι διαστάσεις της σιδηροτροχιάς, ο EISENMANN υπολογίζει ένα πιο συντηρητικό συντελεστή, σε σχέση με τον αντίστοιχο του ZOBA.

Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του 2 και για τις δύο μεθόδους, παρόλο που πρόκειται για καμπύλη γραμμή. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι στρωτήρες από μπετό δίνουν μεγαλύτερη εγκάρσια αντίσταση από τους αντίστοιχους από ξύλο. Το γεγονός ότι όσος αυξάνει η εγκάρσια αντίσταση τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής, γίνεται φανερό και από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 40, 41, 42, 43, όπου με την προσθήκη πτερυγίων, η αύξηση του συντελεστή είναι πολύ μεγάλη. Εξάλλου, η μεταβολή της θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης είναι πολύ μικρή (μόνο 15°C), συνεπώς οι δυνάμεις που εμφανίζονται στις σιδηροτροχιές και αντιστοιχούν σε αυτή τη μικρή μεταβολή θερμοκρασίας είναι μειωμένες. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίστηκαν να είναι πολύ μεγαλύτεροι του δύο και προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο γραμμές είναι υπερδιαστασιοποιημένες.

β) Σύγκριση μεθόδων

Η μέθοδος EISENMANN [7] στηρίζεται στις σχέσεις που προέκυψαν από την ενεργειακή μέθοδο του MEIER, ενώ η μέθοδος ZOBA [4] χρησιμοποιεί μια εμπειρική σχέση, ως πιο πρακτική, σε αντικατάσταση μιας θεωρητικής, δύσχρηστης σχέσης. Η μέθοδός του αφορά στον υπολογισμό για μετρική γραμμή, σε αντίθεση με τη γερμανική που είναι γενική.

Η πρώτη θεωρεί τη διαφοροποιημένη από τη διπλάσια ροπή αδράνειας σιδηροτροχιάς, υποκατάστατη ροπή αδράνειας, πολλαπλασιάζοντας με ένα συντελεστή 2,5, που λαμβάνει υπόψη και την αντίσταση (αδράνεια) που προσφέρουν οι σύνδεσμοι σιδηροτροχιάς στην εσχάρα. Επίσης, λαμβάνει τιμές για την εγκάρσια αντίσταση τριβής ολίσθησης από πειραματικές μετρήσεις και τους πίνακες που προέκυψαν από αυτές. Υποθέτει μια αρχική τιμή σφάλματος και με δεδομένες τη θερμοκρασία τοποθέτησης και τη μέγιστη θερμοκρασία υπολογίζει, μέσω της κρίσιμης θλιπτικής δύναμης το μήκος σιδηροτροχιάς που μετακινείται, το κρίσιμο σφάλμα γραμμής και την κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας, στην οποία εμφανίζεται πλευρική

μετατόπιση, και τελικά το συντελεστή ασφάλειας. Ο τελευταίος προκύπτει ως λόγος της κρίσιμης μεταβολής θερμοκρασίας προς τη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας και ορίζεται ότι πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 2.

Η μέθοδος του ZOBA (στην πρακτική μέθοδο) υπολογίζει την επιτρεπόμενη θλιπτική τάση στις δύο σιδηροτροχιές από θερμοκρασία, που προκύπτει ως γινόμενο της μεταβολής θερμοκρασίας, από τη θερμοκρασία τοποθέτησης στη μέγιστη θερμοκρασία και ανάλογα με το διπλάσιο εμβαδόν διατομής της σιδηροτροχιάς. Στη συνέχεια, υπολογίζει την ελάχιστη κρίσιμη θλιπτική δύναμη, με βάση κάποιους συντελεστές, οι οποίοι δίνονται από πίνακα (Πίνακας 7), ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και την χάραξη (ακτίνα καμπύλης ή για ευθεία) και λαμβάνει υπόψη τη μέση κλίση αρχικού σφάλματος, η οποία, αρχικά θεωρείται σταθερή. Ο συντελεστής A_{cr} έχει διαστάσεις μάζας και δίνει τη δύναμη (σε kg) για κλίση 1‰ (σφάλμα 5mm στα 10m), $K_1=1,00$, $K_2=1,00$ (1722 στρωτήρες ανά χιλιόμετρο) και $K_3=1,00$ (για συνδέσμους RN σε ξύλινους στρωτήρες). Με τον συντελεστή a_{cr} λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική επίδραση του αρχικού σφάλματος (κλίση i_o) στη γραμμή, ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της οριζοντιογραφίας (ακτίνα R). Τέλος υπολογίζει κάποιους συντελεστές, οι οποίοι αφορούν στα επιμέρους στοιχεία της επιδομής (τύπο στρωτήρων, μέση απόστασή τους, διατομή έρματος, τύπο συνδέσμου). Ο συντελεστής ασφάλειας προκύπτει ως λόγος της ελάχιστης κρίσιμης θλιπτικής δύναμης προς την επιτρεπόμενη θλιπτική δύναμη από θερμοκρασία και ορίζεται και εδώ να είναι μεγαλύτερος από δύο.

Όπως αναφέρεται στο [4], συνήθως το ζητούμενο δεν είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφάλειας, με δεδομένη την θερμοκρασία τοποθέτησης, αλλά το αντίστροφο: με δεδομένο τον συντελεστή ασφάλειας (όχι μικρότερος από 2), ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας τοποθέτησης της σιδηροτροχιάς.

(1) Ροπή αδράνειας

Ο EISENMANN, όπως αναφέρθηκε, λαμβάνει υπόψη την ακαμψία που δίνουν στην εσχάρα οι σύνδεσμοι στρωτήρων – σιδηροτροχιάς κατά τον υπολογισμό της ισοδύναμης ροπής αδράνειας [7], ενώ αυτή του ZOBA θεωρεί ως ροπή αδράνειας τη ροπή αδράνειας ως προς τον κατακόρυφο άξονα των δύο σιδηροτροχιών. Στην τελευταία, η επίδραση των συνδέσμων λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός συντελεστή προσαύξησης (συντελεστής K_3) [4].

(2) Αρχικό σφάλμα

Ο EISENMANN, θεωρεί ένα αρχικό σφάλμα χάραξης γραμμής, μέσω του οποίου υπολογίζεται η κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας στην οποία προκύπτει η πλευρική μετατόπιση. Το αρχικό σφάλμα λαμβάνεται ίσο με 20mm [7]. Στη μέθοδο του ZOBA, αντί για το αρχικό σφάλμα, χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς η αδιάστατη μέση κλίση του αρχικού ελαττώματος, η οποία λαμβάνεται ίση με 4‰, δηλαδή θεωρείται ότι σε μια χορδή 10m μήκους, αντιστοιχεί αρχικό σφάλμα 2mm. Η μέση αυτή κλίση θεωρείται στο ουδέτερο επίπεδο γραμμής (υποτίθεται ότι η γραμμή περιέχει το αρχικό σφάλμα επιπεδότητας στην ουδέτερη κατάσταση) και γι' αυτό στη

συνέχεια διορθώνεται με κατάλληλο συντελεστή, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της οριζοντιογραφικής χάραξης και από τον τύπο της σιδηροτροχιάς (a_{cr}) [4].

(3) Εγκάρσια αντίσταση τριβής ολίσθησης

Στην πρώτη μέθοδο, λαμβάνεται τιμή για αυτή την αντίσταση από πίνακες που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις, για διάφορους τύπους στρωτήρων, για διάφορες φάσεις φόρτισης της σιδηροτροχιάς και για ορισμένη μετακίνησή της [7]. Στη δεύτερη μέθοδο, τα ιδιαίτερα στοιχεία που συνθέτουν την επιδομή και επηρεάζουν την εγκάρσια αντίσταση τριβής ολίσθησης λαμβάνονται υπόψη μέσω των προσαυξητικών συντελεστών K_1 (ανάλογα με τύπο στρωτήρα), K_2 (ανάλογα με μέση απόσταση στρωτήρων) και K_3 (ανάλογα με τύπο συνδέσμου). Στη μέθοδο του ZOBA, γίνεται η υπόθεση δύο περιοχών για την εγκάρσια αντίσταση: μιας ελαστικής και μιας πλαστικής [4] (σε αντίθεση με αυτή του EISENMANN, που υποθέτει μια σταθερή αντίσταση ίση με την τιμή που λαμβάνει για μετακίνηση μεγαλύτερη από 2mm). Αυτά φαίνονται στα σχήματα 29 και 35.

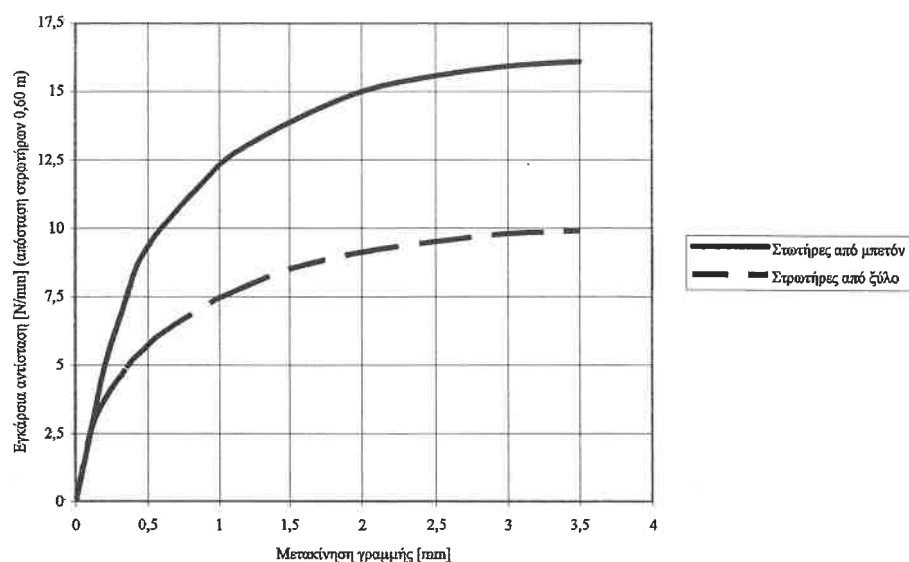
(4) Μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας

Και οι δύο μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία τοποθέτησης στη μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία. Σ' αυτό το διάστημα μεταβολής της θερμοκρασίας αναπτύσσονται θλιπτικές δυνάμεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης.

(5) Κρίσιμη θλιπτική δύναμη στη σιδηροτροχιά

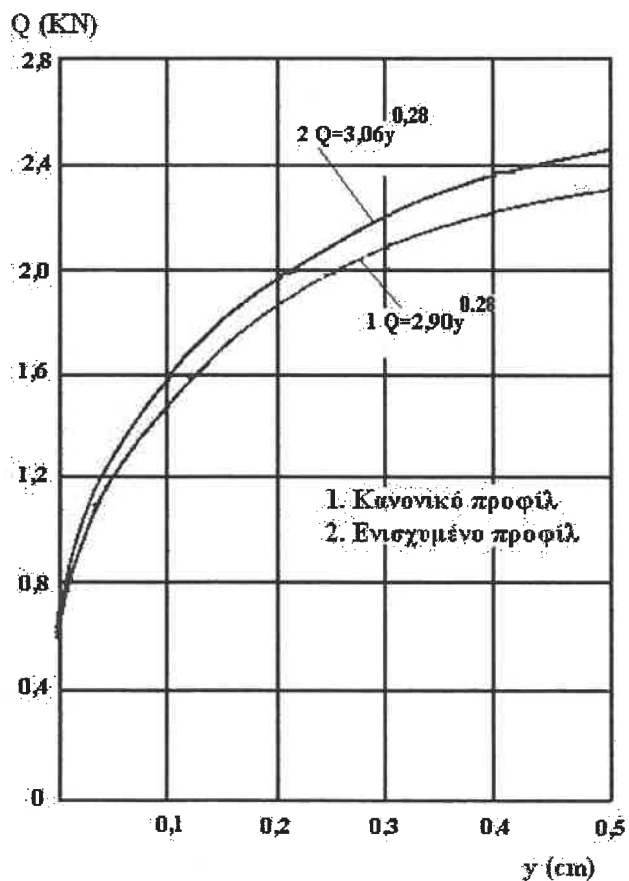
Στην πρώτη μέθοδο, η θλιπτική δύναμη, στην οποία εμφανίζονται τα κρίσιμα μεγέθη μήκους λυγισμού και ελαττώματος, είναι ανάλογη με τη μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας (δεδομένου ότι ο αρμός είναι συγκολλημένος και δεν υφίσταται σ' αυτόν μετακίνηση της σιδηροτροχιάς). Η δύναμη αυτή είναι η δύναμη που εμφανίζεται στη σιδηροτροχιά κατά την εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας και όχι η δύναμη στην οποία εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση. Υπολογίζεται η κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από την δύναμη στη μέγιστη θερμοκρασία [7]. Η κρίσιμη δύναμη που υπολογίζεται από τη δεύτερη μέθοδο είναι η δύναμη στην οποία προκαλείται η πλευρική μετατόπιση της γραμμής [4]. Η θλιπτική δύναμη στη μέγιστη θερμοκρασία, όπως ορίζεται από τη γερμανική μέθοδο (EISENMANN) είναι η ίδια με την επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από θερμοκρασία, που ορίζεται στη δεύτερη μέθοδο.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ EISENMANN ΚΑΙ ZOBA



Σχήμα 29

Εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση πριν από εργασίες συντήρησης για σκυτάρες από μπετόν και ξύλο (στατική τιμή: χωρίς την επίδραση του συρμού)
Πηγή [7]



Σχήμα 35

Αντίσταση της γραμμής για ξύλινους σκυτάρες
Πηγή [4]

(6) Κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας

Στη γερμανική μέθοδο, υπολογίζεται η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία προκαλείται πλευρική μετατόπιση, ενώ στην άλλη μέθοδο, αυτό δεν είναι αναγκαίο, καθώς ο συντελεστής ασφάλειας προκύπτει από σύγκριση δυνάμεων και όχι θερμοκρασιών. Η κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας υπολογίζεται ανάλογα με το αν η οριζοντιογραφική χάραξη περιλαμβάνει ευθεία ή καμπύλη. Τα στοιχεία της οριζοντιογραφίας λαμβάνονται υπόψη από τη δεύτερη μέθοδο για τον υπολογισμό των κρίσιμων συντελεστών A_{cr} και a_{cr} .

(7) Συντελεστής ασφάλειας

Και στις δύο μεθόδους ο συντελεστής ασφάλειας ορίζεται να είναι μεγαλύτερος ή το πολύ ίσος με 2. Η πρώτη μέθοδος συγκρίνει τη μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας με την κρίσιμη για εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης, απαιτώντας η δεύτερη να είναι τουλάχιστον διπλάσια της πρώτης. Η μέθοδος των Σιδηροδρόμων του Κονγκό (ZOBA) συγκρίνει δυνάμεις: την κρίσιμη δύναμη στην οποία εμφανίζεται πλευρική μετατόπιση με την δύναμη που μπορεί να εμφανιστεί λόγω της μεταβολής θερμοκρασίας και απαιτεί η πρώτη να είναι τουλάχιστον διπλάσια της δεύτερης. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και δύναμης είναι η γνωστή $P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ (52). Έτσι, όπως έχει αναφερθεί, ο συντελεστής k_s είναι ο ίδιος είτε ο λόγος αφορά σε διαφορές θερμοκρασίας είτε στις δυνάμεις που αντιστοιχούν σε αυτές τις διαφορές. Δηλαδή: $k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} = \frac{P_{krit}}{P_o}$. Τελικά, και οι δύο μέθοδοι υπολογίζουν

τον ίδιο συντελεστή ασφάλειας και απαιτούν να λαμβάνει τιμές πάνω από 2.

Από την εφαρμογή της προηγούμενης παραγράφου, για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών και τιμών εγκάρσιας αντίστασης, προέκυψε ότι οι δύο μέθοδοι υπολογίζουν παρόμοιους συντελεστές ασφάλειας. Όσο αυξάνει η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης και οι διαστάσεις της σιδηροτροχιάς, η μέθοδος του EISENMANN δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα από την αντίστοιχη του ZOBA, ενώ ο ZOBA είναι πιο συντηρητικός για μικρότερες σιδηροτροχιές και μικρότερες τιμές αντίστασης.

(8) Άλλα στοιχεία

Μέσω της γερμανικής μεθόδου μπορεί να υπολογιστεί τόσο το μήκος της σιδηροτροχιάς, όσο και το επιπλέον ελάττωμα λόγω θλιπτικών δυνάμεων, στο οποίο εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση, ανάλογα με τα στοιχεία της οριζοντιογραφικής χάραξης. Στη δεύτερη μέθοδο δεν δίνεται αυτή η δυνατότητα.

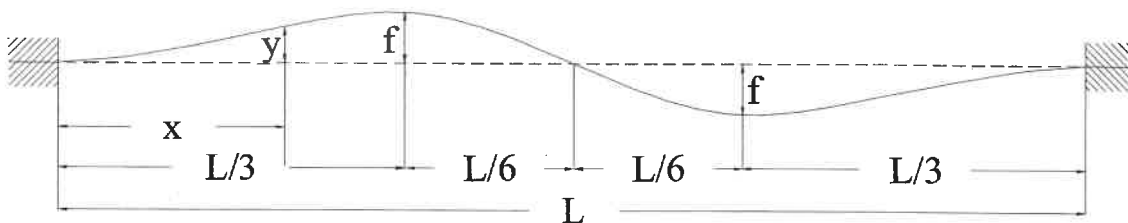
V. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ EISENMANN - ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ EISENMANN

Το πρόβλημα της σταθερότητας αντιμετωπίστηκε θεωρητικά με τη βοήθεια της ενεργειακής μεθόδου. Αυτό πραγματοποιήθηκε από τον Δρ. MEIER [13], ο οποίος ανέπτυξε μια μέθοδο υπολογισμού, κατά την οποία η θλιπτική δύναμη στη σιδηροτροχιά θεωρείται σταθερή, κατά τις πλευρικές μετατοπίσεις. Στη συνέχεια ο EISENMANN, με εφαρμογή των αποτελεσμάτων για τα κρίσιμα σφάλματα του MEIER συνέστησε μια μέθοδο υπολογισμού της Σταθερότητας της Θέσης της Γραμμής, συγκρίνοντας πλέον κρίσιμες και αναμενόμενες διαφορές θερμοκρασίας στη σιδηροτροχιά. Τέλος, εισήγαγε και ένα συντελεστή ασφαλείας, ώστε να εξασφαλιστεί η γραμμή και στην περίπτωση επίδρασης του συρμού (δυναμικές τιμές).

1.1 ΕΥΘΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Σαν πιθανή γραμμή κάμψης λαμβάνεται η ημιτονοειδής γραμμή, (Σχήμα 21).



Σχήμα 21
Γραμμή κάμψης 2
Πηγή [13]

Η εξίσωση της γραμμής κάμψης είναι:

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

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

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

Για την εφαρμοζόμενη ροπή ισχύει:

$$M_{(x)} = P \cdot y \quad (65).$$

Κατά το λυγισμό της γραμμής στο οριζόντιο επίπεδο δρουν τα έργα των δυνάμεων A_b , για την παραμόρφωση της γραμμής κάμψης, A_w , των αντιστάσεων και A_p των θλιπτικών δυνάμεων (πρόκειται για υπολογισμό ράβδου απείρου μήκους και, όπως αναφέρθηκε, παραλείπεται το έργο της

παραμόρφωσης A_v (οι τιμές των S_v και S_l είναι τόσο μικρές σε σχέση με τις τιμές των S_w και S_b , ώστε οι S_v και S_l μπορούν να αμεληθούν, χωρίς σοβαρό σφάλμα). Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, όπου $K_2 = \left(\frac{4\pi^2 EI_E}{L^2} \right)$ κατά Euler είναι (από Πίνακα 3 για γραμμή κάμψης 2):

$$A_b = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx = \frac{9\pi^2 EI_E}{L^2} \cdot \frac{9\pi^2 f^2}{8L} = \frac{K_2 \pi^2 f^2}{4L}$$

$$A_w = w \cdot \int_0^L y dx = wLf \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{\pi} \right) = 0.545wLf$$

$$A_p = -\frac{9\pi^2 f^2}{8L} P$$

όπου:

w = αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση της εσχάρας της γραμμής εντός του έρματος [N/mm]

$w_r = \frac{P}{R}$ = απομείωση της αντίστασης σε εγκάρσια μετακίνηση εξαιτίας της καμπύλωσης [N/mm]

$\lambda = \frac{\pi^2 f^2}{4L}$ = επιμήκυνση της γραμμής κάμψης σε σχέση με τη αρχική μορφή της γραμμής [mm]

L = μήκος λυγισμού που αντιστοιχεί στην τιμή έναρξης της πλευρικής μετατόπισης: θεωρείται σταθερό [mm]

I_E = οριζόντια ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εσχάρας της γραμμής [mm⁴]

Για το συνολικό έργο ισχύει:

$$A = \sum A_i = A_b + A_v + A_p \quad (66)$$

Παραπάνω, είναι τα έργα με τα πρόσημα που αυτά λαμβάνουν. Αρνητικό έργο σημαίνει παροχή έργου (που εκδηλώνεται με παραμόρφωση), ενώ θετικό έργο σημαίνει απορρόφηση έργου (μετατρέπεται σε καμπτικό έργο και έργο τριβής αντίστασης). Από αυτά προκύπτει:

$$A = 0.545wLf + \frac{9\pi^2 f^2}{8L} (K_2 - P) \quad (67)$$

Ο υπολογισμός συνίσταται στον προσδιορισμό της πλευρικής δύναμης S , με την οποία και σε συνδυασμό με μια δεδομένη αρχική απόκλιση από την θεωρητική μορφή, δηλαδή το δεδομένο βέλος, παραμένει ακόμα στη θέση της, κατάσταση, η οποία είναι δυνατή για κάποιο συγκεκριμένο βάρος της γραμμής. Οι πραγματικές δυνάμεις εφαρμόζονται μέσω της ροπής αδράνειας.

Είναι:

$$A_i = \int_0^L S_i \cdot df, \quad S_i = \frac{dA_i}{df} \quad (68)$$

$$S = \sum S_i = \sum \frac{dA_i}{df} = \frac{dA}{df} = 0.545wL + \frac{9\pi^2 f}{4L} (K_2 - P_o) \quad (69)$$

$$\text{Επιπλέον ισχύει: } \frac{dA}{dL} = 0.545wf - 27EI_E \frac{9f^2\pi^4}{8L^4} + \frac{9\pi^2 f^2}{8L^2} P \quad (70)$$

Η κρίσιμη κατάσταση εμφανίζεται, όταν δεν χρειάζεται πλέον καμία πλευρική δύναμη S και το σφάλμα f είναι το ελάχιστο. Οι δύο προϋποθέσεις συνεπάγονται:

$$\begin{aligned} 1.) \quad S &= 0.545wL + \frac{9\pi^2 f}{4L}(K_2 - P) \text{ και} \\ 2.) \quad \frac{df}{dL} &= \frac{dA}{dL} = 0, \text{ όπου: } \frac{df}{dL} = \frac{df}{dA} \cdot \frac{dA}{dL} = \frac{dA}{dL} \cdot \frac{1}{S} \end{aligned}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει η κρίσιμη τιμή του μήκους L_v , στο οποίο εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση, και το κρίσιμο σφάλμα f' σε συνάρτηση με την κρίσιμη θλιπτική δύναμη P_{krit} , ή την κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας Δt_{krit} .

$$L = 3\pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{krit}}} [mm] \quad (53), \quad f' = 8,7w \cdot \frac{EI_E}{P_{krit}^2} [mm] \quad (54)$$

με $P_{krit} = \alpha \cdot \Delta t_{krit} \cdot E \cdot F_{(2)}$ [N] (52), όπου:

α = θερμικός συντελεστής

E = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα της σιδηροτροχιάς

$F_{(2)}$ = εμβαδόν διατομής (των δύο σιδηροτροχιών μαζί)

Εισάγεται η έκφραση του P_{krit} στη σχέση που προέκυψε για το κρίσιμο σφάλμα και προκύπτει η τιμή του Δt_{krit} :

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

Αν προστεθεί τώρα στο κρίσιμο σφάλμα ένα αρχικό υποθετικό σφάλμα f , το οποίο, μετά από νέες μελέτες, είναι περίπου 5-9 mm μεγαλύτερο από το προηγούμενο πραγματικό σφάλμα οριζοντίωσης της γραμμής f_0 (το οποίο εμφανίζεται για κάποιο μήκος γραμμής 5m), δηλαδή η κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας για την καμπυλωμένη γραμμή είναι:

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_E \cdot w}{a^2 F_{(2)}^2 E f}} [^\circ C] \quad (55)$$

με $f = f_0 + 7mm$

και f_0 : πραγματικό αρχικό σφάλμα οριζοντίωσης της γραμμής.

Ενόσω, η πραγματική αύξηση της θερμοκρασίας της σιδηροτροχιάς Δt , είναι μικρότερη από την Δt_{krit} , δεν εμφανίζεται πλευρική μετατόπιση στη γραμμή. Παρολ' αυτά, θεωρείται συντελεστής ασφάλειας, για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των συρμών.

Επαρκής συντελεστής ασφάλειας δίνεται στην περίπτωση μεγάλης ταχύτητας συρμών, με το Δt_{krit} να είναι από 40 έως 50 $^\circ C$ μεγαλύτερο από το Δt . Για μικρότερες ταχύτητες συρμών (ή για καμπύλες μικρότερης ακτίνας) μπορεί ο συντελεστής ασφάλειας να μειωθεί. Όπως, έχει

αναφερθεί, ο συντελεστής ασφάλειας πρέπει να είναι $k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \geq 2$, ώστε να θεωρηθεί η γραμμή θερμικά σταθερή.

1.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΡΑΜΜΗ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

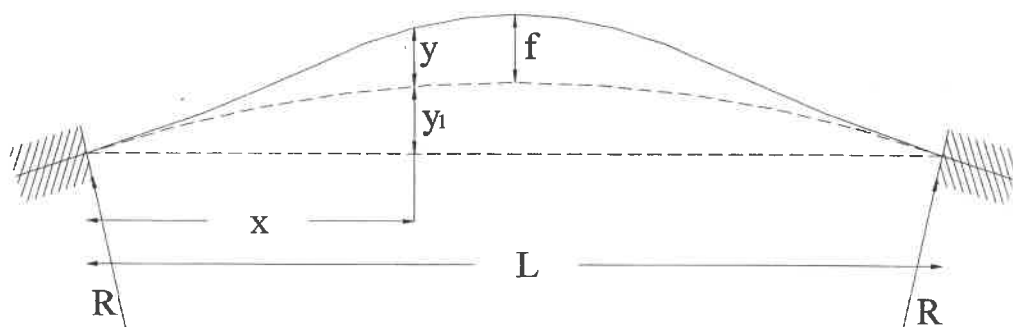
Σαν πιθανή γραμμή κάμψης λαμβάνεται η ημιτονοειδής γραμμή, η οποία αλληλοεπικαλύπτεται με το τόξο κύκλου (σχ.20).

Η εξίσωση της γραμμής κάμψης είναι:

$$y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L}\right) \quad (32).$$

Για την εφαρμοζόμενη ροπή ισχύει:

$$M_{(x)} = P \cdot y \quad (65).$$



Σχήμα 20
Γραμμή κάμψης 1
Πηγή [13]

Κατά το λυγισμό της γραμμής στο οριζόντιο επίπεδο δρουν τα έργα των δυνάμεων A_b , για την παραμόρφωση της γραμμής κάμψης, A_w , των αντιστάσεων και A_p των θλιπτικών δυνάμεων. Ισχύουν οι παρακάτω

$$A_b = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx = \frac{4\pi^2 EI_E}{L^2} \cdot \frac{\pi^2 f^2}{4L} = \frac{K_1 \pi^2 f^2}{4L} \quad \text{σχέσεις, όπου } K_1 = \left(\frac{4\pi^2 EI_E}{L^2} \right) \text{ κατά}$$

$$A_w = w \cdot \int_0^L y dx = \frac{wfL}{2} \quad \text{Euler είναι (από Πίνακα 3 για γραμμή κάμψης 1):}$$

$$A_p = - \left[P \cdot \lambda + \frac{P}{R} \cdot \frac{fL}{2} \right] = -P \left[\frac{\pi^2 f^2}{4L} + \frac{fL}{2R} \right]$$

όπου:

w = αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση της εσχάρας της γραμμής εντός του έρματος [N/mm]

w_r = $\frac{P}{R}$ = απομείωση της αντίστασης σε εγκάρσια μετακίνηση εξαιτίας της καμπύλωσης [N/mm]

λ = $\frac{\pi^2 f^2}{4L}$ = επιμήκυνση της γραμμής κάμψης σε σχέση με τη αρχική μορφή της γραμμής [mm]

L = μήκος κάμψης που αντιστοιχεί στην τιμή έναρξης της πλευρικής μετατόπισης : θεωρείται σταθερό [mm]

I_E = οριζόντια ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εσχάρας της γραμμής
[mm⁴]

Για το συνολικό έργο ισχύει:

$$A = \Sigma A_i = A_b + A_v + A_p \quad (66)$$

Παραπάνω, είναι τα έργα με τα πρόσσημα που αυτά λαμβάνουν. Αρνητικό έργο σημαίνει παροχή έργου, ενώ θετικό έργο σημαίνει απορρόφηση έργου (μετατρέπεται σε καμπτικό έργο και έργο τριβής αντίστασης). Από αυτά προκύπτει:

$$A = \frac{fL}{2} \left(w - \frac{P}{R} \right) + \frac{f^2 \pi^2}{4L} (K - P) \quad (71)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$A_i = \int_0^L S_i \cdot df, \quad S_i = \frac{dA_i}{df} \quad (68)$$

$$S = \Sigma S_i = \Sigma \frac{dA_i}{df} = \frac{dA}{df} = \frac{L}{2} \left(w - \frac{P}{R} \right) + \frac{\pi^2 f}{2L} (K - P) \quad (72)$$

$$\text{Επιπλέον ισχύει: } \frac{dA}{dL} = \frac{f}{2} \left(w - \frac{P}{R} \right) - 3EI_E \frac{f^2 \pi^4}{L^4} + \frac{f^2 \pi^2}{4L^2} P \quad (73)$$

Η κρίσιμη κατάσταση εμφανίζεται, όταν δεν χρειάζεται πλέον καμία πλευρική δύναμη S και το σφάλμα f είναι το ελάχιστο. Οι δύο προϋποθέσεις συνεπάγονται:

$$1.) \quad S = \frac{L}{2} \left(w - \frac{P}{R} \right) + \frac{\pi^2 f}{2L} (K - P) = 0 \quad \text{και}$$

$$2.) \quad \frac{df}{dL} = \frac{dA}{dL} = 0, \quad \text{όπου: } \frac{df}{dL} = \frac{df}{dA} \cdot \frac{dA}{dL} = \frac{dA}{dL} \cdot \frac{1}{S}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει η κρίσιμη τιμή του μήκους L_v , στο οποίο εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση, και το κρίσιμο σφάλμα f' σε συνάρτηση με την κρίσιμη θλιπτική δύναμη P_{krit} , ή την κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας Δt_{krit} .

$$L = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{krit}}} [mm] \quad (56), \quad f' = \left(w - \frac{P_{krit}}{R} \right) \cdot \frac{16EI_E}{P_{krit}^2} [mm] \quad (57)$$

με $P_{krit} = \alpha \cdot \Delta t_{krit} \cdot E \cdot F_{(2)}$ [N] (58), όπου:

α = θερμικός συντελεστής

E = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα της σιδηροτροχιάς

$F_{(2)}$ = εμβαδόν διατομής (των δύο σιδηροτροχιών μαζί)

Αν εισαχθεί η σχέση του P_{krit} στη σχέση για το κρίσιμο σφάλμα χάραξης προκύπτει για το Δt_{krit} :

$$f' = \left(w - \frac{\alpha \cdot \Delta t_{krit} \cdot E \cdot F_{(2)}}{R} \right) \cdot \frac{16EI_E}{\alpha^2 \cdot \Delta t_{krit}^2 \cdot E^2 \cdot F_{(2)}^2} \Rightarrow \alpha^2 EF_{(2)}^2 f' \cdot \Delta t_{krit}^2 + \frac{16\alpha I_E EF_{(2)}}{R} \Delta t_{krit} - 16EI_E w = 0$$

Η διακρίνουσα της παραπάνω δευτεροβάθμιας εξίσωσης είναι:

$$\Delta = \frac{256a^2 I_E^2 E^2 F_{(2)}^2}{R^2} - 64a^2 I_E E^2 w F_{(2)}^2 f'$$

$$\Delta t_{krit} = \frac{-\frac{16a I_E E F_{(2)}}{R} \pm \sqrt{\frac{256a^2 I_E^2 E^2 F_{(2)}^2}{R^2} - 64a^2 I_E E^2 w F_{(2)}^2 f'}}{2a^2 E F_{(2)}^2 f'} \Rightarrow$$

η αρνητική λύση απορρίπτεται και τελικά:

$$\Delta t_{krit} = -\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf'} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf'}\right)^2 + \frac{16I_E w}{a^2 F_{(2)}^2 E f'}}$$

Αν προστεθεί τώρα στο κρίσιμο σφάλμα ένα αρχικό υποθετικό σφάλμα f , το οποίο, μετά από νέες μελέτες, είναι περίπου 5-9 mm μεγαλύτερο από το προηγούμενο πραγματικό σφάλμα οριζοντίωσης της γραμμής f_0 (το οποίο εμφανίζεται για κάποιο μήκος γραμμής 5m), δηλαδή η κρίσιμη αύξηση της θερμοκρασίας για την καμπυλωμένη γραμμή είναι:

$$\Delta t_{krit} = -\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf}\right)^2 + \frac{16I_E w}{a^2 F_{(2)}^2 E f}} [^\circ\text{C}] \quad (58)$$

με $f = f_0 + 7\text{mm}$

και f_0 : πραγματικό αρχικό σφάλμα οριζοντίωσης της γραμμής [16].

1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (ενότητα III), στην παρουσίαση της μεθόδου του EISENMANN, ο συντελεστής ασφάλειας: $k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$ λαμβάνεται τουλάχιστον ίσος με δύο, ώστε να ληφθεί υπόψη και η επίδραση των συρμών η οποία αμελήθηκε στην παραπάνω προσέγγιση. Στις επόμενες παραγράφους λαμβάνεται, προσεγγιστικά, υπόψη η επίδραση των συρμών.

Παρατήρηση: στη γερμανική μέθοδο, που ονομάστηκε μέθοδος EISENMANN, για τον υπολογισμό των κρίσιμων μεγεθών μήκους πλευρικής μετατόπισης σιδηροτροχιάς και σφάλματος τοποθέτησης, θεωρήθηκε η δύναμη που προκύπτει για τη μέγιστη αναμενόμενη (εμφανιζόμενη) διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία τοποθέτησης. Στην τελευταία προσέγγιση, λαμβάνεται η κρίσιμη δύναμη, στην οποία εμφανίζεται η πλευρική μετατόπιση για τον υπολογισμό των εν λόγω μεγεθών. Επειδή, τελικά, το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της Δt_{krit} , ο υπολογισμός της οποίας γίνεται με την θεώρηση, ως δεδομένου, κάποιου σφάλματος γραμμής, δεν έχει σημασία με ποια δύναμη θα γίνει ο προσδιορισμός των κρίσιμων μεγεθών σφάλματος και μήκους πλευρικής μετατόπισης της σιδηροτροχιάς. Άλλωστε, ο συντελεστής ασφάλειας έχει καθορισμένη μορφή είτε πρόκειται για θερμοκρασίες, είτε για δυνάμεις και ο προσδιορισμός του είναι ανεξάρτητος από τα μεγέθη f' και L .

2. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΘΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΡΜΟΥ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΓΡΑΜΜΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, ο διερχόμενος συρμός επιδρά στη γραμμή με τέσσερις τρόπους: προκαλεί ανύψωση της γραμμής κάμψης, επιβάλλει πρόσθετες αξονικές δυνάμεις από την πέδηση και την επιτάχυνση, ταλαντώνεται, προκαλώντας δονήσεις στη γραμμή και φορτίζει τη γραμμή με πλευρικές δυνάμεις. Ουσιαστικά, οι πρόσθετες πλευρικές δυνάμεις, καθώς και οι ταλαντώσεις, εξετάζονται για το σύνολο του συρμού, ενώ η ανύψωση της γραμμής κάμψης και οι πλευρικές δυνάμεις αντιστοιχούν στην επίδραση του ενός άξονα του συρμού.

Οι δύο πρώτες επιδράσεις δε συνδέονται με την πορεία που ακολουθεί ο συρμός, σε αντίθεση με την ανύψωση και, κυρίως, τις πλευρικές δυνάμεις, που έχουν άμεση σχέση με την οφιοειδή κίνηση και τη σχετική θέση που λαμβάνει το φορείο, καθώς κινείται ο συρμός.

i. Βάρος των τροχών και γραμμή κάμψης

Για τη σταθερότητα της γραμμής μας ενδιαφέρει η ανύψωσή της, εξαιτίας των δυνάμεων από τον τροχό. Λόγω αυτής της ανύψωσης μειώνεται η τριβή μεταξύ στρωτήρων και έρματος και τελικά η αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση.

Κατά μέσο όρο εμφανίζονται ανυψώσεις 4,5 m πριν από τον συρμό και 3,5 m μετά τον συρμό (για R 65). Οι μεγαλύτερες πρακτικές τιμές, που εμφανίζονται, οφείλονται στην ιδιοταλάντωση της επιδομής. Εξάλλου, μπορεί ο πρώτος άξονας του συρμού να επηρεάσει την μπροστινή, στην κατεύθυνση κίνησης, ανύψωση «σπρώχνοντας».

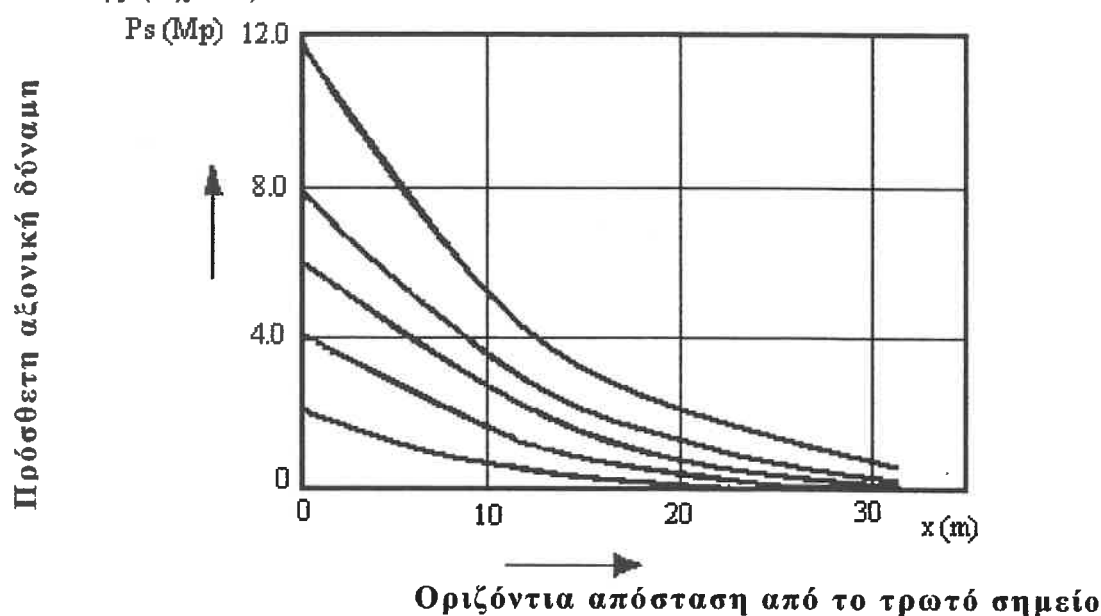
Στην περιοχή της ανύψωσης πρέπει, αν αμεληθεί κάθε άλλη επιρροή του συρμού, να υπολογιστεί η αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση μειωμένη κατά ένα ποσοστό 10%. (επειδή η τιμή της ανύψωσης δεν είναι μεγαλύτερη από 0,3mm, μπορεί η τριβή μεταξύ στρωτήρα και έρματος, για λόγους αλληλοεξάρτησης, μόνο κατά ένα μέρος να θεωρηθεί σαν αντισταθμιστική). Τελικά, προτείνεται η μείωση της τιμής της εγκάρσιας αντίστασης για να ληφθεί υπόψη η ανύψωση κατά 1,3N/mm.

ii. Πρόσθετες αξονικές δυνάμεις εξαιτίας της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των συρμών

Μέσω της τριβής μεταξύ των διερχόμενων τροχών και της σιδηροτροχιάς επιβάλλονται πρόσθετες δυνάμεις στη γραμμή. Κατά την επιτάχυνση προσπαθεί ο οδηγούμενος κινητήριος τροχός να μετατοπίσει την αντιτιθέμενη γραμμή από τη σωστή της θέση. Πίσω από το κινητήριο δρουν θλιπτικές δυνάμεις, πριν από το κινητήριο δρουν εφελκυστικές δυνάμεις. Με την πέδηση του συρμού εμφανίζονται δυνάμεις από την επιβράδυνση, επιπλέον από τις άλλες που έχουν καθοριστεί. Κάθε άξονας μπορεί να θεωρηθεί σαν τρωτό σημείο, όπου μέσω της επιβράδυνσης και της επιτάχυνσης του συρμού εμφανίζονται αξονικές δυνάμεις. Εκεί έχει η

αξονική δύναμη μια τιμή, η οποία συνίσταται από τις υπάρχουσες συμμετοχές των αξονικών δυνάμεων όλων των επιβραδυνόμενων ή οδηγούμενων αξόνων. Η επίδραση των αποτελεσμάτων των δυνάμεων ενός άξονα μειώνεται με την απόσταση των τρωτών σημείων. Για μια ταλαντευόμενη γραμμή, γίνεται σημαντική η επίδραση των αξονικών δυνάμεων πάνω από μια μεγαλύτερη απόσταση.

Διαπιστώθηκε μέσω δοκιμαστικών μετρήσεων στην συνεχή γραμμή, η εξάρτηση των αξονικών δυνάμεων στη σιδηροτροχιά από την απόσταση x των δυνάμεων στο τρωτό σημείο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι, σε καταπονούμενη γραμμή, για απόσταση $x \geq 30$ m, αίρεται η επίδραση των αξονικών δυνάμεων εξαιτίας της επιτάχυνσης του συρμού ή της επιβράδυνσης (Σχ. 45).



Σχήμα 45

Πρόσθετες αξονικές δυνάμεις στη σιδηροτροχιά, σε συνάρτηση με την απόσταση x από το τρωτό σημείο (καταπονούμενη γραμμή)
Πηγή [14]

Σε σύγκριση με την επιτάχυνση, οι τιμές για την επιβράδυνση είναι μεγαλύτερες, επειδή ένα μέρος των επιβραδυνόμενων αξόνων του συρμού μεταδίδει, επίσης, αξονικές δυνάμεις στη γραμμή. Ο υπολογισμός για την επιβράδυνση, συνεπώς, γίνεται σαν τον υπολογισμό καθοριστικών, πρόσθετων, αξονικών δυνάμεων.

Από τα παραπάνω, λαμβάνεται, για την επίδραση της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, μέγιστο για την S 49 $\approx 15\%$ και για την R 65 $\approx 12\%$ των προκαλούμενων από τη θερμοκρασία δυνάμεων.

iii Ταλαντώσεις της επιδομής και του συρμού

Το σύστημα σιδηροτροχιά – συρμός περιγράφεται ως ένα διάφορων μαζών και ελατηρίων που ταλαντώνονται. Η επιβαρημένη επιδομή ταλαντώνεται με συχνότητα 20 Hz. Η συχνότητα της ταλάντωσης του συρμού είναι ουσιαστικά μικρότερη. Εξαιτίας αυτού και για τους χρόνους που περνούν

και με τις καθορισμένες ταχύτητες δεν εμφανίζεται συντονισμός μεταξύ των συρμών και της επιδομής, ώστε να υπολογιστεί.

Η μείωση της στρεπτικής αντίστασης των συνδέσμων της σιδηροτροχιάς μέσω της επίδρασης των συρμών είναι 30%. Σ' αυτή την τιμή προσμετράται, εκτός από την επίδραση της ταλάντωσης και η μείωση των δυνάμεων αντίστασης εξαιτίας εμφάνισης δυνάμεων. Η μείωση της αντίστασης σε εγκάρσια μετακίνηση είναι τελικά εξαιτίας της ταλάντωσης 10%.

iv. Πλευρικές δυνάμεις από το συρμό

Τα περίπλοκα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών συρμών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής και η σχέση επαφής ανάμεσα σε τροχό και σιδηροτροχιά συνθέτουν ένα ακριβές μαθηματικό ομοίωμα των εγκάρσιων δυνάμεων στη γραμμή, όπου όλοι οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη έχουν πιθανοτικές τιμές. Εξαιτίας αυτού μπορούν να ληφθούν τιμές, που προέκυψαν από μετρήσεις και δίνουν ικανοποιητικά ακριβή αποτελέσματα. Συνεπώς, σ' αυτές τις πειραματικές τιμές πρέπει να καταφεύγουμε. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι λαμβάνονται τιμές για το μέτρο των οριζοντίων δυνάμεων, προσεγγιστικά, εξαιτίας της δυσκολίας μελέτης λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος (φαινόμενα ταλαντώσεων, τριβών, κτλ), ίσο με 0,5 – 0,7 των κατακόρυφων δυνάμεων από το συρμό και τελικά περίπου ίσο με 70 KN σε καμπύλη και 60 KN σε ευθεία. Παρόλ' αυτά, λόγω της οφιοειδούς κίνησης και της ειδικής θέσης που λαμβάνει ο φορείο, μόνο ο ένας άξονας φορτίζει τη γραμμή, ενώ οι υπόλοιποι πατάνε πάνω στη γραμμή και αυξάνουν την εγκάρσια αντίσταση. Με συνυπολογισμό των παραπάνω προκύπτει τελικά $\Delta Y = 10 \text{ KN}$.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται, παρουσιάζεται μια διαδικασία κατά την οποία θεωρείται ότι οι οριζόντιες δυνάμεις προκαλούν εγκάρσια μετατόπιση της εσχάρας της γραμμής, όταν μέσω αυτών υπερνικάται η αντίσταση σε εγκάρσια μετατόπιση. Η αντίσταση σε εγκάρσια μετατόπιση της γραμμής, η οποία κυρίως εξαρτάται από την τριβή μεταξύ στρωτήρα και έρματος, αυξάνεται με την επίδραση της κυκλοφορίας.

Ανάμεσα στο έρμα και στον στρωτήρα, εμφανίζεται από την επιπόνηση μια εγκάρσια δύναμη H από την αρκετά μεγάλη εγκάρσια δύναμη των αξόνων H_a . Αυτή η εγκάρσια δύναμη πρέπει να είναι μικρότερη από την δύναμη αντίστασης W της γραμμής έναντι κάποιας μετακίνησης.

Θεωρείται ότι ισχύει η παρακάτω σχέση μεταξύ δύναμης αντίστασης και κατακόρυφης δύναμης από τους άξονες Q_T :

$$W = 0,4 Q_T \quad (40).$$

Από μετρήσεις εκτιμήθηκε μια σχέση μεταξύ αντίστασης τριβής και εγκάρσιας αντίστασης H , η οποία είναι κρίσιμη για μια δεδομένη επιδομή:

$$W/H \leq 0,82 \quad (41).$$

Στην ευθεία ο τροχός διαγράφει μια κυματοειδή τροχιά (ημιτονοειδής τροχιά). Απ' αυτή την τροχιά επιβάλλεται στη γραμμή μόνο μια δύναμη, η οποία εφαρμόζεται από την εγκάρσια μετατόπιση του τροχού, μέσω της δύναμης τριβής μεταξύ σιδηροτροχιάς και τροχού. Η εγκάρσια δύναμη H είναι:

$$\Delta Y = \mu \cdot Q_T = 0,25 Q_T \quad (42).$$

Εξετάζοντας μόνο χονδρικά αυτές τις μέγιστες τιμές, προκύπτει η κρίσιμη σχέση του W/H :

$$W/H = \frac{0,4Q_T}{0,25Q_T} = 1,60 > 0,82.$$

Στην ευθεία γραμμή, οι εγκάρσιες δυνάμεις από τον διερχόμενο συρμό δεν προκαλούν καμία μετατόπιση της εσχάρας της γραμμής. Υπάρχει ικανοποιητική ασφάλεια, επίσης, ώστε να εμποδιστούν πλευρικές ωθήσεις.

Στην καμπύλη γραμμή μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά για την εγκάρσια δύναμη από τους άξονες:

$$H_a = P_R - \mu P_o \frac{P}{q} - \mu P_o' \frac{P}{q} \quad (43).$$

(P_R τιμή κατεύθυνσης του τροχού που ακουμπά στη σιδηροτροχιά, P_o' δύναμη του μη διερχόμενου τροχού, που δεν ακουμπά στη σιδηροτροχιά – απέναντι τροχός -).

Με $\frac{P}{q} \sim 1$, $P_o = P_o'$ και μέγιστο $\mu = 0,25$ γίνεται

$$H_a = P_R - 2 \mu P_o = P_R - 0,5 P_o' \quad (44).$$

Επειδή για δυσμενείς γρήγορους συρμούς και για μικρότερες ακτίνες είναι

$$P_R = 1,25 P_o, \text{ ισχύει:}$$

$$H = Y = 0,75 P_o \approx 0,40 Q_T \quad (45).$$

και για πλευρική ώθηση ίση με $0,15Q$:

$$H = Y = 1,10 P_o = 0,55 Q_T \quad (46).$$

Ισχύει σύμφωνα με τα παραπάνω για την κρίσιμη σχέση W/H , υπό κανονικές συνθήκες:

$$W/H = \frac{0,40Q_T}{0,40Q_T} = 1,0 > 0,82.$$

Και εδώ επίσης η πλευρική δύναμη δεν μετακινεί την εσχάρα της γραμμής. Η αντίσταση σε εγκάρσια μετακίνηση μπορεί να αυξηθεί τόσο από την κυκλοφορία, ώστε η πλευρική δύναμη από το έρμα να εμποδιστεί.

$$\text{Με πλευρική ώθηση είναι } W/H = \frac{0,40Q_T}{0,55Q_T} = 0,726 < 0,82.$$

Τελικά, μεγάλες πλευρικές ωθήσεις μπορούν να μετακινήσουν την εσχάρα της γραμμής. Πρέπει να ληφθούν οι εξής περιορισμοί:

- η καθορισμένη μέγιστη πλευρική ώθηση αντιστοιχεί σε μια ακραία τιμή η οποία μόνο κάτω από μη ευνοϊκές συνθήκες μπορεί να εμφανιστεί,
- οι πλευρικές ωθήσεις μπορούν να εμποδιστούν, για καλή κατάσταση επιδομής, μέσω της ελαστικής αντίδρασης της επιδομής.

Οι πλευρικές δυνάμεις, με κινητό τρωτό σημείο, μπορούν συνεπώς να προκαλέσουν τη μετακίνηση της γραμμής, κυρίως υπό μη ευνοϊκές συνθήκες [14].

ν. Συνυπολογισμός των επιδράσεων του συρμού

Κανονικά, είναι απαραίτητο να θεωρηθούν διάφορες περιοχές (πχ. προ ή μετά του άξονα, προ ή μετά του συρμού στο σύνολό του, κτλ), αλλά αυτό δεν είναι πρακτικό. Γι' αυτό, θεωρούνται τα δυσμενέστερα μεγέθη που είναι δυνατό να προκύψουν. Έτσι, όσον αφορά στις πρόσθετες δυνάμεις, λαμβάνεται μόνο η δυσμενέστερη περίπτωση της πέδησης και προσανξάνεται η αξονική δύναμη λόγω θερμοκρασίας κατά ένα ποσοστό

15% ($P_{o,Q} = 1,15P_o$) (74). Επίσης, η ταλαντώσεις από το συρμό θεωρείται ότι μειώνουν την εγκάρσια αντίσταση κατά ένα ποσοστό 10%.

Η επίδραση των πλευρικών δυνάμεων «απασχολεί» κάποιο ποσοστό της εγκάρσιας αντίστασης. Το ποσοστό αυτό δεν μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από το αντίστοιχο ποσοστό κατά το οποίο απομειώνεται η εγκάρσια αντίσταση στο σημείο της ανύψωσης. Την ίδια στιγμή που ακουμπά ο τροχός στη σιδηροτροχιά και φορτίζει πλευρικά τη γραμμή, εμφανίζεται ανάντη και κατάντη η ανύψωση. Συνεπώς, δεν είναι σωστό να λαμβάνεται ταυτόχρονα απομείωση για την πλευρική δύναμη και για την ανύψωση. Υπολογίζεται η w_q για ευθεία γραμμή ως:

$$w_q = \frac{\Delta Y}{0.545L} \quad (75\alpha) \text{ και για καμπύλη γραμμή:}$$

$$w_q = \frac{2\Delta Y}{L} \quad (75\beta).$$

Οι τιμές που υπολογίζονται από τα παραπάνω συγκρίνονται με την τιμή για ανύψωση 1,3N/mm και τελικά δεχόμαστε τη μεγαλύτερη. Δηλαδή, είναι:

$$w_{qi} = \max\{w_q, 1.3N/mm\} \quad (76).$$

$$\text{Προκύπτει η } w_{red} = w - 0,1w - w_{qi} = 0,9w - w_{qi} \quad (77)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές για την εγκάρσια αντίσταση και την αξονική δύναμη στις σχέσεις του EISENMANN, προκύπτουν οι σχέσεις στις οποίες λαμβάνεται άμεσα η επίδραση του συρμού.

2.2 ΕΥΘΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Για την ευθεία γραμμή με επίδραση συρμού είναι, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6:

Πίνακας 6:

f' για μακριά σιδηροτροχιά με επίδραση συρμού

Γραμμή κάμψης 1	$f' = w_{red} \frac{16EI_E}{P_{o,Q}^2}$
Γραμμή κάμψης 2	$f' = w_{red} \frac{8,7EI_E}{P_{o,Q}^2}$

Πηγή [13]

$$f' = w_{red} \frac{8,7EI_E}{P_{o,Q}^2}.$$

Αν εισαχθεί η έκφραση για την αναμενόμενη μέγιστη δύναμη από θερμοκρασία $P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ και για την w_{red} στην σχέση για το f' προκύπτει:

$$f' = w_{red} \frac{8,7EI_E}{a^2 E^2 F_{(2)}^2 \Delta t^2} \Rightarrow \Delta t = \sqrt{\frac{8,7I_E}{a^2 E F_{(2)}^2 f'} w_{red}} [^\circ C] \quad (78).$$

ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Για αυτή την άνοδο της θερμοκρασίας γίνεται η έναρξη της πλευρικής μετατόπισης. Σε αυτή τη θερμοκρασία άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης,

$$\text{το μήκος λυγισμού } L_Q \text{ είναι } L_Q = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (79).$$

Τελικά, για τον υπολογισμό της σταθερότητας θέσης γραμμής με την επίδραση συρμού, υπολογίζεται το L_Q από τον τύπο (79) και στη συνέχεια η Δt_{krit} από τον τύπο (78) όταν πρόκειται για ευθεία.

2.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Για την καμπύλη γραμμή με επίδραση συρμού είναι, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6:

$$f' = w_{red} \frac{16EI_E}{P_{o,Q}^2}.$$

Αν εισαχθεί η έκφραση για την αναμενόμενη μέγιστη δύναμη από θερμοκρασία $P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ και για την w_{red} στην σχέση για το f' προκύπτει:

$$f'_n = \left(w_{red} - \frac{aEF_{(2)}\Delta t}{R} \right) \frac{16EI_E}{a^2 E^2 F_{(2)}^2 \Delta t^2} \Rightarrow a^2 EF_{(2)}^2 f' \cdot \Delta t^2 + \frac{16aI_E EF_{(2)}}{R} \Delta t - 16EI_E (w_{red}) = 0$$

Η διακρίνουσα της παραπάνω δευτεροβάθμιας εξίσωσης είναι:

$$\Delta = \frac{256a^2 I_E^2 E^2 F_{(2)}^2}{R^2} - 64a^2 I_E E^2 w_{red} F_{(2)}^2 f'$$

$$\Delta t = \frac{-\frac{16aI_E EF_{(2)}}{R} \pm \sqrt{\frac{256a^2 I_E^2 E^2 F_{(2)}^2}{R^2} - 16a^2 I_E E^2 w_{red} F_{(2)}^2 f'}}{2a^2 EF_{(2)}^2 f'} \Rightarrow$$

η αρνητική λύση απορρίπτεται και τελικά:

$$\Delta t = -\frac{16I_E}{aF_{(2)}Rf'} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf'} \right)^2 + \frac{16I_E}{a^2 F_{(2)}^2 Ef'} w_{red}} [^\circ C] \quad (80).$$

Για αυτή την άνοδο της θερμοκρασίας γίνεται η έναρξη της πλευρικής μετατόπισης. Σε αυτή τη θερμοκρασία άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης,

$$\text{το μήκος λυγισμού } L \text{ είναι } L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (81).$$

Τελικά, για τον υπολογισμό της σταθερότητας θέσης γραμμής με την επίδραση συρμού, υπολογίζεται το L από τον τύπο (81) και στη συνέχεια η Δt_{krit} από τον τύπο (80) όταν πρόκειται για καμπύλη.

2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα υπολογισμού, με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών, σε ευθυγραμμία και καμπύλη.

2.4.1 Εφαρμογή σε ευθεία γραμμή με επίδραση συρμού

Τα δεδομένα είναι:

- $\alpha = 1.15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$,
- $E = 2,10 \cdot 10^5 N/mm^2$,
- $f = 20mm$,
- $\Delta Y = 10000N$ (για ευθεία γραμμή),
- τύπος σιδηροτροχιάς: S30, S40, U33 και U36, με χαρακτηριστικά, που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1:

Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών

Τύπος σιδηροτροχιάς	Βάρος σιδηροτροχιάς (kg/m)	Εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς (mm ²)	Ροπή αδράνειας διατομής σιδηροτροχιάς (mm ⁴)
S30	30,00	3645	132×10^4
S40	36,54	4655	200×10^4
U33	46,30	5930	351×10^4
U36	50,56	6450	420×10^4

Πηγή [4]

- εγκάρσια αντίσταση για ξύλινους στρωτήρες (στατική τιμή): $w = 9N/mm$.
- θερμοκρασία τοποθέτησης: $t_v = 30^{\circ}C$ και μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία: $t_o = 70^{\circ}C$, αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης: $\Delta t = t_o - t_v = 70 - 30 = 40^{\circ}C$.

Υπολογισμός του L από τον τύπο (79): $L_Q = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} (79)$ και του $\Delta t_{krit,Q}$

από τον τύπο (78): $\Delta t_{krit,Q} = \sqrt{\frac{8,7I_E}{a^2 \cdot E \cdot F_{(2)}^2 \cdot f}} w_{red} [^{\circ}C] (78)$. Για τους διάφορους

τύπους σιδηροτροχιών φαίνεται ο υπολογισμός στον παρακάτω Πίνακα 13. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και ο υπολογισμός του Δt_{krit} χωρίς την επίδραση συρμού, για ευθεία γραμμή:

Πίνακας 13

Υπολογισμός L_V και $\Delta t_{krit,Q}$ με την επίδραση συρμού σε ευθεία γραμμή

Τύπος σιδ/χιιάς	F (mm^2)	I (mm^4)	$F_{(2)}$ (mm^2)	I_E (mm^4)	$P_{o,Q}$ (KN)	L_Q (m)	$\Delta t_{krit,Q}$ ($^{\circ}C$)	Δt_{krit} ($^{\circ}C$)	k_s
S30	3645	132×10^4	7290	660×10^4	705	18,5	88,4	105,8	1,2
S40	4655	200×10^4	9310	1000×10^4	900	20,5	86,1	101,9	1,2
U33	5930	351×10^4	11860	1755×10^4	1145	24,0	90,9	106,0	1,2
U36	6450	420×10^4	12900	2100×10^4	1245	25,0	91,9	106,6	1,2

*

Στον Πίνακα είναι: $F_{(2)} = 2 \times F$ (mm^2), $I_E = 2,5 \times 2 \times I_{yy}$ (mm^4), $P_{o,Q} = 1,15aEF_{(2)}\Delta t$ (KN), $L_Q = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}}$ (m),

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

με $a = 1.15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 N/mm^2$, $f = 20mm$, $\Delta Y = 10000N$, $w = 9N/mm$, $\Delta t = 40^{\circ}C$

[Λάγιου Μ.]

Ο συντελεστής ασφάλειας είναι κοντά στη μονάδα, αλλά οι κρίσιμες μεταβολές θερμοκρασίας που προέκυψαν με και χωρίς την επίδραση συρμού είναι μεγάλες και τελικά, μπορεί να μην έχουν νόημα (βλ. συμπεράσματα παρακάτω). Επίσης, γίνεται φανερό ότι η επιλογή της τιμής του συντελεστή 2, οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση της ευθείας γραμμής.

2.4.2 Εφαρμογή σε καμπύλη γραμμή με επίδραση συρμού

Τα δεδομένα είναι:

- $\alpha = 1.15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$,
- $E = 2,10 \cdot 10^5 N/mm^2$,
- $f = 20mm$,
- $\Delta Y = 10000N$ (για καμπύλη γραμμή),
- $R = 200m$
- τύπος σιδηροτροχιάς: S30, S40, U33 και U36, με χαρακτηριστικά, που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1:

Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών

Τύπος σιδηροτροχιάς	Βάρος σιδηροτροχιάς (kg/m)	Εμβαδόν διατομής σιδηροτροχιάς (mm ²)	Ροπή αδράνειας διατομής σιδηροτροχιάς (mm ⁴)
S30	30,00	3645	132×10^4
S40	36,54	4655	200×10^4
U33	46,30	5930	351×10^4
U36	50,56	6450	420×10^4

Πηγή [4]

- εγκάρσια αντίσταση για ξύλινους στρωτήρες: $w = 5N/mm$.
- θερμοκρασία τοποθέτησης: $t_v = 30^{\circ}C$ και μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία: $t_o = 70^{\circ}C$, αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης: $\Delta t = t_o - t_v = 70 - 30 = 40^{\circ}C$.

Υπολογισμός του L από τον τύπο (81): $L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (81)$ και του $\Delta t_{krit,Q}$

από τον τύπο (80): $\Delta t_{krit,Q} = -\frac{16I_E}{aF_{(2)}Rf} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf'}\right)^2 + \frac{16I_E}{a^2F_{(2)}^2Ef'}} w_{red} [^{\circ}C] \quad (80)$. Για

τους διάφορους τύπους σιδηροτροχιών φαίνεται ο υπολογισμός στον παρακάτω Πίνακα 14. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και ο υπολογισμός του Δt_{krit} χωρίς την επίδραση συρμού, για καμπύλη γραμμή:

Πίνακας 14

Υπολογισμός L_V και $\Delta t_{krit,Q}$ με την επίδραση συρμού σε καμπύλη γραμμή

Τύπος σιδ/χιάζ	F (mm^2)	I (mm^4)	$F_{(2)}$ (mm^2)	I_E (mm^4)	P_o (KN)	L (m)	$\Delta t_{krit,Q}$ ($^{\circ}C$)	Δt_{krit} ($^{\circ}C$)	k_s
S30	3645	132×10^4	7290	660×10^4	705	12,5	25,8	46,6	1,8
S40	4655	200×10^4	9310	1000×10^4	900	13,5	23,3	40,2	1,7
U33	5930	351×10^4	11860	1755×10^4	1145	16,0	21,0	32,8	1,6
U36	6450	420×10^4	12900	2100×10^4	1245	16,5	19,7	30,5	1,5

*

Στον Πίνακα είναι: $F_{(2)} = 2 \times F$ (mm^2), $I_E = 2,5 \times 2 \times I_{yy}$ (mm^4), $P_{o,Q} = 1,15aEF_{(2)}\Delta t$ (KN), $L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}}$ (m),

$$\Delta t_{krit,Q} = -\frac{16I_E}{aF_{(2)}Rf} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf}\right)^2 + \frac{16I_E}{a^2F_{(2)}^2Ef'}w_{red} [^{\circ}C]}, \Delta t_{krit} = -\frac{16I_E}{aF_{(2)}Rf} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}Rf'}\right)^2 + \frac{16I_E}{a^2F_{(2)}^2Ef'}w[^{\circ}C]}, k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t_{krit,Q}},$$

με $a = 1.15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 N/mm^2$, $f = 20mm$, $R = 200m$, $\Delta Y = 10000N$, $w = 9N/mm$, $\Delta t = 40^{\circ}C$

[Λάγιου Μ.]

Ο συντελεστής ασφάλειας που προκύπτει από τον παραπάνω υπολογισμό είναι πολύ μεγάλος, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο συντελεστής που είχε θεωρηθεί ίσος με 2 μπορεί να οδηγούσε σε υπερδιαστασιολογήσεις. Οι ψηλές τιμές του συντελεστή εμφανίζονται για καμπύλη γραμμή, όπου εξασφάλιση της σταθερότητας της γραμμής είναι πλέον κρίσιμη.

2.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΥ ΔΕ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΡΜΟΥ

2.5.1 Κρίσιμη ακτίνα

Όπως έχει αναφερθεί και έχει γίνει κατανοητό από την προηγούμενη ανάλυση, η καμπύλη είναι δυσμενέστερη σε σχέση με την ευθεία γραμμή και τελικά, ο συντελεστής ασφάλειας εισάγεται κυρίως για την εξασφάλιση της καμπύλης έναντι πλευρικής μετατόπισης. Σκοπός των παρακάτω είναι να προσδιοριστεί η ελάχιστη ακτίνα σε μια καμπύλη, ώστε οριακά να μην εμφανίζεται πλευρική μετατόπιση στη γραμμή. Δηλαδή, για μικρότερη ακτίνα από την κρίσιμη, η γραμμή θα εμφανίσει σίγουρα πλευρική μετατόπιση, για τις συγκεκριμένες συνθήκες, υπό την επίδραση συρμού.

Ως δεδομένα λαμβάνονται ο θερμικός συντελεστής ($\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}\text{C}]$), το μέτρο ελαστικότητας ($E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$), οι διαστάσεις της σιδηροτροχιάς, ανάλογα με τον τύπο της, η εγκάρσια αντίσταση, ανάλογα με τον τύπο των στρωτήρων και η τιμή της πλευρικής δύναμης από το συρμό, η οποία τελικά ισούται με 10KN.

Η επίδραση του συρμού λαμβάνεται υπόψη τόσο μέσω της μείωσης της στατικής τιμής της εγκάρσιας αντίστασης κατά το αντίστοιχο ποσοστό, όσο και μέσω της προσαύξησης της αξονικής δύναμης από θερμοκρασία, για τον συνυπολογισμό των πρόσθετων δυνάμεων από την πέδηση του συρμού (δυσμενέστερη περίπτωση). Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η μείωση της εγκάρσιας αντίστασης, που προκύπτει για καμπύλη χάραξη.

α) Αξονική δύναμη

Αρχικά, υπολογίζεται η αξονική δύναμη που δρα στη γραμμή και εμφανίζεται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Ο υπολογισμός γίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$P_o = \alpha E F_{(2)} \Delta t \quad (52).$$

Όπως αναφέρθηκε, πρέπει στην παραπάνω αξονική δύναμη να συνυπολογιστεί και η πρόσθετη αξονική δύναμη από την πέδηση, που λαμβάνεται ίση με το 15% της αξονικής δύναμης P_o . Δηλαδή, προκύπτει:

$$P_{o,q} = 1,15 P_o \quad (74)$$

Το Δt είναι η μέγιστη άνοδος της θερμοκρασίας, άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης και είναι το μέγεθος, σε συνάρτηση με το οποίο θα βρεθεί η κρίσιμη ακτίνα.

β) Κρίσιμο μήκος πλευρικής μετατόπισης (λυγισμού)

Υπολογίζεται από τον τύπο: $L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (81)$, όπου πλέον στη θέση του

P_o υπολογίζεται το $P_{o,Q}$:

$$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (81).$$

Και αυτό το μέγεθος εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας (αφού εξαρτάται από το $P_{o,Q}$).

γ) Εγκάρσια αντίσταση

Η στατική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης της εσχάρας, είναι αναγκαίο να απομειωθεί, ώστε να ληφθούν υπόψη η καμπύλη χάραξη και οι δυναμικές επιδράσεις του συρμού. Για την καμπύλη χάραξη αφαιρείται από τη στατική τιμή η ποσότητα $\frac{P_{o,Q}}{R}$, για να συνυπολογιστούν οι ταλαντώσεις αφαιρείται ένα ποσοστό 10%, ενώ οι πλευρικές δυνάμεις από τον άξονα και η ανύψωση υπολογίζονται ως εξής:

Ανάλογα με το μήκος λυγισμού $L_{V,Q}$, υπολογίζεται η ποσότητα w_q , η οποία είναι το μέρος της εγκάρσιας αντίστασης, που διατίθεται για να αντισταθεί στην πλευρική δύναμη από τον συρμό. Η w_q δίνεται για την καμπύλη από τον τύπο:

$$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_{V,Q}} \quad (75\beta).$$

Η τιμή αυτή της w_q εμφανίζεται στο σημείο που πατάει ο άξονας. Η ανύψωση εμφανίζεται σε κάποια σημεία μπροστά και πίσω από τον άξονα και σε αυτά τα σημεία συνιστάται να λαμβάνεται τιμή υπολογισμού το $1,3N/mm$. Στην πραγματικότητα, δε λαμβάνονται υπόψη και οι δύο αυτές επιρροές, καθώς είναι αποτέλεσμα της ίδιας δράσης. Δηλαδή, η μείωση στην τιμή της εγκάρσιας αντίστασης εξαιτίας της πλευρικής δύναμης και της ανύψωσης συμβαίνουν ταυτόχρονα και δεν είναι σωστό να αφαιρούνται από την αρχική εγκάρσια αντίσταση και οι δύο τιμές. Τελικά, αφού υπολογιστεί η w_q ελέγχεται αν αυτή είναι μεγαλύτερη του $1,3N/mm$ και λαμβάνεται:

αν $w_q < 1,3N/mm \Rightarrow w_{qi} = 1,3N/mm$, ενώ

αν $w_q > 1,3N/mm \Rightarrow w_{qi} = w_q$ [13].

Συνολικά, η τιμή της αντίστασης σε εγκάρσιες μετακινήσεις (ανεξάρτητα από τα οριζοντιογραφικά στοιχεία) είναι:

$$w_{red} = w - 0,1w - w_{qi} \Rightarrow$$

$$w_{red} = 0,9w - w_{qi} \quad (77).$$

δ) Επιρροή της καμπύλης στην εγκάρσια αντίσταση, κρίσιμη ακτίνα

Όπως έχει αναφερθεί, η επιρροή της καμπύλης στην εγκάρσια αντίσταση λαμβάνεται υπόψη με τον όρο $w_r = \frac{P_{o,Q}}{R}$ (83), όπου αντί για το στατικό P_o , θεωρείται το δυναμικό $P_{o,Q}$. Αυτό σημαίνει ότι στην καμπύλη, η απομένουσα εγκάρσια αντίσταση, για να αποτραπεί η πλευρική μετατόπιση της γραμμής, με την επίδραση συρμού, είναι $w_{rest} = w_{red} - w_r = 0,9w - w_{qi} - \frac{P_{o,Q}}{R}$ (82).

Στην οριακή περίπτωση, που η w_{rest} μηδενίζεται, στη γραμμή θα συμβεί πλευρική μετατόπιση (λυγισμός) για οποιαδήποτε άλλη ενόχληση. Αντιστοιχεί, η κατάσταση αυτή σε μια ασταθή ισορροπία. Για μηδενική τιμή της w_{rest} , προκύπτει η ελάχιστη (κρίσιμη) ακτίνα:

$$w_{rest} = 0 \Rightarrow w_{red} = w_r \Rightarrow 0,9w - w_{qi} = \frac{P_{o,Q}}{R_{min}} \Rightarrow$$

$$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{0,9w - w_{qi}} \quad (83).$$

Υπό τις ίδιες συνθήκες, μια ακτίνα μεγαλύτερη της R_{min} , συνεπάγεται την ύπαρξη περίσσειας εγκάρσιας αντίστασης, ώστε να αποτραπεί η πλευρική μετατόπιση και με κάποιο συντελεστή ασφάλειας, ανάλογα με το μέγεθος της περίσσειας πλευρικής εγκάρσιας αντίστασης. Για ακτίνα μικρότερη της R_{min} , υπό τις ίδιες συνθήκες, η μετατόπιση είναι σχεδόν βέβαιη, χωρίς άλλη ενόχληση της γραμμής.

2.5.2 Διερεύνηση του συντελεστή ασφάλειας

Ορίζεται ως νέος συντελεστής ασφάλειας ο λόγος της κρίσιμης μεταβολής θερμοκρασίας για την εμφάνιση πλευρικής μετατόπισης υπό την επίδραση συρμού προς τη μέγιστη αναμενόμενη μεταβολή θερμοκρασίας. Με βάση τα προηγούμενως αναπτυχθέντα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ελάχιστη (κρίσιμη) ακτίνα, για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, με τη δεδομένη ακτίνα R και για αρχικό σφάλμα χάραξης γραμμής $f_o = 20mm$ υπολογίζεται η κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τοποθέτησης, στην οποία εμφανίζεται πλευρική μετατόπιση και τέλος, συγκρίνεται η τελευταία κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας με την αναμενόμενη μέγιστη. Η κρίσιμη μεταβολή θερμοκρασίας, προέκυψε με την επίδραση συρμού και πλέον ο συντελεστής ασφάλειας δεν είναι ανάγκη

$$\text{να είναι } 2, \text{ αλλά κοντά στη μονάδα } k_{s,Q} = \frac{\Delta t_{krit,Q}}{\Delta t}.$$

Ως δεδομένα λαμβάνονται ο θερμικός συντελεστής ($\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^\circ C]$), το μέτρο ελαστικότητας ($E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$), οι διαστάσεις της σιδηροτροχιάς, ανάλογα με τον τύπο της, η εγκάρσια αντίσταση, ανάλογα με τον τύπο των στρωτήρων και η τιμή της πλευρικής δύναμης από το συρμό, η οποία τελικά ισούται με 10KN (για καμπύλη). Για στρωτήρες από ξύλο, η στατική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης είναι $w = 9N/mm$ [7].

ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Επίσης, θεωρείται θερμοκρασία τοποθέτησης $t_v = 25^\circ C$ και ακτίνα καμπύλης $R = 320m$. Συγκεντρωτικά, τα δεδομένα φαίνονται παρακάτω:

$$\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^\circ C]$$

$$E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$$

$$\text{τύπος σιδηροτροχιάς: R31} \quad \begin{cases} F = 3997 mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994 mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{cases}$$

$$w = 9 N/mm$$

$$\Delta Y = 10000 N$$

$$t_v = 25^\circ C$$

$$R = 320m.$$

Βήματα υπολογισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα υπολογισμού (για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας, ο υπολογισμός έγινε στο EXCEL), για μέγιστη αναμενόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta t = 50^\circ C$

1) Υπολογισμός $P_{o,Q}$

Αρχικά, υπολογίζεται η αξονική δύναμη που δρα στη γραμμή και εμφανίζεται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Ο υπολογισμός γίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$P_o = \alpha E F_{(2)} \Delta t \quad (52) \Rightarrow P_o = 1,15 \times 10^{-5} \times 2,1 \times 10^5 \times 7994 \times 50 = 965 KN.$$

$$\text{Από τον τύπο (74) είναι: } P_{o,Q} = 1,15 P_o \Rightarrow P_{o,Q} = 1,15 \times 965 = 1110 KN.$$

2) Υπολογισμός L_Q

Από τον τύπο (81) είναι:

$$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} = 2\pi \sqrt{\frac{2 \times 2,1 \times 10^5 \times 710 \times 10^4}{1110000}} = 10300 mm = 10,30m$$

3) Υπολογισμός w_{red}

Από τον τύπο (75β) είναι:

$$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_{v,Q}} = \frac{2 \times 10000}{10300} = 2,0 N/mm.$$

Είναι $w_q = 2,0/mm > 1,3 N/mm \Rightarrow w_{q,i} = 2,0 N/mm$ και από τον τύπο (77):

$$w_{red} = 0,9w - w_{qi} \Rightarrow w_{red} = 0,9 \times 9 - 2,0 = 6,1 N/mm.$$

4) Υπολογισμός κρίσιμου σφάλματος f' :

Από τον τύπο (57) προκύπτει, για $w \equiv w_{red}$ και $P_o \equiv P_{o,Q}$:

$$f' = \left(w_{red} - \frac{P_{o,Q}}{R} \right) \cdot \frac{16EI_E}{P_{o,Q}^2} = \left(6,1 - \frac{1110000}{320000} \right) \cdot \frac{16 \times 2,1 \times 10^5 \times 710 \times 10^4}{1110000^2} = 51mm$$

5) Υπολογισμός κρίσιμης ακτίνας R_{min}

Από τον τύπο (83) είναι:

$$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}} = \frac{1110000}{6,1} = 182m.$$

6) Υπολογισμός κρίσιμης μεταβολής θερμοκρασίας Δt_{krit}

Για ακτίνα $R = 320m = 320000mm$ είναι από τον τύπο (58), και όπου $w \equiv w_{red}$

$$\begin{aligned} \Delta t_{krit} &= -\frac{8I_E}{aF_{(2)}R_{min}f} + \sqrt{\left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}R_{min}f} \right)^2 + \frac{16I_E w_{red}}{a^2 F_{(2)}^2 E f}} \Rightarrow \\ \Delta t_{krit} &= -\frac{8 \times 710 \times 10^4}{1,15 \times 10^{-5} \times 7994 \times 320000 \times 20} + \\ &+ \sqrt{\left(\frac{8 \times 710 \times 10^4}{1,15 \times 10^{-5} \times 7994 \times 320000 \times 20} \right)^2 + \frac{16 \times 710 \times 10^4}{(1,15 \times 10^{-5})^2 \times 7994^2 \times 2,1 \times 10^5 \times 20}} \times 6,1 \Rightarrow \\ \Delta t_{krit} &= 73,3^\circ C \end{aligned}$$

7) Υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας

Ο συντελεστής ασφάλειας έχει οριστεί ως ο λόγος

$$k_{s,Q} = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} \quad (5).$$

Για $\Delta t_{krit} = 73,3^\circ C$ και $\Delta t = 50^\circ C$ είναι:

$$k_{s,Q} = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t} = \frac{73,3}{50} = 1,5,$$

δηλαδή 50% επιπλέον ασφάλεια, που σημαίνει ότι όταν συγκολλώ στους $25^\circ C$, για να υπάρξει πλευρική μετατόπιση, πρέπει η θερμοκρασία της σιδηροτροχιάς να φτάσει τους $25 + 73,3 = 98,3^\circ C$. Για να έχει η σιδηροτροχιά $98,3^\circ C$ θερμοκρασία, αυτό σημαίνει ότι και η θερμοκρασία του αέρα θα πρέπει να είναι αντίστοιχα αυξημένη. Συνεπώς, εδώ γεννάται το ερώτημα, κατά πόσο είναι δυνατό να επιτευχθούν τέτοιες θερμοκρασίες σιδηροτροχιάς και πόση θα ήταν τότε η θερμοκρασία αέρα. Είναι απαραίτητο να γίνονται ρεαλιστικές παραδοχές για τη μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας, οι οποίες θα προκύψουν ύστερα από τη διενέργεια πειραματικών μετρήσεων, ώστε να ληφθούν υπόψη οι συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες που

επικρατούν σε κάθε τόπο (ή χώρα). Αντίστοιχα, όμως, θα μεταβάλλεται και ο συντελεστής ασφάλειας.

Επίσης, τα προηγούμενα αποτελέσματα προέκυψαν με την παραδοχή κάποιου μεγέθους αρχικού σφάλματος. Αν είχε υποτεθεί άλλη τιμή για το αρχικό σφάλμα, τα αποτελέσματα θα διέφεραν και θα άλλαζε πάλι ο συντελεστής. Συμπερασματικά, ο συντελεστής ασφάλειας, δεδομένου ότι έχει υπολογιστεί και η επίδραση του διερχόμενου συρμού, μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες τοποθέτησης, κλιματολογικές συνθήκες κτλ. Και ναι μεν η υιοθέτηση του 2 ως συντελεστή ασφάλειας μας καλύπτει πολύ ικανοποιητικά από πλευράς ασφάλειας, αλλά, δεδομένου ότι έχει ληφθεί η δυναμική επίδραση του συρμού, τίθεται ζήτημα ενδεχόμενης υπερδιαστασιολόγησης.

Υπολογισμός συντελεστή για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας

Ο παρακάτω υπολογισμός έγινε με τη βοήθεια του Excel και αφορά στα παραπάνω δεδομένα, μεταβάλλοντας όμως τη μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας, ώστε να προκύψουν διάφορες τιμές του συντελεστή και της κρίσιμης ακτίνας. Η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας κυμαίνεται στα όρια $\Delta t = 30-50^{\circ}\text{C}$, με βήμα υπολογισμού ανά 5°C . Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 15.

Η τιμή αυτή του Δt_{krit} , περιλαμβάνει και την επίδραση συρμού, δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ως η πραγματική κρίσιμη. Μπορούμε πλέον να θεωρήσουμε ότι η γραμμή θα υποστεί πλευρική μετατόπιση, όταν η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας γίνει ίση με την κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας και όχι υποδιπλάσια, όπως ήταν η απαίτηση στις προσεγγίσεις χωρίς την επίδραση του συρμού.

Στον Πίνακα 15, οι συντελεστές λαμβάνουν, για κάθε περίπτωση τοποθέτησης τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερες της μονάδας. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι γραμμές έχουν υπερδιαστασιολογηθεί.

Πίνακας 15

Τιμές συντελεστή για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας άνω της ουδέτερης θερμοκρασίας

$\Delta t = t_o - t_r [^{\circ}C]$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t [KN]$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o [KN]$	666	777	888	999	1100
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} [m]$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} [N/mm]$	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i} [N/mm]$	6,6	6,4	6,3	6,2	6,1
$f' = \left(w_{red} - \frac{P_{o,Q}}{R} \right) \frac{16EI_E}{P_{o,Q}^2} [mm]$	243	157	107	74	51
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	101	121	141	161	182
$\Delta t_{krit} = -\frac{8I_E}{aF_{(2)}R_{min}f} + \left(\frac{8I_E}{aF_{(2)}R_{min}f} \right)^2 + \frac{16I_E w_{red}}{a^2 F_{(2)}^2 Ef} [^{\circ}C]$	77,9	76,1	75,2	74,2	73,3
$t_{max,τζου} = t_r + \Delta t_{krit} [^{\circ}C]$	102,9	101,1	100,2	99,2	98,3
$k_{s,Q} = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$	2,6	2,2	1,9	1,6	1,5

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{aligned} F &= 3997 mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994 mm^2 \\ I_{yy} &= 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{aligned} \right.$

$w = 9 N/mm$, $\Delta Y = 10000 N$, $t_r = 25^{\circ}C$, $R = 320 m$, και $t_{max,τζου}$ η μέγιστη θερμοκρασία σιδηροτροχιάς που πρέπει να επιτευχθεί για να προκύψει πλευρική μετατόπιση της γραμμής [Λάγιου Μ.]

Υπολογισμός κρίσιμης ακτίνας για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και διάφορες τιμές εγκάρσιας αντίστασης

Στο παρακάτω διάγραμμα υπολογίζεται η ελάχιστη ακτίνα, με την οποία μπορεί να τοποθετηθεί η γραμμή, για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και τιμές αντιστάσεων, ώστε να μην προκύψει οριακά πλευρική μετατόπιση της γραμμής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 16 (υπολογισμός για $f = 20mm$) :

Πίνακας 16

Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w = 9N/mm$ και $f_o = 20mm$

$\Delta t = t_o - t_r [^{\circ}C]$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t [kN]$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o [kN]$	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi\sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} [m]$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} [N/mm]$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f_o [mm]$	20	20	20	20	20
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i} [N/mm]$	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	105	127	152	179	210

*με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{array}{l} F = 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{array} \right.$

$w = 9N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_r = 25^{\circ}C$ και $f_o = 20mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 17

Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w = 10N/mm$ και $f_o = 20mm$

$\Delta t = t_o - t_v$ [$^{\circ}C$]	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ [kN]	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o$ [kN]	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}}$ [m]	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q}$ [N/mm]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
f_o [mm]	20	20	20	20	20
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i}$ [N/mm]	7,6	7,5	7,4	7,3	7,2
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	92	111	132	154	179

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{array}{l} F = 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{array} \right.$

$w = 10N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_v = 25^{\circ}C$ και $f_o = 20mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 18

Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w = 11N/mm$ και $f_o = 20mm$

$\Delta t = t_o - t_r$ [$^{\circ}C$]	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)} \Delta t$ [kN]	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15 P_o$ [kN]	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}}$ [m]	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q}$ [N/mm]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
f_o [mm]	20	20	20	20	20
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i}$ [N/mm]	8,5	8,4	8,3	8,2	8,1
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	82	98	116	136	157

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5}$ [$1/^{\circ}C$], $E = 2,10 \cdot 10^5$ [N/mm²], τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{array}{l} F = 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{array} \right.$

$w = 11N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_v = 25^{\circ}C$ και $f_o = 20mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 19

Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w = 12N/mm$ και $f_o = 20mm$

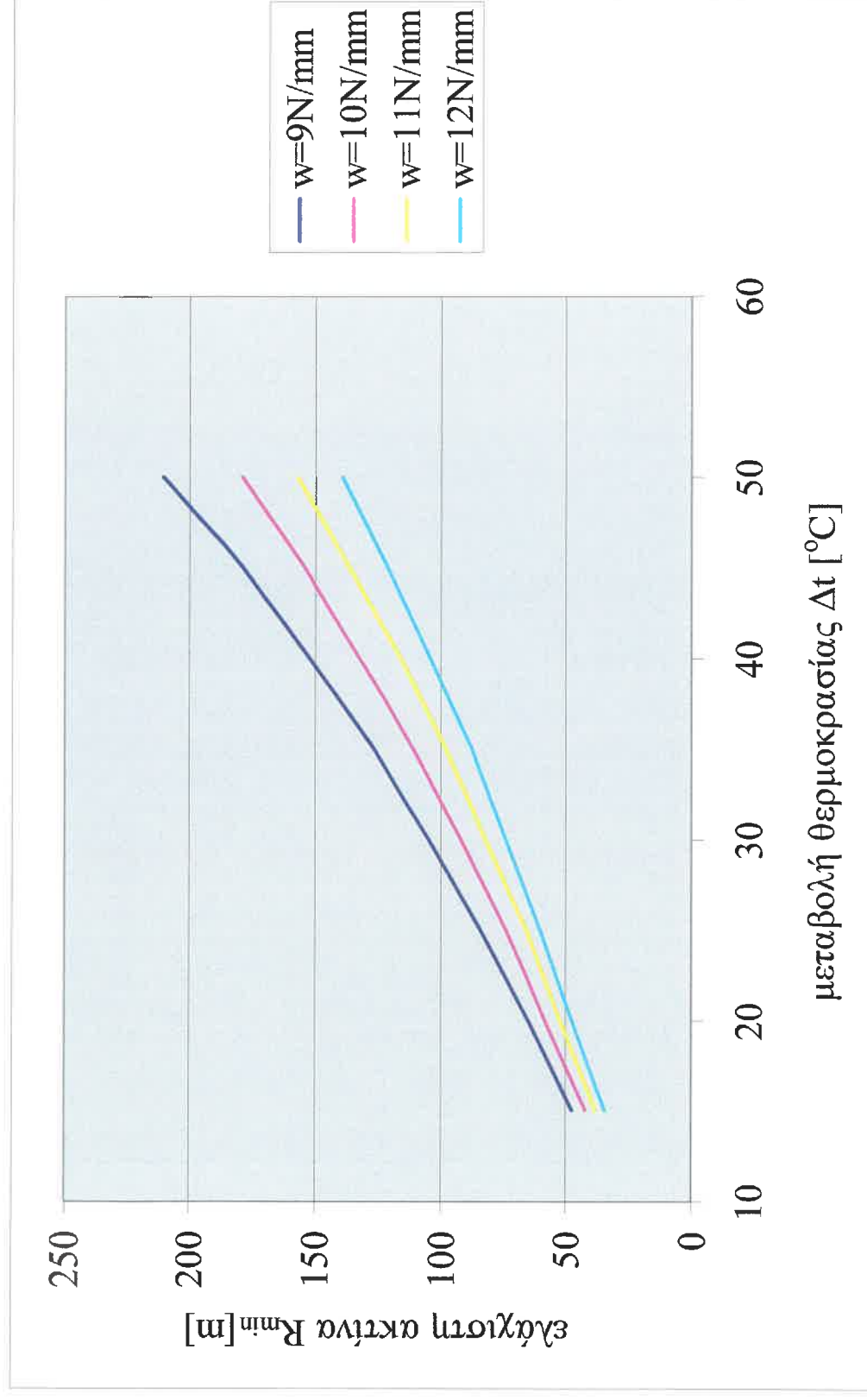
$\Delta t = t_o - t_r$ [$^{\circ}C$]	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ [kN]	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1.15P_o$ [kN]	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}}$ [m]	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q}$ [N/mm]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
f_o [mm]	20	20	20	20	20
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i}$ [N/mm]	9,4	9,3	9,2	9,1	9,0
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	74	88	104	121	139

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{array}{l} F = 3997 mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994 mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{array} \right.$

$w = 12N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_r = 25^{\circ}C$ και $f_o = 20mm$

[Λάγιου Μ.]

Στο διάγραμμα 46 φαίνονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία που υπολογίστηκαν στους παραπάνω πίνακες.



Σχήμα 46

Ελάχιστη ακτίνα για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και τιμές εγκάρσιας αντίστασης
[Λάγιου Μ.]

ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΜΟΥ

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η ελάχιστη ακτίνα μειώνεται με τη μείωση της μέγιστης μεταβολής της θερμοκρασίας, το οποίο συμβαίνει, καθώς με μικρότερες τιμές της μεταβολής θερμοκρασίας, εμφανίζονται στη γραμμή μικρότερες αξονικές δυνάμεις. Το ποσοστό της εγκάρσιας αντίστασης, που «απασχολείται» από την προδιάθεση της καμπύλης να πετάξει τη γραμμή είναι ανάλογο με την αξονική δύναμη και για μικρότερη αξονική δύναμη, η μείωση της εγκάρσιας αντίστασης είναι μικρότερη.

Επίσης, η ελάχιστη ακτίνα μειώνεται με την αύξηση της εγκάρσιας αντίστασης. Με σταθερή την επιρροή της καμπύλης στην αντίσταση, όσος αυξάνεται η στατική τιμή της εγκάρσιας αντίστασης, τόσο αυξάνεται και η δυναμική τιμή της.

Υπολογισμός ακτίνας για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και διάφορες τιμές σφάλματος χάραξης

Στα παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση του σφάλματος στην τιμή της ακτίνας της καμπύλης. Με τη βοήθεια του αλγορίθμου υπολογίζεται η ακτίνα της καμπύλης για σταθερή εγκάρσια αντίσταση και διάφορες τιμές μέγιστης μεταβολής της θερμοκρασίας και του κρίσιμου σφάλματος χάραξης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν (εγκάρσια αντίσταση $w = 9N/mm$):

Πίνακας 20

Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'' = 20mm$ και $w = 9N/mm$

$\Delta t = t_o - t_r$ [$^{\circ}C$]	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t$ [kN]	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o$ [kN]	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2El_E}{P_{o,Q}}}$ [m]					
	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q}$ [N/mm]					
	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
f' [mm]	20	20	20	20	20
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i}$ [N/mm]	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	105	127	152	179	210

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{array}{l} F = 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{array} \right.$

$w = 9N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_v = 25^{\circ}C$ και $f' = 20mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 21

Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f' = 40mm$ και $w = 9N/mm$

$\Delta t = t_o - t_T [^{\circ}C]$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t [kN]$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o [kN]$	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_e}{P_{o,Q}}} [m]$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} [N/mm]$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f'' [mm]$	40	40	40	40	40
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i} [N/mm]$	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	111	139	171	211	261

*με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}C]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{aligned} F &= 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} &= 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{aligned} \right.$

$w = N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_T = 25^{\circ}C$ και $f' = 40mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 22

Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'' = 60mm$ και $w = 9N/mm$

$\Delta t = t_o - t_r \text{ [}^\circ\text{C]}$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)}\Delta t \text{ [kN]}$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o \text{ [kN]}$	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \text{ [m]}$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} \text{ [N/mm]}$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f'' \text{ [mm]}$	60	60	60	60	60
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i} \text{ [N/mm]}$	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	119	153	196	256	345

*με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31

$F = 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2$
 $I_{yy} = 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4$

$w = 9N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_v = 25^\circ C$ και $f'' = 60mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 23

Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f' = 80mm$ και $w = 9N/mm$

$\Delta t = t_o - t_v \text{ [}^\circ\text{C]}$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)} \Delta t \text{ [kN]}$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o \text{ [kN]}$	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2El_E}{P_{o,Q}}} \text{ [m]}$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} \text{ [N/mm]}$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f' \text{ [mm]}$	80	80	80	80	80
$w'_{red} = 0,9w - w'_q \text{ [N/mm]}$	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w'_{red}}$	127	170	230	326	508

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$, $E = 2,10 \cdot 10^5 [N/mm^2]$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{aligned} F' &= 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} &= 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{aligned} \right.$

$w = 9N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_v = 25^\circ\text{C}$ και $f' = 80mm$

[Λάγιου Μ.]

Πίνακας 24

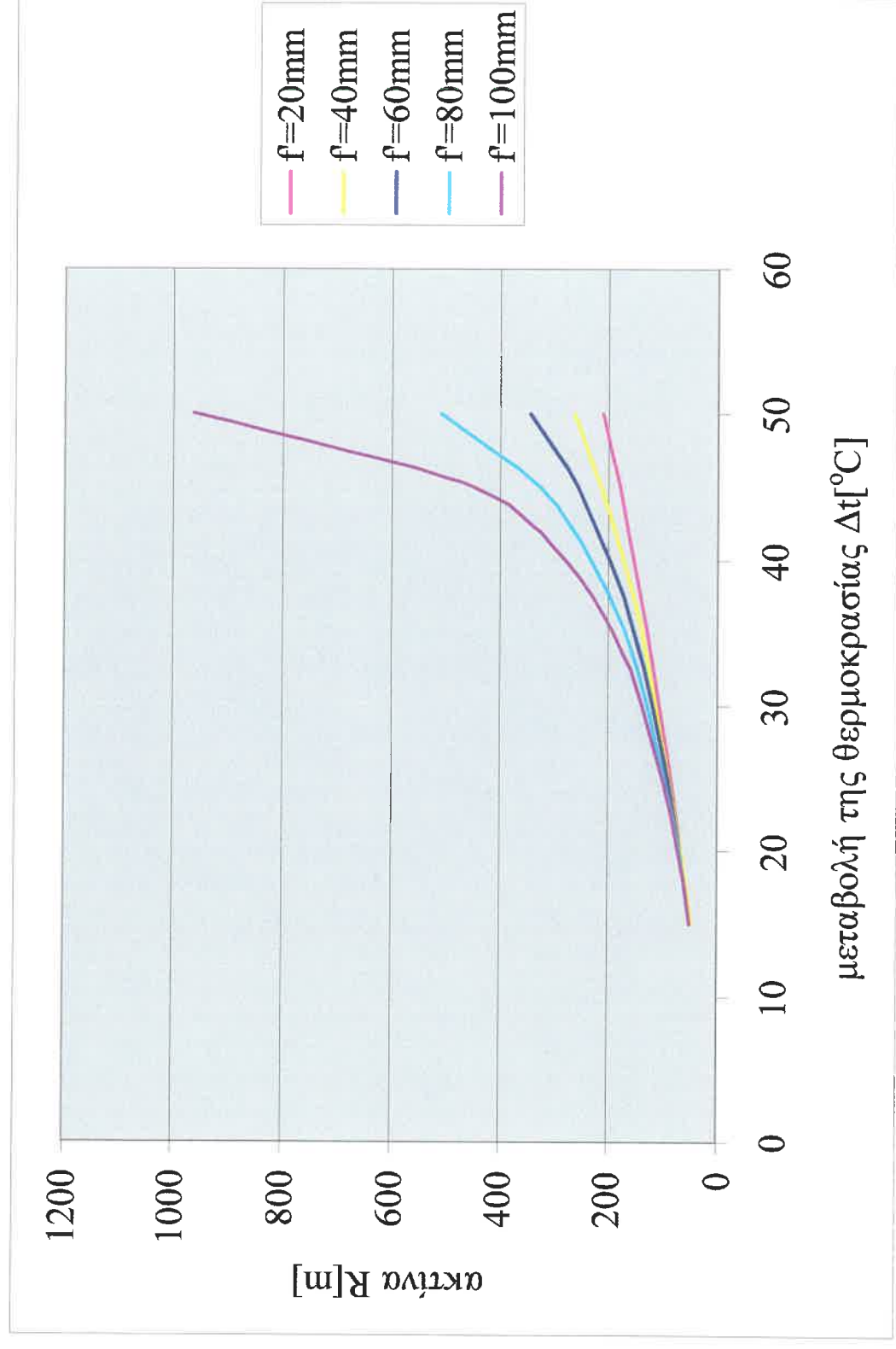
Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f' = 100mm$ και $w = 9N/mm$

$\Delta t = t_o - t_f \text{ [}^\circ\text{C]}$	30	35	40	45	50
$P_o = aEF_{(2)} \Delta t \text{ [kN]}$	579	676	772	869	965
$P_{o,Q} = 1,15P_o \text{ [kN]}$	666	777	888	999	1110
$L_Q = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} \text{ [m]}$	13,3	12,3	11,5	10,8	10,3
$w_q = \frac{2\Delta Y}{L_Q} \text{ [N/mm]}$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
$f' \text{ [mm]}$	100	100	100	100	100
$w_{red} = 0,9w - w_{q,i} \text{ [N/mm]}$	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3
$R_{min} = \frac{P_{o,Q}}{w_{red}}$	137	191	278	449	964

* με $a = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ [1/}^\circ\text{C]}$, $E = 2,10 \cdot 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$, τύπος σιδηροτροχιάς: R31 $\left\{ \begin{aligned} F &= 3997mm^2 \Rightarrow F_{(2)} = 7994mm^2 \\ I_{yy} &= 142 \times 10^4 mm^4 \Rightarrow I_E = 710 \times 10^4 mm^4 \end{aligned} \right.$

$w = 9N/mm$, $\Delta Y = 10000N$, $t_f = 25^\circ C$ και $f' = 100mm$
[Λάγιου Μ.]

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στο διάγραμμα 47:



Σχήμα 47

Ακτίνα για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και τιμές κρίσιμου σφάλματος χάραξης
[Λάγιου Μ.]

Από το διάγραμμα φαίνεται και πάλι ότι με τη μείωση της μέγιστης μεταβολής της θερμοκρασίας η κρίσιμη ακτίνα για διάφορες τιμές σφάλματος μειώνεται. Επίσης, με την αύξηση της τιμής του σφάλματος, η ακτίνα αυξάνεται. Για να υπάρξει πλευρική μετατόπιση σε μεγαλύτερη τιμή σφάλματος, η εγκάρσια αντίσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη. Με την αύξηση της ακτίνας, η απομειωμένη εγκάρσια αντίσταση αυξάνεται, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω.

Σχόλια

Οι καμπύλες των δύο τελευταίων διαγραμμάτων παρουσιάζουν ένα δεδομένο επίπεδο ασφάλειας, για συγκεκριμένες συνθήκες (εγκάρσια αντίστασης ή σφάλματος), για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και ακτίνες. Δηλαδή, μπορούμε να επιτύχουμε ασφάλεια για διάφορες τιμές των κρίσιμων μεγεθών.

Μέχρι τώρα, ο συντελεστής ασφάλειας προέκυπτε από σύγκριση μεταβολών θερμοκρασίας. Όπως, όμως υπολογίστηκε στους πίνακες 14 και 15 και στον πίνακα 16, ο προκύπτων συντελεστής ασφάλειας είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας. Από την παραπάνω ανάλυση έγινε φανερό ότι ο συντελεστής ασφάλειας εξαρτάται από όλα τα κρίσιμα μεγέθη και αν μεταβάλλουμε τις τιμές τους ανάλογα, μεταβάλλεται αντίστοιχα και ο συντελεστής.

Αυτό έχει την εξής σημασία: κάποιες φορές (βλ. Πίνακα 14), η υπολογιζόμενη κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας έχει πολύ μεγάλη τιμή: αν η θερμοκρασία τοποθέτησης είναι στους 25°C και η κρίσιμη θερμοκρασία υπολογιστεί στους 100°C , τότε η θερμοκρασία σιδηροτροχιάς για να προκύψει κρίσιμη κατάσταση πρέπει να ανέλθει στους $25+100=125^{\circ}\text{C}$. Η τελευταία αυτή τιμή της θερμοκρασίας σιδηροτροχιάς είναι πολύ μεγάλη και θα προκύπτει σε θερμοκρασίες τόπου αντίστοιχα μεγάλες. Το ερώτημα είναι αν μπορεί να επιτευχθεί η πολύ μεγάλη θερμοκρασία τόπου και αν τελικά επιτευχθεί, ποιες θα είναι οι συνολικές συνέπειες στην περιβάλλουσα περιοχή, όπου έχει τοποθετηθεί η γραμμή.

Συμπερασματικά, ο συντελεστής ασφάλειας πρέπει να προκύψει ως συνδυασμός της δράσης των κρίσιμων μεγεθών και αφού υπολογιστούν οι κρίσιμες τιμές είναι ανάγκη να ελεγχθεί αρχικά η εφικτότητά τους. Η μεταβολή του κάθε κρίσιμου μεγέθους που υπεισέρχεται στον υπολογισμό της σταθερότητας της γραμμής επηρεάζει ποικιλοτρόπως την τιμή του συντελεστή και γι' αυτό η ίδια τιμή συντελεστή μπορεί να προκύψει για διάφορους συνδυασμούς λύσεων. Τώρα, πλέον που λήφθηκε άμεσα η επίδραση του συρμού και ενσωματώθηκε σε μια μέθοδο, μπορεί να θεωρηθεί και κάποιο άλλο κρίσιμο μέγεθος (όπως για παράδειγμα η ακτίνα της καμπύλης), και στο εξής με κατάλληλη επιλογή των υπόλοιπων μεγεθών να εξασφαλιστεί η γραμμή.

Τέλος, ο συντελεστής που είχε εισαχθεί για την έμμεση θεώρηση της επίδρασης του συρμού, μπορεί πλέον να θεωρηθεί ίσος με τη μονάδα, αφού τα κρίσιμα μεγέθη υπολογιστούν σύμφωνα με τα παραπάνω. Αν, όμως, ο συντελεστής θεωρηθεί ίσος με τη μονάδα, δε λαμβάνονται υπόψη άλλοι αστάθμητοι παράγοντες, εκτός του συρμού (όπως πχ. η επίτευξη θερμοκρασίας μεγαλύτερης της αναμενόμενης μέγιστης που αρχικά

λήφθηκε, ιδιαίτερες συνθήκες καταπόνησης της γραμμής, σε ατύχημα, κτλ), οι οποίοι, όμως, οδηγούν σε υπερεκτίμηση των κρίσιμων μεγεθών και μπορεί να εμφανίζονται τόσο σπάνια, ώστε να μη δικαιολογείται η συνεκτίμησή τους. Προτείνεται περαιτέρω έρευνα επάνω στο θέμα του συντελεστή ασφάλειας, για να προταθεί μια πιο κατάλληλη τιμή, ώστε και να εξασφαλίζεται η γραμμή έναντι πλευρικής μετατόπισης και να μην προκύπτουν αντιστοιχοοικονομικές λύσεις.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕ ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

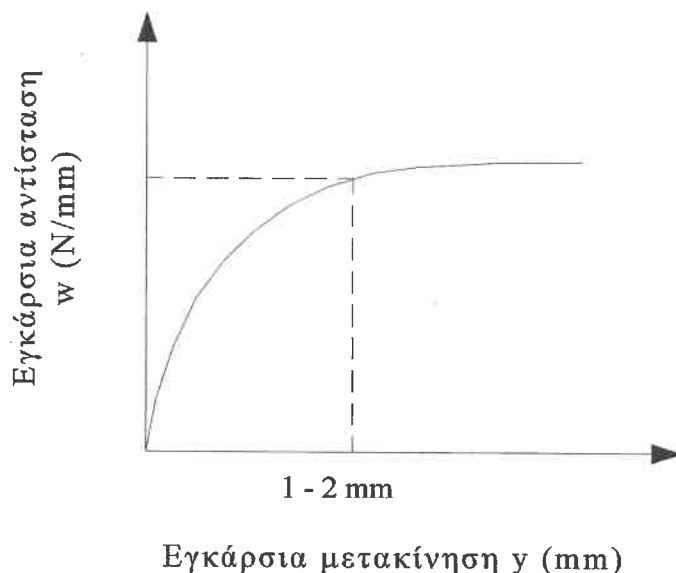
Η μέθοδος του MEIER δεν συνυπολογίζει τη δράση των οριζοντίων δυνάμεων που δρουν στη γραμμή και γι' αυτή την απλοποίηση απαιτεί τελικά η κρίσιμη μεταβολή της θερμοκρασίας να είναι τουλάχιστον διπλάσια της εμφανιζόμενης μεταβολής της θερμοκρασίας άνω του ουδέτερου σημείου. Οι οριζόντιες αυτές δυνάμεις δρουν με περιοδικά εναλλασσόμενη φορά, προς τη φορά εμφάνισης του σφάλματος και αντίθετα προς τη φορά του. Στην πρώτη περίπτωση (κατά τη φορά του σφάλματος), ευνοούν την εμφάνιση του ριπτασμού της γραμμής, ενώ στη δεύτερη τείνουν να τον αποτρέψουν. Προφανώς, η πρώτη περίπτωση είναι η δυσμενής κατάσταση και αυτή εξετάζεται.

3.2 ANTIKEIMENO

Παρακάτω προσδιορίζεται μια πιθανή μορφή του προσομοιώματος, το οποίο εκ πρώτης όψεως φαίνεται απλό ως προς την επίλυσή του με στατική πρώτου βαθμού. Παρόλ' αυτά, η στατική πρώτου βαθμού λαμβάνει ισορροπία θεωρώντας αμελητέα τη συνεισφορά των αξονικών δυνάμεων [11] (αμελείται η δευτερεύουσα ροπή κάμψης [12]), που είναι μια πολύ καλή προσέγγιση στα προβλήματα με σχετικά μικρή αξονική δύναμη, ενώ στην περίπτωση της σιδηροδρομικής γραμμής, τα μήκη, όπως και οι φορτίσεις είναι σχετικά με τους συνήθεις φορείς μεγάλα, με αποτέλεσμα να μην είναι ρεαλιστική η παραπάνω παραδοχή.

Συγκεκριμένα, η πλευρική μετατόπιση είναι ουσιαστικά μια μορφή λυγισμού της γραμμής και ο έλεγχος της Σταθερότητας Θέσης της Γραμμής (ΣΘΓ) αναφέρεται σε κρίσιμα φορτία λυγισμού (P_{cr}). Για τα φορτία αυτά, δεν έχει εφαρμογή η στατική πρώτου βαθμού, καθώς η γραμμή, που εμφανίζει μεγάλη λυγηρότητα εντείνεται πλέον μη γραμμικά και η επιρροή των αξονικών δυνάμεων στην κάμψη γίνεται σημαντική. Όπως τελικά προκύπτει, η σχέση αξονικής δύναμης και βέλους κάμψης είναι έντονα μη γραμμική.

Σκοπός είναι η μελέτη της συμπεριφοράς αξονικά επιπονούμενου μέλους, το οποίο υπόκειται συγχρόνως σε καμπτική ένταση λόγω εγκάρσιων, συγκεντρωμένων ή διανεμημένων, φορτίων, με εφαρμογή της θεωρίας ελαστικής ευστάθειας. Στην περίπτωση της σιδηροδρομικής γραμμής, συγκεντρωμένη θεωρείται η εγκάρσια οριζόντια δύναμη, που οφείλεται κυρίως στην κίνηση των συρμών, ενώ η εγκάρσια αντίσταση στη μετακίνηση της γραμμής λαμβάνεται ως ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Στην πραγματικότητα, η εγκάρσια αντίσταση στη μετακίνηση της γραμμής είναι συνάρτηση του βέλους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31. Απλοποιητικά θεωρείται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα, λαμβάνοντας σε όλο το μετακινούμενο μήκος της σιδηροτροχιάς τη μέγιστη τιμή της. Εξάλλου, στα σημεία που διέρχονται οι άξονες του συρμού, στο συνολικό κατακόρυφο βάρος προστίθεται και αυτό του άξονα, αυξάνοντας την τριβή μεταξύ έρματος – στρωτήρα, δηλαδή την εγκάρσια αντίσταση.

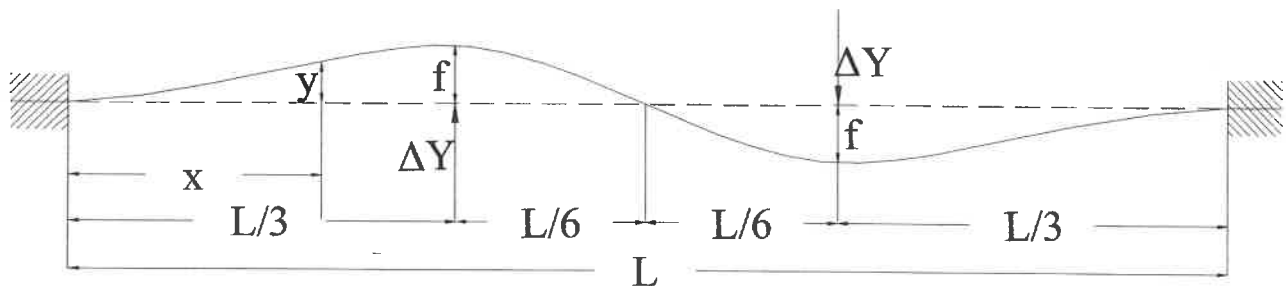


Σχήμα 31
Παραδοχή για εγκάρσια αντίσταση w
Πηγή [15]

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της σιδηροτροχιάς, που υπόκειται στην παραπάνω φόρτιση, λαμβάνεται η ελαφρώς καμπυλωμένη μορφή ισορροπίας. Αν υποθεθεί ότι είναι δυνατή μια τέτοια μορφή ισορροπίας, όταν $P = P_{cr}$, θα πρέπει να υπάρχει σε οποιαδήποτε διατομή της καμπυλωμένης (λόγω λυγισμού) ράβδου ισορροπία μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής ροπής

κάμψης, $M_{εξ}$ και $M_{εσ}$ αντίστοιχα. Τελικά, προκύπτει ότι αν υπάρχει ισορροπία στην παραμορφωμένη (καμπυλωμένη) κατάσταση, αυτή διέπεται από μια διαφορική εξίσωση ισορροπίας, η λύση της οποίας, δίνει έκφραση του καμπτικού βέλους σε κάθε σημείο της διατομής. Επιπλέον, με εφαρμογή των γεωμετρικών και συνοριακών συνθηκών, προκύπτουν εκφράσεις για το μήκος στο οποίο συμβαίνει ο ριπτασμός και για την κρίσιμη αξονική δύναμη, στην οποία πραγματοποιείται το φαινόμενο [11].

Από τις εξισώσεις προκύπτει ότι η σχέση βέλους κάμψης και αξονικής δύναμης είναι μη γραμμική και ως εκ τούτου για να ισχύει η αρχή της επαλληλίας, κατά την κάμψη της σιδηροτροχιάς, λόγω διάφορων εγκάρσιων φορτίων, θα πρέπει η αξονική δύναμη να είναι σταθερή [11]. Σ' αυτή την περίπτωση, το βέλος κάμψης της ράβδου είναι ανάλογο του εγκάρσιου φορτίου και συνεπώς ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί ξεχωριστά το βέλος κάμψης για την περίπτωση που ασκείται μόνο το κατανεμημένο φορτίο της αντίστασης στη μετακίνηση και για την περίπτωση που ασκείται μόνο το συγκεντρωμένο, για ίδια αξονική φόρτιση λόγω θερμοκρασίας.



Σχήμα 28

Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 2
[13]

3.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Ως δεδομένα λαμβάνονται η ημιτονοειδής μορφή της ελαστικής γραμμής κατά την εμφάνιση του μέγιστου σφάλματος, το οποίο εμφανίζεται στο 1/3 του συνολικού μετακινούμενου μήκους της σιδηροτροχιάς, η φόρτιση, από ένα ζεύγος οριζοντίων δυνάμεων ΔY , οι οποίες δρουν προς τη φορά εμφάνισης του βέλους και έχουν ως σημείο εφαρμογής το σημείο πραγματοποίησης του μέγιστου βέλους (μέγιστου σφάλματος) (βλ. Σχήμα 28).

Το μέτρο των δυνάμεων αυτών λαμβάνεται προσεγγιστικά, εξαιτίας της δυσκολίας μελέτης λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος (φαινόμενα ταλαντώσεων, τριβών, κτλ), ίσο με 0,5 – 0,7 των κατακόρυφων δυνάμεων από το συρμό και πάντως περίπου ίσο με 70 KN σε καμπύλη και 60 KN σε ευθεία. Σύμφωνα με τον PRUD' HOMME [7], οι δυναμικές οριζόντιες δυνάμεις δεν μπορούν να είναι μεγαλύτερες από:

$$\Sigma H_a < k_p \cdot (10 + \frac{2\Delta Y}{3}) [KN],$$

με	$k_p =$	0,85 για τους Ελβετικούς Σιδηρόδρομους
	$k_p =$	1,00 για τους Γερμανικούς Σιδηρόδρομους.

Αν ληφθεί $k_p = 0,85$ (Ελβετικοί Σιδηρόδρομοι) είναι:

$$\Delta Y_{\text{ευθεία}} = 0,85 \cdot (10 + \frac{2 \cdot 60}{3}) = 42,5 KN$$

$$\Delta Y_{\text{καμπύλη}} = 0,85 \cdot (10 + \frac{2 \cdot 70}{3}) = 48,17 KN$$

Η παραπάνω τιμή αναφέρεται στο σύνολο των αξόνων του συρμού, ο οποίος έχει μήκος κάποια μέτρα και δεν είναι σωστό να ληφθεί υπόψη η συνολική εγκάρσια δύναμη από αυτόν στη γραμμή. Στην πραγματικότητα, ο ένας άξονας του συρμού «χτυπάει» πάνω στο σημείο του μέγιστου σφάλματος χάραξης γραμμής, ενώ οι υπόλοιποι βρίσκονται στην απέναντι μεριά της γραμμής. Τελικά, ο συνυπολογισμός των προηγούμενων, μας οδηγεί να υιοθετήσουμε μια τιμή για την εγκάρσια αντίσταση ΔY ίση με 10-15 KN. Στα παρακάτω η τιμή της ΔY θεωρείται ίση με 10KN.

Η επίδραση του συρμού λαμβάνεται υπόψη όπως και στην ενεργειακή μέθοδο: θεωρούνται τα δυσμενέστερα μεγέθη που είναι δυνατό να προκύψουν. Έτσι, όσον αφορά στις πρόσθετες δυνάμεις, λαμβάνεται μόνο η δυσμενέστερη περίπτωση της πέδησης και προσαυξάνεται η αξονική δύναμη λόγω θερμοκρασίας κατά ένα ποσοστό 15% ($P_{o,q} = 1,15P_o$)(74). Επίσης, η ταλαντώσεις από το συρμό θεωρείται ότι μειώνουν την εγκάρσια αντίσταση κατά ένα ποσοστό 10%.

Η επίδραση των πλευρικών δυνάμεων «απασχολεί» κάποιο ποσοστό της εγκάρσιας αντίστασης. Το ποσοστό αυτό δεν μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από το αντίστοιχο ποσοστό κατά το οποίο απομειώνεται η εγκάρσια αντίσταση στο σημείο της ανύψωσης. Την ίδια στιγμή που ακουμπά ο τροχός στη σιδηροτροχιά και φορτίζει πλευρικά τη γραμμή, εμφανίζεται ανάντη και κατάντη η ανύψωση. Συνεπώς, δεν είναι σωστό να

λαμβάνεται ταυτόχρονα απόμείωση για την πλευρική δύναμη και για την ανύψωση. Υπολογίζεται η w_q για ευθεία γραμμή ως:

$$w_q = \frac{\Delta Y}{0.545L} \quad (75\alpha) \text{ και για καμπύλη γραμμή:}$$

$$w_q = \frac{2\Delta Y}{L} \quad (75\beta).$$

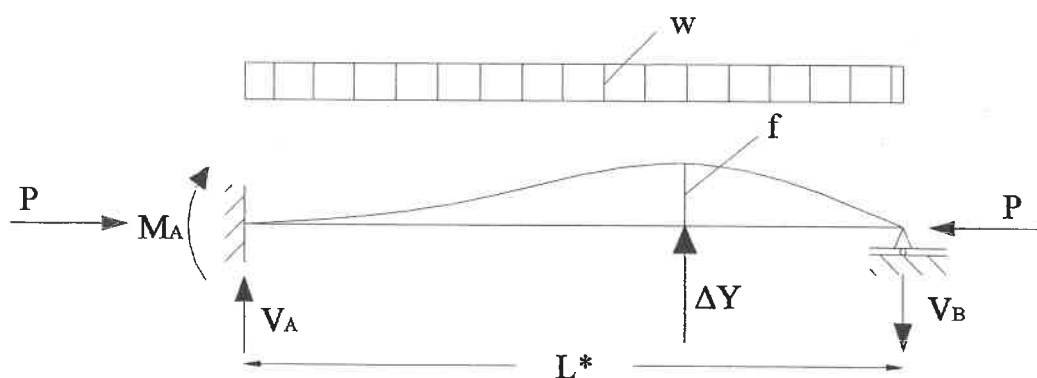
Οι τιμές που υπολογίζονται από τα παραπάνω συγκρίνονται με την τιμή για ανύψωση $1,3\text{N/mm}$ και τελικά δεχόμαστε τη μεγαλύτερη. Δηλαδή, είναι:

$$w_{qi} = \max\{w_q, 1,3\text{N/mm}\} \quad (76).$$

$$\text{Προκύπτει η } w_{red} = w - 0,1w - w_{qi} = 0,9w - w_{qi} \quad (77)$$

Η ακαμψία της ράβδου θεωρείται ίση με την ακαμψία της εσχάρας της γραμμής, δηλαδή I_B (όπως ορίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, για τη μέθοδο του EISENMANN).

Γίνεται φανερό, εξετάζοντας τη μορφή της γραμμής κάμψης ότι πρόκειται για ένα φορέα συμμετρικό με αντισυμμετρική φόρτιση και σύμφωνα με αυτά, γίνεται η παραδοχή μιας πακτωμένης ράβδου στο ένα άκρο της, που στο άλλο άκρο της δεσμεύεται με άρθρωση. Το μήκος της ράβδου λαμβάνεται ίσο με $L/2$, με L , συνολικό μήκος μετακινούμενου τμήματος της σιδηροτροχιάς (μήκος ριπτασμού). Επίσης, παραδεχόμαστε, όπως αναφέρθηκε, ότι η δύναμη φόρτισης εφαρμόζεται στο σημείο πραγματοποίησης του μέγιστου βέλους, που είναι και η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή στα $L/3 = 2L^*/3$, όπου L^* το μήκος της ράβδου (Σχήμα 48).



Σχήμα 48
Παραδοχή στατικού μοντέλου
[Λάγιου Μ.]

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θεωρείται σταθερή ομοιόμορφα κατανεμημένη η αντίσταση στη μετακίνηση της σιδηροτροχιάς, ίση σε όλο το μήκος με τη μέγιστη τιμή της.

3.4 ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

Ζητείται ο προσδιορισμός της κρίσιμης αξονικής δύναμης και κατ' επέκταση της κρίσιμης μεταβολής (ανόδου) της θερμοκρασίας σε σχέση με την ουδέτερη θερμοκρασία, το μήκος στο οποίο πραγματοποιείται ο ριπτασμός ($L=2L^*$) και το κρίσιμο βέλος στο οποίο πραγματοποιείται.

3.5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε πρώτη προσέγγιση θα μελετηθεί η απλή περίπτωση μιας αμφιέρρειστης ράβδου που εντείνεται μόνο αξονικά. Η εξίσωση ισορροπίας μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής ροπής γράφεται:

$$M_{εξ}=M_{εσ} \quad (84),$$

όπου αν $f(x)$ είναι το βέλος κάμψης, τότε $M_{εξ} = P_{cr} \cdot f$ (ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση). Με τη σχέση αυτή εισάγεται η γεωμετρική μη γραμμικότητα που χαρακτηρίζει τα προβλήματα λυγισμού. Εξ' άλλου, όπως είναι γνωστό $M_{εσ} = -EI_E f''(x)$ (καταστατική σχέση για τη ροπή κάμψης), όπου ο τόνος «'» παριστά παραγώγιση ως προς x . Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις στη σχέση (84), λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} EI_E f''(x) + P_{cr} f(x) &= 0 \Rightarrow \\ f''(x) + k^2 f(x) &= 0 \quad (85), \end{aligned}$$

όπου $k^2 = P_{cr} / EI_E$.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι αν υπάρχει ισορροπία στην παραμορφωμένη (καμπυλωμένη) κατάσταση, αυτή διέπεται από τη διαφορική εξίσωση ισορροπίας (85) [13]. Η εξίσωση (85) είναι μια ομογενής διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού, η λύση της οποίας είναι:

$$f = A \sin kx + B \cos kx \quad (86).$$

Με εφαρμογή των γεωμετρικών και συνοριακών συνθηκών προκύπτουν τα A και B . Έτσι, είναι $f(0) = f(L) = 0$. Για την πρώτη συνθήκη:

$$f(0) = 0 \Rightarrow B = 0 \Rightarrow f = A \sin kx,$$

ενώ για τη δεύτερη συνθήκη είναι:

$$f(L) = A \sin kL \Rightarrow A = 0 \quad \text{ή} \quad \sin kL = 0 \Rightarrow \text{για } A = 0, \text{ είναι η κατάσταση πριν το}$$

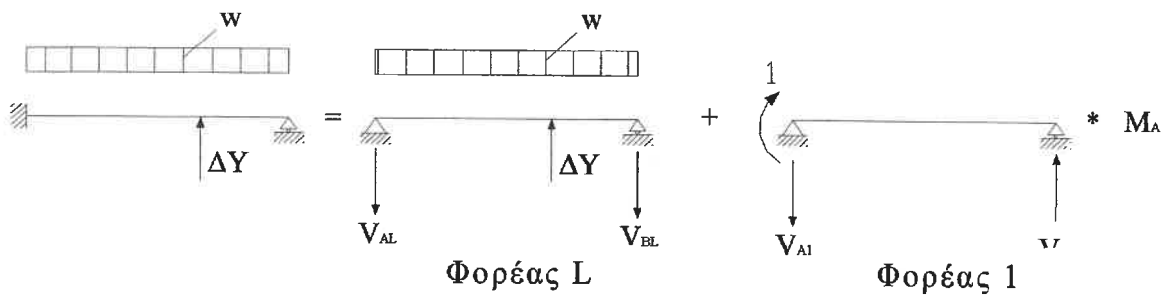
$$\text{λυγισμό} \Rightarrow \sin kL = 0 \Rightarrow kL = n\pi \Rightarrow L = \frac{n\pi}{k}.$$

Ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνει το n , προκύπτουν και οι ιδιομορφές του λυγισμού.

Για την περίπτωση της σιδηροτροχιάς εξετάζεται η παρακάτω φόρτιση, με την δράση του συγκεντρωμένου φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα i. Θεωρείται ότι στην πάκτωση, λόγω της φόρτισης, αναπτύσσεται θετική ροπή $\bar{M}_A$ και θετική αντίδραση $\bar{V}_A$, σύμφωνα με τη γνωστή σήμανση. Τότε γράφεται η ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας εσωτερικών – εξωτερικών ροπών:

$$(87) \begin{cases} -EI_E f''(x) = \bar{M}_A + \bar{V}_A x - \frac{wx^2}{2} + Pf, \text{ για } 0 \leq x \leq \frac{2L^*}{3} \text{ (δεξιά)} \\ -EI_E f''(\bar{x}) = -\bar{V}_B \bar{x} - \frac{w\bar{x}^2}{2} + Pf, \text{ για } 0 \leq \bar{x} \leq \frac{L^*}{3} \text{ (αριστερά)} \end{cases}$$

Στη σχέση (87) εμφανίζονται οι αντιδράσεις της ράβδου $\bar{M}_A, \bar{V}_A$ και $\bar{V}_B$. Είναι δυνατό να εκφραστούν οι δύο τελευταίες ως προς την $\bar{M}_A$, ως εξής: ο συνολικός φορέας ισοδυναμεί με τους παρακάτω δύο φορείς:



Σχήμα 49

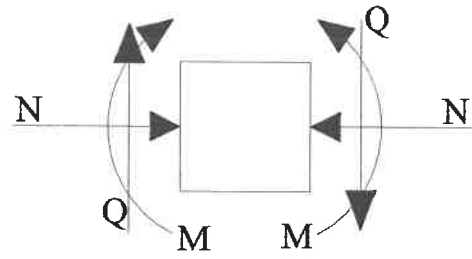
Ισοδύναμοι φορείς και αντιδράσεις στατικού μοντέλου
[Λάγιου Μ.]

Από το παραπάνω σχήμα 49 προκύπτει ότι: $\bar{V}_A = \bar{V}_{AL} + \bar{V}_{A1}$ και $\bar{V}_B = \bar{V}_{BL} + \bar{V}_{B1}$, με

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_{AL} &= -\frac{\Delta Y}{3} + \frac{wL^*}{2} \\ \bar{V}_{BL} &= \frac{2\Delta Y}{3} - \frac{wL^*}{2} \end{aligned} \right\} \quad (88) \text{ για τον L φορέα και}$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_{A1} &= -\frac{1}{L^*} \cdot \bar{M}_A \\ \bar{V}_{B1} &= -\frac{1}{L^*} \cdot \bar{M}_A \end{aligned} \right\} \quad (89) \text{ για τον 1 φορέα}$$

με θετική σήμανση τη γνωστή από τη μηχανική (Σχήμα 50):



Σχήμα 50

Σύμβαση πρόσημων για τα εντατικά μεγέθη
[Λάγιου Μ.]

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη τη θετική φορά, που υιοθετήθηκε στη σύμβαση, προκύπτουν οι εκφράσεις:

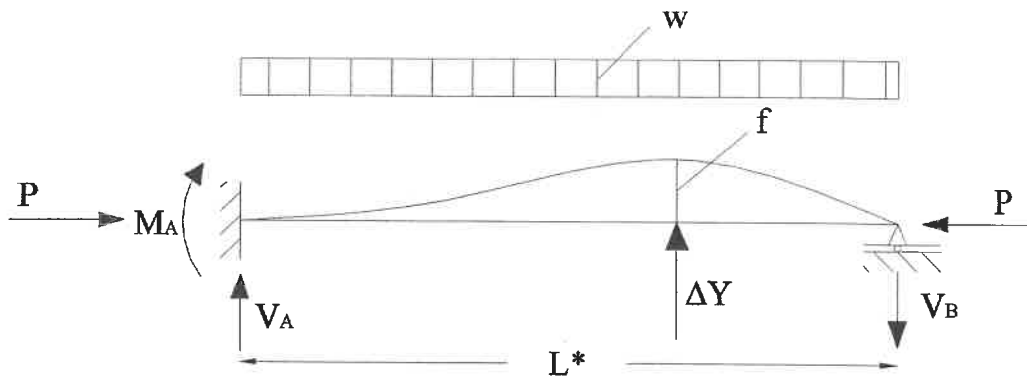
$$(90) \quad \begin{cases} \bar{V}_A = -\frac{\bar{M}_A}{L} - \frac{\Delta Y}{3} + \frac{wL^*}{2} \\ \bar{V}_B = -\frac{\bar{M}_A}{L} + \frac{2\Delta Y}{3} - \frac{wL^*}{2} \end{cases}$$

Εισάγοντας στη σχέση (87) τις εκφράσεις των αντιδράσεων $\bar{V}_A = -\bar{M}_A/L^* - \Delta Y/3$ και $\bar{V}_B = \bar{M}_A/L^* - (2\Delta Y)/3$ λαμβάνουμε:

$$(91) \quad \left\{ \begin{array}{l} -EI_E f''(x) = \bar{M}_A + \left(-\frac{\bar{M}_A}{L} - \frac{\Delta Y}{3} + \frac{wL^*}{2} \right) x - \frac{wx^2}{2} + Pf \\ \text{για } 0 \leq x \leq \frac{2L^*}{3} \text{ (δεξιά)} \\ \\ -EI_E f''(\bar{x}) = -\left(-\frac{\bar{M}_A}{L} + \frac{2\Delta Y}{3} - \frac{wL^*}{2} \right) \bar{x} + \frac{w\bar{x}}{2} + Pf \\ \text{για } 0 \leq \bar{x} \leq \frac{L^*}{3} \text{ (αριστερά)} \end{array} \right.$$

$$(92) \quad \left\{ \begin{array}{l} f''(x) + k^2 f = -\frac{1}{EI_E} \left[\frac{wx^2}{2} + \bar{M}_A \left(1 - \frac{x}{L^*} \right) + \frac{wL^*x}{2} - \frac{\Delta Yx}{3} \right], \text{ για } 0 \leq x \leq \frac{2L^*}{3} \\ \\ f''(\bar{x}) + k^2 f = -\frac{1}{EI_E} \left(\frac{w\bar{x}^2}{2} + \bar{M}_A \frac{\bar{x}}{L^*} + \frac{wL^*\bar{x}}{2} - \frac{2\Delta Y\bar{x}}{3} \right), \text{ για } 0 \leq \bar{x} \leq \frac{L^*}{3} \end{array} \right.$$

$$\text{με } k^2 = \frac{P}{EI_E}.$$



Σχήμα 48
Παραδοχή στατικού μοντέλου
[Λάγιου Μ.]

Τα γενικά ολοκληρώματα των ανωτέρω γραμμικών μη-ομογενών διαφορικών εξισώσεων, τα οποία είναι αθροίσματα της ήδη γνωστής (βλ. παραπάνω) λύσης της ομογενούς εξίσωσης και μιας ειδικής λύσης (που συνδέεται με το β' μέλος των εξισώσεων (88)), δίνονται από τις σχέσεις:

$$(93) \quad \left\{ \begin{array}{l} f = A \sin kx + B \cos kx \frac{1}{P} \left[-\frac{wx^2}{2} + \bar{M}_A \left(1 - \frac{x}{L^*} \right) + \frac{wL^*x}{2} - \frac{\Delta Yx}{2} + \frac{w}{k^2} \right], \\ \quad \text{για } 0 \leq x \leq \frac{2L^*}{3} \\ f = \bar{A} \sin k\bar{x} + \bar{B} \cos k\bar{x} - \frac{1}{P} \left(\frac{w\bar{x}^2}{2} + \bar{M}_A \frac{\bar{x}}{L^*} + \frac{wL^*\bar{x}}{2} - \frac{2\Delta Y\bar{x}}{3} - \frac{w}{k^2} \right), \\ \quad \text{για } 0 \leq x \leq \frac{L^*}{3} \end{array} \right.$$

Με εφαρμογή των κατάλληλων γεωμετρικών και συνοριακών συνθηκών, προκύπτουν τα ζητούμενα. Οι συνοριακές συνθήκες είναι (οι δείκτες δ και α είναι δεξιά και αριστερά αντίστοιχα):

$$f^\delta(0) = f^\alpha(0) = 0 \quad (94), \quad f'^\delta(0) = 0 \quad (95)$$

και οι γεωμετρικές συνθήκες είναι:

$$f^\delta\left(\frac{2L^*}{3}\right) = f^\alpha\left(\frac{L^*}{3}\right) \quad (96)$$

$$f'^\delta\left(\frac{2L^*}{3}\right) = f'^\alpha\left(\frac{L^*}{3}\right) = 0 \quad (97).$$

Οι συνοριακές συνθήκες (94) και (95) προκύπτουν από τις δεσμεύσεις στα άκρα και τη μορφή της γραμμής κάμψης. Οι γεωμετρικές συνθήκες (96) και (97) προκύπτουν από τη θεώρηση για τη γραμμή κάμψης και την απαίτηση

συνέχειας. Η (96) δηλώνει τη συνέχεια της ράβδου στο σημείο $x = \frac{2L^*}{3}$ και οι (97) δείχνουν τη θέση του μέγιστου σφάλματος (βέλους). Από την επίλυση των παραπάνω, μέσω των συνοριακών και των γεωμετρικών συνθηκών, προκύπτουν οι τιμές των σταθερών $A, B, \bar{A}$ και $\bar{B}$, η τιμή της $\bar{M}_A$ (θεμελιώδης ροπή κάμψης) και της κρίσιμης τιμής μήκους $L^* = \frac{L}{2}$.

Από τον πίνακα 5.1, σελ. 142, του [11], λαμβάνονται οι θεμελιώδεις ροπές κάμψης θλιβόμενης ράβδου για διάφορες ράβδους. Οι τιμές για μονόπακτη ράβδο, καταπονούμενη μόνο με κατανεμημένο φορτίο και μόνο με συγκεντρωμένο φορτίο είναι αντίστοιχα:

$$M_A = wL^{*2} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left(1 + \frac{B'}{A'} - \frac{1}{2}C' \right) \quad (98)$$

$$M_A = -\Delta Y L^* \cdot \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{\sin(\beta\xi)}{\sin \beta} - \xi \right) C' \quad (99).$$

όπου:

$$\beta^2 \frac{PL^2}{EI_E} = (kL^*)^2,$$

$$A' = \frac{\beta(\sin \beta - \beta \cos \beta)}{2(1 - \cos \beta) - \beta \sin \beta},$$

$$B' = \frac{\beta(\beta - \sin \beta)}{2(1 - \cos \beta) - \beta \sin \beta},$$

$$C' = \frac{\beta^2 \sin \beta}{\sin \beta - \beta \cos \beta}$$

και $\xi L^* =$ απόσταση συγκεντρωμένου φορτίου από το άκρο με την ελευθέρωση $= \frac{L^*}{3} \Rightarrow \xi = \frac{1}{3}$. Όπως αναφέρθηκε, ισχύει η αρχή της επαλληλίας, αφού τα βέλη κάμψης, και οι καμπτικές ροπές είναι ανάλογες των εγκάρσιων φορτίων. Έτσι, μπορούν να προστεθούν οι τιμές των καμπτικών ροπών. Τελικά, προκύπτει:

$$\bar{M}_A = \frac{1}{\sin kL^* - kL^* \cos kL^*} \left[\frac{w}{2k^2} (4 \sin kL^* - 2kL^* \cos kL^* - 2kL^* - k^2 L^{*2} \sin kL^*) - \frac{\Delta Y L^*}{3} \left(\sin \frac{kL^*}{3} - 3 \sin kL^* \right) \right] \quad (100).$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του φορέα, που είναι ανεξάρτητο της εγκάρσιας φόρτισης, αντιστοιχεί στην τιμή L^* , για την οποία η καμπτική αντίσταση της δοκού τείνει να μηδενιστεί, λόγω αναπτυσσόμενης απείρως μεγάλης ροπής κάμψης. Από τον τύπο (100), γίνεται φανερό ότι αυτό συμβαίνει, όταν $\sin kL^* - kL^* \cos kL^* = 0$ και με $\cos kL^* \neq 0$, (όπου η περίπτωση $\cos kL^* = 0$, είναι απορριπτέα, διότι αφορά το κρίσιμο φορτίο προβόλου και όχι της ράβδου που εξετάζεται), γίνεται: $\tan kL^* = kL^*$, όπου η εξίσωση (εκτός από την προφανή λύση $kL^* = 0$, η οποία αφορά στην περίπτωση χωρίς αξονικό φορτίο) έχει μικρότερη μη μηδενική λύση την:

$$k_{krit} L^*_{krit} = 4,493 \quad (101) \Rightarrow L^*_{krit} \sqrt{\frac{P}{EI_E}} = 4,493, \text{ από την οποία εφόσον θεωρηθεί}$$

ότι ασκείται η $P_{o,Q}$ προκύπτει:

$$L^*_{krit} = 4,493 \sqrt{\frac{EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (102)$$

και με $L_{krit} = 2L^*_{krit} \Rightarrow$

$$L^*_{krit} = 8,986 \sqrt{\frac{EI_E}{P_{o,Q}}} \quad (103).$$

Αν συγκριθεί η τελευταία αυτή σχέση (103), με την αντίστοιχη της ενεργειακής μεθόδου για ευθεία γραμμή (53):

$$L = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_E}{P_{o,Q}}} = 3\pi\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{EI_E}{P_{o,Q}}} = 13,322 \sqrt{\frac{EI_E}{P_{o,Q}}},$$

γίνεται φανερό ότι η πρώτη δίνει πολύ μικρότερες τιμές. Παρόλ' αυτά, η σχέση (105), αναφέρεται σε κρίσιμα μεγέθη δύναμης, ενώ η (53) σε αναμενόμενα μέγιστα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κρίσιμες τιμές θα εμφανίζονταν στην περίπτωση, που δεν υφίστανται αρχικές ατέλειες και δίνουν την τιμή, στην ιδανική κατάσταση, όπου η ροπή κάμψης και το βέλος κάμψης γίνονται άπειρα με την έναρξη του φαινομένου του λυγισμού. Η έναρξη του φαινομένου, με άλλα λόγια, συμβαίνει τη στιγμή που μηδενίζεται η ροπή αντίστασης της τέλειας, χωρίς ελαττώματα, ράβδου. Στην περίπτωση αρχικών ατελειών, δε χρειάζεται δύναμη τόσο μεγάλη, όσο στην περίπτωση της τέλειας ράβδου, αλλά μια μικρότερη τιμή της επαρκεί για να αρχίσει η πλευρική μετατόπιση. Σ' αυτή τη μικρότερη τιμή, που για την περίπτωση της γραμμής είναι η αναμενόμενη μέγιστη δύναμη από θερμοκρασία, αναφέρεται η σχέση (53) και δίνει τελικά, μεγαλύτερη τιμή μήκους λυγισμού.

Προτείνεται, για περαιτέρω διερεύνηση, η επιρροή του αρχικού υποθετικού σφάλματος χάραξης γραμμής, ως αρχικό βέλος (ατέλεια), με χρήση των μεθόδων ελαστικής ευστάθειας. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι και ξεφεύγουν από τους σκοπούς αυτής της εργασίας

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 1) Κατά την σύγκριση των ενεργειακών μεθόδων, προέκυψε ότι παρόλο που οι δύο μέθοδοι του EISENMANN και του ZOBA , λαμβάνουν υπόψη με διαφορετικό τρόπο τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της σταθερότητας της γραμμής, ο συντελεστής ασφάλειας που τελικά υπολογίζουν είναι παρόμοιος.
- 2) Η μέθοδος του EISENMANN μπορεί να επεκταθεί, ώστε να συμπεριληφθεί και η επίδραση του συρμού. Η εφαρμογή για κάποιες συνθήκες τοποθέτησης της μεθόδου, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ασφάλειας, που μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται και απαιτείται να έχει τιμή τουλάχιστον δύο, υπερεκτιμά την επίδραση του συρμού και οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση της γραμμής και πλέον μη συμφέρουσες οικονομικά λύσεις. Είναι δυνατό να επιλεγεί νέα τιμή του συντελεστή ασφάλειας, δεδομένου ότι η επίδραση του συρμού μπορεί να περιγραφεί και ποσοτικά.
- 3) Με εφαρμογές πάνω στη μέθοδο του EISENMANN, όπου έχει ληφθεί υπόψη και η επίδραση του συρμού, μπορούν να προκύψουν διάφοροι συνδυασμοί τιμών των κρίσιμων μεγεθών, ενώ ο συντελεστής ασφάλειας να παραμείνει σταθερός. Ο συντελεστής είναι ανάλογος διάφορων κρίσιμων μεγεθών και όταν αυτά τα μεγέθη υπολογίζονται πρέπει να εξετάζεται η εφικτότητά τους. Τελικά, με μεταβολές των μεγεθών από τα οποία εξαρτάται η σταθερότητα της γραμμής, μπορεί να τοποθετηθεί ασφαλής γραμμή και σε μικρές οριζοντιογραφικές καμπύλες, υπολογίζοντας τον κατάλληλο συνδυασμό κρίσιμων μεγεθών.
- 4) Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η θεωρία της στατικής δευτέρου βαθμού (θεωρία ελαστικής ευστάθειας) για την προσέγγιση του προβλήματος της σταθερότητας της γραμμής. Προκύπτουν πολύπλοκοι τύποι, με την επίλυση των οποίων καταλήγουμε σε απλές σχέσεις παρόμοιας μορφής με αυτές των ενεργειακών μεθόδων. Παρόλ' αυτά, είναι ανάγκη να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της αρχικής ατέλειας, ώστε να προκύψουν πεπερασμένες τιμές των κρίσιμων μεγεθών.

ΠΡΟΤΕΙΝΕΤΑΙ:

- 1) Η περαιτέρω διερεύνηση του συντελεστή ασφάλειας, ώστε να προσδιοριστεί μια νέα λιγότερο συντηρητική τιμή. Με εφαρμογές της διαδικασίας της μεθόδου, με την οποία λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του συρμού, είναι δυνατό να διερευνηθεί ο συντελεστής ασφάλειας και να προταθεί νέα τιμή του.
- 2) Η διερεύνηση της επίδρασης των μεγεθών από τα οποία εξαρτάται η σταθερότητα της γραμμής, ώστε να έχει η συγκόλληση των σιδηροτροχιών ευρύτερη εφαρμογή, με επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού χαρακτηριστικών τοποθέτησης.
- 3) Η εφαρμογή της θεωρίας της ελαστικής ευστάθειας, με τη θεώρηση της αρχικής ατέλειας στο στατικό μοντέλο που παρουσιάστηκε, ώστε να προκύψουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα της ενεργειακής μεθόδου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας κύριο **Κωνσταντίνο Λυμπέρη**, λέκτορα ΕΜΠ, για την καθοδήγησή του και της πολύτιμες συμβουλές του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη δις Ηλιάνα Αδαμοπούλου για τη βοήθειά της και τη γραμματεία Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακών Υποδομών του ΕΜΠ.

Ευχαριστώ τον κύριο Μιχαλόπουλο Μιχαήλ, χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και τη Δασίου Μαρία-Ελένη για τις συμβουλές της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την κατανόησή τους.

V. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Οι πραγματοποιούμενες μεταβολές μήκους της σιδηροτροχιάς εξαιτίας μεταβολών της θερμοκρασίας (διαστολή και συστολή), καθώς και οι δυνάμεις που εμφανίζονται στη σιδηροτροχιά μπορούν να υπολογιστούν, αν θεωρηθεί μια εντελώς ελεύθερη σιδηροτροχιά και μια πλήρως δεσμευμένη. Η παραδοχή που γίνεται ώστε να καταρτιστεί ένα απλοποιημένο διάγραμμα χάσματος αρμού είναι η ορθογωνική κατανομή των δυνάμεων αντίστασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 51, αντικαθιστώντας την τριγωνική κατανομή, που υποτέθηκε στην ακριβή ανάλυση. Λαμβάνεται μια μέση τιμή των δυνάμεων (βλ. παρακάτω).

Είναι:

- για ελεύθερη σιδηροτροχιά: $\sigma_t = 0$

$$\text{διαστολή : } \Delta L_s = a \cdot L_s \cdot \Delta t \text{ [mm]} \quad (104)$$

- για δεσμευμένη σιδηροτροχιά: $\Delta L_s = 0$

$$\text{τάση : } \sigma_t = \frac{\Delta L_s}{L_s} \cdot E = a \cdot \Delta t \cdot E \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (105)$$

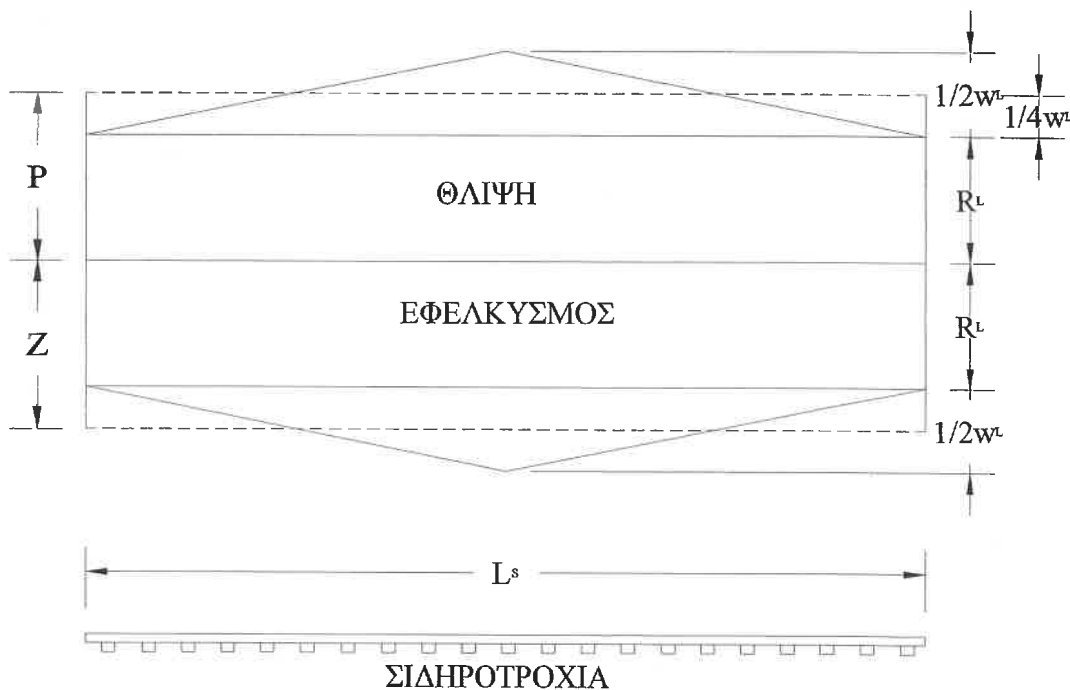
$$\text{δύναμη : } P \text{ ή } Z = a \cdot \Delta t \cdot E \cdot F \text{ [N]} \quad (106)$$

Το πρόβλημα για μεγάλη θλιπτική δύναμη P από θερμοκρασία είναι η εμφάνιση μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων στη σιδηροτροχιά και για κρίσιμες τιμές αυτών, τελικά, ο ριπτασμός της γραμμής, ενώ για μεγάλη εφελκυστική δύναμη Z από θερμοκρασία κινδυνεύει η γραμμή να σπάσει.

Στην περίπτωση των αμφιδετούμενων αρμών, στην οποία πραγματοποιείται σταθερή σύνδεση της σιδηροτροχιάς με τους στρωτήρες και εγκιβωτισμός των στρωτήρων εντός του έρματος, εμφανίζονται δυνάμεις στη σιδηροτροχιά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, ακριβώς όπως και στη γραμμή χωρίς αρμούς. Αυτές, μεταδίδονται στην υποδομή βαθμιαία, μέσω των συνδέσμων και των στρωτήρων, έτσι ώστε στο ελεύθερο άκρο της σιδηροτροχιάς να πραγματοποιείται μόνο ένα μέρος της θεωρητικής μεταβολής μήκους. Έτσι, και η αμφιδετούμενη γραμμή συμπεριφέρεται, για κάποια περιοχή της θερμοκρασίας, όπως και η συγκολλημένη και μόνο στην περιοχή των άκρων της σιδηροτροχιάς πραγματοποιείται μετακίνηση. Θεωρητικές έρευνες έδειξαν, για παράδειγμα, ότι για μήκη σιδηροτροχιών μεγαλύτερα από 30m, εμφανίζονται θλιπτικές δυνάμεις το καλοκαίρι, τόσο μεγάλες όσο και οι αντίστοιχες στις σιδηροτροχιές χωρίς αρμούς. Στο σχήμα 51 είναι:

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- R_L = αντίσταση αμφίδεσης = είναι η αντίσταση του αμφιδέτη στο άκρο της σιδηροτροχιάς [N]
- w_L = αντίσταση τριβής ολίσθησης του στρωτήρα επί του έρματος ανά μέτρο μήκους σιδηροτροχιάς [N/mm] (η αντίσταση τριβής ολίσθησης της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα – σύνδεσμος - είναι σχεδόν διπλάσια της αντίστοιχης στρωτήρα – έρματος)



Σχήμα 51

Κατανομή των δυνάμεων στην αμφιδετούμενη σιδηροτροχιά που υποβάλλεται σε
διαφορά θερμοκρασίας
Πηγή [7]

Αν γίνει η παραδοχή γραμμικής κατανομής, αντικαθιστώντας την τριγωνική μορφή της κατανομής των θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων με μια ορθογωνική κατανομή, προκύπτουν από το σχήμα 51:

- μέση αξονική δύναμη:

$$\bar{P}\eta'\bar{Z} = R_L + w_L \cdot \frac{L_s}{4} \quad [\text{N}] \quad (107)$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- μεταβολή της θερμοκρασίας (από τη θερμοκρασία τοποθέτησης) για να εμφανιστούν οι δυνάμεις P και Z :

$$\Delta t_P \eta' \Delta t_Z = \frac{\bar{P}}{aEF} \text{ [K]} \quad (108)$$

Όταν η μεταβολή θερμοκρασίας Δt γίνει μεγαλύτερη από τη Δt_P ή τη Δt_Z , αρχίζει να κινείται το άκρο της σιδηροτροχιάς, δηλαδή αρχίζει να μεταβάλλεται το χάσμα. Τελικά, με κάποια μεταβολή της θερμοκρασίας θα πραγματοποιηθεί μετακίνηση της σιδηροτροχιάς, όταν υπερνικηθούν οι δυνάμεις αμφίδεσης. Αυτό, περαιτέρω, σημαίνει ότι η πορεία του χάσματος σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας – χάσματος ή θερμοκρασίας – δύναμης, εμφανίζει μια υστέρηση.

Το σημείο στο οποίο ανοίγει ο αρμός είναι καθορισμένο από άποψης θερμοκρασίας, μόνο στο χρονικό σημείο της τοποθέτησης (t_v) της σιδηροτροχιάς. Με την πρώτη μεταβολή της θερμοκρασίας, που κινητοποιεί δυνάμεις μεγαλύτερες της αντίστασης αμφίδεσης, το σημείο περιφέρεται γύρω από τον κύκλο της υστέρησης.

Για τις σιδηροτροχιές χωρίς αρμούς, προκύπτει ότι η συνάρτηση θερμοκρασίας – αξονικών δυνάμεων είναι γραμμική και ότι η ευθεία περνά από το ουδέτερο σημείο ή σημείο τοποθέτησης, με τη θερμοκρασία τοποθέτησης. Τα παραπάνω είναι παραδοχές, οι οποίες απουσία κατάλληλης μεθόδου (επειδή η σιδηροτροχιά δεν έχει κανένα βαθμό ελευθερίας, δεν συμβαίνει και καμία μεταβολή μήκους) δεν έχουν ακόμα αποδειχθεί ότι ισχύουν. Ενδεικτικά, αναφέρεται, ότι η ευθεία από το ουδέτερο σημείο δεν είναι σταθερή, δηλαδή με το πέρασμα του χρόνου η θερμοκρασία μηδενικών τάσεων στη σιδηροτροχιά δεν είναι η ίδια με αυτή της στιγμής της τοποθέτησης [7].

Παρατηρήσεις

Η διαφορά της απλοποιημένης διαδικασίας από την πιο ακριβή διαδικασία είναι στην παραδοχή για την κατανομή της αντίστασης τριβής στρωτήρα – έρματος. Η πιο ακριβής παραδέχεται τριγωνική κατανομή, ενώ η απλοποιημένη ορθογωνική, ομοιόμορφα κατανεμημένη κατανομή. Έτσι, στην πρώτη, η διαφορά θερμοκρασίας, που προκαλεί την εμφάνιση των αντίστοιχων δυνάμεων στη σιδηροτροχιά, είναι ανάλογη του μήκους $L_s/2$, αλλά και οι ενδιάμεσες μεταβολές θερμοκρασίας είναι γραμμική συνάρτηση των ενδιάμεσων τιμών μήκους μετακινούμενης σιδηροτροχιάς από $L_v = 0$ ως $L_v = L_s/2$, η δε διαφορά χάσματος μπορεί να εκφραστεί με μια εξίσωση δευτέρου βαθμού για τις διάφορες τιμές μήκους μετακινούμενης σιδηροτροχιάς. Κατά συνέπεια, το διάγραμμα θερμοκρασίας – χάσματος ακολουθεί παραβολική πορεία δευτέρου βαθμού, κατά τη διαδικασία υπερνίκησης της αντίστασης τριβής στρωτήρα – έρματος. Αντίθετα, στην ορθογωνική κατανομή, δεν εμφανίζεται παραβολικό τμήμα, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας, που προκαλεί την εμφάνιση των αντίστοιχων δυνάμεων στη σιδηροτροχιά, είναι σταθερή, με δεδομένη την δύναμη που

δρα στη σιδηροτροχιά (μέση τιμή $\bar{P}$ ή $\bar{Z}$). Επίσης, το διάκενο του χάσματος του αρμού είναι συνάρτηση πρώτου βαθμού του μήκους στο εξεταζόμενο τμήμα και τελικά η μορφή του διαγράμματος είναι ευθεία γραμμή.

Επιπλέον, στην απλοποιημένη μέθοδο είναι εύκολη και η κατάρτιση των διαγραμμάτων θερμοκρασίας – δυνάμεων, που για την πιο ακριβή μέθοδο είναι αρκετά δυσχερές. Παρακάτω παρατίθενται κάποια παραδείγματα κατάρτισης των διαγραμμάτων χάσματος αρμού και αξονικής δύναμης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, με χρήση της απλοποιημένης μεθόδου.

1.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΑΡΜΟΥ

1.12.1 Παράδειγμα 1

Έστω σιδηροτροχιά VST 36, σε ξύλινους στρωτήρες. Τα δεδομένα είναι τα εξής:

$$E_1 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 4551 \text{ mm}^2$$

$$L_s = 30 \text{ m}$$

$$R_L = 200 \text{ KN}$$

$$w_L = 7,5 \text{ N/mm}$$

$$\Delta t_{\max} = 90^\circ \text{C} \quad (t_o = 60^\circ \text{C} \text{ και } t_u = -30^\circ \text{C})$$

$$t_v = 20^\circ \text{C} \text{ (θερμοκρασία τοποθέτησης – άτονη σιδηροτροχιά)}$$

$$\ell_v = 6 \text{ mm} \text{ (αρχικό χάσμα – χάσμα τοποθέτησης)}$$

α) Μέγιστο διάκενο

Συμβαίνει στη χαμηλότερη θερμοκρασία $t_u = -30^\circ \text{C}$.

Η μέση θλιπτική ή εφελκυστική δύναμη υπολογίζεται:

$$\bar{P} = \bar{Z} = R_L + w_L \cdot \frac{L_s}{4} = 200000 + 7,5 \cdot \frac{30000}{4} = 256,25 \text{ KN}.$$

Η δύναμη αυτή ασκείται στη σιδηροτροχιά μέσω των τριβών αντίστασης αμφίδεσης (R_L) και στρωτήρων – έρματος (w_L).

Η θεωρητική μεταβολή θερμοκρασίας Δt_p για την υπερνίκηση των δυνάμεων αντίστασης τριβής $\bar{P}$, ώστε να αρχίσει να μετακινείται η σιδηροτροχιά είναι:

$$\Delta t_p = \frac{\bar{P}}{aEF} = \frac{256250}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4551} ^\circ C = 23,3^\circ C.$$

Δηλαδή, χρειάζεται να μειωθεί η θερμοκρασία της σιδηροτροχιάς από τη θερμοκρασία $t_v (= 20^\circ C)$ κατά $23,3^\circ C$, για να αρχίσει να ανοίγει ο αρμός. Συνεπώς, για θερμοκρασία $t_{av} = 20 - 23,3 = -3,3^\circ C$ αρχίζει να μεταβάλλεται το χάσμα του αρμού. Το χάσμα διευρύνεται απ' την t_{av} μέχρι την ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία. Είναι:

$$\ell_e = a \cdot L_s \cdot \Delta t_{av}, \text{ με } \Delta t_{av} = |-30 + 3,3| = 26,7^\circ C \Rightarrow$$

$$\ell_e = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 30000 \cdot 26,7 = 9,2 mm.$$

Άρα το μέγιστο χάσμα είναι:

$$\ell_z = \ell_v + \ell_e = 6,0 + 9,2 = 15,2 mm.$$

β) Θερμοκρασία που κλείνει το χάσμα

Αν η σιδηροτροχιά ήταν ελεύθερη (χωρίς αντιστάσεις), θα έπρεπε, για να κλείσει ο αρμός, να ανέβει η θερμοκρασία απ' την t_u κατά:

$$\Delta t_{\kappa\lambda} = \frac{\ell_z}{a \cdot L_s} = \frac{15,2}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 30000} = 44,1^\circ C.$$

Παρόλ' αυτά, η σιδηροτροχιά δεσμεύεται από την αμφίδεση και από την τριβή στρωτήρα – έρμα. Έτσι, πρέπει να υπερνικηθούν τόσο οι αντιστάσεις αμφίδεσης R_L , όσο και τριβής στρωτήρα – έρματος w_L . Οι αντιστάσεις αυτές υπερνικούνται δύο φορές: αφ' ενός ως αποθηκευμένη στη σιδηροτροχιά δύναμη κατά την υπερνίκηση των τριβών από την αρχική μεταβολή χάσματος, αφ' ετέρου για την νέα υπερνίκησή τους. Τελικά, η θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός είναι:

$$t_{\kappa\lambda} = t_u + \Delta t_{\kappa\lambda} + \Delta t_z + \Delta t_p = -30,0 + 44,1 + 2 \times 23,3, \text{ όπου } \Delta t_z = \Delta t_p = 23,3^\circ C$$

$$t_{\kappa\lambda} = 60,7^\circ C (\approx 60^\circ C = t_o).$$

Πρακτικά, ο αρμός δεν κλείνει.

γ) Διάγραμμα χάσματος αρμού – θερμοκρασίας

Η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκε σε θερμοκρασία $t_v = 20^\circ C$, με χάσμα αρμού $\ell_v = 6 mm$ (σημείο V).

Αρχικά, η θερμοκρασία μειώνεται. Η σιδηροτροχιά δεν θα μετακινηθεί, μέχρι η δύναμη σ' αυτήν, από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, να υπερνικήσει τη μέση δύναμη από τις αντιστάσεις $\bar{Z}$ (περιοχή εφελκυσμού). Για να γίνει αυτό, χρειάζεται μείωση της θερμοκρασίας κατά $\Delta t_z = 23,3^\circ C$. Δηλαδή, όπως προαναφέρθηκε η σιδηροτροχιά θα αρχίσει να κινείται στη θερμοκρασία των $t_{av} = -3,3^\circ C$. Στη συνέχεια, το διάκενο του αρμού αρχίζει να διευρύνεται, ανάλογα προς τη μείωση της θερμοκρασίας (εφόσον έχουν υπερνικηθεί οι αντιστάσεις), μέχρι το μέγιστο άνοιγμα ℓ_z , που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία $t_u = -30^\circ C$. Η θερμοκρασία t_u είναι η ελάχιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία σιδηροτροχιάς. Η θερμοκρασία αυξάνεται: το χάσμα του αρμού, αρχικά, παραμένει σταθερό. Για να μετακινηθεί η σιδηροτροχιά πρέπει να υπερνικηθεί η αποθηκευμένη από πριν δύναμη $\bar{Z}$ από τις αντιστάσεις και επιπλέον οι αντιστάσεις από για κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση (κλείσιμο αρμού), δηλαδή η μέση δύναμη $\bar{P}$ (με $\bar{P} = \bar{Z}$). Στη θερμοκρασία $-30^\circ C + 23,3^\circ C = -6,7^\circ C$ εξισορροπείται η $\bar{Z}$ και στη θερμοκρασία $-30^\circ C + 23,3^\circ C + 23,3 = 16,6^\circ C$ εξισορροπείται και η $\bar{P}$ και στη συνέχεια ο αρμός αρχίζει να κλείνει, ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τελικά σε κάποια τιμή της θερμοκρασίας, κλείνει ο αρμός. Το χάσμα του αρμού κλείνει τελειώς στη θερμοκρασία $t_{κλ} = 60,7^\circ C$, ενώ η μέγιστη εμφανιζόμενη θερμοκρασία είναι $t_u = 60^\circ C$.

Η θερμοκρασία μειώνεται εκ νέου: και πάλι πρέπει να υπερνικηθούν δύο φορές οι δυνάμεις που προκύπτουν από τις αντιστάσεις, για να ανοίξει ο αρμός. Η θερμοκρασία, μετά την οποία, ανοίγει ο αρμός είναι : $60,0^\circ C - 23,3^\circ C - 23,3^\circ C = 13,4^\circ C$. Το διάκενο διευρύνεται ανάλογα με τη μείωση της θερμοκρασίας.

Έστω ότι η θερμοκρασία αυτή τα φορά φτάνει τους $-10^\circ C$ (και όχι την ελάχιστη τιμή της $-30^\circ C$) και στη συνέχεια αυξάνει. Η μείωση της θερμοκρασίας είναι $\Delta t' = 13,4 - (-10) = 23,4^\circ C$. Το χάσμα στους $-10^\circ C$ θα είναι: $\ell = a \cdot L_s \cdot \Delta t' = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 30000 \cdot 23,4 = 8mm$. Με την ακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας, ο αρμός θα αρχίσει να κλείνει, ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας, αφού υπερνικηθούν δύο φορές οι τριβές, κ.ο.κ.

δ) Μέγιστες δυνάμεις

Οι θλιπτικές δυνάμεις στη σιδηροτροχιά εμφανίζονται αφού κλείσει ο αρμός και είναι:

$$P_1 = a \cdot E \cdot F \cdot \Delta t_1, \text{ με } \Delta t_1 = t_o - t_{κλ} = 60 - 60,7 = -0,7^\circ C$$

$$P_1 = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4551 \cdot (-0,7) N = -7,7 KN \quad (\text{το μείον αντιστοιχεί στον εφελκυσμό}).$$

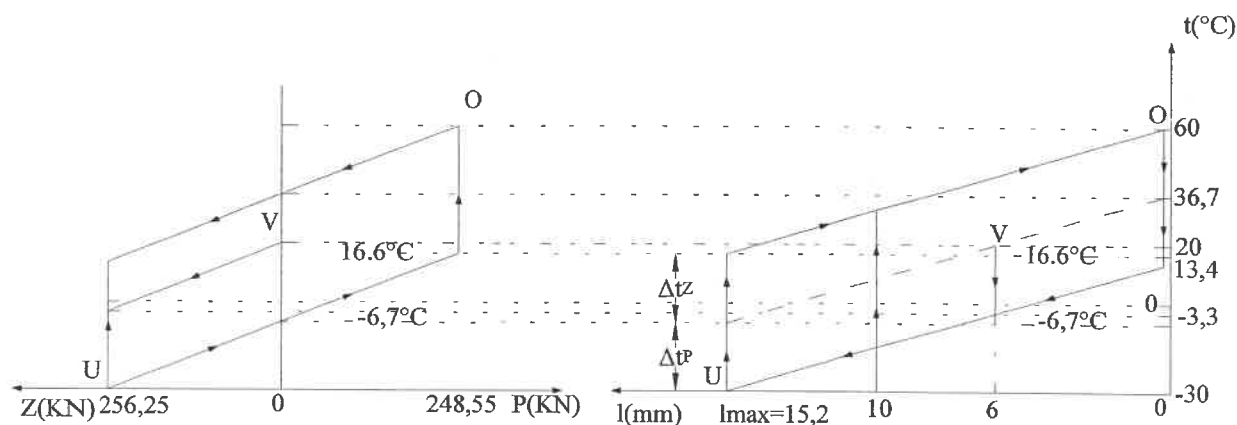
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Η δύναμη P_1 προστίθεται στη μέση τιμή της $\bar{P}$ των θλιπτικών δυνάμεων από τις αντιστάσεις και προκύπτει η μέγιστη εφελκυστική δύναμη $P_{\max}$:

$$P_{\max} = \bar{P} + P_1 = 256,25 + (-7,7) = 248,55 \text{ KN}.$$

Η εφελκυστική δύναμη που εμφανίζεται είναι:

$$Z_{mzx} = \bar{Z} = 256,25 \text{ KN}.$$



Σχήμα 52

Διάγραμμα χασματος / δύναμης – θερμοκρασίας 1^{ου} παραδείματος
[Λάγιου Μ.]

Ακολουθείται η ίδια διαδρομή με αυτή για την κατάρτιση του διαγράμματος χασμάτων. Η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκε σε θερμοκρασία $t_v = 20^\circ\text{C}$, στην οποία δεν υπάρχουν δυνάμεις (ουδέτερη θερμοκρασία). Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, στη σιδηροτροχιά αναπτύσσονται δυνάμεις από τις αντιστάσεις Z . Η δύναμη στη σιδηροτροχιά αυξάνεται. Μόλις φτάσει την τιμή $\bar{Z}$, για θερμοκρασία $-3,3^\circ\text{C}$, ο αρμός ανοίγει. Η δύναμη, από τη στιγμή που αρχίζει η μετακίνηση της σιδηροτροχιάς, παραμένει σταθερή, μέχρι να επιτευχθεί η ελάχιστη θερμοκρασία $t_u = -30^\circ\text{C}$. Με την αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει να υπερνικηθεί η αποθηκευμένη εφελκυστική δύναμη $\bar{Z}$, γεγονός που επιτυγχάνεται στη θερμοκρασία των $-6,7^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία αυξάνεται κι άλλο και σταδιακά (ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας) υπερνικάται η αντίσταση $\bar{P}$, τελικά στην θερμοκρασία των $16,6^\circ\text{C}$. Από τη στιγμή που αρχίζει να μετακινείται η σιδηροτροχιά, η δύναμη παύει να μεταβάλλεται και παραμένει σταθερή μέχρι την επίτευξη της μέγιστης θερμοκρασίας. Τότε, η τιμή της $P_{\max}$ είναι 248,55KN. Με εκ νέου μείωση της θερμοκρασίας, πρέπει να εξισορροπηθεί

η $P_{\max} = 248,55 \text{ KN}$ και η $Z_{\max} = \bar{Z} = 256,25 \text{ KN}$ και αυτό πραγματοποιείται στη θερμοκρασία των $13,4^\circ \text{C}$. Με περαιτέρω μείωση, η δύναμη παραμένει σταθερή, μέχρι την ελάχιστη θερμοκρασία.

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία κατέβει μόνο μέχρι τους -10°C (και όχι στους -30°C), βρισκόμαστε στο ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος, όπου οι αντιστάσεις έχουν υπερνικηθεί και η δύναμη παραμένει σταθερή (μεταβάλλεται, όμως, το διάκενο του χάσματος).

1.12.2 Παράδειγμα 2

Έστω SBBI σε στρωτήρες από σκυρόδεμα.

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 5880 \text{ mm}^2$$

$$L_S = 30 \text{ m}$$

$$R_L = 200 \text{ KN}$$

$$w_L = 7,5 \text{ N/mm}$$

$$\Delta t_{\max} = 90^\circ \text{C} \quad (t_o = 60^\circ \text{C} \text{ και } t_u = -30^\circ \text{C})$$

$$t_v = 20^\circ \text{C} \text{ (θερμοκρασία τοποθέτησης – άτονη σιδηροτροχιά)}$$

$$\ell_v = 6 \text{ mm} \text{ (αρχικό χάσμα – χάσμα τοποθέτησης).}$$

α) Μέγιστο διάκενο

Όμοια με το προηγούμενο παράδειγμα συμβαίνει στη χαμηλότερη θερμοκρασία $t_u = -30^\circ \text{C}$.

$$\begin{aligned} \text{Όμοια} \quad \bar{P} = \bar{Z} = R_L + w_L \frac{L_S}{4} &= 200000 + 7,5 \cdot \frac{30000}{4} = 256,25 \text{ KN} \quad \text{και} \\ \Delta t_p = \frac{\bar{P}}{aEF} &= \frac{256250}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 5880} ^\circ \text{C} = 18,1^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

Δηλαδή, χρειάζεται να μειωθεί η θερμοκρασία της σιδηροτροχιάς από τη θερμοκρασία $t_v (= 20^\circ \text{C})$ κατά $18,1^\circ \text{C}$, για να αρχίσει να ανοίγει ο αρμός.

$$t_{av} = 20 - 18,1 = 1,9^\circ \text{C} \text{ (θερμοκρασία που ανοίγει ο αρμός)}$$

$$\ell_e = a \cdot L_S \cdot \Delta t_{av}, \text{ με } \Delta t_{av} = |-30 - 1,9| = 31,9^\circ \text{C} \Rightarrow$$

$$\ell_e = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 30000 \cdot 31,9 = 11,0 \text{ mm}.$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Άρα, το μέγιστο δυνατό χάσμα είναι:

$$\ell_z = \ell_v + \ell_e = 6,0 + 11,0 = 17,0 \text{ mm}.$$

β) Θερμοκρασία που κλείνει το χάσμα

$$\text{Είναι } \Delta t_{\kappa\lambda} = \frac{\ell_z}{a \cdot L_s} = \frac{17,0}{1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 30000} = 49,3^\circ \text{C}.$$

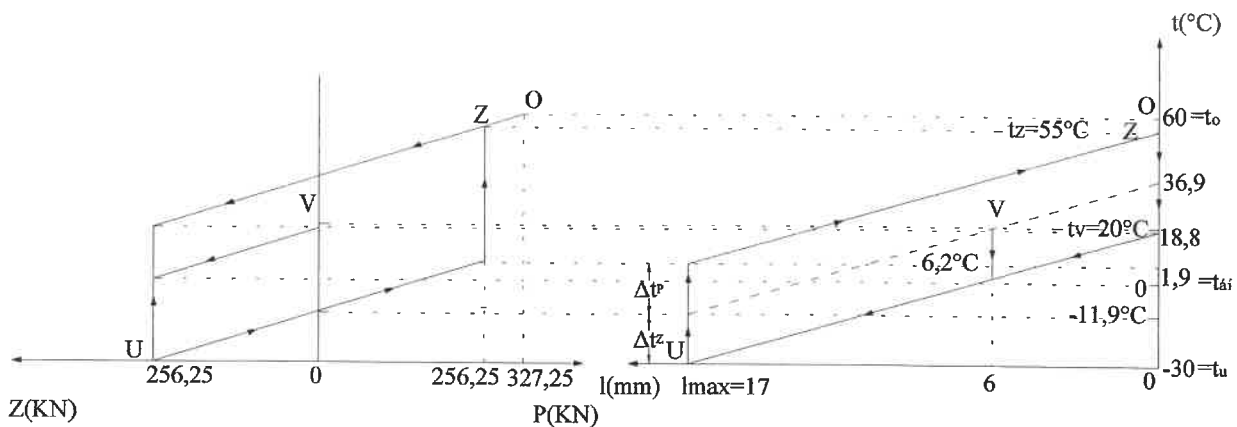
Τελικά, η θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός είναι:

$$t_{\kappa\lambda} = t_u + \Delta t_{\kappa\lambda} + \Delta t_z + \Delta t_p = -30,0 + 49,3 + 2 \times 18,1, \text{ όπου } \Delta t_z = \Delta t_p = 18,1^\circ \text{C}$$

$$t_{\kappa\lambda} = 55,5^\circ \text{C} (< t_o).$$

Η θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός είναι μικρότερη από την μέγιστη. Αυτό σημαίνει ότι όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμοκρασία, ο αρμός έχει ήδη κλείσει και αναπτύσσονται θλιπτικές δυνάμεις στη σιδηροτροχιά (όπως θα φανεί και από τον υπολογισμό του διαγράμματος δυνάμεων – θερμοκρασίας).

γ) Διάγραμμα χάσματος αρμού – θερμοκρασίας



Σχήμα 53

Διάγραμμα χάσματος / δύναμης – θερμοκρασίας 2^{ου} παραδείγματος

[Λάγιου Μ.]

Η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκε σε θερμοκρασία $t_v = 20^\circ \text{C}$, με χάσμα αρμού $\ell_v = 6 \text{ mm}$ (σημείο V).

Για μείωση της θερμοκρασίας, η αντίσταση $\bar{Z}$ υπερνικάται στους 19°C (μείωση κατά $18,1^{\circ}\text{C}$).

Το μέγιστο χάσμα αρμού $\ell_z = 17,0\text{mm}$ εμφανίζεται για θερμοκρασία $t_u = -30^{\circ}\text{C}$.

Για αύξηση της θερμοκρασίας, η αποθηκευμένη αντίσταση $\bar{Z}$ υπερνικάται στους $-30^{\circ}\text{C} + 18,1^{\circ}\text{C} = -11,9^{\circ}\text{C}$ και η $\bar{P}$ στους $-30^{\circ}\text{C} + 18,1^{\circ}\text{C} + 18,1^{\circ}\text{C} = 6,2^{\circ}\text{C}$. Στη συνέχεια μειώνεται το διάκενο του αρμού και στους 55°C κλείνει τελείως. Μέχρι τους (μέγιστους) 60°C , το χάσμα παραμένει μηδενικό. Για μείωση εκ νέου της θερμοκρασίας, για να υπερνικηθεί η αποθηκευμένη $\bar{P}$, πρέπει να φτάσουμε στους $55^{\circ}\text{C} - 18,1^{\circ}\text{C} = 36,9^{\circ}\text{C}$ και για τη $\bar{Z}$ στους $55^{\circ}\text{C} - 18,1^{\circ}\text{C} - 18,1^{\circ}\text{C} = 18,8^{\circ}\text{C}$, οπότε αρχίζει να ανοίγει ο αρμός. Από τη θερμοκρασία των 60°C , μέχρι των 55°C υπερνικάται η αποθηκευμένη θλιπτική δύναμη στη σιδηροτροχιά, που εμφανίζεται μετά το κλείσιμο του αρμού.

δ) Μέγιστες δυνάμεις

Οι μέγιστες δυνάμεις στη σιδηροτροχιά εμφανίζονται αφού κλείσει ο αρμός, και είναι:

$$P_1 = a \cdot E \cdot F \cdot \Delta t_1, \text{ με } \Delta t_1 = t_o - t_{\kappa\lambda} = 60 - 55 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$P_1 = 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 5880 \cdot 5\text{N} = 71\text{KN}.$$

$$\text{Άρα: } P_{\max} = \bar{P} + P_1 = 256,25 + 71 = 327,25\text{KN}.$$

Η εφελκυστική δύναμη που εμφανίζεται είναι:

$$Z_{mzx} = \bar{Z} = 256,25\text{KN}.$$

Ακολουθείται η ίδια διαδρομή. Η σιδηροτροχιά τοποθετήθηκε σε θερμοκρασία 20°C . Η δύναμη στη σιδηροτροχιά αυξάνεται (εφελκυσμός) με μείωση της θερμοκρασίας, μέχρι, στους $19,9^{\circ}\text{C}$, να αρχίσει να ανοίγει ο αρμός, οπότε στη συνέχεια, παραμένει σταθερή και ίση με $256,25\text{KN}$, μέχρι τους -30°C . Με αύξηση της θερμοκρασίας μειώνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις, μέχρι μηδενισμού τους (στοις $-11,9^{\circ}\text{C}$) και στο εξής αυξάνονται οι θλιπτικές δυνάμεις μέχρι τη θερμοκρασία των $6,2^{\circ}\text{C}$, οπότε σταθεροποιείται στην τιμή $256,25\text{KN}$. Μέχρι τους 55°C παραμένουν στην τιμή $256,25\text{KN}$ και στη συνέχεια, αφού κλείσει ο αρμός, αυξάνονται μέχρι την $P_{\max} = 327,25\text{KN}$. Για μείωση της θερμοκρασίας από τους 60°C (μέγιστο), μέχρι τους 55°C , υπερνικάται η αποθηκευμένη θλιπτική δύναμη P_1 από την πίεση των άκρων των δύο σιδηροτροχιών, που συνδέονται, μέχρι τους

$36,9^{\circ}\text{C}$ η θλιπτική δύναμη από την αποθηκευμένη μέση θλιπτική δύναμη $\bar{P}$ και μέχρι τους $18,8^{\circ}\text{C}$ η δύναμη $\bar{Z}$ για να ξεκινήσει και πάλι η κίνηση των σιδηροτροχιών. Από τους $18,8^{\circ}\text{C}$ και μέχρι τους -30°C , η δύναμη παραμένει σταθερή στην τιμή των 256,25KN

2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΑΚΡΙΒΗ ΜΕΘΟΔΟ

1.1.1 Δεδομένα

α) Σταθερές:

Σταθερές μεταβλητές είναι το E : μέτρο ελαστικότητας και το α : θερμικός συντελεστής:

$$E = 2,10 \times 10^5 \text{ N/mm}$$

$$\alpha = 1,15 \times 10^{-5} [1/^{\circ}\text{C}]$$

β) Ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς:

Μεταβλητές είναι:

F : εμβαδόν διατομής σε mm^2

L_s : μήκος σιδηροτροχιάς σε mm

a : απόσταση κέντρου οπής σιδηροτροχιάς από το άκρο σε mm

b : απόσταση μεταξύ των οπών σιδηροτροχιάς σε mm

c : απόσταση κέντρου ακραίας οπής αμφιδέτη από τη γειτονική σε mm

d : απόσταση κέντρου των δύο μεσαίων οπών αμφιδέτη σε mm

ΦB : διάμετρος βλήτρου αμφίδεσης σε mm

ΦR : διάμετρος οπής σιδηροτροχιάς σε mm

ΦE : διάμετρος οπής αμφιδέτη σε mm.

Μέσω των a , b , c , d , ΦB , ΦR , ΦE υπολογίζεται το μέγιστο χάσμα ℓ_z , το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση. Το αποτέλεσμα προκύπτει σε mm.

γ) Ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες και τη θερμοκρασία τοποθέτησης:

Συμπληρώνεται το ανώτατο και το κατώτατο όριο εμφανιζόμενης θερμοκρασίας (αντίστοιχα t_o και t_u) για την περιοχή που γίνεται η τοποθέτηση (σε $^{\circ}\text{C}$).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Συμπληρώνεται η θερμοκρασία τοποθέτησης t_v , ανάλογα με το χάσμα τοποθέτησης ℓ_v .

δ) Ανάλογα με τη διαδικασία τοποθέτησης:

Συμπληρώνεται το χάσμα τοποθέτησης ℓ_v (σε mm) και το σφάλμα χάραξης γραμμής σε οριζοντιογραφία, που συνήθως λαμβάνεται $f=20mm$. Ανάλογα με την τοποθέτηση προκύπτουν, επίσης, και οι τιμές αντίστασης τριβής αμφίδεσης R_L (σε N), αντίστασης τριβής ολίσθησης της σιδηροτροχιάς επί του στρωτήρα και των στρωτήρων επί του έρματος w_L (σε N/ mm).

ε) Μεγέθη προς υπολογισμό

Δt_{gr}	:	μέγιστη διακύμανση της θερμοκρασίας	=	$t_o - t_u [^{\circ}C]$
ℓ_z	:	μέγιστο δυνατό χάσμα αρμού το οποίο επιτρέπει η αμφίδεση	=	$d - 2a + \Phi E + \Phi R - 2\Phi B [mm]$
$\varepsilon\phi\delta$	:	κλίση διαγράμματος θερμοκρασίας - χάσματος αρμού για ελεύθερη σιδηροτροχιά (έδραση και αμφίδεση χωρίς τριβή)	=	$a \cdot L_s$
$\frac{\ell_z}{aL_s}$	=	$\frac{\ell_z}{\varepsilon\phi\delta}$		
Δt_R	:	η απαιτούμενη μεταβολή θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης τριβής αμφίδεσης R_L	=	$\frac{R_L}{aEF} [^{\circ}C]$
Δt_w	:	η απαιτούμενη μεταβολή θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης w_L	=	$\frac{L_s \cdot w_L}{2aEF} [^{\circ}C]$
$\Delta \ell_w$	:	ελαστική μετακίνηση υπό αντίσταση w_L	=	$\frac{L_s^2 \cdot w_L}{4EF} [mm]$
t_L	:	θερμοκρασία στην οποία κλείνει ο αρμός ($\ell_L = 0$)	=	$t_v + \Delta t_R + \frac{\Delta t_w}{2} + \frac{\ell_v}{\varepsilon\phi\delta} [^{\circ}C]$
t_z	:	θερμοκρασία στην οποία το χάσμα αρμού γίνεται ℓ_z	=	$t_v - \Delta t_R - \frac{\Delta t_w}{2} - \frac{\ell_z - \ell_v}{\varepsilon\phi\delta} [^{\circ}C]$
ℓ_u	:	χάσμα αρμού για την ελάχιστη θερμοκρασία t_u	=	$\ell_z - (t_u - t_z)\varepsilon\phi\delta [mm]$
$\ell_{\nu\pi}$	:	για $\ell_u > \ell_z$ το χάσμα παραμένει ℓ_z (μέγιστο) και οι υπολογισμοί γίνονται με το μικρότερο των ℓ_u, ℓ_z .		
P	:	μέγιστη αξονική δύναμη (θλίψη) για την υψηλή περιοχή θερμοκρασίας	=	$\frac{L_s w_L}{4F} + (t_o - t_v)aEF - \ell_v \frac{E}{L_s} [N]$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Z	:	μέγιστη αξονική δύναμη (εφελκυσμός) για τη χαμηλή περιοχή θερμοκρασίας	=	$-\frac{L_S w_L}{4F} + (t_o - t_v) a E F + \ell_v \frac{E F}{L_S} [N]$
---	---	--	---	--

1.1.2 Υπολογισμός στο Excel

Βήματα υπολογισμού:

1. υπολογισμός Δt_{gr}
2. υπολογισμός μέγιστου χάσματος ℓ_z
3. υπολογισμός κλίσης διαγράμματος θερμοκρασίας – χάσματος αρμού για ελεύθερη σιδηροτροχιά
4. υπολογισμός λόγου $\frac{\ell_z}{a L_S} = \frac{\ell_z}{\epsilon \phi \delta}$
5. υπολογισμός απαιτούμενης μεταβολής θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης τριβής αμφίδεσης R_L
6. υπολογισμός απαιτούμενης μεταβολής θερμοκρασίας για την υπερνίκηση της αντίστασης w_L
7. υπολογισμός ελαστικής μετακίνησης υπό αντίσταση w_L
8. υπολογισμός θερμοκρασίας στην οποία κλείνει ο αρμός ($\ell_L = 0$)
9. υπολογισμός θερμοκρασίας στην οποία το χάσμα αρμού γίνεται ℓ_z
10. υπολογισμός χάσματος αρμού για την ελάχιστη θερμοκρασία t_u
11. αν το $\ell_u > \ell_z$ το χάσμα παραμένει ℓ_z (μέγιστο) και οι υπολογισμοί γίνονται με το μικρότερο των ℓ_u, ℓ_z (συνάρτηση IF)
12. υπολογισμός μέγιστης αξονικής δύναμη (θλίψη) για την υψηλή περιοχή θερμοκρασίας
13. υπολογισμός μέγιστης αξονικής δύναμη (εφελκυσμός) για τη χαμηλή περιοχή θερμοκρασίας

3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ZOBA

3.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ας εξετάσουμε την περίπτωση ενός τμήματος της γραμμής του Congo Ocean Railway μεταξύ Bilinga και Loubomo, το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: σιδηροτροχιές U33 (46κιλά/μ), ξύλινοι στρωτήρες, μέση απόσταση μεταξύ των στρωτήρων, 1722 στρ./χμ., PANDROL σύνδεσμοι, σταθερή διατομή έρματος, θερμοκρασία τοποθετήσεως ΣΣΣ: 45°. Ας υπολογίσουμε τη σταθερότητα της γραμμής σε καμπύλη με ακτίνα 300μ.

Ας πάρουμε μέγιστη πιθανή θερμοκρασία σιδηροτροχιών την τιμή 60° . Η διαφορά θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία τοποθέτησεως της ΣΣΣ είναι :

$$\Delta t = 60 - 45 = 15^{\circ}.$$

Για σιδηροτροχιές U33, $S = 59 \text{ εκ.}^2$, κι έτσι η επιτρεπόμενη θλιπτική τάση από θερμοκρασία είναι, σύμφωνα με τη σχέση 52, ίση με:

$$P_o = 2 \times 20601 \times 11 \times 10^{-5} \times 59 \times 15 = 400 \text{ KN για τις τάσεις των δύο σιδηροτροχιών.}$$

Ο Πίνακας 7 δίνει για U33 και $R=300\text{m}$: $A_{cr} = 144$ και $a_{cr} = 0,21$. Επιπλέον, $K_1 = 1,0$ (σταθερή διατομή έρματος), $K_2 = 1,0$ (απόσταση στρωτήρων: 1722 στρ./χμ.), $K_3 = 0,92$ (PANDROL αμφιδέτες), συνεπώς:

$$P_{cr} = \frac{9,81 \times 144}{4^{0,21}} 1,0 \times 1,0 \times 0,92 = 971 \text{ KN.}$$

$$k_s = \frac{971}{400} = 2,4.$$

Ο συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος από δύο. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι ΣΣΣ είναι θερμικά σταθερές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το παράδειγμα 1 αφορά στην περίπτωση, όπου η ουδέτερη θερμοκρασία έχει προσδιοριστεί από πριν. Το πρόβλημα είναι να ελεγχθεί η σταθερότητα 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 (4), και λαμβάνοντας σαν πρώτη προσέγγιση $K_s = 2$, λαμβάνουμε την επιτρεπτή θλιπτική τάση P_a :

$$P_a = \frac{P_{cr}}{2} \quad (63)$$

Η επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας Δt πάνω από τη θερμοκρασία τοποθέτησης της ΣΣΣ βρίσκεται από τη σχέση (58), ως εξής:

$$\Delta t = \frac{P_a}{2 E a S} \quad (64)$$

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Η άσκηση συνίσταται στον καθορισμό της ελάχιστης θερμοκρασίας τοποθέτησης στις παρακάτω συνθήκες: σιδηροτροχιές S40 (36κιλά/μ), χαλύβδινοι στρωτήρες, απόσταση στρωτήρων 1722 στρ./χμ., σταθερή διατομή έρματος, $R = 150\mu$. Μέγιστη πιθανή θερμοκρασία σιδηροτροχιάς: 60°C .

Ο πίνακας 7 δίνει για σιδηροτροχιές S40 και $R = 150\mu$: $A_{cr} = 106$ και $a_{cr} = 0,178$. Οι άλλες παράμετροι είναι: $K_1 = 1,25$, $K_2 = 1,0$, $K_3 = 0,9$.

$$P_{cr} = \frac{9,81 \times 106}{4^{0,178}} 1,25 \times 1,0 \times 0,9 = 915 \text{ KN, οπότε}$$

$$P_a = \frac{915}{2} = 457,5 \text{ KN.}$$

Λαμβάνοντας ως πρώτη προσέγγιση $K_s = 2$, θα λάβουμε:

$$\Delta t = \frac{457,5}{2 \times 20601 \times 0,000011 \times 46,55} = 22^\circ \text{C.}$$

Έτσι, η ελάχιστη θερμοκρασία τοποθέτησης είναι $60^\circ \text{C} - 22^\circ \text{C} = 38^\circ \text{C}$.

3.3 ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ

Τα δύο παραδείγματα, που παρατέθηκαν παραπάνω, δείχνουν πόσο εύκολος είναι ο υπολογισμός της σταθερότητας των ΣΣΣ μέσω της μεθόδου του ZOBA.

Παρόλ' αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι σα γενικός κανόνας η θερμοκρασία τοποθετήσεως είναι ίδια για τους περισσότερους Σιδηρόδρομους σχετικά με τον τύπο του εξοπλισμού της γραμμής και επίσης θεωρείται ότι θα πρέπει να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τις μέσες μηνιαίες μέγιστες θερμοκρασίες σιδηροτροχιάς που συναντώνται στους Σιδηρόδρομους.

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα θεωρητικά αποτελέσματα των ελάχιστων κρίσιμων θλιπτικών τάσεων που προκαλούν τον λυγισμό, που προκύπτουν από τη σχέση (67), ανταποκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν στην Ιαπωνία για μετρική γραμμή επάνω σε ξύλινους στρωτήρες.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον καθορισμό της εγκάρσιας αντίστασης της γραμμής σε ξύλινους στρωτήρες που περιγράφονται παραπάνω συμπληρώνουν τις σποραδικές πληροφορίες που είναι διαθέσιμες σήμερα για τη μετρική γραμμή. Προσφέρουν μια καλύτερη εικόνα αυτού του σημαντικού μηχανικού παράγοντα για τη μελέτη της σταθερότητας της ΣΣΣ.

Όταν υπολογίζεται η σταθερότητα των ΣΣΣ σε άλλους στρωτήρες εκτός από ξύλινους, οι τιμές των παραμέτρων K_1 και K_3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μια πρώτη προσέγγιση ως εξής:

- χαλύβδινοι στρωτήρες: $K_1 = 1,25$, $K_3 = 0,9$
- στρωτήρες από σκυρόδεμα: $K_1 = 1,4$, $K_3 = 1,15$ (σύνδεσμοι Sk1)

Οι δοκιμές για τον καθορισμό της εγκάρσιας αντίστασης της γραμμής με τους δύο αυτούς τύπους στρωτήρων πρέπει να διεξάγονται έτσι ώστε να επιβεβαιώνονται οι αντίστοιχες τιμές των διαφορετικών παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς [4].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) Αναφορές στο κείμενο

- [1] Γιώτη Αποστόλου, «Σιδηροδρομική», 1981, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [2] Shigeru MIURA, Hideaki YANAGAWA, "Extended Applicability of Continuous Welded Rail – Its application to turnout and sharp curve-", August 1992, Japanese Railway Engineering No. 120
- [3] BLATT, «Διατομές σιδηροτροχιών»
- [4] B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- [5] ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»
- [6] Κορωνάιος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- [7] ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Metersrurbahnen", Zürich 1984, Stufe 1, Band 2
- [8] Αμπακούμπκιν Κ.Γ., «Σιδηρόδρομοι», 2000, Εκδόσεις Συμμετρία
- [9] Shunici SUZUKI, "Application of Long Rails in Japan", December 1987, Japanese Railway Engineering No. 104
- [10] William W. Hay, "Railroad Engineering", 1982
- [11] Κουνάδης Αντώνιος, «Ελαστική ευστάθεια», Εκδόσεις Συμμετρίας
- [12] Κουνάδης Αντώνιος, «Σιδηρές II», Εκδόσεις Συμμετρίας
- [13] MEIER, „Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung“, 1937
- [14] PETER LÄTSCH, "Untersuchungen des Einflusses der Züge auf die Sicherheit gegen Gleisverwerfungen“, 1971, Deutsche Eisenbahntechnik, No 19
- [15] Franz Josef GALLATI, "Stabilitätsprobleme lückenloser Meterspurgleise in engen Radien und in Übergangsbogen“, Abhandlung zur Erlangung des Titels „Doktor der technischen Wissenschaften“ der Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich
- [16] EISENMANN J., MATTNER L., "Gleisverwerfung", 1988, Technische Universität München

2) Βιβλιογραφία που εξετάστηκε

- [17] Βαρδουλάκης Ι., «Μηχανική ΙΙ», 1998, Εκδόσεις Συμμετρία
- [18] Α.Γ. Αγγωνστόπουλος, Β.Π. Παπαδόπουλος, «Επιφανειακές Θεμελιώσεις», 1990, Εκδόσεις Συμμετών
- [19] “Optimierung des Oberbaus bei Metersrurbahnen”, Zürich 1984, Stufe 1, Band 1
- [20] DB FACHBUCH, “Oberbauschweißen”, Eisenbahn - Fachverlag Heidelberg Mainz, 1980
- [21] Lichtberger Bernard, “Handbuch Gleis”, Tetzlaff Verlag, 2003

3) Ιστοσελίδες

- [22] Σύνδεσμος Vossloh Skl 14, www.vossloh.com

ΣΧΗΜΑΤΑ

- (1) Τυπική διατομή σιδηροδρομικής γραμμής
Πηγή: Γιώτη Αποστόλου, «Σιδηροδρομική», 1981, Εκδόσεις ΕΜΠ
- (2) Σιδηροτροχιά UIC 54
Πηγή: BLATT, «Διατομές σιδηροτροχιών»
- (3) Ελαστικός σύνδεσμος DS 18, για ξύλινους στρωτήρες
Πηγή: Αμπακούμκιν Κ.Γ., «Σιδηρόδρομοι», 2000, Εκδόσεις Συμμετρία
- (4) Σύνδεσμος Vossloh Skl 14
Πηγή: ιντερνετ
- (5) Σύνδεσμος PANDROL-e
Πηγή: Αμπακούμκιν Κ.Γ., «Σιδηρόδρομοι», 2000, Εκδόσεις Συμμετρία
- (6) Ύψος πτώσης του τροχού στο διάκενο του αρμού
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (7) Σχηματισμός βαθμίδας στον αρμό
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (8) Δημιουργία γόνατος
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (9) Διαμόρφωση αρμού
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (10) Διαμόρφωση σύνδεσης (αρμού) σιδηροτροχιών μεγάλου μήκους – αρμός διαστολής
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (11) Επαφή της κεφαλής/κορμού της σιδηροτροχιάς και σύνδεση του αμφιδέτη
Πηγή: William W. Hay, “Railroad Engineering”, 1982
- (12) Εγκάρσιες δυνάμεις στην αμφίδεση
Πηγή: William W. Hay, “Railroad Engineering”, 1982
- (13) Διάγραμμα σύγκρισης θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα και σιδηροτροχιάς
Πηγή: ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»

- (14) Ανύψωση και μετακίνηση εγκάρσια και οριζόντια της σιδηροδρομικής γραμμής
Πηγή: Κορωναίος Νικ.-Ιωαν. Γ., «Σιδηροδρομική επιδομή», Θεσσαλονίκη, 1963
- (15) 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: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (16) Μέγιστο δυνατό χάσμα αρμού σιδηροτροχιών
Πηγή: ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»
- (17) Παράσταση χασμάτων ελεύθερων σιδηροτροχιών
Πηγή: ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»
- (18) Εικόνα χάσματος για δεσμευμένη σιδηροτροχιά
Πηγή: ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»
- (19) Παράσταση χάσματος για Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές
Πηγή: ΟΣΕ, «Επί της συγκολλήσεως σιδηροτροχιών τύπου S33β σε μήκος 54,00 και 36,00μ.»
- (20) Γραμμή κάμψης 1
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (21) Γραμμή κάμψης 2
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (22) Ακτινική δύναμη q
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (23) Στοιχειώδες τμήμα τόξου ακτίνας R και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (24) Ισοδύναμες δυνάμεις στη σιδηροτροχιά
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937

- (25) Διάγραμμα ισοδύναμων δυνάμεων S σε συνάρτηση με την παραμόρφωση f
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (26) Γραμμή κάμψης με ένα άκρο ελεύθερο να μετακινείται
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (27) Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 1
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (28) Δύναμη συρμού ΔY στη γραμμή κάμψης 2
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (29) Εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση πριν από εργασίες συντήρησης για στρωτήρες από μπετόν και ξύλο (στατική τιμή: χωρίς την επίδραση του συρμού)
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (30) Διάγραμμα που προέκυψε από πειράματα: εγκάρσια αντίσταση μετακίνησης για γραμμή με ξύλινους στρωτήρες πριν και μετά εργασιών συντήρησης
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (31) Παραδοχή για την εγκάρσια αντίσταση σε μετακίνηση w
Πηγή: Franz Josef GALLATI, "Stabilitätsprobleme lückenloser Meterspurbahnen in engen Radien und in Übergangsbogen", Abhandlung zur Erlangung des Titels "Doktor der technischen Wissenschaften" der Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich
- (32) Γραμμή κάμψης σιδηροτροχιάς με ανύψωση υπό τη φόρτιση ενός κατακόρυφου φορτίου (ZIMMERMANN)
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (33) Παραδοχή γραμμής κάμψης για ευθεία γραμμή
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (34) Παραδοχή γραμμής κάμψης για καμπύλη γραμμή
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2

- (35) Αντίσταση της γραμμής για ξύλινους στρωτήρες
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (36) Αντίσταση συνδέσμων στην περιστροφή της σιδηροτροχιάς ως προς τον στρωτήρα, για μικρές τιμές του β
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (37) Παραδοχή γραμμής κάμψης: μέθοδος ZOBA
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (38) Τιμές συντελεστή K_1
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (39) Τιμές συντελεστή K_2
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (40) Παράσταση την κλίσης i_o , της μεθόδου ZOBA (ποιοτικά)
 [Λάγιου Μ.]
- (41) Σύγκριση μεθόδων: γραμμή χωρίς πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια (εγκάρσια αντίσταση $w=8\text{N/mm}$, $K_1=1,40$)
 [Λάγιου Μ.]
- (42) Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια ανά 3 στρωτήρες (εγκάρσια αντίσταση $w=9,6\text{N/mm}$, $K_2=1,68$)
 [Λάγιου Μ.]
- (43) Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια ανά 2 στρωτήρες (εγκάρσια αντίσταση $w=11,2\text{N/mm}$, $K_2=1,96$)
 [Λάγιου Μ.]
- (44) Σύγκριση μεθόδων: γραμμή με πλευρικά εξασφαλιστικά τεμάχια σε κάθε στρωτήρα (εγκάρσια αντίσταση $w=15,2\text{N/mm}$, $K_2=2,66$)
 [Λάγιου Μ.]
- (45) Πρόσθετες αξονικές δυνάμεις στη σιδηροτροχιά, σε συνάρτηση με την απόσταση x από το τρωτό σημείο (καταπονούμενη γραμμή)
Πηγή: PETER LÄTSCH, "Untersuchungen des Einflusses der Züge auf die Sicherheit gegen Gleisverwerfungen", 1971, Deutsche Eisenbahntechnik, No 19
- (46) Ελάχιστη ακτίνα για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και τιμές εγκάρσιας αντίστασης
 [Λάγιου Μ.]

- (47) Ακτίνα για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας και τιμές κρίσιμου σφάλματος χάραξης
[Λάγιου Μ.]
- (48) Παραδοχή στατικού μοντέλου
[Λάγιου Μ.]
- (49) Ισοδύναμοι φορείς και αντιδράσεις στατικού μοντέλου
[Λάγιου Μ.]
- (50) Σύμβαση πρόσημων για τα εντατικά μεγέθη
[Λάγιου Μ.]

ΠΙΝΑΚΕΣ

- (1) Στοιχεία διατομών για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (2) Ισοδύναμη ακαμψία γραμμής κατά EISENMANN
Πηγή: ETH, "Optimierung des Oberbaus bei Meterspurbahnen", Zürich, 1984, Stufe 1, Band 2
- (3) Εκφράσεις των ενεργειών
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (4) Εκφράσεις των ισοδύναμων δυνάμεων
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (5) f' για μακριά σιδηροτροχιά
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (6) f' για μακριά σιδηροτροχιά με επίδραση συρμού
Πηγή: MEIER, "Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung", 1937
- (7) Τιμές συντελεστών A_{cr} και a_{cr} της μεθόδου ZOBA
Πηγή: B. ZOBA, "Stability of continuous welded rails on metre-gauge track", June 1989, Rail International
- (8) Τιμή της w ανάλογα με την τοποθέτηση πλευρικών εξασφαλιστικών
[Λάγιου Μ.]
- (9) Τιμές των A_{cr} και a_{cr} , ανάλογα με τον τύπο της σιδηροτροχιάς και για ακτίνα $R = 200m$
[Λάγιου Μ.]
- (10) $\Delta t_{krit} [^{\circ}C]$, για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών κατά EISENMANN
[Λάγιου Μ.]
- (11) $P_{cr} [KN]$ και $\Delta t_{cr} [^{\circ}C]$, για διάφορους τύπους σιδηροτροχιών κατά ZOBA
[Λάγιου Μ.]
- (12) Συντελεστής ασφαλείας για τις δύο μεθόδους $k_s = \frac{\Delta t_{krit}}{\Delta t}$ ή $k_s = \frac{\Delta t_{cr}}{\Delta t}$
[Λάγιου Μ.]

- (13) Υπολογισμός L_v και $\Delta t_{krit,Q}$ με την επίδραση συρμού σε ευθεία γραμμή
[Λάγιου Μ.]
- (14) Υπολογισμός L_v και $\Delta t_{krit,Q}$ με την επίδραση συρμού σε καμπύλη γραμμή
[Λάγιου Μ.]
- (15) Τιμές συντελεστή για διάφορες μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας άνω της ουδέτερης θερμοκρασίας
[Λάγιου Μ.]
- (16) Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w=9N/mm$ και $f_o=20mm$
[Λάγιου Μ.]
- (17) Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w=10N/mm$ και $f_o=20mm$
[Λάγιου Μ.]
- (18) Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w=11N/mm$ και $f_o=20mm$
[Λάγιου Μ.]
- (19) Ελάχιστη ακτίνα για εγκάρσια αντίσταση $w=12N/mm$ και $f_o=20mm$
[Λάγιου Μ.]
- (20) Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'=20mm$ και $w=9N/mm$
[Λάγιου Μ.]
- (21) Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'=40mm$ και $w=9N/mm$
[Λάγιου Μ.]
- (22) Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'=60mm$ και $w=9N/mm$
[Λάγιου Μ.]
- (23) Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'=80mm$ και $w=9N/mm$
[Λάγιου Μ.]
- (24) Ακτίνα για σφάλμα χάραξης $f'=100mm$ και $w=9N/mm$
[Λάγιου Μ.]

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

- (1) Φωτογραφία στο εξώφυλλο
Πηγή: EISENMANN J., MATTNER L., “Gleisverwerfung”, 1988,
Technische Universität München

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελίδα
<u>Σύνοψη</u>	2
<u>Περίληψη</u>	3
<u>Συμβολισμοί</u>	4
<u>Γενικά</u>	8
<u>I. Εισαγωγή</u>	8
1. Στοιχεία Επιδομής	8
1.1 Σιδηροτροχιά	9
1.2 Στρωτήρες και σύνδεσμοι	11
1.3 Έρμα	15
2. Σύνδεση σιδηροτροχιάς	16
2.1 Αμφιδετης	19
2.2 Συγκόλληση αρμού	22
<u>II. Χάσματα αρμών – Εισαγωγή στη σταθερότητα θέσης γραμμής</u> <u>Θεωρητικό υπόβαθρο</u>	29
1. Χάσματα αρμών	29
1.1 Δεδομένα υπολογισμού	29
1.2 Γενικές αρχές	32
1.3 Διαχωρισμός βραχέων και μακριών σιδηροτροχιών	33
1.4 Διάγραμμα χάσματος ελεύθερης σιδηροτροχιάς	34
1.5 Διάγραμμα χάσματος δεσμευμένης σιδηροτροχιάς	34
1.6 Διαχωρισμός μακριών και Συνεχώς Συγκολλημένων Σιδηροτροχιών	34
1.7 Διάγραμμα χάσματος Συνεχώς Συγκολλημένης Σιδηροτροχιάς	35
1.8 Παράγοντες που επηρεάζουν το διάγραμμα	35
1.9 Τάσεις από θερμοκρασία	35
2. Η σταθερότητα της γραμμής	36
2.1 Ο λυγισμός γενικά	36
2.2 Σταθερότητα των γραμμών	37

<u>III. Διαγράμματα χασμάτων αρμών – Μέθοδοι υπολογισμού της σταθερότητας θέσης γραμμής</u>	48
1. Κατάρτιση διαγραμμάτων χασμάτων αρμού	48
1.1 Παράγοντες	48
1.2 Κλιματολογικές συνθήκες και όρια διακύμανσης της θερμοκρασίας	48
1.3 Μακριές και βραχείες σιδηροτροχιές	50
1.4 Διάγραμμα χασμάτων αρμού	51
1.5 Ανάλυση διαγραμμάτων χασματος	59
1.6 Παρατηρήσεις επί του διαγράμματος	62
1.7 Συνεχώς Συγκολλημένη Σιδηροτροχιά	63
1.8 Διάγραμμα χασματος για τις ΣΣΣ	64
1.9 Τάσεις από θερμοκρασία στη σιδηροτροχιά	65
1.10 Εκλογή αφετηρίας υπολογισμού χασμάτων – Περιορισμοί	66
2. Υπολογισμός σταθερότητας γραμμής	69
2.1 Θεωρία MEIER	69
2.2 Μέθοδος EISENMANN	82
2.3 Μέθοδος ZOBA	93
<u>IV. Σύγκριση μεθόδων EISENMANN και ZOBA</u>	102
1. Μέθοδος EISENMANN	102
2. Μέθοδος ZOBA	106
3. Παράδειγμα εφαρμογής	110
4. Σύγκριση μεθόδων EISENMANN και ZOBA	112
<u>V. Υπολογισμός EISENMANN – Σταθερότητα γραμμής με επίδραση συρμού</u>	126
1. Υπολογισμοί EISENMANN	126
1.1 Ευθεία γραμμή χωρίς την επίδραση συρμού	126
1.2 Καμπύλη γραμμή χωρίς την επίδραση συρμού	129
1.3 Συντελεστής ασφάλειας	131
2. Σταθερότητα γραμμής με επίδραση συρμού	132
2.1 Επίδραση διερχόμενου συρμού στη σταθερότητα γραμμής	132
2.2 Ευθεία γραμμή με επίδραση συρμού	136
2.3 Καμπύλη γραμμή με επίδραση συρμού	137
2.4 Εφαρμογές	138
2.5 Διερεύνηση του συντελεστή ασφάλειας των μεθόδων που δε λαμβάνουν υπόψη την επίδραση συρμού	142

3. Υπολογισμός επιρροής οριζοντίων δυνάμεων με θεωρία ελαστικής ευστάθειας	165
3.1 Γενικά	165
3.2 Αντικείμενο	165
3.3 Δεδομένα και παραδοχές	168
3.4 Ζητούμενα	170
3.5 Μεθοδολογία	170
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	176
<u>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</u>	177
<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	178
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>	179
1. Απλοποιημένη διαδικασία κατάρτισης διαγραμμάτων	179
1.1 Παράδειγμα κατάρτισης διαγράμματος χάσματος αρμού	182
2. Αλγόριθμος	189
2.1 Υπολογισμός χασμάτων αρμού με την ακριβή μέθοδο	189
3. Παράδειγμα εφαρμογής μεθόδου ZOBA	191
3.1 Παράδειγμα 1	191
3.2 Παράδειγμα 2	192
3.3 Επισημάνσεις για τη θερμοκρασία τοποθέτησης	193
3.4 Συμπεράσματα	193
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	194
<u>ΣΧΗΜΑΤΑ</u>	196
<u>ΠΙΝΑΚΕΣ</u>	201
<u>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ</u>	203
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	204