

Φόρτιση Στρωτήρων από Σκυρόδεμα και Εφαρμογή για Διμερείς Στρωτήρες

ΤΕΕ Τεχνικά Χρονικά Volume 14, 2/1994, σελ. 23-42

1.- Εισαγωγή

Η χρησιμοποίηση στη σιδηροδρομική γραμμή, στρωτήρων από σκυρόδεμα, έφερε στην επιφάνεια την ανάγκη ακριβούς προσδιορισμού της φόρτισης που καταπονεί το στρωτήρα.

Από τις αρχές του αιώνα μας μέχρι σήμερα έχουν εμφανισθεί διεθνώς διάφοροι τύποι στρωτήρων από σκυρόδεμα ολόσωμοι και διμερείς. Τούτο οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως στις ιδιαιτερότητες κάθε δικτύου, τις μεταβαλλόμενες συνθήκες κυκλοφορίας και γραμμής σε κάθε χώρα, στη συνέχιση της έρευνας επί του θέματος. Η διεθνής βιβλιογραφία περιέχει αρκετούς τύπους διαφόρων ερευνητών για τον υπολογισμό της φόρτισης των στρωτήρων.

Στην Ελλάδα μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται διμερείς στρωτήρες από σκυρόδεμα. Έπειτα από την εμφάνιση ρηγματώσεων σε διμερείς στρωτήρες στρωμένους στο Ελληνικό δίκτυο τύπου U3, σε ποσοστό 60% περίπου του συνολικού αριθμού τους [12], κατέστη αναγκαία η διερεύνηση του θέματος για την αναζήτηση των αιτίων που το προκάλεσαν, δεδομένου ότι η μέχρι σήμερα διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία δεν δίδει ικανοποιητική αιτιολόγηση του φαινομένου. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα προηγμένα Ευρωπαϊκά δίκτυα από τα οποία προέρχεται ο κύριος όγκος της βιβλιογραφίας δεν αντιμετωπίζουν συνθήκες παρόμοιες με τις υπάρχουσες στο Ελληνικό δίκτυο, όπου εμφανίζονται ορισμένες ιδιαιτερότητες. Για το σκοπό αυτό διεξήχθη έρευνα με αντικείμενο το σύστημα «στρωτήρας - σκύρο» για τις Ελληνικές συνθήκες (τροχαίο υλικό, ποιότητα σκύρου, επιφάνεια κύλισης, επίπεδο συντήρησης κ.λ.π). Η έρευνα διεξήχθη από τον ΟΣΕ σε συνεργασία με το τμήμα Ερευνών «Γραμμή» των Γαλλικών Σιδηροδρόμων (SNCF) [3],[4],[10],[11] και με συμμετοχή του Ε.Μ.Π. [5], της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ. και του ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ όσον αφορά εξειδικευμένα θέματα - τομείς. Περιελάμβανε διερεύνηση των φαινομένων που παρουσιάστηκαν επί γραμμής, εργαστηριακούς ελέγχους και πειράματα επί των επιμέρους υλικών, με σκοπό την αναζήτηση των αιτίων που προκάλεσαν τη συστηματική εμφάνιση ρηγματώσεων στους στρωτήρες.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού και διερευνώνται οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού των στρωτήρων από σκυρόδεμα για τις δυσμενέστερες συνθήκες του Ελληνικού δικτύου, προτείνεται συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού της φόρτισης που αναλαμβάνει κάθε στρωτήρας και γίνεται εφαρμογή για διμερείς στρωτήρες.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

M	η ροπή που καταπονεί τη δοκό επί ελαστικής έδρασης	kNm
y	βύθιση	mm
E	μέτρο ελαστικότητας της σιδηροτροχιάς	KN/mm ²
I	ροπή αδράνειας της σιδηροτροχιάς	mm ⁴
Q_{τρ}	φορτίο τροχού	kN

R	γενικά αντίδραση του στρωτήρα που λαμβάνεται ως φόρτιση του ίδιου του στρωτήρα	kN
R_{τρ}	στατική αντίδραση του στρωτήρα στο φορτίο τροχού	kN
R_a	αντίδραση του στρωτήρα στη φόρτιση λόγω υπερύψωσης	kN
$\frac{R_{στ}}{A}$	συνολική στατική αντίδραση συντελεστή $A = R_{τρ}/Q_{τρ}$	kN
I	η απόσταση των στρωτήρων	m
ρ	συντελεστής αντίδρασης του στρωτήρα	kN/mm
ρ_i	συντελεστής αντίδρασης επιμέρους υλικών	kN/mm
ε	απόσταση κατακόρυφων αξόνων σιδηροτροχιών	mm
Q_a	φόρτιση οφειλόμενη στην ανεπάρκεια υπερύψωσης	kN
h_{KB}	το ύψος του K.B του οχήματος από κεφαλής σιδηροτροχιάς	mm
a	ανεπάρκεια υπερύψωσης	mm
M.A.M	συντομογραφία για τις μη ανηρτημένες μάζες οχημάτων	
m_{MAM}	συμβολισμός των M.A.M σε μαθηματικούς τύπους	t
hr	η δυναμική ακαμψία της γραμμής	kN/mm
σ(ΔR_{MAM})	μέση τυπική απόκλιση της φόρτισης λόγω M.A.M	kN
K₁	πειραματικά καθοριζόμενος συντελεστής που εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς και το όχημα	sec ⁻¹
K_a	συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς και το όχημα και προσδιορίζεται σχετικά, βάσει μετρήσεων σε δεδομένη γραμμή	
V	ταχύτητα του οχήματος	Km/h
A.M.	συντομογραφία για τις ανηρτημένες μάζες οχήματος	
$\bar{P}$	πιθανότητα	
σ(ΔR_{AM})	τυπική απόκλιση του φορτίου που προκαλείται λόγω A.M.	kN
N_L	η μέση τυπική απόκλιση της υψομετρικής κατάστασης της γραμμής	mm
R_λ	συνολική αντίδραση - φορτίο λειτουργίας για τη διαστασιολόγηση του σκυροδέματος (οπλισμένου ή προεντεταμένου) του ημιστρωτήρα	kN
R_u	συνολική αντίδραση - φορτίο στην κατάσταση	

	οριακής θραύσης για τη διαστασιολόγηση του σκυροδέματος του ημιστρωτήρα	
2e	κατανομή της αντίδρασης - φορτίου του ημιστρωτήρα στον ουδέτερο άξονα	kN
2d	μήκος ημιστρωτήρα	mm
f	βοηθητικός συντελεστής	mm
b	πλάτος πέλματος σιδηροτροχιάς	mm
x	απόσταση ουδέτερου άξονα από την άνω επιφάνεια ημιστρωτήρα	mm
λ	μοχλοβραχίονας των δυνάμεων που καταπονούν τον ημιστρωτήρα	mm
Q_{op}	μέγιστη αποδεκτή οριζόντια δύναμη εξασκούμενη από τα οχήματα στη γραμμή	kN
M_{op}	η ροπή που καταπονεί τον ημιστρωτήρα λόγω Q _{op}	kNm
d_o	ύψος ημιστρωτήρα	mm
σ_s	όριο ελαστικότητας του χάλυβα της συνδετήριας ράβδου, για διμερείς στρωτήρες	kN/mm ²
Fe_{ΣΡ}	διατομή συνδετήριας ράβδου, διμερών στρωτήρων	mm ²
h_{ΣΡ}	απόσταση Κ.Β συνδετήριας ράβδου από την άνω επιφάνεια του ημιστρωτήρα	mm
O	όγκος του ημιστρωτήρα	mm ³
Fe_{απαιτ}	απαιτούμενη διατομή σιδηρού οπλισμού ημιστρωτήρα	mm ²
M_{eu}	οριακή ροπή θραύσης	kNm
z	μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων στον ημιστρωτήρα	m
σ_{eu}	όριο διαρροής χαλύβδινου οπλισμού του ημιστρωτήρα	kN/mm ²
M_g	ροπή λόγω ιδίου βάρους	kNm
M_p	ροπή λόγω κινητών φορτίων	kNm

2.- ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΚΑΙ ΣΤΡΩΤΗΡΕΣ

2.1.- Γενικά

Η σιδηροδρομική γραμμή πρέπει να εξασφαλίζει την κύλιση και να «οδηγεί» τα οχήματα με ασφάλεια και άνεση. Προς τούτο η επιδομή της (που στην κλασική της μορφή αποτελείται από τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες με τους συνδέσμους τους και το σκύρο), αναλαμβάνει τις δυνάμεις που εμφανίζονται κατά την κυκλοφορία των συρμών και τις διανέμει προς την έδρασή της (υποδομή). Οι στρωτήρες αποτελούν ουσιώδες στοιχείο της επιδομής, ιδιαίτερα ως προς τη διανομή των φορτίων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της γεωμετρικής απόστασης των σιδηροτροχιών. Ο σχεδιασμός τους πρέπει να ανταποκρίνεται με επάρκεια στο σημαντικό τους ρόλο.

2.2.- Διμερείς στρωτήρες στο Ελληνικό Δίκτυο - συμπεριφορά

Ο διμερής στρωτήρας αποτελείται από δύο πολυεδρικά τεμάχια σκυροδέματος (ημιστρωτήρες), ένα κάτω από κάθε σιδηροτροχιά, που συνδέονται με μία χαλύβδινη ράβδο μεταξύ τους (συνδετήρια ράβδος).

Στο Ελληνικό δίκτυο χρησιμοποιούνται τρεις τύποι διμερών στρωτήρων οπλισμένου σκυροδέματος, τύπου Vagneux U2, U3 και U31, Γαλλικής τεχνολογίας, όμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται από τους Γαλλικούς Σιδηροδρόμους (SNCF).

Από τους παραπάνω τύπους, ο τύπος U3 στο Ελληνικό δίκτυο εμφάνισε ρηγματώσεις, σε ποσοστό 60% περίπου, επί του συνολικού αριθμού των επί γραμμής στρωτήρων αυτού του τύπου, στη θέση κάτω από τη σιδηροτροχιά, που αρχίζουν από την επιφάνεια έδρασης του στρωτήρα και με κατεύθυνση προς τα άνω [10], [11]. Ας σημειωθεί ότι ο ίδιος τύπος στους Γαλλικούς σιδηροδρόμους αν και χρησιμοποιείται και σε γραμμές με $V_{max}=200\text{km/h}$ δεν εμφάνισε ανάλογα προβλήματα.

Ο στρωτήρας U3 έχει φορτίο λειτουργίας 125 kN έως 130 kN, φορτίο θραύσης 140kN έως 175kN και φορτίο καταστροφής του στρωτήρα 175 kN έως 200 kN [15]. Τα φορτία λειτουργίας και θραύσης ελέγχονται είτε πειραματικά στο εργαστήριο με δυναμική δοκιμή για εξαιρετικά φορτία, είτε επί γραμμής, από την παραμένουσα ρηγματώση σε αποφορτισμένο στρωτήρα (παραμένουσα ρωγμή (α) 0,05mm μέχρι 0,1mm και (β) 0,5mm αντίστοιχα). Μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί, ότι ανευρέθη στο Ελληνικό δίκτυο, στρωτήρας που να υπερέβη το όριο θραύσης επί γραμμής. Από πειραματικούς ελέγχους που έγιναν σε εργαστήρια των SNCF, διαπιστώθηκε ότι οι στρωτήρες τύπου U3 του ΟΣΕ εκπληρούν τις απαιτήσεις των 125 kN και 175kN για φορτίο λειτουργίας και φορτίο θραύσης αντίστοιχα. Έτσι η παρατηρηθείσα εκτεταμένη εμφάνιση ρηγματώσεων αποτελεί διερευνητέο θέμα.

Άλλωστε η υπάρχουσα διεθνής βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της φόρτισης των στρωτήρων περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους που προτείνουν αντίστοιχους τύπους. Από αυτούς, ευρύτερα χρησιμοποιούμενος είναι ο τύπος του καθηγητού J. Eisenmann [1.6]. Η φόρτιση που προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου, με τις πιο ακραίες δυσμενείς συνθήκες που προβλέπει, δίδει τιμές φορτίων που δικαιολογούν σποραδική εμφάνιση ρηγματώσεων (της τάξεως 1-2%) αλλά δεν δικαιολογούν καθόλου τη συστηματική εμφάνιση σε ποσοστό μάλιστα 60%.

Η Γαλλική βιβλιογραφία περιέχει και τύπους υπολογισμού της φόρτισης του στρωτήρα ([1], [15]). Από την εφαρμογή τους προκύπτουν αποτελέσματα, για τις τιμές των φορτίων, παρόμοια με του καθ. J. Eisenmann.

Τα ανωτέρω οδήγησαν τους συγγραφείς του παρόντος άρθρου να διερευνήσουν διεξοδικότερα το θέμα της εκτεταμένης εμφάνισης ρηγματώσεων και να προτείνουν συγκεκριμένο μαθηματικό τύπο υπολογισμού της φόρτισης των στρωτήρων, που ικανοποιεί τις πραγματικές συνθήκες που έχουν παρατηρηθεί στο Ελληνικό δίκτυο. Οι συνθήκες αυτές είναι μεγάλες μη ανηρτημένες μάζες, ασβεστολιθικό σκύρο εκτός Ευρωπαϊκών προδιαγραφών, μη εφαρμογή της μεθόδου της λείανσης της επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιών, τρόπος συντήρησης, μεγάλες επιπλατύνσεις τροχών κ.λ.π. Ο προτεινόμενος τύπος δίδει αποτελέσματα που ερμηνεύουν το παρατηρηθέν φαινόμενο εμφάνισης των ρηγματώσεων σε μεγάλο ποσοστό στρωτήρων.

3.- ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΩΤΗΡΩΝ

3.1.- Γενικά

Η εκτίμηση της ασφάλειας κάθε κατασκευής εξαρτάται από τις αβεβαιότητες των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στη μελέτη και τη διαδικασία της ίδιας της κατασκευής του κάθε έργου. Η εκδήλωση της αστοχίας θα εξαρτηθεί από την πιθανότητα εμφάνισης των τιμών των διαφόρων παραγόντων αλλά και από την πιθανότητα συνδυασμού τους. Η διέλευση συρμών είναι τυχαίο δυναμικό φαινόμενο και ανάλογα με τη συχνότητα της φόρτισης που επιφέρει, υπάρχει η αντίστοιχη απόκριση της επιδομής της γραμμής. Κατά τη στιγμή της διέλευσης ενός άξονα, από τη θέση ενός στρωτήρα, εξασκείται στο στρωτήρα ένα συνολικό τυχαίο δυναμικό φορτίο. Η θεωρητική προσέγγιση για τον - κατά το δυνατό - ακριβέστερο προσδιορισμό της πιθανής τιμής του, επιβάλλει την ανάλυση του συνολικού φορτίου σε επιμέρους φορτίσεις που σε γενικές γραμμές μπορούν να αναλυθούν σε:

- α.- Στατική φόρτιση
- β.- Δυναμική φόρτιση

3.2.- Στατική φόρτιση

Στατική φόρτιση ενός στρωτήρα, με την κλασσική έννοια, είναι το φορτίο που αναλαμβάνει ο στρωτήρας όταν ένας ακίνητος άξονας οχήματος βρίσκεται ακριβώς επί της θέσης του στρωτήρα.

Όμως και στις περιπτώσεις κινούμενων αξόνων με χαμηλές συχνότητες, ουσιαστικά έχουμε στατική φόρτιση. Η στατική φόρτιση αναλύεται περαιτέρω σε επιμέρους φορτίσεις.

3.2.1.- Στατικό φορτίο λόγω φορτίου τροχού

Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η θεωρία του Zimmermann που εξετάζει τη γραμμή ως συνεχή δοκό επί ελαστικής έδρασης. Η εξίσωση της είναι:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = -\frac{1}{EI} * \frac{d^2 M}{dx^2} \quad (3.1)$$

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι η αντίδραση ενός στρωτήρα είναι:

$$R_{\tau p} = A * Q_{\tau p}$$

$$\mu \varepsilon \ A = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{I^3 * \rho}{E * I}} \quad (3.2)$$

Το ρ προκύπτει από τη σχέση $\rho = R_{\tau p} / y$, και είναι ονομαζεί ένας συντελεστής ελαστικότητας της γραμμής.

Ο ολικός συντελεστής του στρωτήρα προκύπτει:

$$1/\rho \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i}$$

όπου ν ο αριθμός των υλικών (σιδηροτροχιά, ελαστικό υπόθεμα, στρωτήρας, έρμα, υποδομή).

3.2.2.- Λόγω ανεπάρκειας υπερύψωσης

Δεν είναι ακριβώς στατική, επειδή οφείλεται στη φυγόκεντρο επιτάχυνση που εξασκείται από τους τροχούς ενός οχήματος που εγγράφεται σε καμπύλη με ανεπάρκεια υπερύψωσης. Δεν είναι όμως και δυναμική φόρτιση με την έννοια της φόρτισης της επόμενης παραγράφου. Μερικοί συγγραφείς την αποκαλούν ημι-στατική φόρτιση.

$$Q_a = 2 \cdot a \cdot h_{KB} \cdot Q_{tp} / \varepsilon^2 \quad (3.3)$$

$$\text{και } R_a = A \bar{Q}_a \quad (3.4)$$

$$\text{Συνολικό στατικό φορτίο: } R_{στ} = R_{tp} + R_a \quad (3.5)$$

3.3.- Δυναμική φόρτιση

Η δυναμική φόρτιση της γραμμής εξαρτάται, αφ' ενός μεν από τα μηχανικά χαρακτηριστικά (ακαμψίες, αποσβέσεις) του συστήματος «όχημα - γραμμή», αφ' ετέρου δε από τη διέγερση που προκαλεί η κίνηση του οχήματος επί της γραμμής.

Η απόκριση της γραμμής στην παραπάνω διέγερση έχει ως αποτέλεσμα την προσαύξηση των στατικών φορτίων. Η δυναμική φόρτιση οφείλεται -κύρια- στην κίνηση και την επίδραση των μη ανηρτημένων μαζών των οχημάτων, οι οποίες διεγείρονται από τα σφάλματα της γεωμετρίας της γραμμής και σε μικρότερο βαθμό στην επίδραση των ανηρτημένων μαζών. Για να διατυπωθούν θεωρητικοί τύποι υπολογισμού της δυναμικής φόρτισης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η στατιστική πιθανότητα υπέρβασης του υπολογιζόμενου φορτίου στις πραγματικές συνθήκες. Έτσι οι σχετικοί τύποι αφορούν την τυπική απόκλιση (διασπορά) του φορτίου.

3.3.1.- Φορτίο οφειλόμενο στις μη ανηρτημένες μάζες (M.A.M)

Η θεωρητική ανάλυση οδηγεί στον ακόλουθο τύπο για την τυπική απόκλιση της φόρτισης που προκαλείται λόγω M.A.M.:

$$\sigma(\Delta R_{MAM}) = K\alpha \cdot V \cdot \sqrt{m_{MAM} \cdot h_{\Gamma} [14], [17], [1]} \quad (3.6)$$

Στην πράξη εφαρμόζεται συνήθως ο τύπος

$$\sigma(\Delta R_{MAM}) = K_1 \cdot m_{MAM} \cdot V / 1000 [1], [15]. \quad (3.7)$$

λόγω ευχέρειας προσδιορισμού του συντελεστή K_1 πειραματικά.

3.3.2.- Φορτίο οφειλόμενο στις ανηρτημένες μάζες (A.M)

Η τυπική απόκλιση του φορτίου δίδεται από τον τύπο:

$$\sigma(\Delta R_{AM}) = \frac{V - 40}{1.000} * N_L * Q_{tr} \quad [7] \quad (3.8)$$

3.3.3.- Κατανομή δυναμικών φορτίων

Στις υψηλές συχνότητες δεν αποκρίνεται η επιδομή, επειδή έχει χαμηλή ιδιοσυχνότητα, έτσι, προς την πλευρά της ασφάλειας, θεωρούμε ότι δεν διανέμονται τα δυναμικά φορτία στους γειτονικούς στρωτήρες, σε αντίθεση με τα στατικά φορτία που διανέμονται.

3.4.- Συνολική φόρτιση του στρωτήρα

Οι στρωτήρες πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να καλύπτουν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων (πιθανότητα εμφάνισης $P=99,7\%$) που περιλαμβάνουν φορτία εξαιρετικά μεν, αλλά συνηθισμένα (λόγω Μ.Α.Μ., σφαλμάτων συγκολλήσεων, σφαλμάτων τροχών κ.λ.π). Ως φορτίο λειτουργίας προτείνεται [12] να λαμβάνεται το στατικό φορτίο προσαυξημένο κατά την τριπλάσια τυπική απόκλιση της δυναμικής φόρτισης ($P=99,7\%$), ήτοι:

$$R_{\lambda} = R_{\sigma\tau} + 3 * \sqrt{[\sigma(\Delta R_{MAM})]^2 + [\sigma(\Delta R_{AM})]^2} \quad (3.9)$$

Στη γραμμή όμως παρουσιάζονται φορτία εξαιρετικά και ασυνήθη κατά τη διάρκεια ζωής ενός στρωτήρα (π.χ. αγκύρια συνδέσμων, σκύρα επί της σιδηροτροχιάς ή επιπλατύνσεις τροχών που υπερβαίνουν τους κανονισμούς). Το οριακό φορτίο θραύσης του ημιστρωτήρα προτείνεται [12] να λαμβάνεται ίσο με το στατικό φορτίο προσαυξημένο κατά την πενταπλάσια τυπική απόκλιση της δυναμικής φόρτισης ($P \rightarrow 100\%$):

$$R_u = R_{\sigma\tau} + 5 * \sqrt{[\sigma(\Delta R_{MAM})]^2 + [\sigma(\Delta R_{AM})]^2} \quad (3.10)$$

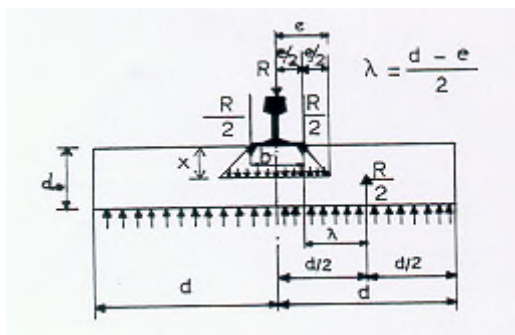
Επειδή στην Ελλάδα δεν διατίθενται δεδομένα μετρήσεων επί του σιδηροδρομικού δικτύου, για τον καθορισμό του $\sigma(\Delta R_{MAM})$ εφαρμόζεται ο θεωρητικό τύπος (3.6).

4.- ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΤΗΡΑ

4.1.- Ροπές λόγω κατανομής πιέσεων στην έδραση του στρωτήρα

Για να υπολογισθούν οι ροπές που καταπονούν το στρωτήρα πρέπει να γίνει παραδοχή κατανομής πιέσεων στην επιφάνεια επαφής στρωτήρα - σκύρου. Η απλούστερη παραδοχή που ακολουθείται από την πλειονότητα της βιβλιογραφίας είναι η ομοιόμορφη. Όμως η κατανομή από την οποία προκύπτει ροπή που συμφωνεί με τις δυσμενέστερες ροπές που μετρήθηκαν επί γραμμής στη θέση κάτω από τη σιδηροτροχιά, είναι η παραβολική, κάτω από κάθε ημιστρωτήρα, με μηδενική πίεση στη μεσαία περιοχή του στρωτήρα.

4.1.1.- Ομοιόμορφη κατανομή



$$M = \frac{\lambda}{2} * R = R(0,25d - 0,125(b + 2x)) \quad (4.1)$$

Σχέδιο 4.1 Ομοιόμορφη κατανομή πιέσεων κάτω από στρωτήρα [9], [2].

Figure 4.1 Uniform pressure distribution under a sleeper [9], [2].

4.1.2.- Παραβολική κατανομή

Στο [9] δίδεται η μορφή της παραβολικής κατανομής από την οποία προκύπτει ροπή που συμφωνεί με τις δυσμενέστερες ροπές που μετρήθηκαν επί γραμμής. Η ροπή που υπολογίζεται με τον τύπο (4.1) για ομοιόμορφη κατανομή πρέπει να προσανξάνεται κατά 60%, σε περίπτωση παραβολικής κατανομής.

4.2.- Λοιπές ροπές

4.2.1.- Ροπή από οριζόντιες δυνάμεις

Η οριζόντια δύναμη σχεδιασμού των οχημάτων, γνωστή ως τύπος Prud'homme, είναι $Q_{op}=0,85(10+2Q_{tr}/3)$. Η δύναμη αυτή, θεωρείται ότι διανέμεται σε τρεις στρωτήρες, από τους οποίους ο μεσαίος αναλαμβάνει το 50% της οριζόντιας δύναμης. Ροπή ως προς ουδέτερο άξονα: $M_{op}=Q_{op}*(d_o - \chi)/2$

4.2.2.- Ροπή από συνδετήρια ράβδο

$$M_{SP}=\sigma_s*F_{eSP}*(h_{SP} - x)/2$$

4.2.3.- Ροπή λόγω ιδίου βάρους

Προκύπτει από τον τύπο 4.1 αν λάβουμε ως $R=2,5*O$ όπου $2,5 \text{ t/m}^3$ το ίδιο βάρος του σκυροδέματος.

5.- ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΜΕΡΩΝ ΣΤΡΩΤΗΡΩΝ

Με τη μέθοδο της συνολικής αντοχής, ανάλογα με τις επιταγές του Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος κάθε χώρας, για φορτίο λειτουργίας και φορτίο θραύσης τα προκύπτοντα από τις προηγούμενες παραγράφους υπολογίζεται η διατομή του σιδηρού οπλισμού του ημιστρωτήρα:

$$Fe_{απαιτ} = \frac{M_{eu}}{Z * \sigma_{eu}}, \text{ όπου } M_{eu} = 1,35M_g + 1,5M_p$$

6.- ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.

6.1.- Γενικά

Σε κάθε ένα από τα δύο πολυεδρικά τεμάχια σκυροδέματος (ημιστρωτήρες) δεδομένων εξωτερικών διαστάσεων - που δεν μπορούν να υπερβούν ορισμένα μεγέθη λόγω περιορισμών χάραξης κ.λ.π - εάν καθορισθεί το φορτίο λειτουργίας και το φορτίο θραύσης, στη συνέχεια διαστασιολογείται ο οπλισμός βάσει των όσων εκτίθενται στην παράγραφο 5. Εκείνο που απομένει είναι να προσδιορισθούν τα φορτία αυτά για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς των επιμέρους παραμέτρων, για τις Ελληνικές συνθήκες.

Για ακριβή προσδιορισμό των τιμών όλων των επιμέρους παραγόντων που υπεισέρχονται στους τύπου (3.9) και (3.10), δεν έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις, στο Ελληνικό δίκτυο. Έχουν γίνει όμως μετρήσεις από αντίστοιχα δίκτυα και Πανεπιστημιακά ιδρύματα του εξωτερικού, για τα δεδομένα των ξένων δικτύων. Έγιναν επίσης πειραματικές διερευνήσεις και μετρήσεις με υλικά του Ελληνικού δικτύου είτε ανά υλικό είτε με συνδυασμούς των υλικών (στρωτήρες, σύνδεσμοι, σκύρα, σκυρόδεμα, σιδηροτροχιές) στα εργαστήρια του Τομέα Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος του ΕΜΠ, του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του ΑΠΘ, των Γαλλικών Σιδηροδρόμων (SNCF), του ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ, του Εργοστασίου στρωτήρων του ΟΣΕ αλλά και επί γραμμής στον άξονα Αθηνών - Θεσσαλονίκης. Έπειτα από συσχετισμό (α) της κατάστασης που παρατηρήθηκε και καταγράφηκε από τη διερεύνηση που έγινε για τις Ελληνικές συνθήκες (β) των διαθέσιμων στοιχείων από τις μετρήσεις σε ξένα δίκτυα και (γ) τις ανακοινώσεις ξένων Πανεπιστημιακών ιδρυμάτων, οι συγγραφείς του παρόντος άρθρου, κατέληξαν σε συγκεκριμένες διακυμάνσεις τιμών των επιμέρους παραμέτρων, που προσεγγίζουν την Ελληνική πραγματικότητα.

6.2.- Εύρος διακύμανσης διαφόρων παραμέτρων

6.2.1.- Συντελεστής αντίδρασης ρ

Στη βιβλιογραφία δίδονται στοιχεία που έχουν προκύψει από έρευνα των Γερμανικών Σιδηροδρόμων (DB) σχετικά με τις τιμές των συντελεστών ρ_i διαφόρων υλικών.

Ως μέσες τιμές λαμβάνονται:

σιδηροτροχιά $\rho_i = 75.000 \text{ kN/mm}$
 στρωτήρας από σκυρόδεμα $\rho_i = 13.500 \text{ kN/mm}$
 σκύρο ρυπασμένο 50 cm πάχους $\rho_i = 250 \text{ kN/mm}$ [1], [2], [13], [17].

Για τα ελαστικά υποθέματα των 4,5mm και 9mm υπολογίζεται το ρ_i από τις σχετικές καμπύλες απόκρισης (load - deflection curves) [6], [12].

Για τη δυσμενέστερη αποδεκτή καμπύλη απόκρισης κατά περίπτωση υπολογίζεται (για υποθέματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα):

για υπόθεμα 4,5mm : $\rho_i = 294,2 \text{ kN/mm}$

για υπόθεμα 9mm : $\rho_i = 119,7 \text{ kN/mm}$ [12].

6.2.2.- Συντελεστής K_a και δυναμική ακαμψία γραμμής h_r

Για τον υπολογισμό του συντελεστή K_a αξιοποιούνται τα στοιχεία των μετρήσεων στο Γαλλικό δίκτυο, όπου μετρήσεις έδωσαν εύρος διακύμανσης του συντελεστή K_1 από 12 έως 6 για κατάσταση επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιάς μη τροχισμένη και K_1 από 4,5 έως 3 για κατάσταση επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιάς τροχισμένη. Οι τιμές αυτές του K_1 είναι αποδεκτές σε γραμμές με $V \geq 120 \text{ km/h}$. Σε γραμμές με $V < 120 \text{ km/h}$ επιτρέπεται και δυσμενέστερη κατάσταση επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιάς.

Λαμβάνοντας υπόψη, ως γραμμή αναφοράς, μια γραμμή - στην οποία έγιναν μετρήσεις στους SNCF - με $V_o = 200 \text{ km/h}$, $h_{r(o)} = 75 \text{ kN/mm}$, $m_{MAM(o)} = 1,5 \text{ t}$ [3] υπολογίζεται ο συντελεστής K_a από το συνδυασμό των τύπων (3.6) και (3.7).

$$K_a = \frac{K_1 * m_{MAM(o)}}{1000 \sqrt{m'_{MAM(o)} * h_{r(o)}}} \quad (3.11)$$

όπου στην μάζα $m'_{MAM(o)}$ έχει συνυπολογισθεί και ποσότητα ισοδύναμης μάζας γραμμής 0,2804 t [8] από τη συμμετοχή της επιδομής στην κίνηση των μη ανηρτημένων μαζών.

Εφαρμόζοντας τον τύπο (3.11) για τις παραπάνω διακυμάνσεις του K_1 προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για το K_a .

	μη τροχισμένη γραμμή	τροχισμένη γραμμή
Συντελεστής K_a	0,00779 ÷ 0,01558	0,00389 ÷ 0,00584

Η h_r υπολογίζεται: $h_r = 2 * \rho / (f * 1)$ όπου
 $f = [\rho / (4 * E * I * 1)]^{0,25}$ [8], [13].

6.2.3.- Μέση τυπική απόκλιση υψομετρικής κατάστασης γραμμής N_L

Επειδή τα στοιχεία αφορούν τον κύριο άξονα Αθηνών - Θεσ/νίκης και σε συσχετισμό με αντίστοιχα δεδομένα του Γαλλικού δικτύου [17], λαμβάνεται $N_L = 1$.

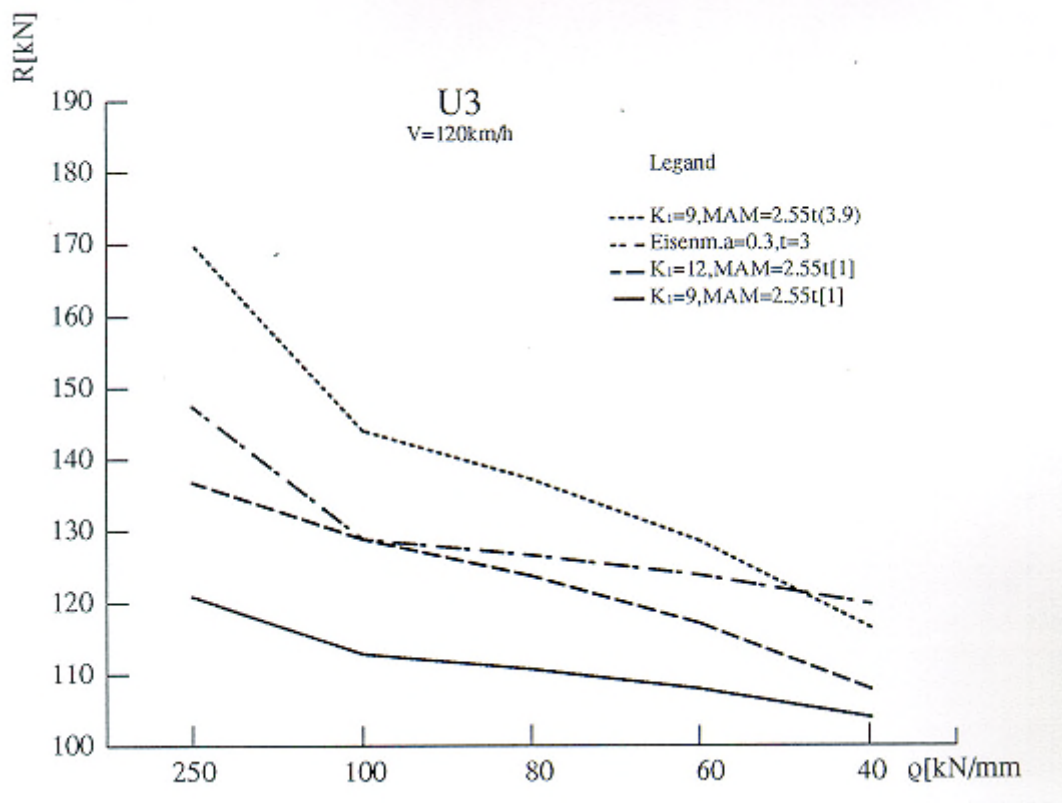
6.3.- Ελεγχος της ισχύος του τύπου (3.9) με αριθμητική εφαρμογή για διμερή στρωτήρα U3, του Ελληνικού δικτύου.

Η σημερινή κατάσταση του Ελληνικού δικτύου με πολύ συμπακνωμένο, ρυπασμένο σκύρο και ανυποχώρητη έδραση, σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία, εντάσσεται σε διακύμανση του συντελεστή ρ_i για την έδραση της γραμμής: από $\rho_i = 100 \text{ kN/mm}$, που αντιστοιχεί σε ρυπασμένο σκύρο, συμπακνωμένο - μη ελαστικό - επί επιχώματος έως $\rho_i = 250 \text{ kN/mm}$ για συμπακνωμένο σκύρο σε πυθμένα σήραγγας ή γέφυρα σκυροδέματος. Οι υπόλοιπες παράμετροι της γραμμής που οδήγησαν στην εμφάνιση ρηγματώσεων: μέγιστη ταχύτητα $V=120 \text{ km/h}$, M.A.M. = 2,55t, σιδηροτροχιά UIC.54, ελαστικό υπόθεμα 4,5 mm και ανεπάρκεια υπερύψωσης 105mm.

Στο διάγραμμα 5.3. φαίνεται η απεικόνιση του προτεινόμενου από το παρόν άρθρο τύπου (3.9) σε σύγκριση με τον τύπο του καθηγητή J. Eisenmann [16] και τον τύπο που περιέχεται στο [1] και [15] ως σύγκριση των δυνάμεων - φορτίων που υπολογίζονται κατά περίπτωση ως φορτία λειτουργίας για τη διαστασιολόγηση της διατομής του ημιστρωτήρα.

Ο τύπος του J. Eisenmann απεικονίζεται με εφαρμογή των ακρότατων δυνατών τιμών $\alpha=0,3$ και $t=3$. είναι προφανές ότι σε συνθήκες με $\rho_i = 100 \text{ kN/mm}$, ο τύπος του J. Eisenmann δίδει αποτελέσματα που βρίσκονται στο όριο των 125 kN άρα αναμένεται σποραδική ρηγμάτωση (της τάξης του 1 έως 2%).

Ο τύπος από τη Γαλλική βιβλιογραφία απεικονίζεται με παραδοχή διανομής των στατικών φορτίων και στους εκατέρωθεν στρωτήρες και για δύο τιμές K_1 : 9 και 12. Η τιμή 12 είναι ακραία αποδεκτή τιμή - μετά την εμφάνιση της οποίας πρέπει να επακολουθήσει λείανση σιδηροτροχιών - και δεν έχει εμφανισθεί συστηματικά στο Ελληνικό δίκτυο. Ο τύπος αυτό σε συνθήκες με $\rho_i = 100 \text{ kN/mm}$ και ακραίες τιμές επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιών $K_1=12$ δίδει αποτελέσματα στο όριο των 125 kN, άρα αναμένεται σποραδική ρηγμάτωση της τάξης του 1 έως 2%. Για μέση κατάσταση επιφάνειας κύλισης σιδηροτροχιών, $K_1=9$, ο τύπος δίδει αποτελέσματα που δεν προβλέπουν ρηγμάτωση σε καμμία περίπτωση.



Διάγραμμα 5.3 Φόρτιση διμερούς στρωτήρα U3 - Σύγκριση εφαρμογής διάφορων τύπων .

Graphic 5.3 Load of twin - block sleeper U3 - Comparison of different formulas application

Ο τύπος (3.9) αντίθετα δίδει αποτελέσματα που βρίσκονται σαφώς μεταξύ ορίου θραύσης και ορίου ρηγμάτωσης. Τούτο σημαίνει ότι αναμένεται συστηματική ρηγμάτωση και σε ακραίες περιπτώσεις, πιθανόν, σποραδική αστοχία, επειδή η τιμή 170 --> 175kN σε περίπτωση $\rho=250$ kN/mm. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συμβατά και επαληθεύονται από την πραγματική εμπειρία, όπως εμφανίζεται σήμερα στο Ελληνικό δίκτυο, όπου έχει παρατηρηθεί συστηματική ρηγμάτωση της τάξης του 60% του συνολικού αριθμού στρωτήρων U3 και καμμία περίπτωση αστοχίας, για χρονική περίοδο από το 1976 (ημερομηνία έναρξης στρώσης επί γραμμής των στρωτήρων U3) μέχρι σήμερα. Η μη εμφάνιση αστοχίας μέχρι σήμερα επί γραμμής σημαίνει:

- (α) ότι το $\rho_i=250$ kN/mm είναι οριακή τιμή και δεν έχει εμφανισθεί ακόμη στην έδραση της γραμμής
- (β) λόγω αντικατάστασης των στρωτήρων U3 στις γέφυρες, δεν έχει δοκιμασθεί πλήρως η συμπεριφορά τους στο χρόνο, σε ακραίες τιμές του ρ_i που τείνουν στο 250kN/mm.
- (γ) μέχρι σήμερα δεν έχει εμφανισθεί καταπόνηση τους με συνολικό φορτίο R που να υπερβαίνει τα 175kN, όριο θραύσης των Ελληνικών διμερών στρωτήρων U3.

7. ΦΟΡΤΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΡΩΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο πίνακες βάσει υπολογισμών για τα ακόλουθα δεδομένα:

- μέγιστη ταχύτητα 200km/h και M.A.M= 1,5t, ανεπάρκεια υπερύψωσης 110mm για το μέλλον (7.1).
- μέγιστη ταχύτητα 140km/h και M.A.M= 2,55t που είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα και η M.A.M: στη δυσμενέστερη ελκτική μονάδα σήμερα στο Ελληνικό δίκτυο, ανεπάρκεια υπερύψωσης 110mm (7.2).
- και στις δύο περιπτώσεις σιδηροτροχιά UIC54 και ελαστικό υπόθεμα 9mm βάσει της δυσμενούς καμπύλης απόκρισης (load-deflection curve) αφού στους σύγχρονους διμερείς στρωτήρες χρησιμοποιούνται μόνο τα υποθέματα των 9mm.

Από την ανάλυση των πινάκων προκύπτει ως φορτίο λειτουργίας του στρωτήρα $R_\lambda=229\text{kN}$ και ως φορτίο θραύσης $R_u=340\text{ kN}$, βάσει των οποίων θα πρέπει να σχεδιάζονται οι στρωτήρες από σκυρόδεμα.

Οι τιμές αυτές προκύπτουν για περιπτώσεις υποδομής όπου υπάρχουν γέφυρες από σκυρόδεμα ή βραχώδες υπόστρωμα(π.χ. πυθμένα σηράγγων). Οι περιπτώσεις όμως αυτές είναι «σημειακές» για μία γραμμή. Αν ληφθούν μέτρα αύξησης της συνολικής ελαστικότητας της γραμμής στα σημεία αυτά, τότε προκύπτουν αντίστοιχα: φορτίο λειτουργίας $R_\lambda =203\text{kN}$ και φορτίο θραύσης $R_u=301\text{ kN}$.

Πίνακας 7.1 Φορτία λειτουργίας (R_λ) και φορτία θραύσης (R_u).

Table 7.1 Service load (R_λ) and ultimum load (R_u).

V=200km/h, M.A.M=1,5t.

$\rho[\text{kN/mm}] K_1$		12	9	6	3,75
250	R_λ [kN]	228,8	192,3	157,9	135,5
	R_u [kN]	339,7	278,8	221,5	184,2
100	R_λ [kN]	203,3	172,3	143,6	125,4
	R_u [kN]	301,1	249,4	201,6	171,3
80	R_λ [kN]	195,9	166,5	139,5	122,5
	R_u [kN]	289,9	240,9	195,9	167,6
60	R_λ [kN]	185,9	158,7	133,9	118,5
	R_u [kN]	274,8	229,5	188,2	162,6
40	R_λ [kN]	171,4	147,5	125,9	112,8
	R_u [kN]	253,1	213,2	177,3	155,5

Πίνακας 7.2 Φορτία λειτουργίας (R_λ) και φορτία θραύσης (R_u).

Table 7.2 Service load (R_λ) and ultimum load (R_u).

V=140km/h, M.A.M=2,55t.

ρ [kN/mm] K_1	12	9	6	3,75
250 R_λ [kN]	206,4	172,7	140,2	117,7
R_u [kN]	302,4	246,2	192,0	154,6
100 R_λ [kN]	182,4	153,5	126,0	107,3
R_u [kN]	266,2	218,1	172,2	141,1
80 R_λ [kN]	175,3	147,9	121,8	104,3
R_u [kN]	255,6	209,9	166,4	137,3
60 R_λ [kN]	165,7	140,3	116,2	100,2
R_u [kN]	241,3	198,9	158,7	132,0
40 R_λ [kN]	151,9	129,3	108,1	94,3
R_u [kN]	220,6	182,9	147,6	124,6

8.- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό αναλύθηκε η καταπόνηση των στρωτήρων από σκυρόδεμα, από στατικά και δυναμικά φορτία. Η στατική φόρτιση υπολογίστηκε βάσει της θεωρίας του Zimmermann, η δε επιρροή της δυναμικής φόρτισης λήφθηκε υπ' όψη με υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων των δυναμικών φορτίων.

Για τον υπολογισμό των ροπών που καταπονούν το στρωτήρα στη θέση κάτω από τη σιδηροτροχιά προτείνεται παραβολική κατανομή τάσεων στην επιφάνεια επαφής στρωτήρα - σκύρου, η οποία δίδει τη δυσμενέστερη ροπή στη θέση αυτή και η οποία συμφωνεί με τις δυσμενέστερες επί γραμμής μετρηθείσες ροπές.

Για να σχεδιασθεί ένας τύπος στρωτήρα ή να ελεγχθεί ένας υφιστάμενος τύπος, σε εφαρμογή των παραπάνω, πρέπει να καθορισθεί το φορτίο λειτουργίας και το φορτίο θραύσης βάσει της εκτιμώμενης ασφάλειας που πρέπει να εξασφαλίζει και της πιθανότητας εμφάνισης φορτίων που πρέπει να καλύπτει. Αυτό εξαρτάται από τις αβεβαιότητες των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στην πραγματική λειτουργία της γραμμής αλλά και των παραδοχών που λαμβάνονται κατά τη θεωρητική προσέγγισή της στον υπολογισμό.

Καταλήγουμε ότι:

- α) το φορτίο λειτουργίας είναι το στατικό φορτίο του στρωτήρα προσαυξημένο κατά το τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης της δυναμικής φόρτισης και καλύπτει πιθανότητα εμφάνισης 99,7%,
- β) το φορτίο θραύσης αντίστοιχα είναι το στατικό φορτίο προσαυξημένο κατά το πενταπλάσιο της τυπικής απόκλισης της δυναμικής φόρτισης και καλύπτει και τις περιπτώσεις εξαιρετικών φορτίων που είναι ασυνήθη επί γραμμής.

Η ισχύς των γενικών τύπων (3.9) και (3.10) που προτείνονται, ελέγχθηκε αριθμητικά για τα Ελληνικά δεδομένα (μεγάλες μη ανηρτημένες μάζες, ασβεστολιθικό σκύρο κακής ποιότητας, επιφάνεια κύλισης σιδηροτροχιών μη τροχισμένη κ.λ.π) στην περίπτωση του στρωτήρα U3 που εμφάνισε ρηγμάτωση και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των τύπων με την επί γραμμής παρατηρηθείσα κατάσταση. Ως διακυμάνσεις των επιμέρους παραμέτρων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό λαμβάνονται τα μεγέθη που εκτιμήθηκε, βάσει διερευνήσεων και μετρήσεων, ότι αντιστοιχούν στις Ελληνικές συνθήκες. Τα προκύπτοντα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των τύπων (3.9) και (3.10) για τις διακυμάνσεις των επιμέρους παραμέτρων του Ελληνικού δικτύου στην περίπτωση του διμερούς στρωτήρα U3

βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των διερευνήσεων επί γραμμής (ρηγματωμένο το 60% των επί γραμμής στρωτήρων U3, χωρίς καμία εμφάνιση αστοχίας μέχρι σήμερα) και των πειραματικών μετρήσεων στο εργαστήριο. Οι τιμές της φόρτισης των στρωτήρων που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο τύπων ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται κατά περίπτωση, πέραν των Ευρωπαϊκών συνθηκών καλύπτουν και τις ιδιαιτερότητες εκείνες, που παρουσιάζονται στην πράξη στην Ελλάδα, δημιουργούν προϋποθέσεις ρηγμάτωσης και είναι πολύ δυσμενέστερες από τις αντίστοιχες των προηγμένων Ευρωπαϊκών δικτύων. Οι περιπτώσεις αυτές δεν καλύπτονται από τους μαθηματικούς τύπους που περιέχονται στη διεθνή βιβλιογραφία ([16], [1], [15]) η εφαρμογή των οποίων δίδει αποτελέσματα που προδικάζουν ανύπαρκτη έως το πολύ σποραδική ρηγμάτωση (1-2%) και όχι την εκτεταμένη ρηγμάτωση (60% του συνόλου των στρωτήρων) που παρατηρήθηκε στο Ελληνικό δίκτυο. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται παραστατικά στο Διάγραμμα 5.3 του παρόντος (για $\rho=100\text{kN/mm}$ - ρυπασμένο σκύρο συμπαγές επί επιχώματος - και για U3 που έχει $R_{\lambda}=125\text{kN}$, $R_u=175\text{kN}$).

Σε αριθμητική διερεύνηση, για στρωτήρα από σκυρόδεμα με σύνδεσμο μεγάλης ελαστικότητας, βάσει των τύπων 3.9 και 3.10 για τις εκτιμούμενες μελλοντικές συνθήκες, υπολογίσθηκαν για διάφορους συνδυασμούς επιδομής - υποδομής τα φορτία λειτουργίας και θραύσεως των στρωτήρων. Για το Ελληνικό δίκτυο προκύπτει ότι για το σχεδιασμό του στρωτήρα το φορτίο λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 203 και 229kN, το δε φορτίο θραύσης μεταξύ 301 και 340kN.

9.- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alias J., La voie ferree, Eyrolles 1984.19,36,64,205-206.
2. Αμπακούμκιν Κ., Σιδηρόδρομοι, Ε.Μ.Π. Αθήνα 1989. 2.3-3, 2,4-13.
3. Cooperation OSE/SNCF : 6/1988. Comportement des traverses en relation avec les charges dynamiques.
4. Cooperation OSE/SNCF : 3/1989. Programme d'essais realise au centre d'essais de la Direction de l' Equipement.
5. Ε.Μ.Π/ Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος /20-10-1989, Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις σε στρωτήρες του ΟΣΕ.
6. fiche UIC 864-5/01-01-86 Specification technique pour la fourniture de semelles a poser sous rails, 4e edition
7. Janin G. La superstructure pour les circulations a grande vitesse. Conference en Autriche, Graz 4/1974,25.

8. Jenkins H.H., Stephenson J.E., Clayto G.A., Morland G.W., Lyon D., «Incidences des parametres caracteristiques de la voie et des vehicules sur les efforts dynamiques verticaux qui se developpent entre rail et roue». Rail International 10/1974, 682-702.
9. ORE: Question D71, RP9.f.97.
10. ΟΣΕ/Επιτροπή - Κ. Γιαννακός, Π. Ιορδανίδης, Ι. Βλασοπούλου/8/1988, Έκθεση Επιτροπής Εμπειρογνομόνων του ΟΣΕ για την επίσκεψη τους στους SNCF από 15.5.1988 - 11.6.1988.
11. ΟΣΕ/Επιτροπή - Κ. Γιαννακός, Π. Ιορδανίδης, Ι. Βλασοπούλου/7.4.1989, Συνοπτική Έκθεση Επιτροπής για το θέμα των διμερών στρωτήρων μετά τη δεύτερη επίσκεψη στους SNCF το Μάρτη του 1989.
12. ΟΣΕ - Κ. Γιαννακός, Ι. Βλασοπούλου/1990 - Μελέτη για το σύστημα «στρωτήρας - σκύρο».
13. Prud'homme A., Sollicitations statiques et dynamiques de la voie, SNCF 3/1966.
14. Prud'homme A., Sollicitations et stabilite de la voie aux grandes vitesses, Coloque ORE «Grandes Vitesses», Vienne 4/1971.
15. Prud'homme A., Eriean J., «Les nouvelles traverses en beton de la SNCF», RGCF - 2/1976, 102 - 117.
16. Railroad Track - Theory and Practice. Edited by Fritz Fastenrath, Frederick Ungar P. Co. New York 1981,12-37.
17. SNCF Mechanique de la voie, 10/1981.