

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΗΛΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ****Μπουλέντ Μ. Ιμάμ**

Λέκτορας, BSc, MSc, PhD

Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey

Guildford, Surrey, GU2 7XH, UK

e-mail: b.imam@surrey.ac.uk

Τιμόθεος Δ. Ρηγινιώτης

Λέκτορας, BEng, PhD, DIC, MASTM

Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey

Guildford, Surrey, GU2 7XH, UK

e-mail: t.righiniotis@surrey.ac.uk

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι οι συνδέσεις μεταξύ διαμήκων και εγκάρσιων δοκών στις ηλωτές σιδηροδρομικές γέφυρες είναι ευπαθείς σε έναρξη ρωγμών λόγω κόπωσης. Η ζημία κόπωσης σε αυτές τις συνδέσεις προκαλείται από δευτεροβάθμιες επιδράσεις λόγω παραμορφώσεων. Αυτές οι επιδράσεις είναι δύσκολο να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας έναν ενιαίο, εφαρμοζόμενο περιγραφέα τάσης, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται σε μια S-N αξιολόγηση. Προκειμένου να εξεταστεί αυτό το πρόβλημα, και μετά από τις εργασίες που δημοσιεύτηκαν πρόσφατα από τους συντάκτες [1,2], σε αυτή την παρουσίαση τα αποτελέσματα μιας λεπτομερούς ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων μιας ηλωτής σιδηροδρομικής γέφυρας χρησιμοποιούνται μέσα στο πλαίσιο της θεωρίας των κρίσιμων αποστάσεων (TCD). Εδώ, χρησιμοποιώντας τη TCD με τον τρόπο που προτείνεται από τον Taylor [3], η ζημία κόπωσης αποδεικνύεται να συγκλίνει με την αύξηση της πυκνότητας του κανάβου. Συγκρίσεις της TCD-βασισμένης μεθόδου με την αντίστοιχη πιο κλασική S-N μέθοδο, αποκαλύπτουν ότι η δεύτερη μπορεί να υποτιμήσει τη ζημία κόπωσης σε μερικές περιπτώσεις κατά έναν παράγοντα ίσο με 3,5.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παλαιών μεταλλικών σιδηροδρομικών γεφυρών στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική που είναι ηλωτές στην κατασκευή και έχουν υπερβεί την ηλικία 100 ετών. Λαμβάνοντας υπόψη τον μεγάλο αριθμό τους, η αντικατάσταση αυτών των γεφυρών θα είναι εξαιρετικά δύσκολη από οικονομικής άποψης και είναι πιθανό να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο. Από την άποψη της διατήρησης αυτών των παλαιών γεφυρών καθώς και τον μελλοντικό σχεδιασμό ενεργειών επισκευής, η λεπτομερής εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση είναι μια σημαντική προϋπόθεση.

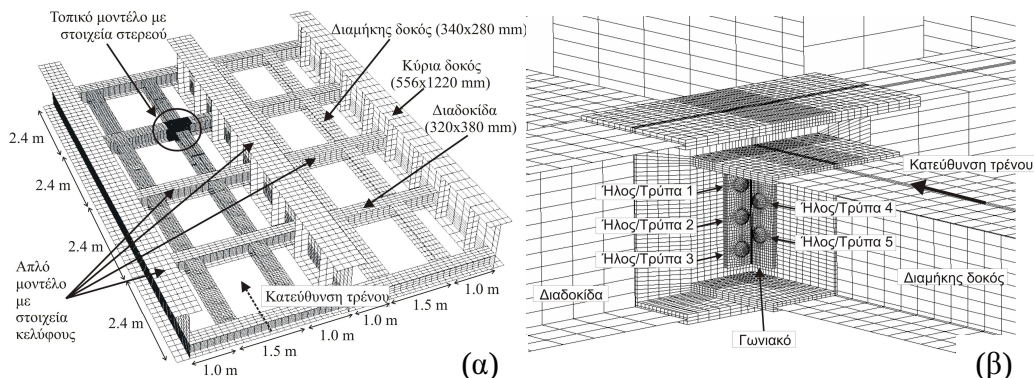
Η πλειονότητα των αναφερθείσων περιπτώσεων ζημιών κόπωσης σε ηλωτές γέφυρες έχει συνδεθεί με συνδέσεις διαμήκων δοκών και εγκάρσιων διαδοκίδων επιβεβαιώνοντας ότι τα εν λόγω στοιχεία είναι ευαίσθητα σε ράγισμα λόγω κόπωσης [4]. Οι ζημιές κόπωσης σε αυτές τις συνδέσεις έχουν αποδοθεί σε δευτερογενείς παραμορφώσεις, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν υπόψη και συχνά παραβλέπονται σε μια τυπική, βασισμένη σε κώδικα, S-N αντιπετώπιση [5]. Λόγω της πολύπλοκης συμπεριφοράς των εν λόγω συνδέσεων, η οποία επίσης εξαρτάται από την αλληλεπίδραση διαφόρων μελών όπως ήλων, γωνιακών και μερών των δοκών της γέφυρας όπως πέλματα και κορμοί, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί μια χαρακτηριστική (“ονομαστική”) τιμή τάσης και ως εκ τούτου να εκφραστούν τα αποτελέσματα με ουσιαστικό τρόπο σε μία S-N βάση.

Αυτές οι δυσκολίες μπορούν να ξεπεραστούν εστιάζοντας στις τοπικές τάσεις σε κοντινή απόσταση από τις συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες λαμβάνουν καθαρά υπόψη τις επιπτώσεις τους, χωρίς να χρειάζεται να προσδιοριστεί μια ονομαστική τιμή τάσης η οποία να πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με διαγράμματα S-N παρμένα από κώδικες. Τοπικές κατανομές τάσεων μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FE), ακόμη και για τις πιο περίπλοκες λεπτομέρειες και γεωμετρίες. Ωστόσο, η μέγιστη τάση που λαμβάνεται στο σημείο συγκέντρωσης τάσης (κορυφή εγκοπής) και η κατανομή της τάσης γύρω από την περιοχή της εξαρτάται από το μέγεθος του κανάβου που χρησιμοποιείται στο FE μοντέλο. Οι πλέον συντηρητικές προβλέψεις λαμβάνονται όταν η ζημία κόπωσης εκτιμάται χρησιμοποιώντας αυτή τη μέγιστη τάση. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχει προταθεί ότι αντί να ληφθεί υπόψη μόνο η μέγιστη τάση, η ελαστική κατανομή τάσης σε μια ορισμένη “κρίσιμη απόσταση” μπροστά από τη συγκέντρωση τάσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για υπολογισμούς ζημίας κόπωσης [3]. Η θεωρία αυτή, αποκαλούμενη Θεωρία Κρίσιμων Αποστάσεων (Theory of Critical Distances (TCD)), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με γραμμικές ελαστικές FE αναλύσεις και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε είδος συγκέντρωσης τάσης.

Στο παρελθόν, οι συγγραφείς υιοθέτησαν την μέθοδο S-N για την εκτίμηση της ζημίας κόπωσης συνδέσεων [1] χρησιμοποιώντας ένα απλό FE μοντέλο μιας γέφυρας αποτελούμενο αποκλειστικά από στοιχεία κελύφους (Σχ. 1α). Μέσω αυτής της έρευνας εντοπίστηκαν οι πιο κρίσιμες συνδέσεις της γέφυρας. Οι συγγραφείς στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ένα πιο πολύπλοκο μοντέλο εστίασαν στη περιοχή της πιο κρίσιμης σύνδεσης χρησιμοποιώντας στοιχεία στερεού (όγκου) [2], όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά και όλα τα στοιχεία της σύνδεσης, όπως οι ήλοι, τα γωνιακά και τα τμήματα των δοκών μοντελοποιήθηκαν λεπτομερώς. Άλλα χαρακτηριστικά που είναι συναφή με ηλωτές συνδέσεις όπως η δύναμη σύσφιξης των ήλων και η τριβή μεταξύ των συνδεδεμένων μερών επίσης λήφθηκαν υπόψη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την ανάλυση παρουσιάστηκαν σε ένα ποιοτικό πλαίσιο, δεδομένου ότι οι τάσεις λήφθηκαν υπόψη στην κορυφή εγκοπών.

Σε αυτή την δημοσίευση, η TCD εφαρμόζεται στα διάφορα τμήματα της σύνδεσης μιας γέφυρας που είχε ερευνηθεί στο παρελθόν [1,2]. Για το λόγο αυτό, τα τρένα μεσαίας κυκλοφορίας του Βρετανικού κώδικα BS 5400 [5] αρχικά διέρχονται πάνω από μια μικρού ανοίγματος γέφυρα. Το μέσο, μέσα σε συγκεκριμένο όγκο, ιστορικό της κύριας τάσης λαμβάνεται σε διάφορα κρίσιμα σημεία εντός της σύνδεσης και η ζημία κόπωσης εκτιμάται χρησιμοποιώντας το διάγραμμα S-N του απλού (χωρίς εγκοπές) υλικού καθώς και τον νόμο του Miner. Η μέθοδος δοκιμάζεται σε ό, τι αφορά τα χαρακτηριστικά σύγκλισής της και οι εκτιμήσεις διάρκειας ζωής σε κόπωση συγκρίνονται με τις εκτιμήσεις

που προέκυψαν από την πιο κλασική προσέγγιση S-N, η οποία βασίζεται στην ονομαστική τάση.



Σχ. 1: (α) FE μοντέλο της γέφυρας (β) Κοντινή άποψη της σύνδεσης και της ονοματολογίας των τρυπών/ήλων

3. Η ΘΕΩΡΙΑ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ (TCD)

Σύμφωνα με τη TCD, όλες οι φυσικές διεργασίες που οδηγούν στην εμφάνιση ρωγμών θεωρούνται ότι λαμβάνουν χώρα μέσα σε μια πεπερασμένη έκταση/όγκο μπροστά από τη συγκέντρωση τάσης. Επομένως, η συμπεριφορά κόπωσης εξαρτάται από την ελαστική κατανομή της τάσης μέσα σε αυτόν τον όγκο και όχι από τη συγκέντρωση τάσης σε ένα μοναδικό σημείο. Το μέγεθος του όγκου μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας δύο υλικές ιδιότητες: το όριο κόπωσης απλών δειγμάτων $\Delta\sigma_0$ και το κατώτατο όριο (κατώφλι) εξέλιξης ρωγμών ΔK_{th} . Μέσα στο πλαίσιο της TCD, η κρίσιμη απόσταση, η οποία χαρακτηρίζει την περιοχή μέσα στην οποία πρόκειται να εξεταστούν οι τάσεις, ορίζεται ως [3]:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

Έχοντας υπολογίσει το L , το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί η χαρακτηριστική τάση, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς κόπωσης. Εδώ, ο υπολογισμός γίνεται μέσα σε ημισφαίριο με κέντρο στη κορυφή της εγκοπής και ακτίνα $1,54L$ [3] σύμφωνα με [3]:

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{V} \int \sigma_{pmax} dV \quad (2)$$

όπου V είναι ο όγκος του ημισφαιρίου και σ_{pmax} είναι η μέγιστη κύρια τάση.

Ακολούθως, η χαρακτηριστική αυτή τάση συγκρίνεται με το σταθερού εύρους όριο κόπωσης (CAFL) του απλού (χωρίς εγκοπή) υλικού προκειμένου να καθοριστεί εάν θα συμβεί αστοχία κόπωσης. Η σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για ένα ευρύ φάσμα γεωμετριών εγκοπών (κυκλικές οπές, γωνίες κλπ.) και υλικών (χάλυβας, χυτοσίδηρος, αλουμίνιο) έχει δείξει ότι η TCD είναι σε θέση να προβλέψει την αντοχή σε κόπωση με ένα περιθώριο σφάλματος 20% [6,7].

Μετά από αυτή τη συνοπτική περιγραφή της TCD, η FE ανάλυση παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Στη παρούσα έρευνα, η TCD χρησιμοποιείται από κοινού με μεταβλητού εύρους φόρτιση η οποία προκύπτει από τη διάβαση τρένων πάνω από μία μικρού ανοίγματος ηλωτή γέφυρα.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FE)

4.1 FE μοντέλο της γέφυρας

Το FE μοντέλο της γέφυρας παρουσιάζεται στο Σχ. 1α ενώ το Σχ. 1β απεικονίζει λεπτομερώς τη σύνδεση που φαίνεται στο Σχ. 1α καθώς επίσης και την ονοματολογία που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν τα μέλη της. Το μοντέλο έχει περιγραφεί και επικυρωθεί λεπτομερώς σε προηγούμενες μελέτες [2]. Οι FE αναλύσεις πραγματοποιούνται υποθέτοντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά υλικού. Δύο επίπεδα σύσφιξης εξετάζονται για τους ήλους, μια χαμηλή έως μέτρια τάση σύσφιξης 100 MPa και μια υψηλή τάση σύσφιξης 200 MPa. Η γέφυρα φορτίζεται από τη μία πλευρά με τα τρένα μεσαίας κυκλοφορίας του BS 5400 [5]. Τα αξονικά φορτία των τρένων εφαρμόζονται στατικά στο πάνω πέλμα των διαμήκων δοκών αγνοώντας κατά αυτό τον τρόπο τη δυναμική ενίσχυση και οποιαδήποτε ευεργετικά αποτελέσματα που συνδέονται με τη διάδοση του φορτίου στις σιδηροτροχιές και τους στρωτήρες.

4.2 Ιδιότητες υλικού

Η γέφυρα θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένη από σφυρήλατο σίδηρο, το οποίο είναι ένα υλικό που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για τον σφυρήλατο σίδηρο ποικίλλει μεταξύ 170 και 220 GPa [8], έχοντας μία μέση τιμή περίπου ίση με 200 GPa. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται εδώ μαζί με μια τιμή του λόγου Poisson ίση με 0,3. Όσον αφορά το κατώτατο όριο (κατώφλι) εξέλιξης ρωγμών, μια τιμή $\Delta K_{th}=13,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ θεωρείται. Αυτή η τιμή προτάθηκε στη [9] μετά από μια σειρά πειραμάτων μεγέθυνσης ρωγμών σε σφυρήλατο σίδηρο με ένα λόγο τάσεων 0,1. Για το όριο κόπωσης $\Delta\sigma_0$ του υλικού, ορισμένο στους $N_{FL}=2\times 10^6$ κύκλους, μια τιμή ίση με 183 MPa χρησιμοποιείται, η οποία είναι βασισμένη σε δοκιμές κόπωσης με λόγο τάσεων 0,1 [10].

4.3 Υπολογισμός ζημίας κόπωσης

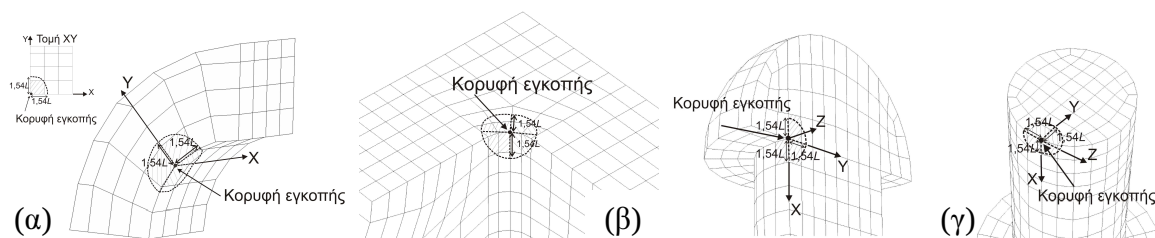
Σε προηγούμενη έρευνα [2], οι κρίσιμες περιοχές μέσα στη σύνδεση εντοπίστηκαν κατά μήκος της περιφέρειας των τρυπών στην επιφάνεια του γωνιακού σύνδεσης σε επαφή με τους κορμούς των δοκών, κατά μήκος του γωνιακού, και γύρω από την περιφέρεια των ήλων στη τομή κεφαλής και κορμού. Οι κρίσιμοι όγκοι που χρησιμοποιούνται μέσα στο πλαίσιο της TCD παρουσιάζονται στο Σχ. 2. Τα στοιχεία μεγέθους $1,54L$ που εξετάζονται για την εκτίμηση της χαρακτηριστικής τάσης παρουσιάζονται σκιασμένα στο Σχ. 2. Οι μέγιστες κύριες τάσεις λαμβάνονται στα κέντρα μάζας αυτών των στοιχείων και η χαρακτηριστική τάση, σ_{ave} , υπολογίζεται βάσει της εξ. (2).

Πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε μία από τις περιοχές που παρουσιάζονται στο Σχ. 2 υπάρχουν πολλαπλοί κρίσιμοι όγκοι που συνδέονται με διαφορετικές κορυφές εγχοπών. Π.χ. στο Σχ. 2α οι κορυφές εγχοπών βρίσκονται γύρω από όλη την περιφέρεια στην επιφάνεια της τρύπας. Προκειμένου να ληφθεί το ιστορικό τάσης, η διαδικασία εφαρμόζεται σε κάθε βήμα φόρτισης της FE ανάλυσης. Έτσι, διάφορα ιστορικά τάσης παράγονται τα οποία αντιστοιχούν στις διαφορετικές κορυφές εγχοπών. Για καθένα από αυτά τα ιστορικά τάσης, η μέθοδος rainflow χρησιμοποιείται για να μετατραπούν σε εύρη τάσεων ($\Delta\sigma_{ave}$) και ο νόμος του Miner εφαρμόζεται στο διάγραμμα S-N του απλού (χωρίς εγχοπή) υλικού. Δεδομένου ότι η φόρτιση τρένων είναι μεταβλητού εύρους, το CAFL δεν λαμβάνεται υπόψη και το διάγραμμα S-N επεκτείνεται κάτω από το $\Delta\sigma_0$ με μία κλίση 1/5.

Κατά συνέπεια, η ζημία κόπωσης για μία διάβαση τρένου, που παράγει k εύρη τάσεων, θα δίνεται από την σχέση:

$$D_{11} = \frac{1}{N_{FL} (\Delta\sigma_0)^5} \sum_1^k n_i [(\Delta\sigma_{ave})_i]^5 \quad (3)$$

όπου $(\Delta\sigma_{ave})_i$ είναι το εύρος της τάσης i και n_i είναι ο αντίστοιχος αριθμός κύκλων φόρτισης. Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές ζημιών που λαμβάνονται από την διάβαση κάθε τρένου πάνω από τη γέφυρα (εξ. (3)) με τις αντίστοιχες συχνότητες των τρένων οι οποίες δίνονται μέσα στον BS 5400 [5] και αθροίζοντας για τα έτη για τα οποία η γέφυρα είναι σε χρήση, υπολογίζεται η συνολική ζημία κόπωσης σε κάθε περιοχή μέσα στη σύνδεση. Εδώ, θεωρείται ότι η μέση κυκλοφορία του BS 5400 ξεκινά το 1970 και ότι η ζημία κόπωσης μέχρι εκείνο τον χρόνο μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα [1]. Για τους υπολογισμούς της υπολειπόμενης ζωής σε κόπωση, η μελλοντική εξέλιξη φορτίων παραβλέπεται.



Σχ. 2: (α) Κρίσιμος όγκος γύρω από την περιφέρεια τρυπών (β) Κρίσιμος όγκος γύρω από το γωνιακό (γ) Κρίσιμος όγκος γύρω από την περιφέρεια ήλων

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

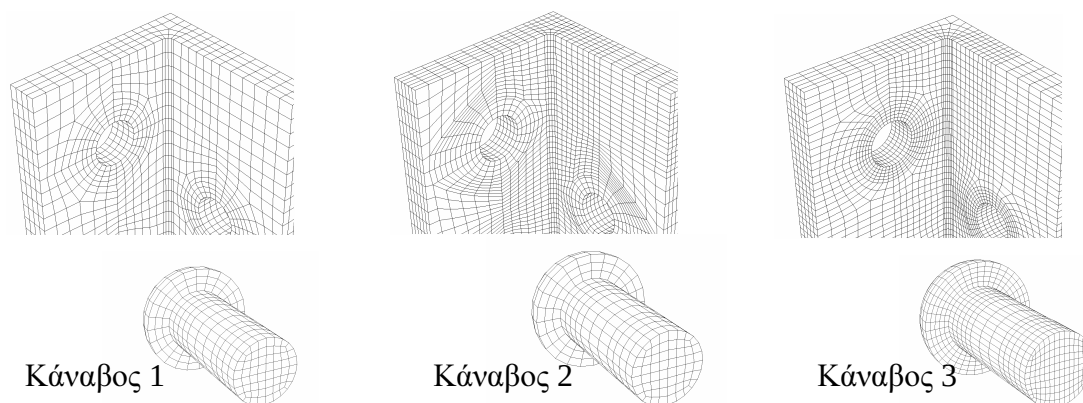
5.1 Μελέτη σύγκλισης

Μελέτη σύγκλισης πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της αύξησης του μεγέθους κανάβου στη ζημία κόπωσης. Τρεις διαφορετικές πυκνότητες κανάβου εξετάστηκαν, οι διαφορές των οποίων παρουσιάζονται στο Σχ. 3. Το Σχ. 4 παρουσιάζει τη ζημία κόπωσης για μία διάβαση τρένου (BS 5400 τρένο αριθ. 7) για τις τρεις διαφορετικές πυκνότητες κανάβου που παρουσιάζονται στο Σχ. 3. Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται για διάφορες περιοχές μέσα στην σύνδεση, αντιστοιχούν σε μια τάση σύσφιξης ήλων 100 MPa. Η σύγκριση των ζημιών κόπωσης που συσχετίζονται με τους κανάβους 1 και 2 δείχνει σημαντικές διαφορές, οι οποίες, σε μερικές περιπτώσεις, φτάνουν το 50%. Αυξάνοντας περαιτέρω την πυκνότητα κανάβου (κανάβος 3), οι διαφορές στη ζημία μειώνονται σημαντικά με μια μέγιστη διαφορά 15% μεταξύ των κανάβων 2 και 3. Το Σχ. 4 δείχνει ότι η μέθοδος όγκου TCD οδηγεί στη σύγκλιση κανάβου σε όλα τα μέλη της σύνδεσης.

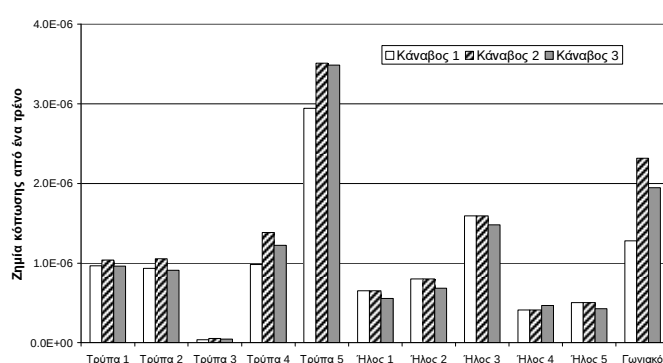
5.2 Ζημία κόπωσης

Η συνολική ζημία κόπωσης D_I για την περίοδο 1970-2007 υπολογίζεται σε κάθε περιοχή χρησιμοποιώντας την εξ. (3) καθώς και τα ιστορικά τάσης και των τεσσάρων τρένων που αποτελούν τη μέση κυκλοφορία του BS 5400. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που παρουσιάζονται μέσα στην [1]. Εκεί, η ζημία D_g υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την κλασική S-N μέθοδο σε συνδυασμό με την καμπύλη S-N της Network Rail [11].

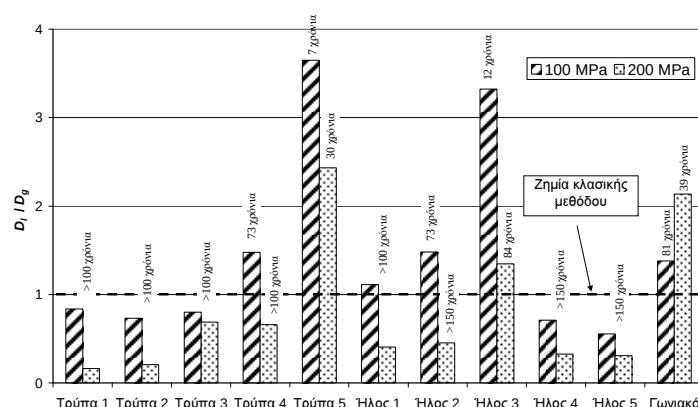
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5 με την μορφή της αναλογίας D_I / D_g καθώς επίσης και των απομένουσων διαρκειών ζωής σε κόπωση. Είναι φανερό ότι η χρήση της



Σχ. 3: Μέρη του FE μοντέλου που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες κανάβου



Σχ. 4: Ζημία κόπωσης σε διαφορετικές περιοχές της σύνδεσης για τρεις διαφορετικές πυκνότητες κανάβου (BS 5400 τρένο αριθ. 7, τάση σύσφιξης = 100 MPa)



Σχ. 5: Σύγκριση της συνολικής ζημίας κόπωσης μεταξύ της κλασικής μεθόδου [1] και της μεθόδου TCD για την περίοδο 1970-2007 και αντίστοιχη απομένουσα ζωή

TCD οδηγεί σε υψηλότερες εκτιμήσεις ζημίας για τις κρίσιμες περιοχές της σύνδεσης (τρύπα 5, ήλος 3 και γωνιακό). Οι διαφορές μεταξύ των προβλέψεων των δύο μοντέλων, για τις κρίσιμες περιοχές, είναι χαμηλότερες στην περίπτωση της υψηλότερης τάσης σύσφιξης των ήλων (200 MPa). Ανάλογα με την τάση σύσφιξης, το Σχ. 5 δείχνει ότι η κλασική μέθοδος αξιολόγησης [1] μπορεί να υποτιμήσει τη ζημία κόπωσης κατά έναν παράγοντα 3,5. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις της απομένουσας διάρκειας ζωής σε κόπωση δείχνουν την αναμενόμενη ευεργετική επίδραση της τάσης σύσφιξης των ήλων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η δημοσίευση παρουσίασε εκτιμήσεις ζημίας κόπωσης για μια τυπική, μικρού ανοίγματος, ηλωτή σιδηροδρομική γέφυρα. Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω μιας νέας προσέγγισης αξιολόγησης της κόπωσης που υιοθετεί τη θεωρία κρίσιμων αποστάσεων (TCD). Η TCD, αντί να βασίζεται στην ονομαστική τάση ή την τάση στην εγκοπή, εξετάζει ολόκληρη την κατανομή τάσης στην περιοχή της εγκοπής. Η μελέτη έδειξε ότι, με την αύξηση της πυκνότητας του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων, επιτυγχάνεται ικανοποιητική σύγκλιση μέσω της χρήσης της TCD. Στη συνέχεια, η ολική ζημία των διαφορετικών μελών της σύνδεσης υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ένα σύνθετο ιστορικό φόρτισης που προέκυψε από την διέλευση τρένων πάνω από τη γέφυρα. Οι εκτιμήσεις ζημίας συγκρίθηκαν με τις εκτιμήσεις που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την κλασική προσέγγιση βασισμένη σε ονομαστικές τάσεις και το αντίστοιχο διάγραμμα S-N. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κλασική προσέγγιση τείνει να υποτιμήσει τη ζημία κόπωσης των κρίσιμων περιοχών της σύνδεσης, κατά ένα μέγιστο παράγοντα 3,5. Αυτές οι διαφορές βρέθηκαν να είναι μικρότερες στην περίπτωση της υψηλότερης δύναμης σύσφιξης. Παρόλο που η TCD απαιτεί μεγάλη μετεπεξεργασία, ειδικά σε τρισδιάστατες εφαρμογές γεφυρών, το γεγονός ότι βασίζεται σε απλό χαρακτηρισμό του υλικού καθώς και τα συγκλίνοντα χαρακτηριστικά της την κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική για την αξιολόγηση κόπωσης πολύπλοκων λεπτομερειών γεφυρών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Imam B., Righiniotis T.D., Chryssanthopoulos M.K. και Bell B. “Analytical fatigue assessment of a typical riveted UK rail bridge”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE) – Bridge Engineering*, Vol. 159, No. 3, 2006, pp. 105-116.
- [2] Imam B.M., Righiniotis T.D. και Chryssanthopoulos M.K. “Numerical modelling of riveted railway bridge connections for fatigue evaluation”, *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 11, 2007, pp. 3071-3081.
- [3] Bellett D., Taylor D., Marco S., Mazzeo E., Guillois J. και Pircher T. “The fatigue behaviour of three-dimensional stress concentrations”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. 3, 2005, pp. 207-221.
- [4] Al-Emrani M. “Fatigue in riveted railway bridges – A study of the fatigue performance of riveted stringers and stringer-to-floor-beam connections”, *PhD Thesis*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2002.
- [5] BS 5400. “Steel, concrete and composite bridges: Part 10: Code of practice for fatigue”, London: British Standards Institute, 1980.
- [6] Taylor D. και Wang G. “The validation of some methods of notch fatigue analysis”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 23, No. 5, 2000, pp. 387-394.
- [7] Susmel L. και Taylor D. “Fatigue design in the presence of stress concentrations”, *Journal of Strain Analysis and Engineering Design*, Vol. 38, No. 5, 2003, pp. 443-452.
- [8] Imam B. “Fatigue analysis of riveted railway bridges”, *PhD Thesis*, University of Surrey, UK, 2006.
- [9] Helmerich R., Kühn B. και Nussbaumer A. “Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life”, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 3, No. 3, 2007, pp. 245-255.
- [10] Cullimore M.S.G. “The fatigue strength of wrought iron after weathering in service”, *The Structural Engineer*, Vol. 45, No. 5, 1967, pp. 193-199.
- [11] Railtrack. “RT/CE/C/025, Railtrack line code of practice: The structural assessment of underbridges”, Railtrack, UK, 2001.

FATIGUE EVALUATION OF RIVETED BRIDGE CONNECTIONS USING THE THEORY OF CRITICAL DISTANCES**Boulent M. Imam**

Lecturer in Civil Engineering, BSc, MSc, PhD
Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey
Guildford, Surrey, GU2 7XH, UK
Email: b.imam@surrey.ac.uk

Timothy D. Righiniotis

Lecturer in Civil Engineering Structures, BEng, PhD, DIC, MASTM
Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey
Guildford, Surrey, GU2 7XH, UK
Email: t.righiniotis@surrey.ac.uk

SUMMARY

In the past few years, fatigue of riveted railway bridge connections has received considerable attention. A number of damaged cases have been reported for stringer-to-cross-girder connections both in railway and highway bridges. Fatigue damage in these connections is caused by deformation induced secondary stresses, which are often very difficult to analyse, requiring sophisticated FE models. Estimating the fatigue damage in these connections through current assessment codes, in which a single stress descriptor (the nominal stress) is traditionally used, is not a straightforward process due to the multiaxial nature of the stresses.

The aim of this paper is to present a novel method for fatigue damage and remaining life estimation. The method is applied to a critical stringer-to-cross-girder connection in a typical, short-span, riveted railway bridge and its results are compared with those obtained using the traditional S-N approach. For the purposes of this investigation, a previously developed and benchmarked FE model of the bridge and the connection is analysed under the passage of trains. The recently developed Theory of Critical Distances (TCD) is employed for damage calculations. Sensitivity studies show that through the use of the TCD, fatigue damage converges with increasing mesh density. Furthermore, the results reveal that, in some cases, the traditional S-N method can underestimate fatigue damage by a factor of 3.5.