

ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Νικολαΐδης Ν. Θεμιστοκλής, Κόντης Λ. Αθανάσιος, Μπανιωτόπουλος Κ. Χαράλαμπος¹

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

E-mail: think@civil.auth.gr

¹School of Civil Engineering, University of Birmingham
B15 2TT Birmingham, United Kingdom

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μεθοδολογία ελέγχου και αποκατάστασης της παλαιάς χαλύβδινης δικτυωτής σιδηροδρομικής γέφυρας δύο ανοιγμάτων στον Εχέδωρο ποταμό. Ο βιώσιμος σχεδιασμός υφιστάμενης γέφυρας είναι απαραίτητος καθώς έτσι δίδεται απάντηση στα ζητήματα επάρκειας φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με την προβλεπόμενη χρήση μέσα από ένα ορθολογικό πρόγραμμα επεμβάσεων, αλλά και στον προσδιορισμό του υπολοίπου χρόνου ζωής της. Κρίσιμο εργαλείο για αυτή την ανάλυση αποτελεί η επιτόπου λεπτομερής αποτύπωση στη θέση της γέφυρας και η καταγραφή της ακριβούς γεωμετρίας της, όπως και των επιμέρους δομικών στοιχείων που την συνθέτουν. Έτσι εξασφαλίζεται ότι λαμβάνονται υπόψη ακριβή μεγέθη και διαστάσεις στα υπολογιστικά μοντέλα ελέγχου, ενώ αυτή η καταγραφή παραμένει για τη συνέχεια της έρευνας αλλά και για μελλοντική αξιοποίηση.

Ο έλεγχος σε οριακές καταστάσεις και οι παράμετροι σχεδιασμού λαμβάνονται κατ' εφαρμογή των συστάσεων και οδηγιών "Sustainable Bridges" που έχουν εκδοθεί υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Στην ανάλυση χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS για το γενικό μοντέλο της γέφυρας, αλλά και για ειδικά μοντέλα ελέγχου λεπτομερειών στα οποία λαμβάνονται υπόψη και οι συνθήκες επαφής μεταξύ των συνδεόμενων μελών. Με τα ειδικά αυτά μοντέλα διενεργείται και ο έλεγχος σε κόπωση χαρακτηριστικών κρίσιμων λεπτομερειών του φορέα, όπως χαλύβδινες πλάκες κόμβων και ηλώσεις. Από τους ελέγχους διαπιστώνεται η στιβαρότητα του φέροντος οργανισμού υπό τη δράση των φορτίων σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη και την έντονη λοξότητα της γέφυρας σε κάτοψη. Η απάντηση στο ερώτημα της βιωσιμότητας της γέφυρας εξαρτάται κυρίως από τα αποτελέσματα του ελέγχου σε κόπωση και οδηγεί στην εκτίμηση του υπολοίπου χρόνου ζωής της. Επιπρόσθετα η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό των αβεβαιοτήτων του σχεδιασμού αποκατάστασης μέσα από την εξασφάλιση ευρωστίας κρίσιμων μελών και συνδέσεων της.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια επέμβαση αποκατάστασης γέφυρας χαρακτηρίζεται ως βιώσιμη όταν στον σχεδιασμό της περιλαμβάνονται, η αποτίμηση του υπολοίπου χρόνου ζωής, ο ακριβής καθορισμός των μελλοντικών απαιτήσεων κυκλοφορίας και η δυνατότητα κάλυψης τους από τη γέφυρα και βέβαια το τελικό κόστος των επεμβάσεων σε σχέση με τη σπουδαιότητα της γέφυρας αλλά και το πιθανό κόστος αντικατάστασης της. Ειδικά στην περίπτωση όπου η γέφυρα είναι χαρακτηρισμένη ως ιστορική καθώς περιέχει χαρακτηριστικά που αφορούν, την τοποθεσία ή τα ιστορικά γεγονότα με τα οποία συνδέεται ή ακόμα χαρακτηριστικά για τα οποία αποτελεί σημαντικό μνημείο σχεδιασμού για την ιστορία της μηχανικής των κατασκευών. Στην Ελλάδα ιδιαίτερα εντοπίζονται αρκετές τέτοιες περιπτώσεις γεφυρών, ιδιαίτερα κατά μήκος του σιδηροδρομικού δικτύου, οι οποίες είναι συνήθως χαλύβδινες και ανακατασκευάστηκαν μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου πολέμου. Μια τέτοια γέφυρα είναι και η ιστορική χαλύβδινη δικτυωτή σιδηροδρομική γέφυρα δύο ανοιγμάτων στον Εχέδωρο ποταμό, η οποία χρησιμοποιείται ως υπολογιστικό μοντέλο στην παρούσα εργασία για να καταδείξει τα χαρακτηριστικά μιας βιώσιμης αποκατάστασης. Ο καθορισμός των κριτηρίων σχεδιασμού, ο οποίος οδηγεί στην βιώσιμη αποκατάσταση προκύπτει από το πλαίσιο των οδηγιών με τον γενικό τίτλο 'Sustainable Bridges' οι οποίες εκδόθηκαν από διευρωπαϊκή επιστημονική ομάδα εργασίας υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Από την άλλη πλευρά βάση για τον καθορισμό των κρίσιμων μεγεθών σχεδιασμού και τους ελέγχους αποτίμησης της γέφυρας χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μέσα από το πρόγραμμα ANSYS. Πρόκειται για συνδυασμένη ανάλυση που αφορά τόσο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων όλης της γέφυρας, όσο και επιμέρους μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση σε βάθος κρίσιμων κατασκευαστικών λεπτομερειών. Ιδιαίτερα με τα επιμέρους μοντέλα προσομοιώνονται με ακρίβεια οι πλέον χαρακτηριστικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, οι οποίες εμπεριέχουν τόσο τις ηλώσεις, όσο και τα συνδεδεμένα ελάσματα και τις συνθήκες επαφής μεταξύ τους ώστε να μπορούν να γίνουν διάφορες παραμετρικές αναλύσεις και η αντίστοιχη αποτίμηση τους. Η ανάλυση αυτή υποβοηθείται αρκετά από την ειδική έκδοση «Workbench» του προγράμματος ANSYS και την διαδικασία αναλυτικής τρισδιάστατης σχεδίασης και εισαγωγής του μοντέλου στο πρόγραμμα και την επιλογή της κατάλληλης διακριτοποίησης και συνθηκών επαφής.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η υφιστάμενη σιδηροδρομική γέφυρα στον Εχέδωρο ποταμό αποτέλεσε νευραλγικό τεχνικό έργο του σιδηροδρομικού δικτύου για την Ελλάδα και το εξωτερικό για πολλές δεκαετίες (βλ. Εικ. 1). Η γέφυρα αυτή, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιστορική ανακατασκευάστηκε πλήρως περί το 1946 μετά τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο στη θέση ακόμα παλαιότερης μεταλλικής γέφυρας που υπήρχε εκεί από το 1896. Η γέφυρα καθώς διασταυρώνεται με τον ποταμό με σημαντική λοξότητα, καλύπτει ένα συνολικό άνοιγμα $L = 121,00m$, το οποίο γεφυρώνεται με δύο χαλύβδινα αμφίεριστα φατνώματα που στηρίζονται στα εκατέρωθεν ακρόβαθρα, αλλά και σε ένα μεσόβαθρο στο μέσον του ποταμού τα οποία είναι ογκώδεις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα δύο στατικά ανεξάρτητα χαλύβδινα τμήματα του φορέα έχουν επιμέρους μήκη $l_i = 60.00m$ και αποτελούνται από δύο άνω δικτυώματα τοποθετημένα στα άκρα της διατομής του καταστρώματος [1], [2]. Κάθε άνοιγμα, το οποίο διαμορφώνεται με μεγάλη λοξότητα στην κάτοψη αποτελείται από το κατάστρωμα κυκλοφορίας (χαλύβδινο χωρίς έρμα) το οποίο συνδέεται με δύο εκατέρωθεν αυτού χαλύβδινα δικτυωτά άνω ζευκτά (βλ. Εικ.1α). Τα συνδεδεμένα μέρη τόσο μεταξύ των μελών του δικτυώματος, όσο και μεταξύ των κύριων δοκών καταστρώματος, στους κόμβους του κάτω πέλματος των δικτυωμάτων, είναι χαλύβδινοι ήλοι. Οι ηλώσεις αποτελούσαν για πολλά χρόνια τον

κύριο τρόπο σύνδεσης μεταξύ των μελών μεταλλικών φορέων, με αποτέλεσμα οι συνδέσεις αυτές να εμφανίζονται στα περισσότερα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς με βασικό υλικό τον χάλυβα που πρέπει να διατηρηθούν, όπως ιστορικές γέφυρες, αξιόλογα κτίρια ή και άλλες ειδικές κατασκευές. Στη συγκεκριμένη γέφυρα, τα χαλύβδινα μέρη της έχουν κατασκευαστεί με μεταφερόμενα προκατασκευασμένα στοιχεία, τα οποία τοποθετήθηκαν και συνδέθηκαν μεταξύ τους επί τόπου με ηλώσεις.



Εικόνα 1. Αποψη α) του καταστρώματος β) τυπικού κόμβου της παλαιάς δικτυωτής σιδηροδρομικής γέφυρας

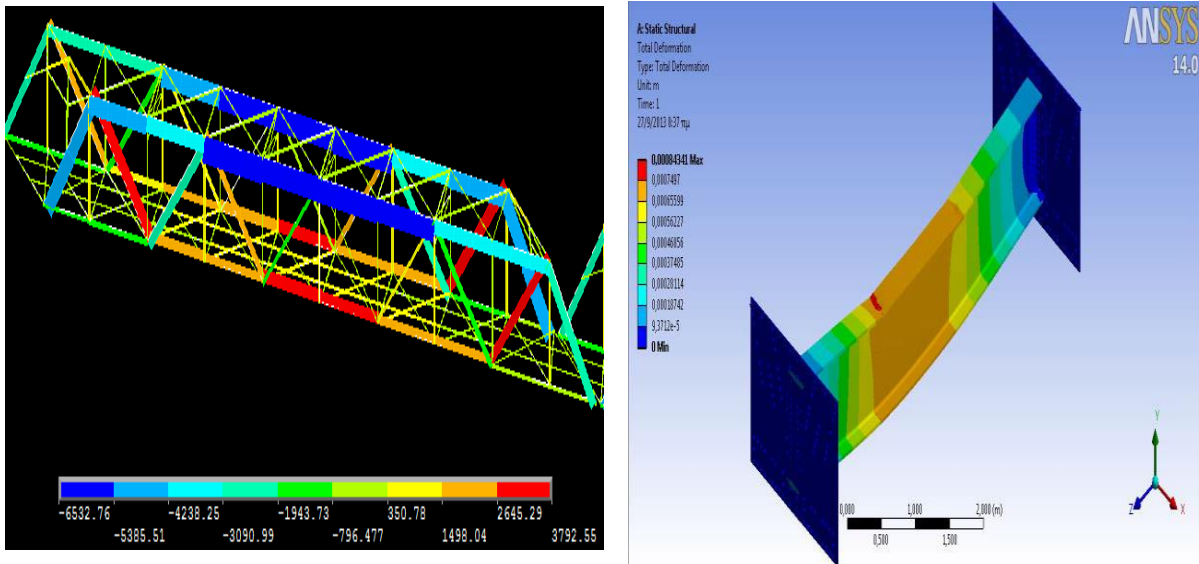
Κάθε χαλύβδινο δικτύωμα που στηρίζει ένα από τα δύο ανοίγματα της γέφυρας διαμορφώνεται από ολόσωμες διατομές I, H, γωνιακά ή ειδικά τεμάχια αλλά και σύνθετες ηλωτές διατομές διαφόρων μορφών. Οι μορφές αυτές είναι καταγεγραμμένες στη βιβλιογραφία παλαιότερων ετών με αναλυτική περιγραφή διαστάσεων, μηχανικών χαρακτηριστικών αλλά και παραμέτρων αντοχής. Χαρακτηριστική είναι η σύνθετη διατομή μορφής κλειστού διπλού H (channel) αποτελούμενη από 2 τοποθετημένες συμμετρικά και αντίθετα διατομές UNP (κορμούς) και συνδεδεμένες στα πέλματα τους με 2 αντίστοιχες πλάκες (πέλματα) μέσω συνεχών διαμήκων ηλώσεων. Οι διατομές UNP των κορμών της σύνθετης διατομής φέρουν σε σταθερές αποστάσεις κατά μήκος ελλειψοειδείς οπές για μείωση του βάρους και αποφυγή συγκέντρωσης νερών στο εσωτερικό της κλειστής διατομής αλλά και για μεταβολή της απόκρισης της γέφυρας και των μελών της στη δράση του ανέμου. Τα δύο δικτύωματα κάθε ανοίγματος συνδέονται όπως αναφέρθηκε στο κάτω πέλμα μέσω του καταστρώματος κυκλοφορίας, το οποίο διαθέτει προς ενίσχυση του διαφράγματος, πέραν των κύριων εγκάρσιων δοκών και των διαμήκων διαδοκίδων, οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Αντίστοιχα στο άνω πέλμα η σύνδεση των δύο δικτυωμάτων γίνεται με οριζόντιο δικτύωμα δυσκαμψίας και αντιστήριξης ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική αντιστήριξη του θλιβόμενου πέλματος έναντι λυγισμού διαμορφώνοντας έτσι ένα εξαιρετικά ανθεκτικό και δύσκαμπτο άνοιγμα συνολικά. Αδυναμία του στατικού συστήματος, πέρα από το αντικειμενικό γεγονός της ηλικίας της γέφυρας και των κύκλων φόρτισης που έχει ήδη υποστεί είναι ότι παραλαμβάνει απευθείας τα φορτία κυκλοφορίας χωρίς την παρεμβολή έρματος δημιουργώντας έτσι αυξημένες ταλαντώσεις, ενώ αναπτύσσονται σημειακές και όχι καταναμημένες φορτίσεις στις κύριες δοκούς του καταστρώματος. Η γενική κατάσταση της γέφυρας στο σύνολο της παρά το γεγονός ότι δεν βρίσκεται σε λειτουργία εδώ και αρκετά χρόνια είναι καλή. Εντοπίζονται βέβαια κάποια προβλήματα διάβρωσης σε κόμβους (βλ. Εικ. 1β) και ήλους που προέρχονται από την έλλειψη τακτικού προγράμματος συντήρησης στη γέφυρα αλλά αυτά κρίνεται ότι επιδιορθώνονται, ενώ η γέφυρα λειτουργικά μπορεί να ενταχθεί σε τοπικό σιδηροδρομικό δίκτυο με βιώσιμο τρόπο. Η κατάταξη και κατηγοριοποίηση του τύπου χάλυβα που λαμβάνεται υπόψη ως βασικό δομικό υλικό της γέφυρας έγινε στη βάση υφιστάμενων στοιχείων ερευνών και οδηγιών [3], [4] με τη βοήθεια και ιστορικών εγχειριδίων του οίκου παραγωγής των προκατασκευασμένων μελών της (Carnegie Steel Company's Standard specifications). Με τα μηχανικά αυτά χαρακτηριστικά του υλικού και με διαδοχικές επισκέψεις στη θέση της γέφυρας έγινε εφικτή η διερεύνηση της αντοχής της γέφυρας.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Προκειμένου να καθοριστεί με ρεαλιστικό τρόπο ένας συντελεστής ασφαλείας στην ανάλυση σχεδιασμού της γέφυρας, ελέγχθηκε η συμπεριφορά της γέφυρας κάτω από διάφορα κριτήρια οριακών καταστάσεων σχεδιασμού όπως Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας ΟΚΑ, Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας ΟΚΛ αλλά και Οριακή Κατάσταση Κόπωσης. Το όριο αντοχής θραύσης του παλαιού μη-συγκολλησίμου χάλυβα της γέφυρας προσδιορίστηκε στην τιμή $f_u = 385 \text{ N/mm}^2$ και το αντίστοιχο όριο διαρροής ή ελαστικό όριο στην τιμή $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$. Η εκτίμηση αυτή όμως που εδώ εκτιμήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές και γενική παρατήρηση πρέπει να συμπληρώνεται με επί τόπου μη καταστροφικούς ελέγχους αλλά και πρόγραμμα εργαστηριακών ελέγχων επιβεβαίωσης των χαρακτηριστικών του υλικού και της αντοχής του. Αντίστοιχα η δύναμη περίσφιξης που αναλαμβάνουν οι ήλοι λαμβάνεται αρχικά υπόψη με μια μέση τιμή 100 N/mm^2 , σύμφωνα με τα στοιχεία των βιβλιογραφικών αναφορών και σε αντιστοιχία με την επιτόπου παρατήρηση και έλεγχο όπου προκύπτει δομική ακεραιότητα χωρίς βλάβες ή διάκενα μεταξύ των συνδεομένων ελασμάτων. Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής όμως προτείνεται η διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας κρίσιμων λεπτομερειών, με παραμετρική μεταβολή (κανονική ή και με διασπορά στην τιμή μεταξύ τους πάνω σε μια λεπτομέρεια) στην τιμή της δύναμης περίσφιξης που αναλαμβάνουν οι ήλοι από 50 N/mm^2 σε 200 N/mm^2 . Τέλος και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα και τις αβεβαιότητες σχεδιασμού λαμβάνεται υπόψη στους ελέγχους αντοχής συντελεστής ασφαλείας υλικού για τον παλαιό χάλυβα η συνιστώμενη βιβλιογραφικά τιμή

Στην εργασία αυτή η κατασκευή αναλύθηκε αρχικά με ένα τρισδιάστατο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων (βλ. Εικ. 2α) που περιλαμβάνει το σύνολο της γέφυρας με το πρόγραμμα ANSYS Workbench. Στη συνέχεια η ανάλυση προχώρησε με επί μέρους πιο αναλυτικά και ακριβή, τρισδιάστατα μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων σύνθετων λεπτομερειών ώστε να διερευνηθεί σε βάθος οι οριακές παράμετροι κρίσιμων λεπτομερειών για τη βιωσιμότητα της γέφυρας. Μια τέτοια αντιπροσωπευτική σύνθετη λεπτομέρεια είναι αυτή που αφορά τη σύνδεση της κύριας δοκού καταστρώματος με τις χαλύβδινες πλάκες (Gusset plates) μεταφοράς και κατανομής των δυνάμεων στους κόμβους των κάτω πελμάτων των εκατέρωθεν δικτυωμάτων (βλ. Εικ. 2β). Η σύνδεση μεταξύ των μελών αυτών γίνεται με ήλους που προσομοιώνονται κατάλληλα και με την ακριβή τους γεωμετρία χρησιμοποιώντας κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία με το πρόγραμμα ANSYS Workbench. Με το τρισδιάστατο μοντέλο της σύνθετης κατασκευαστικής λεπτομέρειας τίθεται υπό διερεύνηση τοπικές διαφοροποιήσεις στη δύναμη περίσφιξης των ήλων και πιθανές αστοχίες ή βλάβες σε αυτούς. Αντίστοιχη ανάλυση μπορεί να δοθεί με εισαγωγή μιας τοπικής αστοχίας στην πλάκα, αλλά η διερεύνηση αυτή είναι έξω από τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Τα μοντέλα φόρτισης σιδηροδρομικής κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο μοντέλα, κατάλληλα διαμορφωμένα για την εκάστοτε περίπτωση εφαρμογής, ελήφθησαν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 μέρος 2 EN-1991-2. Συγκεκριμένα τέθηκαν υπόψη στην ανάλυση τα μοντέλα φόρτισης LM 71, SW/0 and SW/2 και η κατανομή τους για την περίπτωση σιδηροδρομικής γέφυρας μονής γραμμής. Ταυτόχρονα τα φορτία αυτά πολλαπλασιάστηκαν α) με το συντελεστή κατηγοριοποίησης $a_{LC} = 1,00$ (με τιμή που περιγράφεται στις οδηγίες για βιώσιμες γέφυρες) και β) με το δυναμικό συντελεστή για γραμμή με κανονική συντήρηση (Πιν. 6.2(5.6), EN-1991-2). Ειδικά για το υπολογιστικό μοντέλο του συνόλου της γέφυρας και για κάθε ένα από τα δυο δικτυώματα κάθε φατώματος, ελήφθησαν αμφιέριστες συνθήκες στήριξης (άρθρωση – κύλιση) να διαμορφώνεται στις εκατέρωθεν εδράσεις. Από την άλλη μεριά με το τρισδιάστατο μοντέλο της σύνθετης κατασκευαστικής λεπτομέρειας τέθηκαν υπό διερεύνηση τοπικές διαφοροποιήσεις στη δύναμη περίσφιξης των ήλων και πιθανές αστοχίες ή βλάβες σε αυτούς. Αντίστοιχη ανάλυση μπορεί να δοθεί με εισαγωγή μιας τοπικής αστοχίας στην πλάκα, αλλά η ανάλυση αυτή είναι έξω από τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση, η συχνότητα ταλάντωσης του καταστρώματος σύμφωνα με τους υπολογισμούς ικανοποιεί τις προδιαγραφές σχεδιασμού $n_o^{lower} < n_o = 4,33Hz < n_o^{upper}$ ώστε η επιρροή της ταλάντωσης να εκτιμηθεί με τον προβλεπόμενο συντελεστή. Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς μέσω των συνδυασμών δράσης, ελήφθησαν υπόψη όλα τα ειδικά φορτία που προβλέπονται σε μια ανάλυση σιδηροδρομικής γέφυρας όπως, έκκεντρη θέση των κινητών φορτίων, δυνάμεις τροχοπέδησης και επιτάχυνσης, δράση ανέμου κ.α.



Εικόνα 2. Αποτελέσματα α) τρισδιάστατου μοντέλου όλης της γέφυρας - διάγραμμα αξονικών δυνάμεων των ράβδων του ζευκτού, β) τρισδιάστατου μοντέλου κρίσιμης σύνθετης λεπτομέρειας – τάσεις von Mises

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα (βλ. Εικ. 2α), όλα τα κύρια μέλη του δομικού συστήματος της γέφυρας ικανοποιούν τον έλεγχο αστοχίας για όλους τους χαρακτηριστικούς συνδυασμούς δράσης των Ο.Κ.Α. [5],[6],[7]. Αντίστοιχη επίλυση και ικανοποιητική απόκριση (βλ. Εικ. 2β) σύμφωνα με το υπολογιστικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε προηγούμενα γίνεται και για την κρίσιμη σύνθετη λεπτομέρεια σύνδεσης κύριας δοκού καταστρώματος με τις εκατέρωθεν πλάκες των ηλωτών κόμβων σύνδεσης με τα δικτυώματα για το συνδυασμό φόρτισης υπό την φόρτιση κυκλοφορίας LM 71. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνεται εκτίμηση τάσεων σε όλα τα συνδετήρια ελάσματα και πλάκες σύνδεσης αλλά και στους ήλους.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Η αστοχία εξαιτίας της κόπωσης συμβαίνει σε ένα συγκεκριμένο τμήμα της γέφυρας εξαιτίας της επαναλαμβανόμενης φόρτισης, πολλές φορές σε επίπεδα μικρότερα από τα κρίσιμα φορτία σχεδιασμού) και της αντίστοιχης επαναλαμβανόμενης μεταβολής τάσεων στο μέλος ή τη λεπτομέρεια που εξετάζεται [8]. Ο έλεγχος κόπωσης στο συγκεκριμένο τύπο γέφυρας καθίσταται κρίσιμος, τόσο στα δομημένα με ηλώσεις σύνθετα μέλη, όσο και στις λεπτομέρειες των κόμβων, καθώς εκεί η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω μεγάλου αριθμού ήλων. Κρίσιμα μέλη στην περίπτωση αυτή είναι τόσο οι ήλοι όσο και τα συνδετήρια ελάσματα μιας λεπτομέρειας. Για γέφυρες από χάλυβα ο ασφαλής σχεδιασμός έναντι κόπωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EN1993-1-9) εξασφαλίζεται στο βαθμό που ικανοποιείται η σχέση (1): $\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$. Για την κατασκευή αυτή που οι συνδέσεις διαμορφώνονται στο σύνολο τους με ηλώσεις το ονομαστικό εύρος τάσεων υπολογίζεται στην καθαρή διατομή (πλήρης διατομή πλην τις οπές των ήλων για μια

κρίσιμη τομή). Για την εκτίμηση του εύρους των τάσεων $\Delta\sigma_E$ τίθεται αντίστοιχος συνδυασμός συρμού ελαφριάς αλλά τακτικά επαναλαμβανόμενης φόρτισης, όπου το βαρύ τμήμα του φορτίου τίθεται στις πλέον κρίσιμες θέσεις φόρτισης για τα στοιχεία λεπτομερειών που εξετάζονται.

Νο Τύπου τραίνων (συνδ. συρμού ελαφρού φόρτου)	$\Delta\sigma_i$ (Μpa)	N_i (cycles)	n_i (cycles)	n_i / N_i
1	120.91	2.60×10^5	7.30×10^4	0.279
2	38.24	3.36×10^6	3.65×10^5	0.108
3	33.25	2.32×10^7	6.93×10^6	0.298
4	28.56	1.10×10^7	1.82×10^5	0.016
$D_d = \sum (n_i / N_i) \leq 1$				0.701

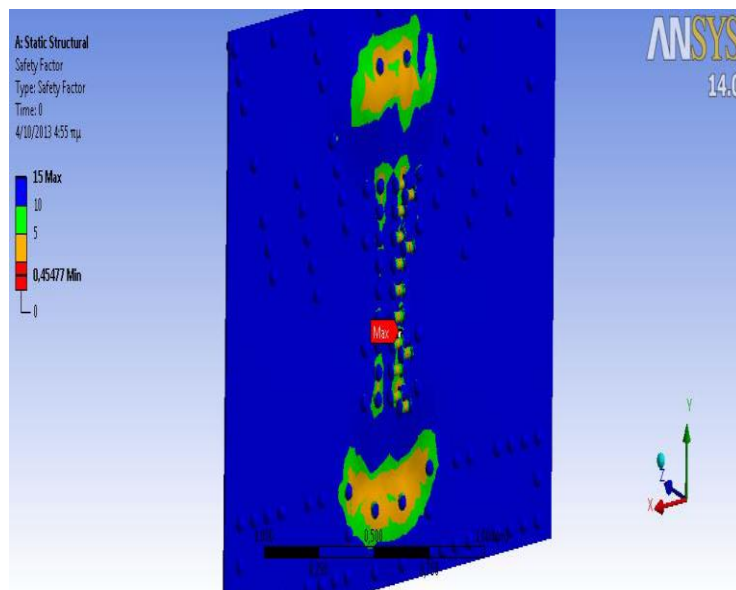
Πίνακας 1. Σωρευτική εκτίμηση βλάβης για κρίσιμο έλασμα σύνθετης λεπτομέρειας

Η σωρευτική εκτίμηση βλάβης για ένα μεταβλητό εύρος φόρτισης, το οποίο στην περίπτωση συνδυασμού κυκλοφορίας περιγράφεται ως συνδυασμός συρμού ελαφρού φορτίου “light traffic mix” που εξαρτάται από την πιθανότητα και τη συχνότητα με την οποία η γέφυρα και η γραμμή μπορεί να φέρει συνδυασμούς συρμού ελαφρού φορτίου, βασίζεται στον κανόνα Palmgren-Miner συσσώρευσης βλαβών $D_d = \sum (n_i / N_i)$, όπου N_i είναι ο αριθμός των κύκλων εύρους τάσεων που πέρα από τον οποίο προκαλείται αστοχία για την κρίσιμη αυτή λεπτομέρεια, n_i είναι ο αριθμός των πραγματικών κύκλων εύρους τάσεων στη διάρκεια ζωής της γέφυρας και $\Delta\sigma_i$ είναι το ονομαστικό εύρος τάσεων. Το τρέινα λειτουργίας για συνδυασμό συρμού ελαφρού φορτίου στην ανάλυση αυτή προέρχονται από τους τύπους 1,2,5 & 9 όπως καθορίζονται στο Παράρτημα Δ του Ευρωκώδικα 1 (EN1991-2). Για κάθε κρίσιμο μέλος λεπτομέρειας σύνδεσης που τίθεται κάτω από διερεύνηση, όπως η σύνθετη λεπτομέρεια που αναλύεται εδώ, προσδιορίζεται η συσσώρευση βλάβης (βλ. Πιν. 1).

Μερικός συντ. ασφαλείας	γ_{Ff}	$\Delta\sigma_i$ (Μpa)	n_i (cycles)	Number of train (LM 71) per day
Επίπεδο ανοχής σε βλάβες/χαμηλό επίπεδο κινδύνου	1.00	175.47	5.00×10^5	13.50
Επίπεδο ανοχής σε βλάβες/υψηλό επίπεδο κινδύνου	1.15	149.48	3.00×10^5	8.20
Επίπεδο ασφάλειας ζωής / χαμηλό επίπεδο κινδύνου	1.15	149.48	3.00×10^5	8.20
Επίπεδο ασφάλειας ζωής / υψηλό επίπεδο κινδύνου	1.35	129.98	1.70×10^5	4.50

Πίνακας 2. Εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση (T=100 έτη) για τη χαλύβδινη δικτυωτή γέφυρα

Η ικανοποίηση του κριτηρίου συσσώρευσης βλάβης αποτελεί ένα από τα κύρια κριτήρια βιωσιμότητας του σχεδίου αποκατάστασης. Με τη χρήση της σχέσης (1) μπορεί η ανάλυση κόπωσης (έχοντας ως βάση μια κρίσιμη λεπτομέρεια) να προχωρήσει σε μια εκτίμηση των φορτίων τραίνων. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει με προσδιορισμό αριθμού ρεαλιστικών και πραγματικών συρμών τραίνων που μπορεί να διέρχονται από τη γέφυρα, λαμβάνοντας υπόψη συντελεστές ασφαλείας για τις δράσεις $\gamma_{FF} = 1,00-1,35$ ανάλογα με το επίπεδο επιτελεστικότητας που μπορεί να τεθεί και για τις αντιστάσεις $\gamma_{Mf} = 1,15$, μια εκτιμώμενη διάρκεια ζωής και λειτουργίας (εδώ τίθεται διάρκεια ζωής 100 ετών, βλ. Πιν. 2). Να σημειωθεί ότι για την ανάλυση αυτή, η πραγματική διάρκεια ζωής θα προκύψει από την αφαίρεση του χρόνου ζωής που έχει παρέλθει (με συνθήκες φόρτισης στη γέφυρα). Η ανάλυση αυτή αναφορικά με την κρίσιμη λεπτομέρεια που εξετάζεται έναντι αστοχίας κόπωσης μπορεί να γίνει και κάτω από μια καθορισμένη ως πραγματική φόρτιση με το Μοντέλο συρμού LM 71, χρησιμοποιώντας το ειδικό πρόγραμμα ANSYS Workbench και θέτοντας τις παραμέτρους σχεδιασμού και χρόνου ζωής που αναλύθηκαν πιο πάνω.



Εικόνα 3. Εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας σε κόπωση κρίσιμης πλάκας σύνδεσης για την ζητούμενη διάρκεια ζωής

Κατά συνέπεια, η διάρκεια ζωής σε κόπωση του κάθε συστατικού μια σύνδεσης μπορεί να προσδιοριστεί διακριτά, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα να εντοπιστούν οι πλέον κρίσιμες θέσεις και μέλη που ενδέχεται να οδηγήσουν πιο σύντομα σε αστοχία. Ο συγκεκριμένος συντελεστής με τον τρόπο που εξάγεται μας δίνει μια χρήσιμη και πλήρως αξιοποιήσιμη εικόνα της πιθανής αποτυχίας (βλ. Εικ. 3)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή κατεβλήθη προσπάθεια να παρουσιαστούν στοιχεία μιας διαδικασίας σχεδιασμού αποκατάστασης γέφυρας βάσει κριτηρίων βιώσιμου σχεδιασμού στο πλαίσιο των Ευρωκωδίκων, με χρήση και ανάλυση αντίστοιχη με αυτή που καθορίζουν οι εκδοθείσες Ευρωπαϊκές οδηγίες για βιώσιμες σιδηροδρομικές γέφυρες. Ο σχεδιασμός και η αποτίμηση των ελέγχων έναντι κόπωσης κατέστη ο κρίσιμος συνδυασμός που καθορίζει τα βιώσιμα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αποκατάστασης της γέφυρας [9]. Η ανάλυση αυτή με τα καθολικά αλλά και τα λεπτομερή υπολογιστικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κρίσιμων λεπτομερειών, κατέδειξε το πεδίο τάσεων που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια κρίσιμη λεπτομέρεια. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία αποκατάστασης μπορεί είτε να εστιάσει σε κρίσιμα μέλη μιας λεπτομέρειας για

να τα αποκαταστήσει, να τα αντικαταστήσει ή ακόμα και να τα ενισχύσει. Η παραμετρική και σε βάθος ανάλυση τάσεων ιδιαίτερα σε μια λεπτομέρεια λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια πραγματικών συνθηκών ή πιθανών αστοχιών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πέρα από τη γενική εικόνα από τη μη χρήση και συντήρηση της γέφυρας, η οποία σαφώς μπορεί να βελτιωθεί η φέρουσα ικανότητα της παραμένει σημαντική. Επομένως ένας τέτοιος σχεδιασμός και μελέτη αποκατάστασης μπορεί να είναι βιώσιμος και λειτουργικός με την σαφή προσθήκη στη διαδικασία αυτή, ενός προγράμματος μη καταστροφικών ελέγχων επί τόπου που θα συμπληρώνεται με αξιόπιστες εργαστηριακές αναλύσεις και αποτιμήσεις αντοχής. Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι γέφυρες αυτού του τύπου είναι αρκετές στον Ελληνικό χώρο και ότι διεθνώς το ζήτημα αυτό είναι σημαντικό εξαιτίας του μεγάλου αριθμού υφιστάμενων γεφυρών εντός συγκοινωνιακών δικτύων που αναβαθμίζονται διαρκώς, η προτεινόμενη ανάλυση και μεθοδολογία καταδεικνύει ότι μπορεί να προκύψει αξιόπιστο συμπέρασμα για τη βιωσιμότητα ή μη μιας αποκατάστασης. Τέλος πρέπει να γίνει ιδιαίτερη μνεία της προσπάθειας του συλλόγου φίλων του Μουσείου Σιδηροδρόμου Θεσσαλονίκης για το έργο το οποίο επιτελεί ως προς τη διάσωση της ιστορίας του σιδηροδρόμου στην Ελλάδα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] BUTH, E., (2004), “Truss Bridge Retrofit Railings”, Project Summary Report, O-4419-S Retrofit Railing for Existing Truss Bridges, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, July 2004.
- [2] NIKOLAIDIS Th., KONTIS A., BANIOPOULOS, C.C., (2014), “On the sustainable restoration design of a historical steel truss railway, CESARE,14, Civil Engineering for Sustainability and Resilience International Conference, Amman, Jordan, 24-27 April 2014.
- [3] GUIDELINE FOR LOADS AND RESISTANCE, PUBLICATION (2007) “Sustainable Bridges - Assessment of Existing European Railway Bridges – Advices on the Use of Advanced Methods”, Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006), COWI A/S.
- [4] LARSSON, T., LAGERQVIST, O., (2009), “Material Properties of Old Steel Bridges”, NCCS2009, pp. 120-127.
- [5] ΚΟΝΤΗΣ Α. (2013), “Ανάλυση Βιωσιμότητας Χαλύβδινης Υφιστάμενης Σιδηροδρομικής Γέφυρας με Αποτίμηση των Ελέγχων Αστοχίας και Κόπωσης”, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Α.Π.Θ., Σεπτ. 2013.
- [6] ΜΠΑΝΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ Χ., ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ Θ., “Κατασκευές από χάλυβα – Παραδείγματα σχεδιασμού στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 3, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 978-960-456-323-4, 2012.
- [7] SPYRAKOS, C., RAFTOYIANNIS, I., ERMOPOULOS, J., (2004), “Condition Assessment and Retrofit of a Historic Steel - Truss Railway Bridge”, Journal of Construction Steel Research, Vol. 60, pp. 1213-1225.
- [8] CHAMINDA, S., OHGA, M., DISSANAYAKE, R., TAKIWAKI, K., (2007), “Different Approaches for Remaining Fatigue Life Estimation of Critical Members in Railway Bridges”, Steel Structures, Vol. 7, pp. 263-276.
- [9] MESLER, V., “Restoration of Historic Metal Truss Bridges”, Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, ASCE, October 2007, pp. 270-274, 2007.

ON THE SUSTAINABLE RESTORATION DESIGN OF A HISTORICAL STEEL RAILWAY BRIDGE

Themistoklis N. Nikolaidis, Athanasios L. Kontis, Charalampos C. Baniotopoulos¹

Institute of Metal Structures, Department Of Civil Engineering, Aristotle University of
Thessaloniki

54124 Thessaloniki, Greece

e-mail: thnik@civil.auth.gr; alkontis@civil.auth.gr

¹School of Civil Engineering, University of Birmingham

B15 255 Birmingham, United Kingdom

e-mail: c.baniotopoulos@bham.ac.uk

SUMMARY

This paper presents a methodology applied for the restoration design of the old steel truss Echedoros River Railway Bridge. Such an intervention can be characterized as sustainable if the design considerations include the assessment of the remaining fatigue life, the estimation of the future traffic demands and the evaluation of the total cost of the project. The certification of the design criteria used in the present study, i.e. loads and resistance assessments is mainly based on the Guidelines entitled ‘Sustainable Bridges’, which have been recently produced by the European Commission. The Echedoros River Railway Bridge due to its position used for decades to be one of the most important structures of the railway network in the northern part of Greece. The bridge been classified as a historic structure, was completely reconstructed in 1946 after the 2nd World War in its present form that consists of two spans with one concrete support in the middle of the river and two main truss girders with riveted connections for each opening. In the present work a finite element analysis model of the whole bridge and several partial finite element analysis models of critical details have been studied using ANSYS software including solutions for critical traffic, earthquake and fatigue loading combinations. With this framework the field conditions of the most representative details have been simulated taking into consideration different local deficiencies and possible failures. As a result an evaluation of extreme stress areas on gusset plates and a more representative stress distribution among the connecting rivets has been obtained. The restoration of the old steel-truss railway bridge with riveted connections is mainly limited by its strength in fatigue and influenced by the ultimate strength of its structural members. This way the proposed methodology leads to a more robust restoration design.