ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΚΥΡΙΟ ΦΟΡΕΑ ΔΟΚΩΝ ΚΙΒΩΤΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Παναγιώτης Καζαντζής Μηχανολόγος Μηχανικός Computer Control Systems S.A. Μαρούσι, Ελλάς e-mail: <u>pkazan@ccs.gr</u> **Bernard Rémy** Τεχνικός Διευθυντής - Πολιτικός Μηχανικός Computer Control Systems S.A. Saclay, France e-mail: <u>bremy@aol.com</u>

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός του άρθρου είναι η παρουσίαση των αριθμητικών μεθόδων και των αποτελεσμάτων της μελέτης εφαρμογής δύο μεταλλικών γεφυρών: της πεζογέφυρας στην λεωφόρο Breucq κοντά στο νέο στάδιο της πόλης Lille και της γέφυρας πάνω από το κανάλι Ourcq στο Παρίσι.



Φωτ. 1: Πεζογέφυρα της Breucq και γέφυρα πάνω από το κανάλι Ourcq

2. ΓΕΦΥΡΑ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ OURCQ

2.1 Περιγραφή του φορέα

Η γέφυρα κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της επέκτασης της γραμμής του τραμ στο Παρίσι και εξυπηρετεί την κυκλοφορία του τραμ και των πεζών πάνω από το κανάλι. Το κατάστρωμα αποτελείται από μία συνεχή κεντρική δοκό τριών ανοιγμάτων 32,5m – 55m - 32,5m, στην οποία συνδέονται διαγώνια στοιχεία προβόλου που στηρίζουν μία ορθότροπη πλάκα (σχ. 1). Το συνολικό μήκος της είναι 121,6 μέτρα και το πλάτος της 14 μέτρα.



Σχ. 1: τομή και κάτοψη του καταστρώματος

Ο σχεδιασμός της διατομής είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζονται οι μικρές μετακινήσεις του καταστρώματος και να παραλαμβάνονται οι ροπές τόσο της κάμψης όσο και της στρέψης. Η διατομή της συνεχούς δοκού είναι κιβωτιοειδής, σχήματος τραπεζίου, με ελάσματα κορμού μήκους 2,5 m και ελάσματα άνω και κάτω πέλματος 2,0m και 2,5m αντίστοιχα. Το πάχος των πελμάτων μεταβάλλεται από 40mm ως 80 mm και το πάχος των κορμών από 20mm ως 25mm στις ενδιάμεσες στηρίξεις. Οι διαγώνιοι πρόβολοι τοποθετούνται ανά 2,5 μέτρα και συγκολλούνται στους κορμούς της διατομής της κεντρικής δοκού. Τα διαγώνια αυτά στοιχεία μεταφέρουν το βάρος των οχημάτων του τραμ και το βάρος των πεζών μέσω μία ορθότροπης πλάκας. Αποτελούνται από συγκολλητές δοκούς των οποίων το άνω πέλμα είναι η ορθότροπη πλάκα. Η ορθότροπη πλάκα αποτελείται από ένα έλασμα πάχους 14 mm και πέντε νευρώσεις τραπεζοειδούς διατομής. Ανά 2,5 μέτρα επίσης στην ίδια ευθεία με τη σύνδεση των διαγωνίων στοιχείων τοποθετούνται διαφράγματα στο εσωτερικό της κιβωτιοειδούς διατομής για να εμποδίσουν τον τοπικό λυγισμό των ελασμάτων της. Προκειμένου να παραλαμβάνονται οι μη συμμετρικές φορτίσεις που δημιουργούνται από τις διάφορες περιπτώσεις φόρτισης χωρίς τον κίνδυνο ανύψωσης του καταστρώματος, συγκολλούνται εγκάρσια στοιχεία τετράγωνης κιβωτιοειδούς διατομής μήκους 10 m και ύψους περίπου 1 m στα ακρόβαθρα, που επιτρέπουν να απομακρύνουμε τις στηρίξεις του φορέα (σχ. 2). Η απόσταση των αξόνων των στηρίξεων είναι 9 m. Με τον ίδιο τρόπο οι άξονες των στηρίξεων απομακρύνονται στα βάθρα κατά 3,85 m. Οι στηρίξεις του καταστρώματος είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη διαστολή ή συστολή του.



Σχήμα 2 : εγκάρσια τομή του καταστρώματος στα ακρόβαθρα και στα βάθρα.

2.2 Στοιχεία της μελέτης εφαρμογής

Για τη μελέτη εφαρμογής απαιτούνται πολλά και διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης:

α) Τρισδιάστατο μοντέλο του φορέα ραβδωτών στοιχείων (σχ. 3) που περιλαμβάνει τη συνεχή δοκό, τα διαγώνια στοιχεία προβόλου και τα εγκάρσια στοιχεία στα βάθρα και στα ακρόβαθρα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων του καταστρώματος, του κατασκευαστικού αντιβέλους της συνεχούς δοκού, τη διαστασιολόγηση των διατομών, τη δυναμική απόκριση του φορέα σε κινητά φορτία, τη μελέτη ανέγερσης και τις συγκολλήσεις των ελασμάτων της συνεχούς δοκού.



Σχήμα 3: Προσομοίωμα υπολογισμού με 3D απεικόνιση των διατομών.

β) Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (σχ. 4) για τον υπολογισμό της αντοχής των εγκάρσιων στοιχείων και της ευστάθειας των κάτω πελμάτων σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.



Σχήμα 4: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων

γ) Διάφορα τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των πολύπλοκων εγκάρσιων στοιχείων στα βάθρα και τα ακρόβαθρα, της ορθότροπης πλάκας και των νευρώσεων που απαιτούνται (σχ. 5).



Σχ. 5: Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της ορθότροπης πλάκας και των εγκάρσιων στοιχείων στα βάθρα

2.3 Παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων

Οι έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό ΕΝ 1993-1-5 που μας επιτρέπει να λάβουμε υπόψη την επιρροή της υστέρησης λόγω διάτμησης και τον διατμητικό λυγισμό των ελασμάτων. Οι διαστασιολογήσεις έγιναν με βάση τις εσωτερικές δυνάμεις που προέκυψαν από την επίλυση. Η ροπή στρέψης χρησιμοποιήθηκε για την επαύξηση της διάτμησης στα ελάσματα της διατομής. Στο παρακάτω σχήμα δίνουμε ενδεικτικά τις περιβάλλουσες των διαγραμμάτων των καμπτικών ροπών και των ελαστικών τάσεων της συνεχούς δοκού. Παρατηρούμε μέγιστες θλιπτικές τάσεις της τάξεως των 180 MPa.



Σχ. 6: Διαγράμματα καμπτικών ροπών και τάσεων της συνεχούς δοκού του φορέα

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των κάτω πελμάτων σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, γίνεται υπολογίζοντας σε πρώτο στάδιο την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού κατά Euler. Η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού προέκυψε με ένα συντελεστή 17.9 του φορτίου οριακής κατάστασης αστοχίας, τιμή που κρίνεται ασφαλής από άποψη ευστάθειας. Οι διαστασιολογήσεις της ορθότροπης πλάκας και των εγκάρσιων στοιχείων στα βάθρα και τα ακρόβαθρα έγιναν με βάση τις τάσεις Von Mises που προέκυψαν από τα τοπικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη μελέτη της δυναμικής απόκρισης της γέφυρας στη δράση της κίνησης των πεζών. Η ιδιομορφική ανάλυση έδωσε την 1^η ιδιομορφή που κινητοποιεί μάζα στην κατακόρυφη διεύθυνση στη συχνότητα 1,859 Hz. Σύμφωνα με τον οδηγό του SETRA, τοποθετούμαστε στην περιοχή 1, που σημαίνει μέγιστος κίνδυνος συντονισμένης ταλάντωσης (συχνότητα μεταξύ 1,7 και 2,1 Hz). Απαιτείται λοιπόν δυναμική ανάλυση στην κατακόρυφη διεύθυνση και για την περίπτωση φόρτισης: πλήθος πολύ πυκνό. Το δυναμικό φορτίο που εφαρμόζεται είναι της μορφής: $F_s=14.257 \times cos(2 \pi 1.895 t)$

Η επίλυση έγινε με τη μέθοδο της υπέρθεσης των ιδιομορφών και έδωσε μέγιστη επιτάχυνση 2,54 > 2,5 m/sec² δηλαδή επίπεδο άνεσης ανεπίτρεπτο. Με δεδομένο ότι στις προδιαγραφές του έργου απαιτείται επίπεδο άνεσης υψηλό (επιταχύνσεις <0.5 m/sec²), το κριτήριο της άνεσης δεν ικανοποιείται.

Όσον αφορά τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης στη δράση της κίνησης των συρμών του τραμ, θεωρούμε ότι τα φορτία κινούνται με ταχύτητες από 0 έως 70 km/h με ένα βήμα 5 km/h. Η επίλυση έγινε με τη μέθοδο της υπέρθεσης ιδιομορφών και έδωσε μέγιστη επιτάχυνση $0,54 \text{ m/sec}^2 > 0,5 \text{ m/sec}^2$, που θεωρείται αποδεκτή.

3. ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ ΛΕΩΦΟΡΟΥ BREUCQ, LILLE

3.1 Περιγραφή του φορέα

Η πεζογέφυρα είναι δύο ανοιγμάτων 60 m και 30 m και το πλάτος της είναι 10 m. Αποτελείται από δύο όμοιους κύριους μεταλλικούς φορείς, οι οποίοι τοποθετούνται παράλληλα και συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας ορθότροπης πλάκας. Κάθε κύριος φορέας αποτελείται από ένα μεταλλικό υποστύλωμα, δύο μεταλλικά τόξα και δύο ελκυστήρες (σχ.5). Όλα τα στοιχεία του κύριου φορέα κατασκευάζονται από δοκούς τετράγωνης κιβωτιοειδούς διατομής πλάτους 1,2 m και μεταβλητού ύψους από 200mm ως 850mm. Το πάχος των ελασμάτων μεταβάλλεται από 20mm σε 40mm. Το πάχος της ορθότροπης πλάκας είναι 8 mm. Ο άξονας των στηρίξεων της γέφυρας, παρουσιάζει σε κάτοψη κλίση 30° σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του φορέα. Η μεταλλική πλάκα ενισχύεται με τραπεζοειδείς νευρώσεις ανά 400 mm, ύψους 280 mm και πάχους 6 mm που ακολουθούν τη γωνία του άξονα των στηρίξεων και διακόπτεται στο κέντρο της για να επιτραπεί η δίοδος των υδρορροών. Είναι επίσης εξοπλισμένη με δυναμικούς αποσβεστήρες.



Σχ. 7:Πλάγια όψη και κάτοψη της πεζογέφυρας

Οι κόμβοι σύνδεσης των διαφόρων στοιχείων του κύριου φορέα διαμορφώνονται με τη βοήθεια ελασμάτων όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχ. 8:Κόμβοι σύνδεσης των διαφόρων στοιχείων του κύριου φορέα

3.2 Στοιχεία της μελέτης εφαρμογής

Ο κύριος φορέας υπολογίζεται με τη βοήθεια τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχειών το οποίο περιλαμβάνει τους δύο κύριους μεταλλικούς φορείς προσομοιωμένους με ραβδωτά στοιχεία, την ορθότροπη πλάκα προσομοιωμένη με επιφανειακά στοιχεία, τις νευρώσεις της ορθότροπης πλάκας προσομοιωμένες με ραβδωτά στοιχεία.



Σχ. 9:Συνολικό μοντέλο επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Κατά την επίλυση λαμβάνονται υπόψη οι φάσεις ανέγερσης (σχ.10). Τα τελικά αποτελέσματα προκύπτουν από την υπέρθεση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μοντέλων που περιλαμβάνουν τα διάφορα τμήματα του φορέα κατά τη διαδικασία ανέγερσης και το τελικό μοντέλο με τις αντίστοιχες συνθήκες στήριξης.



Σχ. 10:Φάσεις ανέγερσης του έργου

Η μελέτη των συνδέσεων των διαφόρων στοιχείων του φορέα (πάχη ελασμάτων, συγκολλήσεις) θα προκύψουν για τις δυσμενέστερες περιπτώσεις φόρτισης που προέκυψαν από την επίλυση του παραπάνω μοντέλου με τη βοήθεια ενός τρισδιάστατου πλήρους μοντέλου της κατασκευής με την τεχνική του sub-modeling.



Σχ. 11: Τρισδιάστατου πλήρες μοντέλο του έργου

3.3 Παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων

Από τη μελέτη προέκυψε η ανάγκη για την υλοποίηση άρθρωσης στη βάση του υποστυλώματος, ενώ ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε πάκτωση. Επίσης προέκυψε η ανάγκη αύξησης του πάχους της ορθότροπης πλάκας από 8mm σε 10mm, κυρίως λόγω των θερμοκρασιακών φορτίων που προκαλούν τη συστολή ή τη διαστολή της πλάκας. Όλες οι διατομές είναι τάξης 2 ή 3. Οι ελαστικές τάσεις του κύριου φορέα που προέκυψαν από την επίλυση είναι μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας (μέγιστη θλιπτική τάση 389.2 MPa, για ποιότητα χάλυβα S355). Ωστόσο οι τάσεις αυτές παρουσιάζονται σε διατομή τάξης 2, η οποία σύμφωνα με τον έλεγχο κατά Ευροκώδικα είναι αποδεκτή. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν και με τα αποτελέσματα του πλήρους μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση των συνδέσεων των ελασμάτων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η γκρι περιοχή αντιστοιχεί σε τάσεις μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας,



Σχ. 12: Τάσεις Von Mises στους κόμβους του κύριου φορέα

Η μοντελοποίηση των φάσεων κατασκευής αύξησε τις τάσεις κατά 10% περίπου. Μας επέτρεψε να υπολογίσουμε τις υψομετρικές θέσεις των προσωρινών στηρίξεων έτσι ώστε οι διατομές των τμημάτων του φορέα που συγκολλούνται να είναι παράλληλες και να αποφευχθεί η δημιουργία μόνιμων τάσεων στα σημεία της συγκόλλησης. Μας επέτρεψε τέλος να διαστασιολογήσουμε τις προσωρινές κατασκευές και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται κατά τη φάση της ανέγερσης.

Ο υπολογισμός της δυναμικής της απόκρισης σε κινητά φορτία πεζών χωρίς τη μοντελοποίηση των αποσβεστήρων δεν ικανοποιεί τα κανονιστικά κριτήρια. Από την ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής μέσω του μεγέθους της γενικευμένης μάζας που κινητοποιείται ανά ιδιόμορφη, δίνεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή των αποσβεστήρων να εφοδιάσει τη γέφυρα με τον κατάλληλο εξοπλισμό απόσβεσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μελέτες εφαρμογής απαιτούν καταρχήν τη δημιουργία ενός σχετικά απλού συνολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τη διαστασιολόγηση του συνολικού φορέα και στη συνέχεια τη δημιουργία διαφόρων «τοπικών» μοντέλων για τη διαστασιολόγηση όλων των επιμέρους στοιχείων και των λεπτομερειών της κατασκευής. Ο τρόπος της ανέγερσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην μελέτη εφαρμογής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι γενικά οι κατασκευές αυτές δεν ικανοποιούν τα κανονιστικά κριτήρια όταν υποβάλλονται σε εξαναγκασμένες ταλαντώσεις λόγω της κυκλοφορίας των πεζών. Η χρησιμοποίηση ειδικού εξοπλισμού απόσβεσης των ταλαντώσεων μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα αυτό χωρίς να χρειαστεί να αλλάξει ο αρχικός σχεδιασμός του έργου.

EXECUTION STUDIES OF TWO BOX GIRDER STEEL BRIDGES

Panagiotis Kazantzis Senior Mechanical engineer Computer Control Systems S.A. Athens, Greece e-mail: <u>pkazan@ccs.gr</u> Bernard Rémy Technical Director – Civil Engineer Computer Control Systems S.A. Saclay, FRANCE e-mail: <u>bremy@aol.com</u>

SUMMARY

The aim of this paper is to present the numerical methods and some of the results derived from the execution study of two steel bridges. These bridges present some particularities in their architectural conception concerning their principal structural components and their erection procedure. These two bridges are: (a) the bridge over Ourcq canal in Paris and (b) the footbridge at Breucq avenue in the new Lille stadium. The first bridge was constructed within the framework of the T3 tramway extension in Paris, and serves the tramway circulation as well as bicycle and pedestrian traffic. Its length is 121.6m with a total width of 14m. The bridge is made by a central steel box girder (continuous, 3 spans) and diagonally converging cantilevers supporting an orthotropic steel deck. The second bridge is a two span footbridge with a total length of 90 m and overall width of 10 m. The bridge is composed by two almost identical main steel structures placed in parallel over Breucq avenue and linked by an orthotropic plate. These structures are made of variable height box girder sections. These studies include the creation of a detailed finite element model, the modeling of all loading cases and combinations and all necessary design checks of different parts of the steel structure and their connections, according to Eurocode 3. They include also a dynamic behavior study, the calculation of structure's eigenmodes and bridge's dynamic response due to moving loads such as tram or pedestrian traffic. At last they include the erection study which ensures the safety of the erection procedure by calculating forces, moments, displacements and the level of temporary supports for the main structure and for all auxiliary structures during erection.