

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΡΑΙΝΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Γιάννης Ευθυμίου
Πολιτικός Μηχανικός, Msc
Computer Control Systems AE
Αθήνα, Ελλάδα
gefthi@ccs.gr

Γιάννης Παλαμάς
Δρ Πολιτικός Μηχανικός
Διευθύνων Σύμβουλος Computer Control Systems AE
Αθήνα, Ελλάδα
jpalamas@ccs.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα σημαντικά ζητήματα όσον αφορά στην συμπεριφορά των σιδηροδρομικών γεφυρών γραμμών μεγάλων ταχυτήτων (LGV), είναι η απόκριση τους υπό τα δυναμικά φορτία των τρένων. Διερευνώνται φαινόμενα συντονισμού τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε πιθανή αστοχία των στοιχείων πλήρωσης του καταστρώματος, σε επαύξηση των στατικών φορτίων, αλλά και σε αίσθηση ανασφάλειας από μέρους των επιβατών. Η διερεύνηση επιτυγχάνεται μέσω δυναμικών αναλύσεων βάσει Ευρωκώδικα, από τις οποίες εξάγονται αποτελέσματα που αφορούν στις βυθίσεις, στις κατακόρυφες επιταχύνσεις αλλά και στην εγκάρσια στρέψη του καταστρώματος. Η παρούσα εργασία ασχολείται με σύμμικτες γέφυρες που αποτελούνται από δύο κύριες μεταλλικές δοκούς καθώς και με μεταλλικές γέφυρες με υψίκορμες πλάγιες δοκούς και σύμμικτες εγκάρσιες δοκούς (μορφής U). Γίνεται μια ανασκόπηση των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά τη δυναμική ανάλυση σιδηροδρομικών γεφυρών τρένων μεγάλων ταχυτήτων, αναλύονται δύο τύποι διατομών βάσει υπαρκτών παραδειγμάτων και εξετάζονται οι ιδιαιτερότητες των αποτελεσμάτων. Τέλος προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων θεμάτων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιρροή των φαινομένων συντονισμού των σιδηροδρομικών γεφυρών υπό την επίδραση τραίνων μεγάλων ταχυτήτων, είναι σημαντική. Ο Ευρωκώδικας προτείνει μια μέθοδο πρόβλεψης της συμπεριφοράς του φορέα και ελέγχου των φαινομένων που προκύπτουν και η οποία θα παρουσιαστεί συνοπτικά στην παρούσα εργασία με αναφορά στα προβλήματα που ανέκυψαν σε δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις γεφυρών. Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση συγκεκριμένων μεταβλητών που αφορούν στη δυναμική συμπεριφορά των φορέων.

Τα μέγιστα φαινόμενα λόγω δυναμικής φόρτισης είναι πιο πιθανό να συμβούν σε περιοχές συντονισμού, όπου ένα πολλαπλάσιο της συχνότητας του φορτίου συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα της γέφυρας [1]. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, στην περίπτωση αυτή η μέγιστη επιτάχυνση της γέφυρας είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας της. Προτείνεται ωστόσο να ληφθούν υπόψη δύο περιπτώσεις μάζας του φορέα, μέγιστη και ελάχιστη. Μια τρίτη περίπτωση με το μέσο όρο της μάζας χρησιμοποιείται στη μελέτη κοπώσεως υπό δυναμικά φορτία. Λαμβάνονται υπόψη μόνο οι μάζες των μόνιμων φορτίων και όχι του τραίνου, καθώς έχει αποδειχθεί [4] ότι δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο είδος του φορέα που εξετάζεται.

Για να επιλυθεί το δεδομένο πρόβλημα, επιλέγεται η δυναμική ανάλυση επαλληλίας των ιδιομορφών. Γίνονται αρχικά ιδιομορφικές αναλύσεις για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις θεώρησης μάζας και στη συνέχεια επιλέγονται για κάθε περίπτωση οι ταχύτητες με τις οποίες θα διατρέξουν την γέφυρα τα δέκα θεωρητικά τρένα HSLM-A του Ευρωκώδικα. Για τον έλεγχο κοπώσεως, επιλύουμε μόνο για ένα πραγματικό τρένο σχεδιασμού.

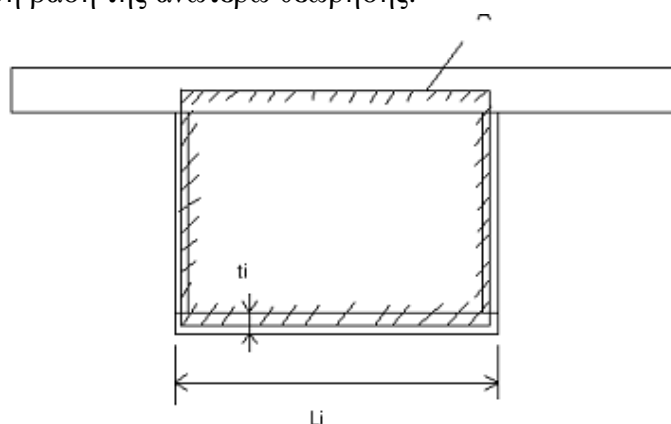
Το εύρος των ταχυτήτων καλύπτει από τα 40 m/s μέχρι τη μέγιστη πιθανή ταχύτητα σχεδιασμού, η οποία ισούται με την εμπορική ταχύτητα της γραμμής αυξημένη κατά 20%. Η εμπορική και η μέγιστη ταχύτητα λαμβάνονται υποχρεωτικά υπόψη, ενώ η επιλογή των υπόλοιπων κρίσιμων ταχυτήτων που βρίσκονται στο εύρος σχεδιασμού αφήνεται στην κρίση του μελετητή. Για κάθε περίπτωση μάζας, τραίνου και ταχύτητας ελέγχονται οι μετακινήσεις, οι επιταχύνσεις, η εγκάρσια συστροφή του καταστρώματος και η στροφή των στηρίξεων. Τέλος, ελέγχεται η επιρροή των δυναμικών φαινομένων στις στατικές φορτίσεις, δηλαδή αν ο δυναμικός συντελεστής επαύξησης των στατικών φορτίων είναι επαρκής.

3. ΣΥΜΜΙΚΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΔΥΟ ΣΙΔΗΡΟΔΟΚΩΝ

3.1 Γενικά

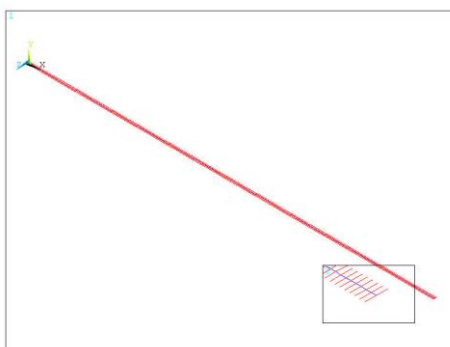
Τα επόμενα παραδείγματα εφαρμογής, που αφορούν στην κοιλαδογέφυρα της Vienne (γραμμή Tours – Bordeaux) και στη γέφυρα PRA 0238 (γραμμή Bretagne – Pays de la Loire) ακολουθούν πρακτικές και μεθόδους υπολογισμού βάσει Ευρωκώδικα. Η μέθοδος αυτή έχει παρουσιαστεί αναλυτικά και καλύπτεται στη βιβλιογραφία [7].

Πρόκειται για σύμμικτες γέφυρες με κατάστρωμα από ωπλισμένο σκυρόδεμα εδραζόμενο στις δύο κύριες δοκούς, που μεταξύ τους συνδέονται με εγκάρσια στοιχεία. Η σύμμικτη λειτουργία των δοκών εξασφαλίζεται με τη χρήση διατμητικών ήλων στο άνω πέλμα. Στο κάτω πέλμα οι δοκοί συνδέονται με προκατασκευασμένες πλάκες σκυροδέματος, σχηματίζοντας έτσι ουσιαστικά κλειστή κιβωτοειδή διατομή (φωτ.2), η οποία υπόκειται στην αρχή του Saint-Venant. Τούτέστιν, η στρεπτική της αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των εξισώσεων του Bredt. Το μοντέλο επίλυσης αποτελείται από ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία προσομοιώνουν την ολική διατομή της γέφυρας, αθροίζοντας τις επιμέρους δυσκαμψίες των σύμμικτων δοκών, και υπολογίζοντας τη στρεπτική αντίσταση βάση της ανωτέρω θεώρησης.



Φωτ.2 Κιβωτοειδής διατομή σύμμικτης γέφυρας δύο δοκών

Οι μάζες τοποθετούνται ως επικόμβιες, κατακόρυφες και στρεπτικές. Οι στρεπτικές δημιουργούνται λόγω της εκκεντρότητας των στοιχείων του καταστρώματος σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα του φορέα. Τα δυναμικά φορτία των αξόνων του τραίνου τοποθετούνται επικόμβια και ακολουθούν μια ισοστατική κατανομή μεταξύ των κόμβων εκατέρωθεν του κάθε άξονα. Καθώς η γέφυρα επιλύεται για την περίπτωση που ένα τρένο μόνο βρίσκεται στη μία λωρίδα κίνησης, ο κάθε κόμβος φορτίζεται με ένα κατακόρυφο φορτίο και με μία στρεπτική ροπή, η οποία προσομοιώνει τα φαινόμενα που προκύπτουν από την εκκεντρότητα της φόρτισης. Λαμβάνεται υπόψη η ακριβής θέση των στηρίξεων και η οποιαδήποτε εγκάρσια κλίση που μπορεί να έχουν αυτές, χρησιμοποιώντας άκαμπτα στοιχεία με μήκος ίσο με την εγκάρσια απόσταση της στήριξης από το κέντρο βάρους του φορέα. Επιπλέον άκαμπτα στοιχεία προβόλων τοποθετούνται σε κάθε κόμβο ώστε να οπτικοποιηθεί η στρεπτική συμπεριφορά της κατασκευής.



Φωτ.3 Προσομοίωμα επίλυσης

Στις επόμενες παραγράφους τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, περιορίζονται στις κατακόρυφες επιταχύνσεις, ως το πλέον κρίσιμο μέγεθος της δυναμικής συμπεριφοράς των φορέων.

3.2 Κοιλαδογέφυρα Vienne

Η κοιλαδογέφυρα της Vienne αποτελείται από 6 ανοίγματα (57,5 - 62,5 - 60,5 - 58,5 - 56,5 - 51,0m).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης βρέθηκαν σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από τον κανονισμό. Η μέγιστη επιτάχυνση παρατηρήθηκε στην περίπτωση της ελάχιστης μάζας και ίση με $2,5\text{m/sec}^2$, τιμή σημαντικά μικρότερη από τα κανονιστικά όρια ($3,5\text{m/sec}^2$).

3.2 Γέφυρα PRA0238

Η γέφυρα PRA 0238 ανήκει στην κατηγορία γεφυρών με μικρά σχετικά ανοίγματα (21 – 31 – 21m). Η μελέτη αυτή αναδεικνύει την ιδιαίτερη δυναμική συμπεριφορά των σύμμικτων γεφυρών μικρών ανοιγμάτων .

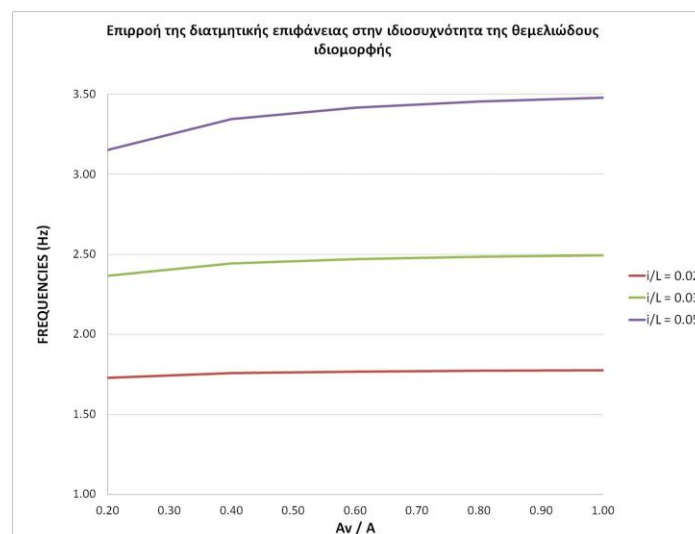
Κατά τη μελέτη με την προαναφερθείσα μέθοδο, παρατηρήθηκαν επιταχύνσεις, μεγαλύτερες από το κανονιστικό όριο των $3,5\text{m/sec}^2$. Συγκεκριμένα, η τιμή της επιτάχυνσης στην περίπτωση της μέγιστης μάζας ήταν ίση με $7,2\text{m/sec}^2$ και της ελάχιστης $4,14\text{m/sec}^2$ στα ακραία ανοίγματα της γέφυρας. Παρατηρείται λοιπόν ότι, πέραν του γεγονότος ότι οι τιμές είναι παραπάνω από το επιτρεπόμενο όριο, η θεώρηση του Ευρωκώδικα για τις μέγιστες αναμενόμενες επιταχύνσεις στην περίπτωση της ελάχιστης μάζας δεν επαληθεύεται.

Από τη διερεύνηση της μεθόδου επίλυσης, προέκυψε ότι η διατμητική επιφάνεια που λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για τη δυναμική συμπεριφορά του φορέα. Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν με βάση τη θεώρηση του κανονισμού που προτείνει να λαμβάνεται υπόψη μόνο η συμμετοχή του κορμού της μεταλλικής δοκού στη διάτμηση και να αγνοείται η συμμετοχή της πλάκας σκυροδέματος. Στη διερεύνηση αυτού του προβλήματος, παρατηρήθηκε ότι με μεγαλύτερη διατμητική επιφάνεια με συμμετοχή μέρους της επιφάνειας της πλάκας [2],[3], οι επιταχύνσεις στην περίπτωση της μέγιστης και της ελάχιστης μάζας αντίστοιχα ήταν ίσες με $3,45\text{m/sec}^2$ και $3,82\text{m/sec}^2$, τιμές σημαντικά μικρότερες από αυτές της πρώτης ανάλυσης. Επιπλέον η μέγιστη επιτάχυνση προέκυψε στην περίπτωση της ελάχιστης μάζας, αποτέλεσμα σύμφωνο με την υπόθεση του Ευρωκώδικα. Παρατηρήθηκε στην περίπτωση αυτή, ότι η διατμητική επιφάνεια επηρεάζει ιδιαίτερα την ιδιομορφική συμπεριφορά της κατασκευής, μεγαλώνοντας τις τιμές των συχνοτήτων στις αντίστοιχες ιδιομορφές.

Τα αποτελέσματα αυτά οδηγούν σε προβληματισμούς όσον αφορά στις γέφυρες με μικρά ανοίγματα. Καθώς η δυσκαμψία τους είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος τους, η συμπεριφορά τους μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο ως διατμητική παρά καμπτική,

ακολουθώντας τη λογική της δοκού Timoshenko. Η διατμητική επιφάνεια λοιπόν είναι καθοριστικός παράγοντας για την ανάλυση. Βάσει έρευνας σε δεδομένες μελέτες, αλλά και στη βιβλιογραφία [6], εξάγεται το συμπέρασμα ότι μπορεί να θεμελιωθεί ένας λόγος δυσκαμψίας ως προς το μήκος ανοίγματος, του οποίου οι τιμές καταδεικνύουν την επιρροή της διατμητικής επιφάνειας. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος, τόσο πιο δύσκαμπτη η γέφυρα και άρα η κάθε μεταβολή της διατμητικής επιφάνειας που λαμβάνεται υπόψη επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ιδιομορφική ανάλυση.

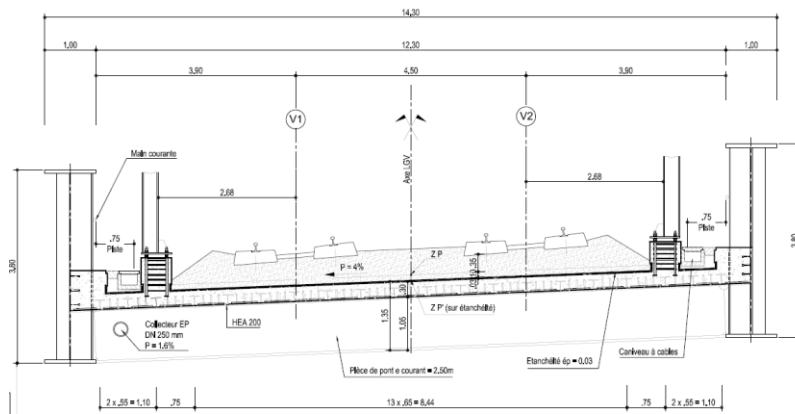
Για την περαιτέρω τεκμηρίωση της συγκεκριμένης υπόθεσης, έγινε μια παραμετρική ανάλυση μιας δοκού ενός και δύο ανοιγμάτων. Το μήκος ανοίγματος, η διακριτοποίηση και το εμβαδό της διατομής κρατήθηκαν σταθερά, με μεταβολή της διατμητικής επιφάνειας (δοσμένη σαν ποσοστό του συνολικού εμβαδού) και της ροπής αδράνειας της δοκού (επιφέροντας αλλαγές στο λόγο I/L όπου I η ροπή αδράνειας και L το μήκος ανοίγματος). Παρατηρείται (φωτ. 4) ότι όσο αυξάνεται ο λόγος I/L τόσο η αύξηση της διατμητικής επιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας. Σε περιπτώσεις όπου το I/L έχει μικρές τιμές (εύκαμπτη γέφυρα), η μεταβολή επιφέρει αμελητέες αυξήσεις. Για να υπάρχει μια σχετική αντιστοιχία με τις προαναφερθείσες μελέτες, ο λόγος I/L της PRA 0238 κυμαίνεται στο 0,05 ενώ της Vienne στο 0,03.



Φωτ.4 Επιρροή του λόγου I/L στην αύξηση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας λόγω της αύξησης του εμβαδού διάτμησης

4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΜΟΡΦΗΣ U - ΓΕΦΥΡΑ PRA 1205

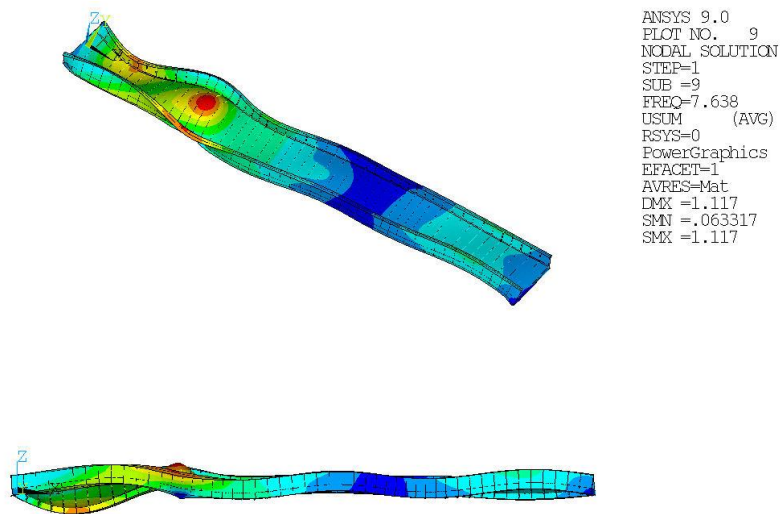
Η γέφυρα PRA 1205 της γραμμής Bretagne-Pays de la Loire, ανήκει στην κατηγορία των μεταλλικών γεφυρών με σύμμικτο κατάστρωμα. Η γέφυρα αποτελείται από δύο υψίκορμες δοκούς, το κάτω πέλμα των οποίων συνδέεται με εγκάρσια στοιχεία πάνω στα οποία συνδέεται με σύμμικτη σύνδεση το κατάστρωμα. Σύμμικτη λειτουργία έχουν μόνο οι εγκάρσιες δοκοί, ενώ η γενικότερη μορφολογία της γέφυρας περιγράφεται λόγω σχήματος σαν το λατινικό γράμμα U (φωτ. 5).



Φωτ.5 Μεταλλικές γέφυρες μορφής U

Η ιδιομορφία των γεφυρών αυτών έγκειται στο γεγονός ότι τα εγκάρσια στοιχεία που φέρουν το κατάστρωμα είναι μεγάλου μήκους και η δυσκαμψία τους παίζει σημαντικό ρόλο στην ιδιομορφική συμπεριφορά. Εύκαμπτα εγκάρσια στοιχεία, οδηγούν σε ιδιομορφές τοπικού χαρακτήρα (φωτ.6), όπου η σχετική παραμόρφωση τους είναι κυρίαρχη και κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του συνολικού φορέα. Η δυσκαμψία των στοιχείων αυτών είναι καθοριστική όσον αφορά και στη στρέψη του φορέα, ο οποίος είναι ανοικτής μορφής και άρα δεν υπόκειται στην αρχή του Saint-Venant. Αυτός είναι και ο λόγος που για να επιλυθούν φορείς τέτοιου τύπου, η θεώρηση της μονής δοκού που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4 δεν επαρκεί. Καταλήγει λοιπόν ο μελετητής σε λύσεις ανάλυσης καθολικής γεωμετρίας, με προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ιδιαίτερος απαιτητικών σε υπολογιστικό χρόνο.

Οι ιδιαιτερότητες αυτές που ανακύπτουν για τους συγκεκριμένους φορείς οδηγούν στην ανάγκη της περαιτέρω έρευνας, με σκοπό να βρεθεί μια πιο απλή μέθοδος προσομοίωσης, αλλά και να προσδιοριστεί η ελάχιστη δυσκαμψία των εγκάρσιων στοιχείων, ώστε να μην προκύπτουν ιδιομορφές τοπικού χαρακτήρα που οδηγούν σε δυσμενή αποτελέσματα.



Φωτ.6 Ιδιομορφές τοπικού χαρακτήρα

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πείρα από τις μελέτες, μέρος της οποίας αναπτύχθηκε παραπάνω, και η βιβλιογραφική έρευνα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν θέματα στο πρόβλημα της δυναμικής απόκρισης των γεφυρών υπό την επίδραση τραίνων μεγάλων ταχυτήτων, τα οποία χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης. Προτείνεται λοιπόν να μελετηθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά των εν λόγω φορέων, χρησιμοποιώντας προσομοιώματα και πειραματικές διατάξεις, με στόχο να προσδιοριστούν αλγόριθμοι για:

- την επιλογή μέγιστης/ελάχιστης μάζας, καθώς φάνηκε (παράγραφος 4.2) ότι η περίπτωση από την οποία θα προκύψουν οι μέγιστες επιταχύνσεις που αποτελούν κρίσιμο μέγεθος δεν είναι πάντα αυτή της ελάχιστης μάζας, όπως προτείνει ο Ευρωκώδικας,
- τον ακριβέστερο υπολογισμό της διατμητικής επιφάνειας, ειδικά σε γέφυρες μικρών ανοιγμάτων, οι οποίες λόγω μεγάλου λόγου δυσκαμψίας/μήκος διαστασιολογούνται από την δυναμική ανάλυση,
- τον ασφαλή προσδιορισμό των κρίσιμων ταχυτήτων βάσει συμπαγών κριτηρίων, καλύπτοντας τις απαιτούμενες περιπτώσεις αλλά κάνοντας ταυτόχρονα οικονομία στον χρόνο υπολογισμού,
- τον προσδιορισμό βασικών παραμέτρων (όπως η απόσβεση)

και γενικότερα για την ικανότητα πρόβλεψης της δυναμικής συμπεριφοράς κάθε πιθανής γεωμετρίας γέφυρας (μέγεθος ανοιγμάτων-είδος διατομής).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] EN 1991-2 *Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*
- [2] LIANG, QING QUAN and UY, BRIAN and BRADFORD, MARK A. and RONAGH, HAMID R. (2004) *Ultimate strength of continuous composite beams in combined bending and shear. Journal of Constructional Steel Research, 60 (8). pp. 1109-1128. ISSN 0143-974X.*
- [3] LIANG, QING QUAN and UY, BRIAN and BRADFORD, MARK A. and RONAGH, HAMID R. (2005) *Strength analysis of steel-concrete composite beams in combined bending and shear. Journal of Structural Engineering, 131 (10). pp. 1593-1600. ISSN 0733-9445.*
- [4] FRYBA L., *Dynamics of Railway Bridges*
- [5] FRYBA L., *Vibration of solids and structures under moving loads*
- [6] YIH-HWANG LIN, *Vibration analysis of Timoshenko beams traversed with moving loads, Journal of Marine Science and Technology, Vol.2, No.1, pp.25-35.*
- [7] ΣΑΟΥΡΙΔΗΣ Χ, *Μελέτες γεφυρών για τραίνα υψηλής ταχύτητας: το έργο LGV Rhin-Rhone στη Γαλλία, Πρακτικά 6^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Μεταλλικών Κατασκευών, Ιωάννινα 2008.*

DYNAMIC BEHAVIOUR OF STEEL-COMPOSITE BRIDGES UNDER THE INFLUENCE OF HIGH-SPEED TRAINS

Yannis Efthymiou

Civil Engineer, Msc

Computer Control Systems SA

Athens, Greece

gefthi@ccs.gr

Yannis Palamas

Civil Engineer, Phd

CEO Computer Control Systems SA

Athens, Greece

jpalamas@ccs.gr

1. SUMMARY

One of the major issues regarding the behaviour of high-speed railroad bridges (LGV) is their response under the influence of the dynamic load of the trains. Resonance phenomena that can possibly lead to damage in the ballast, to an augmentation of the static loads and also to a sense of insecurity among passenger are examined. In order to accomplish these examinations, certain Eurocode-based numerical analyses are required, leading to the resulting displacements, accelerations and deck twist. This paper focuses on two-girder steel-concrete composite bridges and lateral girder steel bridges with a steel-concrete composite deck. An overview of the dynamic analysis of these types of bridges is presented, alongside with worked examples which present certain peculiarities in their results highlighting the need for further examination. Finally, certain solutions are proposed in order to address the issues that arise.