

**ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΓΙΑ ΤΡΕΝΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ:
ΤΟ ΕΡΓΟ LGV RHIN-RHONE ΣΤΗΝ ΓΑΛΛΙΑ**

Χρήστος Σαουρίδης
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Computer Control Systems S.A.
Μαρούσι, Ελλάς
e-mail: chrisa@ccs.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η νέα επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου υψηλών ταχυτήτων (LGV) στην ανατολική Γαλλία είναι ένα από τα μεγαλύτερα σύγχρονα έργα υποδομής της χώρας που ξεκίνησε το 2005 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2012. Στόχος του έργου είναι να αυξηθεί η ταχύτητα σύνδεσης των πόλεων της περιοχής με το υπάρχον δίκτυο καθώς και η μείωση του χρόνου πρόσβασης στις γειτονικές χώρες (Γερμανία, Ελβετία).

Στην παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συνολικού έργου και στην συνέχεια εξετάζονται εννέα από τις βασικότερες κοιλαδογέφυρες από την σκοπιά της μελέτης. Οι γέφυρες είναι όλες από χάλυβα και έχουν ανοίγματα που κυμαίνονται από 40 μέχρι 66 μέτρα με διατομές τύπου σύμμικτης δίδυμης δοκού μορφής I με άνω ή κάτω κατάστρωμα ή κιβωτιοειδείς σύμμικτες δοκούς. Λόγω της υψηλής ταχύτητας προσπέλασης του δικτύου σε συνθήκες λειτουργίας (350km/h) όλες οι γέφυρες μελετήθηκαν για δυναμική φόρτιση ώστε να εξασφαλισθεί η ικανοποίηση των κριτηρίων δυναμικής συμπεριφοράς αλλά και η αντοχή σε κόπωση. Τμήμα του έργου βρίσκεται σε σεισμική περιοχή. Οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις, που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό παραλαβής των σεισμικών δράσεων, παρουσιάζονται ανάλογα με το είδος της γέφυρας.

2. ΤΟ ΕΡΓΟ LGV RHIN-RHONE BRANCHE EST

Ο ανατολικός κλάδος του δικτύου υψηλών ταχυτήτων RHIN-RHONE αποτελεί το πρώτο τμήμα ενός γενικότερου έργου επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου μεταξύ των γαλλικών επαρχιών. Οι προμελέτες του ανατολικού κλάδου μεταξύ των πόλεων Dijon και Mulhouse ξεκίνησαν στις αρχές του 2005 και η παράδοση προβλέπεται στα τέλη του 2011. Το έργο αποτελεί σήμερα το μεγαλύτερο εργοτάξιο στην Γαλλία. Παρακάτω κάποιο ενδεικτικά μεγέθη του έργου:

- Μήκος νέας γραμμής 140 χιλιόμετρα, το 40% της οποίας σε δασική έκταση
- 160 γέφυρες κάθε είδους
- 17 υδραυλικά έργα

- 12 κοιλαδογέφυρες
- 1 σήραγγα μήκους 2km
- 2 νέοι επιβατικοί σταθμοί
- 30 εκατομμύρια κυβ. μέτρα εκσκαφών (4πλάσιο του όγκου της σήραγγας της Μάγνης)
- 22 εκατομμύρια κυβ. μέτρα επιχώσεων (9πλάσιο του όγκου της πυραμίδας του Χέοπα)
- 400 χιλιόμετρα προστατευτικών περιφράξεων
- 6.000 θέσεις εργασίας
- Προϋπολογισμός: 2.3 δις. Ευρώ



Σχήμα 1: Θέση της νέας γραμμής

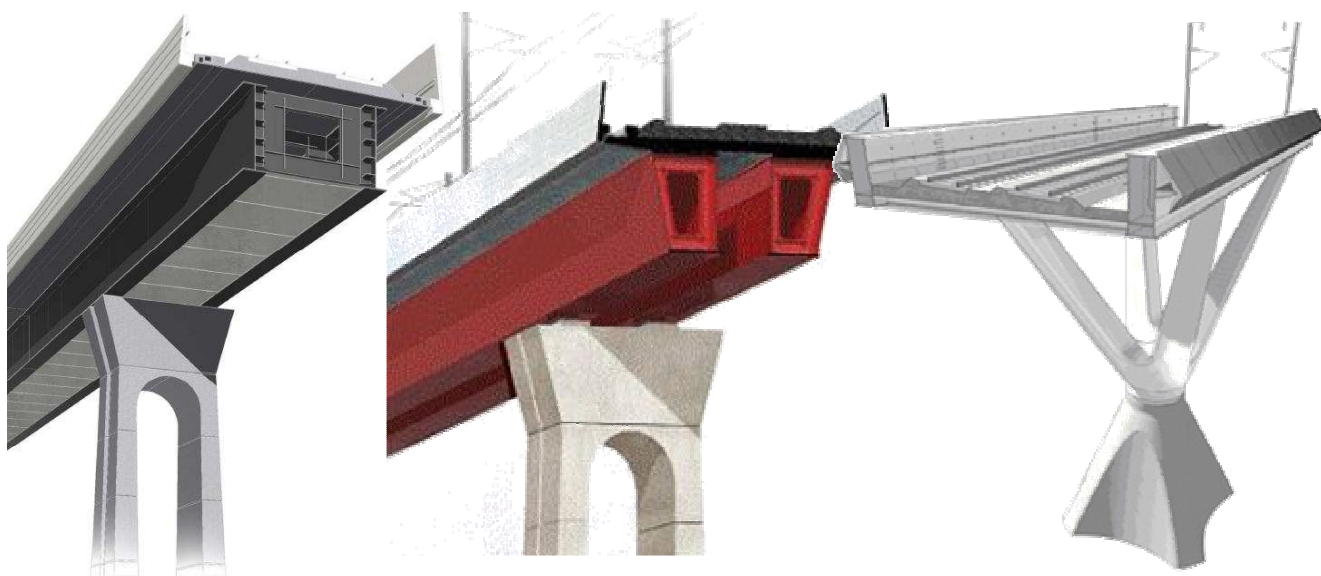
Το τμήμα μελετών της εταιρίας μας, στα πλαίσια ανάθεσης από την κατασκευαστική εταιρία EIFFEL, ανέλαβε τις μελέτες εφαρμογής για επτά και τον έλεγχο μελετών για δύο από τις συνολικά δώδεκα κοιλαδογέφυρες του έργου. Στο άρθρο αυτό δίνονται τα βασικότερα στοιχεία των μελετών με έμφαση στα μέσα αντισεισμικής προστασίας και υπολογισμών σε δυναμική φόρτιση.

3. ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΚΟΙΛΑΔΟΓΕΦΥΡΩΝ

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα στοιχεία που περιγράφουν τις 9 κοιλαδογέφυρες που μελετήθηκαν:

Γέφυρα	Στατικό σύστημα	Συνολ. Μήκος (m)	Τύπος διατομής	Βάρος χάλυβα (t)
Ognon	Συνεχής, 6 ανοιγμάτων	180	Σύμμικτη 2-Ι	700
Linotte	Συνεχής, 8 ανοιγμάτων	362	Σύμμικτη 2-Ι	1450
Quenoche	Συνεχής, 7 ανοιγμάτων	422	Σύμμικτη 2-Ι	1800
Corcelles	Συνεχής, 9 ανοιγμάτων	450	Σύμμικτη 2-Ι	1900
Aibre	Συνεχής, 5 ανοιγμάτων	250	Σύμμικτη 2-Ι	930
Pertuis	Συνεχής, 5 ανοιγμάτων	220	Σύμμικτη 2-Ι	770
Epenottes	Συνεχής, 9 ανοιγμάτων	450	Σύμμικτη 2-Ι	1600
Lizaine	Συνεχής, 11 ανοιγμάτων	717	Σύμμικτη 2-κιβωτ.	4700
Savoireuse	Αμφίεριστες εν σειρά	794	Πλευρικές δοκοί	9100

Πίνακας 1: Στοιχεία των γεφυρών που μελετήθηκαν



Σχήμα 2: Διατομές γεφυρών (Σύμμεκτη 2-Ι, Σύμμεκτη 2-κιβωτ., πλευρικές δοκοί)

Στο τμήμα μελετών της εταιρίας μας ανατέθηκαν οι μελέτες εφαρμογής των φορέων των γεφυρών με διατομή από δίδυμη σύμμεκτη δοκό μορφής Ι και οι έλεγχοι των μελετών για τις γέφυρες άλλης μορφής διατομής.

Τα κλασικά στάδια της μελέτης για τα στατικά φορτία (μόνιμα, φάσεις κατασκευής, κανονιστικοί συρμοί) αντιμετωπίστηκαν με χρήση του λογισμικού MixteWin (ανάπτυξη και διάθεση από την CCS). Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για όλους τους ελέγχους (τάσεις στα πέλματα της δοκού, στην πλάκα του καταστρώματος και στον οπλισμό της πλάκας, την διάτμηση της πλάκας και του ελάχιστου εγκάρσιου οπλισμού, την κύρτωση των κορμών των δοκών και την τοποθέτηση οριζόντιων ενισχύσεων όπου αυτό απαιτείται, τις κατακόρυφες και οριζόντιες ενισχύσεις των κορμών των κυρίων δοκών, την αντοχή και κατανομή των διατμητικών ήλων, τις συγκολλήσεις μεταξύ του κορμού του άνω και κάτω πέλματος, τον έλεγχο των κατασκευαστικών λεπτομερειών του μεταλλικού σκελετού σε κόπωση και τον έλεγχο σε κόπωση των διατμητικών ήλων).

Το άρθρο αυτό επικεντρώνεται στα εξής ειδικά θέματα τα οποία και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους: (α) Δυναμική απόκριση των φορέων των γεφυρών και σχετικά κριτήρια επάρκειας και (β) Συστήματα παραλαβής των σεισμικών φορτίων.

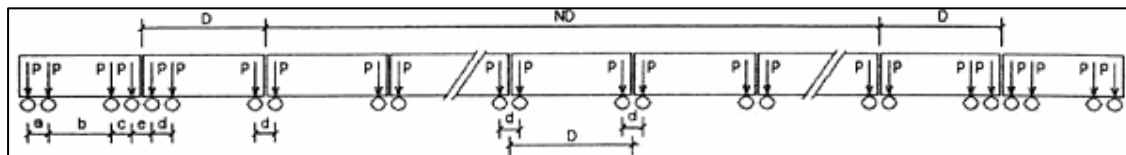
4. ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Οι σύγχρονοι κανονισμοί επιβάλλουν την μελέτη υπό δυναμική φόρτιση των σιδηροδρομικών γεφυρών όταν η ταχύτητα διέλευσης των τρένων ξεπερνά τα 200km/h. Η προβλεπόμενη από τις προδιαγραφές ταχύτητα χρήσης του νέου δικτύου είναι 350km/h και επομένως απαιτείται η μελέτη όλων των γεφυρών για δυναμικά φορτία.

Η μελέτη για δυναμικά φορτία αποτελείται από δύο μέρη:

1. Έλεγχος των ακρότατων τιμών κατακόρυφης επιτάχυνσης, βέλους κάμψης, στρέβλωσης, στροφής των ακρόβαθρων και δυναμικού συντελεστή προσαύξησης. Η δυναμική φόρτιση περιγράφεται από το Universal Train, δηλαδή ένα σύνολο από 10 στοιχειώδη τρένα (βλ. Πίνακα 2).

2. Ελεγχος έναντι κόπωσης για επαναλαμβανόμενες διελεύσεις του πραγματικού συρμού TGV.



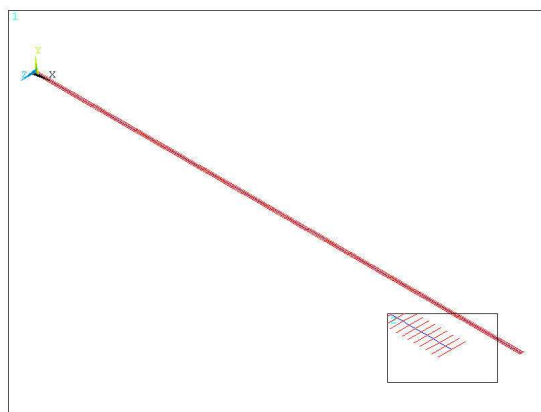
ΤΡΕΝΟ	Πλήθος ενδιάμεσων οχημάτων N	Μήκος οχήματος D (m)	Αξονική απόσταση τροχών d (m)	Σημιακό φορτίο P (kN)
A1	18	18	2.0	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2.0	180
A4	15	21	3.0	190
A5	14	22	2.0	170
A6	13	23	2.0	180
A7	13	24	2.0	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2.0	210
A10	11	27	2.0	210

Πίνακας 2: Universal Train

Η απόκριση του φορέα υπολογίζεται για κάθε συρμό του Universal Train για έξι ταχύτητες, τρεις υποχρεωτικές: $V_1=10\text{km/h}$ (οιονεί στατική απόκριση), $V_2=350\text{km/h}$ (ονομαστική ταχύτητα δικτύου), $V_3=420\text{km/h}$ (μέγιστη δυνατή ταχύτητα) και τρεις «κρίσιμες» οι οποίες υπολογίσθηκαν (διαφορετικές για κάθε τρένο) από την σχέση:

$V_i = D \times f_i / n$ όπου D το μήκος οχήματος, n ακέραιος που αντιστοιχεί στην τάξη της διέγερσης ώστε να προκύψει ταχύτητα μέσα στα θεωρούμενα όρια (200-420 km/h) και f_i η συχνότητα της ιδιομορφής i.

Οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας προσομοίωμα από ραβδωτά στοιχεία με το πρόγραμμα ANSYS. Τα χαρακτηριστικά των διατομών των στοιχείων είναι αυτά που προέκυψαν από την στατική ανάλυση για συντελεστή ισοδυναμίας χάλυβα/σκυροδέματος $m=6$. Τα ραβδωτά στοιχεία στον άξονα της γέφυρας συμπληρώνονται από άλλα εγκάρσια με άκαμπτα χαρακτηριστικά και στην ακριβή απόσταση της γραμμής από τον άξονα της γέφυρας επί των οποίων εφαρμόζονται τα φορτία των συρμών.



Σχήμα 3: Προσομοίωμα δυναμικής ανάλυσης

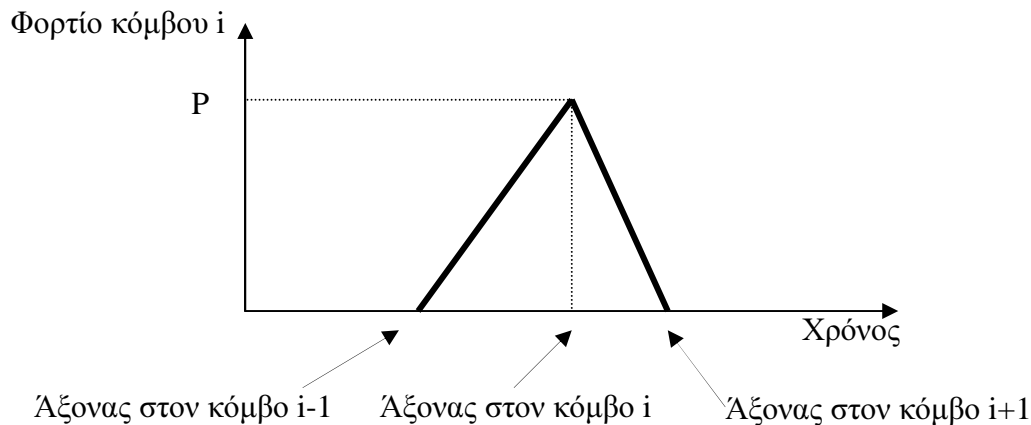
Η στρεπτική ροπή αδράνειας υπολογίσθηκε με βάση την εξίσωση του Bredt για κλειστές λεπτότοιχες διατομές:

$$J_{\text{torsion}} = 4 * A^2 / (\sum L_i/t_i), \text{ } L_i, t_i \text{ μήκος και πάχος του } i\text{-οστού τοιχώματος.}$$

Η μάζα αντιστοιχεί στα μόνιμα φορτία και λαμβάνεται υπόψη τόσο σε ότι αφορά την δυνατότητα μετάθεσης όσο και στροφής γύρω από τον άξονα της γέφυρας (στρεπτική κίνηση).

Η δυναμική ανάλυση βασίζεται στην μέθοδο της ιδιομορφικής επαλληλίας (mode superposition). Υπολογίζονται οι ιδιομορφές που αντιστοιχούν σε ιδιοσυχνότητα μέχρι 20Hz. Για την δυναμική ανάλυση χρησιμοποιείται συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης ίσος με 0.5%.

Το ιστορικό δυνάμεων που αντιστοιχεί σε κάθε συρμό αποτελείται από επικόμβια φορτία. Αν για κάποιο χρονικό βήμα ένας άξονας βρίσκεται μεταξύ δύο κόμβων, υπολογίζεται η ισοδύναμη ισοστατική κατανομή του φορτίου μεταξύ του κόμβου που προηγείται και αυτού που έπεται της θέσης του άξονα (βλ. Σχήμα 4).

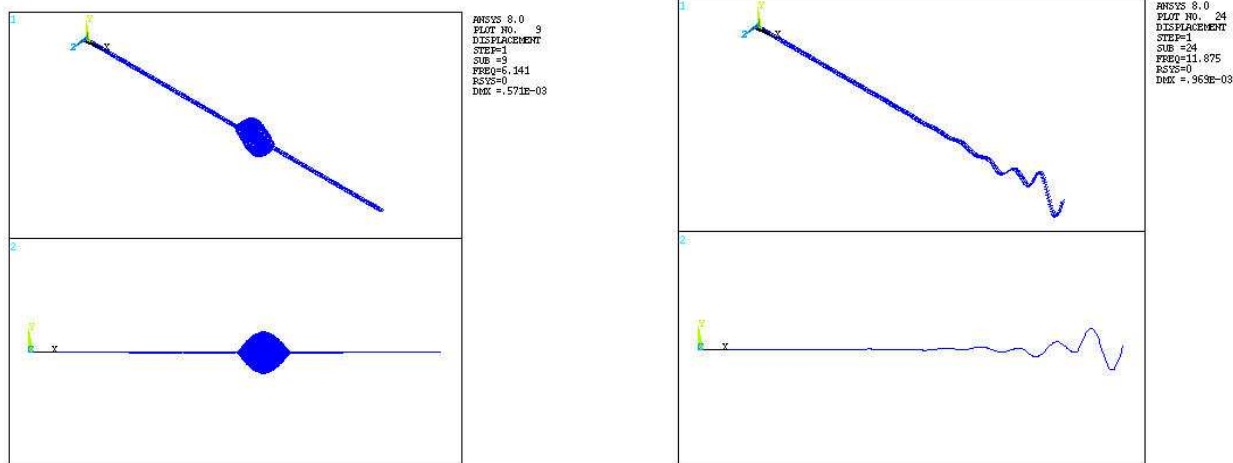


Σχήμα 4: Μεταβολή του φορτίου στον κόμβο i για διέλευση ενός άξονα.

Ελέγχονται τα παρακάτω κριτήρια δυναμικής συμπεριφοράς:

- Οριακό δυναμικό βέλος κάμψης (αφορά την άνεση των επιβατών) $\sim L/2200$
- Οριακή κατακόρυφη επιτάχυνση (κίνδυνος αποσταθεροποίηση έρματος και απώλειας επαφής τροχού/τροχιάς) $\rightarrow 0.35g = 3.43m/s^2$.
- Δυναμική στρέβλωση της σιδηροδρομικής γραμμής (κίνδυνος απώλειας επαφής τροχού/τροχιάς) $\rightarrow 1.2mm / 3m = 0.4mm/m$.
- Συμβατότητα μεταξύ του δυναμικού αυξητικού συντελεστή ϕ (λόγος δυναμικού προς στατικό βέλος κάμψης) και αυτού που χρησιμοποιήθηκε κατά την στατική ανάλυση Φ .

Από την εμπειρία ανάλογων μελετών έχει προκύψει ότι οι κρίσιμες ιδιομορφές είναι οι στρεπτικές σε κάθε θέση και αυτές που προκαλούν κάμψη ή/και στρέψη των ακραίων φατνωμάτων. Στις παρακάτω εικόνες δίνονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης για την γέφυρα Quenoche (48-6*55-44 = 422m).



Σχήμα 5: Στρεπτική ($f=6.2\text{Hz}$) και καμπτική ακραίου φατνώματος ($f=11.9\text{Hz}$).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των βασικών παραμέτρων ελέγχου για όλες τις γέφυρες που μελετήθηκαν και ελέγχθηκαν.

Γέφυρα	Συνολ. Μήκος (m)	f_b (Hz)	f_T (Hz)	max δ (mm)	max a (m/s^2)	max g (mm/m)
Ognon	180	8.80	5.90	5.50	1.60	0.070
Linotte	352	5.99	6.20	5.95	2.14	0.020
Quenoche	422	3.96	6.15	5.95	1.60	0.020
Corcelles	450	4.98	6.05	5.30	1.51	0.017
Aibre	250	3.79	7.34	8.40	1.50	0.024
Pertuis	220	4.19	5.75	7.40	1.82	0.023
Epenottes	450	4.44	5.80	9.50	2.20	0.024
Lizaine	717	2.80	3.40	14.40	1.00	0.059
Savoireuse	794	2.21	4.91	18.00	3.34	0.164

f_b, f_T : Καμπτική και στρεπτική κρίσιμη ιδιοσυχνότητα
 δ : Δυναμικό βέλος κάμψης
 a : Δυναμική επιτάχυνση
 g : Δυναμική στρέβλωση

Πίνακας 3: Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης

Παρατηρούμε ότι τα κριτήρια δυναμικής συμπεριφοράς δεν είναι κρίσιμα για την διαστασιολόγηση των σύμμικτων γεφυρών εκτός της Savoireuse η οποία παρουσιάζει την ιδιομορφία του στατικού συστήματος από διαδοχικά φατνώματα μικρού μήκους.

Ο έλεγχος σε κόπωση υπό επαναλαμβανόμενη δυναμική φόρτιση λόγω διέλευσης συρμών TGV έγινε με βάση την ίδια μεθοδολογία για δύο ταχύτητες: 350km/h και μία «κρίσιμη» ταχύτητα που προσεγγίζει την προηγούμενη. Θεωρήθηκε διάρκεια ζωής του έργου τα 100 έτη, 70 διελεύσεις ανά διεύθυνση ανά ημέρα ($5,1 \times 10^6$ κύκλοι φόρτισης) και 5% διασταυρώσεις τρένων πάνω στην γέφυρα. Σε κάθε «κρίσιμη» θέση (υπό την έννοια των κατασκευαστικών λεπτομερειών που περιγράφονται στους πίνακες 8.1-8.6 του μέρους 1.9 του Ευρωκώδικα 3) προκύπτει ένα ιστορικό τάσεων από το οποίο, κατόπιν επεξεργασίας με βάση την μέθοδο μέτρησης κύκλων rainflow και τον νόμο Palmgren-Miner προκύπτει ο αθροιστικός δείκτης βλάβης (D , cumulative damage). Σε όλες τις περιπτώσεις προέκυψε $D \ll 1$.

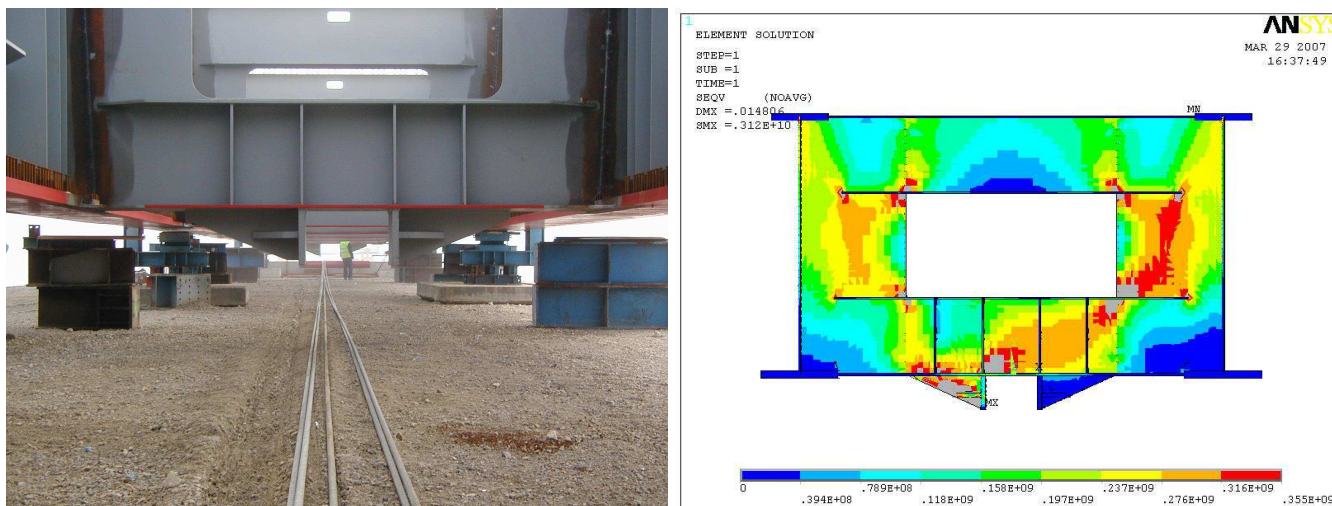
5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

Στις συνήθεις περιπτώσεις οι στηρίξεις (εφέδρανα) των γεφυρών επιτρέπουν τις μετακινήσεις κατά την διαμήκη ή/και την εγκάρσια διεύθυνση εκτός από μία (ακλόνητη στήριξη). Από τις γέφυρες που μελετήθηκαν ή ελέγχθηκαν, μερικές απαιτούσαν ως επιπλέον μελέτη τον έλεγχο των κατασκευαστικών διαμορφώσεων για την παραλαβή σεισμικών δράσεων. Οι αντίστοιχοι έλεγχοι έγιναν με την βοήθεια προσομοιωμάτων με πεπερασμένα στοιχεία.

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται για όσες γέφυρες απαιτήθηκαν αντισεισμικές στηρίξεις τα συστήματα που εφαρμόστηκαν:

Γέφυρα	Εγκάρσια Αντισεισμική Στήριξη	Διαμήκης Αντισεισμική Στήριξη
Corcelles	Μεταλλικό διάφραγμα ως αντέρεισμα	Κιβωτιοειδές διάφραγμα και σύστημα μεταλλικών δοκών
Aibre	Μεταλλικό αντέρεισμα πακτωμένο στο βάθρο και μεταλλικό διάφραγμα	Κιβωτιοειδές διάφραγμα και μεταλλικά αντερείσματα πακτωμένα στο ακρόβαθρο
Pertuis	Μεταλλικό αντέρεισμα πακτωμένο στο βάθρο και μεταλλικό διάφραγμα	Κιβωτιοειδές διάφραγμα και μεταλλικά αντερείσματα πακτωμένα στο ακρόβαθρο
Epenottes	Αντισεισμικοί αποσβεστήρες	Αντισεισμικοί αποσβεστήρες
Lizaine	Μεταλλικό αντέρεισμα πακτωμένο στο βάθρο και μεταλλικό διάφραγμα	Μεταλλικό αντέρεισμα πακτωμένο στο βάθρο και μεταλλικό διάφραγμα
Savoireuse	Εφέδρανα των ισοστατικών φατνωμάτων	Αντισεισμικοί αρμοί στην πλάκα σκυροδέματος

Πίνακας 4: Συστήματα αντισεισμικών στηρίξεων



Σχήμα 6: Διαμόρφωση εγκάρσιας αντισεισμικής στήριξης και προσομοίωμα υπολογισμού.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζουμε τις ευχαριστίες μας στο τμήμα επικοινωνίας της RFF (Réseau Ferré de France) για τα γενικά στοιχεία του έργου και το υλικό της παρουσίασης (περισσότερες πληροφορίες: <http://www.lgvrhinrhone.com>). Για το φωτογραφικό υλικό των γεφυρών ευχαριστούμε επίσης όλους τους συνεργάτες μας στο εργοστάσιο μεταλλικών κατασκευών της EIFFEL-Lauterbourg.

**DESIGN STUDIES OF HIGH SPEED TRAIN BRIDGES:
THE RHIN-RHONE PROJECT IN FRANCE**

Christos Saouridis
Civil Engineer, PhD
C.C.S. S.A
Maroussi, HELLAS
e-mail: chrisa@ccs.gr

SUMMARY

The new extension of the high speed railway network (LGV) in the east of France is one of the biggest infrastructure projects which has been launched on 2005 and is scheduled to be completed in 2012. This project will increase the speed linking the cities of the region with the existing railway network but also will reduce the necessary time to access the neighboring countries (Germany, Switzerland).

In this article are first presented the main project characteristics and then we focus on nine important viaducts regarding their design studies. The viaducts are all made of steel and have spans varying between 40 and 66 meters and sections made of either double I composite beams with top or bottom deck, or box composite girders. Due to the high speed limit in service conditions (350km/h) all the bridges have been verified under dynamic excitation in order to satisfy the relevant dynamic behavior criteria as well as the dynamic fatigue resistance. Part of the project is located to a seismic area. A brief description of the design alternatives, which are used to resist the seismic forces, is given as a function of the bridge characteristics.