

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΧΑΛΥΒΑ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Αδαμάκος Θεόδωρος

Υποψήφιος διδάκτωρ ΕΜΠ - Computer Control Systems S.A.
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου, Αθήνα
tadamakos@yahoo.com

Βάγιας Ιωάννης

Καθηγητής ΕΜΠ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου, Αθήνα
vastahl@central.ntua.gr

Ηλιόπουλος Άρης

Δρ. Πολ. Μηχανικός
Σφακτηρίας 4, Χαλάνδρι
15231 Αθήνα
iliop78@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μίας νέας μεθόδου προσομοίωσης σύμμικτων γεφυρών, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη χωρικών μοντέλων ραβδωτών στοιχείων. Η νέα αυτή μέθοδος έχει ως στόχο τη δημιουργία προσομοιωμάτων, τα οποία είναι εύκολα στη χρήση τους, αξιόπιστα στην εφαρμογή τους και προβλέπουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματική συμπεριφορά του φορέα. Συγκριτικές αναλύσεις με ήδη αξιόπιστες μεθόδους αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα είναι ικανό να προβλέψει την παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση του φορέα ενώ είναι κατάλληλο και για τον έλεγχο ευστάθειας του μεταλλικού σκελετού κατά τη σκυροδέτηση.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

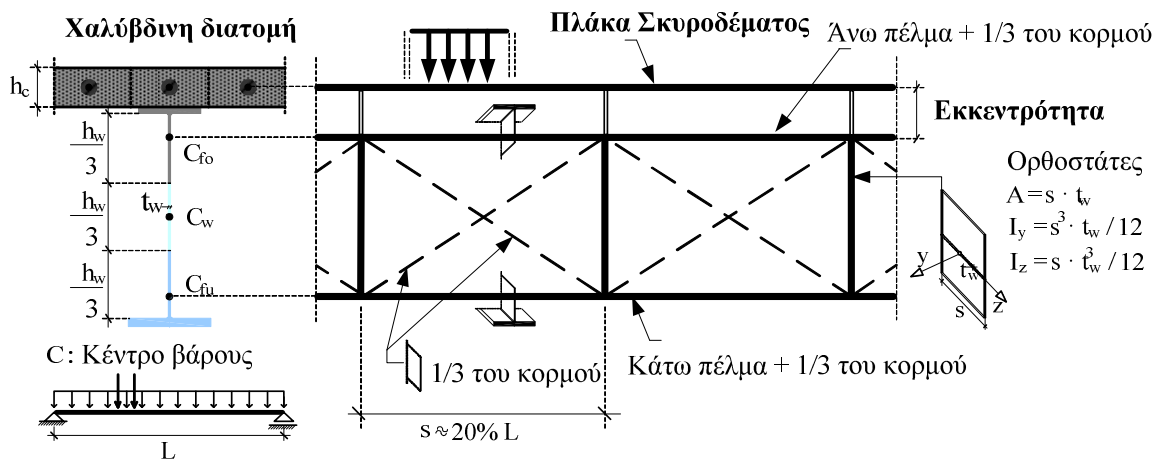
Η ανάλυση σύμμικτων γεφυρών στις μέρες μας είναι συνυφασμένη με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι μέθοδοι που υιοθετούνται, αναπτύσσονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσφέρουν εύκολο χειρισμό, μικρούς χρόνους επίλυσης και αξιόπιστα αποτελέσματα. Μία από τις μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια στη γεφυροποιία είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ). Η Μ.Π.Σ. έχει το ισχυρό πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση πολύπλοκων φορέων και να προσφέρει

αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Ο χειρισμός της όμως προϋποθέτει ειδικές σε βάθος γνώσεις, με αποτέλεσμα να απαιτείται πάντα εξειδικευμένο προσωπικό για την εφαρμογή της. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις παραδοχές και τις επιλογές του μηχανικού, ενώ μπορεί να είναι πολλές φορές δύσκολα ως προς τον έλεγχο και την επεξεργασία τους.

Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια σημειώνεται μία τάση χρήσης απλούστερων προσομοιωμάτων ραβδωτών στοιχείων, τα οποία αποδεικνύονται εύχρηστα και αξιόπιστα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος προσομοίωσης σύμμικτων γεφυρών με ραβδωτά στοιχεία. Η προτεινόμενη μέθοδος αναπτύσσεται σε τρεις διαστάσεις σε αντίθεση με την δισδιάστατη μέθοδο της εσχάρας [1]. Έτσι, προσφέρει τη δυνατότητα εισαγωγής δευτερευόντων στοιχείων, όπως χιαστί σύνδεσμοι και διαδοκίδες, ενώ επιτρέπει την διεξαγωγή ανάλυσης ευστάθειας. Η τρισδιάστατη μορφή της προσφέρει αποτελέσματα τα οποία θα απαιτούσαν χρήση της Μ.Π.Σ. ενώ ταυτόχρονα οι χρόνοι επίλυσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων υπερτερούν έναντι της τελευταίας.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

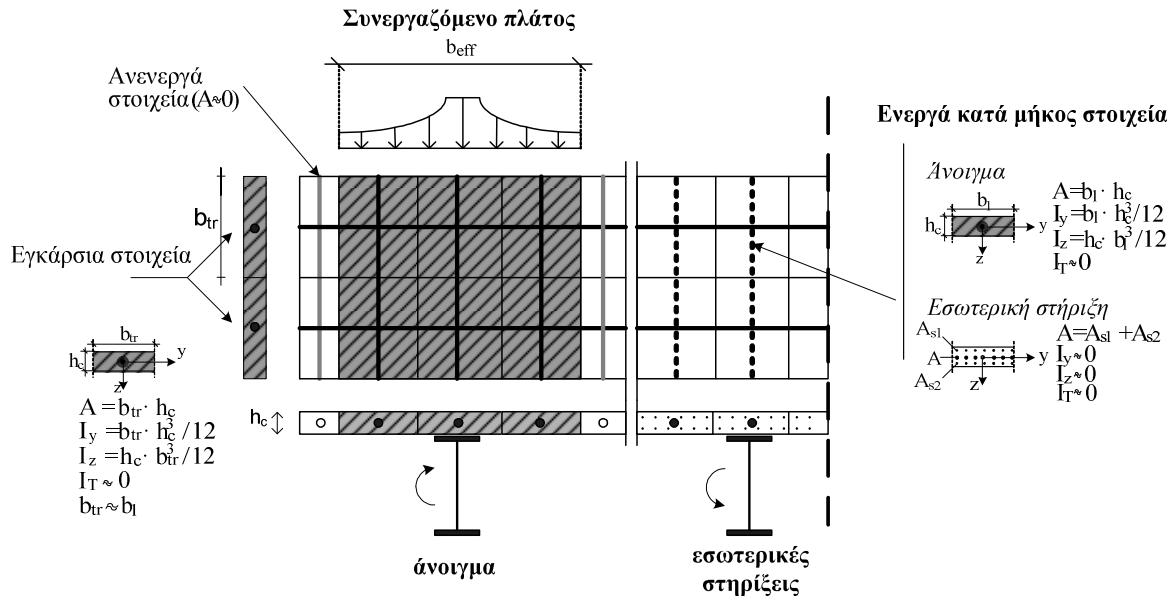
Η προσομοίωση των σύμμικτων δοκών γίνεται σύμφωνα με το Σχ. 1. Η μεταλλική δοκός αντικαθιστάται από δύο, άνω και κάτω ράβδους, διατομής ίσης με τη διατομή του πέλματος συν το ένα τρίτο της διατομής του κορμού. Η διατομή των διαγώνιων στοιχείων είναι ίση με το ένα τρίτο της διατομής του κορμού που απομένει. Ορθοστάτες τοποθετούνται ανά μία απόσταση ίση με το 20% του ανοίγματος. Περεταίρω πύκνωση είναι επιτρεπτή χωρίς όμως να έχει ιδιαίτερη επιρροή στα αποτελέσματα. Τα κατά μήκος στοιχεία και οι ορθοστάτες είναι ικανοί να αναλάβουν ροπή, τέμνουσα και αξονική δύναμη. Οι χιαστί σύνδεσμοι αναλαμβάνουν μόνο αξονική ένταση.



Σχ. 1 Προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης σύμμικτης διατομής I μέσω ραβδωτών στοιχείων – αναλυτικό προσομοίωμα [2]

Η διατομή σκυροδέματος, που αντιστοιχεί στο συνεργαζόμενο πλάτος της σύμμικτης διατομής εισάγεται μέσω μίας επιπλέον κατά μήκος ράβδου όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Τα κατά μήκος στοιχεία τοποθετούνται στο κέντρο βάρους των διατομών. Η ράβδος της διατομής σκυροδέματος εισάγεται μέσω εκκεντρότητας, ίσης με την απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους της διατομής σκυροδέματος και του κέντρου βάρους της διατομής του άνω ταυ.

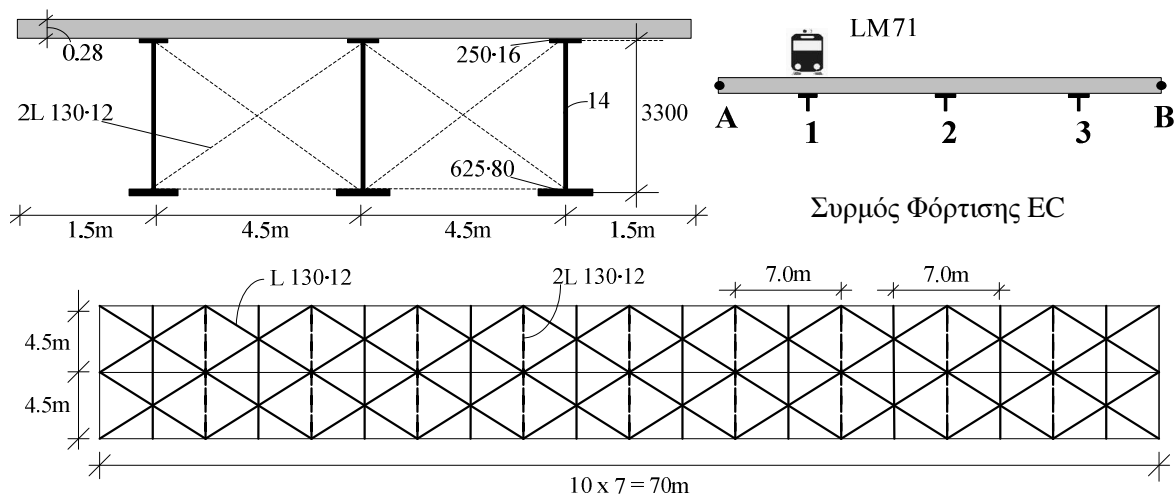
Η προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος βασίζεται στις αρχές της εσχάρας δοκών [1] και φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ.2 Προσομοίωση πλάκας σκυροδέματος σύμφωνα με το προτεινόμενο τρισδιάστατο προσομοίωμα ραβδωτών στοιχείων [2-4]

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΙΚΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΚΑΤΩ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

Ο φορέας του Σχ. 3 αποτελείται από τρεις κύριες δοκούς και πλάκα καταστρώματος [5]. Στη θέση της ακραίας δοκού επιβάλλεται ο συρμός LM71 του ευρωκώδικα [6], έτσι ώστε να είναι έκκεντρος ως προς το κέντρο βάρους της εγκάρσιας διατομής. Ο φορέας προσομοιώνεται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο (3Δ) και τα αποτελέσματα του συγκρίνονται με τη Μ.Π.Σ. Δύο διαφορετικές περιπτώσεις εξετάζονται: στην πρώτη περίπτωση δεν τοποθετείται κάτω σύστημα οριζόντιων χιαστί συνδέσμων ενώ στη δεύτερη περίπτωση τοποθετούνται σύνδεσμοι όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



Σχ. 3 Εγκάρσια διατομή γέφυρας, φόρτιση και σύστημα κάτω οριζόντιων συνδέσμων[5]

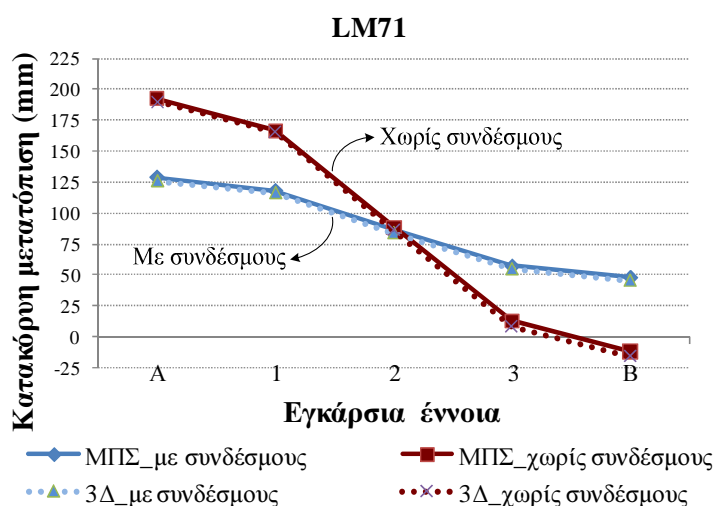
Παρατηρείται, από τα αποτελέσματα του Πιν. 1, ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων είναι πάρα πολύ μικρές. Επισημαίνεται επίσης η δυνατότητα εισαγωγής στο μοντέλο των χιαστί και των οριζόντιων συνδέσμων, οι οποίοι όπως φαίνεται από τη συγκριτική ανάλυση επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα. Πράγματι, με την τοποθέτηση των συνδέσμων το μέγιστο βέλος μειώνεται από 192,4mm σε 128,9mm και η μέγιστη τάση στις σιδηροδοκούς από 17,10 kN/cm² σε 12,85 kN/cm².

(mm)	w _A	w ₁	w ₂	w ₃	w _B	(mm)	w _A	w ₁	w ₂	w ₃	w _B
Μ.Π.Σ.	<u>128,9</u>	118,1	86,1	57,3	48,2	Μ.Π.Σ.	<u>192,4</u>	166,4	88,6	13,1	-11,8
3Δ	125,	116,3	84,1	54,9	45,7	3Δ	190,1	165,4	86,1	8,6	-15,9
kN/cm ²	σ_c	σ₁	σ₂	σ₃		kN/cm ²	σ_c	σ₁	σ₂	σ₃	-
Μ.Π.Σ.	-1,09	<u>12,85</u>	9,29	8,25	-	Μ.Π.Σ.	-1,62	<u>17,10</u>	10,04	-2,85	-
3Δ	-1,04	13,65	9,14	7,44	-	3Δ	-1,83	17,78	10,35	2,97	-

Με εγκάρσιους συνδέσμους

Χωρίς εγκάρσιους συνδέσμους

- w_A, w_B: μέγιστες παραμορφώσεις στα άκρα του καταστρώματος Α και Β (mm)
w₁, w₂, w₃: μέγιστες παραμορφώσεις στις κύριες δοκούς (mm)
σ₁, σ₂, σ₃: μέγιστες τάσεις στις κύριες δοκούς (kN/cm²)
σ_c: μέγιστη θλιπτική τάση στην άνω ίνα σκυροδέματος (kN/cm²)

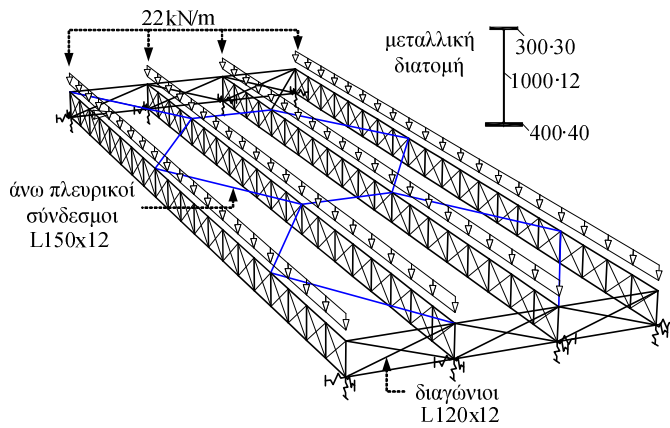


Πιν. 1 Μέγιστες τάσεις και μέγιστες παραμορφώσεις στο μέσο, για τον φορέα χωρίς και με οριζόντιους χιαστί συνδέσμους (Μ.Π.Σ.- 3Δ)

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ

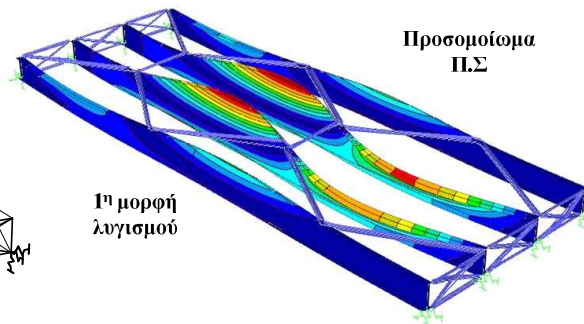
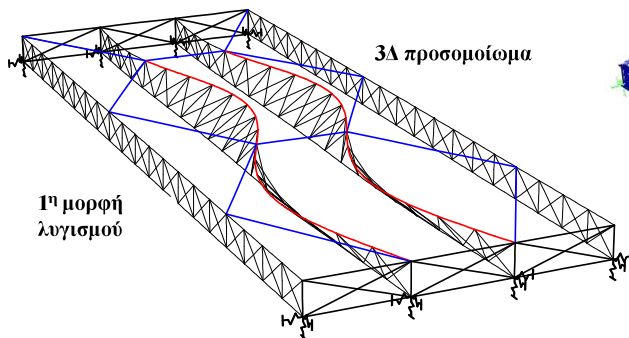
Στον φορέα του Σχ. 4, πραγματοποιείται ανάλυση λυγισμού για ένα κατανεμημένο φορτίο που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το φορτίο του νωπού σκυροδέματος. Ο φορέας προσομοιώνεται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, ενώ προστίθενται άνω σύνδεσμοι για την ευστάθεια του μεταλλικού σκελετού. Παρατηρείται ότι οι τιμές των δεικτών φόρτισης που προκύπτουν από την προτεινόμενη προσομοίωση (3Δ) βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με τις τιμές της Μ.Π.Σ. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται η 1^η μορφή λυγισμού η οποία φαίνεται ότι ταυτίζεται για τις δύο διαφορετικές αναλύσεις. Το ίδιο συμβαίνει και για τις υπόλοιπες μορφές λυγισμού.

3Δ-Προσομοίωμα



Δείκτες φόρτισης n_{cr}

Μορφή λυγισμού	3Δ προσομοίωμα	Μ.Π.Σ
1 ^η	1,586	1,539
2 ^η	1,591	1,589
3 ^η	1,703	1,673
4 ^η	1,707	1,716

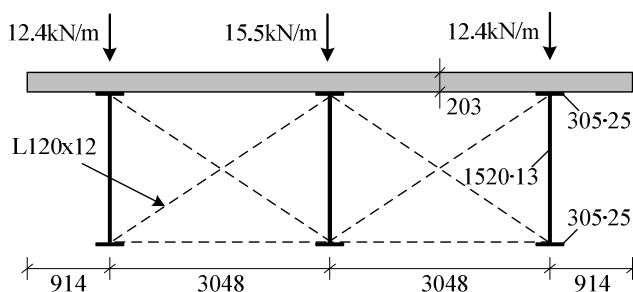


Σχ. 4 Κανονικές μορφές λυγισμού και δείκτες φόρτισης του μεταλλικού σκελετού αμφιέρειστης γέφυρας υπό το φορτίο σκυροδέτησης [4]

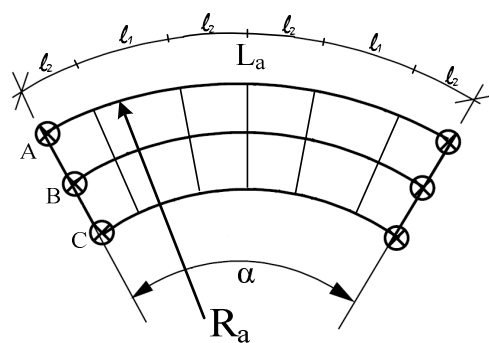
6. ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΕΦΥΡΑ

Για την προσομοίωση καμπύλων σύμμικτων γεφυρών ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στους ευθύγραμμους φορείς, με τα ευθύγραμμα ραβδωτά στοιχεία να ακολουθούν την καμπύλη γεωμετρία του φορέα. Η μόνη διαφορά από έναν ευθύγραμμο φορέα έγκειται στην στρεπτική ροπή αδρανείας των στοιχείων που προσομοιώνουν την πλάκα σκυροδέματος.

Γεωμετρία



L_a	$R_a = 101.5m$	l_1	l_2
30.48m	$\alpha = 17.2^\circ$	6.096m	4.572m

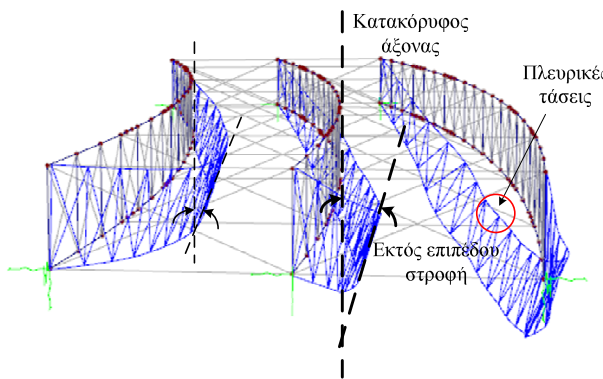


$$E_s = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad E_c = 3350 \text{ kN/cm}^2$$

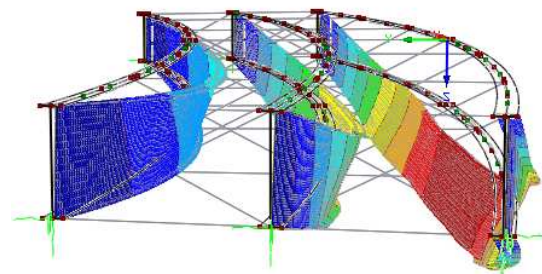
Σχ. 5 Γεωμετρία και φόρτιση καμπύλου φορέα [3][5]

Καθώς η στρεπτική σταθερά της πλάκας σκυροδέματος είναι πολύ μικρότερη από την καμπτική ροπή αδρανείας των κύριων δοκών, σε γέφυρες «ομαλής γεωμετρίας», όπως ευθύγραμμοι φορείς, μπορεί να θεωρείται μηδενική, χωρίς αυτή η παραδοχή να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Σύμφωνα με τον Hambly [1], η θεώρηση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα για φορείς λοξών στηρίξεων, μεγάλης γωνίας λοξότητας ή για καμπύλους φορείς αυξημένης καμπυλότητας.

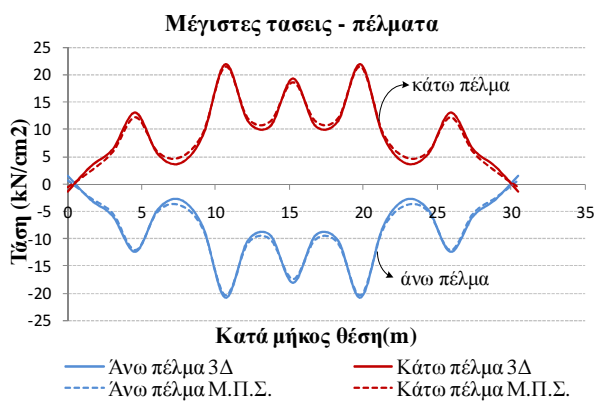
Στο σχήμα 5, φαίνεται η γεωμετρία ενός καμπύλου φορέα ο οποίος θα μελετηθεί κατά τη σκυροδέτηση. Οι καμπύλοι φορείς κινδυνεύουν κατά την σκυροδέτηση λόγω παραμόρφωσης εκτός επιπέδου των κύριων δοκών, η οποία συνοδεύεται από πλευρική εκτροπή των πελμάτων [7]. Για το λόγο αυτό, προστίθενται στην πράξη ενδιάμεσα χιαστί στοιχεία, έτσι ώστε να παρέχεται εξασφάλιση των πελμάτων. Τα στοιχεία αυτά επηρεάζουν την εντατική και παραμορφωσιακή συμπεριφορά του φορέα. Για να γίνει αντιληπτή η ιδιαίτερη συμπεριφορά του καμπύλου φορέα, μελετάται υπό το ίδιο φορτίο ένας ευθύγραμμος φορέας ίδιου μήκους και ίδιας εγκάρσιας γεωμετρίας.



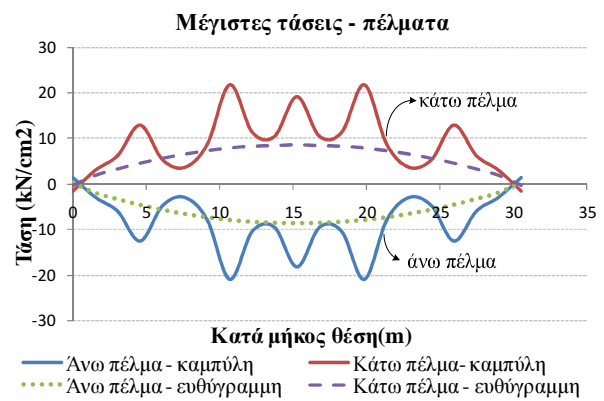
(α) Παραμορφωμένος φορέας - 3Δ



(β) Παραμορφωμένος φορέας - Μ.Π.Σ



(γ) Τάσεις στα πέλματα για την εξωτερική δοκό 3Δ – Μ.Π.Σ



(δ) Τάσεις στα πέλματα για ορθογωνικό και καμπύλο φορέα – 3Δ

Σχ. 6 Παραμόρφωση του μεταλλικού σκελετού κατά τη σκυροδέτηση με τις δύο μεθόδους και τάσεις στα πέλματα της εξωτερικής κύριας δοκού [3]

Στο σχήμα 6 φαίνεται η παραμόρφωση του μεταλλικού σκελετού, όπου είναι εμφανής η εκτός επιπέδου στροφή των σιδηροδοκών για τα δύο προσομοιώματα. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις, καθώς τα

διαγράμματα των τάσεων σχεδόν ταυτίζονται. Από την άλλη μεριά, στο διάγραμμα (δ) παρατίθενται οι τάσεις των πελμάτων για τον καμπύλο φορέα που εξετάστηκε, όπως και για τον ευθύγραμμο φορέα. Τα αποτελέσματα του διαγράμματος αφορούν την επίλυση με το προτεινόμενο προσομοίωμα (3Δ).

Παρατηρείται η διαφορά των μέγιστων τάσεων ιδιαίτερα στις περιοχές σύνδεσης των εγκάρσιων συνδέσμων. Η διαφορά στις τάσεις οφείλεται στις πλευρικές τάσεις που αναπτύσσονται στα πέλαμα κατά την κάμψη τους ως προς τον ασθενή άξονα της σιδηροδοκού. Οι τάσεις αυτές, που είναι σχεδόν μηδενικές στον ευθύγραμμο φορέα, αυξάνουν τη συνολική τάση των πελμάτων από 8.5 kN/cm^2 σε 22 kN/cm^2 για το άνω πέλαμα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπεραίνεται από τα παραπάνω παραδείγματα ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα είναι ικανό να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά μιας σύμμικτης γέφυρας. Η τρισδιάστατη μορφή του προσφέρει το πλεονέκτημα διεξαγωγής ανάλυσης ευστάθειας κατά τη σκυροδέτηση, ενώ ιδιαίτερα φαινόμενα όπως η εκτός επιπέδου στροφή των σιδηροδοκών σε καμπύλες γέφυρες προβλέπονται τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Η χρήση ραβδωτών στοιχείων μειώνει το χρόνο προσομοίωσης και επίλυσης και δίνει στο μηχανικό τη δυνατότητα εισαγωγής δευτερευόντων στοιχείων που παίζουν σημαντικό ρόλο κατά την ανάλυση.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hambly, E. C., *Bridge Deck Behaviour*, 2nd Edition, E. F. & N. Spon, 1990
- [2] Vayas I., Piopoulos A. and Adamakos T., “Spatial Systems for Modelling Steel-Concrete Composite Bridges – Comparison of Grillage Systems and FE models” *Steel Construction Design and Research*, Vol. 3, Issue 2, June 2010, pp. 100-111
- [3] Adamakos T, Vayas I, Petridis S and Iliopoulos A, “Modeling of curved composite I-girder bridges using spatial systems of beam elements”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, Issue 3, March 2011, pp. 462-470
- [4] Vayas I., Adamakos T., Iliopoulos A., “Modeling of Steel-Composite Bridges, Spatial Systems vs. Grillages”, *Proceedings of 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures*, Leeds, UK, 8-10 July 2009.
- [5] Unterweger, H., *Globale Systemberechnung von Stahl - und Verbundbrücken – Leistungsfähigkeit einfacher Stabmodelle*, Habilitation, Technische Universität Graz, Austria, 2001.
- [6] EN 1991-2 Eurocode 1 : Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges, 2003
- [7] Coletti, D. and Yadlosky, J.M., “Behavior and Analysis of Curved and Skewed Steel Girder Bridge.” *Proceedings of the World Steel Bridge Symposium 2005*, Orlando, FL. American Institute of Steel Construction, National Steel Bridge Alliance, Chicago, IL, 2005.

ANALYSIS OF COMPOSITE BRIDGES USING THREE DIMENSIONAL MODELS OF BAR ELEMENTS

Theodoros Adamakos

PhD Student

NTUA, School of Civil Engineering

Computer Control Systems S.A.

Athens

tadamakos@yahoo.com

Ioannis Vayas

Professor

NTUA, School of Civil Engineering

Athens

vastahl@central.ntua.gr

Aris Iliopoulos

Civil engineer PhD

Sfaktirias 4, Halandri

15231 Athens

iliop78@otenet.gr

SUMMARY

Plane grillages and Finite Element Models are widely used for the design of bridges. In a grillage idealization the entire superstructure of the bridge is suitably represented by different sets of bar elements. On the other hand, the finite element method makes use of plane and solid elements for the three dimensional representation of the structure. Although these models are generally accepted as sufficient accurate, they are associated with some drawbacks. To overcome the difficulties of plane grillage and finite element analysis, a new improved way of modeling steel composite bridges is presented in this paper. The proposed model is based on the simulation of steel I-girders through the use of equivalent trusses. The concrete slab is suitably represented by a set of bar elements. In contrast to the grillage model, which is usually used for the analysis of bridges, the recommended 3D-Model allows for a more reliable prediction of deformations and internal forces while it allows for the introduction of secondary members that play an important role in the bridge behavior. Besides, curved bridges display unique behavior characteristics and for this reason the grillage analysis is not always suitable. The proposed model is deemed accurate for the analysis of curved bridges while it can be used for the stability analysis of the steel structure during concreting. Worked examples are provided to illustrate the set up procedure of the proposed modeling and to compare its results with corresponding finite elements models. The work presented in this paper is a part of a research project, which is carried out in the National Technical University of Athens for modeling steel and composite bridges.