

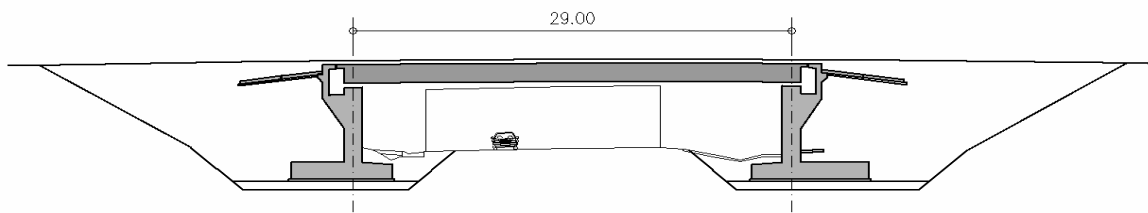
Πλεονεκτήματα της χρήσης προκατασκευασμένων δοκών διατομής διπλού ταυ σε φορείς γεφυρών

Κωνσταντίνος Φακίς

Πολιτικός μηχανικός Α.Π.Θ., costasfakis@yahoo.gr

Εισαγωγή

Η αρχική εγκεκριμένη μελέτη του υπό παρουσίαση τεχνικού γεφυροποιίας, προέβλεπε αμφιέριστο φορέα ενός ανοίγματος θεωρητικού μήκους 29.00μ (πρόκειται για άνω διάβαση κάθετου άξονα της Εγνατίας οδού) χυτής επί τόπου προεντεταμένης πλάκας σκυροδέματος καταστρώματος. Με δεδομένη την ανάγκη απρόσκοπτης χρήσης του κάθετου άξονα της Εγνατίας οδού και την ταυτόχρονη όχληση που θα προκαλούσαν τα ικριώματα βαρέος τύπου κατά τη χύτευση της πλάκας του καταστρώματος, εξετάστηκε από τον εργολάβο κατασκευής εναλλακτική λύση με χρήση προκατασκευασμένων δοκών (ώστε να αποφευχθεί η χρήση ικριωμάτων).



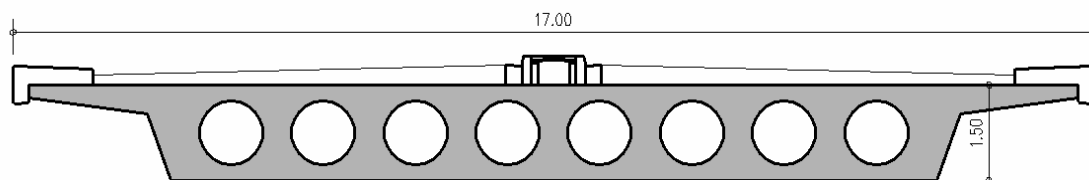
Σχ. 1 Κατά μήκος τομή γέφυρας αρχικής μελέτης

Οι περιορισμοί που έπρεπε να λάβει υπ' όψη της η νέα μελέτη ήταν οι παρακάτω:

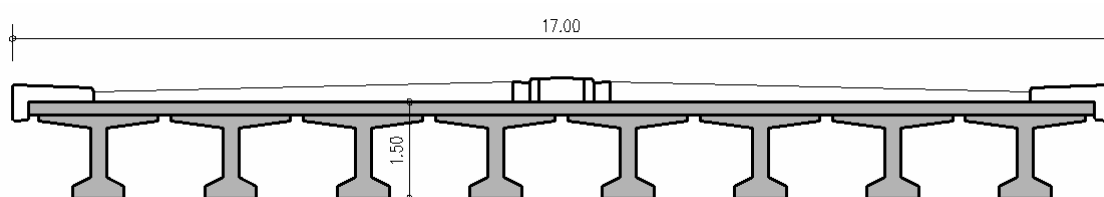
- Τα ήδη κατασκευασμένα ακρόβαθρα του τεχνικού επέβαλαν την υποχρέωση να διατηρηθούν και στη νέα μελέτη κρίσιμα γεωμετρικά μεγέθη όπως το θεωρητικό μήκος του φορέα του καταστρώματος, το μέγιστο στατικό ύψος του νέου φορέα (λόγω της ανάγκης μη όχλησης του περιτυπώματος κυκλοφορίας), η μάζα του φορέα και η δυστημσία των ελαστομεταλλικών εφεδράνων, ώστε να μην αλλάξουν σημαντικά τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της αρχικής μελέτης (μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή) κλπ.
- Επιπλέον, ο προϋπολογισμός κατασκευής (αναφερόμενος στις ίδιες τιμές τιμολογίου) με βάση τη νέα μελέτη έπρεπε να προκύπτει μικρότερος ή το πολύ ίσος του εγκεκριμένου αρχικού προϋπολογισμού, ώστε να δικαιολογείται η έγκριση της επικαιροποιημένης μελέτης.

Σε αντιδιαστολή με την αρχική μελέτη, που προέβλεπε προεντεταμένη χυτή πλάκα σκυροδέματος με διαμόρφωση διάκενων στο εσωτερικό της μάζας της για μείωση του ίδιου βάρους, η νέα μελέτη προτείνει χρήση προκατασκευασμένων προεντεταμένων δοκών, διατομής διπλού ταυ, με

διευρυμένο άνω πέλιμα, ώστε να διαμορφωθεί ενιαίο κατάστρωμα εργασίας χωρίς τη χρήση προπλάκων μεταξύ των δοκών.



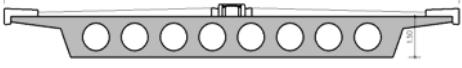
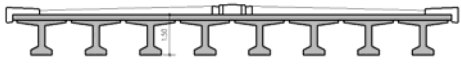
Σχ. 2 Διατομή καταστρώματος γέφυρας αρχικής μελέτης



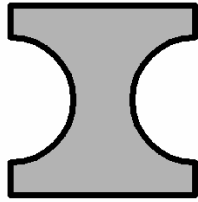
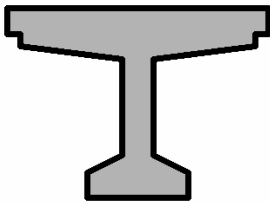
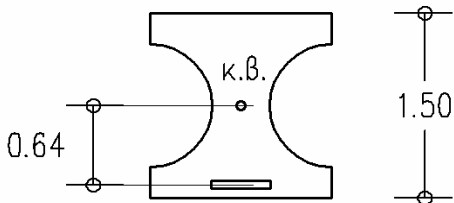
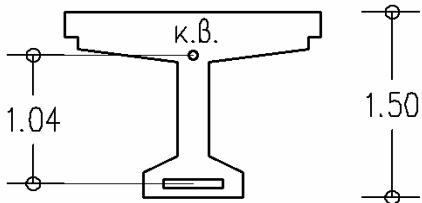
Σχ. 3 Διατομή καταστρώματος γέφυρας νέας μελέτης

Συγκριτικά στοιχεία προμελέτης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακα κρίσιμα μεγέθη μεταξύ των δύο μελετητικών λύσεων, της αρχικής εγκεκριμένης μελέτης και της νέας:

	Αρχική μελέτη	Νέα μελέτη
Θεωρ. άνοιγμα	L=29.00μ	L=29.00μ
Διατομή καταστρώματος		
Εμβαδό διατομής	13.76τμ	9.00τμ
Ροπή λόγω ίδιου βάρους	$(13.76 \cdot 25) \cdot 29.00^2 / 8 = 36163kNm$	$(9.00 \cdot 25) \cdot 29.00^2 / 8 = 23653kNm$
Ροπή λόγω πρόσθετων μόνιμων	$(0.23 \cdot 17.00 \cdot 25) \cdot 29.00^2 / 8 = 10276kNm$	$(0.23 \cdot 17.00 \cdot 25) \cdot 29.00^2 / 8 = 10276kNm$
Ροπή λόγω κινητών κυκλοφορίας	$(2.50 \cdot 17.00 + 6.50 \cdot 3.00) \cdot 29.00^2 / 8 = 6518kNm$	$(2.50 \cdot 17.00 + 6.50 \cdot 3.00) \cdot 29.00^2 / 8 = 6518kNm$
Συνολική Ροπή	$36163 + 10276 + 6518 = 52957kNm$	$23653 + 10276 + 6518 = 40447kNm$

Για να είναι ευχερέστερη η σύγκριση των δύο λύσεων η παράθεση των μεγεθών συνεχίζεται ανά «δοκίδα» του καταστρώματος:

	Αρχική μελέτη	Νέα μελέτη
Διατομή «δοκίδας»		
Αριθμός δοκίδων	9	8
Συνολική Ροπή ανά δοκίδα	$52957 / 9 = 5884 kNm$	$40447 / 8 = 5055 kNm$
Καλώδια προέντασης ανά δοκίδα	6 καλώδια με 10 συρματόσχοινα διαμέτρου 0.6 in το καθένα	2 καλώδια με 12 συρματόσχοινα και 1 καλώδιο με 15 συρματόσχοινα διαμέτρου 0.6 in το καθένα
Κανονισμοί μελέτης	DIN1045, DIN1072, DIN1075	DIN Fachbericht 101, 102
Επιτρεπόμενη τάση χάλυβα προέντασης	$f_p = 0.65 \cdot 1500 = 975 MPa$	$f_p = 0.75 \cdot 1700 = 1275 MPa$
Μέσος μοχλοβραχίονας αντιστροφής λόγω προέντασης		
Εμβαδό καλωδίων προέντασης ανά δοκίδα	$A_p = 6 \cdot 10 \cdot 1.50 cm^2 = 90.0 cm^2$	$A_p = (2 \cdot 12 + 1 \cdot 15) \cdot 1.50 cm^2 = 58.5 cm^2$
Αντιστροφή λόγω προέντασης	$f_p \cdot A_p \cdot z = (975 \cdot 10^3) \cdot \left(\frac{90.0}{10000}\right) \cdot 0.64 = 5616 kNm$	$f_p \cdot A_p \cdot z = (1275 \cdot 10^3) \cdot \left(\frac{58.5}{10000}\right) \cdot 1.04 = 7757 kNm$
Συνολική ποσότητα χάλυβα προέντασης	$9 \cdot (6 \cdot 10) \cdot 29.00 \cdot 1.20 = 18792 kgr$	$8 \cdot (2 \cdot 12 + 1 \cdot 15) \cdot 29.00 \cdot 1.20 = 10857 kgr$

Παρατηρώντας προσεκτικά τα μεγέθη που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα και, παρά το γεγονός ότι ο υπολογισμός είναι προσεγγιστικός, διαπιστώνεται η ορθότητα της επιλογής της ποσότητας του χάλυβα προέντασης της αρχικής μελέτης, ωστόσο, αν εγκαταλειφθεί η λύση του χυτού καταστρώματος που προτείνει η νέα μελέτη, επιτυγχάνεται «αντιρροπή» λόγω προέντασης 38% μεγαλύτερη. Επιπλέον, γίνεται εξοικονόμηση χάλυβα προέντασης 43% με αντίστοιχη μείωση του κόστους προμήθειας και εγκατάστασης της προέντασης. Το πλεονέκτημα αυτό της προτεινόμενης λύσης της νέας μελέτης οφείλεται:

- Σε κανονιστικούς λόγους, καθώς οι νέοι κανονισμοί DIN Fachbericht, αλλά και οι Ευρωκώδικες, επιτρέπουν μεγαλύτερες μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις στον χάλυβα προέντασης (πλέον τα πιστοποιημένα υλικά χάλυβα διαθέτουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στις μηχανικές τους αντοχές).
- Σε γεωμετρικούς λόγους, καθώς η επιλογή ευρέος άνω πέλματος της προκατασκευασμένης δοκού «έλκει» προς την άνω ίνα της διατομής το κέντρο βάρους της, αυξάνοντας σημαντικά το μοχλοβραχίονα της εφαρμοζόμενης δύναμης προέντασης.

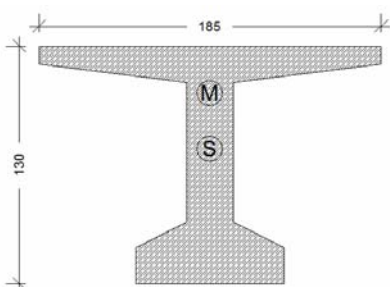
Ωστόσο, η πρόταση της νέας μελέτης παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Η εσχάρα προκατασκευασμένων δοκών θεωρείται αισθητικά μη επιθυμητή λύση, όταν επιλέγεται για φορείς άνω διάβασης (για τους διερχόμενους οδηγούς των οχημάτων της κύριας αρτηρίας) και επιπλέον, η εξωτερική επιφάνεια του φορέα καταστρώματος είναι 3 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της χυτής πλάκας, με αποτέλεσμα να δυσμενοποιείται η διαδικασία χρόνιων απωλειών της αρχικής προέντασης λόγω ερπυσμού (για το λόγο αυτό η «αντιρροπή» επιλέγεται σημαντικά μεγαλύτερη από την ροπή λόγω μονίμων και κινητών φορτίων). Τέλος, η πρόταση 8 δοκών δημιουργεί την ανάγκη προμήθειας 16 εφεδράνων, τα οποία πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα, ώστε να μη μεταβληθεί σημαντικά η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της αρχικής μελέτης και να διατηρηθούν (ή και να μειωθούν) τα επίπεδα σεισμικής καταπόνησης των ήδη κατασκευασμένων ακροβάθρων.

	Αρχική μελέτη	Νέα μελέτη
Συνολική Ροπή ανά δοκίδα	$52957 / 9 = 5884kNm$	$40447 / 8 = 5055kNm$
Μάζα ανά δοκίδα	$\frac{8M}{l^2 g} \cdot l = \frac{8 \cdot 5884}{29.00^2 \cdot 9.81} \cdot 29.00 = 165t$	$\frac{8M}{l^2 g} \cdot l = \frac{8 \cdot 5055}{29.00^2 \cdot 9.81} \cdot 29.00 = 142t$
Μάζα ανά εφεδρανο	$(165 \cdot 9) / 12 = 124t$	$(142 \cdot 8) / 16 = 71t$
Εφεδρανα	12 εφεδρανα 350x450x196(88)	16 εφεδρανα Φ400x181(77)
Δυστημσία κάθε εφεδράνου	$1890 \cdot (0.350 \cdot 0.450) / 0.088 = 3383kN / m$	$1890 \cdot (3.14 \cdot 0.400^2 / 4) / 0.077 = 3083kN / m$

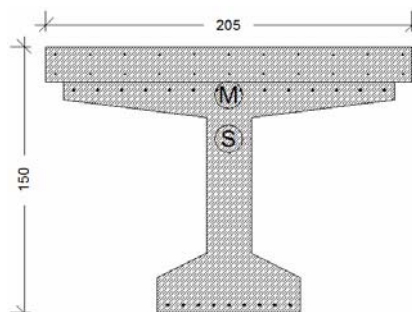
Μάζα/ Δυστημσία	$\frac{124}{3383} = 0.037$	$\frac{71}{3083} = 0.023$
Ιδιοπερίοδος	$2\pi\sqrt{0.037} = 1.208 \text{ sec}$	$2\pi\sqrt{0.023} = 0.953 \text{ sec}$
Φασματική επιτάχυνση	$\Phi = ag\beta_o(T_2 / T) =$ $0.16 \cdot 9.81 \cdot 2.50 \cdot (0.60 / 1.208) = 1.949$	$\Phi = ag\beta_o(T_2 / T) =$ $0.16 \cdot 9.81 \cdot 2.50 \cdot (0.60 / 0.953) = 2.470$
Συνολική σεισμική τέμνουσα	$F = M \cdot \Phi = (12 \cdot 124) \cdot 1.949 = 2900 \text{ kN}$	$F = M \cdot \Phi = (16 \cdot 71) \cdot 2.470 = 2806 \text{ kN}$

Στοιχεία νέας μελέτης

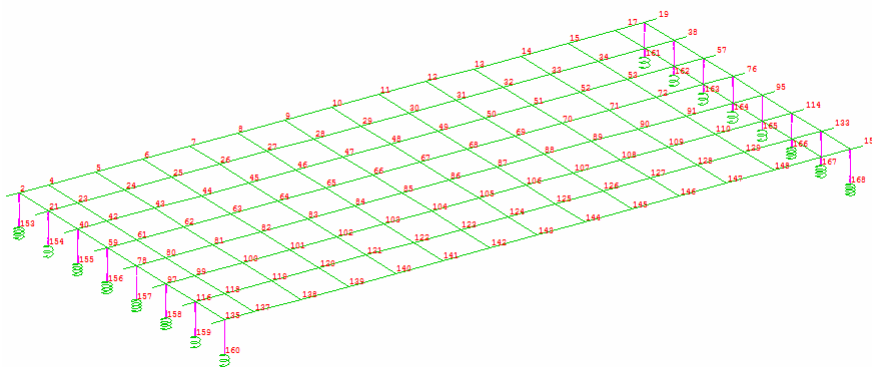
Μετά την παραπάνω προεργασία γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του αναλυτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνει τη νέα πρόταση για το κατάστρωμα της υπό μελέτης γέφυρας. Χρησιμοποιήθηκε το έγκυρο λογισμικό πακέτο ανάλυσης γενικών φορέων SOFISTIK το οποίο έχει δυνατότητα εισαγωγής προέντασης και παραγωγής τάσεων στις διάφορες φάσεις κατασκευής της τελικής διατομής (προκατασκευασμένη δοκός, εφαρμογή προέντασης, εισαγωγή ενέματος στο σωλήνα των καλωδίων, εφαρμογή φορτίων χυτής πλάκας, σκλήρυνση χυτής πλάκας και απώλειες προέντασης στιγμιαίες και χρόνιες).



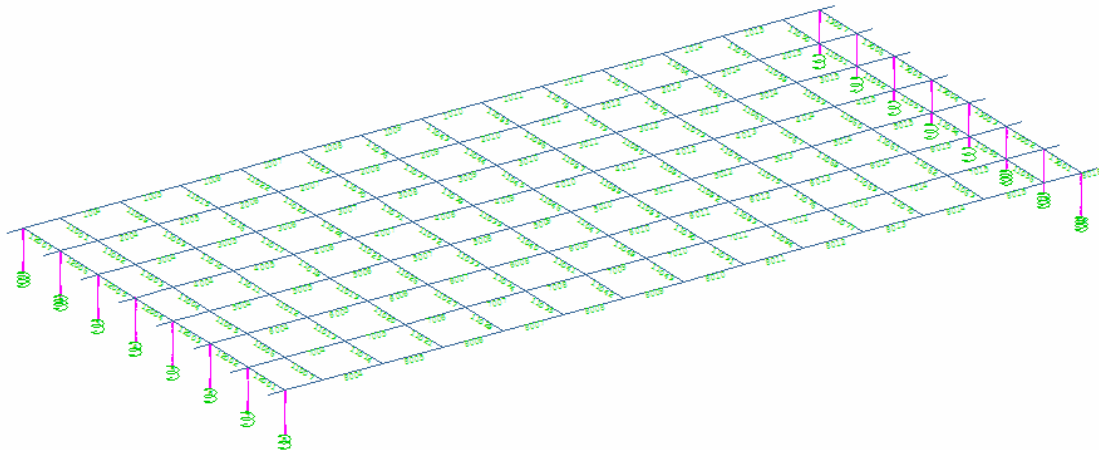
Σχ. 4 Διατομή προκατασκευασμένης δοκού



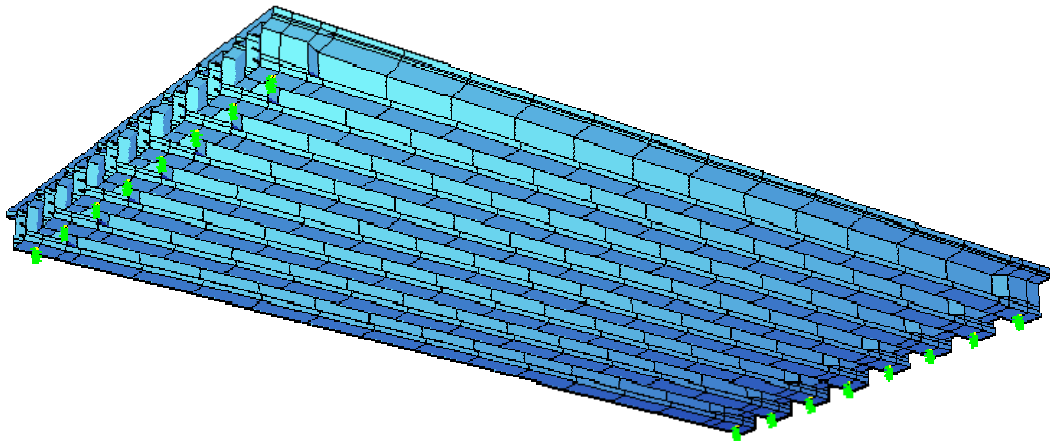
Σχ. 5 Διατομή σύνθετης πλακοδοκού



Σχ. 6 Προσομοίωμα καταστρώματος (αριθμοί κόμβων)

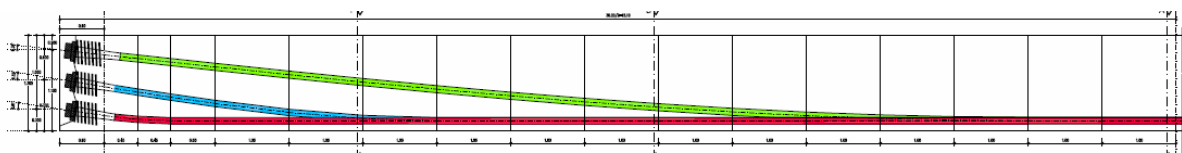


Σχ. 7 Προσομοίωμα καταστρώματος (αριθμοί ράβδων – frame elements)

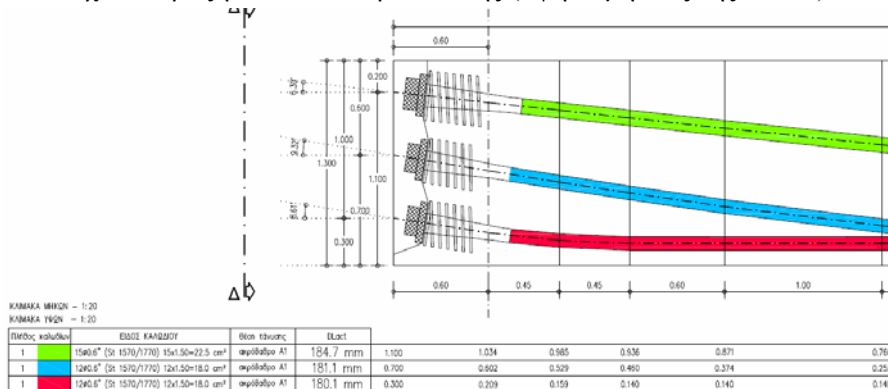


Σχ. 8 Τρισδιάστατο προσομοίωμα καταστρώματος (με «εξώθηση» διατομών)

Η χάραξη των καλωδίων είναι παραβολική, αντίστοιχη με την παραβολική κατανομή των ροπών λόγω μονίμων φορτίων.



Σχ. 9 Χάραξη καλωδίων προέντασης (όψη 1/2 μήκους της δοκού)

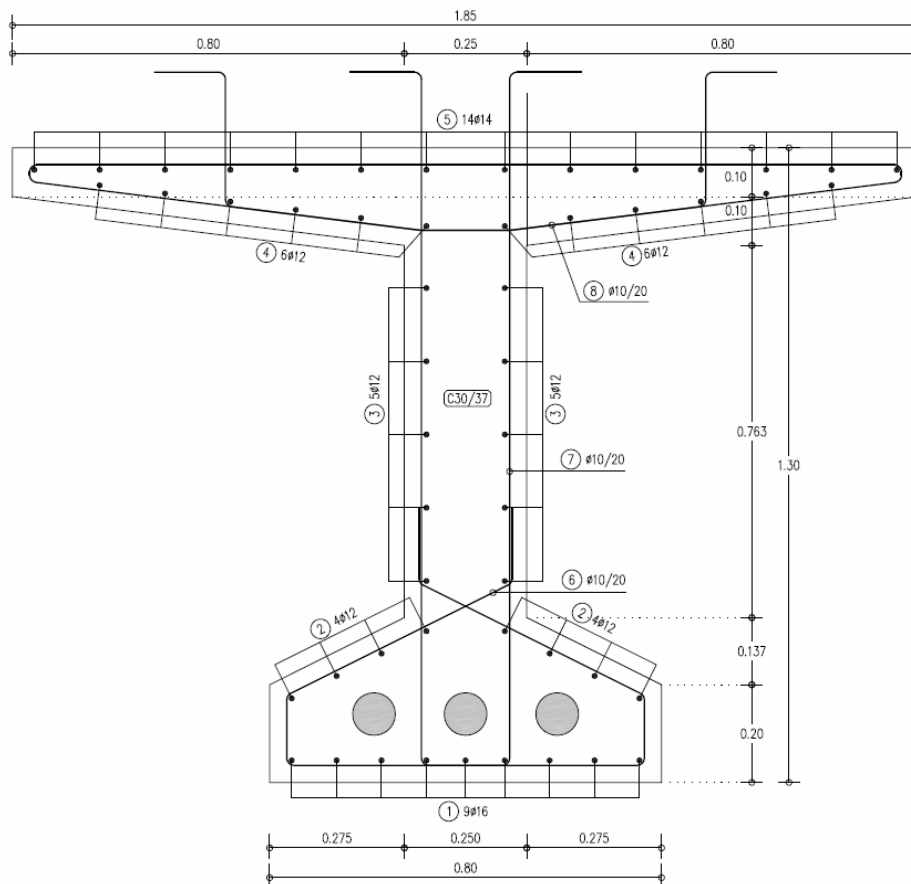


Σχ. 10 Λεπτομέρεια κεφαλών αγκύρωσης καλωδίων προέντασης

Εφαρμόζονται τα φορτία που προβλέπονται από τα DIN Fachbericht 101, 102 εξάγονται οι τάσεις στις διάφορες φάσεις κατασκευής και πραγματοποιείται ο έλεγχός τους για τους διάφορους συνδυασμούς λειτουργικότητας (σπάνιο, μη συχνό, συχνό και οιονεί μόνιμο):

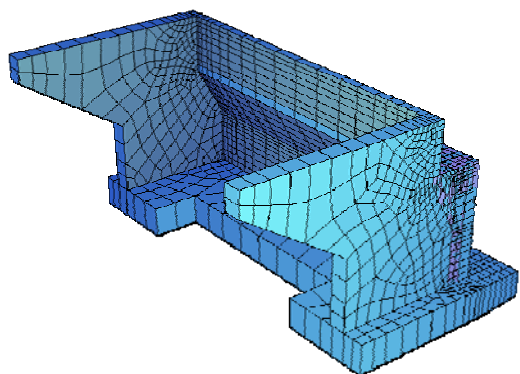
- Περιορισμός θλιπτικών τάσεων σκυροδέματος $11.1MPa < 0.6f_c = 18MPa$.
- Περιορισμός τάσεων χάλυβα οπλισμού $21.8MPa < 0.8f_y = 400MPa$.
- Περιορισμός θλιπτικών τάσεων σκυροδέματος για την παραδοχή της γραμμικότητας του φαινομένου του ερπυσμού $11.0MPa < 0.45f_c = 13.5MPa$.
- Περιορισμός τάσεων χάλυβα προέντασης $1001MPa < 0.65f_p = 1105MPa$.
- Έλεγχος απόθλιψης, της απουσίας δηλαδή εφελκυστικών τάσεων στην παρειά της δοκού πλησίον των καλωδίων (ικανοποιείται).
- Έλεγχος εύρους ρηγμάτωσης (ικανοποιείται).

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των οπλισμών (οριακή κατάσταση αστοχίας) ως ευμενέστερη οριακή κατάσταση της αντίστοιχης της λειτουργικότητας (όπως είναι αναμενόμενο σε προεντεταμένους φορείς) και εκπονείται ο έλεγχος κόπωσης (ικανοποιείται με τον ελάχιστο τοποθετούμενο οπλισμό).

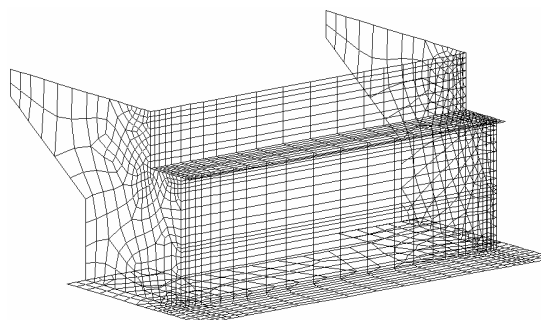


Σχ. 11 Λεπτομέρεια όπλισης στο μέσο της προεντεταμένης δοκού

Τέλος, μεταφέρονται οι μέγιστες αντιδράσεις των εφεδράνων του καταστρώματος ως φορτία σε μοντέλο επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων των ήδη κατασκευασμένων ακρόβαθρων για τον έλεγχο της επάρκειας τους, ο οποίος με βάση την πρόνοια της μελέτης του καταστρώματος, ικανοποιείται όπως ήταν επιθυμητό (για να αποφευχθούν εργασίες ενίσχυσης).



Σχ. 12 Τρισδιάστατο προσομοίωμα ακρόβαθρου (με «εξώθηση» διατομών)



Σχ. 13 Προσομοίωμα ακρόβαθρου (quad elements)

Έλεγχος οικονομικότητας της νέας μελέτης

Παρακάτω επιχειρείται ο έλεγχος της μεταβολής του προϋπολογισμού της αρχικής μελέτης, ώστε να διαπιστωθεί, αν η νέα μελέτη προτείνει οικονομικότερη κατασκευή. Οι εργασίες που επηρεάζονται από τη νέα πρόταση κατασκευής του καταστρώματος είναι:

- Η ποσότητα του σκυροδέματος της πλάκας καταστρώματος.
- Η ποσότητα του σκυροδέματος των θωρακίων, πλακών πρόσβασης των ακρόβαθρων (που θα κατασκευαστούν μετά την ολοκλήρωση του καταστρώματος).
- Το συνολικό βάρος του «χαλαρού» σπλισμού.
- Το συνολικό βάρος του χάλυβα προέντασης.
- Ο συνολικός όγκος των εφεδράνων.
- Η κατάργηση της χρήσης στοιχείων πολυστερίνης για την υλοποίηση των οπών της πλάκας καταστρώματος της αρχικής μελέτης.

Τα παραπάνω ποσοτικοποιούνται στον πίνακα που ακολουθεί και παρατηρείται τελική εξοικονόμηση (σε τιμές τιμολογίου δημοσίων έργων) 99.479,90 ευρώ της δαπάνης κατασκευής του συνόλου της γέφυρας. Αν συγκριθεί το ποσό αυτό με τον αρχικό συνολικό προϋπολογισμό του έργου (684.473,45) διαπιστώνεται ότι η νέα μελέτη, χωρίς να κάνει καμία έκπτωση σε θέματα κανονισμών και ασφαλείας, επιτυγχάνει εξοικονόμηση 14.5%, ποσοστό ιδιαίτερος σημαντικό ειδικά στη τρέχουσα

οικονομική κατάσταση (καλοκαίρι 2016) και κρίσιμο για την ανταγωνιστικότητα των εργολάβων κατασκευής.

ΕΙΔΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	Α.Τ.	ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΑΡΘΡΟ	ΜΟΝΑ-ΔΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΟΣ €	ΔΑΠΑΝΗ €
Οπλισμένο C20/25 βάρων, πλακών πρόσβασης, τοίχων, θωρακίων κλπ	2.5	ΟΔΟ Β-29.4.5	m ³	1.285,00	1.147,15	-137,85	108,00	-14.887,80
Προεντεταμένο C30/37 πλακών, πλακοδοκών Ύψους H ≤ 7,00 m	2.6	ΟΔΟ Β-29.5.7.1	m ³	485,00	289,57	-195,43	170,00	-33.223,10
Σιδηρούς οπλισμός STIII (S400) ή ST IV (S500s) εκτός υπόγειων έργων	2.7	ΟΔΟ Β-30.2	Kgr	162.390,00	148.904,00	-13.486,00	1,00	-13.486,00
Σκληρός χάλυβας προέντασης 150/170	2.9	ΟΔΟ Β-31.1	Kgr	19.735,00	11.844,20	-7.890,80	3,80	-29.985,04
Σταθερά εφέδρανα γεφυρών ελαστομεταλλικά ή ελαστομερή	2.10	ΟΔΟ Β-46.1	lt	440,00	363,74	-76,26	33,70	-2.569,96
Απομόνωση στοιχείων κατασκευής με διογκωμένη πολυστερίνη, με μηχανική στερέωση των πλακών	2.19	ΟΙΚ 79.33	m ³	185,00	0,00	-185,00	28,80	-5.328,00
ΣΥΝΟΛΟ								-99.479,90

Συμπεράσματα

Με αφορμή τα όσα εκτέθησαν παραπάνω (ποσοτικοποιημένη εφαρμογή δύο εναλλακτικών μελετητικών λύσεων), προκύπτει η σημασία της προτεινόμενης μελετητικής λύσης στη διαμόρφωση του τελικού προϋπολογισμού κατασκευής ενός έργου. Στη δύσκολη οικονομική συγκυρία, εν μέσω της οποίας είναι υποχρεωμένο να δραστηριοποιείται το τεχνικό δυναμικό της χώρας, ίσως είναι πιο επίκαιρη από ποτέ η αναγκαιότητα εκπόνησης εναλλακτικών μελετών, ώστε χωρίς έκπτωση στην ασφάλεια, να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση πόρων.

Η συνειδητοποίηση της σπουδαιότητας της μελετητικής πρότασης ως προς την οικονομικότητα της υλοποίησης του έργου αναβαθμίζει το ρόλο των μελετητών, δημιουργεί συνθήκες υγιούς ανταγωνιστικότητας, τόσο σε επίπεδο υποψήφιων αναδόχων μελετητών (όπου η επιλογή του καταλληλότερου δε θα είναι μόνο η μικρότερη αμοιβή αλλά και η ποιότητα της προτεινόμενης μελέτης) όσο και σε επίπεδο εργολάβων κατασκευής (όπου η αρτιότερη τεχνικό-οικονομικά λύση διασφαλίζει τη βιωσιμότητα της επιχειρηματικής δραστηριότητας στον κλάδο των έργων).

Τέλος, τα σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία, που έχουν στη διάθεσή τους οι μελετητές - πολιτικοί μηχανικοί, τους εξασφαλίζουν από σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα, ωστόσο, ειδικά στις

μελέτες γεφυροποιίας, που πραγματεύονται ισοστατικούς φορείς ή φορείς με μικρό βαθμό υπερστατικότητας, η συμβολή της μελετητικής προεργασίας «με το χέρι» στην παραγωγή του εξαγόμενου αποτελέσματος είναι κρίσιμη για την οικονομικότητα της τελικής πρότασης και αναβαθμίζει την ιδιότητα του μελετητή.

Βιβλιογραφία

- Ιωάννη Α. Τέγου, Προεντεταμένο σκυρόδεμα, νεότερες μέθοδοι υπολογισμού, Εκδ.ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 1997
- Χρ.Μ. Οικονομου – Χρ. Καραγιάννης, Προεντεταμένο σκυρόδεμα, συνοπτική θεωρία και 15 αριθμητικές Εφαρμογές, Εκδ. ΣΕΛΚΑ-4Μ, Αθήνα, 2007
- Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (Ο.Μ.Ο.Ε.), Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Αθήνα, 2006
- Din Fachbericht 101, Δράσεις σε γέφυρες, Εκδ. DIN Deutsches Institut fuer Normung e.V, 2η έκδοση ελληνικής μετάφρασης, Αθήνα, 2003
- Din Fachbericht 102, Γέφυρες από σκυρόδεμα, Εκδ. DIN Deutsches Institut fuer Normung e.V, 2η έκδοση ελληνικής μετάφρασης, Αθήνα, 2003
- EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, 2002