

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΒΑΘΡΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

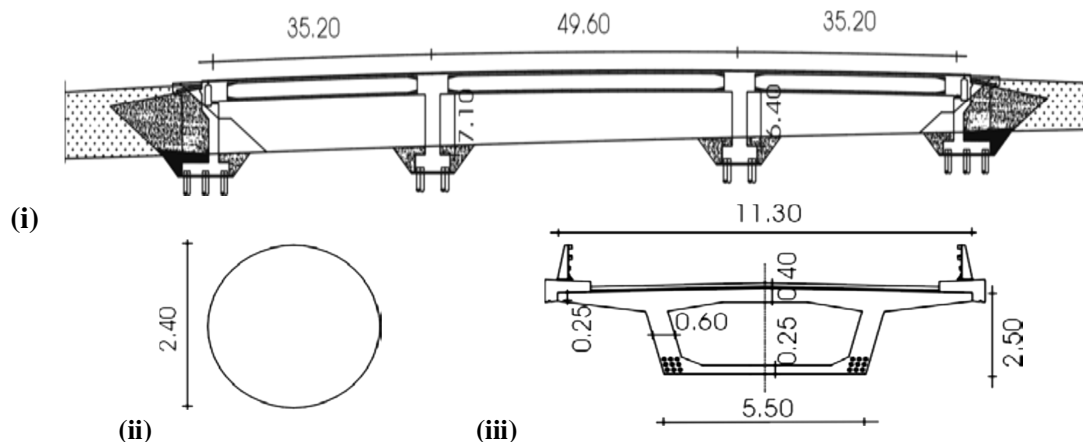
ΜΙΝΤΖΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΣΤΑΥΡΕΛΗ ΔΗΜΗΤΡΑ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την σεισμική αποτίμηση γέφυρας με τη μέθοδο της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (push over) και την ενίσχυση των βάθρων της με μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών. Η εργασία περιλαμβάνει τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη σεισμική αποτίμηση καθώς επίσης και τη διαδικασία για την επιλογή κατάλληλης ποσότητας μανδύα ΙΟΠ, για την ενίσχυση των βάθρων της γέφυρας. Τέλος, παρουσιάζονται η δράση των σύνθετων υλικών κατά την περίσφιγξη σκυροδέματος όπως επίσης και τεχνικές για τη σωστή τοποθέτηση του μανδύα στις θέσεις των βάθρων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γέφυρα που χρησιμοποιήθηκε για τη σεισμική αποτίμηση και την ενίσχυση των βάθρων της είναι μια παραλλαγή της γέφυρας T6 της Εγνατίας Οδού (τμήμα Αμπέλι-Πετρίτσι, Δεληγιαννίδης 2005) ώστε να αντικατοπτρίζει μη σεισμικό σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι ο σχεδιασμός του οπλισμού της γέφυρας έχει γίνει με βάση παλιότερες αντιλήψεις, δηλαδή χωρίς προβλέψεις πλαστιμότητας και χωρίς ικανοτικό σχεδιασμό τέμνουσας. Το σχήμα και η γεωμετρία της γέφυρας φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1 : (i) Γέφυρα T6 Εγνατίας Οδού, (ii) Διατομή βάθρων (iii) Διατομή φορέα καταστρώματος στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος [1]

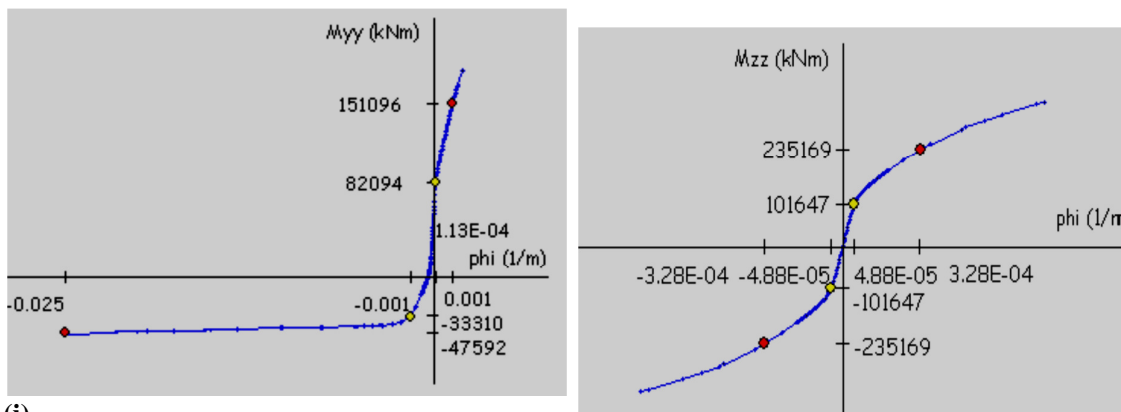
Η γέφυρα αποτελείται όπως φαίνεται και από το σχήμα από δύο ανισοϋψή μεσόβαθρα, τα οποία είναι συμπαγή και κυκλικά διαμέτρου $D=2.4\text{m}$.

Η σεισμική αποτίμηση της γέφυρας έγινε με τη χρήση την ανελαστικής στατικής μεθόδου, η οποία θα περιγραφεί εκτενώς παρακάτω. Η θεμελιώδης σχέση για την δυσκαμψία στην μέθοδο αυτή είναι η εξής [2]:

$$EI_{eff} = \frac{My Ls}{3 \theta y} \quad (1)$$

Η σχέση αυτή αναφέρεται στα βάρη και στην επιλογή της κατάλληλης δυσκαμψίας γι' αυτά. Γενικά ισχύει ότι ως τιμή $(EI)_{eff}$ πρέπει να χρησιμοποιείται η επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή της ακραίας διατομής ή διατομών, όπου αναμένεται σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων κατά το σεισμό σχεδιασμού: στις βάσεις των βάρων και στις περιοχές όπου συνδέονται με το φορέα του καταστρώματος, για κίνηση κατά τη διαμήκη έννοια, ή μόνον στις βάσεις των βάρων για κίνηση κατά την εγκάρσια έννοια.

Όσον αφορά τη δυσκαμψία του φορέα (προεντεταμένο σκυρόδεμα), ακολουθείται διαφορετική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, η δυσκαμψία καθορίζεται μέσω του διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής, που λαμβάνει υπ' όψιν και την προμήκυνση των τενόντων. Σε ασύμμετρες διατομές, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση τα κιβώτια καταστρώματος χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δυσκαμψιών (θετικής και αρνητικής φοράς). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διατομές αυτές για κάμψη περί τον οριζόντιο άξονα έχουν ροπή ρηγμάτωσης και δυσκαμψία εξαρτώμενη απ' την φορά. Παρακάτω παρουσιάζονται 2 διαγράμματα που δείχνουν τις 2 περιπτώσεις προέντασης της διατομής ως προς οριζόντιο και ως προς κατακόρυφο άξονα. Παρατηρούμε λοιπόν το λόγο για τον οποίο είναι σημαντικό κυρίως στην α' περίπτωση να υπολογίσουμε τον μέσο όρο των δυσκαμψιών, καθώς φαίνεται καθαρά ότι οι τένοντες δε δρουν με τον ίδιο τρόπο σε θετική και σε αρνητική ροπή.



(i)

(ii)

Διάγραμμα 1: i) Προένταση ως προς οριζόντιο άξονα, ii)

Προένταση ως προς κατακόρυφο άξονα [1]

Στη δική μας περίπτωση οι δυσκαμψίες του φορέα ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία [1] και εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

Για την εκλογή της ποσότητας του μανδύα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των βάρων στηριχθήκαμε στις θεμελιώδεις σχέσεις του Ευρωκώδικα ελέγχοντας τη στροφή θ_u για την επιλογή του οπλισμού ενίσχυσης σε περίσφιγξη και αντίστοιχα την τέμνουσα V για την επιλογή του οπλισμού ενίσχυσης σε διάτμηση.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον οπλισμό περίσφιγξης στη βάση της σχέση του Ευρωκώδικα [3]:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3)^{\nu} \left[\frac{\max(0.01\omega')}{\max(0.01\omega)} \right]^{0.225} \left(\frac{Lv}{h} \right)^{0.35} 25^{(a\rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} (1.25^{100\rho_d}) \quad (2)$$

Αλλά για κυκλικές διατομές[4]:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} [(\theta y + \varphi u - \varphi y)Lpl \left(1 - \frac{0.5Lpl}{Ls}\right) + asl \Delta\theta u, slip] \quad (3)$$

Όπου $\Delta\theta u, slip = 10 dbI (\varphi u + \varphi y)/2$

$$\varphi u = \min\left(\frac{\varepsilon_{cu,c}}{\xi_{cu,c} dc}, \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su})d}\right)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 0.0035 + \left(\frac{10}{Dc}\right)^2 + 0.2 \frac{\alpha \rho_w f_{yw}}{f_{cc}}$$

$$\alpha = \left(1 - \frac{sh}{2Dc}\right)^2$$

$$Lpl = 0.07Ls + 0.65D$$

Όσον αφορά τον οπλισμό διάτμησης και πιο συγκεκριμένα την τέμνουσα αντοχής, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις του Ευρωκώδικα [3] :

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})\right) \cdot \left[0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{Lv}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \quad (4)$$

Όπου γ_{el} ίσο με 1,15 για πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα

μ_{Δ}^{pl} = λόγος πλαστικής γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία προς Δ

ρ_{tot} = γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού

h = ύψος διατομής (=διάμετρος D)

A_c = εμβαδόν πυρήνα της διατομής ($\pi D^2/4$)

$V_w = \frac{\pi A_{sw}}{2 s_h} f_{yw} (D - 2c)$ η συμβολή εγκάρσιου οπλισμού

c = επικάλυψη σκυροδέματος

2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ

Για τη σεισμική αποτίμηση της γέφυρας, όπως προαναφέρθηκε, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανελαστικής στατικής ανάλυσης, γνωστή και ως push-over.

Το φάσμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτό του EC8.

Θεωρήθηκε ότι η περιοχή που βρίσκεται η γέφυρα βρίσκεται στην Κεφαλονιά επομένως ανήκει στη σεισμική ζώνη III.

Το έδαφος θεωρείται κατηγορίας C.

Χρησιμοποιήθηκε επίσης, σκυρόδεμα $f_{cm}=26$ MPa, χάλυβας $f_{ym}=386$ MPa.

Ο οπλισμός της διατομής του βάθρου ήταν 34Φ20(ο διαμήκης) και Φ8/30(ο εγκάρσιος).

Τα φορτία σχεδιασμού και οι μάζες ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία [1].

Οι τέμνουσες αντοχής σε κάθε διεύθυνση για αξονική δύναμη $N=N_{G+\psi Q}$, βρέθηκαν αντίστοιχα:

$$V_{R_{xx}}=7064.4 \text{ kN και } V_{R_{yy}}=3868.62 \text{ kN}$$

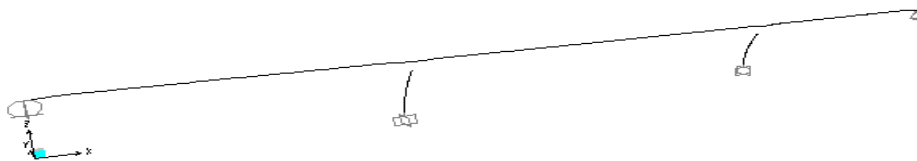
Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	III, $\alpha=0.36$
Κατηγορία σπουδαιότητας	$\Sigma 3$, $\gamma_1=1.15$
Κατηγορία εδάφους	C $T_B=0.20$, $T_C=0.60$

Πίνακας 1

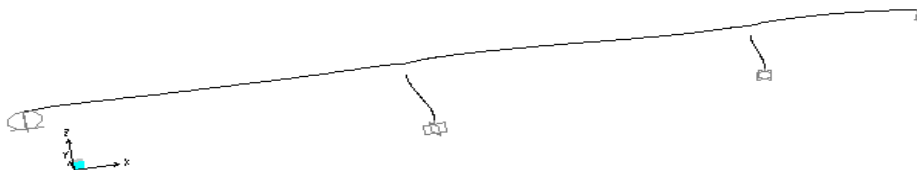
Σημαντικό βήμα για την εκτέλεση της push-over είναι ο ορισμός των hinges στα άκρα των 2 βάθρων. Τα hinges τα οποία ορίζουμε, είναι στροφικά πλαστικά ελατήρια τα οποία ενεργοποιούνται όταν διαρρεύσει η κατασκευή μας. Αμέσως μετά την ενεργοποίησή τους, η δυσκαμψία άκρου σχεδόν μηδενίζεται και έτσι δημιουργείται μια πιο ρεαλιστική εικόνα του πώς συμπεριφέρεται η κατασκευή μας (τα δύο βάθρα), καθώς μπορεί να εκτιμηθεί το μη γραμμικό διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετακίνησης κορυφής.

Τα δεδομένα για τις ιδιότητες των hinges, εισήχθησαν απλοποιητικά για αξονική δύναμη $N=N_{G+\psi Q}$.

Πριν την εκτέλεση της push-over παρουσιάζονται οι ιδιομορφές 1 και 2 της ταλάντωσης της κατασκευής από τις οποίες προέκυψε ότι η ιδιοπερίοδος στην ιδιομορφή 1 είναι $T_1=1.03$ sec και η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος στη ιδιομορφή 2 είναι $T_2=0.86$ sec.



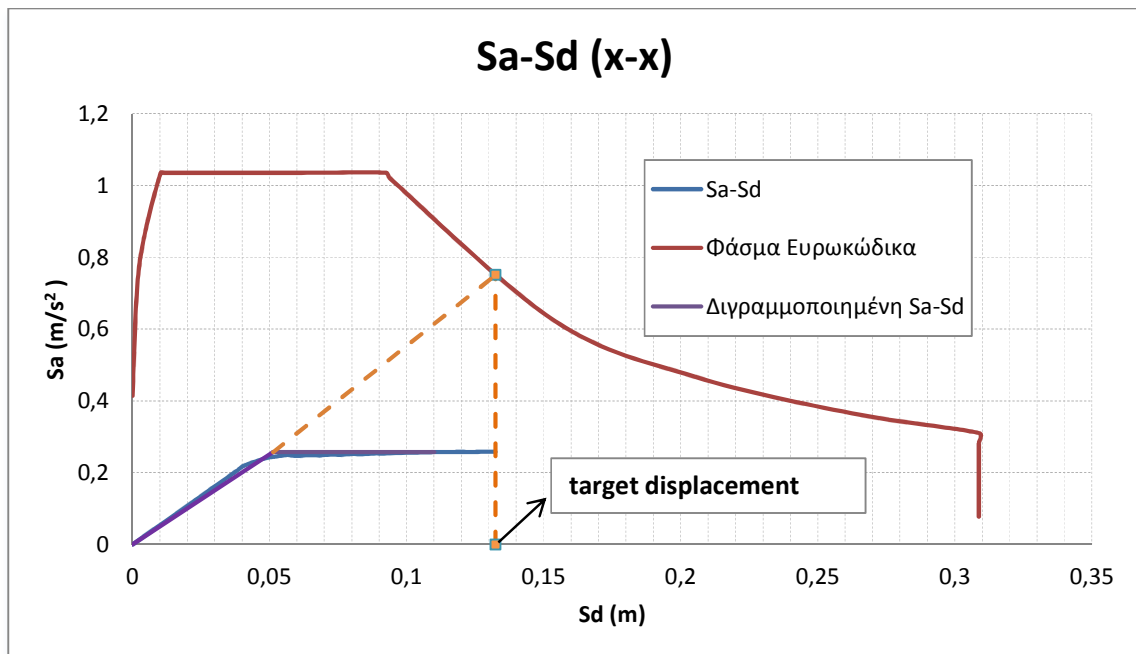
Σχήμα 1 :Ιδιομορφή 1 της ταλάντωσης



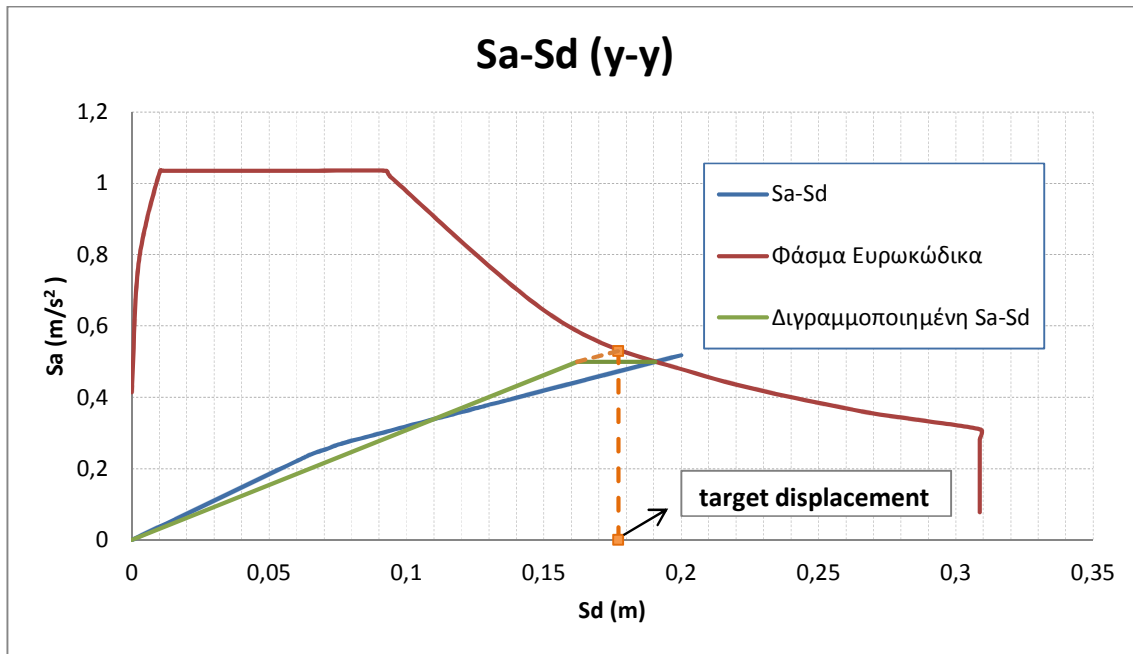
Σχήμα 2 : Ιδιομορφή 2 της ταλάντωσης

Στη συνέχεια στόχος είναι η εύρεση της απαιτούμενης σεισμικής μετακίνησης(target displacement) από το διάγραμμα Sa-Sd το οποίο είναι εξαγόμενο από το πρόγραμμα [5] μετά την εκτέλεση της push-over.

Για να βρεθεί η target displacement, θα πρέπει αρχικά να διγραμμοποιηθεί η συγκεκριμένη καμπύλη και στη συνέχεια να εισαχθεί το φάσμα του Ευρωκώδικα για την κατηγορία εδάφους και τη σεισμική επιτάχυνση που επιλέξαμε[11]. Μετά τη διγραμμοποίηση, για διάγραμμα μεγάλων ιδιοπεριόδων στοχεύουμε στο φάσμα του Ευρωκώδικα και η τετμημένη του σημείου τομής είναι η απαιτούμενη σεισμική μετακίνηση(target displacement). Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



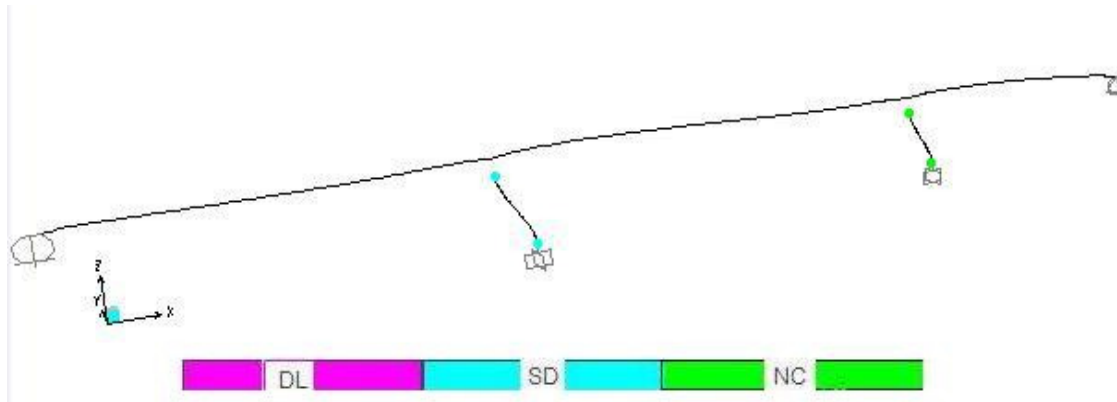
Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα Sa-Sd ως προς τη διεύθυνση x-x



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα Sa-Sd ως προς τη διεύθυνση y-y

Αφού λοιπόν βρεθεί η τιμή της, ελέγχεται σε ποιο βήμα της push-over επιτεύχθηκε η απαιτούμενη σεισμική μετακίνηση και σε τι στάθμη επιτελεσματικότητας επιτεύχθηκε έτσι ώστε να βγάλουμε συμπέρασμα αν χρειάζεται ενίσχυση ή όχι.

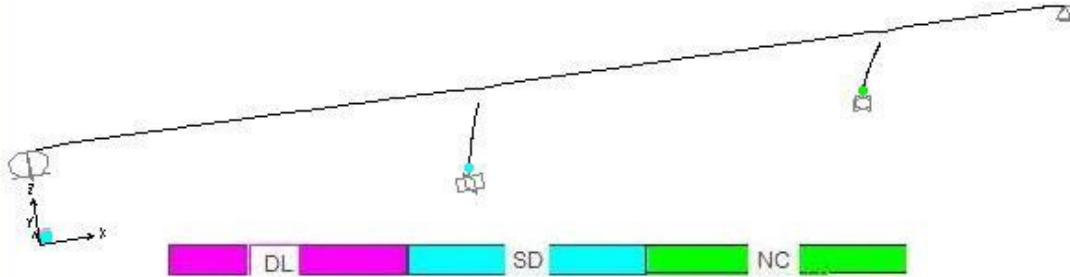
Βρέθηκε λοιπόν ότι στη διεύθυνση x-x η απαιτούμενη σεισμική μετακίνηση έχει τιμή 0.133 m και πραγματοποιείται στο βήμα 35 της ανάλυσης. Στο συγκεκριμένο βήμα παρατηρείται ότι τα κάτω άκρα των βάθρων υπερβαίνουν τη στάθμη Γ δηλαδή την οιονεί κατάρρευση γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σίγουρα τα βάθρα θα χρειαστούν ενίσχυση.



Σχήμα 3: Διεύθυνση x-x, Βήμα 35 ανάλυσης

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθούμε και για τη διεύθυνση y-y και βρίσκουμε ότι η απαιτούμενη σεισμική μετακίνηση έχει τιμή 0.178 m και πραγματοποιείται στο βήμα 55 της ανάλυσης. Στο συγκεκριμένο βήμα παρατηρείται ότι και τα 2 άκρα των βάθρων υπερβαίνουν

τη στάθμη Γ, δηλαδή την οιονεί κατάρρευση. Άρα και πάλι το συμπέρασμα είναι ότι τα βάθρα χρειάζονται ενίσχυση και ως προς αυτή τη διεύθυνση.



Σχήμα 4: Διεύθυνση y-y, Βήμα 55 ανάλυσης

Παρακάτω παρουσιάζεται επίσης το διάγραμμα V-δ(Τέμνουσα βάση-Μετακίνηση κορυφής) για τις 2 διευθύνσεις όπως αυτό προέκυψε από την ανάλυση καθώς επίσης και τα σημεία που υποδεικνύουν τις στάθμες επιτελεστικότητας του ΚΑΝ.ΕΠΕ. οι οποίες είναι οι εξής [6]:

ρ υπέρβασης σεισμ. δράσης εντός του συμβ. t ζωής	Άμεση Χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία Ζωής	Οιονεί Κατάρρευση
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2

Πίνακας 2

A. Άμεση χρήση μετά το σεισμό, η οποία στον Ευρωκώδικα 8 αναφέρεται και ως Damage Limitation(DL)

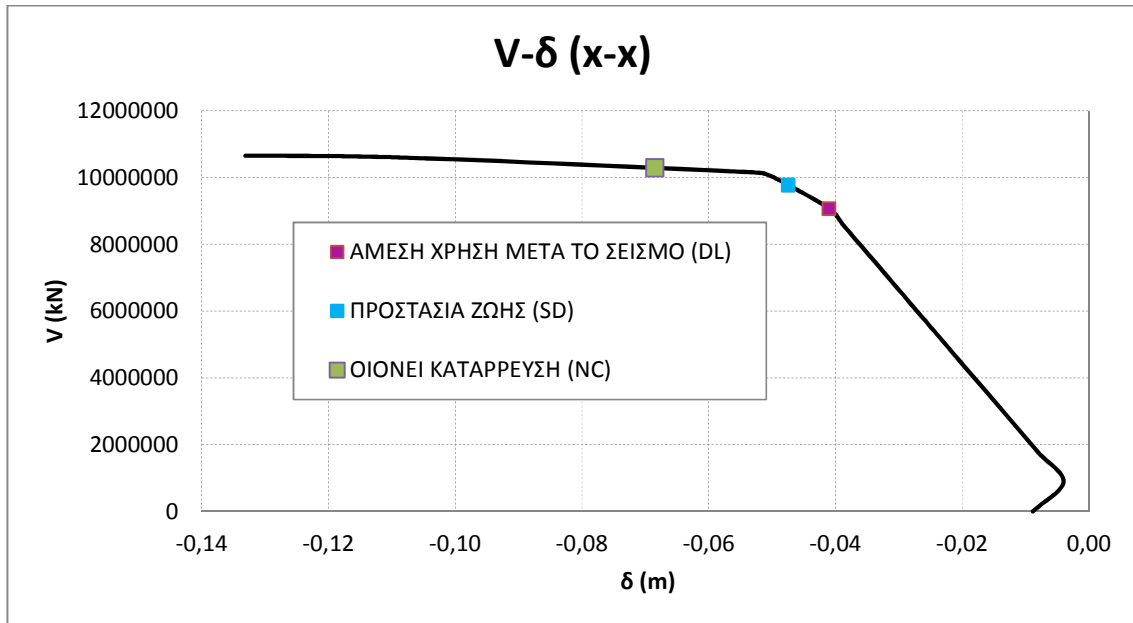
B. Προστασία ζωής, η οποία στον Ευρωκώδικα 8 αναφέρεται και ως Significant Damage(SD)

Γ. Οιονεί κατάρρευση, που στον Ευρωκώδικα 8 αναφέρεται και ως Near Collapse(NC)

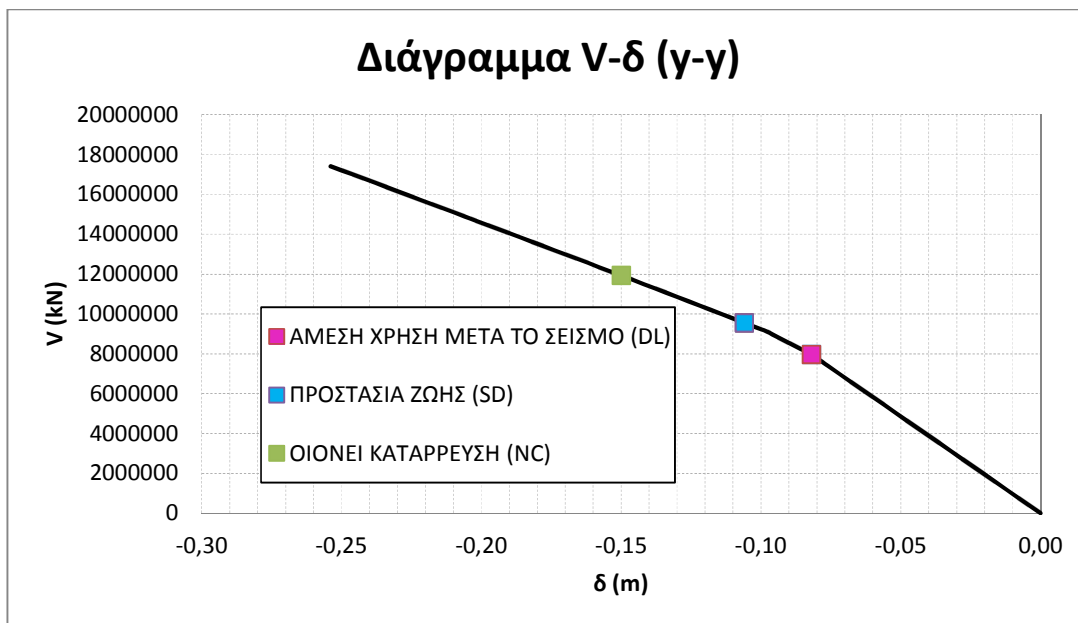
Η υιοθέτηση στόχου αποτίμησης ή ανασχεδιασμού με πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης 50% οδηγεί εν γένει σε πιο συχνές, πιο εκτεταμένες και πιο έντονες βλάβες έναντι ενός αντίστοιχου στόχου με πιθανότητα υπέρβασης της σεισμικής δράσης 10%.

Σεισμός Σχεδιασμού

1. «ενδεχόμενος», περιόδου 225 ετών (20% πιθανότητα στα 50 έτη)
2. «σπάνιος», περιόδου 475 ετών (10% πιθανότητα στα 50 έτη), όπως ισχύει στον ΕΑΚ2000
3. «εξαιρετικά σπάνιος», περιόδου 2475 ετών (2% πιθανότητα στα 50 έτη)



Διάγραμμα 3: Τέμνουσα βάσης-Μετακίνηση κορυφής ως προς τη διεύθυνση x-x



Διάγραμμα 4 : Τέμνουσα βάσης-Μετακίνηση κορυφής ως προς τη διεύθυνση y-y

Επομένως ,εκτός των άλλων, η μέθοδος αυτή μας δίνει ένα καλό συμπέρασμα όσον αφορά την απόκριση της κατασκευής μας, και συγκεκριμένα των βάθρων της γέφυρας, σε σχέση με τις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας που στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. αποτελούν το σημαντικότερο μέσο αποτίμησης και κατά συνέπεια ενίσχυσης καθώς είναι αυτές που καθορίζουν το επίπεδο βλαβών της κατασκευής που κάθε φορά εξετάζουμε.

Μετά την εκτέλεση της push-over η τέμνουσα αντοχής V_R και στις 2 διευθύνσεις μειώνεται λόγω της αύξησης του δείκτη πλαστιμότητας μ_0 και λόγω της μείωσης του λόγου

L_s/D . Επομένως οι αρχικές τιμές των V_{Rxx} και V_{Ryy} μειώνονται και πλέον τις μειωμένες αυτές τιμές χρησιμοποιούμε για να συγκρίνουμε με τις τέμνουσες της ανάλυσης V_{sd} .

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

Κατά τη διεύθυνση x-x η στοχευόμενη μετακίνηση βρέθηκε 0.153 m και πραγματοποιήθηκε στο Βήμα 35 της ανάλυσης. Στο βήμα αυτό υπερβαίνουμε την οιονεί κατάρρευση(Στάθμη Γ) επομένως χρειάζεται ενίσχυση.

Επίσης, κατά τη διεύθυνση αυτή βρέθηκε ότι η τέμνουσα σχεδιασμού μετά την εκτέλεση της push-over ήταν $V_{sd}=6428.80$ kN για το αριστερό βάθρο και $V_{sd}=7234.90$ kN για το δεξί βάθρο. Επομένως παρατηρείται ότι στο δεξί βάθρο η τέμνουσα ξεπέρασε την αρχική αντοχή πριν την εκτέλεση της push-over. Δηλαδή, $V_{sd}=7234.90$ kN > V_R .Επομένως υπάρχει απαίτηση ενίσχυσης και ως προς τέμνουσα.

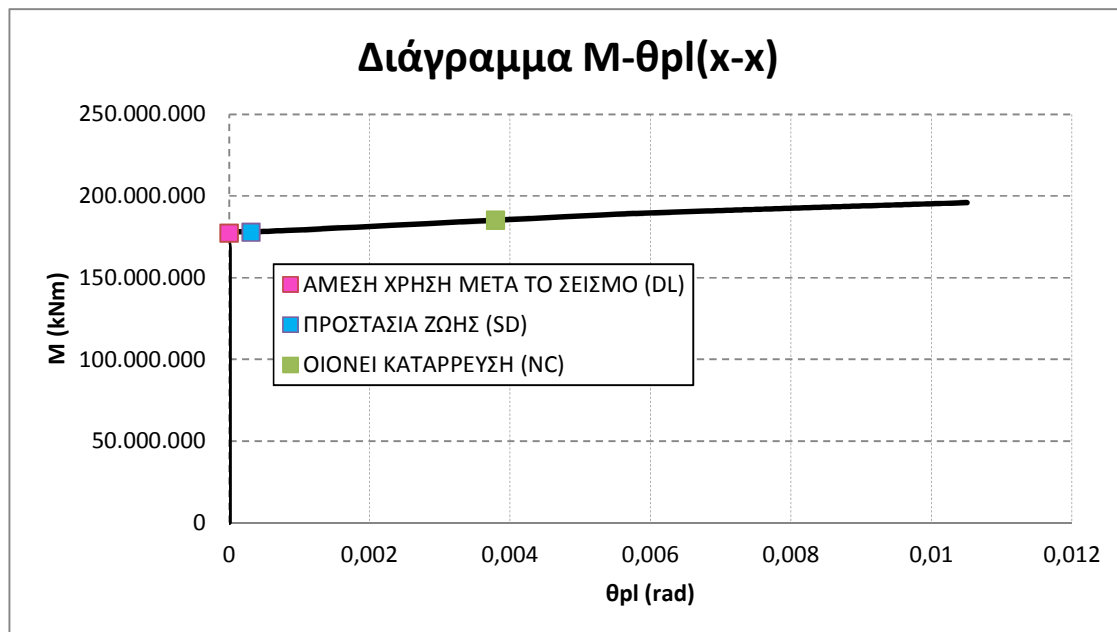
Κατά τη διεύθυνση y-y η στοχευόμενη μετακίνηση βρέθηκε 0.233 m και πραγματοποιήθηκε στο Βήμα 55 της ανάλυσης. Στο βήμα αυτό υπερβαίνουμε και πάλι την οιονεί κατάρρευση(Στάθμη Γ) επομένως χρειάζεται ενίσχυση.

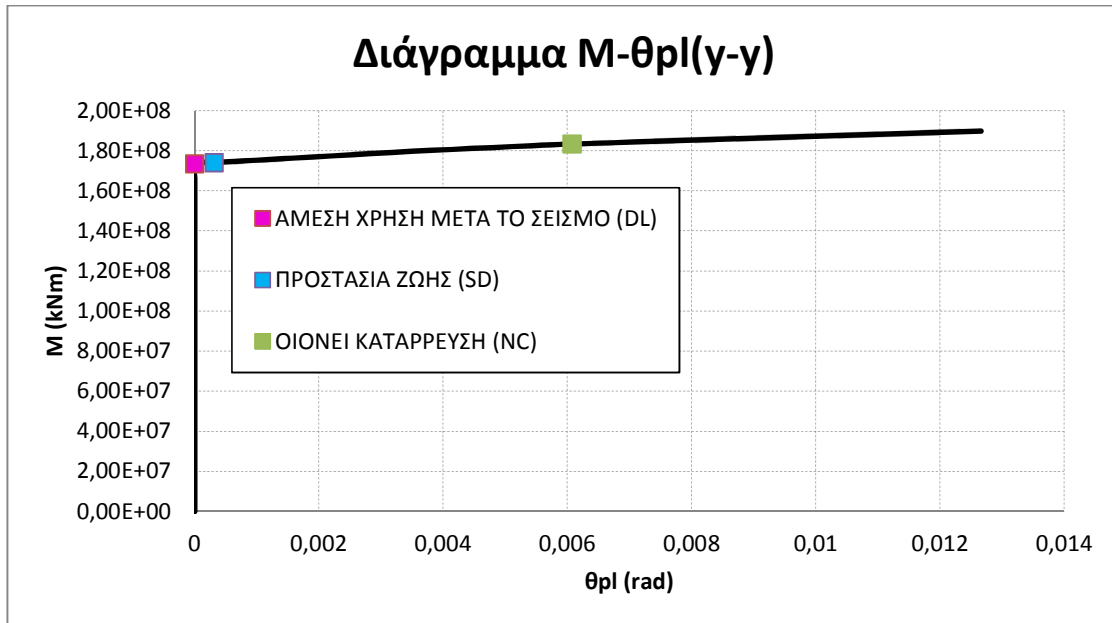
Επίσης, κατά τη διεύθυνση αυτή βρέθηκε ότι η τέμνουσα σχεδιασμού μετά την εκτέλεση της push-over ήταν $V_{sd}=1347.9$ kN για το αριστερό βάθρο και $V_{sd}=2697.9$ kN για το δεξί βάθρο. Επομένως παρατηρώ ότι κατά τη διεύθυνση αυτή δεν απαιτείται ενίσχυση ως προς τέμνουσα καθώς $V_{sd}=2697.9$ kN < V_R .

3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΒΑΘΡΩΝ

Για την επιλογή της ποσότητας του μανδύα CFRP που θα καλύψει τις απαιτήσεις που προέκυψαν από την αποτίμηση ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά μέσω του προγράμματος, βρίσκουμε το διάγραμμα ροπών-στροφών ($M-\theta_{pl}$) στο οποίο αναφέρονται και οι στάθμες επιτελεστικότητας. Έχουμε ,λοιπόν τα εξής διαγράμματα:





Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα ροπών-στροφών ως προς τη διεύθυνση γ-γ

Από τα διαγράμματα αυτά, λοιπόν, βρίσκουμε τα θ_{pl} που χρειαζόμαστε και με τους παρακάτω τύπους θα βρούμε τις καμπυλότητες ϕ που είναι απαραίτητες για να βρούμε τις στρώσεις του CFRP.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον οπλισμό κάμψης στηριχθήκαμε στη σχέση του Ευρωκώδικα [3] :

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3)^{\nu} \left[\frac{\max(0.01\omega')}{\max(0.01\omega)} \right]^{0.225} \left(\frac{Lv}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha_{psx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100\rho d}) \quad (2)$$

Επειδή, όμως πρόκειται για κυκλική διατομή, και ο Ευρωκώδικας δεν εμπεριέχει σχέσεις για τέτοιου είδους διατομές θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις που αναφέρονται σε κυκλική διατομή [4]:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} [(\theta y + \phi u - \phi y)Lpl \left(1 - \frac{0.5Lpl}{Ls} \right) + \alpha sl \Delta\theta u, slip] \quad (3)$$

Όπου $\Delta\theta u, slip = 10 dbl (\phi u + \phi y)/2$

$$\phi u = \min\left(\frac{\epsilon_{cu,c}}{\xi_{cu,c} d_c}, \frac{\epsilon_{su}}{(1-\xi_{su})d} \right)$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0.0035 + \left(\frac{10}{Dc} \right)^2 + 0.2 \frac{\alpha \rho_w f_{yw}}{f_{cc}}$$

$$\alpha = \left(1 - \frac{sh}{2Dc} \right)^2$$

$$Lpl = 0.07Ls + 0.65D$$

Από τις σχέσεις αυτές και με δεδομένο από το διάγραμμα το θ_{pl} και το θy του βάρους το οποίο επίσης θεωρείται δεδομένο από το πρόγραμμα, καταλήγουμε μέσω των σχέσεων αυτών στα παρακάτω ϕ :

Βάθρο Διεύθυνση	Αριστερό Βάθρο	Δεξί Βάθρο
x-x	$\phi=0.01451$	$\phi=0.01502$
y-y	$\phi=0.01886$	$\phi=0.02176$

Πίνακας 3

Όσον αφορά τώρα την απαίτηση σε τέμνουσα στηριζόμαστε στη σχέση του Ευρωκώδικα [3]:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})\right) \cdot \left[0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \quad (4)$$

Όπου γ_{el} ίσο με 1,15 για πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα

μ_{θ}^{pl} = λόγος πλαστικής γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία προς θ

ρ_{tot} = γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού

h = ύψος διατομής (=διάμετρος D)

A_c = εμβαδόν πυρήνα της διατομής ($\pi D^2/4$)

$V_w = \frac{\pi A_{sw}}{2 s_h} f_{yw} (D - 2c)$ η συμβολή εγκάρσιου οπλισμού

c = επικάλυψη σκυροδέματος

Από τον τύπο αυτό αλλά και από το ίδιο το πρόγραμμα, βρίσκουμε ότι η μέγιστη τελική τέμνουσα μετά την εκτέλεση της push-over είναι $V_{sd}=7234.90$ kN στη διεύθυνση x-x και $V_{sd}=2697.9$ kN στη διεύθυνση y-y. Όπως αναφέρθηκε και στο κομμάτι της αποτίμησης έχοντας σαν δεδομένο τις τέμνουσες αντοχής μετά την εκτέλεση της push-over, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι κατά τη διεύθυνση x-x θα υπολογίσουμε οπλισμό ενίσχυσης σε τέμνουσα ($V_{sd}=7234.90$ kN > V_R) ενώ κατά τη διεύθυνση y-y δεν απαιτείται τέτοιου είδους οπλισμός ($V_{sd}=2697.9$ kN < V_R).

Αφού λοιπόν υπολογίστηκαν οι καμπυλότητες ϕ και οι τέμνουσες V_{sd} πριν την ενίσχυση με μανδύα CFRP, πρέπει να βρούμε και τις αντίστοιχες καμπυλότητες ϕ και τέμνουσες V_R για κάθε βάθρο μετά την επιλογή κατάλληλης ποσότητας οπλισμού ενίσχυσης.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις [3]:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})\right) \cdot \left[0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w + V_{Rd,f} \right] \right] \quad (5)$$

$$V_{Rd,f} = 0,9d \cdot f_{fd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \left(\frac{w_f}{s_f}\right)^2 \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \sin\beta \quad (6)$$

Όπου d είναι το ενεργό πλάτος, θ η γωνία κλίσης γονάτου, $f_{fda,e}$ η ενεργή δύναμη αποκόλλησης για στοιχείο πλήρως τυλιγμένο με FRP, t_f το πάχος της στρώσης του μανδύα, β η γωνία μεταξύ της ισχυρής διεύθυνσης της στρώσης του μανδύα και του άξονα του στοιχείου, $w_f = \min(0,9d, h_w) \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ (πλάτος στρώσης μανδύα) και s_f το διάκενο των στρώσεων FRP μετρούμενο κάθετα στην ισχυρή διεύθυνση του μανδύα. Καθώς επίσης και τον τύπο[3]:

$$f_1 = 0,4 I_x^2 \frac{f_c \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}} \quad (7)$$

Όπου, f_c η αντοχή του σκυροδέματος, ε_{cu} η παραμόρφωση θραύσης σκυροδέματος και ε_{ju} η θεωρούμενη παραμόρφωση θραύσης του μανδύα FRP.

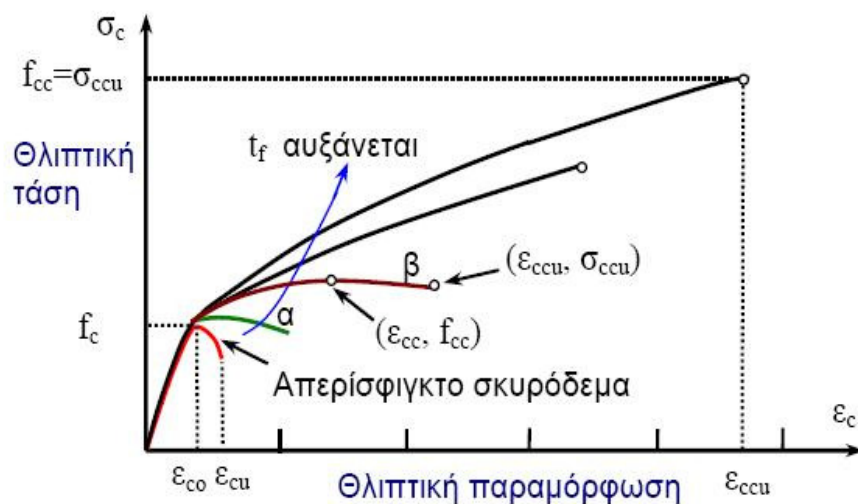
Για την ειδική περίπτωση της κυκλικής διατομής που εξετάζουμε εμείς, η ένταση περισφιγξης που εφαρμόζει ο μανδύας FRP στη διατομή (f_1) είναι $f_1 = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{ju}$ όπου E_f το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα FRP και $\rho_f = 4 t_f / D$ [3].

Η μέγιστη τάση του FRP υπολογίζεται από τη σχέση[3]:

$$f_{f,e} = \min(f_{u,f}, e_{u,f} E_f) \left[1 - 0,7 \min(f_{u,f}, e_{u,f} E_f) \frac{\rho_f}{f_c} \right] \quad (8)$$

με $f_{u,f}$ και E_f να είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του FRP και $e_{u,f}$ οριακή παραμόρφωση ίση με 0,015 για CFRP (carbon-fibre-reinforced polymer).

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της θλιπτικής τάσης και της παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα σύνθετων υλικών. Όπως διακρίνουμε και από το διάγραμμα 7 έχουμε δεδομένο το διάγραμμα θλιπτικής τάσης-παραμόρφωσης για το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, και στόχος μας είναι να βρούμε την καμπύλη που αντιστοιχεί στο περισφιγμένο υλικό και το οποίο στη συνέχεια θα μας οδηγήσει στην εύρεση της τελικής καμπυλότητας φ μετά την τοποθέτηση του CFRP.



Διάγραμμα 7 : Καμπύλες θλιπτικής τάσης- παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά[7]

Χρησιμοποιούμε, λοιπόν, τις παρακάτω σχέσεις οι οποίες θα μας οδηγήσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα και οι οποίες είναι [7]:

$$f_{ccd} = E_{sec,ud} \varepsilon_{ccu} \geq f_{cd} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)] \left[\frac{E_{sec,Md}(E_c - E_{sec,ud})}{E_{sec,ud}(E_c - E_{sec,Md})} \right]^{1 - \frac{E_{sec,Md}}{E_c}} \quad (10)$$

$$E_{sec,ud} = \frac{E_c}{1 + 2 \left(\frac{E_c}{f_{cd}} - \frac{1}{0.002} \right) \frac{f_{fde}}{E_f}} \quad (11)$$

$$E_{sec,Md} = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} f_{cd}}{0.002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)]} \quad (12)$$

$$\alpha_{1d} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}} - 2 \frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}}} - 1.254 \quad (13)$$

$$\alpha_{2d} = 1 - \left[0.6 \left(\frac{d}{b} \right)^2 - 1.4 \frac{d}{b} + 0.8 \right] \sqrt{\frac{\sigma_{lud,b}}{f_{cd}}} \quad (14)$$

$$\sigma_{lud,b} = a_f \frac{2t_f}{d} f_{fde} \quad (15)$$

Στις παραπάνω σχέσεις E_c = αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

$E_c = [1.05 * 9500 * (f_{ck} + 8)]^{1/3}$ και a_f = συντελεστής αποδοτικότητας του μανδύα, που εξαρτάται: (α) από τη γεωμετρία της διατομής (λόγος πλευρών, ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες), (β) από το βαθμό περιτύλιξης (κάλυψης) του σκυροδέματος και (γ) από τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους. Συγκεκριμένα, είναι [7]:

$$a_f = a_n a_s a_a \leq 1 \quad (16)$$

$$\text{Συντελεστής διατομής: } \alpha_n = \frac{A_e}{A_g} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \left(1 - \frac{A_s}{A_g}\right)} \approx 1 - \frac{(b-2R)^2 + (d-2R)^2}{3bd}$$

$$\text{Συντελεστής κάλυψης: } \alpha_s = \frac{\left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2}{1 - \frac{A_s}{A_g}} \approx \left(1 - \frac{s'_f}{2d}\right)^2$$

$$\text{Συντελεστής διεύθυνσης: } \alpha_a = \frac{1}{1 + (\tan \beta_f)^2}$$

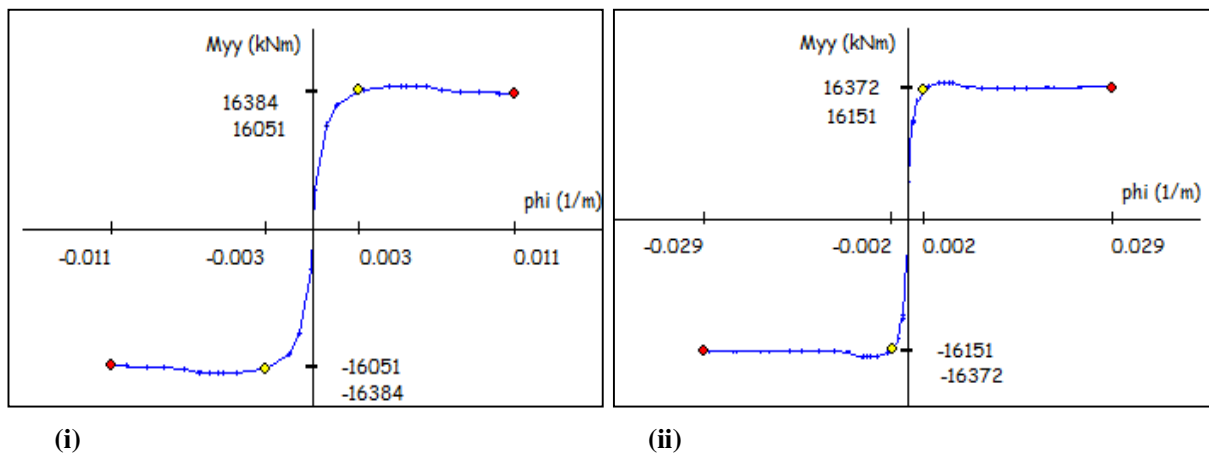
όπου A_g = εμβαδόν διατομής, A_s = εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού, s'_f = καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξης, d = μήκος μικρότερης πλευράς (ή διάμετρος, στην περίπτωση κυκλικής διατομής), β_f = γωνία ινών ως προς την κάθετο στον άξονα του μέλους. Για κυκλικές διατομές $\alpha_n = 1$, για πλήρη κάλυψη του στοιχείου $\alpha_s = 1$ και για οριζόντια διάταξη των ινών $\alpha_a = 1$, το οποίο ισχύει και στη δική μας περίπτωση.

Τελικά, επιλέγουμε οπλισμό CFRP και στα 2 βάθρα καθ' όλο το ύψος τους με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

Στρώσεις	1
t (mm)	0.177
E(MPa)	240000
fu (MPa)	3500

Πίνακας 4

Φτάνουμε στο συμπέρασμα, λοιπόν, ότι το νέο διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων($M-\phi$), το οποίο προήλθε από τη νέα σχέση $\sigma-\epsilon$ για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα CFRP μετά την ενίσχυση, εμφανίζει σαν καμπυλότητα $\phi=0.029$ (Διάγραμμα 8(ii)). Επομένως η καμπυλότητα αυτή καλύπτει τις απαιτήσεις που αρχικά είχαν υπολογιστεί και στα 2 βάρθρα και τις οποίες αναφέραμε στον Πίνακα 4.



Διάγραμμα 8 : Ροπή M_{yy} -καμπυλότητα ϕ (i) πριν την ενίσχυση, (ii) μετά την ενίσχυση [9]

Όσον αφορά τις τέμνουσες, μετά την ενίσχυση με CFRP το αποτέλεσμα έχει ως εξής:

Στη διεύθυνση x-x η τέμνουσα παίρνει την τιμή $V_R=7505,3 > V_{sd}$.

Στη διεύθυνση y-y η τέμνουσα παίρνει την τιμή $V_R=4289,8 > V_{sd}$. Σ' αυτή τη διεύθυνση έγινε τυπικά ο έλεγχος αν και είχαμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι δεν χρειάζεται ενίσχυση σε τέμνουσα.

Τελικά, συμπεραίνουμε πως και ως προς τη στροφή χορδής αλλά και ως προς διάτμηση, η ενίσχυση που επιλέξαμε καλύπτει τις απαιτήσεις μας.

4. ΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ^[8]

Ο λόγος που επιλέξαμε να τοποθετήσουμε CFRP ως ενίσχυση στα βάρθρα της γέφυρας που μελετήσαμε είναι η συμβολή της περισφιγξης του σκυροδέματος στις κατασκευές. Ειδικότερα, με τη συμβολή της περισφιγξης στο σκυρόδεμα, αξιοποιείται η δράση της τριαξονικής θλίψης. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται ιδιαίτερα σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας του στοιχείου ενώ συγχρόνως αυξάνεται και η θλιπτική του αντοχή. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αξονική καταπόνηση υποστηλωμάτων, το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας σύνθετων υλικών που το περιβάλλει να ενεργοποιείται (μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες), επιβάλλοντας έτσι

εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του μέλους μέχρις ότου αστοχήσει. Οι τάσεις περισφιγξης έχουν σαν αποτέλεσμα :

1. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας (δηλαδή της οριακής παραμόρφωσης) του σκυροδέματος.
2. Αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
3. Βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
4. Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων.

Αυτός, λοιπόν, είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η εφαρμογή της τεχνικής αυτής εξαπλώνεται ραγδαία στην πράξη.

5. ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ^[10]

Η πιο αποτελεσματική τεχνική εφαρμογής μανδύων ΙΟΠ που χρησιμοποιείται σε σεισμικές ενισχύσεις κατασκευών είναι το «τύλιγμα» του μανδύα (wrap method) γύρω από το υποστύλωμα που χρειάζεται ενίσχυση. Αποτελείται από στρώσεις μανδύα ΙΟΠ που έχουν προηγουμένως εμποτισθεί με ειδική ρητίνη. Οι ίνες της κάθε στρώσης έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν σε κάθε διεύθυνση, αλλά και έμμεσα σε πολλαπλές διευθύνσεις αλλάζοντας τον προσανατολισμό της κάθε στρώσης ώστε να προστατεύεται το υποστύλωμα από ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση. Αναλυτικότερα, οι ίνες της πρώτης στρώσης του μανδύα ΙΟΠ είναι προσανατολισμένες σε γωνία 0 μοιρών, στη δεύτερη στρώση σε γωνία 60 μοιρών και στην τρίτη σε γωνία 120 μοιρών. Το μοτίβο 0/60/120 επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο πάχος t του μανδύα, όπως αυτό υπολογίστηκε από την ανάλυση.

Στην περίπτωση μας, τα βάθρα ενισχύθηκαν καθ' όλο το ύψος τους με μία στρώση, ώστε να αποφευχθεί η μετατόπιση της έντασης σε μη-ενισχυμένες περιοχές. Σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι άλλων είναι τα εξής δύο: 1) λόγω της περιμετρικής εφαρμογής του μανδύα δεν υπάρχουν σημεία στα οποία μπορεί να γίνει αποκόλληση λόγω σεισμού, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των μεταλλικών ελασμάτων και 2) η ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής της.

Όσον αφορά τα βάθρα γεφυρών, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια στις ΗΠΑ και στη συνέχεια στον υπόλοιπο κόσμο μια αυτοματοποιημένη και γρήγορη τεχνική, τηρώντας ταυτόχρονα τα θεσμοθετημένα ποιοτικά στάνταρντς. Συγκεκριμένα, η ενίσχυση σε υποστυλώματα/βάθρα γεφυρών με αυτή τη μέθοδο γίνεται σε τρία βήματα:

- 1) Προετοιμασία βάθρου: Καθαρίζονται καταρχήν τα βάθρα στα σημεία που θα εφαρμοσθεί ο μανδύας ΙΟΠ από τη σκόνη και τυχόν άλλους ρύπους. Στη συνέχεια, εξομαλύνεται όλη η επιφάνεια καθώς είναι σημαντικό να μην υπάρχουν εξογκώματα και κοιλότητες, με αποτέλεσμα την καλή εφαρμογή του μανδύα.
- 2) Τοποθέτηση μανδύα ΙΟΠ: Περιλαμβάνει την εγκατάσταση και τον προγραμματισμό του ειδικού μηχανήματος και την επικόλληση του FRP. Αποτελείται από μια βάση που εγκαθίσταται περιμετρικά του βάθρου και μία κεφαλή, η οποία στηρίζεται πάνω σ' αυτή και μετακινείται καθ' ύψος και γύρω από το βάθρο τυλίγοντας το μανδύα μέχρι να επιτευχθεί το κατάλληλο πάχος t , όπως υπολογίσαμε από την ανάλυση.

- 3) Αποτίμηση: Χρησιμοποιώντας θερμικές μεθόδους και κυκλικά πάνελ που περιβάλλουν το βάθρο μετράται το πάχος του FRP, σε όποιο σημείο θελήσουμε, ώστε να εξασφαλισθεί η ποιοτική κατασκευή.



Η μέθοδος αυτή (Robo-Warper/ US Patent) είναι παράδειγμα ποιότητας στη σεισμική ενίσχυση κατασκευών, καθώς εξαλείφεται η πιθανότητα λάθους από ανθρώπινο παράγοντα αλλά και ταχύτητας. Ενδεικτικά, μπορούμε να ενισχύσουμε δύο βάθρα ύψους 7 μέτρων μόνο σε μία ημέρα (εγκατάσταση εξοπλισμού, επικόλληση μανδύα, αποσυναρμολόγηση και απομάκρυνση εξοπλισμού από το εργοτάξιο.) έναντι περίπου 3 ημερών που θα χρειαζόμασταν αν επιλέγαμε ενίσχυση με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος. Αποδεικνύεται έτσι, πόσο γρήγορη, αποτελεσματική και οικονομική μπορεί να είναι η ενίσχυση με FRP.

Εικόνα 2: Ενίσχυση με Robo-Warper

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βασιλείος Γ. Μπαρδάκης, “Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών σκυροδέματος με βάση τις μετακινήσεις”, Διαδακτορική Διατριβή, Πάτρα 2007
- [2] European Committee for Standardisation (CEN), European (draft) Standard EN 1998-3: Eurocode 8 design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings: CEN; 2001
- [3] The European Standard EN 1998-3:2005: Eurocode 8 design of structures for earthquake resistance-Part 3: assessment and retrofitting of buildings.
- [4] Διονύσιος Ε. Μπισκίνης, “Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος, με ή χωρίς ενίσχυση”, Διαδακτορική Διατριβή, Πάτρα 2007
- [5] SAP 2000 Version 14.2.0
- [6] Ο.Α.Σ.Π., Ομάδα Μελέτης για τη σύνταξη Κανονισμού Επεμβάσεων σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, Ομάδα εναρμόνισης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με τους Ευρωκώδικες, “Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), Τελικό Εναρμονισμένο Κείμενο”
- [7] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Ενισχύσεις κατασκευών σκυροδέματος και τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά, Κεφάλαιο 6, “Περίσφιγξη σκυροδέματος”
- [8] Στέφανος Η. Δρίτσος, “Ενισχύσεις- Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος”, Πάτρα 2011
- [9] ANSRuop , module M-φ
- [10] Poveromo Scott, “The Use of Fiber Reinforced Polymer Composites to Retrofit Reinforced Concrete Bridge Columns”, 2003
- [11] Γεώργιος Παναγόπουλος, Ανδρέας Ι. Κάππος, “Διγραμμική προσέγγιση διαγραμμάτων μεγεθών δυνάμεων -παραμορφώσεων”, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος