



Σεισμική Συμπεριφορά Κυκλικών Βάθρων Γεφυρών Κατασκευασμένων με Σωλήνες Ινοπλισμένων Πολυμερών Πληρωμένους με Σκυρόδεμα

Κωνσταντίνος Γ. Μεγαλοοικονόμου¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σωλήνας Ινοπλισμένου Πολυμερούς (ΙΟΠ) μπορεί να λειτουργήσει ως ελαφρύς μόνιμος ξυλότυπος σε πασσάλους και βάθρα γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ). Έτσι, εξαλείφει τον χρόνο και το κόστος σε σχέση με τον παραδοσιακό ξυλότυπο και την αφαίρεσή του. Επιπρόσθετα, λειτουργεί ως προστατευτικός μανδύας με διάρκεια ζωής για τον πυρήνα σκυροδέματος σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ο καταστατικός νόμος υλικού που προτάθηκε από τους Megalooikonomou et al. (2012) [1] προστέθηκε στην εργαλειοθήκη του λογισμικού MATLAB γνωστή ως FEDEAS Lab [2] ως μονοαξονικός καταστατικός νόμος. Για την πιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του συγκεκριμένου μοντέλου υλικού, προσομοιώθηκαν πειράματα κυκλικών υποστυλωμάτων ΟΣ κατασκευασμένων με σωλήνα ΙΟΠ υπό ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση και ταυτόχρονο θλιπτικό αξονικό φορτίο. Συγκεκριμένα, όλα τα δοκίμια πρόβολοι προσομοιώθηκαν με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού/υποστυλώματος με «ίνες», όπου το περισφιγμένο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε με τη χρήση του προαναφερόμενου καταστατικού νόμου. Σύγκριση μεταξύ της αριθμητικής και πειραματικής υστερητικής συμπεριφοράς του υποστυλώματος είναι ενδεικτική της αποτελεσματικότητας του υιοθετημένου τρόπου προσομοίωσης.

Λέξεις κλειδιά : Σωλήνας ΙΟΠ, Βάθρο Γέφυρας, Καταστατικός Νόμος, Σκυρόδεμα

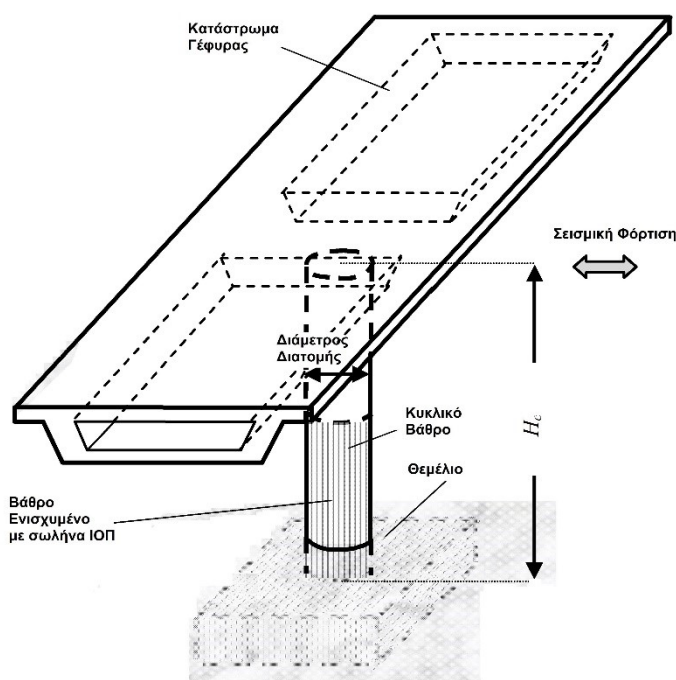
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας θα ήταν δύσκολο να φανταστούμε το σύγχρονο κόσμο στον οποίο ζούμε χωρίς τα πολυμερή. Και αυτό γιατί αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας αφού τα συναντάει κανείς από τις καθημερινές οικιακές συσκευές μέχρι τα επιστημονικά και ιατρικά όργανα. Σήμερα οι μηχανικοί έχουν στραφεί δυναμικά στα πολυμερή διότι συνειδητοποίησαν ότι

¹ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, std153412@ac.eap.gr

μπορούν να τους προσφέρουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν διαθέτουν άλλα υλικά. Τα πολυμερή προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως το γεγονός ότι είναι ελαφριά, αντέχουν στην διάβρωση ατμοσφαιρικών παραγόντων, παρουσιάζουν ευκολία στην χρήση τους κ.λπ. και παρόλο που έχουν και αυτά τα όρια τους η εκμετάλλευσή τους περιορίζεται μόνο από την εφευρετικότητα του μηχανικού. Ένας από τους παράγοντες κλειδί που κάνουν τα πολυμερή ελκυστικά σε διάφορες εφαρμογές των μηχανικών είναι η δυνατότητα ενίσχυσης τους με διάφορες ίνες. Τα σύνθετα υλικά που παράγονται με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και τελευταία στις δομικές κατασκευές, είτε σε αντικατάσταση του χάλυβα, είτε σε νέες εφαρμογές. Οι ίνες προσφέρουν ένα καλό συνδυασμό αντοχής και δυσκαμψίας. Τα αραμίδια, οι ίνες άνθρακα και οι ίνες γυαλιού είναι αυτές που συναντάει κανείς πιο συχνά στην ενίσχυση των πολυμερών. Τελευταία προκειμένου οι επιστήμονες να οδηγηθούν σε ένα υλικό που θα συνδυάζει την αντοχή με την οικονομία κατέληξαν στην χρήση συνδυασμού ινών όπως για παράδειγμα ίνες γυαλιού με ίνες άνθρακα.

Ως οικονομικά αποδοτικό και άμεσα διαθέσιμο υλικό, το σκυρόδεμα έχει κυριαρχήσει στην κατασκευαστική αγορά για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Επειδή η περίσφιγξη του σκυροδέματος βελτιώνει σημαντικά την αντοχή και την πλαστιμότητά του, ο εγκάρσιος χαλύβδινος οπλισμός χρησιμοποιείται συνήθως σε συμβατικά υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ως εναλλακτική λύση στον χάλυβα, το ινοπλισμένο πολυμερές (ΙΟΠ) έχει εισαχθεί στην κατασκευαστική βιομηχανία, απλώς και μόνο λόγω του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, του υψηλού λόγου δυσκαμψίας προς βάρος και των καλύτερων χαρακτηριστικών αντίστασης στη διάβρωση.



Σχ. 1 : Γέφυρα με κυκλικό βάθρο ενισχυμένο με σωλήνα ΙΟΠ.

Η μέθοδος του σωλήνα ΙΟΠ με πλήρωση σκυροδέματος έχει προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον στους ερευνητές την τελευταία δεκαετία. Ο σωλήνας ΙΟΠ μπορεί να λειτουργήσει ως ελαφρύς μόνιμος ξυλότυπος σε νέες κατασκευές υποστυλωμάτων ΟΣ σε πολυώροφα κτίρια ή σε πασσάλους και βάθρα σε εφαρμογές γεφυρών (Σχήμα 1). Ο σωλήνας εξαλείφει τον χρόνο και το κόστος σε

σχέση με τον παραδοσιακό ξυλότυπο και την αφαίρεσή του. Λειτουργεί επίσης ως προστατευτικός μανδύας με διάρκεια ζωής για τον πυρήνα σκυροδέματος σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το περίβλημα ΙΟΠ συμβάλλει στη δομική ακεραιότητα του υποστυλώματος προσφέροντας τόσο διαμήκη όσο και εγκάρσιο οπλισμό. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει την υποσχόμενη απόκριση τέτοιου τύπου υποστυλωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση. Ειδικότερα, έδειξαν ότι μια ελάχιστη ποσότητα εσωτερικού χαλύβδινου οπλισμού, ακόμη και αυτή κάτω του 1%, μπορεί να προσδώσει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά διάχυσης ενέργειας για την αντοχή σε ακραία γεγονότα [3]. Παρά τις δυνατότητές τους, όπως αποδεικνύεται από δεκαετίες πειραματικών και αναλυτικών εργασιών [4-8], υπάρχει έλλειψη μοντέλων ακριβής πρόβλεψης για την σεισμική συμπεριφορά τέτοιων υποστυλωμάτων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην έλλειψη γενικευμένων μοντέλων για την απόκριση σε τάσεις και παραμορφώσεις των σωλήνων ΙΟΠ και του περισφιγμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ, λόγω της μεγάλης ποικιλίας υλικών και διαδικασιών κατασκευής που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του σωλήνα ΙΟΠ. Εξαιτίας, της μεγάλης αγοράς και της μαζικής παραγωγής σωλήνων ΙΟΠ στη βιομηχανία σωληνώσεων, το κόστος παραγωγής τέτοιων σωλήνων δεν είναι σημαντικό, σε σύγκριση με τους άλλους τύπους προϊόντων ΙΟΠ που αναπτύσσονται κυρίως για νέες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να είναι οικονομικά αποδοτικά σε σύγκριση με τα συμβατικά υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) [9]. Το επίπεδο περίσφιξης και η απόδοση ενός σωλήνα ΙΟΠ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της ίνας, της μήτρας, της γωνίας της σπείρας και του πάχους του κελύφους. Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μοντέλου υστερητικής απόκρισης κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση αποτελεί ερευνητική πρόκληση. Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί και αξιολογηθεί διάφορα μοντέλα τάσεων-παραμορφώσεων για σκυρόδεμα με ΙΟΠ [10-15]. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται ο προτεινόμενος καταστατικός νόμος υλικού που επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση των διατμητικών παραμορφώσεων (ανεξάρτητα από τις ορθές) σε επίπεδο υλικού. Επίσης, η μέση απόκριση των δύο διαφορετικών περιοχών -πυρήνας σκυροδέματος και επικάλυψη σκυροδέματος- στη διατομή επιτρέπει την μοντελοποίηση με ένα μοναδικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων για όλη την κυκλική διατομή λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα περίσφιξης λόγω της παρουσίας τόσο του σωλήνα ΙΟΠ όσο και του χαλύβδινου οπλισμού.

2. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ΙΟΠ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟ ΟΠΛΙΣΜΟ

Τα περισσότερα καταστατικά μοντέλα της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος με σωλήνα ΙΟΠ στην βιβλιογραφία λαμβάνουν υπόψη την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας που προσδίδει ο σωλήνας ΙΟΠ αγνοώντας τον υπάρχοντα οπλισμό στην διατομή του υποστυλώματος. Ακόμα και αν ο υπάρχων οπλισμός σε μια διατομή υποστυλώματος ΟΣ δεν επαρκεί να περισφίξει τον πυρήνα της διατομής, συνεισφέρει παρόλα αυτά μαζί με τον σωλήνα ΙΟΠ στην περίσφιξη της διατομής. Για αυτό τον λόγο, ο καταστατικός νόμος που έχει προταθεί από την Διεθνή Ομοσπονδία Σκυροδέματος (*fib*) [16,17] ενισχύθηκε ώστε να λάβει υπόψη την επιρροή στην περίσφιξη του υπάρχοντος οπλισμού κατά την κατασκευή ενός υποστυλώματος ΟΣ με σωλήνα ΙΟΠ. Στην συνέχεια όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα ο καταστατικός νόμος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση πειραμάτων κυκλικών βάρων γεφυρών κατασκευασμένων με σωλήνα ΙΟΠ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

2.1 Προτεινόμενη επαναληπτική διαδικασία

Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος (αντοχή, πλαστιμότητα και διάχυση ενέργειας) ενισχύονται σημαντικά σε κατάσταση τριαξονικής καταπόνησης. Στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εγκάρσιου χαλύβδινου οπλισμού ή ακόμη και σωλήνα ΙΟΠ, έτσι ώστε, μαζί με τον διαμήκη οπλισμό, να περιορίζεται η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος. Αυτού του είδους ο (παθητικός) περιορισμός βελτιώνει τη συμπεριφορά του υλικού μετά την έναρξη της εσωτερικής ρηγμάτωσης, η οποία προκαλεί την έναρξη της διόγκωσης.

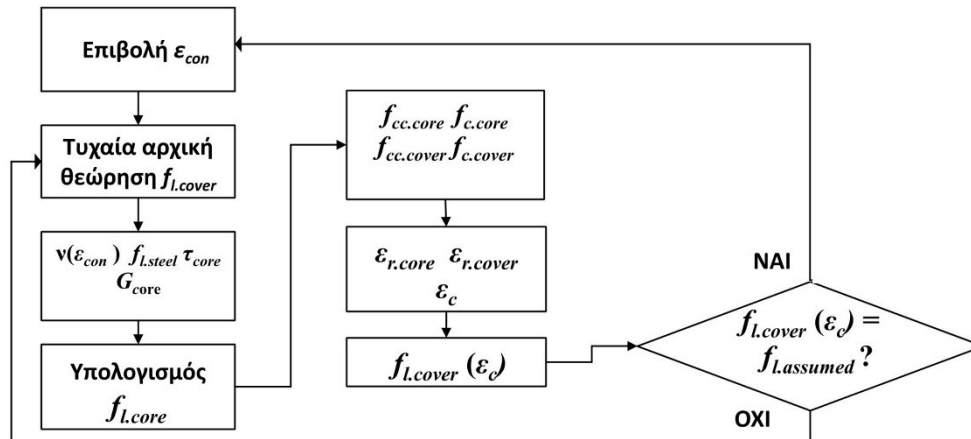
Για χαμηλές τιμές παραμόρφωσης, η κατάσταση τάσεων στον εγκάρσιο χαλύβδινο οπλισμό είναι πολύ μικρή και το σκυρόδεμα είναι ουσιαστικά απερίσφικτο. Σε αυτό το εύρος, ο χάλυβας και ο σωλήνας ΙΟΠ συμπεριφέρονται παρόμοια. Δηλαδή, η πίεση προς τα μέσα ως αντίδραση στη διόγκωση του σκυροδέματος αυξάνεται συνεχώς. Επομένως, μιλώντας με όρους μεταβλητών πιέσεων περισφιγξης που αντιστοιχούν σε αυτό το επίπεδο θλιπτικής παραμόρφωσης της διατομής και ενεργών τριαξονικών μοντέλων που ορίζουν καμπύλες θλιπτικής τάσης-παραμόρφωσης για σκυρόδεμα που υπόκειται σε σταθερή πλευρική πίεση, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που περιγράφει την εντατική κατάσταση της διατομής πρέπει να διασχίζει όλες τις καμπύλες ενεργού περισφιγξης μέχρι την καμπύλη με πλευρική πίεση ίση με εκείνη που ασκούν οι χαλύβδινοι συνδετήρες κατά τη διαρροή. Μετά διαρροή των συνδετήρων, η πλευρική πίεση εξακολουθεί να αυξάνεται μόνο λόγω του σωλήνα ΙΟΠ, ενώ η πλευρική πίεση του χάλυβα παραμένει σταθερή.

Στη διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 2, αφού επιβληθεί μια αξονική τάση στη διατομή, υποτίθεται ότι ασκείται πίεση κάποιου επιπέδου από τον σωλήνα ΙΟΠ. Στη συνέχεια, ο συντελεστής Poisson μέχρι την διαρροή των χαλύβδινων συνδετήρων και η πίεση που προέρχεται από τον εγκάρσιο οπλισμό υπολογίζεται με βάση το μοντέλο BGL (Braga et al., 2006 [18]). Δεδομένου ότι αυτή η πλευρική πίεση σύμφωνα με το μοντέλο BGL είναι η λύση του τανυστή τάσεων μέσω της τασικής συνάρτησης του Airy, η διατμητική τάση στον πυρήνα σκυροδέματος προσδιορίζεται επίσης μαζί με το μέτρο διάτμησης. Εδώ λαμβάνονται ακόμα υπόψη η συμβολή στην περισφιγξη των διαμήκων ράβδων οπλισμού και η δράση «τόξου» μεταξύ δύο γειτονικών συνδετήρων κατά μήκος του υποστυλώματος (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Σχέσεις της προτεινόμενης επαναληπτικής διαδικασίας (ορισμοί των μεταβλητών [19]).

(Brag a et al. 2006) [18]	$f_{l,steel}(\varepsilon_{con}) = k_{sl} \frac{E_{con} E_s A_{sh} \nu(\varepsilon_{con})}{R_{core} E_{con} S + E_s A_{sh} [1 - \nu(\varepsilon_{con})] \cdot [\nu(\varepsilon_{con}) \cdot \varepsilon_{con} + 1]} \cdot \varepsilon_{con}, \varepsilon_{sh} < \varepsilon_{yh}$
	$f_{l,steel}(\varepsilon_{con}) = k_{sl} 0.5 \rho_{sh} f_{yh}, \varepsilon_{shu} \geq \varepsilon_{sh} \geq \varepsilon_{yh}$
	$\rho_{sh} = \frac{4 A_{sh}}{D_{core} S}, \varepsilon_{yh} = \frac{f_{yh}}{E_s}, \varepsilon_{sh} = \varepsilon_{c,core} = \varepsilon_{r,core} = \nu(\varepsilon_{con}) \cdot \varepsilon_{con}$
	$\nu(\varepsilon_{con}) = \nu_0 \left[1 + 0.2 \left(\frac{\varepsilon_{con}}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{con}}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 + 1.55 \left(\frac{\varepsilon_{con}}{\varepsilon_{c0}} \right)^3 \right], \nu_0 = 0.2, \varepsilon_{c0} = 0.002$
	$k_{sl} = \frac{45 \xi_l^3}{45 \xi_l^3 + \beta \xi_{st}}, \xi_l = \frac{D_b}{S}, \beta = \frac{D_h}{D_b}, \xi_{st} = \frac{2 D_h}{\pi R_{core}}$
	$\tau_{core} = \frac{E_{con} E_s A_{sh} \nu(\varepsilon_{con})}{R_{core} E_{con} S + E_s A_{sh} [1 - \nu(\varepsilon_{con})] \cdot [\nu(\varepsilon_{con}) \cdot \varepsilon_{con} + 1]} \cdot \varepsilon_{con}$ $G_{core} = \frac{E_{con}}{2 \cdot [1 + \nu(\varepsilon_{con})]}$

<i>(Spoelstra and Monti 1999) [16]</i>	$f_c = \frac{f_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r}, \quad x = \frac{\varepsilon_{con}}{\varepsilon_{cc}}, \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right], \quad r = \frac{E_{con}}{E_{con} - E_{sec}} \quad E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}},$ $\frac{f_{cc}(f_l)}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.254, \quad \varepsilon_r(\varepsilon_{con}, f_l) = \frac{E_{con} \varepsilon_{con} - f_c(\varepsilon_{con}, f_l)}{2 \beta f_c(\varepsilon_{con}, f_l)},$ $\beta = \frac{5700}{\sqrt{ f_{co} }} - 500, \quad E_{con} = 5700 \cdot \sqrt{ f_{co} } (MPa)$
<i>(Megaloiki Kononou et al. 2012) [1]</i>	$\varepsilon_c = \frac{\Delta C}{C} = \frac{R_{core}(1 + \varepsilon_{r,core}) + c(1 + \varepsilon_{r,cover})}{(R_{core} + c)} - 1$ $\varepsilon_{c,core} = \varepsilon_{r,core}$ $f_{l,core} = f_{l,cover} + f_{l,steel}, \quad f_{c,av} = \frac{A_{core}}{A_{tot}} f_{c,core} + \frac{A_{cover}}{A_{tot}} f_{c,cover}$ $f_{l,cover} = 1/2 \rho_j E_j \varepsilon_c, \quad \rho_j = 4t_j/D$



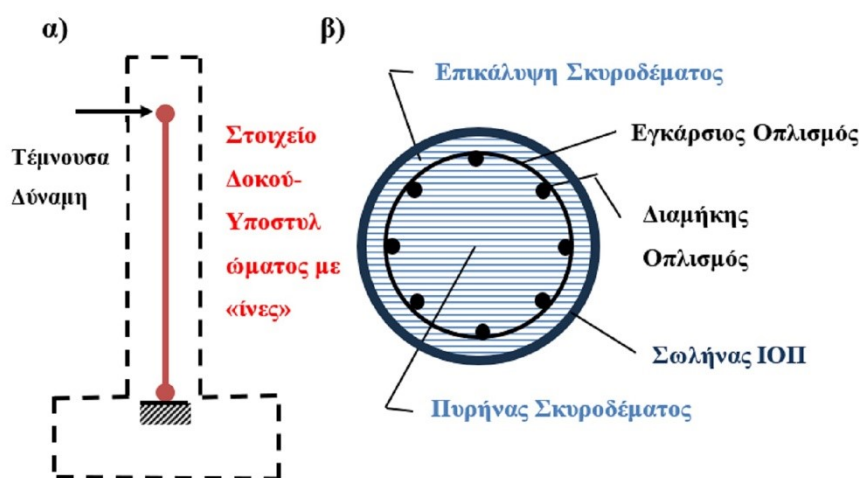
Σχ. 2 : Προτεινόμενη επαναληπτική διαδικασία.

Έτσι, η πίεση περίσφιγξης στον πυρήνα σκυροδέματος είναι το άθροισμα των πλευρικών πιέσεων που συνεισφέρουν τα δύο συστήματα περίσφιγξης (σωλήνας ΙΟΠ και χάλυβας). Η πρόταση του μοντέλου της Διεθνούς Ομοσπονδίας Σκυροδέματος (*fib*) (Spoelstra and Monti, 1999 [16,17]) πέρα από αυτό το σημείο χρησιμοποιείται βασικά για τον καθορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων που δηλώθηκαν παραπάνω, εφαρμόζοντας το μοντέλο αυτό για τις δύο διαφορετικές περιοχές του πυρήνα σκυροδέματος και της επικάλυψης. Η διαδικασία επαληθεύεται στο τελευταίο βήμα όπου η πίεση περίσφιγξης του σωλήνα ΙΟΠ ορίζεται με βάση την πλευρική παραμόρφωση (Πίνακας 1).

Η παρούσα εργασία παρέχει πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή του παραπάνω αναπτυχθέντος μοντέλου υλικού για σκυρόδεμα στην εργαλειοθήκη για MATLAB γνωστή ως FEDEAS Lab [2]. Μέχρι σήμερα, το μοντέλο δεν έχει εφελκυστική αντοχή και χρησιμοποιεί τους κανόνες φόρτισης / αποφόρτισης με βάση την εργασία των Karsan και Jirsa 1969 [20].

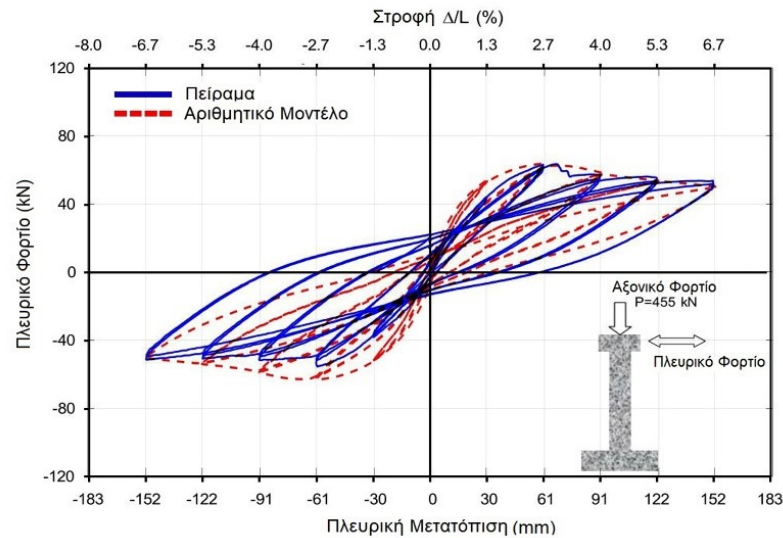
3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην πειραματική μελέτη του Zhu 2004 [9] πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μεταξύ άλλων σε ένα κυκλικό υποστυλωμα κατασκευασμένο με σωλήνα ΙΟΠ και δοκιμάστηκε επίσης και ένα κυκλικό υποστυλωμα ως δοκίμιο ελέγχου χωρίς ΙΟΠ. Τα υποστυλώματα δοκιμάστηκαν υπό σταθερό αξονικό φορτίο και ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση με βήμα μετατόπισης ως πολλαπλάσιο της μετατόπισης διαρροής του υποστυλώματος που αποτέλεσε το δοκίμιο ελέγχου. Όλα τα υποστυλώματα είχαν ύψος 2.3 m. Ο σωλήνας ΙΟΠ είχε εσωτερική διάμετρο 312 mm και πάχος 5.1 mm. Το μέτρο ελαστικότητας του σωλήνα ΙΟΠ σε εφελκυσμό ήταν 12.5 GPa. Το σκυρόδεμα είχε μετρούμενη αντοχή σε θλίψη 28 ημερών 55 MPa. Η κυκλική διατομή διαμέτρου 312 mm περιελάμβανε τέσσερις ράβδους χάλυβα διαμέτρου 16 mm και τέσσερις ράβδους διαμέτρου 19 mm αντοχής 414 MPa. Τέλος, ο εγκάρσιος χαλύβδινος οπλισμός είχε διάμετρο 13 mm με βήμα 64 mm και αντοχή 414 MPa.

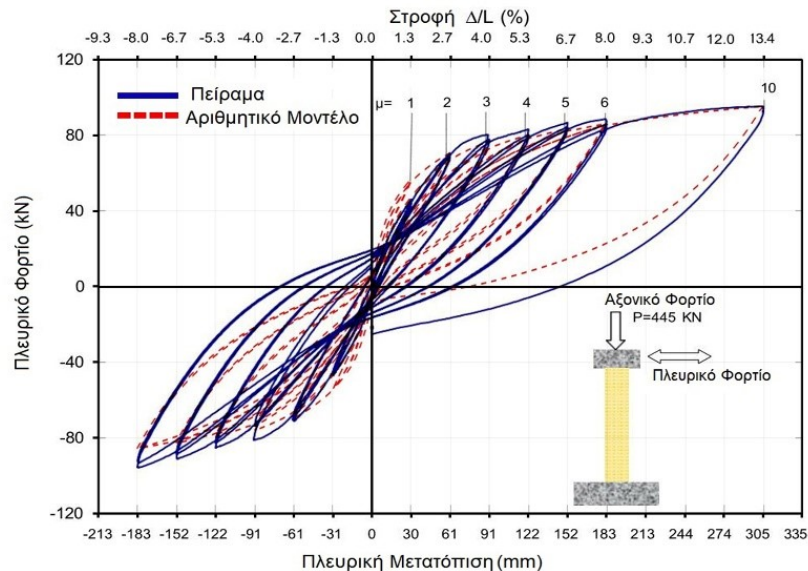


Σχ. 3 : α) Μοντέλο προβόλου βάθρου γέφυρας β) Διακριτοποίηση διατομής σε «ίνες».

Το υποστυλωμα πρόβολου της παραπάνω πειραματικής μελέτης μοντελοποιήθηκε με ένα γραμμικό στοιχείο δοκού με «ίνες» σε όλο το ύψος του βάθρου που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την καμπτική υστερητική συμπεριφορά του βάθρου γέφυρας (Σχήμα 3). Τα αποτελέσματα που παράγονται στην παρούσα μελέτη βασίζονται στη διατύπωση του μη γραμμικού στοιχείου δοκού με «ίνες» με τη μέθοδο των μετατοπίσεων [2]. Για την προσομοίωση του δοκιμίου χωρίς σωλήνα ΙΟΠ η διατομή των «ινών» διακριτοποιήθηκε σε πυρήνα περισφιγμένου σκυροδέματος και επικάλυψη απερίσφικτου σκυροδέματος και εφαρμόστηκε ανάλογα με τον βαθμό περισφιγής ο νόμος υλικού του Mander et al. 1988 [21]. Στην περίπτωση του δοκιμίου με σωλήνα ΙΟΠ, δεδομένου ότι η απόκριση του υλικού που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα έχει ήδη υπολογιστεί κατά μέσο όρο με βάση τις διαφορετικές αποκρίσεις του πυρήνα σκυροδέματος (περισφιγμένου με σωλήνα ΙΟΠ & χάλυβα) και την επικάλυψη σκυροδέματος (περισφιγμένη μόνο από τον σωλήνα ΙΟΠ), εφαρμόζεται ο ίδιος νόμος τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε ίνα στη διακριτοποιημένη κυκλική διατομή (Σχήμα 3β). Το γεγονός αυτό δίνει ένα σαφές πλεονέκτημα στο προτεινόμενο μοντέλο. Να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση του διαμήκους οπλισμού υιοθετήθηκε και στα δύο δοκίμια στη κυκλική διατομή με «ίνες» ο καταστατικός νόμος των Menegotto and Pinto 1973 [22].



Σχ. 4 : Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου έλέγχου [9].



Σχ. 5 : Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου κατασκευασμένου με σωλήνα ΙΟΠ [9].

Η παραπάνω σύγκριση μεταξύ της αριθμητικής και της πειραματικής υστέρησης των παραπάνω υποστυλωμάτων είναι ενδεικτική της αποτελεσματικότητας της εφαρμοσμένης μοντελοποίησης (Σχήμα 4 και 5). Παράλληλα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζει ένα μεγαλύτερο βαθμό αυτό-επαναφοράς στην αρχική του θέση στους κύκλους υστέρησης σε σχέση με το πείραμα λόγω του ότι ο καταστατικός νόμος λαμβάνει υπόψιν και την διατμητική τάση όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Τέλος, εκτενέστερη επαλήθευση του προτεινόμενου καταστατικού νόμου και με άλλα πειραματικά αποτελέσματα περιλαμβάνεται στην ερευνά των Shakya and Hain 2024 [23].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς βάρων γεφυρών κατασκευασμένων με σωλήνα ΙΟΠ. Επεκτάθηκε η χρήση ενός υπάρχοντος καταστατικού νόμου υλικού που ενσωματώθηκε στην εργαλειοθήκη για το λογισμικό MATLAB γνωστή με το όνομα FEDEAS Lab. Προσομοιώθηκαν πειραματικά υποστυλώματα από τη βιβλιογραφία τόσο με σωλήνα ΙΟΠ όσο και χωρίς ΙΟΠ για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της μεθόδου κατασκευής υποστυλωμάτων με σωλήνα ΙΟΠ. Διαπιστώθηκε ότι η προσομοίωση των βάρων με σωλήνα ΙΟΠ είναι δυνατή με τη χρήση των διαθέσιμων αναλυτικών εργαλείων για συμβατικά μέλη ΟΣ. Επίσης, ο εσωτερικός χαλύβδινος οπλισμός είναι απαραίτητος για την παροχή επαρκούς πλαστιμότητας του δομικού συστήματος υπό σεισμικά φορτία αλλά θα μπορούσε να είναι ακόμα και ο ελάχιστος λόγω της παρουσίας του σωλήνα ΙΟΠ. Τέλος για την εδραίωση της μεθόδου είναι καλό να καθοριστεί ένα ελάχιστο πάχος σωλήνα ή ένας μέγιστος λόγος διαμέτρου προς πάχος για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής και πλαστιμότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Megalooikonomou, K. G., Monti, G., & Santini, S. (2012). Constitutive Model for Fiber-Reinforced Polymer-and Tie-Confined Concrete. *ACI Structural Journal*, 109(4), 569-578.
- [2] Filippou F.C., Constantinides M. (2004). FEDEAS Lab – Getting Started Guide and Simulation Examples, NEESgrid Report 2004-22 and SEMM Report 2004-05 (<https://fedeeas.net/>).
- [3] Hain, A.; Zaghi, A.E.; Saiidi, M.S. (2019) Flexural behavior of hybrid concrete-filled fiber reinforced polymer tube columns. *Comp. Struct.*, 230, 111540.
- [4] Shao, Y.; Mirmiran, A. (2005) Experimental investigation of cyclic behavior of concrete-filled fiber reinforced polymer tubes. *J. Comp. Constr.* 9, 263–273.
- [5] Zhu, Z.; Ahmad, I.; Mirmiran, A. (2006) Seismic performance of concrete-filled FRP tube columns for bridge substructure. *J. Bridge Eng.*, 11, 359–370.
- [6] Shi, Y.; Zohrevand, P.; Mirmiran, A. Assessment of Cyclic Behavior of Hybrid FRP Concrete Columns. *J. Bridge Eng.* 2013, 18, 553–563.
- [7] Youm, K.; Cho, J.; Lee, Y.; Kim, J.J. (2013) Seismic performance of modular columns made of concrete filled FRP tubes. *Eng. Struct.* 57, 37–50.
- [8] Lanning, A.; Hain, A.; Zaghi, A.E.; Saiidi, M.S. (2022) Experimental study on hybrid concrete-filled fiber reinforced polymer tube (HCFFT) columns under simulated seismic loading. *Eng. Struct.*, 264, 114478.
- [9] Zhu Z. (2004) Joint construction and seismic performance of concrete filled fiber reinforced polymer tubes. Ph.D. dissertation. Raleigh (NC): Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University.
- [10] Samaan, M.; Mirmiran, A.; Shahawy, M. Model of concrete confined by fiber composites. *J. Struct. Eng.* 1998, 124, 1025–1031.
- [11] Saiid Saiidi, M.; Sureshkumar, K.; Pulido, C. (2005) Simple carbon-fiber-reinforced-plastic-confined concrete model for moment-curvature analysis. *J. Comp. Constr.*, 9, 101–104.
- [12] Youssef, M.N.; Feng, M.Q.; Mosallam, A.S. (2007) Stress–strain model for concrete confined by FRP composites. *Comp. Eng.*, 38, 614–628.
- [13] Lam, L.; Teng, J.G. (2003) Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Constr. Build. Mat.*, 17, 471–489.
- [14] Lam, L.; Teng, J.G. (2009) Stress–strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression. *Eng. Struct.*, 31, 308–321.
- [15] Teng, J.G.; Jiang, T.; Lam, L.; Luo, Y.Z. (2009) Refinement of a design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *J. Comp. Constr.*, 13, 269–278.
- [16] Spoelstra M.R. and Monti G. (1999) FRP-Confined Concrete Model, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 3(3), 143-150.
- [17] Technical Report (2001), Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, 14th fib bulletin, The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.

- [18] Braga F., Gigliotti R., Laterza M. (2006) Analytical Stress-Strain Relationship for Concrete Confined by Steel Stirrups and/or FRP Jackets, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 132(9), 1-15.
- [19] Megalooikonomou K.G. (2019) *Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Columns*, 1st ed.; Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, UK, ISBN (10): 1-5275-2785-9, ISBN (13): 978-1-5275-2785-0, 387.
- [20] Karsan, I. D., Jirsa, J. O. (1969). Behavior of concrete under compressive loadings. *Journal of the Structural Division*. 95(12),2543–64.
- [21] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114, 1804–1826.
- [22] Menegotto M., Pinto, P. (1973) Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending, *IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, Lisbon, Portugal.
- [23] Shakya, S.; Hain, A. (2024) Analytical Modeling Approaches for the Cyclic Behavior of Concrete-Filled Circular Filament Wound GFRP Tube Columns. *J. Compos. Sci.*, 8, 259.