

Σεισμική Συμπεριφορά Παλαιού Τύπου Υποστυλωμάτων ΟΣ υπό Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση

**Κωνσταντίνος Μεγαλοοικονόμου¹, Βαγγέλης Πάτσης², Γεώργιος Μαρούλης²,
Αριστείδης Παπαχρηστίδης²**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σύγχρονο δομημένο περιβάλλον στα αστικά κέντρα της Μεσογείου κυριαρχείται από κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.) είτε αποτελούμενα από μικτό σύστημα φερόντων στοιχείων, είτε αμιγώς πλαίσιακού τύπου. Περίπου το 70% έχει χτιστεί με τους προ του 1985 Κανονισμούς, και σήμερα θεωρούνται περιορισμένης σεισμικής ικανότητας επειδή δεν ικανοποιούν τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού. Εικάζεται ότι σε ενδεχόμενο ισχυρό σεισμό πολλά από αυτά τα κτίρια είτε θα αναπτύξουν σημαντική βλάβη είτε και κατάρρευση, σε επανάληψη των τραγικών συμβάντων που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν σε πολλά αστικά κέντρα της περιοχής με πολλά θύματα (π.χ. Πάρνηθα Αθήνα και Ιζμίτ της Τουρκίας το 1999, L'Aquila Ιταλίας το 2009, Αίγιο 1995, Σεισμός Τουρκίας-Συρίας 2023). Στην παρούσα εργασία, διατμητικώς κρίσιμα υποστυλώματα (τόσο ορθογωνικά όσο και κυκλικά) από πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας προσομοιώθηκαν με μη γραμμικά μέλη συγκεντρωμένης πλαστικότητας, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροπή-καμπυλότητας αλλά και τέμνουσας-διατμητικής παραμόρφωσης κυκλικών και ορθογωνικών διατομών με βάση τη θεωρία διαγώνιου θλιπτικού πεδίου. Η σύγκριση μεταξύ της αριθμητικής και της πειραματικής ανακυκλιζόμενης πλευρικής απόκρισης των υπο εξέταση υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα δείχνει την αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης που υιοθετήθηκε.

Λέξεις Κλειδιά: Θεωρία Διαγώνιου Θλιπτικού Πεδίου, Υποστυλώματα, Ροπή-Καμπυλότητα, Τέμνουσα-Διατμητική παραμόρφωση

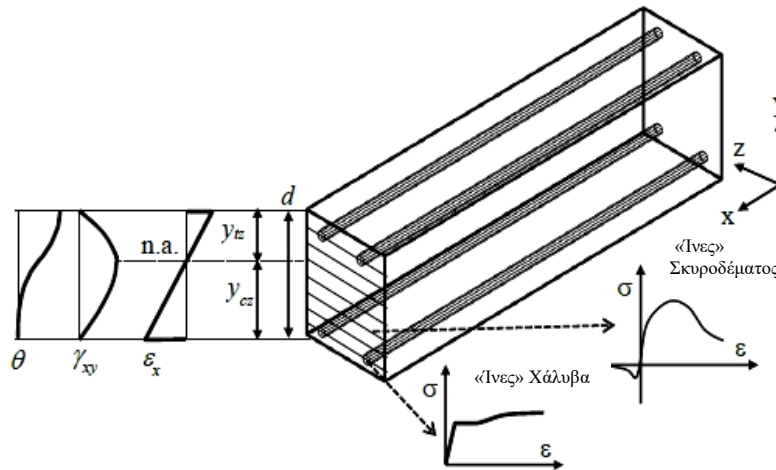
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την πρόοδο της τεχνολογίας, ακόμη και οι πιο προηγμένες μέχρι σήμερα μέθοδοι αντισεισμικού σχεδιασμού και αποτίμησης απαιτούν κάποιας μορφής μη γραμμική ανάλυση - είτε στατική είτε δυναμική. Οι αναλύσεις αυτές εκτελούνται συνήθως με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία καθορισμένα με βάση διαφορετικές μεθοδολογίες και προσεγγίσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται στοιχεία δοκού-υποστυλώματος με «ίνες» (Σχήμα 1) με χρήση μοντέλων ομογενοποιημένης ρηγμάτωσης. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το ρηγματωμένο σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ένα συνεχές μέσο αλλά ορθότροπο. Γενικά, τα μοντέλα αυτά αναφέρονται

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

² 3DR Engineering Software, Πολιτικός Μηχανικός vaggelis.patsis@gmail.com, Μηχανολόγος Μηχανικός georgem@3dr.eu, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός aristidi@3dr.eu

ως «μοντέλα ομογενοποιημένης ρηγματώσης», καθώς η ρηγματώση μοντελοποιείται ως καταναμημένο φαινόμενο εξαρτώμενη από την κατεύθυνση. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για αναλύσεις διατομών.



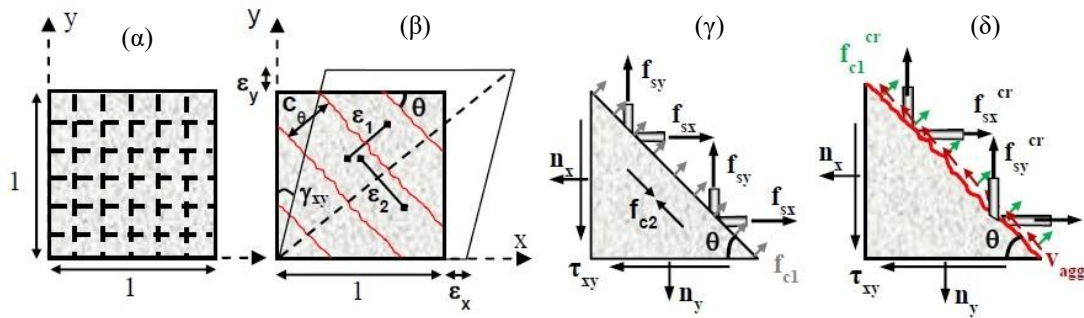
Σχήμα 1: Μοντέλο Διατομής με Ίνες – Ορισμοί

2 ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ «ΙΝΕΣ» ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΟΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΝΤΑΣΗ

2.1 Καταστατικός νόμος υλικού σκυροδέματος

Η ανάλυση των μηχανισμών διατμητικής αντοχής στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξετάζεται σε επίπεδο στοιχείο υποκείμενο σε επίπεδη ένταση με κύρια αιτία παραμόρφωσης την διατμητική συστολή (displacement control). Για την επίλυση του μηχανικού προβλήματος γίνεται χρήση των συνθηκών ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Ο οπλισμός διατάσσεται ομοιόμορφα ως ορθογωνικός κάνναβος στις κατευθύνσεις x και y , παράλληλα με το σύστημα συντεταγμένων του προβλήματος (Σχήμα 2). Η ομοιόμορφη κατανομή του οπλισμού επιτρέπει την θεώρηση ομογενοποιημένης ρηγματώσης στο στοιχείο (smeared cracking) και άρα την χρήση μέσων τιμών για τις παραμέτρους πεδίου (average stress and strain). Επιπροσθέτως λαμβάνεται ότι το επίπεδο ρηγματώσης συμπίπτει με αυτό της κύριας εφελκυστικής παραμόρφωσης ενώ το ρηγματωμένο σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ως ορθοτροπικό υλικό με άξονες προσανατολισμένους στο κύριο σύστημα αξόνων, που είναι ταυτόσημο για τα πεδία των τάσεων και παραμορφώσεων. Θεωρείται ότι τα φορτία που δρουν στα επίπεδα των άκρων του στοιχείου αποτελούνται από συνοριακές επίπεδες τάσεις, δηλαδή ορθές τάσεις n_x , n_y και διατμητικές τάσεις τ_{xy} . Η παραμόρφωση ορίζεται από τον ταυνοστή παραμορφώσεων για επίπεδη ένταση:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & 0 \\ \gamma_{xy}/2 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (1)$$



Σχήμα 2: (α) επίπεδο στοιχείο υποκείμενο σε επίπεδη ένταση (β) μέσες παραμορφώσεις, και (γ) μέσες τάσεις (δ) τοπικές τάσεις [1,2].

Το μοντέλο περιλαμβάνει τρία σύνολα σχέσεων [2]: σχέσεις ισορροπίας μεταξύ των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων και των μέσων τάσεων στο σκυρόδεμα και τον οπλισμό και μονοαξονικές καταστατικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για το ρηγματωμένο σκυρόδεμα κατά τις κύριες διευθύνσεις, το ίδιο και για τον οπλισμό. Οι καταστατικές αυτές σχέσεις για το ρηγματωμένο σκυρόδεμα προκύπτουν από δοκιμές στοιχείων επίπεδης έντασης οπλισμένου σκυροδέματος με τη χρήση μιας ειδικά κατασκευασμένης πειραματικής διάταξης δοκιμών τέτοιων στοιχείων στο Πανεπιστήμιο του Τορόντο. Δεδομένου ότι η διατύπωση της θεωρίας διαγώνιου θλιπτικού πεδίου (MCFT) βαθμονομήθηκε με τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών σε αυτή τη πειραματική διάταξη, βασίζεται σε ρεαλιστικά καταστατικά μοντέλα για το σκυρόδεμα που προκύπτουν από πειραματικώς επιβεβαιωμένα φαινόμενα. Ενώ οι ρωγμές είναι ομογενοποιημένες και οι σχέσεις διατυπώνονται σε όρους μέσων τάσεων και παραμορφώσεων, μια κρίσιμη πτυχή της MCFT είναι η εξέταση των τοπικών συνθηκών τάσεων και παραμορφώσεων στις ρωγμές (Σχήμα. 2δ) [2].

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ορθές και διατμητικές τάσεις για την i -οστή «ίνα»/στρώση $(\sigma_x^i, \tau_{xy}^i)$ μιας διατομής «ινών» μιας δοκού σκυροδέματος [3], διατυπώνεται ένα διαξονικό καταστατικό μοντέλο «ινών» σύμφωνα με την MCFT. Τα βήματα και οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των όρων για τις συνθήκες ισορροπίας, τις συνθήκες συμβιβαστού και τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων παρατίθενται στον Πίνακα 1. Για τον προσδιορισμό της έντασης της διατομής έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Οι ορθές παραμορφώσεις ϵ_x και η διατμητική γ_{xy} είναι γνωστές για κάθε «ίνα», και απορρέουν από την παραδοχή επίπεδων διατομών και παραβολικής κατανομής των διατμητικών παραμορφώσεων κατά μήκος του ύψους της διατομής με μέγιστη τιμή $\gamma_{xy,max}$ στον ουδέτερο άξονα y_{na} (Εξίσωση 2 και Σχήμα 1). Στην ουσία πρόκειται για δύο ημι-παραβολές με το ίδιο μέγιστο $\gamma_{xy,max}$ που συναντώνται στο σημείο του ουδέτερου άξονα με διαφορετικά σημεία εκκίνησης δηλαδή τις ακραίες εφελκυσόμενες «ίνες» και ακραίες θλιβόμενες «ίνες» αντίστοιχα).

$$\gamma_{xy}(y) = \gamma_{xy,max} \cdot \left[2 \left(\frac{y}{y_{na}} \right) - \left(\frac{y}{y_{na}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

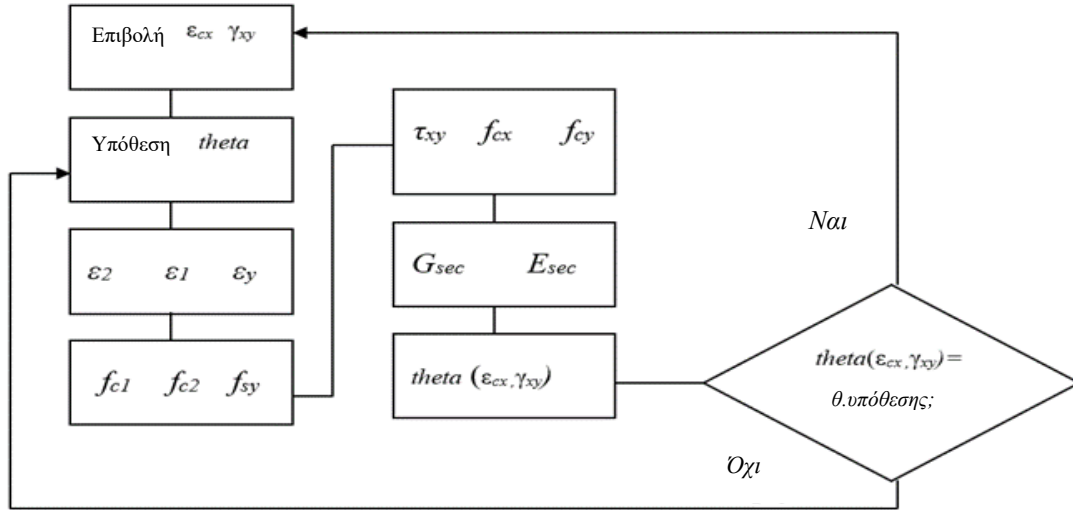
- Η εγκάρσια τάση σκυροδέματος f_{cy} προσδιορίζεται για κάθε ίνα από συνθήκες ισορροπίας (θεωρώντας μηδενική ορθή τάση n_y).
- Το διάγραμμα ροής της επαναληπτικής μεθόδου που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Η ζητούμενη παράμετρος είναι η γωνία των κύριων διευθύνσεων που υποθέτουν

σύμπτωση των κύριων αξόνων για την κύρια τάση και την κύρια παραμόρφωση του σκυροδέματος. Για να επιταχυνθεί η σύγκλιση του αλγορίθμου στη σωστή τιμή αυτής της γωνίας θ (Σχήμα 1 και Σχήμα 2), η αρχική εκτίμηση της μεθόδου για τη γωνία κλίσης των αξόνων των κύριων τάσεων/παραμορφώσεων (γωνία του κύριου άξονα 2 με τον άξονα x) προσδιορίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\theta(y) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{y}{y_{cz}} \right)^3, 0 < y \leq y_{cz}$$

$$\theta(y) = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \cdot \left[2 \left(\frac{y-y_{cz}}{y_{tz}} \right) - \left(\frac{y-y_{cz}}{y_{tz}} \right)^2 \right], y_{cz} < y \leq d \quad (3)$$

όπου y είναι η θέση της «ίνας» / στρώσης σκυροδέματος (y : το σημείο μηδέν εντοπίζεται στην ακραία θλιβόμενη «ίνα», Σχήμα 1), y_{cz} είναι το βάθος της θλιβόμενης ζώνης, y_{tz} είναι το βάθος της εφελκυστικής ζώνης και d είναι το συνολικό βάθος της διατομής (δηλ. $y_{cz}+y_{tz}=d$, Σχήμα 1).



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής της επαναληπτικής διαδικασίας για κάθε «ίνα»/στρώση της διατομής σύμφωνα με την MCFT [1].

Πίνακας 1: Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην επαναληπτική διαδικασία [2].

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{cx}, \varepsilon_1 = \varepsilon_x + \frac{\gamma_{xy} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{2}, \varepsilon_y = \varepsilon_1 - \frac{\gamma_{xy}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_1$$

$$f_{c1} = E_c \cdot \varepsilon_1 \text{ για } 0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}, f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200\varepsilon_1}} \text{ για } \varepsilon_{cr} < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{yx},$$

$$f_{c2} = f_{c2max} \cdot \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right], \frac{f_{c2max}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34\varepsilon_1/\varepsilon'_c} \leq 1.0, f_{sy} = E_{sy}\varepsilon_y \leq f_{yy}$$

$$f_{cy} = -\rho_y \cdot f_{sy}, \tau_{xy} = \frac{f_{cy} - f_{c2}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, f_{cx} = f_{c1} - \tau_{xy} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), G_{sec} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}},$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cx}}{\varepsilon_x},$$

$\theta(\varepsilon_{cx}, \gamma_{xy}) = \tan^{-1} \frac{f_{c1} - f_{cy}}{\tau_{xy}}$
f'_c = Θλιπτική Κυλινδρική Αντοχή Σκυροδέματος (MPa), ε'_c = Παραμόρφωση στην Θλιπτική Κυλινδρική Αντοχή Σκυροδέματος, E_c = Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος (MPa), f_{cr} = Εφελκυστική Αντοχή Σκυροδέματος (MPa), ε_{cr} = Παραμόρφωση στην Εφελκυστική Αντοχή Σκυροδέματος, ε_{yx} = Παραμόρφωση Διαρροής του Διαμήκους Χαλύβδινου Οπλισμού, E_{sy} = Μέτρο Ελαστικότητας Χαλύβδινου Εγκάρσιου Οπλισμού (MPa), f_{yy} = Αντοχή Διαρροής Εγκάρσιου Χαλύβδινου Οπλισμού (MPa), ρ_y = Ποσοστό Εγκάρσιου Χαλύβδινου Οπλισμού.

2.2 Μοντέλο Διατομής

Εάν εφαρμοστεί η αρχή του δυνατού έργου για ένα στοιχείο δοκού, προκύπτει η εξίσωση (4). Το εξωτερικό έργο εκτελείται από τις εξωτερικές δυνάμεις (p) στις αντίστοιχες μετατοπίσεις (u), ενώ το εσωτερικό έργο εκτελείται από τις βασικές δυνάμεις (q) στις αντίστοιχες παραμορφώσεις (v).

$$\delta u^T p = \delta v^T q \quad (4)$$

Το εσωτερικό έργο της εξίσωσης (4) μπορεί να προκύψει από το ολοκλήρωμα του γινομένου των τάσεων με τις σχετικές δυνατές παραμορφώσεις στον όγκο V του στοιχείου. Σε πολλές εφαρμογές της μη γραμμικής ανάλυσης, το εσωτερικό έργο περιορίζεται στο εσωτερικό έργο από την ορθή τάση σ_x και τη διατμητική τάση τ , στην ορθή παραμόρφωση ε_x και τη διατμητική παραμόρφωση γ αντίστοιχα [4]:

$$\delta v^T q = \int \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dV \quad (5)$$

Η παραμόρφωση και η τάση είναι συναρτήσεις της θέσης κατά μήκος του διαμήκους άξονα του στοιχείου x και της θέσης εντός της διατομής, οι οποίες δίνονται σε τοπικές συντεταγμένες y (σε σχέση με το ύψος) και z (σε σχέση με το πλάτος). Η εξίσωση (5) μπορεί να ξαναγραφεί αντικαθιστώντας το ολοκλήρωμα επί του όγκου του στοιχείου με ολοκλήρωση επί του εμβαδού της διατομής A σε ένα σημείο x και στη συνέχεια ολοκλήρωση επί ολόκληρου του μήκους του στοιχείου:

$$\delta v^T q = \int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dV = \int [\int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dA] dx \quad (6)$$

Οι παραμορφώσεις σε ένα σημείο «ίνας»/στρώσης της διατομής της δοκού (περίπτωση δύο διαστάσεων) σχετίζονται με τις παραμορφώσεις της διατομής ως εξής [5]:

$$\varepsilon_x(x) = \varepsilon_0 - y_\varepsilon \cdot \varphi(x) \quad (7)$$

$$\gamma_{xy}(x) = \gamma_{xy.max} \quad (8)$$

όπου ε_0 είναι η αξονική παραμόρφωση στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων της διατομής (κέντρο βάρους) και το y_ε προσμετράται επίσης ως προς το κέντρο αυτό, $\varphi(x)$ είναι η καμπυλότητα της διατομής και $\gamma_{xy.max}$ είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης στον ουδέτερο άξονα. Επομένως, οι παραμορφώσεις σε ένα υλικό σημείο m της διατομής μπορούν να εκφραστούν σε μορφή μητρώων ως εξής:

$$\varepsilon(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varphi \\ \gamma_{xy.max} \end{Bmatrix} = B_s(y_\varepsilon) \cdot e(x) \quad (9)$$

$$B_s(y_\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Οι εσωτερικές δυνάμεις της διατομής δίνονται ακολούθως:

$$\text{Αξονική Δύναμη: } N = \int \sigma_x dA \quad (11)$$

$$\text{Τέμνουσα Δύναμη: } V = \int \tau_{xy} dA \quad (12)$$

$$\text{Ροπή: } M = - \int y_\varepsilon \sigma_x dA \quad (13)$$

Τα παραπάνω μπορούν να γραφούν σε μορφή μητρώων ως εξής:

$$f_s(x) = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \sigma(x, y_\varepsilon) dA \quad (14)$$

όπου:

$$f_s(x) = \begin{Bmatrix} N \\ M \\ V \end{Bmatrix}, \quad B_s(y_\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτοποίηση της διατομής σε «ίνες»/στρώσεις, οι συνολικές δυνάμεις στη διατομή της δοκού μπορούν να υπολογιστούν απλά αθροίζοντας τις συνεισφορές των επιμέρους «ινών»:

$$N = \sum_{i=1}^{n.Στρώσεις} \sigma_x^i A^i, \quad V = \sum_{i=1}^{n.Στρώσεις} \tau_{xy}^i A^i, \quad M = - \sum_{i=1}^{n.Στρώσεις} \sigma_x^i y_\varepsilon^i A^i \quad (16)$$

όπου A^i είναι το εμβαδόν της i -οστής «ίνας»/στρώσης. Η ορθή και η διατμητική τάση για την i -οστή «ίνα»/στρώση (σ_x^i, τ_{xy}^i) λαμβάνονται από τις αντίστοιχες τάσεις χρησιμοποιώντας ένα διαξονικό καταστατικό μοντέλο υλικού «ινών» σύμφωνα με την MCFT (Σχήμα 3, $\sigma_x^i = f_{cx}^i$). Στην προτεινόμενη μέθοδο, οι δυνάμεις της διατομής προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας γνωστές παραμορφώσεις της διατομής- αντίθετα, για γνωστές δυνάμεις διατομής, εκτελούνται επαναλήψεις επί των τιμών των παραμορφώσεων της διατομής εντός μιας προκαθορισμένης αποδεκτής ανοχής απόκλισης για τα μεγέθη των δυνάμεων.

Η μέθοδος υπολογισμού του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας της διατομής k_s προκύπτει από τη παραγωγή του διανύσματος των εσωτερικών δυνάμεων f_s ως προς το διάνυσμα παραμόρφωσης της διατομής e :

$$k_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$k_s = \frac{\partial f_s}{\partial e} = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial e} dA = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} B_s(y_\varepsilon) dA \quad (18)$$

$$\sigma(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \varepsilon(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} = \begin{bmatrix} E_m & 0 \\ 0 & G_m \end{bmatrix} \quad (20)$$

όπου E_m και G_m είναι τα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης σε ένα σημείο m της διατομής, τα οποία προσεγγίζονται εδώ από τα E_{sec} και G_{sec} (Πίνακας 1, Σχήμα 3).

3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΟΠΗΣ-ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ-ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η άγνωστη ροπή M (και η σχετική αξονική παραμόρφωση ε_0) για δεδομένο αριθμό βημάτων κλιμακωμένης καμπυλότητας φ και η άγνωστη τέμνουσα V για ταυτόχρονα βήματα κλιμάκωσης της διατμητικής παραμόρφωσης γ προσδιορίζονται από την ανάλυση διατομής, με ή χωρίς την παρουσία σταθερού αξονικού φορτίου N . Το σύστημα εξισώσεων για την ισορροπία της διατομής τίθεται στη συνέχεια ως εξής:

$$\begin{cases} N - N_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \\ M - M_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \\ V - V_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Υπάρχει ρητή σύζευξη των δυνάμεων αντίστασης της διατομής. Εάν δίνονται τα N , φ και γ , η πρώτη εξίσωση χρησιμοποιείται για την επίλυση του ε_0 στη συνέχεια, η τιμή αυτή χρησιμοποιείται μαζί με τις δεδομένες τιμές για τα φ και γ στη δεύτερη και τρίτη εξίσωση για τον προσδιορισμό των M και V . Η αξονική δύναμη αντίστασης στην πρώτη εξίσωση (21) προσεγγίζεται με ανάπτυγμα σειράς Taylor μέχρι την πρώτη (γραμμική) τάξη:

$$N - \left[N_r(\varepsilon_{00}, \varphi_0) + \frac{\partial N}{\partial \varepsilon_0} \Delta \varepsilon_0 + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial N}{\partial \gamma} \Delta \gamma \right] = 0 \quad (22)$$

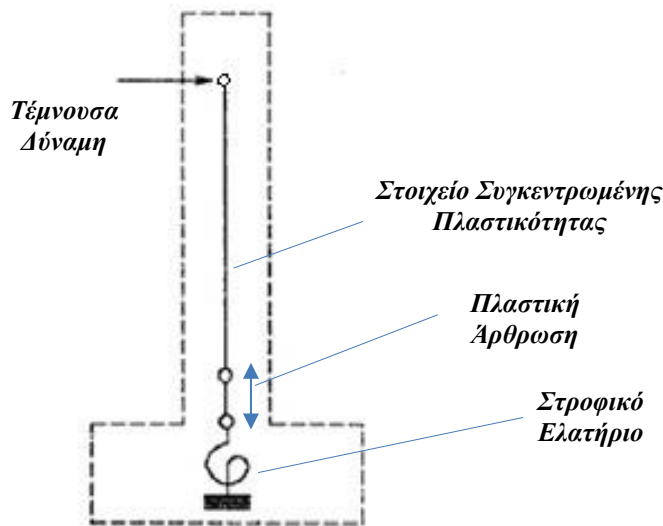
όπου ο δεύτερος δείκτης 0 δηλώνει την αρχική τιμή εκκίνησης της λύσης. Με την αξονική δύναμη N , το βήμα της καμπυλότητας $\Delta \varphi$ και το βήμα της διατμητικής παραμόρφωσης $\Delta \gamma$, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να επιλυθεί για $\Delta \varepsilon_0$:

$$\Delta \varepsilon_0 = \left(\frac{\partial N}{\partial \varepsilon_0} \right)^{-1} \cdot \left(N_u - \frac{\partial N}{\partial \varphi} \Delta \varphi - \frac{\partial N}{\partial \gamma} \Delta \gamma \right) \quad \text{με,} \quad N_u = N - N_r(\varepsilon_{01}, \varphi_1) \quad (23)$$

Για κάθε βήμα, η αριθμητική επίλυση χωρίζεται σε δύο κύριες φάσεις: τη φάση κλιμάκωσης, η οποία συνίσταται στην εφαρμογή του βήματος της καμπυλότητας και της διατμητικής παραμόρφωσης, και τη φάση σύγκλισης, κατά την οποία εκτελούνται επαναλήψεις για την επίτευξη της ισορροπίας μεταξύ της σταθερής αξονικής δύναμης, της καμπυλότητας και της διατμητικής παραμόρφωσης. Σε ένα αρχικό πρώτο βήμα, η αξονική δύναμη εφαρμόζεται χωρίς καμπυλότητα και χωρίς διατμητική παραμόρφωση.

4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

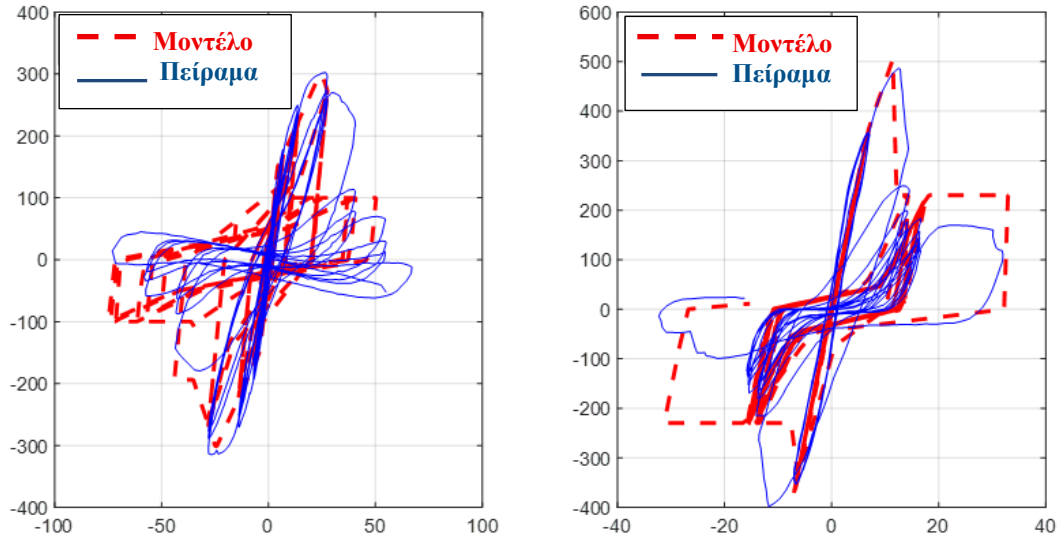
Το παρακάτω Σχήμα 4 δείχνει τη προσομοίωση ενός υποστυλώματος προβόλου με στοιχείο συγκεντρωμένης πλαστικότητας εντός πλαστικών αρθρώσεων (BWH) [6][7]. Στη βάση του στοιχείου προστίθεται ένα στροφικό ελατήριο που προσομοιώνει την εξόλκευση της αγκύρωσης των εφελκόμενων ράβδων οπλισμού από το θεμέλιο του υπό εξέταση υποστυλώματος. Επίσης, για το μοντέλο της διατομής χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό υστέρησης που ακολουθεί τις περιβάλλουσες απόκρισης ροπής-καμπυλότητας και τέμνουσας-διατμητικής παραμόρφωσης της διατομής οπλισμένου σκυροδέματος του υπό εξέταση υποστυλώματος. Για να ενσωματωθούν όσα προαναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, το μοντέλο διατομής του στοιχείου συγκεντρωμένης πλαστικότητάς συγκεντρώνει τα προηγούμενως καθορισμένα μονοαξονικά υλικά σε ένα ενιαίο μοντέλο εσωτερικής δύναμης-παραμόρφωσης διατομής εντός των πλαστικών αρθρώσεων του στοιχείου BWH.



Σχήμα 4: Μοντέλο προβόλου διατμητικής κρίσιμου υποστυλώματος με στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας εντός πλαστικών αρθρώσεων (BWH) [8].

Στην παρούσα μελέτη, το εν λόγω μήκος πλαστικής άρθρωσης προσδιορίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν από τους Megalooικονομου et al. (2018) [8]. Η σύγκριση (Σχήμα 5) μεταξύ της αριθμητικής και της πειραματικής ανακυκλιζόμενης πλευρικής απόκρισης των

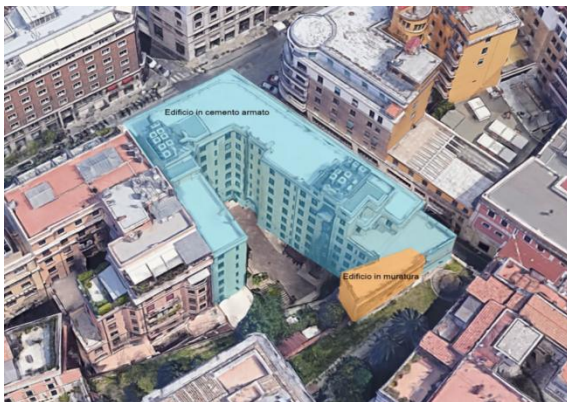
εξεταζόμενων υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος [9],[10] υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της υιοθετημένης μοντελοποίησης ψαθυρών υποστυλωμάτων.



Σχήμα 5: Συσχέτιση με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία (Άξονας x: μετατόπιση σε mm και Άξονας y: Τέμνουσα δύναμη σε kN), (αριστερά: ορθογωνικό υποστύλωμα 1 [9] και δεξιά: κυκλικό υποστύλωμα 20 [10]).

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ 7ΟΡΟΦΗΣ ΥΠΑΡΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Για τον έλεγχο της εφαρμοσιμότητας της παραπάνω μεθοδολογίας έγινε εφαρμογή της για την αποτίμησης υπαρκτής κατασκευής. Η κατασκευή προς αποτίμηση είναι ένα κτίριο 7 τυπικών ορόφων και 2 ορόφων δώματος στην Ρώμη, Ιταλία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6(β). Αποτελείται από 2 στατικά ανεξάρτητα τμήματα: ένα οπλισμένου σκυροδέματος, με μπλε χρώμα στην Εικόνα 6(α), και ένα φέρουσας τοιχοποιίας με πορτοκαλί χρώμα.



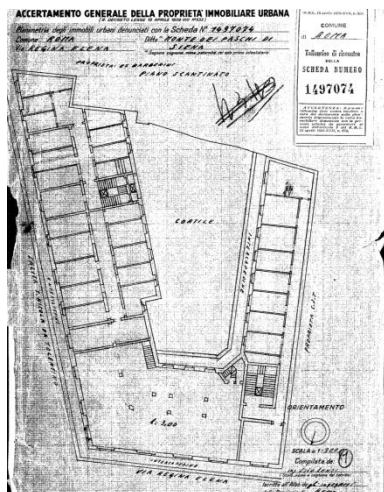
(α) Φωτογραφία Κάτοψης



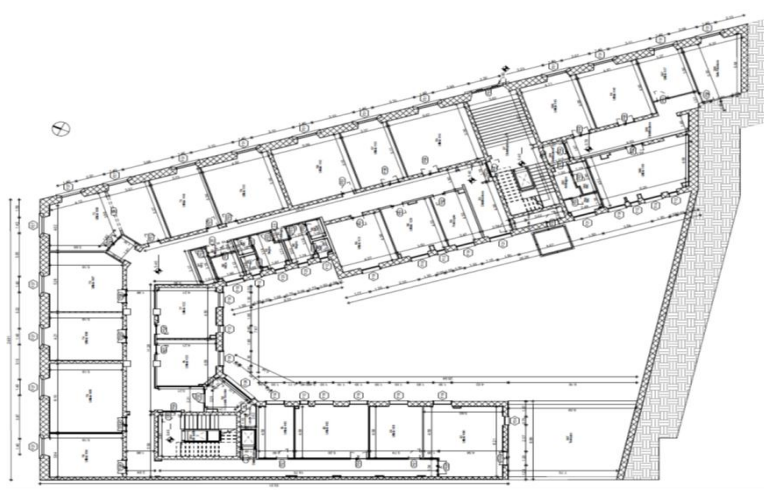
(β) Πλαϊνή Όψη

Εικόνα 6: Κτίριο 7 ορόφων και 2 επιπρόσθετων ορόφων δώματος

Η κάτοψη του κτηρίου, σχήματος U όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 7, έχει συνολικό εμβαδό περίπου 900m². Το κτίριο κατασκευάστηκε το 1930, σύμφωνα με τους τότε κανονισμούς, χωρίς προβλέψεις για τοιχώματα, ικανοτικούς ελέγχους και απαιτήσεις πλαστιμότητας.



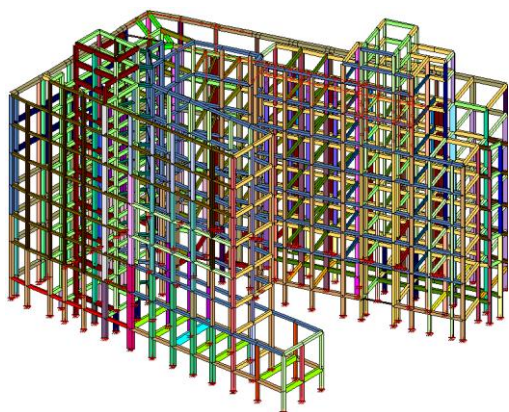
(α) Πρωτότυπη άδεια



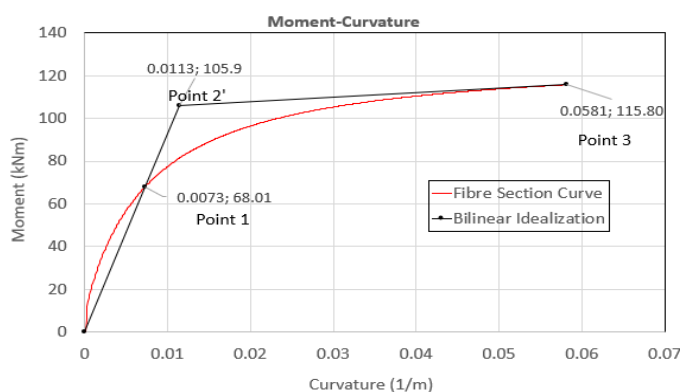
(β) Αποτύπωση κάτοψης

Εικόνα 7: Κάτοψη

Το υπολογιστικό προσομοίωμα δημιουργήθηκε στο λογισμικό GT STRUDL [11] και αποτελείται από 1200 κόμβους, 2200 ραβδωτά μέλη, κινηματικές εξαρτήσεις για την προσομοίωση της διαφραγματικής λειτουργίας, 123 ανεξάρτητες περιπτώσεις φόρτισης (Εικόνα 8(α)). Για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των μελών οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετήθηκαν 3000 διαφορετικά μη γραμμικά ελατήρια, λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες ιδιότητες σκυροδέματος, χάλυβα, και τον τοποθετημένο οπλισμό (Εικόνα 8(α)). Διενεργήθηκαν στατικές ανελαστικές αναλύσεις (Pushover), σύμφωνα με τον EC8-3.



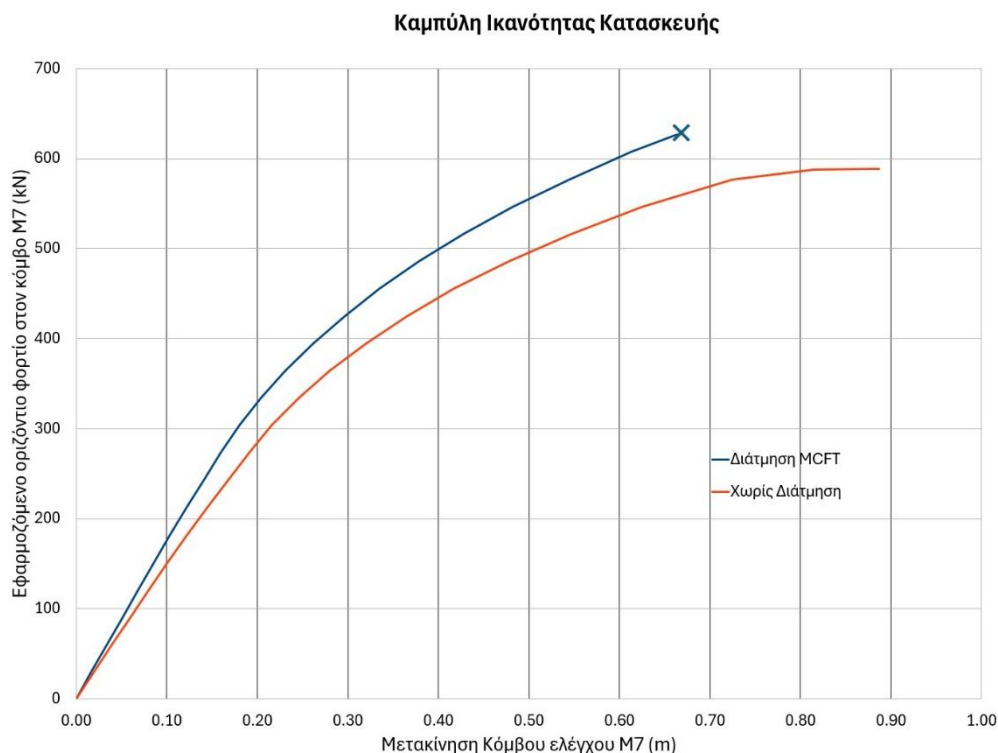
(α) 3D υπολογιστικού προσομοιώματος



(β) Μη γραμμικό ελατήριο υποστυλώματος

Εικόνα 8: Υπολογιστικό προσομοίωμα στο GT STRUDL

Η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής, ενδεικτικά για σεισμική φόρτιση κατά τη μεγάλη διεύθυνση του κτιρίου (άξονας X), λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την αλληλεπίδραση της διάτμησης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 9. Πολλά υποστυλώματα αστοχούν διατμητικά, περιορίζοντας έτσι την μέγιστη μετατόπιση του κτιρίου από τα 90cm στα 66cm.



Σχήμα 9: Καμπύλη ικανότητας από την Ανάλυση Ex

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την παρούσα εργασία μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των διατμητικώς κρίσιμων υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος που διερευνήθηκαν εδώ είναι, αφενός, αποτέλεσμα του μηχανισμού αλληλεπίδρασης κάμψης-διάτμησης, ο οποίος προσομοιώθηκε με βάση τη θεωρία του διαγώνιου θλιπτικού πεδίου (MCFT), και, αφετέρου, της συνεισφοράς στην τελική μετατόπιση της εξόλκευσης των εφελκόμενων ράβδων οπλισμού από την συνήθως ελλειπή αγκύρωση τους στο θεμέλιο του υποστυλώματος. Προσομοιώθηκαν διατμητικώς κρίσιμα υποστυλώματα (ορθογωνικά και κυκλικά) από σχετικά πειράματα στη βιβλιογραφία με μη γραμμικά ραβδωτά στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας εντός πλαστικών αρθρώσεων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας ανάλυσης διατομής του προτεινόμενου μοντέλου διατομής «ινών». Η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία επιβεβαιώνει την καλύτερη εκτίμηση της πλήρους απόκρισης έως την κατάρρευση των δεικτών αντοχής και παραμόρφωσης των διατμητικώς κρίσιμων υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος, για τον έλεγχο εφαρμοσιμότητας της μεθοδολογίας έγινε αποτίμηση υπαρκτής κατασκευής.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Megalooikonomou K.G Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Columns, Cambridge Scholars Publishing, ISBN (10): 1-0364-3873-2, ISBN (13): 978-1-0364-3873-9, p. 387, 2024.
2. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal Proceedings*, 1986, 83(2):219-231.
3. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory. *ACI Structural Journal*, 1988, 85(3):258-268.
4. Filippou, F. C., and Fenves, G. L.: Methods of analysis for earthquake-resistant structures. In: Bozorgnia Y, Bertero VV (eds) *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press, Boca Raton, 2004.
5. Ceresa, P., Petrini, L., and Pinho, R.: A fibre flexure–shear model for cyclic nonlinear behavior of RC structural elements. Research Report ROSE-2008/07. IUSS Press: Pavia, Italy, 2008.
6. Papachristidis A., Fragiadakis M. & Papadrakakis M. (2010). A 3D fibre beam-column element with shear modelling for the inelastic analysis of steel structures. *Computational Mechanics*. 45. 553-572.
7. Scott, M.H. and G.L. Fenves. Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam-Column Elements, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2006, 132(2):244-252.
8. Megalooikonomou, K. G., Tastani, S. P., and Pantazopoulou, S. J. Effect of Yield Penetration on Column Plastic Hinge Length. *Engineering Structures*, Elsevier, 2018, 156:161-174.
9. Sezen, H., and Moehle, J. P. Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(6):842-849.
10. Ang, B. G., Priestley, M. J. N., and Paulay, T. Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(1):45-59.
11. GT STRUDL Version 43 (2024), Hexagon, Norcross, Georgia 30092 U.S.A.