

## Ανακυκλιζόμενος Καταστατικός Νόμος Υλικού για Περισφιγμένο Σκυρόδεμα με Μανδύες ΙΟΠ σε Ορθογωνικές Διατομές στο Λογισμικό OpenSEES

Κωνσταντίνος Γ. Μεγαλοικονόμου<sup>1</sup>, Γεώργιος Σ. Παπαβασιλείου<sup>2</sup>

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο καταστατικός νόμος υλικού που προτάθηκε από τους Μεγαλοικονόμου και Παπαβασιλείου (2019) προστέθηκε στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα OpenSEES ως μονοαξονικός καταστατικός νόμος υπό την ονομασία ‘*FRPConfinedConcrete*’. Για την πιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του συγκεκριμένου μοντέλου υλικού, προσομοιώθηκαν πειράματα τετραγωνικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος επισκευασμένων με μανδύες από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP/ΙΟΠ) υπό ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση και ταυτόχρονο θλιπτικό αξονικό φορτίο που πραγματοποιήθηκαν από τους Memon and Skeikh (2005). 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:** Ορθογωνικά Υποστυλώματα, Σκυρόδεμα, Περίσφιξη, Ανακύκλιση, Μανδύες ΙΟΠ.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλούσια βιβλιοθήκη υλικών, στοιχείων και εντολών ανάλυσης καθιστά το OpenSEES [1] ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική προσομοίωση των μη γραμμικών δομικών και γεωτεχνικών συστημάτων υπό σεισμική και όχι μόνο διέγερση. Επιπλέον, η βάση δεδομένων του OpenSEES αναπτύσσεται συνεχώς και περιέχει τα πιο νέα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης, πολύ σύντομα μετά τη δημοσίευσή τους σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά. Η αποτελεσματικότητα του βασίζεται σε μια γλώσσα εντολών η οποία επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί αρκετά ευέλικτα αρχεία εισόδου χωρίς διεπιφάνεια χρήστη. Το OpenSEES δεν είναι ένα μαύρο κουτί, αλλά λογισμικό ανοικτού κώδικα, καθιστώντας το ένα χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο για την αριθμητική μοντελοποίηση. Μπορούν να ενσωματωθούν στο OpenSEES εργαλεία, στοιχεία ή

<sup>1</sup> Ερευνητής Μηχανικός, Γερμανικό Ερευνητικό Κέντρο για Γεωεπιστήμες (GFZ), kmegal@gfz-potsdam.de

<sup>2</sup> Lecturer in Civil Engineering, University of the Highlands and Islands, Georgios.Papavasileiou.ic@uhi.ac.uk

εργαλεία ανάλυσης τα οποία γίνονται σύντομα διαθέσιμα, χάρη στις τακτικές ενημερώσεις του. Η προσθήκη μιας νέας υπορουτίνας (μοντέλο υλικού, τύπος στοιχείου, μέθοδος επίλυσης συστημάτων) γίνεται μέσω κώδικα C++, μαζί με μια εντολή εισόδου με χρήση του αντίστοιχου ακρωνύμιου, η οποία χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη και την κατασκευή του νέου υλικού. Τα περισσότερα μοντέλα υλικού ορίζονται ως υποκατηγορίες της κατηγορίας μονοαξονικών καταστατικών νόμων *UniaxialMaterial*. Σε αντίθεση με τις υπορουτίνες της C ή της FORTRAN, καμία πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του μοντέλου δεν παρέχεται ως όρισμα στη ρουτίνα του υλικού. Η διατήρηση των απαραίτητων ορισμάτων, η απόρριψη των αχρείαστων και η συσχέτιση των ορισμάτων με τις αντίστοιχες μεταβλητές του νόμου υλικού, γίνεται μέσα στο μοντέλο υλικού. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν ταυτόχρονα (α) παραμέτρους, δηλαδή πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του υλικού και (β) μεταβλητές κατάστασης ή μεταβλητές ιστορικού, δηλ. πληροφορίες απαραίτητες για τον καθορισμό της τρέχουσας κατάστασής του και, συνεπώς, για τον υπολογισμό της τρέχουσας τάσης και του τρέχοντος εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το μοντέλο υλικού που εισήχθη στο OpenSEES με βάση τον καταστατικό νόμο υλικού που προτάθηκε από τους Μεγαλοοικονομου και Papavasileiou [2] για ορθογωνικά υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένα με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP/ΙΟΠ). Το συγκεκριμένο μοντέλο προστέθηκε στο OpenSEES ως μονοαξονικός καταστατικός νόμος (*UniaxialMaterial*) υπό την ονομασία '*FRPConfinedConcrete*'.

## 2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ '*FRPConfinedConcrete*'

Ο καταστατικός νόμος υλικού '*FRPConfinedConcrete*' προϋπήρχε στο OpenSEES [3] και μοντελοποιούσε έως τώρα τη συμπεριφορά κυκλικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή λαμβάνοντας υπόψη και τον προϋπάρχοντα εγκάρσιο οπλισμό, βάσει του μοντέλου υλικού που προτάθηκε από τους Μεγαλοοικονομου *et al.* [4]. Η συγκεκριμένη υπορουτίνα τροποποιήθηκε ούτως ώστε να μοντελοποιεί τόσο κυκλικές, όσο και ορθογωνικές διατομές περισφιγμένες με μανδύες ΙΟΠ.

Η εντολή που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του εν λόγω μοντέλου υλικού είναι η '*FRPConfinedConcrete*' και συντάσσεται ως εξής:

```
uniaxialMaterial FRPConfinedConcrete $mattag $SecTyp $fpc1 $fpc2 $epsc0 $D $c $Ej  
$Sj $tj $eju $S $fyl $fyh $dlong $dtrans $Es $v0 $k $useBuck
```

για κυκλικές διατομές και:

```
uniaxialMaterial FRPConfinedConcrete $matTag $SecTyp $h $w $rc $fpc $Ej $tj $eju $k
```

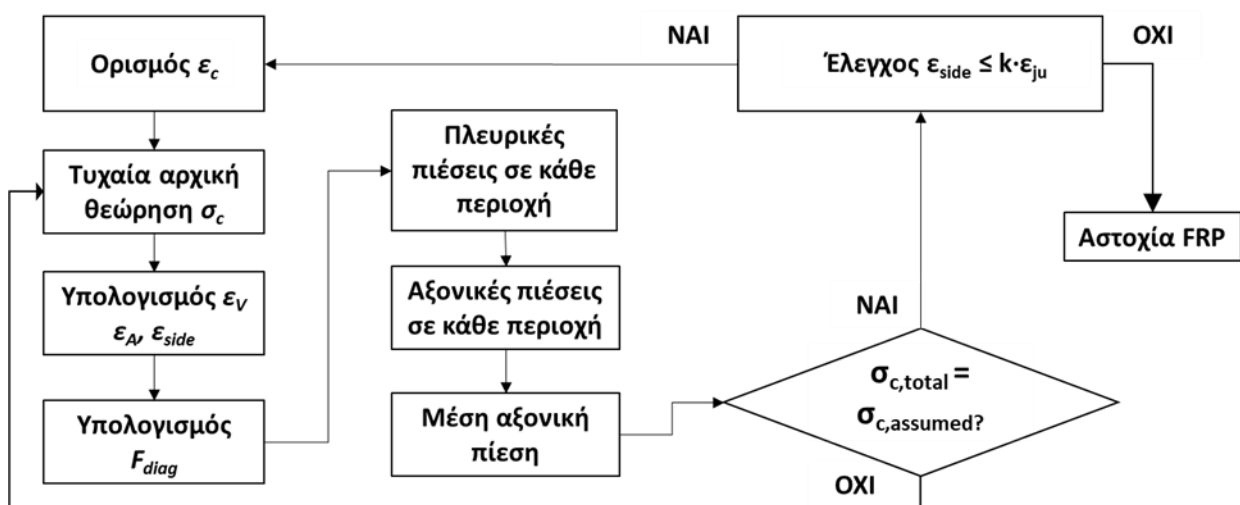
για ορθογωνικές διατομές.

Για την περίπτωση των κυκλικών διατομών, περισσότερες λεπτομέρειες για την εφαρμογή του δίνονται στο [3]. Οι νέες παράμετροι που παρουσιάζονται παραπάνω, αντιστοιχούν στον τύπο διατομής (κυκλική [C] ή ορθογωνική [R]), καθώς και σε μηχανικές ή γεωμετρικές ιδιότητες του ορθογωνικού στοιχείου που είναι περισφιγμένο με ΙΟΠ, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του. Στον Πίνακα 1 περιγράφονται οι μεταβλητές στις οποίες αντιστοιχούν οι σχετικές παράμετροι.

Πίνακας 1: Περιγραφή των ορισμάτων της εντολής 'FRPConfinedConcrete' για ορθογωνικά υποστυλώματα.

Σειρά ορισμού	Όνομα ορίσματος	Μεταβλητή στην οποία αντιστοιχεί
1	<i>matTag</i>	Ετικέτα υλικού
2	<i>SecTyp</i>	Τύπος διατομής
3	<i>h</i>	Ύψος διατομής
4	<i>w</i>	Πλάτος διατομής
5	<i>rc</i>	Ακτίνα στρογγύλευσης γωνιών
6	<i>fpc</i>	Αντοχή σκυροδέματος υφιστάμενου υποστυλώματος
7	<i>Ej</i>	Μέτρο ελαστικότητας μανδύα FRP
8	<i>tj</i>	Πάχος μανδύα FRP
9	<i>εju</i>	Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση μανδύα FRP
10	<i>k</i>	Συντελεστής προσαρμογής της παραμόρφωσης αστοχίας του FRP, ανάλογα με τον τύπο FRP [5]

Το μοντέλο υλικού ξεκινάει με τον ορισμό ενός βήματος παραμόρφωσης και, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίζει συμβατές τάσεις σκυροδέματος. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο υλικού.



Σχήμα 1: Επαναληπτική διαδικασία του μοντέλου υλικού 'FRPConfinedConcrete'.

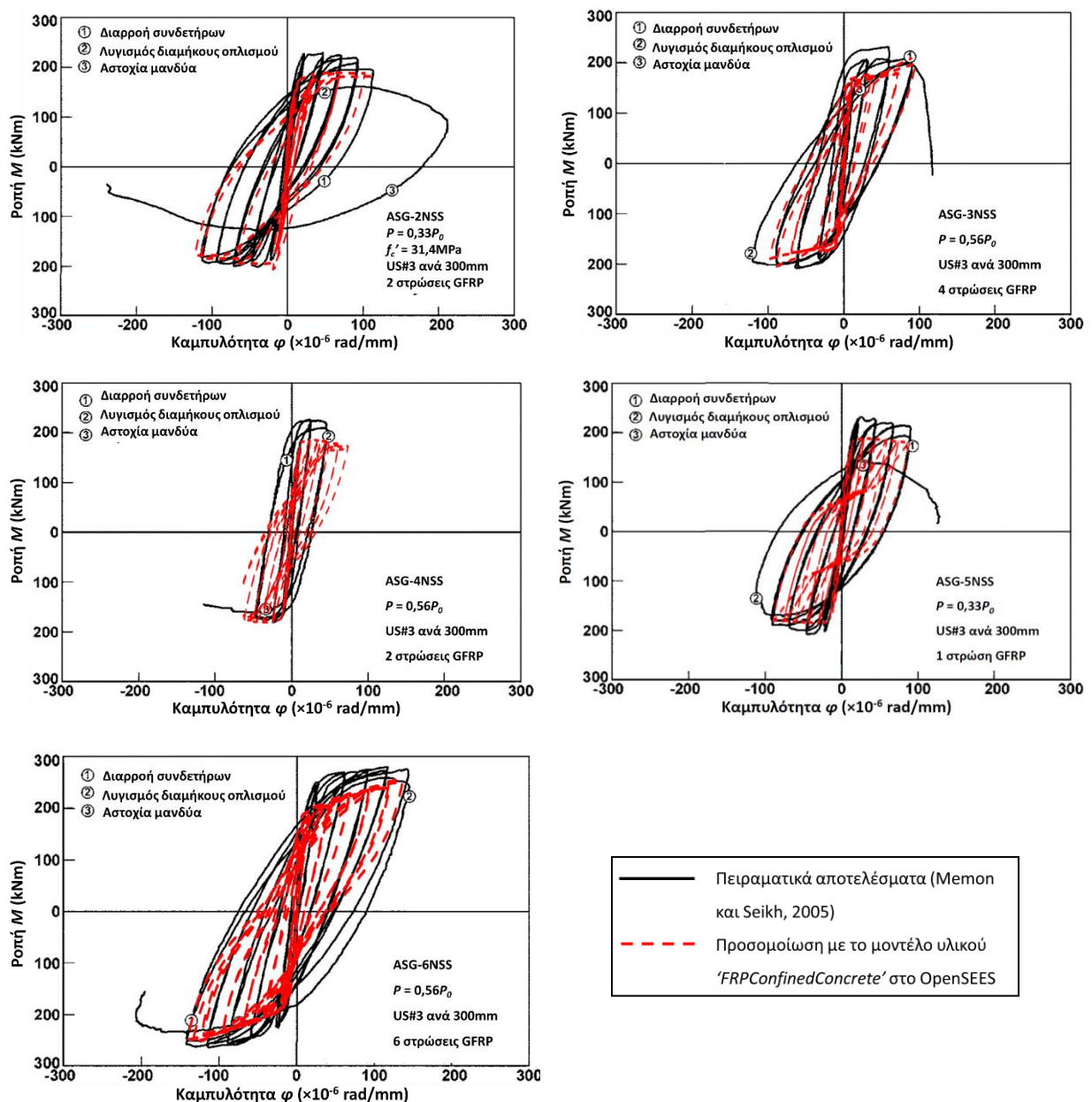
Όπως περιγράφεται στο [2], έχει παρατηρηθεί ότι σε ορθογωνικά υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένα με μανδύες ΙΟΠ, δεν υπάρχουν περιοχές που συμπεριφέρονται ως απερίσφικτες, όπως θεωρούν διάφορα μοντέλα, αλλά περιοχές κοντά στο μανδύα περίσφιξης, όπου οι τάσεις περίσφιξης λόγω του μανδύα ΙΟΠ ασκούνται κυρίως σε μια διεύθυνση. Συνεπώς, οι περιοχές αυτές δεν είναι απερίσφικτες, αλλά υπόκεινται σε διαξονική θλίψη, αντί για τριαξονική, όπως ισχύει στον πυρήνα της ορθογωνικής διατομής. Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρεί συνεπώς δύο περιοχές στη διατομή: (α) μια περιοχή τριαξονικής θλίψης (πυρήνας) και (β) μια περιοχή διαξονικής θλίψης (γύρω από τον πυρήνα). Το μοντέλο υπολογίζει τις δύο αυτές αξονικές τάσεις κάθε περιοχής αντίστοιχα και στη συνέχεια τη μέση αξονική τάση που εφαρμόζεται στη συνολική ορθογωνική διατομή.

### 3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου, επιλέχθηκε η μοντελοποίηση ορθογωνικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με μανδύες ΙΟΠ υπό ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση, η οποία προσομοιώνει σεισμικά φορτία, καθώς και ταυτόχρονο σταθερό θλιπτικό αξονικό φορτίο. Για τη σύγκριση αυτή, επιλέχθηκαν τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τους Memon και Sheikh [6] σε τετραγωνικά υποστυλώματα περισφιγμένα με μανδύες GFRP (μανδύες από Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) κατασκευασμένων με υαλονήματα). Στη συγκεκριμένη εργασία, οι Memon και Sheikh μελέτησαν την αποτελεσματικότητα της χρήσης GFRP στην ενίσχυση τετραγωνικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος μειωμένης πλαστιμότητας ή που έχουν υποστεί βλάβες, για διάφορες τιμές πάχους μανδύα GFRP και τιμές θλιπτικού αξονικού φορτίου. Κάθε ένα από τα οκτώ δοκίμια που δοκιμάστηκαν, αντιστοιχούν σε υποστυλώματα κτιρίων και γεφυρών που κατασκευάστηκαν πριν από το 1971 και αποτελούνται από υποστυλώματα διατομής  $305 \times 305 \times 1473$  mm συνδεδεμένα σε στέλεχος  $508 \times 762 \times 813$  mm που προσομοιώνει τη θεμελίωση του υποστυλώματος. Τα δοκίμια δοκιμάστηκαν υπό σταθερό θλιπτικό αξονικό φορτίο και ανακυκλιζόμενη πλευρική μετατόπιση, ώστε να προσομοιώνει φορτία σεισμού. Στο Σχήμα 2 παρατίθενται τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από το OpenSEES σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα των Memon και Sheikh. Η μοντελοποίηση των υποστυλωμάτων έγινε με στοιχεία κατανεμημένης πλαστιμότητας (στοιχεία ινών), στα οποία το περισφιγμένο με μανδύα ΙΟΠ οπλισμένο σκυρόδεμα μοντελοποιήθηκε με το νέο καταστατικό νόμο ('FRPConfinedConcrete', για  $SecType = R$ ), όπου η απομείωση της δυσκαμψίας κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση λαμβάνει χώρα σύμφωνα με το μοντέλο των Karsan και Jirsa [7], θεωρώντας μηδενική εφελκυστική αντοχή. Ο καταστατικός νόμος που προτάθηκε από τους Menegoto και Pinto [8] χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του διαμήκους οπλισμού. Τα αποτελέσματα ροπής-καμπυλότητας στην πιο κρίσιμη διατομή καταγράφηκαν και προσαρμόστηκαν ούτως ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα των Memon και Sheikh.

Παρατηρείται καλή συσχέτιση των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Περιορισμένη απόκλιση παρατηρείται στα σημεία όπου γίνεται επαναφόρτιση του δοκιμίου, κατά την αντιστροφή της εφαρμοζόμενης μετατόπισης. Αυτή η

διαφοροποίηση στα αποτελέσματα, σχετίζεται με τις παραδοχές της μοντελοποίησης, και συγκεκριμένα με τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο υλικού οι ρωγμές περιγράφονται ως ένα δυαδικό φαινόμενο: πλήρως ανοικτές ρωγμές ή πλήρως κλειστές ρωγμές. Συνεπώς, όταν ο διαμήκης σιδηρός σπλισμός είναι σε θλίψη, οι ρωγμές θεωρούνται κλειστές, οπότε το σκυροδέμα συνεισφέρει στο σύνολό του στη συνολική αντοχή του σκυροδέματος, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει κατά τον εφελκυσμό, όπου η συνεισφορά του είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, καθώς το κλείσιμο των ρωγμών γίνεται ατελώς, προκαλώντας τη σχετική απόκλιση στην απόκριση του δοκιμίου.



Σχήμα 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά σε τετραγωνικά υποστύλωματα οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με GFRP υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση [6].



## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο υλικού που προτάθηκε από τους Μεγαλοοικονομου και Papavasileiou (2019) για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ορθογωνικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύες ΙΟΠ, προστέθηκε στη βάση δεδομένων του λογισμικού OpenSEES. Η εισαγωγή του έγινε στην εντολή '*FRPConfinedConcrete*' που προϋπήρχε και προσομοίωνε μέχρι τώρα μόνο τη συμπεριφορά κυκλικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με FRP με βάση το μοντέλο υλικού που είχε προταθεί από τους Μεγαλοοικονομου *et al.* (2012).

Στην παρούσα εργασία δόθηκαν πληροφορίες σχετικά με τη διάρθρωση της σχετικής υπορουτίνας και τον τρόπο υπολογισμού του συγκεκριμένου καταστατικού νόμου. Επιπλέον, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης στο OpenSEES με το συγκεκριμένο καταστατικό νόμο, με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε τετραγωνικά δοκίμια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων και είναι ενδεικτική της αποτελεσματικότητας προσομοίωσης με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου.

## 5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. and Fenves, G.L. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) Command Language Manual. California, USA: PEER Center; 2006.
2. Μεγαλοοικονομου, Κ. Γ., & Παπαβασίλειου, Γ. Σ. (2019). Analytical Stress-Strain Model for FRP-Confined Rectangular RC Columns. *Front. Built Environ*, 5, 39.
3. Παπαβασίλειου, Γ.Σ., & Μεγαλοοικονομου, Κ.Γ. (2015). Numerical simulation of FRP-confined circular bridge piers using opensees. In *Proceedings of: OpenSees Days Italy (OSD), Second International Conference, University of Salerno, Fisciano, Salerno, Italy*.
4. Μεγαλοοικονομου, Κ. Γ., Monti, G., & Santini, S. (2012). Constitutive Model for Fiber-Reinforced Polymer and Tie-Confined Concrete. *ACI Structural Journal*, 109(4).
5. Lam, L., Teng, J. G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. *Journal of reinforced plastics and composites*, 22(13), 1149-1186. DOI: 10.1177/0731684403035429 376
6. Memon, M. S., Sheikh, S. A. (2005). Seismic resistance of square concrete columns retrofitted with glass fiber-reinforced polymer. *ACI structural journal*, 102(5), 774-783. DOI: 10.14359/14673
7. Karsan, I. D., Jirsa, J. O. (1969). Behavior of concrete under compressive loadings. *Journal of the Structural Division*. 95(12):2543-64.
8. Menegotto, M. (1973). Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Nonelastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending. In *IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Final Report*, Lisbon, Portugal.