

Υποστυλώματα Ωπλισμένου Σκυροδέματος Τετραγωνικής και Ορθογωνικής Διατομής Περισφιγμένα με Ινωπλισμένα Πολυμερή – Πρόβλεψη Αντοχής και Παραμόρφωσης Αστοχίας

Θεοδώρα Φαναραδέλλη – Μαριόλα, Υποψήφια Διδάκτορας Δ.Π.Θ., theofanar@gmail.com

Θεόδωρος Ρουσάκης, Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ., trousak@civil.duth.gr

Αθανάσιος Καραμπίνης, Καθηγητής Δ.Π.Θ., ak@duth.gr

Εισαγωγή

Η χρήση των Ινωπλισμένων Πολυμερών (ΙΩΠ, Fiber Reinforced Polymers, FRP) ως οπλισμού ενίσχυσης σε κατασκευές είναι πολύ δημοφιλής. Τα υποστυλώματα θεωρούνται τα κρισιμότερα δομικά στοιχεία των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως σε μια έντονα σεισμική περιοχή, όπως η Ελλάδα, πολλά από τα υφιστάμενα υποστυλώματα παρουσιάζουν ανεπάρκειες και είναι απαραίτητη η ενίσχυσή τους ώστε να ικανοποιούν τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (ΕΑΚ, EC8). Τα κυριότερα δομικά ΙΩΠ περιλαμβάνουν ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού, παρουσιάζουν κυρίως γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία τους και προσδίδουν στο σκυρόδεμα βελτιωμένη αντοχή και πλαστιμότητα ανηγμένων παραμορφώσεων. Τα ανθρακοϋφάσματα συνδυάζουν εκτός από υψηλή εφελκυστική αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, ενώ το γυαλί έχει κυρίως υψηλή παραμορφωσιμότητα και το αραμίδιο μεγάλη αντίσταση σε κρούση.

Πολλές και σημαντικές επιμέρους πειραματικές έρευνες αφορούν τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων σκυροδέματος κυκλικής διατομής περισφιγμένων εξωτερικά με ΙΩΠ. Ταυτόχρονα πολλές μελέτες υποστυλωμάτων υπό αξονικό φορτίο έχουν επεκταθεί και σε δοκίμια που περιλαμβάνουν χαλύβδινο οπλισμό (εγκάρσιο ή/και διαμήκη). Παράλληλα, έχουν προκύψει σχέσεις και προσομοιώματα τα οποία περιγράφουν ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, προβλέποντας με σημαντική ακρίβεια τη θλιπτική αντοχή και την αξονική παραμόρφωση των δοκιμίων. Εξίσου σημαντική έρευνα έχει γίνει και για δοκίμια μη κυκλικής διατομής. Μία από τις πιο πρόσφατες βάσεις δεδομένων καταρτίστηκε από τους Nistico et al. (2014) και αφορά δοκίμια κυκλικής και τετράγωνης διατομής καθώς και τη συλλογή των προσομοιωμάτων πρόβλεψης της αντοχής και της παραμόρφωσής τους. Παρομοίως οι Lim and Ozbakaloglu (2014) επικεντρώθηκαν στη συλλογή των προσομοιωμάτων αντοχής και παραμόρφωσης για να καταλήξουν στη δική τους πρόταση για ένα ακριβές προσομοίωμα για την πρόβλεψη της αντοχής και της παραμόρφωσης δοκιμίων τετράγωνης διατομής. Ακόμα πιο πρόσφατη είναι και η μελέτη των Triantafillou et al. (2015) η οποία αφορά υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος με λόγο πλευρών 3 και 4, ενισχυμένα με φύλλα CFRP. Εξετάζονται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών αγκυρώσεων, η επιρροή των φύλλων του FRP καθώς και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με τη διατομή των υποστυλωμάτων της μελέτης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε δοκίμια μη κυκλικής διατομής. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν όλα τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας για δοκίμια

τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Συγκεντρώθηκαν συνολικά 786 δοκίμια διαφορετικών διατομών και συντάχθηκε μια μεγάλη βάση δεδομένων και πειραματικών αποτελεσμάτων. Για την επεξεργασία των στοιχείων συγκεντρώθηκαν 23 δημοσιευμένα εμπειρικά προσομοιώματα για την πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής και της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων μη κυκλικής διατομής.

Η Βάση Δεδομένων

Η βάση δεδομένων αποτελείται από περισφιγμένα δοκίμια τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής και καταρτίστηκε ύστερα από εκτενή έρευνα στη βιβλιογραφία. Περιλαμβάνει 58 πειραματικές εργασίες και συνολικά 786 πειράματα που έλαβαν χώρα από το 2001 έως το 2016. Από αυτά τα δοκίμια, τα 155 είναι άοπλα ορθογωνικής διατομής, τα 375 άοπλα τετράγωνης διατομής, τα 172 ωπλισμένα τετράγωνης διατομής και τα 84 ωπλισμένα δοκίμια ορθογωνικής διατομής. Τα δοκίμια αυτά είναι περισφιγμένα με ΙΩΠ άνθρακα, υάλου και αραμιδίου. Επίσης, υπάρχουν και δοκίμια περισφιγμένα με σχοινιά από σύνθετα υλικά (PPFR) τα οποία δοκιμάστηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, του ΔΠΘ (Rousakis and Tourtouras, 2014). Τα περισσότερα δοκίμια υπόκεινται σε μονότονη φόρτιση, ενώ έχουν συμπεριληφθεί και αρκετά που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενη. Επίσης, τα περισσότερα δοκίμια που περιλαμβάνονται στη βάση αστόχησαν εξαιτίας της αστοχίας του ΙΩΠ. Όσον αφορά την περισφιγξη, υπάρχουν δοκίμια περισφιγμένα με ολόσωμο μανδύα και άλλα περισφιγμένα μερικώς με λωρίδες υφασμάτων. Οι στρώσεις των υλικών της περισφιγξης κυμαίνονται από 1 έως 12. Οι ακτίνες καμπυλότητας των δοκιμίων κυμαίνονται από 0 έως 60 mm, οι λόγοι πλευρών (b/h) από 0,18 (ορθογωνικής διατομής) μέχρι 1 (τετράγωνης διατομής). Στα δοκίμια ορθογωνικής και τετράγωνης διατομής η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυμαίνεται από 10 MPa έως 145 MPa. Στα ωπλισμένα δοκίμια, η ονομαστική τάση διαρροής του οπλισμού κυμαίνεται από 200 MPa έως 500 MPa. Τέλος, ο λόγος s/Φ_L κυμαίνεται από 3,5 μέχρι 18,75. Ο λόγος αυτός εκφράζει την ευστάθεια της θλιβόμενης ράβδου που στηρίζεται λόγω ύπαρξης συνδετήρων ανά απόσταση s και διαθέτει δυσκαμψία που εξαρτάται από τη διάμετρό της Φ_L . Αν ο λόγος s/Φ_L είναι υψηλός, η ράβδος μπορεί να χάσει την ικανότητα παραλαβής αξονικού θλιπτικού φορτίου λόγω πρόωρου λυγισμού πριν ακόμη αναπτύξει την πλήρη τάση κράτυνσης (Maalej et al., 2002).

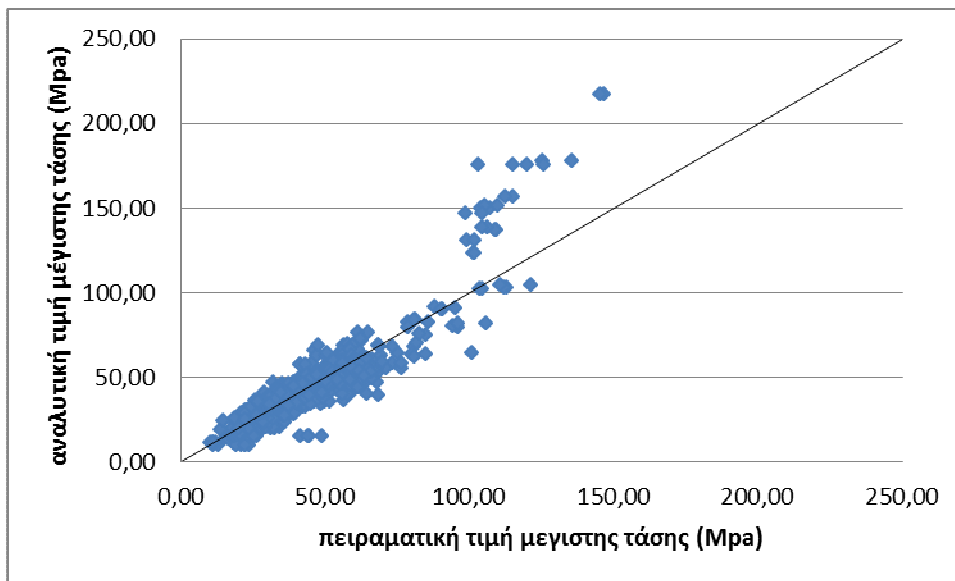
Υφιστάμενα προσομοιώματα πρόβλεψης αντοχής και ανηγμένης παραμόρφωσης αστοχίας

Για την επεξεργασία της βάσης δεδομένων συγκεντρώθηκαν 23 εμπειρικά προσομοιώματα που έχουν δημοσιευθεί από το 2002 μέχρι το 2016 για την πρόβλεψη της μέγιστης αναλαμβανόμενης τάσης και της αντίστοιχης αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων μη κυκλικών διατομής. Κάποια από αυτά μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε δοκίμια τετράγωνης και σε ορθογωνικής διατομής (Shehata et al., 2002), (Chaallal et al., 2003), (Lam and Teng, 2003), (Ilki et al., 2004), (Vintzileou and Panagiotidou, 2007), (Kumutha, 2007), (Youssef et al., 2007), (Wei and Wu, 2012), (Lim and Ozbakkaloglu, 2014), (Triantafillou et al., 2016). Επίσης υπάρχουν προσομοιώματα που εφαρμόζονται μόνο σε δοκίμια τετράγωνης διατομής (Campione & Miraglia, 2003), (Yousef Al-Salloum, 2006), (Wu and Wang, 2009), (Toutanji et al., 2009), (Wu and Zhou, 2010), (Csuka and Kollar, 2012), (Rousakis et al., 2012), (Nistico and Monti, 2014). Τα προσομοιώματα για την πρόβλεψη των ανηγμένων παραμορφώσεων είναι τα (Shehata et al., 2002), (Campione and Miraglia, 2003), (Chaallal et al., 2003), (Lam and Teng, 2003), (Ilki et al., 2004), (Yan and Pantelides, 2007), (Youssef et al., 2007), (Vintzileou and Panagiotidou, 2007), (Ilki et al., 2008), (Wei and Wu, 2012), (Lim and Ozbakkaloglu, 2014) και το πιο πρόσφατο εκείνο των Cao et al. (2015) που στηρίζεται στην

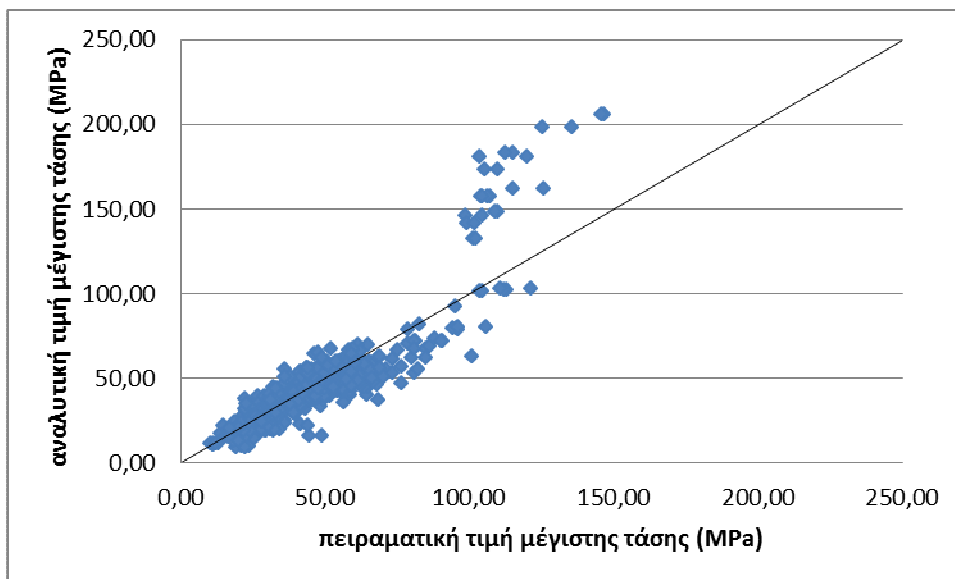
πρόβλεψη της παραμόρφωσης με βάση την ενέργεια που απορροφά το σύστημα όταν υπόκειται σε αξονική φόρτιση. Τέλος, υπάρχουν και προσομοιώματα που εφαρμόζονται σε δοκίμια περισφιγμένα με GFRP (Kumutha, 2007) ή AFRP (Wang and Wu, 2010, 2011). Από όλα τα παραπάνω προσομοιώματα, τα 18 θεωρούν ότι η μέγιστη τιμή τάσης - παραμόρφωσης των δοκιμίων ταυτίζονται με τις αντίστοιχες τιμές που λαμβάνει στην αστοχία (μετελαστικός κλάδος συνεχώς αυξανόμενο αναλαμβανόμενο φορτίο), ενώ τα υπόλοιπα 3 προσομοιώματα θεωρούν ότι τα δοκίμια έχουν διαφορετική μέγιστη τιμή τάσης - παραμόρφωσης και αστοχίας (φθίνοντας μετελαστικός κλάδος διαγράμματος, Youssef et al. 2007, Wei and Wu 2012, Yan and Pantelides 2007).

Κάποια από προσομοιώματα, λόγω των περιορισμών που θέτουν, μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύ μικρό μέρος του συνόλου των υφιστάμενων δοκιμίων και το δείγμα θεωρείται ανεπαρκές ώστε να προκύψει αξιόπιστη στατιστική επεξεργασία. Ειδικότερα, το προσομοίωμα των Lim & Ozbakkaloglu (2014), έχει πολύ περιορισμένο εύρος εφαρμογής σε 343 δοκίμια λόγω των πολλών περιορισμών που θέτουν οι ίδιοι ερευνητές. Ωστόσο, παρουσιάζει μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 13,3% και μέσο όρο του λόγου αναλυτικής προς πειραματική τιμή της τάσης 0,90, όταν εφαρμόζεται σε υποστυλώματα με λόγο $2r/d_c \geq 0.15$ και μέτρο ελαστικότητας του ΙΩΠ $100.000 \text{ MPa} \leq E_f \leq 640.000 \text{ MPa}$. Το ίδιο ισχύει και για τα προσομοιώματα που εφαρμόζονται σε δοκίμια με συγκεκριμένο είδος ΙΩΠ.

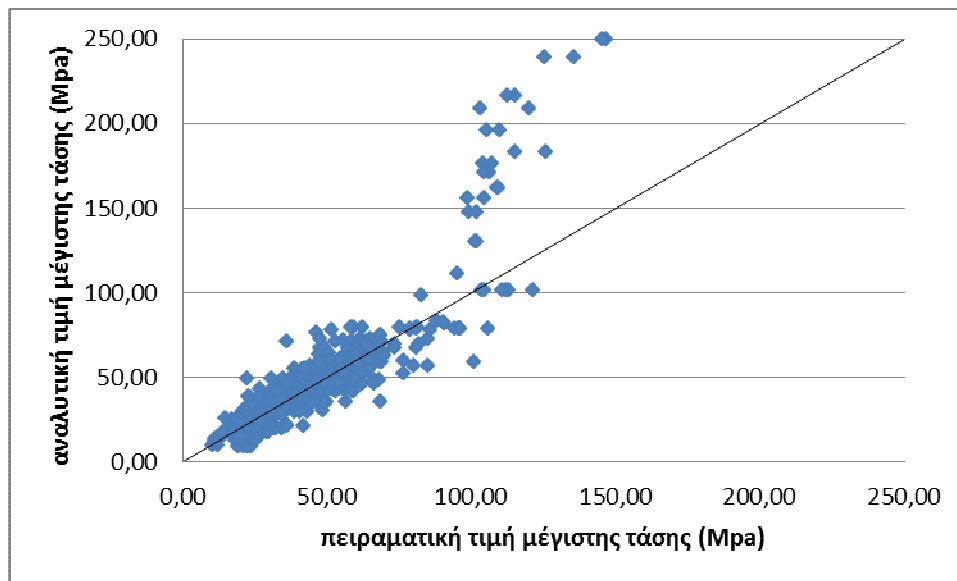
Εξετάζοντας το σχήμα των δοκιμίων και το κατά πόσο επηρεάζει την αντοχή τους, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής, άοπλα και ωπλισμένα, παρουσιάζουν αυξημένο μέσο απόλυτο σφάλμα και του λόγο των αναλυτικών προς τις πειραματικές τιμές των αποτελεσμάτων τους, σε σχέση με τα δοκίμια τετράγωνης διατομής, στα περισσότερα προσομοιώματα. Από τα προσομοιώματα όπου ταυτίζονται οι μέγιστες τιμές τάσης - παραμόρφωσης με την αστοχία, το προσομοίωμα των Chaallal et al. (2003) δίνει το μεγαλύτερο μέσο απόλυτο σφάλμα από όλα τα προσομοιώματα ίσο με 75% και μέσο όρο αναλυτικής προς πειραματική τιμή 1,73 αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος και για ωπλισμένα και για άοπλα δοκίμια τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής. Τα μικρότερα σφάλματα και την καλύτερη διασπορά τιμών για την πρόβλεψη της αντοχής, για ολόκληρη τη βάση δεδομένων (δοκίμια τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής, ωπλισμένα και άοπλα) δίνουν τα προσομοιώματα των Wei and Wu (2012) με μέσο απόλυτο σφάλμα 14,2% και μέσο όρο λόγων 0,98, των Piki et al. (2004) με τιμές αντίστοιχα 14,5% και μέσο όρο λόγων 0,98 καθώς και των Yan and Pantelides (2007) με τιμές 16,3% και 1,02. Στα σχήματα 1 έως 3 φαίνονται η συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των προσομοιωμάτων που δίνουν τις ακριβέστερες προβλέψεις, για τη μέγιστη τάση όλων των δοκιμίων της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό, και γίνεται η σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή.



Σχήμα 1: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Wei and Wu (2012) για τη μέγιστη αντοχή των 786 δοκιμίων τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή

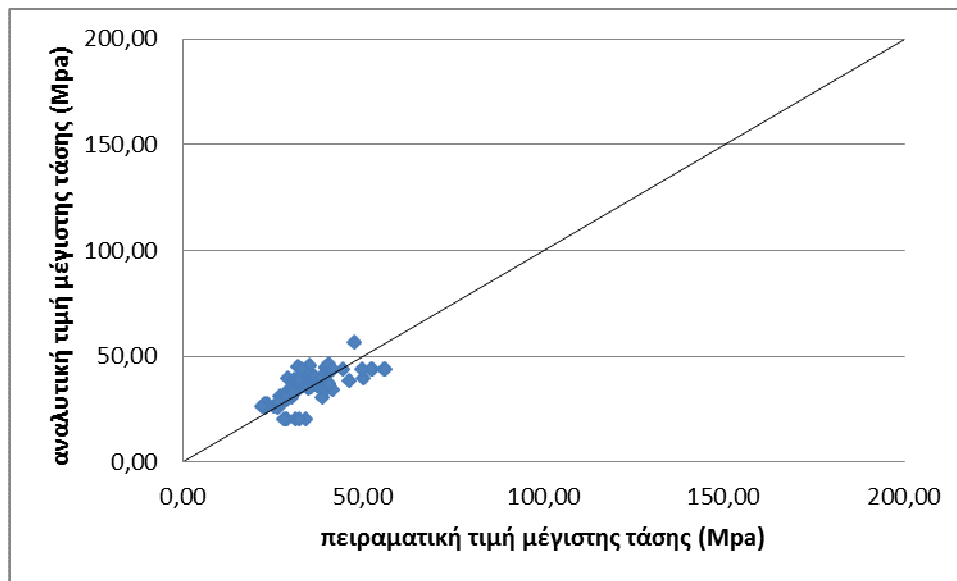


Σχήμα 2: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Ilki et al. (2004) για τη μέγιστη αντοχή των 786 δοκιμίων τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή

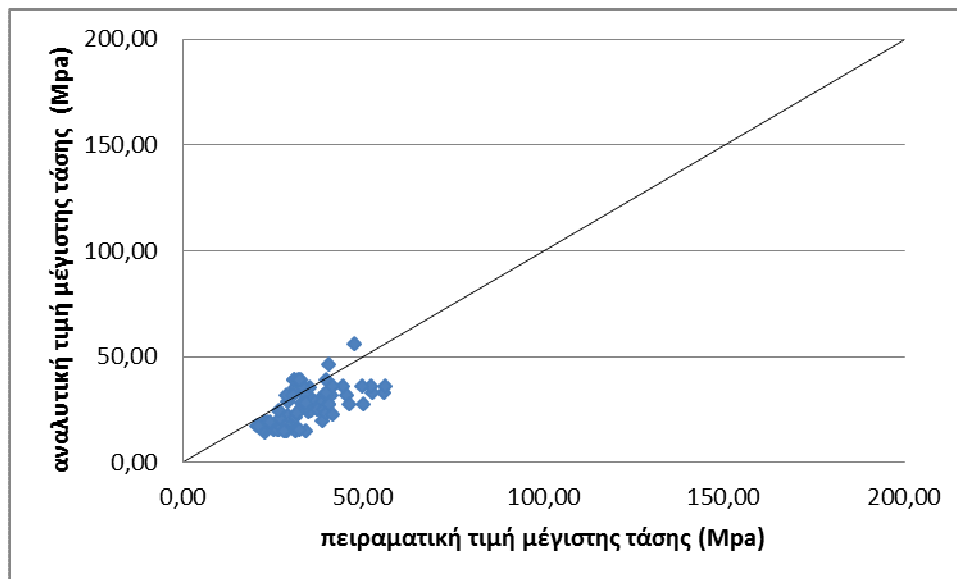


Σχήμα 3: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Yan and Pantelides (2007) για τη μέγιστη αντοχή των 786 δοκιμών τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή

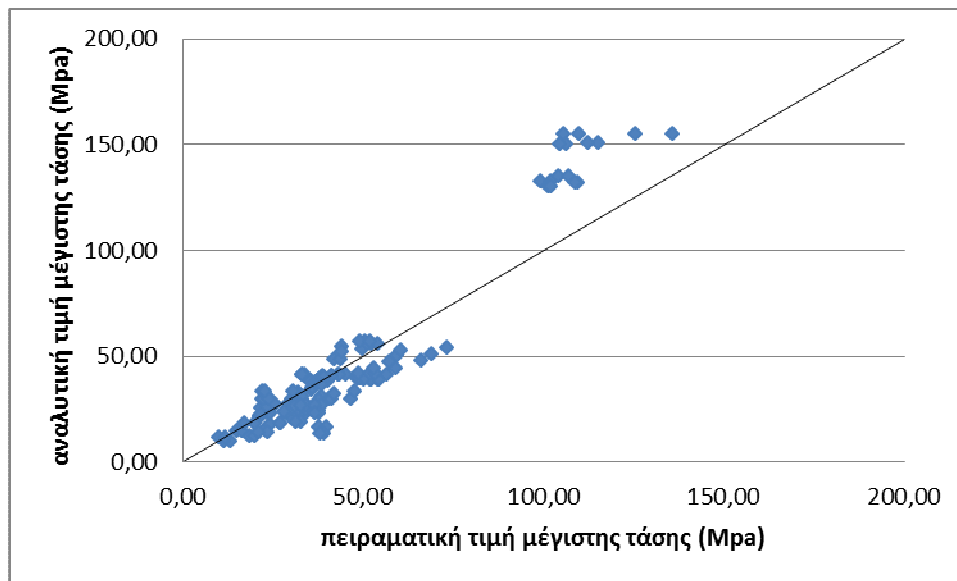
Πιο συγκεκριμένα, για τα 76 ωπλισμένα δοκίμια ορθογωνικής διατομής, την καλύτερη πρόβλεψη της μέγιστης αναλαμβανόμενης τάσης παρέχει το προσομοίωμα των Pki et al. (2004) με σφάλμα 11,6% και μέσο όρο λόγων 1,03, όταν στην αντοχή προστεθεί και η επιρροή του χαλύβδινου οπλισμού. Επίσης, με την προσθήκη της επιρροής του εσωτερικού οπλισμού, το προσομοίωμα των Triantafillou et al. (2016) για τα ωπλισμένα δοκίμια ορθογωνικής διατομής δίνει μέσο απόλυτο σφάλμα στην πρόβλεψη της αντοχής 13,4% και μέσο λόγο αναλυτικής προς πειραματική τιμή 1,03. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα προσομοιώματα δε λαμβάνουν υπόψη τους τον εσωτερικό οπλισμό και γι' αυτό στη συγκεκριμένη επεξεργασία έχει προστεθεί. Έτσι για όλα τα προσομοιώματα παρατηρείται βελτίωση του μέσου απόλυτου σφάλματος αλλά και του μέσου λόγου της αναλυτικής προς πειραματική τιμή. Για τα 155 άοπλα δοκίμια ορθογωνικής διατομής, το προσομοίωμα των Shehata et al. (2002) δίνει το μικρότερο μέσο απόλυτο σφάλμα πρόβλεψης 18,8% και μέσο όρο λόγων 0,94. Για τα 375 άοπλα δοκίμια τετραγωνικής διατομής παρατηρείται ότι τα περισσότερα προσομοιώματα δίνουν αρκετά αξιόπιστες τιμές. Το προσομοίωμα των Wu and Zhou (2010) δίνει το μικρότερο μέσο απόλυτο σφάλμα στην πρόβλεψη 13,6% και μέσο όρο λόγων 0,98. Τα αναλυτικά προσομοιώματα εφαρμόστηκαν και στα 161 ωπλισμένα δοκίμια τετραγωνικής διατομής. Το προσομοίωμα των Wu and Zhou (2010) δίνει μικρότερο μέσο απόλυτο σφάλμα 11,6% και μέσο όρο λόγων 0,96, με την προσθήκη της επιρροής του χαλύβδινου οπλισμού. Στα σχήματα 4 έως 6 παρουσιάζεται η συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των προσομοιωμάτων για τη μέγιστη τάση των 239 δοκιμών ορθογωνικής διατομής, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και στα σχήματα 7 και 8 τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα 547 δοκίμια τετράγωνης διατομής και η σύγκρισή τους με τη πειραματική τιμή της μέγιστης αναλαμβανόμενης τάσης.



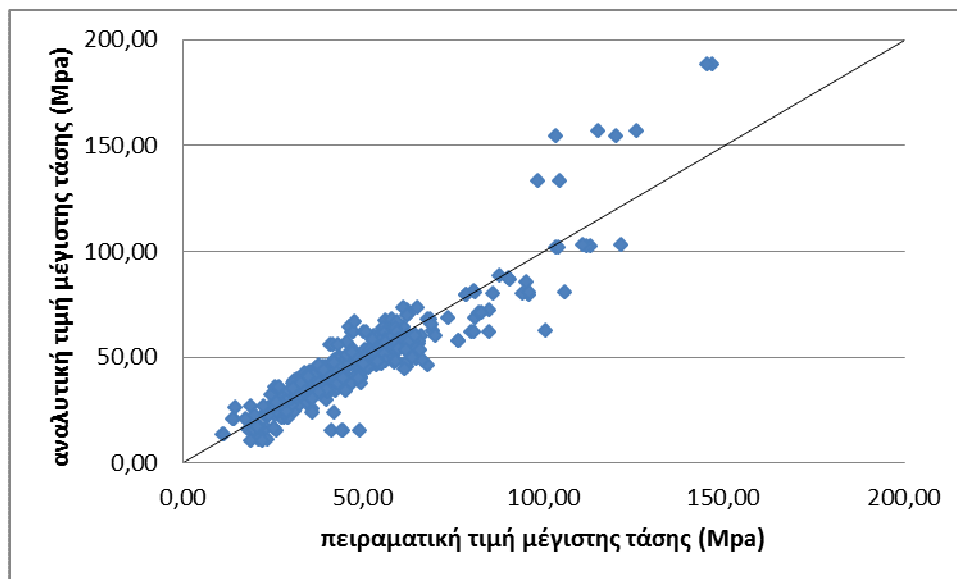
Σχήμα 4: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Ilki et al. (2004) για τη μέγιστη αντοχή των 76 δοκιμίων ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή



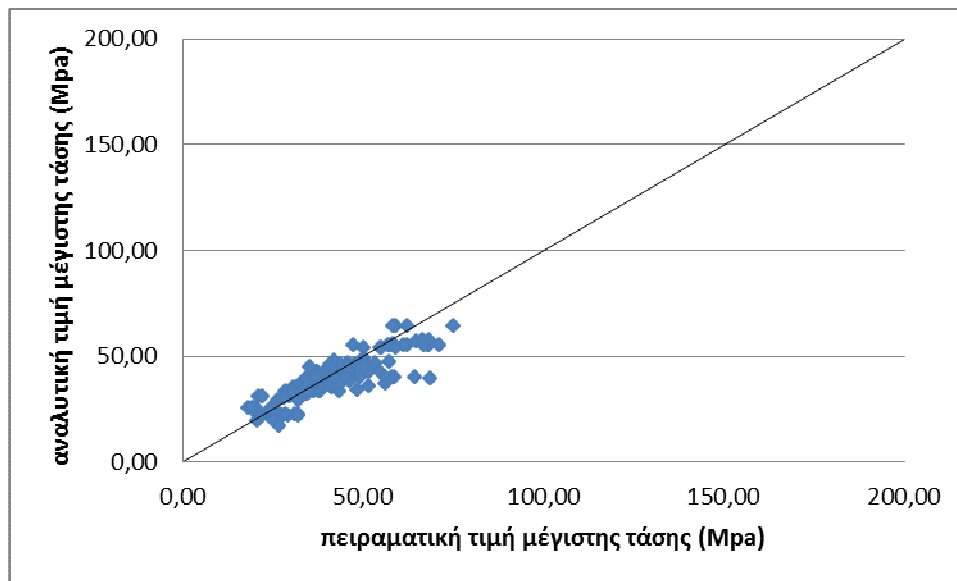
Σχήμα 5: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Triantafillou et al. (2016) για τη μέγιστη αντοχή των 76 δοκιμίων ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή



Σχήμα 6: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Shehata et al. (2002) για τη μέγιστη αντοχή των 155 δοκιμίων ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή



Σχήμα 7: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Wang and Wu (2009) για τη μέγιστη αντοχή των 375 δοκιμίων τετραγωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή



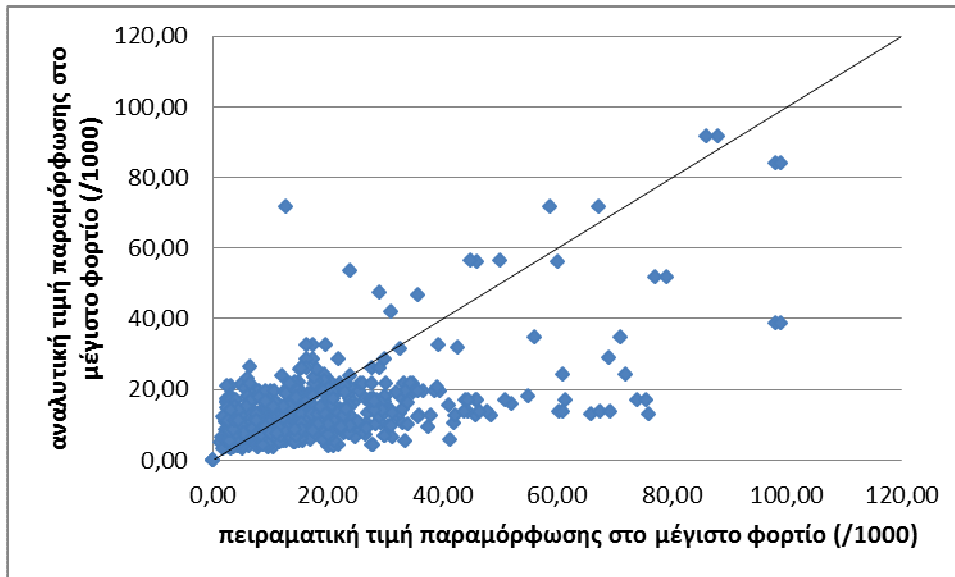
Σχήμα 8: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Wu and Zhou (2010) για τη μέγιστη αντοχή των 161 δοκιμίων τετραγωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική αντοχή

Στα σχήματα 1,2,3,6 και 7 παρατηρείται ότι για δοκίμια με υψηλής αντοχής σκυροδέματα και πολλές στρώσεις ΙΩΠ οι προβλέψεις των προσομοιωμάτων είναι σημαντικά ανασφαλείς.

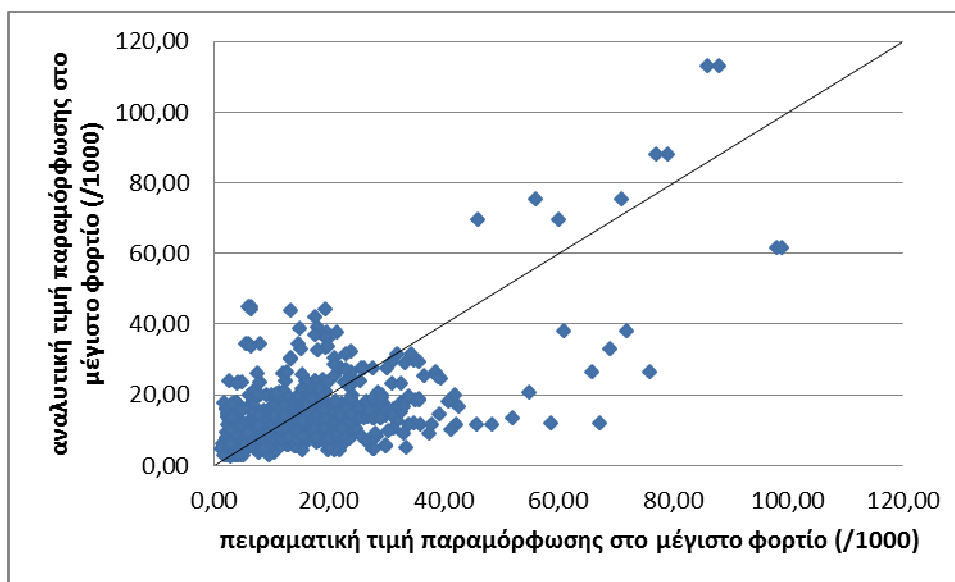
Για την πρόβλεψη της ανηγμένης παραμόρφωσης στη μέγιστη τιμή του φορτίου, παρατηρείται μεγάλο μέσο απόλυτο σφάλμα και αποκλίσεις του λόγου αναλυτικής προς πειραματική τιμή από τη μονάδα, σε όλα τα αναλυτικά προσομοιώματα της εργασίας, ειδικά στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής. Τα μικρότερα σφάλματα και την καλύτερη διασπορά τιμών για την πρόβλεψη της ανηγμένης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, για ολόκληρη τη βάση δεδομένων δίνουν τα προσομοιώματα των Shehata et al. (2002), με μέσο απόλυτο σφάλμα 74,8% και μέσο όρο λόγων 1,31, των Chaallal et al. (2003) με μέσο απόλυτο σφάλμα 75,4% και μέσο όρο λόγων 1,36 και των Cao et al. (2016) με μέσο απόλυτο σφάλμα 84,7% και μέσο όρο λόγων 1,35. Στα σχήματα 9 έως 11 παρουσιάζεται η συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των προσομοιωμάτων που δίνουν τις καλύτερες προβλέψεις για την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο των 786 δοκιμίων τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με την αντίστοιχη πειραματική. Στα υπόλοιπα προσομοιώματα οι προβλέψεις για την ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο είναι πάνω από το 87% για το μέσο απόλυτο σφάλμα όλων των δοκιμίων. Το μικρότερο σφάλμα προκύπτει για την κατηγορία δοκιμίων τετράγωνης διατομής με οπλισμό και για το προσομοίωμα των Chaallal et al. (2003) με μέσο απόλυτο σφάλμα 56,7% και μέσο όρο λόγων 1,13.

Επιπλέον, τα προσομοιώματα που προβλέπουν τις τιμές παραμόρφωσης στην αστοχία υποστρωμάτων και με φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά, παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερα σφάλματα (Youssef et al. 2007, Wei and Wu 2012, Yan and Pantelides 2007). Την καλύτερη πρόβλεψη παρέχει το προσομοίωμα Wei and Wu (2012) με μέσο απόλυτο σφάλμα 145% και μέσο όρο λόγων 1,88. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για αντισεισμικές ενισχύσεις το κρίσιμο ζητούμενο είναι η πρόβλεψη της πλαστιμότητας ανηγμένων παραμορφώσεων του περισιφισμένου σκυροδέματος που ορίζεται στην αστοχία τόσο για κρατυνόμενη όσο και για φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων. Επιπλέον, τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν

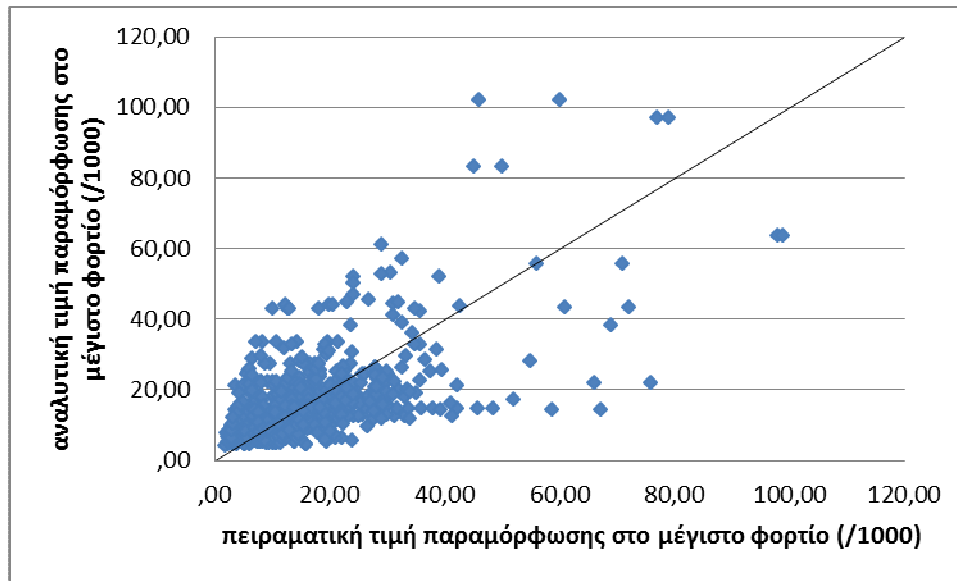
ότι στα υποστυλώματα ΩΣ πλήρους κλίμακας ενισχυμένα με FRP (De Luca et al., 2011 κλπ) η φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για τη χρήση καταστατικών προσομοιωμάτων που να έχουν τη δυνατότητα να περιγράψουν την ενδεχόμενη φθίνουσα μετελαστική συμπεριφορά ώστε να εφαρμοστεί αξιόπιστο κριτήριο αστοχίας.



Σχήμα 9: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Shehata et al. (2002) για την ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο των 786 δοκιμίων της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική παραμόρφωση



Σχήμα 10: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Chaallal et al. (2003) για την ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο των 786 δοκιμίων της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική παραμόρφωση



Σχήμα 11: Συσχέτιση των αναλυτικών προβλέψεων των Cao et al. (201) για την ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο των 786 δοκιμίων της βάσης δεδομένων, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και σύγκρισή τους με τη μέγιστη πειραματική παραμόρφωση

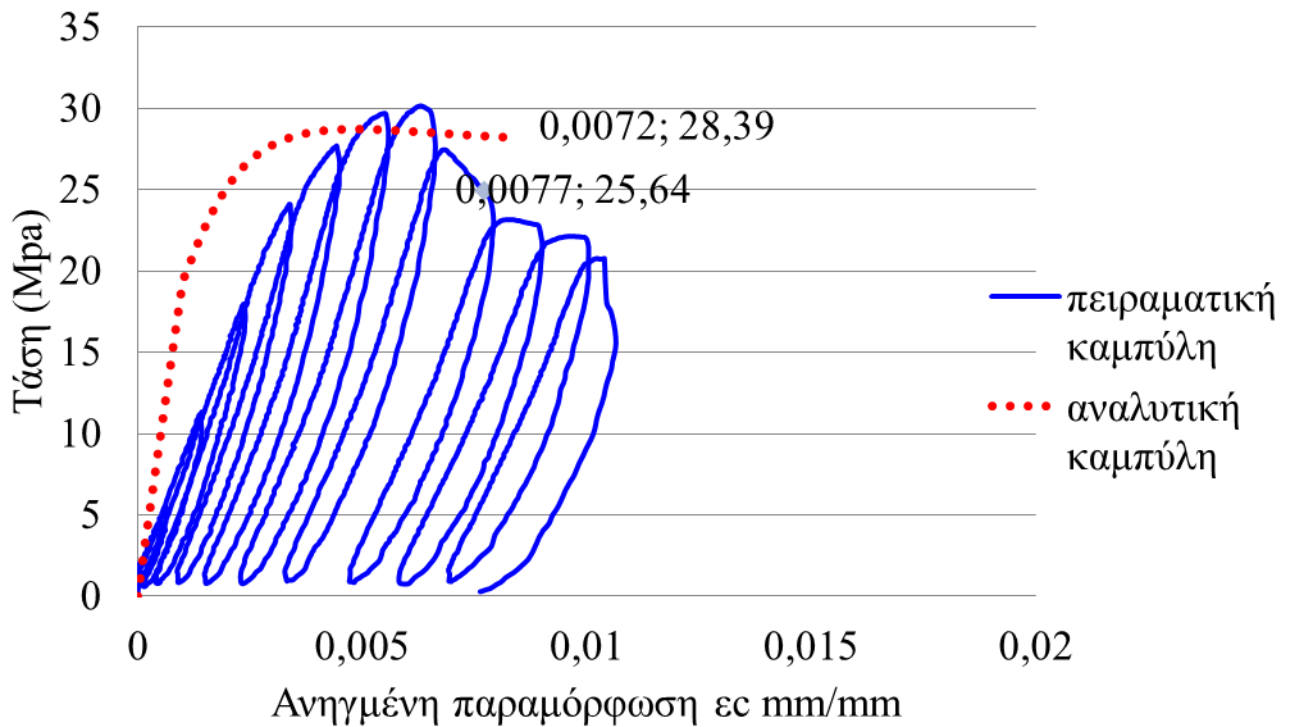
Πρόβλεψη τάσης αστοχίας και ανηγμένης παραμόρφωσης αστοχίας σε υποστυλώματα με φθίνοντα μετελαστικό κλάδο

Παρουσιάζεται το προσομοίωμα των Rousakis and Tourtouras (2015) για την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων κυκλικής και μη διατομής. Το προσομοίωμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε περισφιγμένα με ΙΩΠ δοκίμια κάθε είδους διατομής, με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Στηρίζεται στην πρόταση του Mander et al. (1998) για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό τριαξονική φόρτιση. Οι Wang and Restrepo (2001) είχαν παρουσιάσει ένα προσομοίωμα που στηριζόταν στην πρόβλεψη του Mandler et al. (1998) για τη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής που είναι περισφιγμένα με ΙΩΠ και έχουν και εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Λαμβάνει υπόψη του τη διακριτοποίηση της διατομής τους σκυροδέματος σε επαρκώς περισφιγμένα και άοπλα τμήματα παραβολικού σχήματος. Ικανοποιεί τις απλές εξισώσεις της εγκάρσιας ισορροπίας δυνάμεων στη διατομή εξαιτίας της διαστολής του σκυροδέματος και είναι περισφιγμένο με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό ή/και ΙΩΠ. Λαμβάνοντας υπόψη τη φέρουσα ικανότητα της κάθε διακριτής περιοχής του σκυροδέματος και του κάθε διαμήκους οπλισμού χάλυβα για επιβαλλόμενη αξονική παραμόρφωση, το προσομοίωμα υπολογίζει το συνολικό αναλαμβανόμενο φορτίο για ολόκληρο το δοκίμιο. Στο προσομοίωμα των Wang and Restrepo (2001) η εκτίμηση των παραμορφώσεων, λόγω της αξονικής βράχυνσης του σκυροδέματος, βασίζεται στην παραδοχή ότι ο λόγος των πλευρικών προς τις αξονικές παραμορφώσεις είναι σταθερός και ίσος με 0,5. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα ο λόγος των πλευρικών προς τις αξονικές παραμορφώσεις καθώς και η φέρουσα ικανότητα κάθε διακριτής περιοχής του σκυροδέματος και του εσωτερικού οπλισμού υπολογίζονται με επαναληπτική διαδικασία.

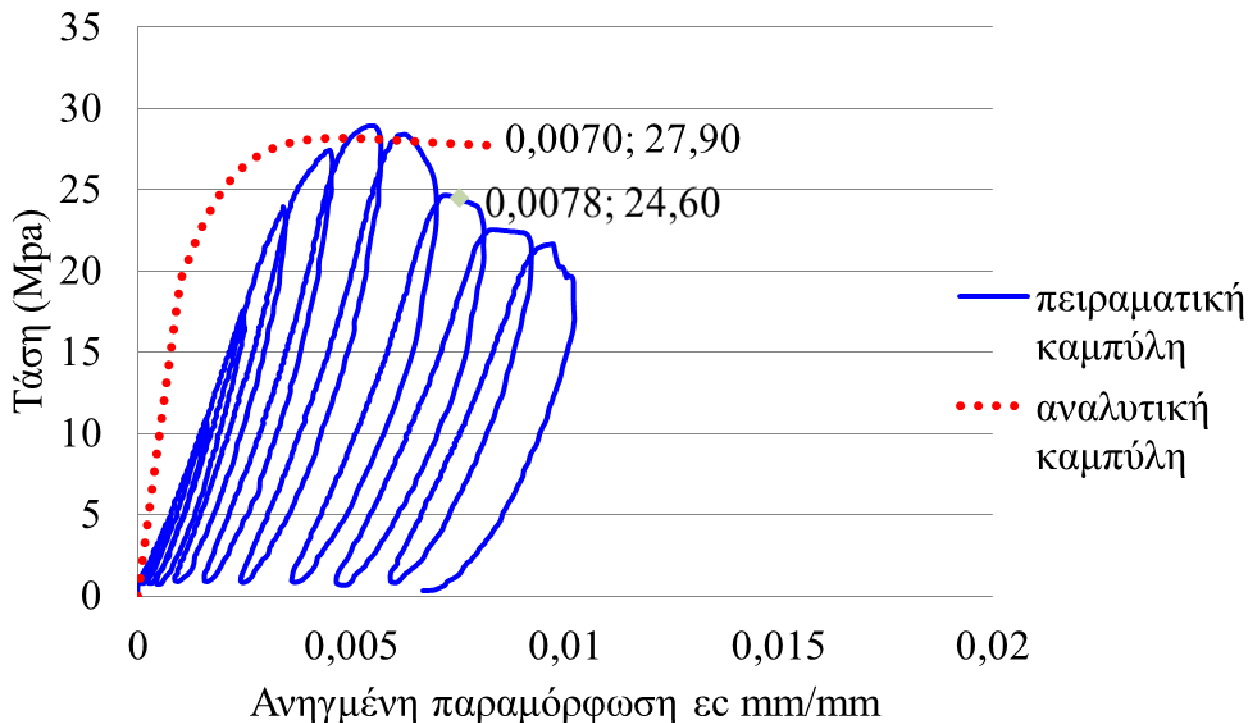
Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού είναι παρόμοια με εκείνη των Spoelstra and Monti (Rousakis and Tourtouras, 2015).

Οι προβλέψεις του προτεινόμενου προσομοιώματος συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές για 3 δοκίμια ορθογωνικής διατομής των Rousakis, Tsakiris, Karabinis (2012) που περιλαμβάνονται στη βάση και είναι περισφιγμένα με ΙΩΠ και ενισχυμένα με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό.

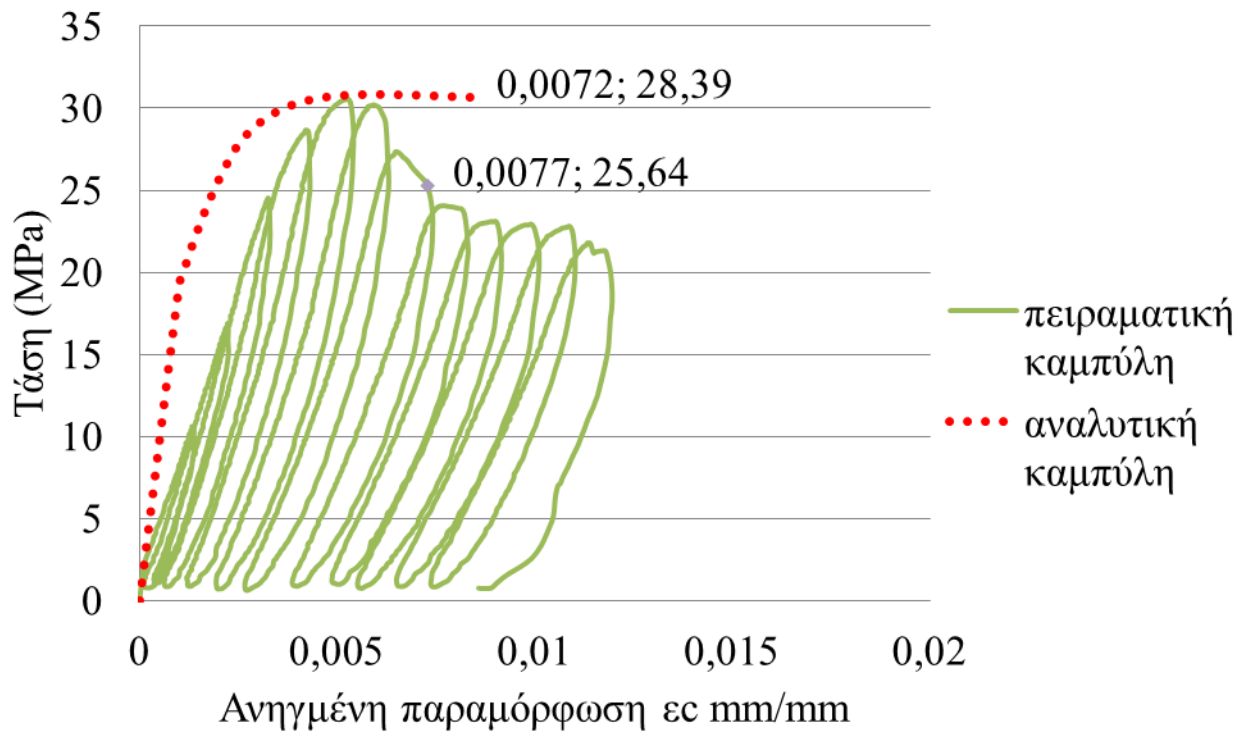
Στα σχήματα 12 έως 14 συγκρίνονται οι αναλυτικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες πειραματικές.



Σχήμα 12: Τάση – Ανηγμένη παραμόρφωση για το δοκίμιο C16_S8_S5,5_75_L2 των Rousakis et al. (2012)



Σχήμα 13: Τάση – Ανηγμένη παραμόρφωση για το δοκίμιο C16_S8_S5,5_150_L2 των Rousakis et al. (2012)



Σχήμα 14: Τάση – Ανηγμένη παραμόρφωση για το δοκίμιο C16_B8_S5,5_75_L2 των Rousakis et al. (2012)

Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου προσομοιώματος συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων των Youssef et al. (2006), Yan and Pantelides (2007) και Wei and Wu (2012) για την ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας (πίνακας 1).

Όνομα δοκιμίου	f _{cu}	ε _{cu}	Youssef et al. (2006)		Σφάλμα		Λόγος αναλ/πειρ τιμή		Yan and Pantelides (2007)		Σφάλμα		Λόγος αναλ/πειρ τιμή		Wei and Wu (2012)		Σφάλμα		Λόγος αναλ/πειρ τιμή		Rousakis and Tourtouras (2015)		Σφάλμα		Λόγος αναλ/πειρ τιμή	
			f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}	f _{cu}	ε _{cu}
C16_S8_S5,5_75_L2	25,6	0,0077	23,3	-	-9,2%	-	0,91	-	25,2	0,034	-1,8%	342,4%	0,98	4,42	25,3	0,0162	-1,5%	110,1%	0,98	2,10	28,4	0,007	10,7%	-6,9%	1,11	0,93
C16_S8_S5,5_150_L2	24,6	0,0078	23,3	-	-5,4%	-	0,95	-	25,2	0,034	2,3%	337,3%	1,02	4,37	25,3	0,0158	2,6%	101,7%	1,03	2,02	27,9	0,007	13,4%	-10,5%	1,13	0,90
C16_B8_S5,5_75_L2	26,0	0,0073	23,3	-	-10,4%	-	0,90	-	25,2	0,034	-3,1%	369,8%	0,97	4,70	25,3	0,0162	-2,8%	122,4%	0,97	2,22	30,7	0,008	18,3%	4,4%	1,18	1,04

Πίνακας 1: Πειραματικές τιμές 3 δοκιμίων ορθογωνικής διατομής με ολισμό, ενισχυμένα με FRP (Rousakis et al., 2012) και αναλυτικές προβλέψεις των 4 προσομοιωμάτων της βιβλιογραφίας για τις τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις στην αστοχία.

Συμπεράσματα

Η εργασία επικεντρώνεται σε υποστυλώματα τετράγωνης και ορθογωνικής διατομής, με ή χωρίς εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό. Από την επεξεργασία 786 δοκιμίων και τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις 23 εμπειρικών προσομοιωμάτων για την πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής και της αξονικής παραμόρφωσης των υποστυλωμάτων προκύπτουν τα παρακάτω:

- Η μέγιστη τάση μπορεί να προβλεφθεί με το προσομοίωμα των Wei and Wu (2012) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 14,2% και μέσο όρο λόγων 0,98 για όλα τα δοκίμια. Ακριβέστερη πρόβλεψη του μέγιστου αναλαμβανόμενου φορτίου προκύπτει για δοκίμια τετράγωνης διατομής με οπλισμό από το προσομοίωμα των Wu and Zhou (2010) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 11,6% και μέσο όρο λόγων 0,96, για δοκίμια τετράγωνης διατομής χωρίς οπλισμό από το προσομοίωμα των Wu and Zhou (2010) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 13,6% και μέσο όρο λόγων 0,98, για δοκίμια ορθογωνικής διατομής με οπλισμό από το προσομοίωμα των Ilki et al. (2004) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 11,6% και μέσο όρο λόγων 1,03, και για δοκίμια ορθογωνικής διατομής χωρίς οπλισμό από το προσομοίωμα των Shehata et al. (2002) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 18,8% και μέσο όρο λόγων 0,94.
- Η ανηγμένη παραμόρφωση στη μέγιστη τάση μπορεί να προβλεφθεί με το προσομοίωμα των Shehata et al. (2002) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος 74,8% και μέσο όρο λόγων 1,31 για όλα τα δοκίμια. Ακριβέστερη πρόβλεψη της παραμόρφωσης προκύπτει για δοκίμια ορθογωνικής διατομής χωρίς οπλισμό και δοκίμια τετράγωνης διατομής με οπλισμό με τιμές 60,1% και 63,3% και μέσο όρο λόγων 1,07 και 1,24 αντίστοιχα από το ίδιο προσομοίωμα.
- Η πρόβλεψη της ανηγμένης παραμόρφωσης στην αστοχία υποστυλωμάτων με φθίνουσα μεταλαστική συμπεριφορά, παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερα σφάλματα. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση καταστατικών προσομοιωμάτων τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων με ευαισθησία σε φθίνουσα μεταλαστική συμπεριφορά των υποστυλωμάτων. Το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα για την πλήρη καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής με εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό, περισφιγμένων με ΙΩΠ παρέχει ικανοποιητική πρόβλεψη για τα εξεταζόμενα δοκίμια.

Βιβλιογραφία

- Al-Salloum Y.A. (2007), “Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates”, *Composites: Part B* 38 (2007) 640–650.
- Campione G., Miraglia N. (2001), “Strength and strain capacities compression members reinforced with FRP”, *Cement and Concrete Composites* 25 (2003) 31-41.
- Cao Y.-G., Wu Y.-F., Li X.-Q. (2016), “Unified model for evaluating ultimate strain of FRP confined concrete based on energy method”, *Construction and Building Materials* 103 (2016) 23–35.
- Chaallal O., Shahawy M. and Hassan M. (2003), “Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapping”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No.3, August 1, 2003.
- Csuka B., Kollar L. (2012), “Fiber-reinforced plastic-confined rectangular columns subjected to axial loading”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31(7) 481–493.
- De Luca A., Nardone F., Matta F., Nanni A., Lignola G., Prota A. (2011), “Structural Evaluation of Full-Scale FRP-Confined Reinforced Concrete Columns”, *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000152, 112-123.
- Ilki A., Kumbasar N., Koc V. (2004), “Low strength concrete members externally confined with FRP sheets”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 18, No. 2 (2004) 167-194.
- Ilki A., Peker O., Karamuk E., Demir C., Kumbasar N. (2008), “FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0899-1561 2008 20:2 (169).
- Kumutha R., Vaidyanathan R., Palanichamy M.S. (2007). “Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP”, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 609–615.

- Lam L, Teng J (2003), “Design - oriented stress - strain model for FRP - confined concrete”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2003 22: 1149.
- Lin J.C., Ozbakkaloglu T. (2014), “Design Model for FRP-Confined Normal and High – Strength Concrete Square and Rectangular Columns”, *Magazine of Concrete Research*, May 2014.
- Maalej M., Tangwongswal S., Paramasivam P. (2003), “Modeling of rectangular RC columns strengthened with FRP”, *Cement and Concrete Composites* 25 (2003) 263-276.
- Nistico N., Pallini F., Rousakis T., Wu Y.-F., Karabinis A. (2014), “Peak strength and ultimate strain prediction for FRP confined square and circular concrete sections”, *Composites: Part B* 67 (2014) 543–554.
- Rousakis T.C. (2005), “Mechanical Behaviour of Concrete Confined by Composite Materials”, PhD Thesis, D.U.Th., *Civil Engineering Department, Xanthi, Greece (in Greek)*.
- Rousakis T.C., Karabinis A.I. (2008), “Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects”, *Materials and Structures* (2008) 41:1595–1611.
- Rousakis T.C., Tourtouras I.S. (2014), “RC columns of square section – Passive and active confinement with composite ropes”, *Composites: Part B* 58 (2014) 573–581.
- Rousakis T.C., Tourtouras I.S. (2015), “Modeling of passive and active external confinement of RC columns with elastic material”, *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.* 95, No. 10, 1046–1057.
- Shehata A.E.M., Carneiro L.A.V., Shehata L.C.D. (2002), “Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 35, January-February 2002, pp 50-58.
- Spoelstra M.R., Monti G. (1999), “FRP-confined concrete model”, *ASCE Journal of Composites for Construction* 3(3), 143–150.
- Triantafillou T.C., Choutopoulou E., Fotaki E., Skorda M., Stathopoulou M., Karlos K. (2016), “FRP confinement of wall-like reinforced concrete columns”, *Materials and Structures* (2016) 49:651–664.
- Vintzileou E., Panagiotidou E. (2008), “An empirical model for predicting the mechanical properties of FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 841–854.
- Wang Y.-F., Wu H.-L. (2011), “Size Effect of Concrete Short Columns Confined with Aramid FRP Jackets”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 4, August 1, 2011.
- Wei Y.-Y., Wu Y.-F. (2012), “Unified stress–strain model of concrete for FRP-confined columns”, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 381–392.
- Wu Y.-F., Wei Y.-Y. (2010), “Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns”, *Engineering Structures* 32 (2010) 32-45.
- Wu Y.-F., Zhou Y.-W. (2010), “Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP”, *J. Compos. Constr.* 2010.14:175-184.
- Yan Z., Pantelides C.P., Reaveley L.D. (2006) “Experimental Investigation on Shape Modify Method of Rectangular Columns Confined with FRP Composites”, *Composites in Construction 2005 – Third International Conference Lyon, France, July 11 – 13, 2005*.