



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

«ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ  
ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ  
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΪΣΙΔΩΡΟΥ ΣΩΤΗΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Βόλος, Ιούλιος 2017

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου για την συνεχή και αδιάκοπη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ τον κ. Παπαθεοχάρη Θεοχάρη, υποψήφιο Διδάκτορα του Παν/μίου Θεσσαλίας για την πολύτιμη βοήθειά του στα πλαίσια της ανάλυσης και σχολιασμού του θέματος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εξέταση της αξιοπιστίας αναλυτικών προσομοιωμάτων της βιβλιογραφίας όσον αφορά στον υπολογισμό της περισφιγμένης αντοχής σκυροδέματος  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη ινοπλισμένων πολυμερών (FRP). Αρχικά, συλλέχθηκαν 339 δοκίμια από πειράματα της βιβλιογραφίας, κάποια με περίσφιγξη ανθρακονημάτων, CFRP (carbon fiber reinforced polymer) και κάποια με περίσφιγξη υαλονημάτων, GFRP (glass fiber reinforced polymer) και τα βασικά χαρακτηριστικά τόσο των δοκιμίων όσο και των υλικών περίσφιγξης. Έπειτα, για τα δοκίμια αυτά υπολογίστηκε η αντοχή  $f'_{cc}$  με χρήση δώδεκα αναλυτικών προσομοιωμάτων της βιβλιογραφίας και κατασκευάστηκαν διαγράμματα προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  ώστε να ελεγχθεί η σύγκλισή τους. Δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά της περίσφιγξης και η αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  των δοκιμίων παίζουν κυρίαρχο ρόλο στο αποτέλεσμα, η ανάλυση έγινε για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και GFRP, και  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 50 MPa, από 0 μέχρι 80 MPa και από 50 MPa μέχρι  $f'_{co\ max}$  ξεχωριστά. Επιπρόσθετα υπολογίστηκαν τόσο ο συντελεστής συμφωνίας Lin όσο και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman για τα αποτελέσματα κάθε μοντέλου για καθεμιά από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, καθώς και η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των πειραματικών και αναλυτικών τιμών  $f'_{cc}$ . Τέλος, παρουσιάζεται μια προσπάθεια βελτίωσης δύο αναλυτικών μοντέλων, αυτά των Ozbakkaloglu (2013) και Toutanji (1999) βάσει των πειραματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν .

Λέξεις-κλειδιά: περίσφιγξη, FRPs, κύλινδροι, σκυρόδεμα, αντοχή, προσομοιώματα

## ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$f'_{cc}$ : αντοχή σκυροδέματος μετά την περίσφιγξη με FRP (MPa)

$f'_{co}$ : αντοχή σκυροδέματος πριν την περίσφιγξη με FRP (MPa)

$f_{ck}$ : χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος βάσει EC (MPa)

$E_c$ : μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος πριν την περίσφιγξη (GPa)

$\epsilon_{cc}$ : αξονική παραμόρφωση σκυροδέματος μετά την περίσφιγξη (% ή ‰)

$f_l$ : πλευρική τάση λόγω περίσφιγξης (MPa)

$f_{FRP}$ : εφελκυστική αντοχή του FRP (MPa)

$t_f$ : πάχος περίσφιγξης (mm)

$E_{FRP}$ : μέτρο ελαστικότητας του FRP (GPa)

$D$ : διάμετρος δοκιμίου (mm)

$B$ : συντελεστής που ορίζει τη μη γραμμικότητα του κριτηρίου αντοχής (προσομοίωμα του Girgin(2013))

$M$ : συντελεστής που ορίζει την κλίση του κριτηρίου αστοχίας (προσομοίωμα του Girgin (2013))

$k_\epsilon$ : συντελεστής αποδοτικότητας (προσομοίωμα των Berna 't Csuka and La 'szlo ' P Kolla ' r (2010))

$k_f$ : Δυσκαμψία λόγω πλευρικής περίσφιγξης (MPa) (προσομοίωμα Ozbakkaloglu (2013))

$k_i$ : Συντελεστής ενίσχυσης της αντοχής (προσομοίωμα Ozbakkaloglu (2013))

$c_1$ : Παράμετρος για την έκφραση της αντοχής (Προσομοίωμα Ozbakkaloglu (2013))

$f_{l,ua}$ : ενεργή πλευρική τάση λόγω περίσφιγξης (MPa)

$f'_{lo}$ : οριακή πίεση λόγω περίσφιγξης (MPa)

$C_j$ : συντελεστής-μέτρο αποδοτικότητας της περίσφιγξης (προσομοίωμα των Xiao & Wu (2000)) (MPa)

$k_{eff}$ : αποδοτικότητα της περίσφιγξης ως λόγος  $f'_{cc}/f'_{co}$  (προσομοίωμα Toutanji (1999))

Περιεχόμενα	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	4
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Γενικά .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στις κατασκευές .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Τύποι ινών .....</b>	<b>9</b>
1.3.1 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CFRP).....	9
1.3.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GFRP).....	10
1.3.3 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ.....	11
1.3.4 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ .....	12
1.3.5 ΤΡΙΧΙΤΕΣ .....	12
1.3.6 ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ .....	12
<b>1.4 Μήτρα .....</b>	<b>13</b>
1.4.1 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ .....	13
1.4.2 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ .....	14
1.4.3 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ.....	14
<b>1.5 Συνάφεια ινών -μήτρας .....</b>	<b>15</b>
<b>1.6 Κόλλα .....</b>	<b>16</b>
<b>1.7 Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες των FRP .....</b>	<b>16</b>
<b>1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των FRP .....</b>	<b>18</b>
<b>1.9 Εφαρμογές των FRP στα υποστυλώματα .....</b>	<b>19</b>
<b>2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Διάμετρος δοκιμών (D) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος (<math>f'_{co}</math>) .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Πάχος περίσφιγξης FRP (<math>t_f</math>) .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Αποκόλληση FRP.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5 Πειραματική διαδικασία .....</b>	<b>27</b>
<b>3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Fardis and Khalili (1982) .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab (2016) .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Mander et al &amp; Saadatmanesh et al (1994) .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4 C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas, S. Marques and D. Marques (2008).....</b>	<b>35</b>
<b>3.5 Benzaid et al. (2010) .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6 Berna 't Csuka and La 'szlo ' P Kolla 'r (2010).....</b>	<b>36</b>

3.7 Spoelstra & Monti (1999) .....	37
3.8 Ozbakkaloglu and Lim (2013) .....	39
3.9 Κανονισμός EC 2 Part 1.1 .....	41
3.10 Zehra Canan Girgin (2013) .....	43
3.11 Xiao and Wu (2000) .....	44
3.12 Toutanji (1999).....	46
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ</b> .....	<b>48</b>
4.1 Δοκίμια με περίσφιγξη CFRP.....	50
4.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 112,6 MPa .....	50
4.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 50 MPa .....	53
4.1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 80 MPa .....	57
4.1.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΑΠΟ 50 ΕΩΣ 112,6 MPa.....	60
4.2 Δοκίμια με περίσφιγξη GFRP .....	63
4.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 107,8 MPa ....	63
4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 50 MPa .....	67
4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 80 MPa.....	71
4.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΑΠΟ 50 ΕΩΣ 107,8 MPa.....	75
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανά θεωρητικό μοντέλο .....	78
4.4 Στατιστική ανάλυση.....	86
4.5 Σύγκριση της αξιοπιστίας των αναλυτικών προσομοιωμάτων.....	89
4.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP .....	89
4.5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP .....	93
4.6 Κατάταξη των μοντέλων ανάλογα με την ικανότητα πρόβλεψης $f'_{cc}$ για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP/GFRP .....	99
<b>5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ</b> .....	<b>102</b>
5.1 Μοντέλο Ozbakkaloglu- συντελεστής $k_1$ .....	102
5.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=3,67$ .....	103
5.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=2,49$ .....	105
5.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=3,30$ .....	107
5.1.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	113
5.2 Ανάλυση αναλυτικού προσομοιώματος Toutanji (1999) και προσπάθεια βελτίωσής του .....	114
5.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ CFRP ΚΑΙ GFRP ΔΟΚΙΜΙΑ .....	115
5.2.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ CFRP ΔΟΚΙΜΙΑ.....	117
5.2.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ GFRP ΔΟΚΙΜΙΑ .....	119

5.2.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	121
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>123</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>124</b>
Ξένη βιβλιογραφία.....	124
Ελληνική βιβλιογραφία.....	128

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Η ανάγκη για περεταίρω ασφάλεια και επάρκεια στις κατασκευές, υφιστάμενες ή μη, οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και εξάπλωση μεθόδων ενίσχυσης των κατασκευών από σκυρόδεμα με σκοπό την βέλτιστη συμπεριφορά τους σε συνθήκες καταπόνησης. Η περίσφιγξη με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών έχει πλέον ευρεία εφαρμογή καθώς εφαρμόζεται σε δομικά στοιχεία όπως υποστυλώματα, δοκοί, πλακοδοκοί, πλάκες καθώς και σε στοιχεία από φέρουσα τοιχοποιία.

## 1.2 Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στις κατασκευές

Η ενίσχυση των δομικών στοιχείων με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών κρίνεται απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις όπως:

- Κόπωση των δομικών στοιχείων
- Διάβρωση των οπλισμών ειδικά σε κτήρια σε παράκτιες περιοχές
- Αύξηση επιβαλλόμενων φορτίων λόγω αλλαγής χρήσης του χώρου
- Επέμβαση σε παλαιά κτήρια για την εφαρμογή του νέου κανονισμού
- Ανεπάρκεια εγκάρσιου οπλισμού (αριθμός συνδετήρων)
- Λόγω σεισμικής καταπόνησης

Αναφορικά με τα ινοπλισμένα πολυμερή, πρόκειται για σύνθετα υλικά αποτελούμενα από ίνες άνθρακα, υάλου, ή αραμιδίου, (σπανιότερα βασάλτη) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης πεπλεγμένα με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να σχηματίζουν εύκαμπτα υφάσματα ή δύσκαμπτα ελάσματα μίας ή δύο διευθύνσεων. Η ενίσχυση με τη χρήση σύνθετων υλικών δύναται να επιτευχθεί με την επικόλληση τους εξωτερικά στα δομικά μέλη σε προσανατολισμό τέτοιο έτσι ώστε να παραλαμβάνουν εφελκιστικές δυνάμεις. Τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τένοντες, να συμβάλλουν ως μέσο ενίσχυσης στο σκυρόδεμα ή/και σε συνδυασμό με υπάρχων οπλισμό χάλυβα οπλισμού ή προεντεταμένου χάλυβα.

Τα σύνθετα υλικά ως μέσο ενίσχυσης αποτελούνται κυρίως από ίνες σε πολυμερική μήτρα και η κόλλα επικόλλησης τους σε επιφάνειες σκυροδέματος.



Οι ίνες στα ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηρίζονται για την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και τη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά τους κατά την αστοχία. (Καλογεράκης,

2013). Ο άνθρακας, το γυαλί και το αραμίδιο απαντώνται ως τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής τους, συνεπώς προκύπτουν ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ινών διάφοροι τύποι FRP. Πιο συγκεκριμένα, τα CFRP (carbon fiber reinforced polymers) αποτελούνται από ίνες άνθρακα, τα GFRP (glass fiber reinforced polymers) από ίνες γυαλιού καθώς και τα AFRP από ίνες αραμιδίου. Το αραμίδιο κυρίως λόγω του αρνητικού συντελεστή θερμικής διαστολής που εμφανίζει δε χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα.

Ωστόσο στην παρούσα εργασία γίνεται εξέταση δοκιμών περισιγμένων με **CFRP** και **GFRP**, συνεπώς θα δοθεί περαιτέρω έμφαση στους συγκεκριμένους τύπους FRP.

### 1.3 Τύποι ινών

#### 1.3.1 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CFRP)

Το **ανθρακόνημα** ή **ίνες άνθρακα** είναι υλικό το οποίο αποτελείται κυρίως από ίνες άνθρακα. Οι ίνες αποτελούνται από άτομα άνθρακα των οποίων οι δεσμοί είναι περίπου παράλληλοι με τον άξονα της ίνας, γεγονός που προσδίδει υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Παρόλο αυτών των ιδιοτήτων, σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος και την αντοχή στα χημικά, η χρήση τους περιορίζεται στο ότι η παραγωγή τους είναι πολύ πιο δαπανηρή από ότι η παραγωγή υαλοβάμβακα ή ινών από πλαστικό. Για την παραγωγή των ινών χρησιμοποιείται πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), ίνες τεχνητού μεταξιού (rayon) και πίσσα. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής είναι δυνατή η μεταβολή των θερμοκρασιών με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθούν ίνες με διάφορες ιδιότητες. (Wikipedia, 2017)



Σχ. 1.3.1 Ίνες άνθρακα

Στον Πίνακα 1.3.1 παρουσιάζονται οι βασικές φυσικές ιδιότητες του άνθρακα.

Πίνακας 1.3.1 Βασικές φυσικές ιδιότητες του άνθρακα (Τριανταφύλλου, 2006)

Άνθρακας	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0,2-0,4

### 1.3.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GFRP)

Η δομική βάση των ινών γυαλιού είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, και αλουμινίου και θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, Z (ή AR) και S.



Σχ. 1.3.2 Ίνες γυαλιού

E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, και πολύ καλή συμπεριφορά στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Ωστόσο χαρακτηρίζονται από μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

Z ή AR-glass (Alkali Resistant): Πρόκειται για ίνες από γυαλί με προσθήκη ζirkονίου για να συνεισφέρει στην αντοχή στην αλκαλικότητα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς το σκυρόδεμα διαθέτει πολύ αλκαλικό περιβάλλον. Η χρήση AR glass έχει εδραιωθεί για δεκαετίες και επιτρέπει το λεπτότερο και ελαφρύτερο σκυρόδεμα, ενώ παράλληλα αποτελεί πρωταρχικό ενισχυτή στο GFRPC (οπλισμένο σκυρόδεμα από γυαλί και η ενίσχυση από χάλυβα δεν είναι πλέον απαραίτητη ([www.buddyrhodes.com](http://www.buddyrhodes.com), 2017)).

S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO<sub>2</sub> (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγγαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την άμεση υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Η δομή αυτή χαρακτηρίζει τα υαλονήματα ως ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

Στον Πίνακα 1.3.2 (Τριανταφύλλου, 2006) καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ινών γυαλιού:

Πίνακας 1.3.2 (Τριανταφύλλου, 2006)

Γυαλί	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
E	70-75	1900-3000	3,0-4,5
AR, ή Z	70-75	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5

Εκτός από τις ίνες από άνθρακα και γυαλί, υπάρχουν ίνες άλλου είδους όπως μεταλλικές, κεραμικές, τριχίτες και ίνες φυσικών ορυκτών. Ωστόσο για διάφορους λόγους που αναφέρονται έπειτα δεν προτιμώνται τόσο όσο αυτές από άνθρακα και γυαλί.

### 1.3.3 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών

ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

#### 1.3.4 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας ( $Al_2O_3$ ), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες  $Si_3N_4$ , BeO,  $B_4C$  και  $ZrO_2$ . Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

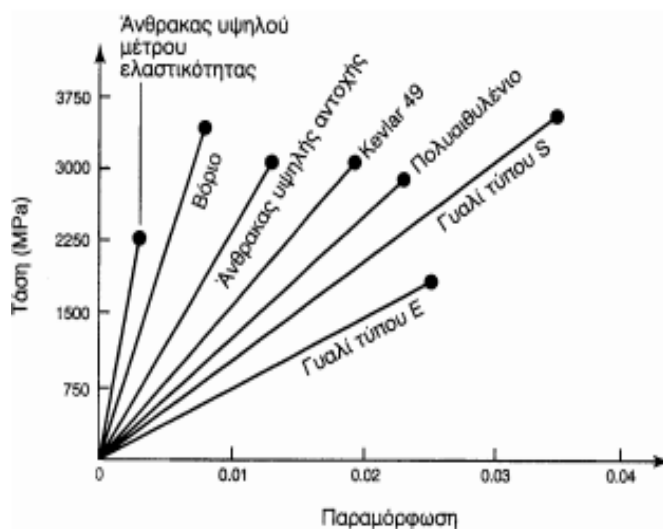
#### 1.3.5 ΤΡΙΧΙΤΕΣ

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1  $\mu m$ , ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλια και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχίτων σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

#### 1.3.6 ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμίαντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου  $\sim 20$  nm, και έχουν διάμετρο  $\sim 10$   $\mu m$  και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500 °C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμίαντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι 14 συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700÷900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm<sup>3</sup>. (Σύνθετα Υλικά, Ε.Μ.Π.)

Στο Σχήμα 1.3.3 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) για τους διάφορους τύπους ινών.



Σχ. 1.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης (Σύνθετα Υλικά, Ε.Μ.Π.)

## 1.4 Μήτρα

Η μήτρα στα ΠΙ αποτελείται από βινυλεστερική ή πολυεστερική ρητίνη αλλά συνήθως εποξειδική καθώς η τελευταία, παρά το υψηλό κόστος της χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες σε εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις. (Masuelli, 2013)

Η μήτρα αποτελεί τη συγκολλητή ύλη μεταξύ των ινών. Συνήθως πρόκειται για ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές το οποίο συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, προσδίδει προστασία και αναλαμβάνει τη μεταφορά των δυνάμεων σε αυτές. Επιπρόσθετα καθορίζει ορισμένες μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών όπως για παράδειγμα την αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, τη διατμητική και θλιπτική αντοχή.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας χωρίζονται σε ομάδες υλικού μήτρας για σύνθετα υλικά, δηλαδή σε:

- Οργανικές
- Μεταλλικές και
- Κεραμικές

### 1.4.1 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) Θερμοπλαστικές:

Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) Θερμοσκληρυνόμενες:

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200 °C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

#### 1.4.2 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρες προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μητρων είναι πολύ χαμηλή (~300 °C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C.

#### 1.4.3 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής

μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας. Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών – μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος μήτρας είναι αυτός των εποξειδικών ρητίνων, αλλά σπανιότερα χρησιμοποιείται και πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Ωστόσο, σχετικά με τις εποξειδικές ρητίνες, με τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες τους και τη μεγάλη ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις που επιδεικνύουν, υπερέχουν μεταξύ των άλλων τύπων μήτρας. (Τριανταφύλλου, 2006)

## 1.5 Συνάφεια ινών -μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών – μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του σύνθετου υλικού. Η διεπιφάνεια ίνας – μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής της μήτρας και της ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al)
- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία. (Σύνθετα υλικά, Ε.Μ.Π.)

## 1.6 Κόλλα

Ως κόλλα κατά κανόνα χρησιμοποιείται εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού,. Έτσι εξασφαλίζεται η συνεργασία των δύο υλικών και η μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών: χρόνου εργασιμότητας, χρόνου εφαρμογής και θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ .

Αναφορικά με το **χρόνο εργασιμότητας**, επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο χρήσης της κόλλας καθώς καθορίζει το διαθέσιμο χρόνο κατά τον οποίο κάποιος χρησιμοποιεί την κόλλα εύκολα πριν αρχίσει η αύξηση του ιξώδους της και σκλήρυνση του δοχείου στο οποίο έγινε η ανάμειξη. Οι διάφοροι τύποι κόλλας, η ποσότητα που θα χρησιμοποιηθεί και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος καθορίζουν το χρόνο εργασιμότητας.

Όσον αφορά στο **χρόνο εφαρμογής**, ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει τη χρονική διάρκεια κατά την οποία η κόλλα έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες, δηλαδή είναι «ενεργή». Εντός αυτού του χρονικού διαστήματος πρέπει να γίνει η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

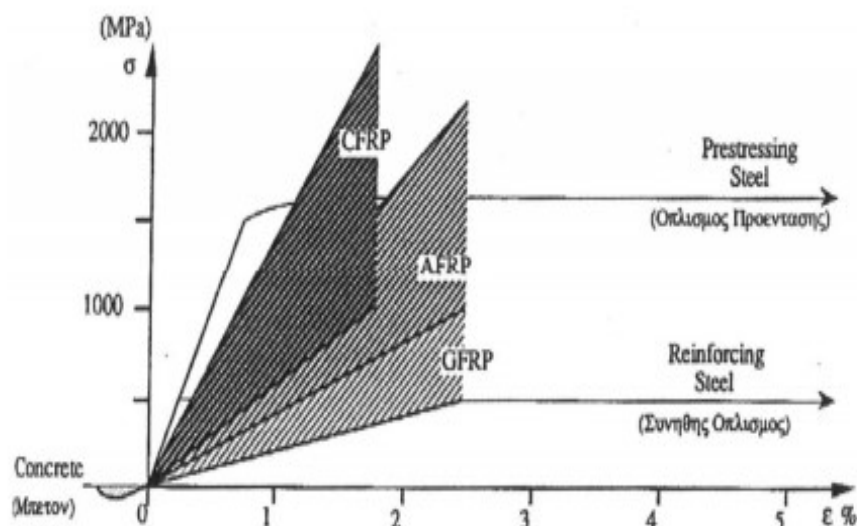
Η **θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης** αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών. Πρόκειται για την τιμή της θερμοκρασίας κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται ταχύτατα. Συνεπώς, παρατηρείται περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς των δυνάμεων.

## 1.7 Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες των FRP

Τα FRP χαρακτηρίζονται από μεγάλη εφελκυστική αντοχή της τάξης των 1500-3000 MPa η οποία ξεπερνά 3-4 φορές αυτή του κοινού χάλυβα S500. Παρόλο που οι συγκεκριμένες τιμές των αντοχών ισχύουν κυρίως για βραχυχρόνια φόρτιση, μακροχρόνια οι τιμές μειώνονται σημαντικά ανάλογα με το είδος της ίνας. Ειδικότερα, για τις ίνες άνθρακα που έχουν το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (35-190 GPa) και τη μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας (1-1,5%) η εφελκυστική τους αντοχή μπορεί να μειωθεί μακροχρόνια μέχρι και 75-95% . Στις ίνες γυαλιού που το μέτρο ελαστικότητας έχει τη μικρότερη τιμή ~50 GPa και η παραμόρφωση αστοχίας του έχει τη μεγαλύτερη τιμή ίση με 3%, η εφελκυστική αντοχή σε μακροχρόνια φόρτιση μειώνεται κατά 40-60% της αρχικής. (Παππά-Ποταμού, 2006)



Οι σχέση τάσης-παραμόρφωσης ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7.1.

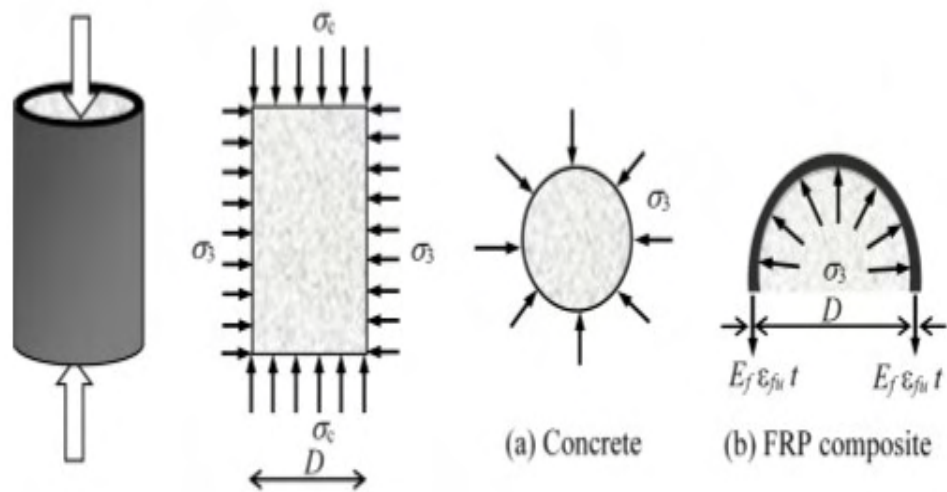


Σχ.1.7.1 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για περίσφιξη με διάφορους τύπους FRP (Παππά-Ποταμού, 2006)

Από το σχήμα 1.7.1 παρατηρείται ότι ο χάλυβας (steel), είτε ως συνήθης οπλισμός είτε ως οπλισμός προέντασης, εμφανίζει υψηλότερη δράση περίσφιξης συγκριτικά με τους άλλους τύπους μανδύα όσο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Από τη διαρροή και έπειτα, η συγκεκριμένη τιμή τάσης διατηρείται σταθερή. Αντίθετα, οι μανδύες FRP εμφανίζουν μια συνεχή (μονοτονική) αύξηση όσον αφορά στην τάση περίσφιξης. Συγκριτικά με την τη δράση της περίσφιξης με τη χρήση GFRP έναντι αυτής με CFRP, η πρώτη φαίνεται να «εκμεταλλεύεται» την οκλιμότητα καθώς εμφανίζει μέγιστη τάση περίσφιξης σε ύστερο χρόνο, δηλαδή έχοντας επέλθει μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης (strain) στο σκυρόδεμα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η **τάση περίσφιξης  $\sigma_i$**  (ή  **$f_i$**  όπως θα συμβολίζεται στη συνέχεια), (Σχ. 1.7.2) σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου  $D$  περισφιγμένο εξωτερικά με FRP μέτρου ελαστικότητας  $E_{FRP}$  και πάχους  $t_f$ , δηλαδή οι εγκάρσιες κατά την ακτινική διεύθυνση τάσεις που προκαλούνται στο FRP λόγω της επιβολής θλιπτικού αξονικού φορτίου στο δοκίμιο δίνεται από τη σχέση 1.7.1 ως εξής:

$$\sigma_i = f_i = \frac{2 \cdot t_f}{D} * f_{FRP} \quad \text{Εξ. 1.7.1}$$



Σχ. 1.7.2 Αξονική καταπόνηση κυλίνδρου και ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης (Zehra Canan Girgin και Konuralp Girgin, 2015)

Όπως είναι φανερό, η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- Τύπος ινών (CFRP/GFRP)
- Πάχος περίσφιγξης  $t_f$
- Κλίση των ινών ως προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου
- Χρήση FRP καθ' όλη την εξωτερική επιφάνεια (συνεχές «τύλιγμα») ή με κενά
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου (για κυλινδρικά δοκίμια:  $D$ ,  $h$ )
- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος πριν την περίσφιγξη

## 1.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των FRP

Τα σύνθετα υλικά διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα λόγω των οποίων υπερέρχουν έναντι των άλλων υλικών ενίσχυσης.

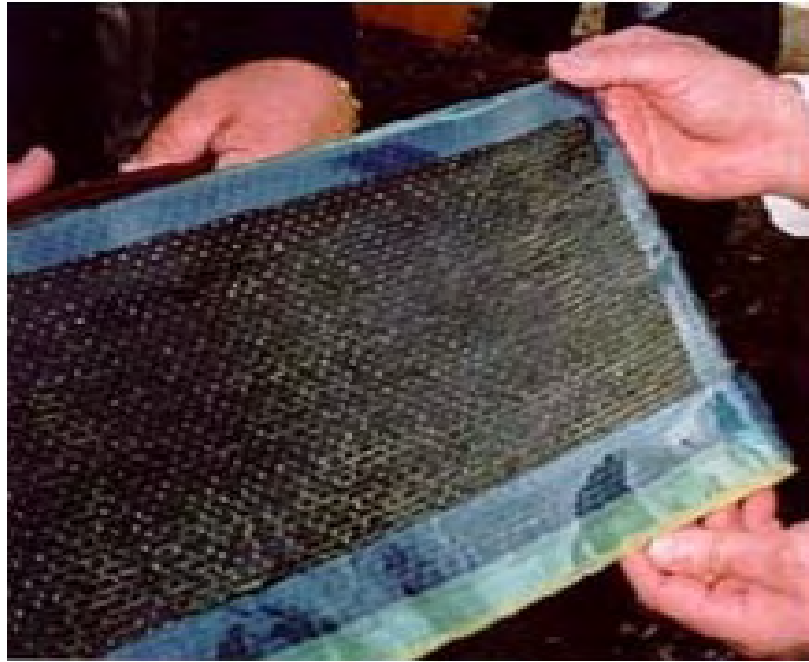
Αρχικά, το μικρό τους βάρος τα καθιστά εύκολα στη μεταφορά και τοποθέτησή τους. Συγκριτικά με το χάλυβα, η πυκνότητα τους είναι το 20% της συνολικής πυκνότητας του χάλυβα.

Επιπλέον, η υψηλή εφελκυστική αντοχή των FRP αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα έναντι των μεταλλικών ελασμάτων. Με εξαίρεση τα CFRP, είναι πιο εύκαμπτα και εμφανίζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία. Επιπρόσθετα, τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευκολία και ευελιξία καθώς και ταχύτητα στη διαδικασία της εφαρμογής τους. Η χρήση ρητίνης που χρησιμοποιείται για την επικόλληση των σύνθετων υλικών στην εξωτερική πλευρά των δοκιμίων συνίσταται για την άμεση τεχνική ενίσχυσης. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής ενίσχυσης δεν απαιτείται η αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων, ενώ παράλληλα οδηγεί σε αύξηση της πλαστιμότητας και της αντοχής της διατομής του υπόψη δομικού στοιχείου.

Από την άλλη πλευρά, τα σύνθετα υλικά έχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, η εκδήλωση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς μέχρι την αστοχία σημαίνει απουσία του «πλατό» διαρροής συνεπώς η μορφή αστοχίας των υλικών είναι ψαθυρή γεγονός το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Επιπλέον, κάποιες από τις μηχανικές τους ιδιότητες που αναφέρθηκαν προτύτερα δύνανται να μειωθούν λόγω της έκθεσης των σύνθετων υλικών στο αλκαλικό περιβάλλον της ατμόσφαιρας. Ακόμη, οι έντονες παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού είναι ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης FRP. Τέλος, η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου ενίσχυσης απαιτεί υψηλό κόστος, το οποίο παρ' όλα αυτά αντιμετωπίζεται καθώς η ευρεία χρήση και κατ' επέκταση η παραγωγή των υλικών αυξάνεται.

## 1.9 Εφαρμογές των FRP στα υποστυλώματα

Μια από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές των ινοπλισμένων πολυμερών είναι αυτή της ενίσχυσης υποστυλωμάτων. Η ενίσχυση μπορεί να επιτευχθεί είτε με “περιτύλιξη” των μελών με ταινίες από σύνθετα υλικά είτε με χρήση μανδύων από τα ίδια υλικά (σχήματα 1.9.1, 1.9.2, 1.9.3 και 1.9.4). Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου συνίσταται στην αύξηση του εγκιβωτισμού άρα και αύξηση της θλιπτικής αντοχής, αύξηση της πλαστιμότητας, βελτίωση του μηχανισμού ανάληψης τεμνουσών δυνάμεων και βελτίωση της αντοχής του διαμήκους οπλισμού σε λυγισμό, καθώς και στην αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής των μελών. Σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου έναντι αντίστοιχων με χάλυβα, όπως αναφέρονται και παραπάνω, είναι ότι τα υλικά αυτά δεν διαβρώνονται, έχουν μικρό βάρος, είναι διαθέσιμα σε μεγάλες διαστάσεις, αναπτύσσουν μεγάλες αντοχές, μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις. Παράλληλα με τη μέθοδο αυτή μειώνεται ο κατασκευαστικός χρόνος καθώς επίσης έχει χαμηλό κόστος συντήρησης.



Σχ. 1.9.1 Μανδύας από FRP



Σχ. 1.9.2 Ενίσχυση υποστυλώματος με χρήση μανδύα από FRP



Σχ. 1.9.3 Ενίσχυση υποστυλώματος με χρήση μανδύα από FRP



Σχ. 1.9.4 Ενίσχυση υποστυλώματος με FRP

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για την μελέτη της συμπεριφοράς των υποστρωμάτων με κυκλική διατομή και επενδυμένων εξωτερικά με FRP σε συνθήκες θλιπτικής καταπόνησης κρίθηκε αναγκαία η αναζήτηση πειραματικών δεδομένων από πειράματα της βιβλιογραφίας. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε κυλίνδρους που διέφεραν ως προς τη διάμετρο  $D$  και το ύψος  $h$ . Κύριος παράγοντας που επηρέασε τα αποτελέσματα ήταν η τιμή της αντοχής απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  καθώς και το είδος της περίσφιγξης των δοκιμίων. Ως είδος περίσφιγξης επιλέχθηκε εξωτερική επένδυση με μανδύα CFRP ή GFRP. Οι διαφορετικές ιδιότητες των ινών και τα χαρακτηριστικά των κατασκευαστών των FRP συμβάλλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση της τελικής αντοχής  $f'_{cc}$  του περισιγμένου δοκιμίου.

Μέσω σχετικής βιβλιογραφίας συλλέχθηκαν 339 δοκίμια εκ των οποίων τα 238 είναι επενδυμένα με μανδύα CFRP και τα 88 με μανδύα GFRP. Επιπλέον, σε αρκετά πειράματα υπήρξαν δοκίμια χωρίς επένδυση FRP τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς (REF). Εκτός αυτής της διαφοροποίησης, τα δοκίμια διαφέρουν ως προς τις γεωμετρικές ιδιότητές τους καθώς επιλέχθηκαν δοκίμια με διάμετρο  $D$  από 51 έως 610 mm, ως προς την αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  η οποία κυμαίνεται από 8,5 έως 112,6 MPa και ως προς το πάχος περίσφιγξης  $t_f$  του FRP.

### 2.1 Διάμετρος δοκιμίων (D)

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων επιλέχθηκαν διαφορετικής διαμέτρου δοκίμια γεγονός που επηρέασε ανάλογα το τελικό αποτέλεσμα. Με μια σύντομη ανασκόπηση, η συνήθης τιμή διαμέτρου  $D$  για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της βιβλιογραφίας είναι 100-250 mm. Ωστόσο, στα πειράματα των Li-Fang-Chern (2003), Youseff (2003), Marques-Chastre (2012) και Matthys-Toutanji-Taerwe (2006) χρησιμοποιήθηκαν κύλινδροι μεγαλύτερης διάστασης, δηλαδή από 300 έως 406 mm. Όσον αφορά στη μεγαλύτερη διάμετρο δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή στο πείραμα των Carey-Harries (2005) και ήταν ίση με 610 mm.

Αντίθετα, ορισμένοι ερευνητές διεξήγαγαν πειράματα σε δοκίμια διαμέτρου μικρότερης από 100 mm. Συγκεκριμένα, η μικρότερη διάμετρος δοκιμίου απαντάται στο πείραμα των Harmon - Slattery (1992) και είναι ίση με 51 mm.

Η χρήση πολύ μικρής ή πολύ μεγάλης διαμέτρου στα δοκίμια επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αντοχής του περισιγμένου σκυροδέματος  $f'_{cc}$  καθώς σε μεγάλης διαμέτρου δοκίμια η τιμή της τάσης λόγω περίσφιγξης μειώνεται αρκετά ως αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου  $D$  του δοκιμίου.

## 2.2 Αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος ( $f'_{co}$ )

Ειδικότερα, δοκίμια χαμηλής αντοχής απερίσφικτου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα στα οποία η περίσφιγξη έγινε με χρήση CFRP. Οι M. Fernández Cánovas & M.N. González-García & J.Á. Piñero & A. Cobo (2015), Pki A. et al. (2008), Li & Fang & Chern (2003) και Shahawy et al. (2000) χρησιμοποίησαν κυλίνδρους χαμηλής αντοχής - η χαμηλότερη των οποίων απαντάται στο πείραμα των M. Fernández Cánovas & M.N. González-García & J.Á. Piñero & A. Cobo (2015) και είναι ίση με 8,5 MPa – κι οι οποίοι ήταν περισφιγμένοι με μανδύες CFRP.

Ο μεγαλύτερος αριθμός πειραμάτων τόσο με χρήση μανδύων CFRP όσο και με χρήση μανδύων GFRP ερευνά δοκίμια μέσης αντοχής από 24 MPa μέχρι 49,6MPa. Συγκεκριμένα, οι Touhari & Mitiche-Kettab (2016), Wang et al. (2012), Berthet et al. (2005), Rousakis & Tepfers (2004), και άλλοι ασχολήθηκαν με την ενίσχυση κυλίνδρων μέσης αντοχής σκυροδέματος.

Όσον αφορά στους κυλίνδρους με περίσφιγξη CFRP υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ , τα δεδομένα λήφθηκαν από πειράματα των Rousakis & Tepfers (2004), Xiao - Wu (2000), Li & Wu & Gravina (2016), Touhari & Mitiche-Kettab (2016), Benzaid & Mesbah (2012), Cui & Sheikh (2010), και Berthet et al. (2005), όπου οι τιμές της  $f'_{co}$  ξεκινούν από τα 51,8 Mpa και φθάνουν έως τα 112,6 Mpa στο πείραμα των Berthet et al (2005).

Η βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας δεν περιλαμβάνει δοκίμια με περίσφιγξη GFRP που να χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή  $f'_{co}$ . Τα περισσότερα πειράματα διεξήχθησαν σε δοκίμια μέσης αντοχής από 24 MPa μέχρι 47,7 MPa τα οποία διέφεραν ως προς το πάχος περίσφιγξης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων.

Ωστόσο ερευνητές όπως οι Almusallam (2007), Berthet et al. (2005), Touhari & Mitiche-Kettab (2016) και Cui - Sheikh (2010) εργάστηκαν πειραματικά στην εφαρμογή GFRP περίσφιγξης σε κυλινδρικά δοκίμια υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ . Χαρακτηριστικό πείραμα αποτελεί αυτό του Almusallam (2007) κατά το οποίο χρησιμοποιείται κύλινδρος με  $f'_{co}$  ίση με 107,8 MPa.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κεντρική αξονική θλιπτική φόρτιση μέχρι να επέλθει αστοχία. Στα περισσότερα δοκίμια παρατηρήθηκε θραύση-αποκόλληση του FRP πριν καν εμφανιστεί η αναμενόμενη από τον κατασκευαστή τιμή μέγιστης εφελκυστικής αντοχής ( $f_{tensile}$  ή  $f_{FRP}$ ) για την οποία είχε σχεδιαστεί. Αναφορικά με αυτό, σε αρκετά πειράματα, πριν την εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας προηγήθηκε ένα



χαρακτηριστικό “coupon test” για τα δοκίμια ώστε να οριστεί η πραγματική τιμή αντοχής του FRP. Συμπερασματικά, αυτές οι τιμές λήφθηκαν υπόψη στους επόμενους υπολογισμούς, που σημειωτέον αποδείχθηκαν αρκετά μικρότερες από τις θεωρητικές των κατασκευαστών.

Εκτός από το  $f_t$  ( $f_{tensile}$ ), το μέτρο ελαστικότητας του FRP,  $E_{FRP}$ , και το πάχος  $t_f$  συμβάλλουν στον τρόπο και στο χρόνο αστοχίας. Σε γενικές γραμμές παρατηρήθηκε ότι η χρήση μεγάλου πάχους περίσφιγξης οδηγεί σε γρήγορη αποκόλληση του μανδύα από την εξωτερική πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου, με άλλα λόγια στην αστοχία του FRP συντομότερα.

### 2.3 Πάχος περίσφιγξης FRP ( $t_f$ )

Το πάχος των φύλλων FRP και ο αριθμός στρώσεων καθορίζουν την τιμή του πάχους περίσφιγξης  $t_f$ , η οποία συμβάλλει καθοριστικά στην αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. Πολύ μικρή τιμή του  $t_f$  σημαίνει ελάχιστη περίσφιγξη. Αντίθετα, η χρήση πολύ μεγάλης τιμής  $t_f$  δεν επηρεάζει θετικά το περισφιγμένο δοκίμιο. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν το πάχος του FRP είναι πολύ μεγάλο, η αποκόλληση του από τη εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου στο οποίο έχει επικολληθεί γίνεται συντομότερα με αποτέλεσμα το FRP να μην εμφανίζει την προβλεπόμενη τιμή αντοχής για την οποία έχει σχεδιαστεί, καθώς αστοχεί για μικρότερη τιμή επιβαλλόμενου φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κύλινδρος δέχεται μεγαλύτερη τάση λόγω περίσφιγξης, συνεπώς και πλευρική τάση  $f_l$ , με αποτέλεσμα η επιβαλλόμενη τάση να ξεπερνά την τάση συνάφειας του σκυροδέματος - FRP. Η υπέρβαση της τάσης συνάφειας των δύο υλικών οδηγεί στην αποκόλληση του FRP που έχει επικολληθεί εξωτερικά του κυλίνδρου, συνεπώς και στη συντομότερη αστοχία του πριν αυτό προλάβει να αναπτύξει την προσδοκώμενη  $f_{FRP}$ .

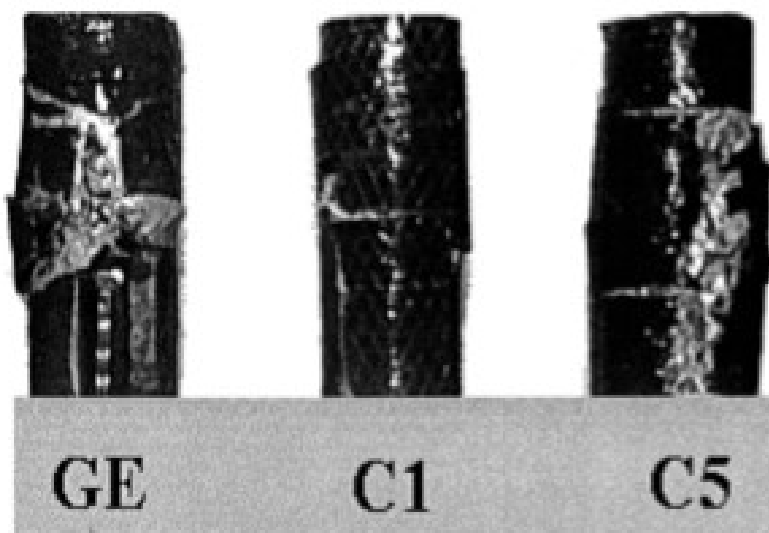
Τα περισσότερα δοκίμια της παρούσας εργασίας είναι περισφιγμένα με πάχος FRP  $t_f$  που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,3 με 2,0 mm. Ωστόσο, οι Li & Wu & Gravina (2016), Harmon & Slattery (1992), Jiang & Teng (2007) και Dias da Silva & Santos (2001) χρησιμοποίησαν πάχος περίσφιγξης μικρότερο των 0,3 mm. Η μικρότερη τιμή  $t_f$  που εντοπίστηκε ήταν στο πείραμα των Li & Wu & Gravina (2016) και στο πείραμα των Shahawy et al. (2000) και ήταν ίσο με 0,05 mm. Αντίθετα, στο πείραμα του Youseff (2003) χρησιμοποιούνται εκτός των άλλων δοκίμια με μεγάλο πάχος FRP. Συγκεκριμένα, ο Youseff διαθέτει δύο δοκίμια με πάχος  $t_f$  ίσο με 5,84 και 7,26 mm αντίστοιχα.

## 2.4 Αποκόλληση FRP

Αυτή η μορφή αστοχίας αφορά στην πρόωρη αποκόλληση του μανδύα λόγω ανεπαρκούς συνάφειας του υλικού και σύνδεσής του με το δοκίμιο. Η αστοχία προκαλείται από την ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια κυλίνδρου- FRP και κύρια αιτία αυτού είναι η μικρή διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι τάσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβιβαστούν από το ένα υλικό στο άλλο με αποτέλεσμα την αδυναμία ανάληψης της επιβαλλόμενης δύναμης και την αστοχία του υλικού. Η αστοχία αυτή είναι ψαθυρής μορφής.

Η διεπιφάνεια μπορεί να αποτελείται είτε από τη στρώση του FRP και του κυλίνδρου είτε από δύο ή περισσότερες στρώσεις του σύνθετου υλικού. Αναφορικά με την πρώτη περίπτωση, το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να μεταβιβασθεί ανά μονάδα διεπιφανείας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της στρώσης του σύνθετου υλικού με το δομικό στοιχείο, ενώ με τη δεύτερη περίπτωση η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της ρητίνης.

Στα σχήματα 2.4.1 και 2.4.2 φαίνεται η αποκόλληση του FRP από δοκίμια των πειραμάτων της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 2.4.1

Αστοχία - αποκόλληση FRP (Toutanji, 1999)



Σχήμα 2.4.2

Αποκόλληση του FRP (Touhari & Mitiche-Kettab, 2016)

## 2.5 Πειραματική διαδικασία

Σε όλα τα πειράματα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όσον αφορά στην προετοιμασία των δοκιμίων και στα όργανα και τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν.

Σε πρώτη φάση, συλλέγονται τα δοκίμια των οποίων προσδιορίζονται τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά ( $D$ ,  $h$ ), η αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  και άλλα στοιχεία που αφορούν στον προσδιορισμό της ποιότητας του σκυροδέματος όπως το μέτρο ελαστικότητας και οι αναλογίες παρασκευής του. Αναφορικά με τα

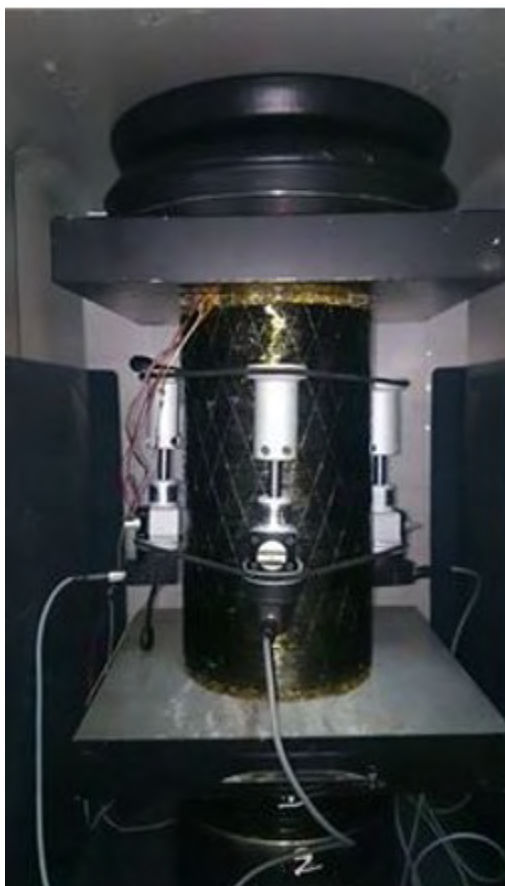
FRP που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού των χαρακτηριστικών τους, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας  $E_{FRP}$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_{FRP}$  του FRP. Ωστόσο, σε αρκετά πειράματα όπως αυτό του Berthet et. al. (2005) διεξάγονται εργαστηριακά tests κατά τα οποία αποδεικνύεται αν τα στοιχεία του FRP που παρέχονται από τον κατασκευαστή έχουν μεγάλη απόκλιση συγκριτικά με αυτά που εμφανίζει το FRP στην πράξη.

Η ενέργεια αυτή γίνεται με σκοπό τη χρήση αντιπροσωπευτικών δεδομένων που θα οδηγήσουν σε αντικειμενικότερο αποτέλεσμα, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις και σφάλματα.

Έπειτα, τα δοκίμια υφίστανται μια διαδικασία καθαρισμού (απόλιπανσης) (λ.χ. με τη χρήση μέθυλ - αίθυλο κετόνης, πείραμα Shahawy (2000) ), ώστε η επικόλληση του FRP στην εξωτερική επιφάνεια των κυλίνδρων να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά. Στη συνέχεια, ακολουθεί τύλιγμα (wrapping) της εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας με τα φύλλα FRP των οποίων το μήκος έχει προσδιορισθεί να καλύπτει όλο το ύψος του δοκιμίου (συνεχές τύλιγμα χωρίς κενά) και το πάχος είναι ίσο με το  $t_f$  που έχει οριστεί για το κάθε πείραμα. Για την επικόλληση χρησιμοποιείται ειδική εποξειδική ρητίνη, η οποία παραμένει σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου και τα χαρακτηριστικά της οποίας έχουν προσδιορισθεί από τον κατασκευαστή.

Πριν την έναρξη της επιβολής της φόρτισης, τα δοκίμια μένουν τουλάχιστον τρεις μέρες σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου.

Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοτονική αξονική φόρτιση. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται υδραυλική πρέσα μέσω της οποίας είναι δυνατή η σταθερή επιβολή του θλιπτικού φορτίου. Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η εφαρμογή του φορτίου είναι σταθερός και εκφράζεται με την τιμή της παραμόρφωσης σε mm ανά λεπτό (mm/min). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται LVDTs επικολλώμενα στην περιφέρεια του κυλίνδρου σε μορφή στεφάνης (hoop) στο μέσο του ύψους των κυλίνδρων. Παράλληλα, τα δείγματα είναι εφοδιασμένα με πρόσθετο επιμηκυσιόμετρο στο μέσο περίπου του ύψους τους, έτσι ώστε να προσδιορισθούν οι αξονικές παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα με την απαραίτητη ακρίβεια. Η καταγραφή των τιμών του επιβαλλόμενου φορτίου καθώς και των αντίστοιχων τιμών των παραμορφώσεων που προκαλούνται στο δοκίμιο λόγω της φόρτισης είναι εφικτή μέσω της χρήσης ενός συστήματος συλλογής δεδομένων (data acquisition system). Στο σχήμα 2.5.1 φαίνεται μια τυπική διάταξη δοκιμίου σε υδραυλική πρέσα (πείραμα Touhari & Mitiche-Kettab (2016)).



Σχήμα 2.5.1

Αξονική καταπόνηση δοκιμίου μέσω υδραυλικής πρέσας (Touhari & Mitiche-Kettab, 2016)

Η επιβολή του φορτίου σταματά τη στιγμή που επέρχεται αστοχία. Ο τρόπος της αστοχίας σε όλα τα πειράματα είναι η αποκόλληση του FRP, δηλαδή το FRP λόγω της εξαιρετικά υψηλής επιβολής τάσης χάνει πλέον την ικανότητα ανάληψης των δυνάμεων και συνάφειας με το σκυρόδεμα.

Μετά την πειραματική διαδικασία γίνεται η συλλογή των αποτελεσμάτων κατά την οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην τάση ( $f'_{cc}$ ), για την οποία επέρχεται η αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος, και στην αντίστοιχη παραμόρφωση  $\epsilon'_{cc}$ . Τα αποτελέσματα του εκάστοτε πειράματος ελέγχονται μέσω αναλυτικών προσομοιωμάτων είτε συγκρίνονται με αντίστοιχα δεδομένα της βιβλιογραφίας ώστε να ελεγχθεί με τέτοιο τρόπο η αξιοπιστία των πειραματικών μετρήσεων και τυχόν παραδοχών.

Ορισμένοι ερευνητές δεν είχαν ως στόχο μόνο τη διεξαγωγή του πειράματος αλλά και την πρόταση ενός νέου αναλυτικού προσομοιώματος υπολογισμού της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος ( $f'_{cc}$ ) μέσω της ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα οι Touhari & Mitiche-Kettab (2016) και Toutanji (1999) διεξήγαγαν πειράματα - τα αποτελέσματα των οποίων αποτέλεσαν βάση για την πρόταση νέων αναλυτικών προσομοιωμάτων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον κάποια μοντέλα προέκυψαν βασιζόμενα σε αποτελέσματα και χαρακτηριστικά συγκεκριμένων δοκιμίων πειραμάτων (λ.χ. η χρήση συγκεκριμένου τύπου FRP, χρήση πολύ μεγάλης/μικρής διαμέτρου δοκιμίου κ.λπ.) πιθανότατα να εμφανίζουν μεγάλη αξιοπιστία για δοκίμια με ανάλογα χαρακτηριστικά, αλλά όχι τόσο για δοκίμια με διαφορετικό τύπο μανδύα ή γεωμετρικά χαρακτηριστικά (D, h).

Για το λόγο αυτό για την παρούσα εργασία κρίθηκε αναγκαία η αναζήτηση εκτός πειραματικών δεδομένων, και αναλυτικών προσομοιωμάτων, καθώς η εφαρμογή των δεδομένων σε αυτά αποτελούν κατά κάποιο τρόπο διαδικασία ελέγχου της αξιοπιστίας τους.

Τα στοιχεία των δοκιμίων που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.5.1). Πιο συγκεκριμένα, στις πρώτες δύο στήλες αναγράφονται ο τίτλος του άρθρου, οι συγγραφείς και η αρίθμηση των δοκιμίων – ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στα άρθρα-. Έπειτα αναγράφεται η τιμή της τάσης του σκυροδέματος πριν την περίσφιγξη  $f'_{co}$ , το πάχος του FRP,  $t_f$ , το μέτρο Ελαστικότητας  $E_{FRP}$  και η εφελκυστική αντοχή  $f_{tensile}$  ή  $f_{FRP}$  του FRP. Στην τελευταία στήλη των δεδομένων αναγράφεται η διάμετρος D των δοκιμίων. Τέλος, για κάθε δοκίμιο αναφέρεται η τιμή της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f'_{cc}$  που προέκυψε από τα πειράματα που διεξήχθησαν.

Πίνακας 2.5.1 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων δοκιμίων (Παράρτημα Α)

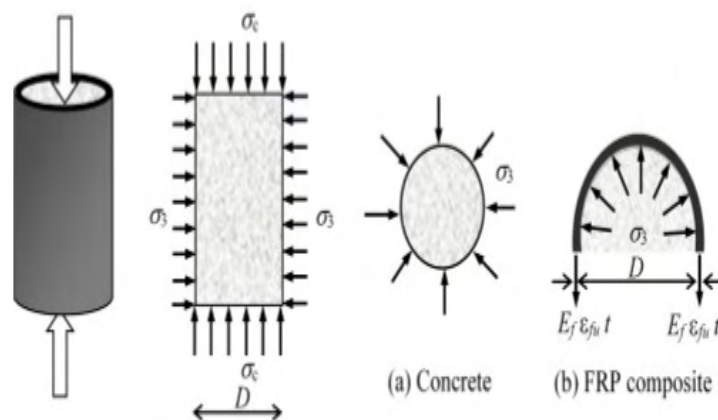
### 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Όσον αφορά στο αναλυτικό μέρος της παρούσας εργασίας κρίθηκε απαραίτητη η αναζήτηση κατάλληλων προσομοιωμάτων από τη βιβλιογραφία τα οποία προσδιορίζουν την αναμενόμενη αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος  $f'_{cc}$  έχοντας λάβει υπόψη τα στοιχεία της πειραματικής βάσης δεδομένων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συνολικά εξετάζονται δώδεκα μοντέλα τα οποία προέκυψαν είτε από αναλυτική έρευνα βασισμένη σε αρχές της μηχανικής είτε από επεξεργασία αποτελεσμάτων σχετικών πειραμάτων που προηγήθηκαν με σκοπό την διαμόρφωση της τελικής σχέσης.

Όλα τα μοντέλα αναφέρονται στην αντοχή του περισφιγμένου κυλίνδρου με εξωτερική επένδυση FRP που υπόκειται σε αξονικό θλιπτικό φορτίο μέχρις ότου επέλθει η αστοχία. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της περισφιγξης, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας  $E_{FRP}$  και η εφελκυστική αντοχή  $f_{FRP}$  του ινοπλισμένου πολυμερούς καθώς και το πάχος  $t_f$  της περισφιγξης συμβάλλουν καθοριστικά στην τελική διαμόρφωση της τιμής  $f'_{cc}$ . Ειδικότερα, τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται με μια σχέση από την οποία προκύπτει η τάση  $f_l$  που ασκείται πλευρικά από το FRP στα τοιχώματα του κυλίνδρου εξαιτίας της περισφιγξης. Ακόμη, η διάμετρος του εκάστοτε δοκιμίου ( $D$ ) είναι αντιστρόφως ανάλογη της  $f_l$  και επηρεάζει την τιμή της όπως φαίνεται στην Εξ. 1.7.1.

Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα το  $t_f$  και η  $f_{FRP}$  αποτελούν χαρακτηριστικά του τύπου περισφιγξης που χρησιμοποιείται και το  $D$  σχετίζεται με τη γεωμετρία των δοκιμίων. Για να υπάρξει συμφωνία μονάδων θεωρούμε τα  $t_f$ ,  $D$  εκφρασμένα σε mm και την τάση  $f_{FRP}$  σε MPa. Συνεπώς και το αποτέλεσμα της  $f_l$  προκύπτει σε MPa.

Στο Σχ. 3.1 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο δρα η  $f_l$ . Σημειώνεται επίσης ότι το γινόμενο  $E_f \cdot \epsilon_{fu}$  ισούται με την τάση  $f_{FRP}$  που προαναφέρθηκε καθώς η παραμόρφωση του FRP  $\epsilon_{fu}$  έχει προσδιορισθεί πειραματικά και η συμπεριφορά του θεωρείται γραμμικά ελαστική.



Σχήμα 3.1 Πλευρική τάση περισφιγξης  $f_l$  (Zehra Canan Girgin και Konuralp Girgin, 2015)

Ωστόσο κάθε μοντέλο έχει προκύψει από συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα και παραδοχές. Ως εκ τούτου κάποια μοντέλα εφαρμόζονται σε κάθε κύλινδρο ανεξαρτήτως του είδους περίσφιγξης, ενώ άλλα προβλέπουν διαφορετικές τιμές συντελεστών όταν πρόκειται για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και διαφορετικές όταν πρόκειται για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP. Η διαφοροποίηση αυτή είχε ως στόχο την προσπάθεια αντικειμενικότερων αποτελεσμάτων μιας και οι δύο τύποι περίσφιγξης διαφέρουν σε αρκετά σημεία. Ωστόσο θα έπρεπε να σημειωθεί ότι τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα άρθρα για τον έλεγχο των αναλυτικών μοντέλων ήταν περιορισμένα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποιος τρόπος ελέγχου της αξιοπιστίας κάθε μοντέλου. Αυτό το κενό έρχεται να καλύψει η παρούσα εργασία, κάνοντας μια διερεύνηση της απόδοσης κάθε μοντέλου έναντι μια πολύ μεγάλης βάσης πειραματικών δεδομένων.

Η καταλληλότητα του εκάστοτε μοντέλου όσον αφορά στη βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας εξετάστηκε με την εφαρμογή των στοιχείων των δοκιμών στα μοντέλα και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτές που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που είχε προηγηθεί. Η μεγάλη ή μικρή απόκλιση μεταξύ των προσδιοριζόμενων πειραματικά και αναλυτικά αποτελεσμάτων οφείλεται σε πολλούς παράγοντες οι οποίοι θα εξετασθούν στη συνέχεια.

Τα αναλυτικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

1. Fardis and Khalili (1982)
2. Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab (2016)
3. Mander et al & Saadatmanesh et al (1994)
4. C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas, S. Marques and D. Marques (2008)
5. Benzaid et al. (2010)
6. Berna 't Csuka and La 'szlo ' P Kolla 'r (2010)
7. Spoelstra and Monti (1999)
8. Togay Ozbakalloglu & Jian C. Lim (2013)
9. EC 2 (Part 1.1)
10. Zehra Canan Girgin (2013)
11. Xiao and Wu (2000)
12. Toutanji (1999)

### **3.1 Fardis and Khalili (1982)**

Οι Fardis & Khalili, ως πρώτοι που μελέτησαν την περίσφιγξη σκυροδέματος με τη χρήση μανδύα FRP, διεξήγαγαν πειράματα θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια τα οποία ήταν εξωτερικά επενδυμένα με FRP. Η αντοχή των κυλίνδρων  $f'_{co}$  πριν την περίσφιγξη κυμαινόταν μεταξύ των 20 με 50 MPa. Βασιζόμενοι λοιπόν στην εξίσωση



3.1.1 που αρχικά είχε προταθεί από τους Richard et al το 1928 προσδιόρισαν το συντελεστή  $k_1$  ώστε να προκύψει η τελική μορφή της εξίσωσης 3.1.2 ως εξής:

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left[ \frac{f_l}{f'_{co}} k_1 + 1 \right] \quad (3.1.1)$$

$$f'_{cc} = \left( 1 + 4,1 * \frac{f_l}{f'_{co}} \right) * f'_{co} \quad (3.1.2)$$

### 3.2. Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab (2016)

Μετά από πείραμα που περιλάμβανε την θλίψη 54 δοκιμίων τα οποία είχαν κοινή διάμετρο αλλά διέφεραν ως προς την αντοχή  $f'_{co}$  και το είδος περίσφιγξης, οι Touhari και Mitiche-Kettab κατέληξαν σε δύο τελικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, έχοντας αρκετά δοκίμια των οποίων η αντοχή κυμαινόταν από 24 MPa (χαμηλής αντοχής) μέχρι 61,7 MPa (υψηλής αντοχής), βασίστηκαν στο κριτήριο του Beniaowski (εξ. 3.2.1)

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left( 1 + N * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^M \right) \quad (3.2.1)$$

όπου M, N σταθερές εξαρτώμενες από το υλικό και την  $f'_{co}$

Δεδομένου ότι τη στιγμή της θραύσης δεν έχει ακόμα προκληθεί η παραμόρφωση στο FRP

$\varepsilon_{FRP,u}$  αλλά μια μικρότερη τιμή παραμόρφωση  $\varepsilon_{h,rep}$  τη στιγμή της αστοχίας θεωρούμε τον λόγο των μεγεθών αυτών  $k_{ef}$  ως εξής:

$$k_{ef} = \frac{\varepsilon_{h,rep}}{\varepsilon_{FRP,u}} \quad (3.2.2)$$

$$\text{Άρα, } f_l = \frac{f_{leff}}{k_{ef}} \quad (3.2.3)$$

Με την εισαγωγή της (3.2.1) στην (3.2.3),

$$f'_{cc} = f'_{co} * (1 + N * k_{ef}^M * \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}}\right)^M) \quad (3.2.4)$$

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων βρέθηκαν προσεγγιστικά οι παρακάτω προσεγγίσεις για τις σταθερές M και N για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και GFRP αντίστοιχα. (Εξ. 3.2.5 και εξ. 3.2.6 )

Για CFRP:

$$f'_{cc} = f'_{co} * (1 + 3,58 * \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}}\right)^{0,997}) \quad (3.2.5)$$

Για GFRP:

$$f'_{cc} = f'_{co} * (1 + 2,50 * \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}}\right)^{1,027}) \quad (3.2.6)$$

Εξετάζοντας όλα τα δείγματα της παρούσας μελέτης από κοινού, εξήχθη ένας μέσος συντελεστής  $k_{mef}$  ίσος με 0,79 για CFRP και 0,74 για GFRP αντίστοιχα και με την εισαγωγή της  $f_l$  συναρτήσεως της  $f_{l,eff}$  λαμβάνουμε τις ακόλουθες εξισώσεις (Εξ. 3.2.7 και εξ.3.2.8 ) για την αντοχή περισφιγμένων κυλίνδρων με μανδύα CFRP και GFRP αντίστοιχα:

**CFRP**

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left(1 + 2,8 * \left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)\right) \quad (3.2.7)$$

**GFRP**

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left(1 + 1,85 * \left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)\right) \quad (3.2.8)$$

### 3.3 Mander et al & Saadatmanesh et al (1994)

Οι Mander et al & Saadatmanesh et al ανέλυσαν ένα μοντέλο για δοκίμια σκυροδέματος κυκλικής διατομής λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  και την πλευρική τάση προκαλούμενη από το FRP,  $f_l$ . Για τον προσδιορισμό της τάσης  $f_l$  χρησιμοποιείται ο τύπος που αναφέρθηκε πρωτότερα,  $f_l = \frac{2 * t_f}{D} * f_{FRP}$ . Συνεπώς προκύπτει η εξίσωση 3.3.1 ως εξής:

$$f'_{cc} = \left( 2,254 * \sqrt{1 + 7,94 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)} - 2 * \frac{f_l}{f'_{co}} - 1,254 \right) * f'_{co} \quad (3.3.1)$$

### 3.4 C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas, S. Marques and D. Marques (2008)

Έπειτα από τη διεξαγωγή πειραμάτων θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  από 30 μέχρι 70 MPa τα οποία ήταν επενδυμένα με μανδύες CFRP ή GFRP και καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι Aire, Gettu, Casas, S. Marques και D. Marques προχώρησαν στον υπολογισμό ενός νέου μοντέλου. (Εξ. 3.4.1)

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 * f_l \quad (3.4.1)$$

$$\text{Όπου:} \quad k_1 = 6,7 * f_l^{-0,17} \quad (3.4.2)$$

### 3.5 Benzaid et al. (2010)

Το μοντέλο αυτό υπολογίστηκε για την πρόβλεψη της τιμής της αντοχής κυλίνδρων σκυροδέματος μετά την περίσφιξη τους με μανδύα CFRP. Η αντοχή των δοκιμίων πριν την περίσφιξη ήταν μεταξύ των τιμών 29-62 MPa δηλαδή μέσης και υψηλής αντοχής. Συνεπώς προκύπτει η τελική σχέση (Εξ. 3.5.1) υπολογισμού της  $f'_{cc}$  ως εξής:

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left( 1 + 1,6 * \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (3.5.1)$$

### 3.6 Berna ´t Csuka and La ´szlo ´ P Kolla ´r (2010)

Στην αναλυτική περιγραφή του μοντέλου αυτού εισήχθη ο όρος  $\kappa_\varepsilon$  ως συντελεστής αποδοτικότητας (efficiency factor) του οποίου η τιμή διαφέρει ανάλογα το είδος της περίσφιγξης που μελετάται. Από πειράματα προσδιορίστηκε η τιμή του για κάθε είδος περίσφιγξης, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας του FRP τόσο μεγαλύτερη τιμή θα προκύπτει για το συντελεστή  $\kappa_\varepsilon$ . Ο συντελεστής  $\kappa_\varepsilon$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,6 και 1,0 αλλά μετά από πειραματική έρευνα ως αντιπροσωπευτικές τιμές λήφθηκαν οι 0,68 και 0,793 για CFRP και GFRP αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά της περίσφιγξης ( $t_f$ ,  $f_{FRP}$ ) καθώς και η διάμετρος  $D$  των δοκιμίων παίζουν σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα καθώς η έκφραση της  $f_l$  που συσχετίζει τα παραπάνω μεγέθη εμφανίζεται στην σχέση υπολογισμού της  $f'_{cc}$ . Ειδικότερα εμφανίζεται ο όρος  $f_{l,a}$  η οποία είναι η ενεργός τάση λόγω περίσφιγξης (actual confining stress) και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 3.6.1.

$$f_{l,a} = \kappa_\varepsilon * f_l \quad (3.6.1)$$

Συνεπώς, το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη διαφορά μεταξύ της περίσφιγξης με μανδύα CFRP ή με GFRP λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών ( $E_f$ ) -το οποίο επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα-. Το πάχος  $t_f$  και η αντοχή  $f_{FRP}$  έχουν συμπεριληφθεί στην έκφραση της  $f_l$ . Συνεπώς, δίνονται δύο διαφορετικές εκφράσεις, η πρώτη για την περίπτωση περίσφιγξης με μανδύα CFRP (Εξ. 3.6.2) και η δεύτερη για την περίπτωση περίσφιγξης με μανδύα GFRP (Εξ. 3.6.3 )

#### **Για CFRP**

$$\kappa_\varepsilon = 0,68 * f_l \quad (3.6.2)$$

#### **Για GFRP**

$$\kappa_\varepsilon = 0,793 * f_l \quad (3.6.3)$$

Τέλος , προκύπτουν οι τελικές εκφράσεις υπολογισμού της αντοχής των περισιφιγμένων δοκιμίων λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω. Οι τελικές σχέσεις (Εξ. 3.6.6 και 3.6.7) δίνονται ως μέσος όρος των δύο εξισώσεων (Εξ. 3.6.4 και εξ. 3.6.5) οι οποίες αποτελούν την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή  $f'_{cc}$  ως εξής:

$$f'_{cc,min} = f_{l,a} + \sqrt{10,16 * f_{l,a} * f'_{co}} \quad (3.6.4)$$

$$f'_{cc,max} = f_{l,a} + \sqrt{10,16 * f_{l,a} * f'_{co} + f'_{co}{}^2} \quad (3.6.5)$$

Συνεπώς, η τελική σχέση υπολογισμού της  $f'_{cc}$  για περίσιφιγξη με CFRP και GFRP αντίστοιχα δίνεται μέσω των ακόλουθων εξισώσεων (Εξ. 3.6.6 και 3.6.7):

#### Για CFRP

$$f'_{cc} = \frac{\left[ \left( 0,68 * f_l + \sqrt{10,16 * 0,68 * f_l * f'_{co} + f'_{co}{}^2} \right) + \left( 0,68 * f_l + \sqrt{10,16 * 0,68 * f_l * f'_{co}} \right) \right]}{2} \quad (3.6.6)$$

#### Για GFRP

$$f'_{cc} = \frac{\left[ \left( 0,793 * f_l + \sqrt{10,16 * 0,793 * f_l * f'_{co} + f'_{co}{}^2} \right) + \left( 0,793 * f_l + \sqrt{10,16 * 0,793 * f_l * f'_{co}} \right) \right]}{2} \quad (3.6.7)$$

### 3.7 Spoelstra & Monti (1999)

Οι Spoelstra & Monti, το 1999, βασιζόμενοι στην ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων και εφαρμογών, πρότειναν εξισώσεις προσδιορισμού της μέγιστης τάσης  $f'_{cc}$  και παραμόρφωσης  $\epsilon'_{cc}$  του περισιφιγμένου σκυροδέματος με FRP. Με βάση συγκεκριμένο θεωρητικό υπόβαθρο εξήγαν τα ακόλουθα:

Δεδομένου ότι

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} * \left( \frac{(E_c - E_{sec,u}) * E_{sec}}{(E_c - E_{sec}) * E_{sec,u}} \right)^{1 - \frac{E_{sec}}{E_c}} \quad (3.7.1)$$

$$\text{και} \quad E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.7.2)$$

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_{sec,u}$  ισούται με :

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2 * \beta * \varepsilon_{ju}} = \frac{E_c}{1 + 2 * \beta * \left( \frac{f_{ju}}{E_j} \right)} \quad (3.7.3)$$

Όπου  $\beta$ : παράμετρος που προσδιορίζεται μέσω της Εξ. 3.7.4

$$\beta = \frac{1}{\varepsilon_{co}} - \frac{E_c}{f'_{co}} \quad (3.7.4)$$

με την υπόθεση ότι  $\varepsilon_{co} = 0,002$ .

Οι παραπάνω εξισώσεις βασίζονται σε παραμέτρους του μοντέλου του Mander:

$$f'_{cc} = \left( 2,254 * \sqrt{1 + 7,94 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)} - 2 * \frac{f_l}{f'_{co}} - 1,254 \right) * f'_{co} \quad (3.7.5)$$

$$\text{Με } f_l = \frac{2 * f_{FRP} * t_f}{D}, \quad \text{κατά τα γνωστά}$$

Μετά από την εφαρμογή των παραπάνω αναλυτικών εκφράσεων σε πληθώρα δεδομένων που είχαν συλλεχθεί από τους Spoolstra και Monti, κατέληξαν στην παρακάτω έκφραση για τον υπολογισμό της αντοχής των κυλίνδρων σκυροδέματος μετά την περίσφιγξη με FRP. (Εξ.3.7.8)

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left( 0,2 + 3 * \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \right) \quad (3.7.8)$$

Σημειώνεται επίσης ότι το συγκεκριμένο μοντέλο προορίζεται κυρίως για δοκίμια μέσης αντοχής, δηλαδή για  $f'_{co}$  από 30 έως 50 MPa. Συνεπώς τυχόν αποκλίσεις και μη αντιπροσωπευτικές τιμές του μοντέλου σε δοκίμια είτε πολύ χαμηλής είτε υψηλής αντοχής θα είναι λογικές.

### 3.8 Ozbakkaloglu and Lim (2013)

Το συγκεκριμένο μοντέλο, βασισμένο σε δεδομένα σχετικής βιβλιογραφίας που αποτελείται από 832 κυκλικής διατομής δοκίμια σκυροδέματος εξωτερικά επενδυμένα με μανδύα FRP, προτείνει συγκεκριμένες εξισώσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής του σκυροδέματος μετά την περίσφιγξη με μανδύα FRP. Η διαδικασία προσδιορισμού της τελικής έκφρασης προϋποθέτει μια σειρά εξισώσεων με την εισαγωγή νέων όρων με σκοπό την πιο ακριβή εξίσωση προσδιορισμού της  $f'_{cc}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του FRP,  $E_{FRP}$ , με αποτέλεσμα το τελικό αποτέλεσμα να επηρεάζεται όχι μόνο από την τιμή της αντοχής  $f_{FRP}$ , αλλά και από το μέτρο ελαστικότητας  $E_{FRP}$ . Οι ιδιότητες των FRP, δηλαδή ο τύπος του μανδύα (CFRP ή GFRP) ακόμη και διαφορές μεταξύ ίδιου τύπου μανδύα – λ.χ. μεταξύ δύο μανδύων CFRP υπάρχουν διαφορές στα χαρακτηριστικά - επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αναλυτικές εκφράσεις και η τελική εξίσωση υπολογισμού της αντοχής  $f'_{cc}$ , δεδομένου όλων των σχετικών παραδοχών που έγιναν κατά τη μελέτη τους.

Αρχικά υπολογίζεται ο όρος  $k_{ef}$  ως ο συντελεστής μείωσης της παραμόρφωσης του στελέχους (Εξ. 3.8.1). Παρατηρείται ότι ο όρος αυτός εξαρτάται μόνο από την αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  και από το μέτρο ελαστικότητας του FRP,  $E_{FRP}$ . Οι τιμές των  $f'_{co}$  και  $E_{FRP}$  είναι εκφρασμένες σε MPa και είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερης αντοχής είναι το σκυρόδεμα καθώς και όσο μεγαλύτερης αντοχής είναι το FRP, η τιμή του  $k_{ef}$  είναι μικρότερη. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης 3.8.1 εφαρμόζεται σε περιπτώσεις αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι και 120 MPa.

$$k_{ef} = 0,9 - 2,3 * f'_{co} * 10^{-3} - 0,75 * E_{FRP} * 10^{-6} \quad (3.8.1)$$

Αναφορικά με την τιμή της τάσης λόγω περίσφιγξης  $f_i$ , απαιτείται απομείωσή της ώστε να ληφθεί στους υπολογισμούς ως η τελική ενεργή τάση λόγω περίσφιγξης. Συνεπώς, από τον πολλαπλασιασμό της  $f_i$  με τον συντελεστή απομείωσης  $k_{ef}$  που

υπολογίστηκε παραπάνω, προκύπτει η τιμή της  $f_{lu,a}$ , δηλαδή η τελική ενεργή τάση λόγω περίσφιγξης. (Εξ. 3.8.2)

$$f_{lu,a} = k_{ef} * f_l \quad (3.8.2)$$

Στη συνέχεια, προσδιορίζεται ο συντελεστής  $k_l$  (Εξ. 3.8.3) ο οποίος εξαρτάται από το πάχος των στρώσεων και το μέτρο ελαστικότητας του FRP καθώς και τη διάμετρο  $D$  του δοκιμίου. (Εξ. 3.8.3)

$$k_l = \frac{2 * E_{FRP} * t_f}{D} \quad (3.8.3)$$

Στο σημείο αυτό η τιμή  $k_l$  ελέγχεται για το αν είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τιμής

$f'_{co}{}^{1,65}$ . Ειδικότερα, αν η τιμή  $k_l$  είναι μικρότερη της  $f'_{co}{}^{1,65}$ , το  $k_l$  λαμβάνεται ίσο με  $f'_{co}{}^{1,65}$ . Διαφορετικά, υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης 3.8.3.

Επιπλέον με βάση την εξίσωση 3.8.4 υπολογίζεται η παράμετρος  $c_1$  η οποία σχετίζεται άμεσα με την αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  και τον συντελεστή  $k_l$  ως εξής:

$$c_1 = 1 + 0,0058 * \frac{k_l}{f'_{co}} \quad (3.8.4)$$

Έπειτα αναφέρεται ο όρος  $f'_{lo}$  ως η κατώτερη τιμή πίεσης περίσφιγξης και προσδιορίζεται μέσω της εξίσωσης 3.8.5. Είναι άμεσα εξαρτημένος από τον συντελεστή  $k_l$  και την αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  ως εξής:

$$f'_{lo} = k_l * \left( 0,43 + 0,009 * \frac{k_l}{f'_{co}} \right) * \left( \frac{f'_{co}}{22000 * \left( \frac{f'_{co}}{10} \right)^{0,30}} \right) \quad (3.8.5)$$

Βάσει όλων των παραπάνω προκύπτει η τελική σχέση προσδιορισμού της αντοχής  $f'_{cc}$  μέσω της εξίσωσης 3.8.6 .

$$f'_{cc} = c_1 * f'_{co} + k_1 * (f_{lu,a} - f'_{lo}) \quad (3.8.6)$$



Ο συντελεστής  $k_1$  αναφέρεται ως συντελεστής ενίσχυσης της αντοχής και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο FRP που χρησιμοποιείται. Στην παρούσα μελέτη, οι Ozbakkaloglu και Lim θεώρησαν ότι η τιμή 3,20 αντιπροσωπεύει επαρκώς τις περιπτώσεις για περίσφιγξη με μανδύα CFRP ή GFRP ώστε να προκύπτουν συντηρητικά αποτελέσματα.

Εναλλακτικά, προτάθηκε η χρήση συγκεκριμένων τιμών του συντελεστή  $k_1$  δηλαδή 3,67 και 2,49 για περίσφιγξη με CFRP και GFRP αντίστοιχα. Ωστόσο, η εφαρμογή των τιμών αυτών στην εξίσωση υπολογισμού της  $f'_{cc}$  (Εξ. 3.8.6) έγινε με βάση δεδομένα που διέθεταν. Η ανάγκη για περαιτέρω έλεγχο και εφαρμογή των υπόψη συντελεστών σε μια πιο εκτεταμένη βάση δεδομένων κρίνεται αναγκαία ώστε να αποδειχθούν ως καταλληλότεροι συγκριτικά με την αρχική προσέγγιση του  $k_1=3,20$ .

Στον Πίνακα 3.8.1 (Ozbakkaloglu-Lim, 2013) παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές  $k_1$  βάσει των τύπων FRP που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 3.8.1 Τιμή  $k_1$  σε σχέση με τον τύπο FRP (Ozbakkaloglu και Lim, 2013)

Variation of strength enhancement coefficients ( $k_1$ ) with FRP type and confinement technique.

Specimens	$k_1$		
	Number	$R^2$	Average
All	753	0.799	3.22
All wrapped	684	0.806	3.26
CFRP wrapped	426	0.870	3.67
GFRP wrapped	149	0.759	2.49
AFRP wrapped	67	0.889	3.30
HM CFRP wrapped	34	0.772	4.96
UHM CFRP wrapped	8	-	-
All tube-encased	69	0.759	2.94
CFRP tube-encased	14	0.907	2.87
GFRP tube-encased	36	0.731	2.92
AFRP tube-encased	12	0.811	2.95
HM CFRP tube-encased	3	-	-
UHM CFRP tube-encased	4	-	-

### 3.9 Κανονισμός EC 2 Part 1.1

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.1.9 του Ευρωκώδικα 2 (Eurocode 2: Design of concrete structures-Part1-1, EN 1992-1-1: 2004) η σχέση (3.9.1) που υπολογίζει την τάση για το περισφιγμένο σκυρόδεμα  $f'_{cc}$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$f'_{cc} = f_{ck,c} = f_{ck} * \left(1,000 + \frac{5*\sigma_2}{f_{ck}}\right) \quad \text{για } \sigma_2 \leq 0,05 * f_{ck} \quad (3.9.1)$$

$$f'_{cc} = f_{ck,c} = f_{ck} * \left(1,125 + \frac{2,50*\sigma_2}{f_{ck}}\right) \quad \text{για } \sigma_2 > 0,05 * f_{ck} \quad (3.9.2)$$

όπου

$f_{ck}$ : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$f_{ck,c}$ : η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος (ή  $f'_{cc}$ ) και

$\sigma_2$  : η πλευρική τάση λόγω περισφιγξης (Εξ.3.9.3 )

$$\sigma_2 = \frac{2*t_f*f_{FRP}}{D} \quad (3.9.3)$$

Επίσης, με βάση την παράγραφο Α.4.4.3 του Ευρωκώδικα 8 – μέρος 3 (Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3, EN 1998-3: 2005) η αναγκαία τάση περισφιγξης που πρέπει να εφαρμοσθεί πλευρικά σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος μέσω της περισφιγξης με FRP με σκοπό να επιτευχθεί η προσδοκώμενη πλαστιμότητα, εξαρτάται από τον λόγο  $I_x = \mu_{\phi, target} / \mu_{\phi, available}$ , δηλαδή από τους δείκτες πλαστιμότητας - στόχο και - διαθέσιμο αντίστοιχα και υπολογίζεται βάση της εξίσωσης 3.9.4.

$$f_l = 0,4 * I_x^2 * \left(\frac{\varepsilon^2_{cu}}{\varepsilon^{1,5}_{ju}}\right) \quad (3.9.4)$$

όπου  $f_c$  η αντοχή του σκυροδέματος,

$\varepsilon_{cu}$  η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος τη στιγμή της αστοχίας

και  $\varepsilon_{ju}$  η ανηγμένη παραμόρφωση του μανδύα της στιγμή της αστοχίας, που είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση των ινών  $\varepsilon_{fu}$ .

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κυκλικών διατομών περισφιγμένες με συνεχείς στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς (όχι λωρίδες), η τάση λόγω περισφιγξης που εφαρμόζεται από μία στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς ισούται με: (εξ. 3.9.5)

$$f_l = 0,5 * \rho_{FRP} * E_{FRP} * \varepsilon_{ju} \quad (3.9.5)$$

Ο όρος  $\rho_{FRP}$  εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του FRP και το πάχος  $t_f$  όπως περιγράφεται μέσω της Εξ. 3.9.6.

$$\rho_{FRP} = \frac{4 \cdot t_f}{D} \quad (3.9.6)$$

Εφόσον τη στιγμή της αστοχίας του μανδύα FRP παρατηρείται παραμόρφωση ίση με  $\epsilon_{ju}$ , λόγω της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του FRP, υπολογίζεται εύκολα η αντοχή  $f_{FRP}$  του FRP ως γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας  $E_{FRP}$  και της παραμόρφωσης  $\epsilon_{ju}$ . Συνεπώς, η εξίσωση 3.9.5 είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για τον προσδιορισμό της τάσης λόγω περίσφιγξης  $f_l$ , δηλαδή με  $f_l = \frac{2 \cdot f_{FRP} \cdot t_f}{D}$ .

### 3.10 Zehra Canan Girgin (2013)

Στη μελέτη αυτή, τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown Johnston που είχαν προσδιοριστεί αρχικά στα πλαίσια μελέτης στη βραχομηχανική, διευρύνθηκαν και αποτέλεσαν βάση για την ανάπτυξη ενός ακόμη αναλυτικού προσομοιώματος για τον υπολογισμό της αντοχής  $f'_{cc}$  των κυλίνδρων. Η εγκυρότητα και αξιοπιστία του αναλυτικού προσομοιώματος ελέγχθηκε με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από πειράματα για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  από 24 μέχρι 108 MPa. Ο Girgin προσπάθησε να συσχετίσει την αντοχή του σκυροδέματος προ περίσφιγξης,  $f'_{co}$  με τα στοιχεία της περίσφιγξης με FRP. Στην προσπάθεια αυτή χρησιμοποίησε την ήδη ορισμένη έννοια της ασκούμενης πλευρικά τάσης λόγω περίσφιγξης  $f_l$  η οποία είναι ίση με (Εξ. 3.10.1)

$$f_l = \frac{2 \cdot t_f \cdot f_{FRP}}{D} \quad (3.10.1)$$

Έπειτα, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή δύο επιπλέον συντελεστών, των B και M οι οποίοι συμβολίζουν τη μη γραμμικότητα του κριτηρίου αντοχής και την κλίση του περιβλήματος αστοχίας για  $f_l=0$  αντίστοιχα. Όπως είναι φανερό και μέσω των σχέσεων υπολογισμού τους, (Εξ. 3.10.2 και εξ. 3.10.3 (α, β) αντίστοιχα), είναι άμεσα συσχετισμένες με την αντοχή του σκυροδέματος των δοκιμίων πριν την περίσφιγξη με FRP,  $f'_{co}$ . Επιπρόσθετα, η μορφή της εξίσωσης 3.10.2 μέσω της οποίας λαμβάνεται η τιμή του B για δεδομένη τιμή αντοχής  $f'_{co}$ , προσομοιάζεται με παραβολικό διάγραμμα.

$$B = 1 - 0,0172 * \left( \log(f'_{co}) \right)^2 \quad (3.10.2)$$

$$M = 0,0035 * f'_{co}{}^2 - 0,056 * f'_{co} + 2,83 \quad (3.10.3) \text{ (α)}$$

$$M = 0,0003 * f'_{co}{}^2 - 0,076 * f'_{co} + 5,46 \quad (3.10.3) \text{ (β)}$$

Σημειώνεται ότι για την περίπτωση που η τιμή της  $f'_{co}$  θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 7 και 24 MPa, ο υπολογισμός του  $M$  θα γίνεται με βάση την εξίσωση 3.10.3 (α). Κατά συνέπεια, για την περίπτωση που η αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$  είναι μεταξύ των 25 και 108 MPa, η τιμή του  $M$  υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης 3.10.3 (β).

Προς αποφυγή λαθών όσον αφορά στις μονάδες μέτρησης, στην εξίσωση προσδιορισμού της παραμέτρου  $B$  η τιμή της  $f'_{co}$  πρέπει να είναι εκφρασμένη σε kPa.

Η τελική σχέση υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος των περισφιγμένων κυλίνδρων  $f'_{cc}$  δίνεται ως εξής (Εξ. 3.10.4):

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left(1 + \frac{M}{B} * \frac{f_l}{f'_{co}}\right)^B \quad (3.10.4)$$

Παρατηρείται τέλος, ότι όσο υψηλότερης αντοχής είναι το σκυρόδεμα, τόσο μικρότερη τιμή  $M$  προκύπτει.

### 3.11 Xiao and Wu (2000)

Οι Xiao και Wu μελέτησαν τον προσδιορισμό κατάλληλου προσομοιώματος για τον υπολογισμό της αντοχής  $f'_{cc}$  του περισφιγμένου σκυροδέματος μέσω πειραμάτων σε 27 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος με τη χρήση μανδύων CFRP. Σύμφωνα με την πρότασή τους, η τιμή της  $f'_{cc}$  προσδιορίζεται βάσει της εξίσωσης 3.11.1:

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left(a + k * \frac{f_r}{f'_{co}}\right) \quad (3.11.1)$$

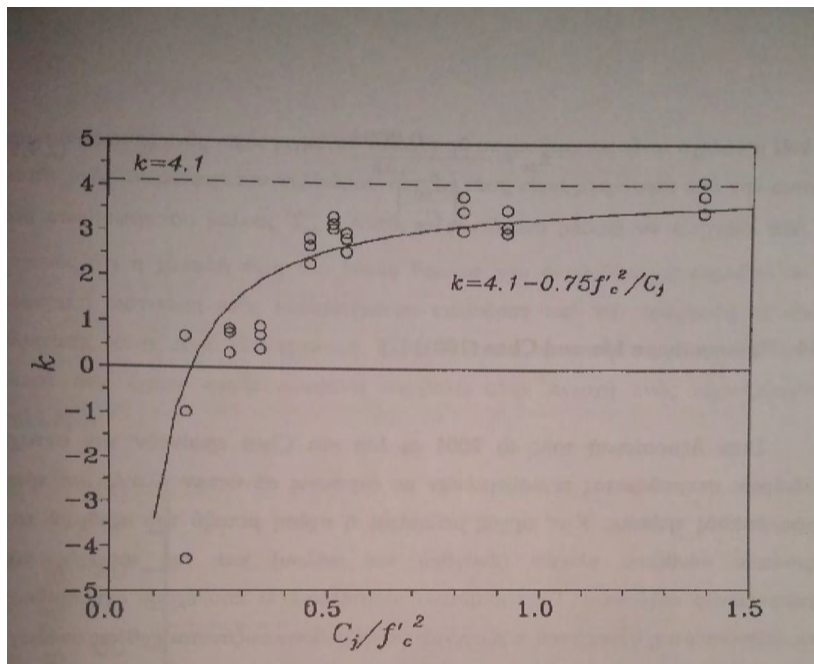
Οι ερευνητές, βασιζόμενοι στην ανάλυση και επεξεργασία της παλινδρόμησης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα, προσδιόρισαν την τιμή του  $a$  ίση με 1,10 και την τιμή του  $k$  να υπολογίζεται βάσει της Εξ. 3.11.2 ως εξής :

$$k = 4,1 * 0,75 * \frac{f'^2_{co}}{c_j} \quad (3.11.2)$$

Ο όρος  $C_j$  εισάγεται στην αναλυτική διαδικασία ως μέτρο της περίσφιγξης και βασίζεται κατά κύριο λόγο στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας του FRP,  $E_{FRP}$ , στο πάχος των στρώσεων του FRP,  $t_{FRP}$ , καθώς και στη διάμετρο του κυλίνδρου  $D$ , όπως είναι φανερό παρακάτω (Εξ. 3.11.3)

$$C_j = \frac{2 * t_{FRP} * E_{FRP}}{D} \quad (3.11.3)$$

Το επόμενο σχήμα (Σχ. 3.11.1) παρουσιάζει τα πειραματικά δεδομένα και την εξίσωση παλινδρόμησης για το συντελεστή περίσφιγξης  $k$  σύμφωνα με τη μελέτη των Χiao και Wu.



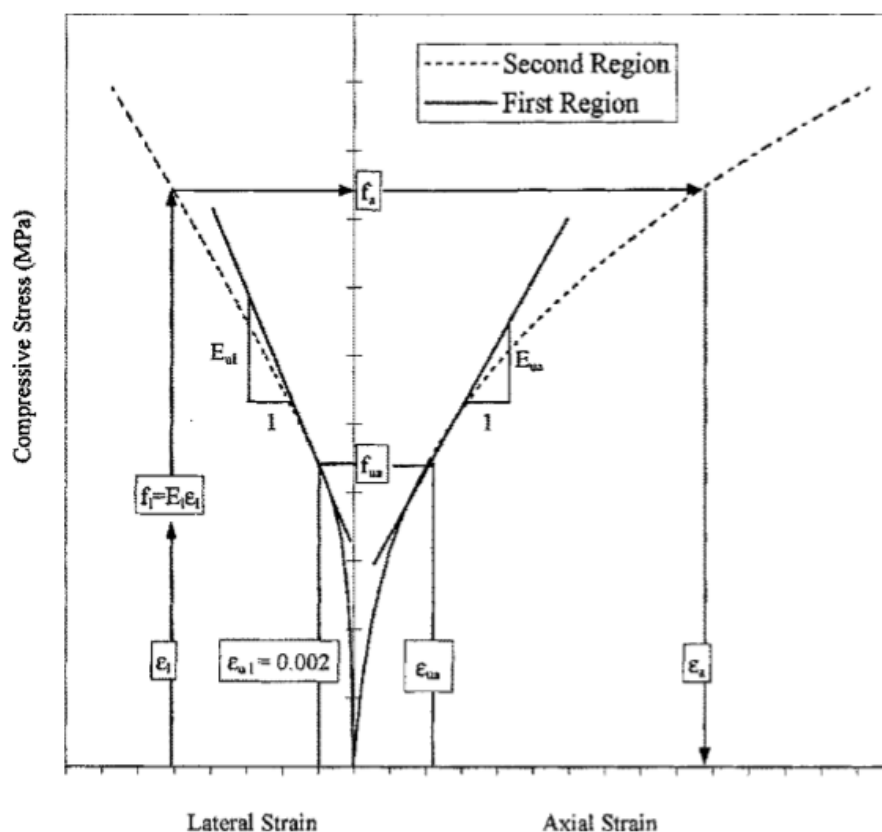
Σχ. 3.11.1 Πειραματικά δεδομένα και εξίσωση παλινδρόμησης για το συντελεστή περίσφιγξης  $k$ , (Xiao & Wu, 2000)

Σημειώνεται τέλος, ότι ο συμβολισμός  $f'_c$  στο παραπάνω σχήμα αντιπροσωπεύει την αντοχή του σκυροδέματος χωρίς περίσφιγξη  $f'_{co}$ .

### 3.12 Toutanji (1999)

Ο Toutanji ασχολήθηκε με την μελέτη ενός αναλυτικού προσομοιώματος το οποίο προσδιορίζει την τιμή της τάσης  $f'_{cc}$  του περισφιγμένου σκυροδέματος. Κατά τη μελέτη αυτή, διεξήγαγε πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε κυλίνδρους από σκυρόδεμα περισφιγμένους εξωτερικά με μανδύες CFRP και GFRP. Για τον προσδιορισμό της τελικής σχέσης υπολογισμού της  $f'_{cc}$  βασίστηκε αρχικά στα μοντέλα των Richard et al (1928) και σε αυτό των Mander et al (1988) στα οποία χρησιμοποιείται οπλισμός περίσφιξης από χάλυβα.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.12.1) παρουσιάζεται σχηματικά το προτεινόμενο μοντέλο στο οποίο διακρίνονται δύο φάσεις: η Φάση I και η Φάση II.



Σχ. 3.12.1 Διάγραμμα τάσεων-παρ/σεων του προτεινόμενου μοντέλου, (Toutanji, 1999)

Από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του προτεινόμενου μοντέλου (Σχ. 3.12.1) προκύπτει ότι κατά τη Φάση I η συμπεριφορά του FRP είναι ίδια όπως αυτή των συνδετήρων που συμβάλλουν ως οπλισμός περίσφιξης του σκυροδέματος. Ειδικότερα, τη στιγμή που η τιμή της παραμόρφωσης του σκυροδέματος φθάσει την τιμή 0,002, δηλαδή τη στιγμή της ρηγμάτωσης, τα φύλλα FRP ενεργοποιούνται.

Μέχρι τη στιγμή αυτή, δηλαδή κατά τη Φάση I, τα φύλλα FRP δεν έχουν ενεργοποιηθεί, συνεπώς η στιγμή της ρηγμάτωσης σηματοδοτεί τη λήξη της Φάσης I του διαγράμματος. Στη συνέχεια, καθώς η τιμή της παραμόρφωσης αυξάνεται, ξεκινάει μια γραμμή με μικρότερη κλίση. Είναι φανερό ότι τη στιγμή που επέρχεται η αστοχία των κυλίνδρων χωρίς περίσφιγξη, οι αντίστοιχα περισφιγμένοι κύλινδροι επιδεικνύουν περισσότερη πλαστιμότητα και η αστοχία τους καθυστερεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συμβολή της περίσφιγξης καθώς τη στιγμή της αστοχίας των απερίσφικτων κυλίνδρων, έχει συμβεί ήδη η ενεργοποίηση του μανδύα FRP στους κυλίνδρους με περίσφιγξη. Προφανώς και η αστοχία των τελευταίων επέρχεται αργότερα και σηματοδοτείται με την αποκόλληση του μανδύα FRP.

Ο Toutanji, αρχικά βασισμένος στην εξίσωση των Richart et al. (1928), (Εξ. 3.12.1) πρότεινε κάποιες αλλαγές όσον αφορά στον υπολογισμό του συντελεστή  $k_1$ .

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (3.12.1)$$

Ενώ στη σχέση του Richart et al. που αποτέλεσε βάση για τη συγκεκριμένη έρευνα του Toutanji, ο συντελεστής  $k_1$  θεωρήθηκε μια σταθερή τιμή, ο Toutanji μέσω παλινδρόμησης των πειραματικών αποτελεσμάτων πρότεινε μια σχέση που συνδέει το συντελεστή αποδοτικότητας  $k_1$  με το λόγο  $\frac{f_l}{f'_{co}}$  (εξ. 3.12.2) και κατέληξε στην εξ. 3.12.3 που αποτελεί την τελική εξίσωση προσδιορισμού της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f'_{cc}$ .

$$k_1 = \left( 3,50 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0,15} \right) \quad (3.12.2)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left[ 1 + 3,5 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (3.12.3)$$

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της μελέτης σχετικά με την αξιοπιστία των αναλυτικών προσομοιωμάτων του κεφαλαίου 3 βάσει των πειραματικών δεδομένων και καταγραφών που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, η βάση δεδομένων (Πίνακας 2.5.1) περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων και των υλικών περίσφιγξης καθώς και τις τιμές  $f'_{cc}$  που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Σε πρώτο στάδιο, υπολογίζεται η προβλεπόμενη τιμή  $f'_{cc}$  με βάση τα αναλυτικά μοντέλα προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  του κεφαλαίου 3. Κατά συνέπεια, για κάθε δοκίμιο της βιβλιογραφίας υπολογίζονται 12 διαφορετικές τιμές αντοχής μετά την περίσφιξη  $f'_{cc}$ , οι οποίες προκύπτουν με την εφαρμογή των δεδομένων των δοκιμίων στις μαθηματικές εκφράσεις του εκάστοτε μοντέλου.

Κάθε ένα από τα αναλυτικά προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν διαφέρουν ως προς τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψη και τυχόν παραδοχές. Παρ' όλα αυτά, στους μαθηματικούς τύπους όλων των μοντέλων περιέχεται η τιμή της  $f_i$  η οποία εμφανίζεται είτε ως λόγος  $f_i/f'_{co}$  (προσομοιώματα Spoelstra and Monti (1999), Fardis and Khahili (1982)) είτε μειωμένη κατά ένα συντελεστή που έχει οριστεί κατά τη μελέτη του προσομοιώματος (λ.χ. προσομοίωμα Ozbakkaloglu (2013)). Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητος και ο υπολογισμός της  $f_i$  βάσει του τύπου 1.7.1, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της περίσφιγξης ( $t_f$ ,  $E_{FRP}$  και  $f_{FRP}$ ) και της διαμέτρου  $D$  του δοκιμίου.

Η υπολογιστική διαδικασία γίνεται με τη βοήθεια του excel. Ο πίνακας των δεδομένων περιέχει όλα τα δοκίμια της βιβλιογραφίας χωρισμένα σε τρεις ομάδες ανάλογα τον τύπο περίσφιγξης που φέρουν (CFRP(δοκίμια με ανθρακονήματα)/GFRP (δοκίμια με υαλονήματα)/REF(δοκίμια χωρίς περίσφιξη)) και τα δοκίμια κάθε ομάδας κατατάσσονται κατά σειρά αύξουσας αντοχής απερίσφικτου σκυροδέματος  $f'_{co}$ .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών βάσει κάθε αναλυτικού προσομοιώματος και της προσδιοριζόμενης πειραματικά τιμής  $f'_{cc}$  για την οποία επέρχεται η αστοχία του εκάστοτε δοκιμίου. Γίνεται αντιληπτό ότι στην περίπτωση των δοκιμίων REF που χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς στα πειράματα και δεν είχαν περισφιχθεί με κάποιο από τους τύπους μανδύα FRP, η ενίσχυση λόγω περίσφιγξης είναι μηδενική. Συνεπώς, η τιμή της αντοχής των REF δοκιμίων  $f'_{cc}$  συμπίπτει με την αντοχή  $f'_{co}$ .



Όσον αφορά στα περισφιγμένα δοκίμια με CFRP/GFRP η σχέση προβλεπόμενης και πειραματικής τιμής  $f'_{cc}$  γίνεται αντιληπτή ευκολότερα μέσω της σχεδίασης των διαγραμμάτων  $f'_{cc}$  για προβλεπόμενες (αναλυτικά υπολογισμένες) και πειραματικές τιμές.

Για κάθε αναλυτικό προσομοίωμα, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα  $f'_{cc}$ , των οποίων ο οριζόντιος άξονας περιέχει τις τιμές  $f'_{cc}$  υπολογισμένες με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογισμού και ο κατακόρυφος άξονας περιέχει τις πειραματικές τιμές που προέκυψαν από τα πειράματα.

Για κάθε μοντέλο παρέχονται δύο διαγράμματα. Το ένα περιέχει δεδομένα και αποτελέσματα για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και το δεύτερο για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP.

Ο διαχωρισμός ανάμεσα σε δοκίμια με μανδύα CFRP και GFRP κρίθηκε σκόπιμος καθώς πολλά μοντέλα ανταποκρίνονται διαφορετικά ανάλογα τον τύπο των ινών περίσφιγξης. Κάποια μοντέλα αναπτύχθηκαν μόνο βάσει πειραματικών δεδομένων βασισμένων σε δοκίμια που περισφίχθηκαν με ανθρακονήματα, με συνέπεια τα αποτελέσματα να εμφανίζουν μεγάλη σύγκλιση με τα πειραματικά για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Συνεπώς, ο διαχωρισμός των δεδομένων ανάλογα με τον τύπο του μανδύα περίσφιγξης, προσδίδει σαφέστερη εικόνα για την καταλληλότητα και απόδοση του εκάστοτε μοντέλου.

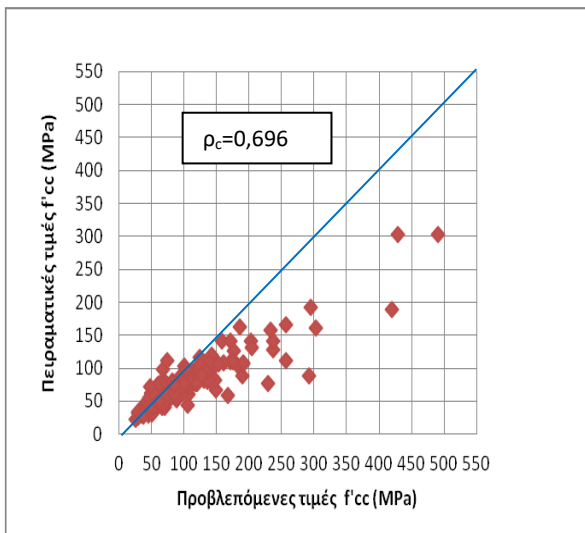
Επιπρόσθετα σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η τιμή  $\rho_c$  η οποία είναι ο συντελεστής συμφωνίας του Lin. Ο συντελεστής συσχέτισης συμφωνίας του Lin λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, με 1 την πλήρη γραμμική συσχέτιση των δεδομένων σε γραμμή κλίσης 45 μοιρών.

Τα διαγράμματα σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα με αποτέλεσμα η μπλε βοηθητική διαγώνιος γραμμή που χαράχτηκε σε γωνία 45 μοιρών να διευκολύνει την κατανόηση της συμπεριφοράς του εκάστοτε μοντέλου. Ειδικότερα, κάθε κουκκίδα παριστάνει και ένα δοκίμιο για το οποίο οι συντεταγμένες του στο επίπεδο (x, y) ισούνται με τις προβλεπόμενες και πειραματικές τιμές της  $f'_{cc}$  αντίστοιχα. Συνεπώς, όσο κοντύτερα στη διαγώνιο βρίσκεται κάθε σημείο, τόσο μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  προκύπτει.

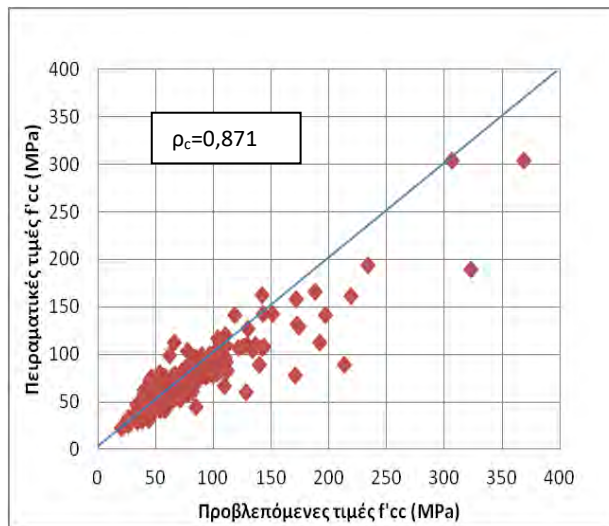
## 4.1 Δοκίμια με περίσφιγξη CFRP

### 4.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 112,6 MPa

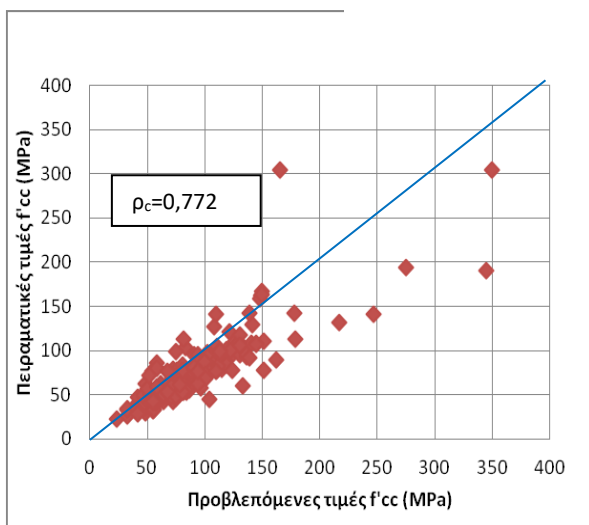
Στα σχήματα 4.1.1.1 έως 4.1.1.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  (εκφρασμένες σε MPa) για κάθε ένα από τα αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP με αντοχή  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 112,6 MPa.



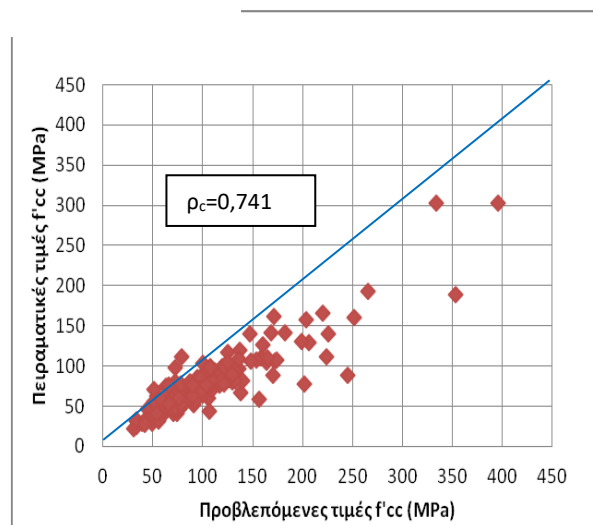
Σχήμα 4.1.1.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



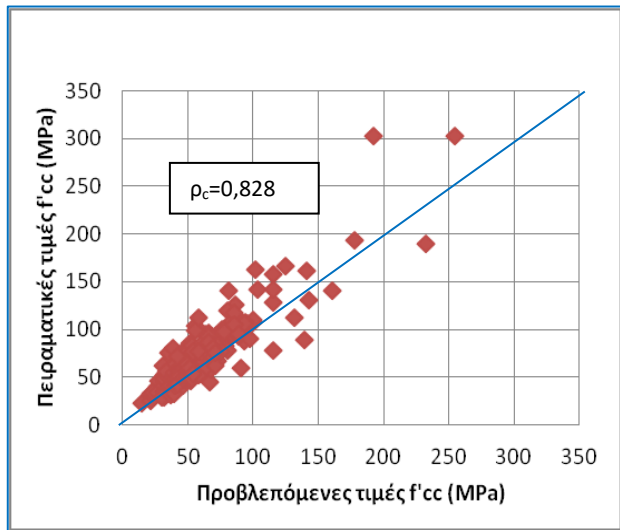
Σχήμα 4.1.1.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche-Kettab



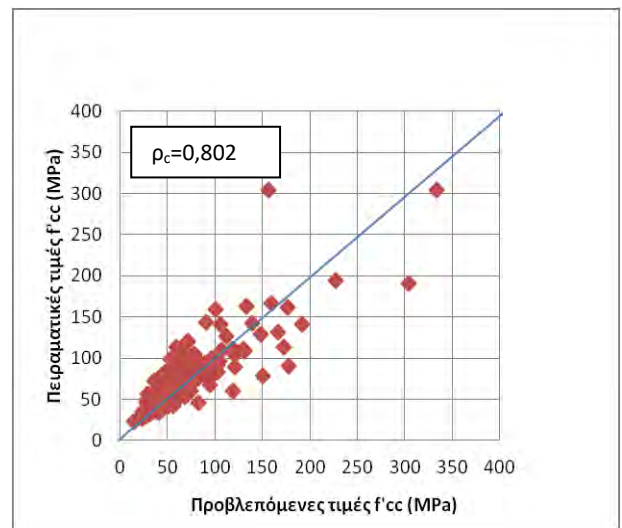
Σχήμα 4.1.1.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh (1988, 1994)



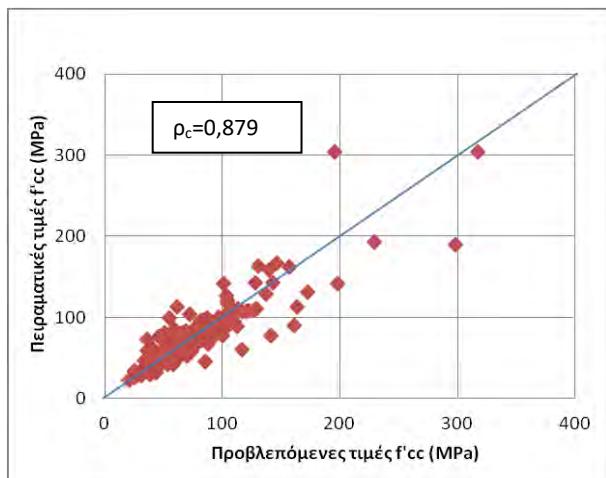
Σχήμα 4.1.1.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Aire & Gettu & Casas & Marques (2008)



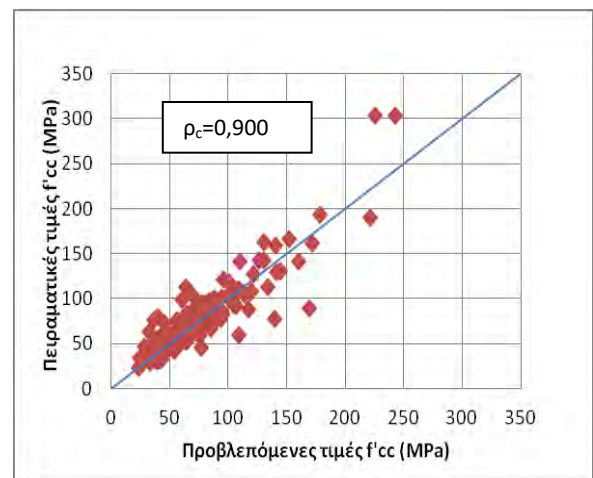
Σχήμα 4.1.1.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Benzaid et al. (2010)



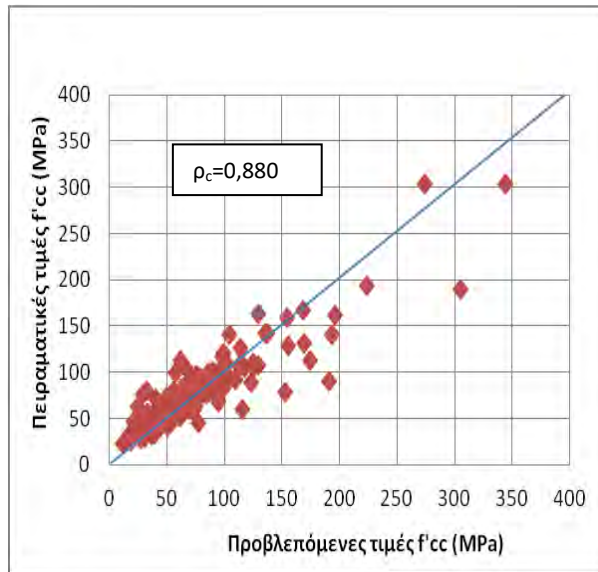
Σχήμα 4.1.1.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Berna't Csuka & La'zslo 'P Kolla'r (2010)



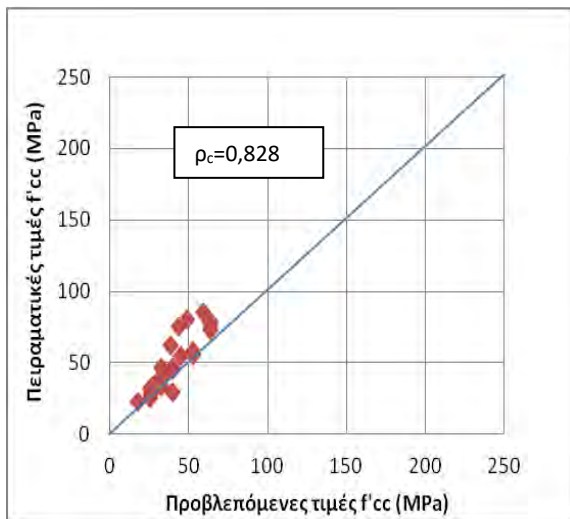
Σχήμα 4.1.1.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Spolstra & Monti



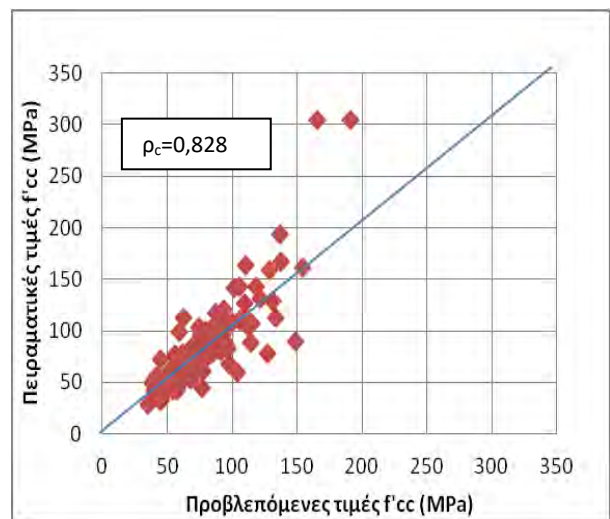
Σχήμα 4.1.1.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο του Ozbakkaloglu



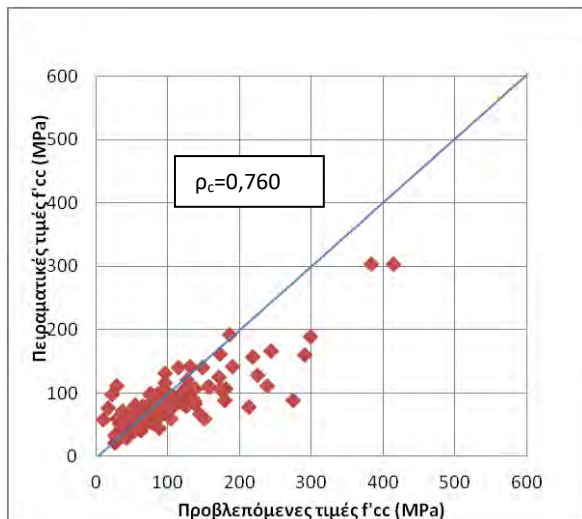
Σχήμα 4.1.1.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο του EC - 2



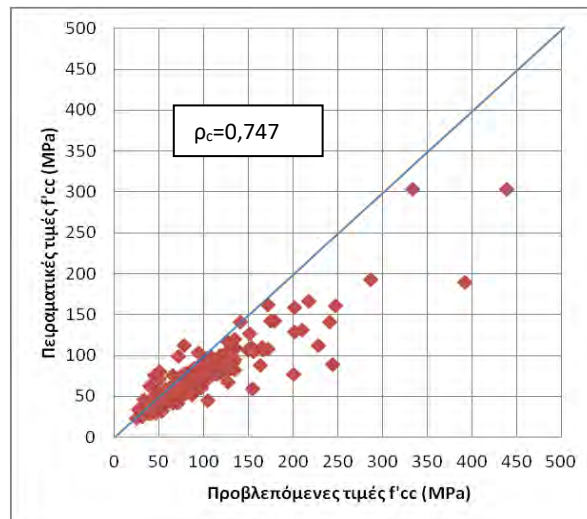
Σχήμα 4.1.1.10α Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο του Girgin (2013) για  $f'_{co}$  από 7 έως 24 MPa



Σχήμα 4.1.1.20β Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο του Girgin για  $f'_{co}$  από 24 έως 112,6 MPa



Σχήμα 4.1.1.41 Διάγραμμα προβλεπόμενων –πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu (2000)



Σχήμα 4.1.1.32 Διάγραμμα προβλεπόμενων –πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με βάση το μοντέλο των Toutanji (1999)

#### 4.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 50 MPa

Είναι φανερό ότι η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος των δοκιμίων πριν την περίσφιγξη  $f'_{co}$  επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος  $f'_{cc}$ . Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η κατηγοριοποίηση των δοκιμίων με βάση την αντοχή  $f'_{co}$ . Έτσι, προέκυψαν τρεις διαφορετικές κατηγορίες για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP:

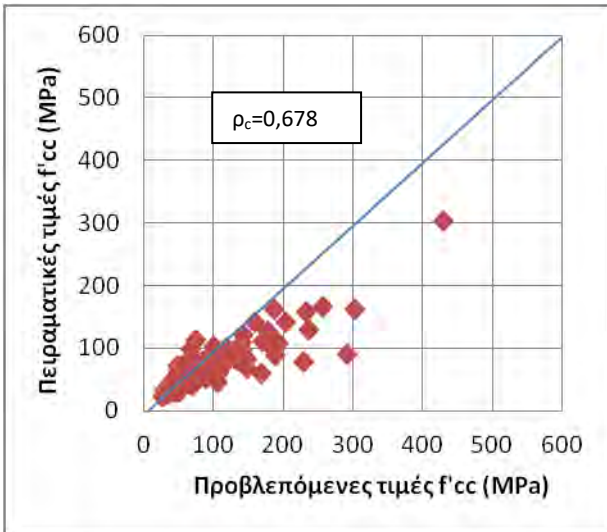
- α) Για  $f'_{co}$  από 0 έως 50 MPa
- β) Για  $f'_{co}$  από 0 έως 80 MPa
- γ) Για  $f'_{co}$  από 50 MPa έως  $f'_{co,max}$

Η τιμή  $f'_{co,max}$  είναι ίση με 112,6 MPa για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP.

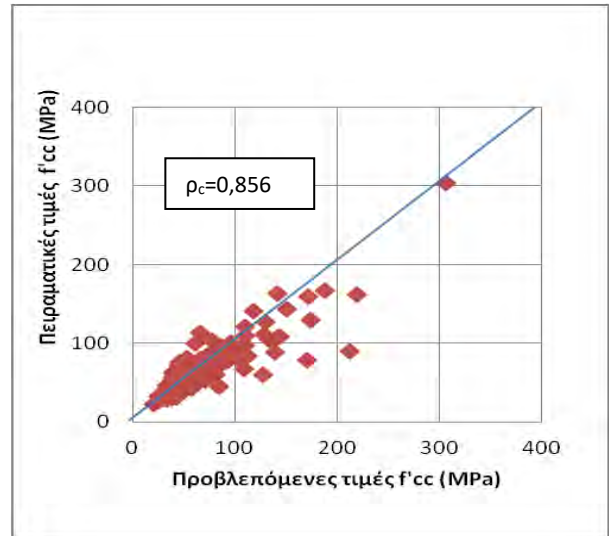
Σημειώνεται επίσης ότι για αντοχή  $f'_{co}$  ανώτερη των 50 MPa τα δοκίμια θεωρούνται υψηλής αντοχής, συνεπώς κρίθηκε σκόπιμη η εξέταση των δοκιμίων χαμηλής - μέτριας αντοχής  $f'_{co}$  και υψηλής ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, ακολουθείται η ίδια διαδικασία υπολογισμού προβλεπόμενων τιμών  $f'_{cc}$  με βάση τα αναλυτικά μοντέλα και η σύγκρισή τους με τις πειραματικές τιμές μέσω διαγραμμάτων προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για κάθε προσομοίωμα ξεχωριστά.

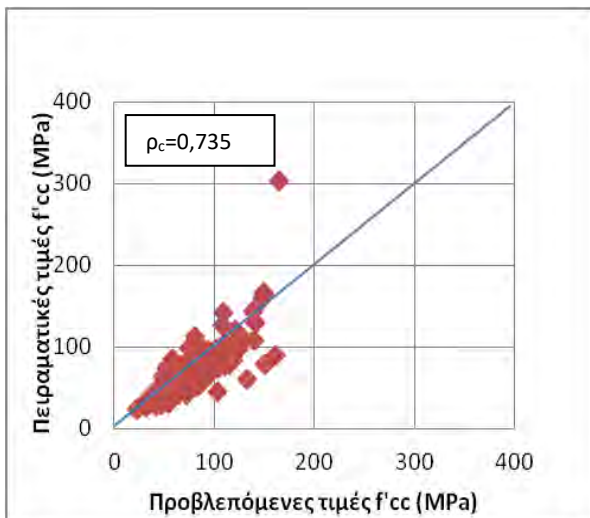
Στα σχήματα 4.1.2.1 μέχρι 4.1.2.12 εικονίζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων-πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa επενδυμένα εξωτερικά με μανδύα CFRP.



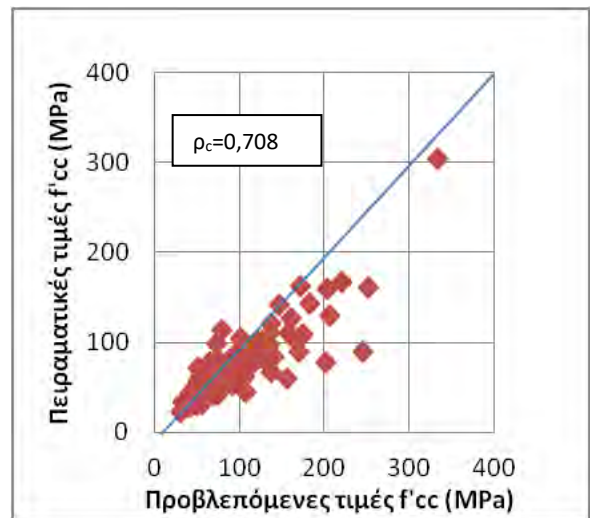
Σχήμα 4.1.2.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50$  MPa με βάση τους Khalili & Fardis



Σχήμα 4.1.2.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50$  MPa με βάση τους Touhari & Mitiche Kettab

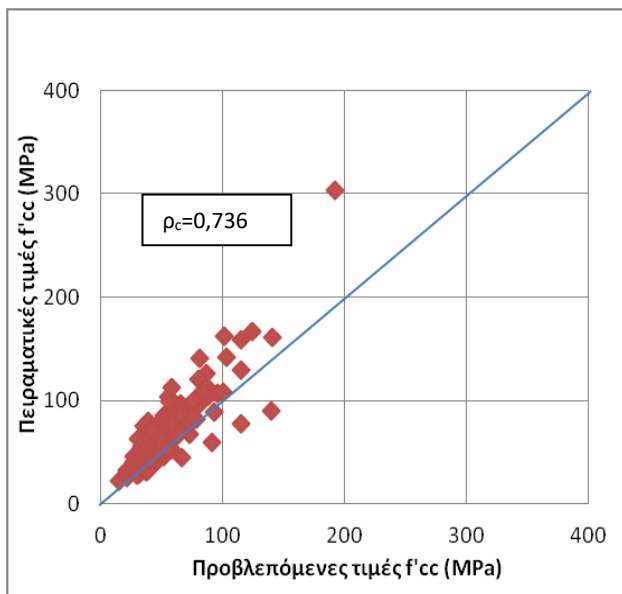


Σχήμα 4.1.2.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50$  MPa με βάση τους Mander & Saadatmanesh

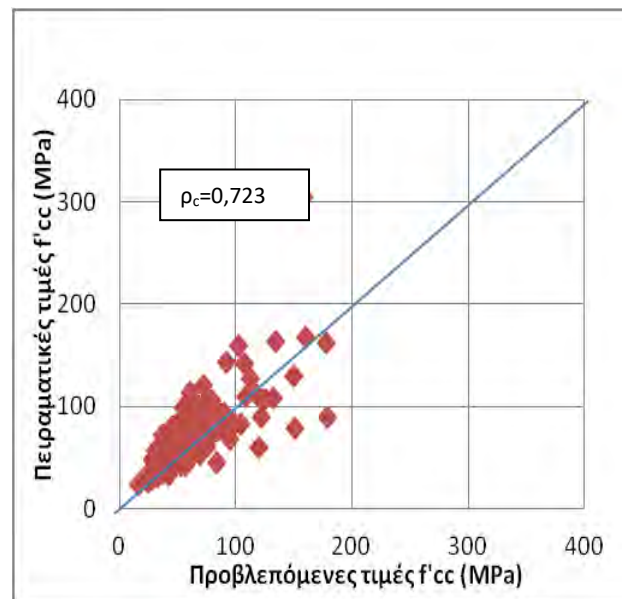


Σχήμα 4.1.2.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50$  MPa με βάση τους Aire, Gettu, Casas & Marques

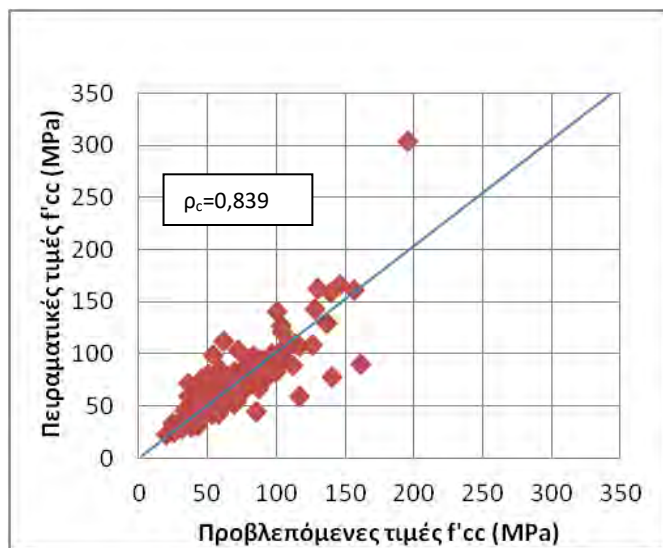




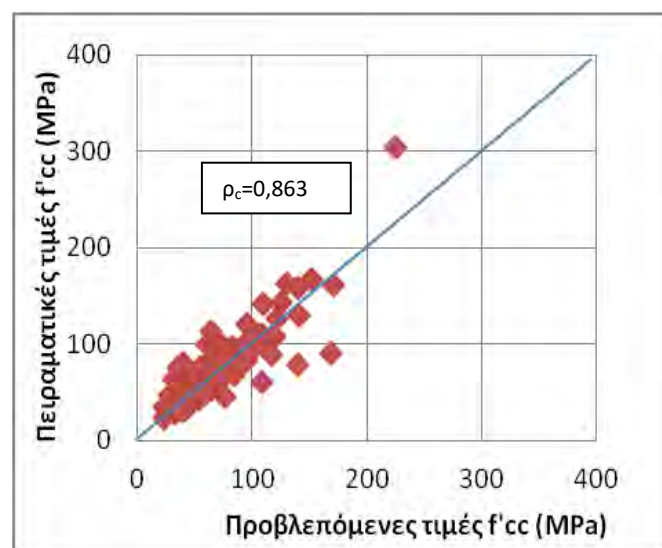
Σχήμα 4.1.2.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τους Benzaid et.al



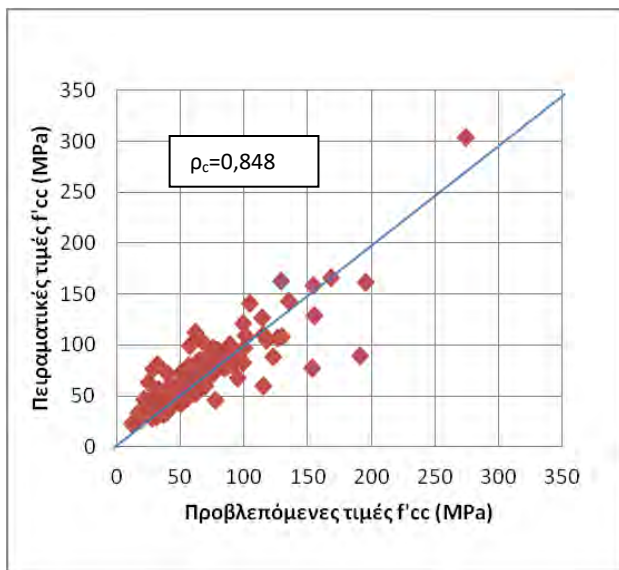
Σχήμα 4.1.2.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τους Berna't Csuka & La'zslo 'P Kolla'r



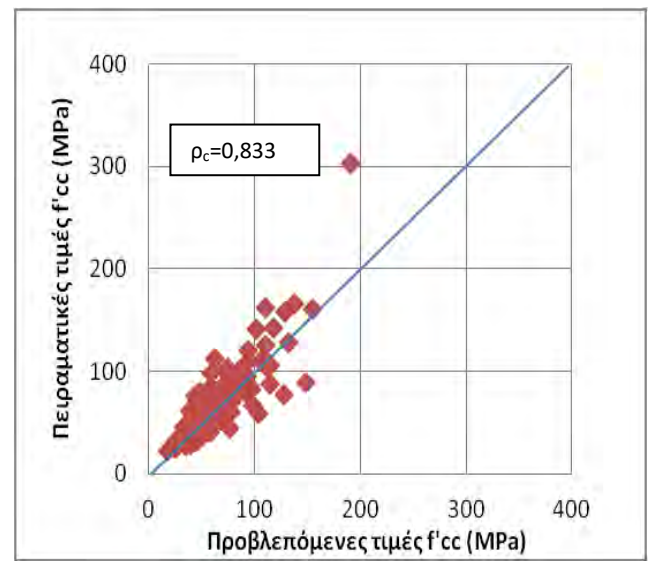
Σχήμα 4.1.2.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τους Spoelstra & Monti



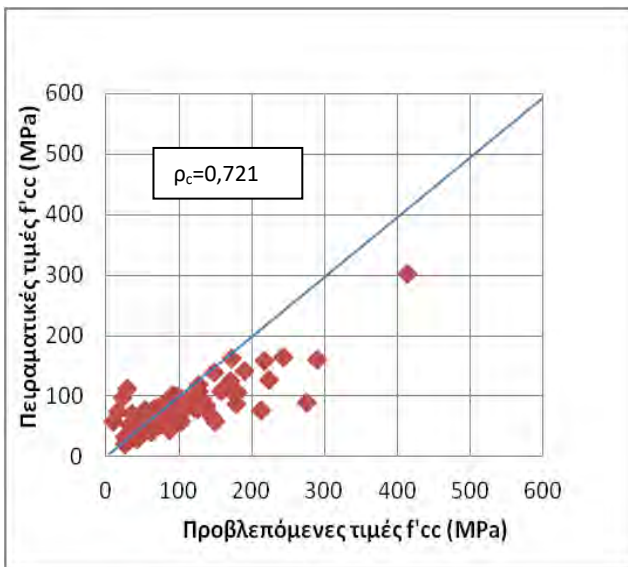
Σχήμα 4.1.2.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τον Ozbakkaloglu



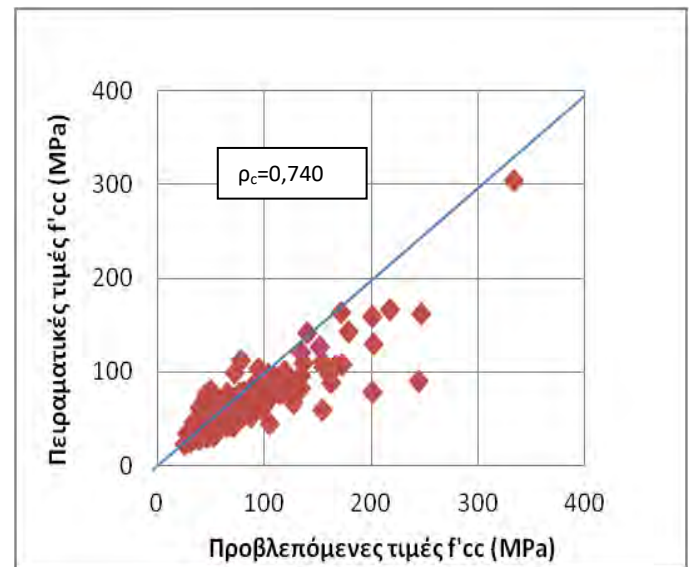
Σχήμα 4.1.2.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τον EC - 2



Σχήμα 4.1.2.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τον Girgin



Σχήμα 4.1.2.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τους Xiao & Wu

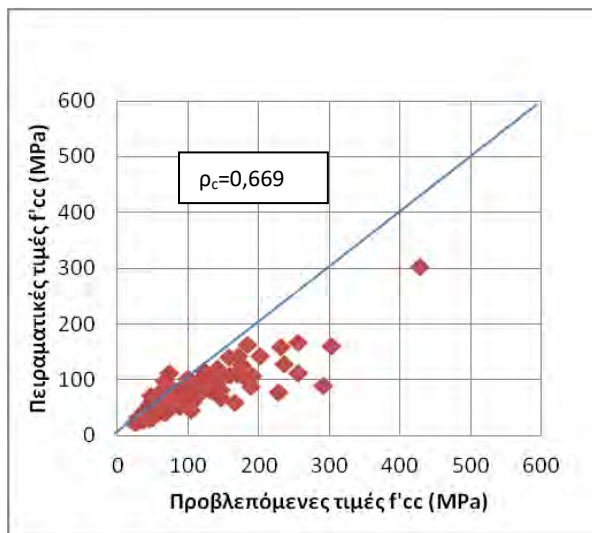


Σχήμα 4.1.2.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 50\text{MPa}$  με βάση τον Toutanji (1999)

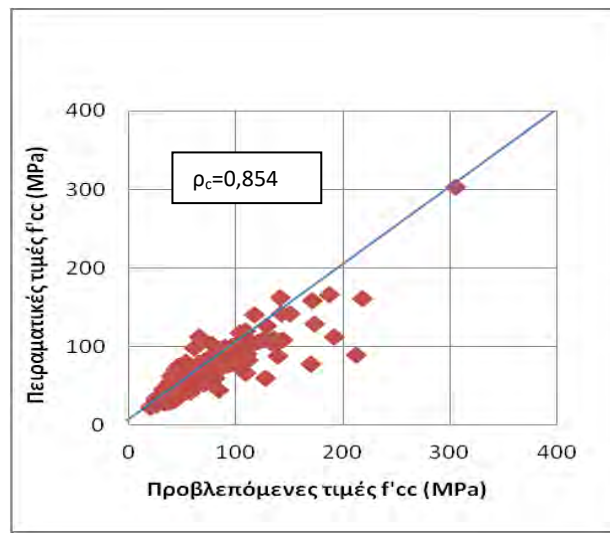


### 4.1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 80 MPa

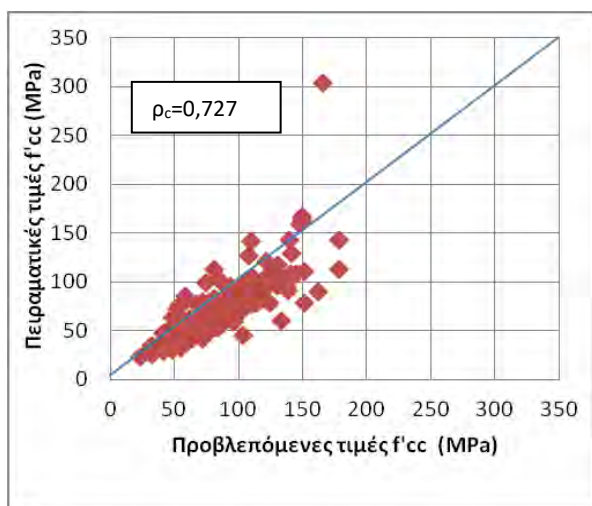
Στα σχήματα 4.1.3.1 μέχρι 4.1.3.12 εικονίζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων-πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa επενδυμένα εξωτερικά με μανδύα CFRP.



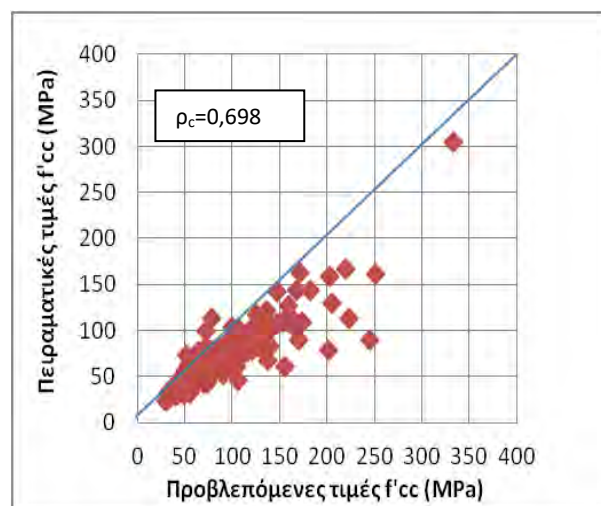
Σχήμα 4.1.3.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$ MPa με βάση τους Fardis & Khalili



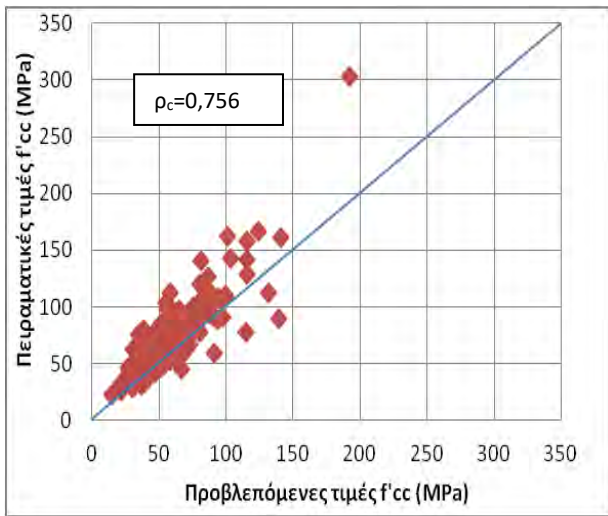
Σχήμα 4.1.3.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$ MPa με βάση τους Touhari & Mitiche - Kettab



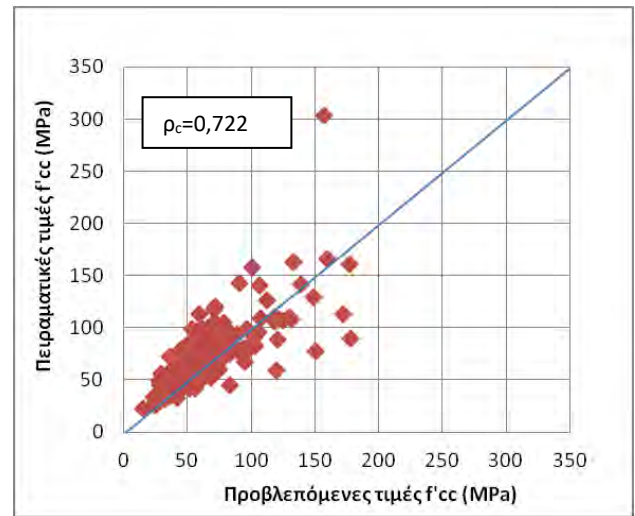
Σχήμα 4.1.3.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$ MPa με βάση τους Mander & Saadatmanesh



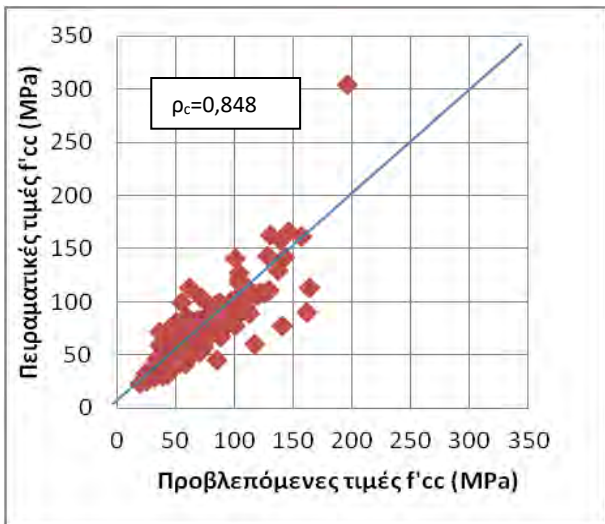
Σχήμα 4.1.3.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$ MPa με βάση τους Aire, Gettu, Casas & Marques



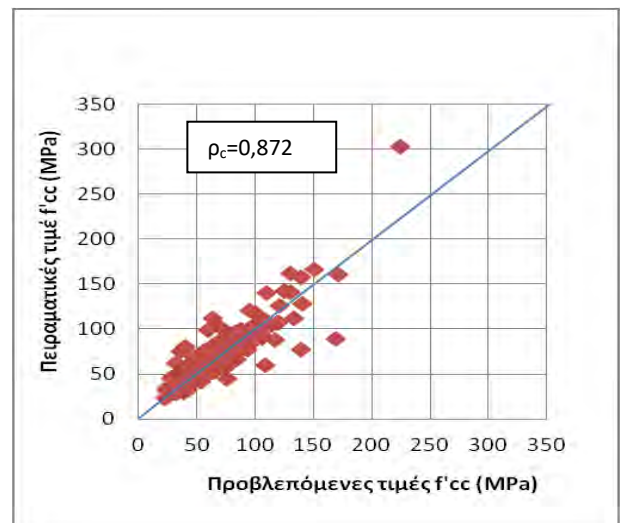
Σχήμα 4.1.3.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τους Benzaid et al.



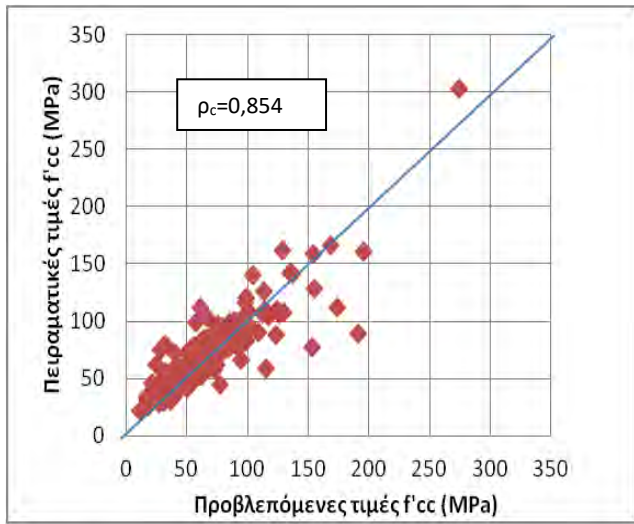
Σχήμα 4.1.3.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τους Berna't Csuka & La'zslo 'P Kolla'r



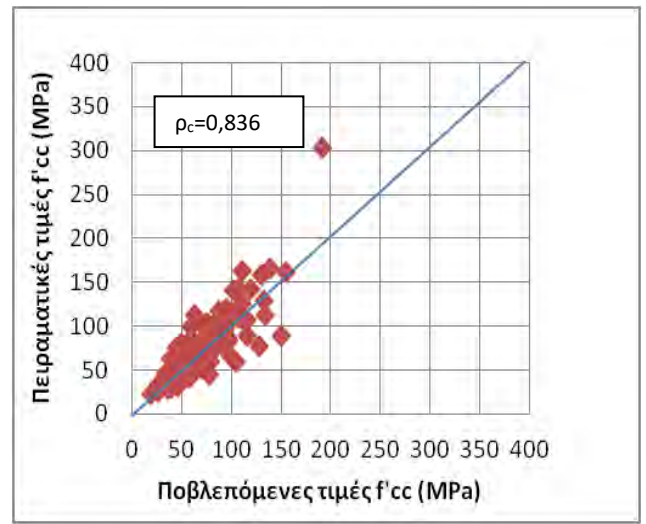
Σχήμα 4.1.3.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τους Spoelstra & Monti



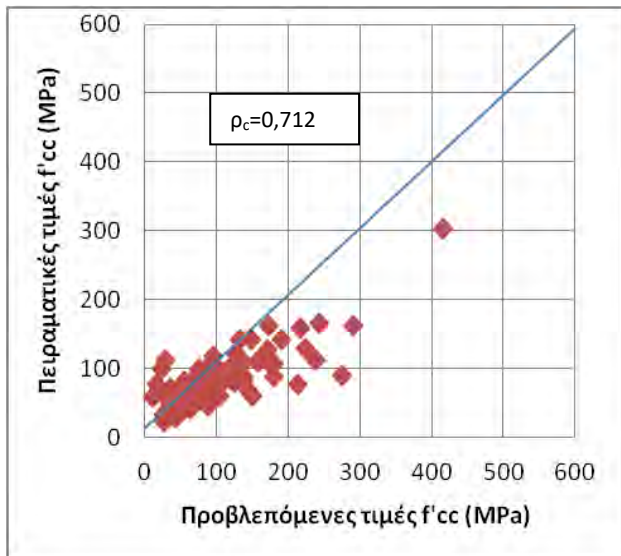
Σχήμα 4.1.3.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τον Ozbakkaloglu



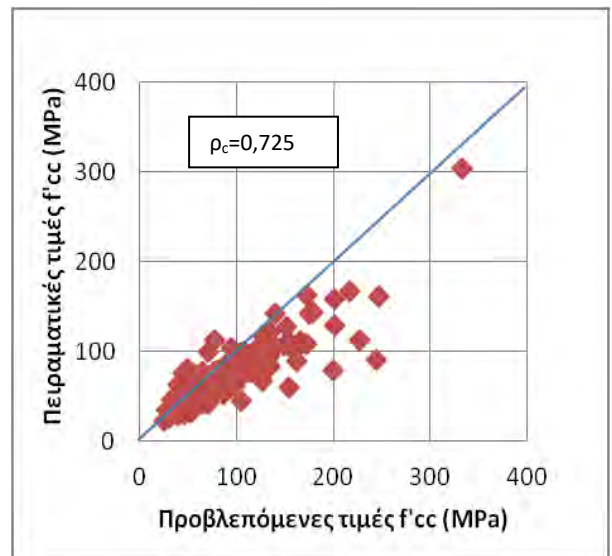
Σχήμα 4.1.3.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τον EC - 2



Σχήμα 4.1.3.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τον Girgin



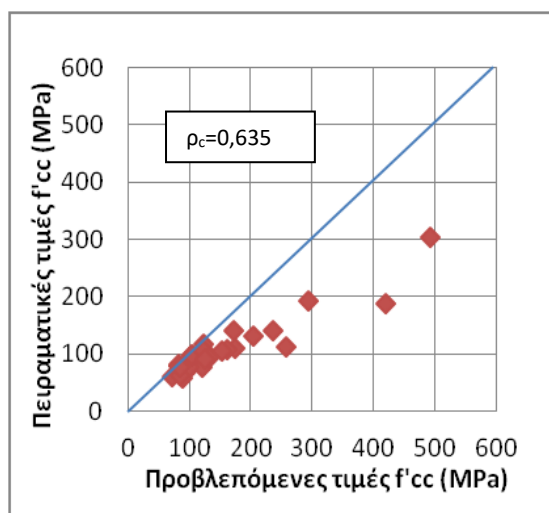
Σχήμα 4.1.3.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τους Xiao & Wu



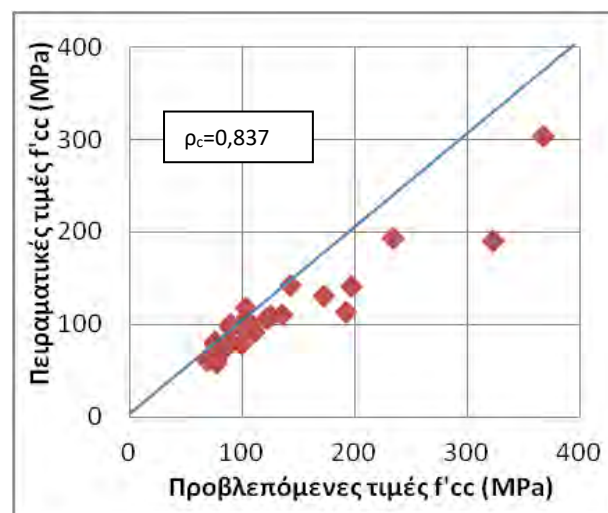
Σχήμα 4.1.3.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $f'_{co} < 80$  MPa με βάση τον Toutanji (1999)

#### 4.1.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΑΠΟ 50 ΕΩΣ 112,6 MPa

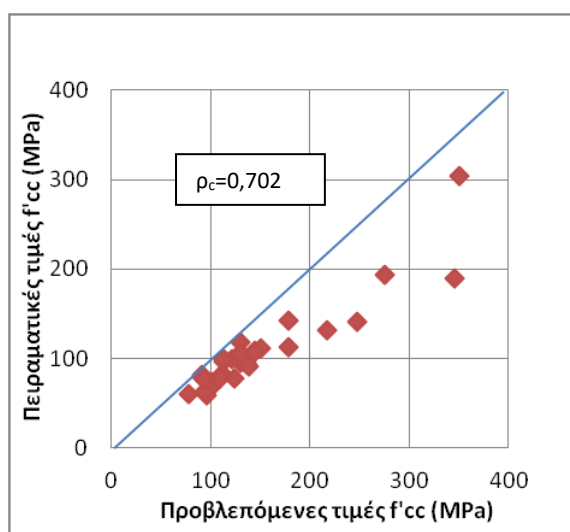
Στα σχήματα 4.1.4.1 μέχρι 4.1.4.12 εικονίζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων-πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 112,6 MPa επενδυμένα εξωτερικά με μανδύα CFRP.



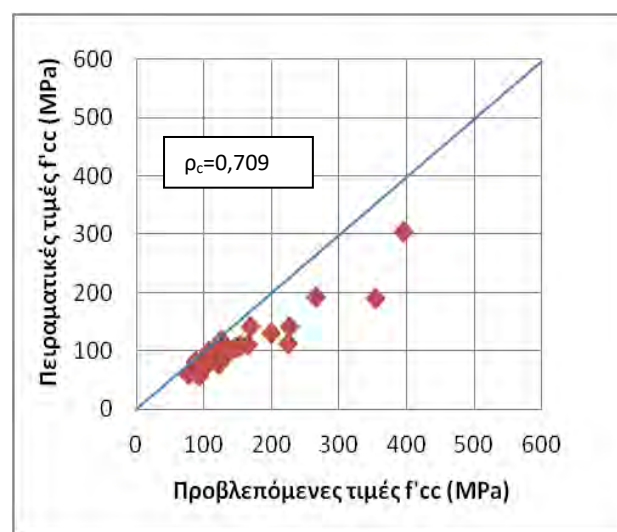
Σχήμα 4.1.4.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Fardis & Khalili



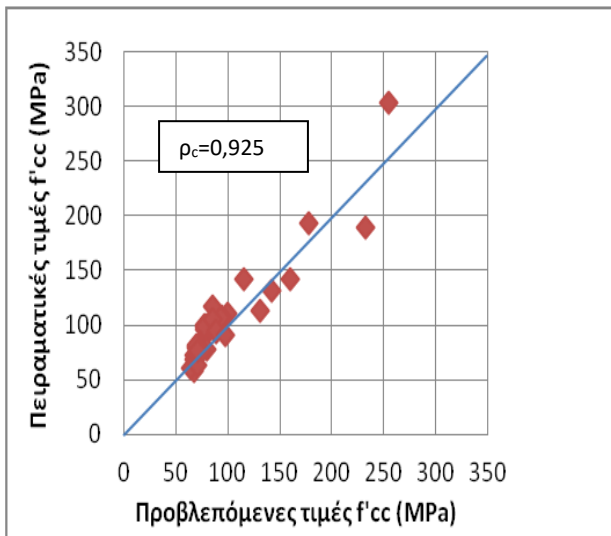
Σχήμα 4.1.4.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Touhari & Mitiche - Kettab



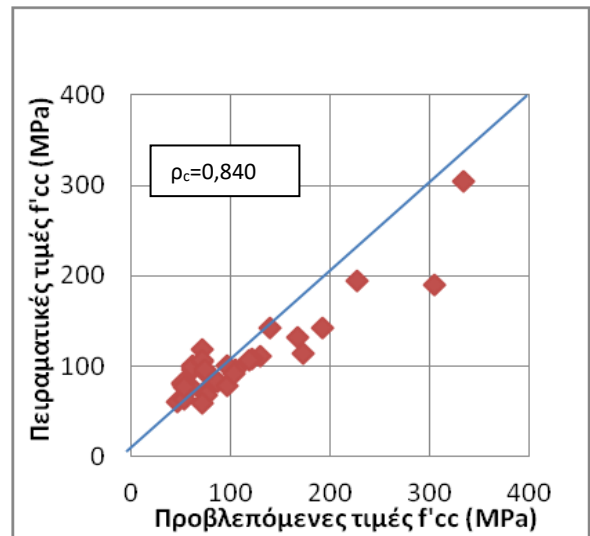
Σχήμα 4.1.4.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Mander & Saadatmanesh



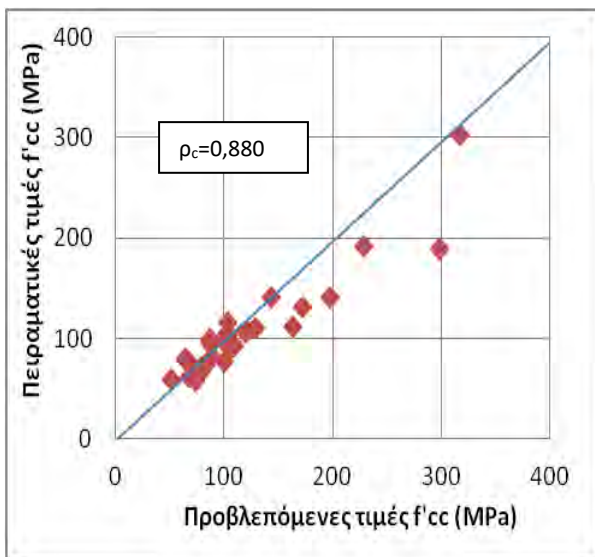
Σχήμα 4.1.4.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Aire, Gettu, Casas & Marques



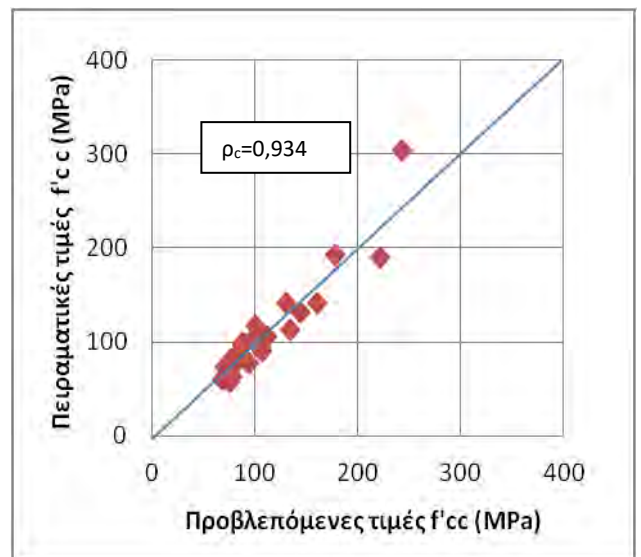
Σχήμα 4.1.4.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Benzaid et al.



Σχήμα 4.1.4.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Berna't Csuka & La'zsló 'P Kolla'r

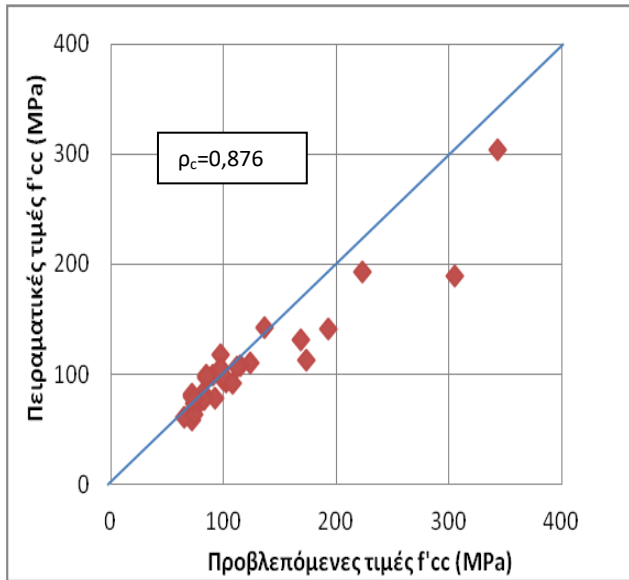


Σχήμα 4.1.4.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Spoelstra & Monti

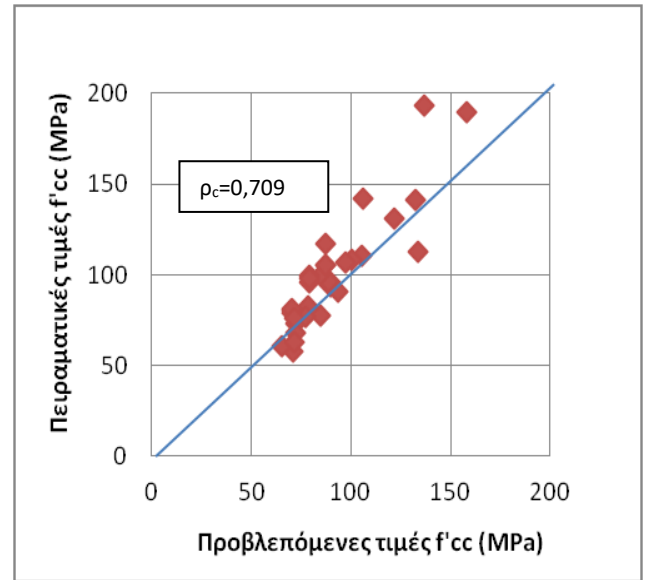


Σχήμα 4.1.4.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τον Ozbakkaloglu

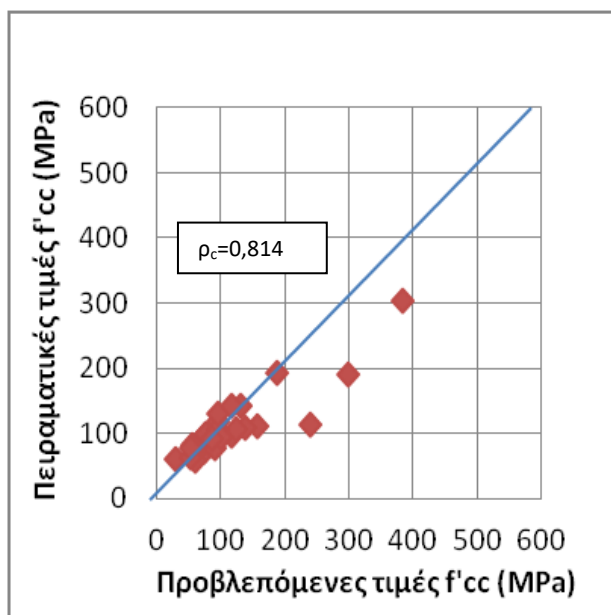




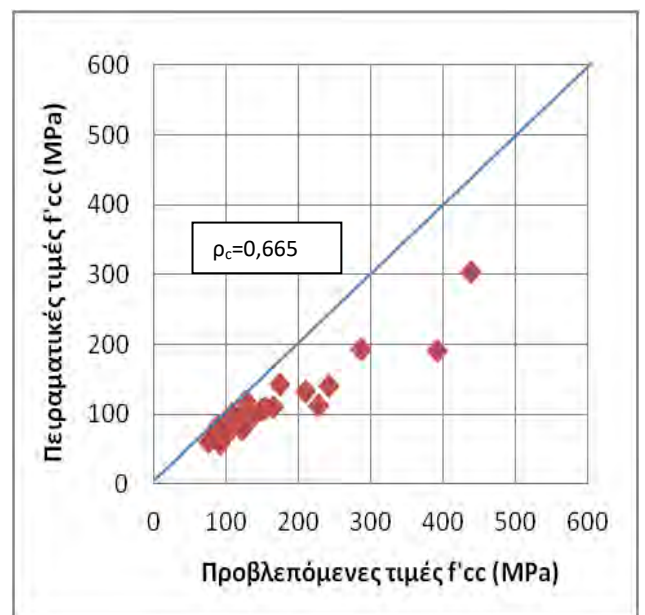
Σχήμα 4.1.4.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τον EC – 2



Σχήμα 4.1.4.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τον Girgin



Σχήμα 4.1.4.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τους Xiao & Wu



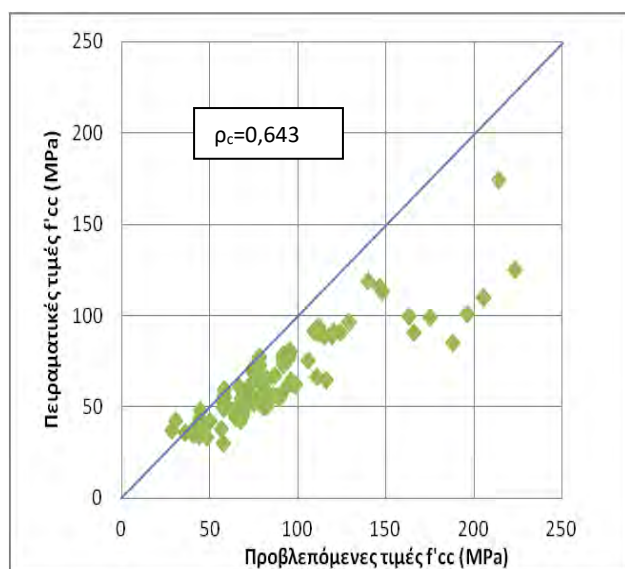
Σχήμα 4.1.4.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και  $50 < f'_{co} < 112,6$  MPa με βάση τον Toutanji (1999)

## 4.2 Δοκίμια με περίσφιγξη GFRP

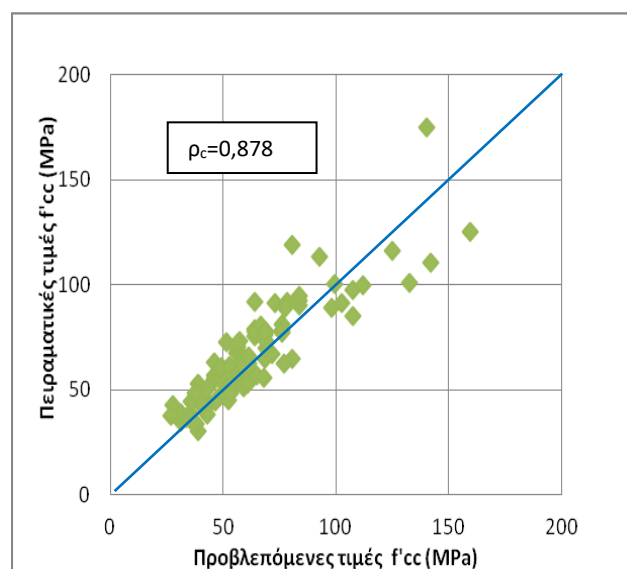
### 4.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 107,8 MPa

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP, έπονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP.

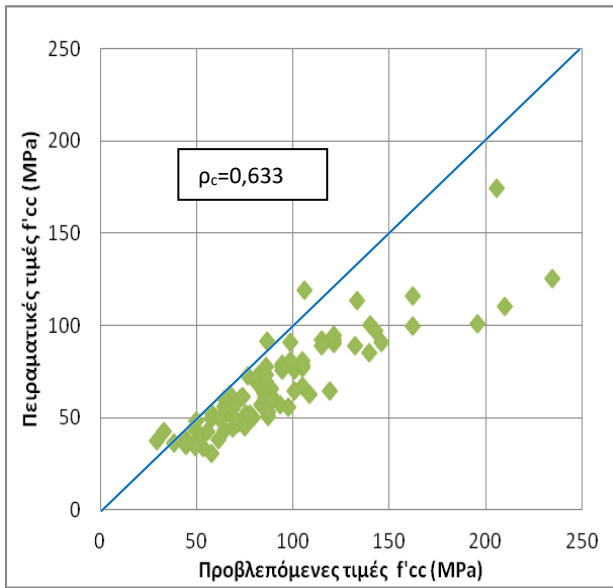
Στα σχήματα 4.2.1.1 έως 4.2.1.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  (εκφρασμένες σε MPa) για κάθε ένα από τα αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP με αντοχή  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 107,8 MPa.



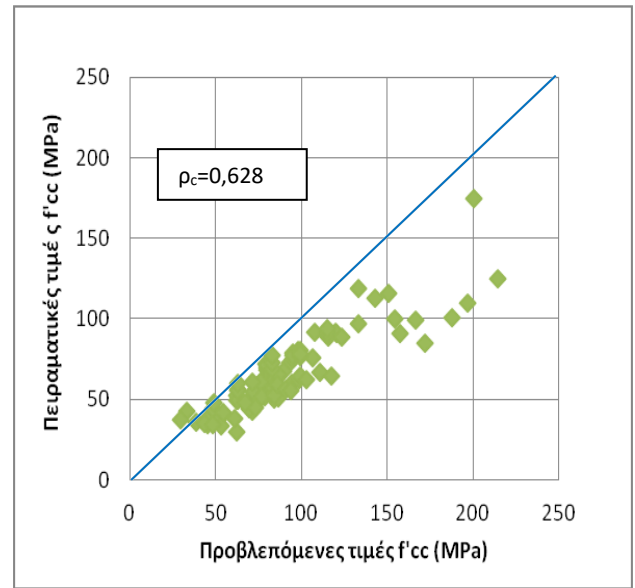
Σχήμα 4.2.1.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



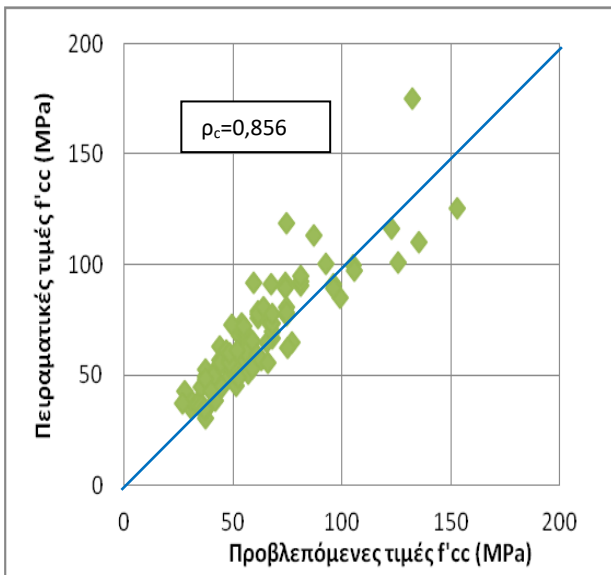
Σχήμα 4.2.1.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche-Kettab



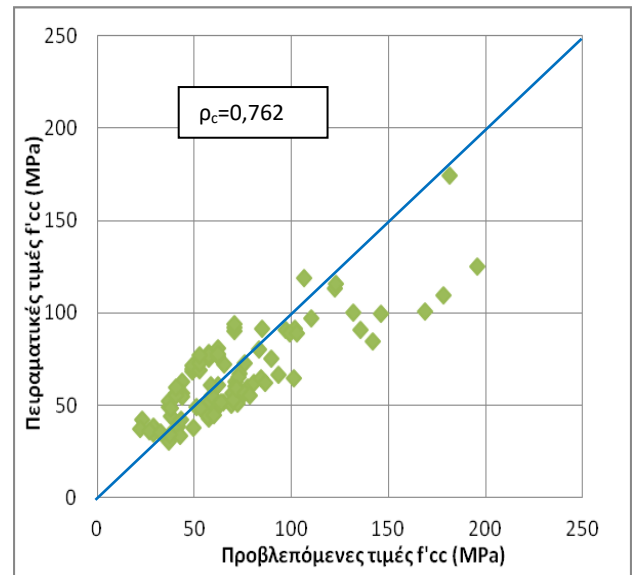
Σχήμα 4.2.1.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



Σχήμα 4.2.1.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques

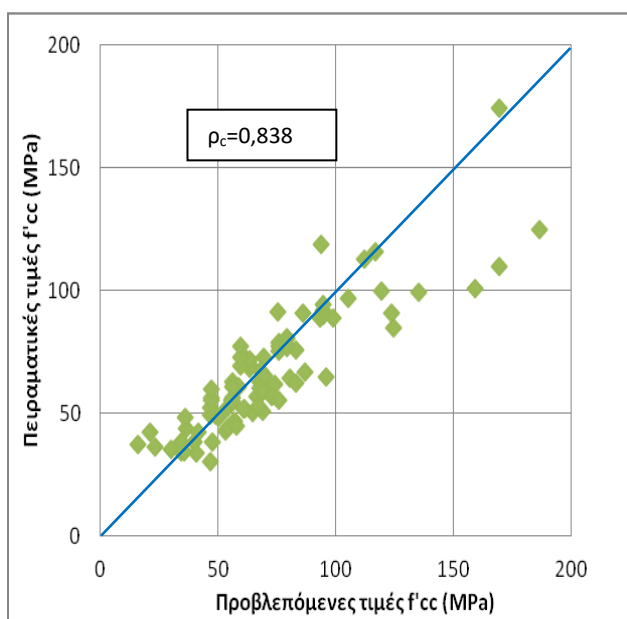


Σχήμα 4.2.1.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Benzaid et al.

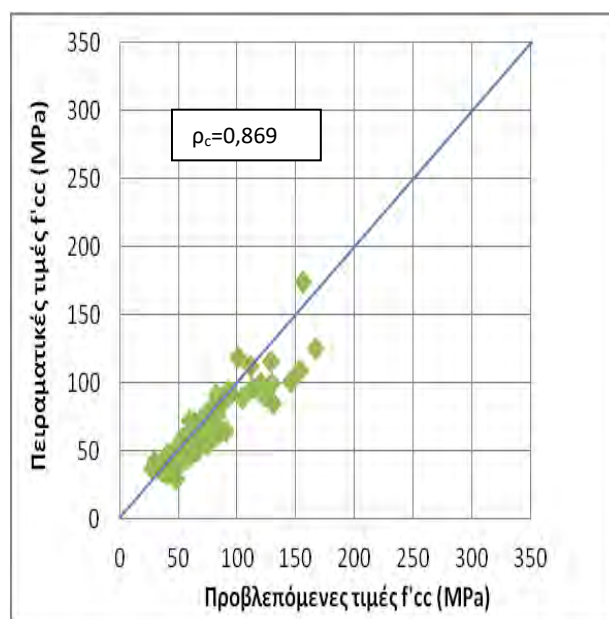


Σχήμα 4.2.1.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Berna't Csuka & La'zslo 'P Kolla'r

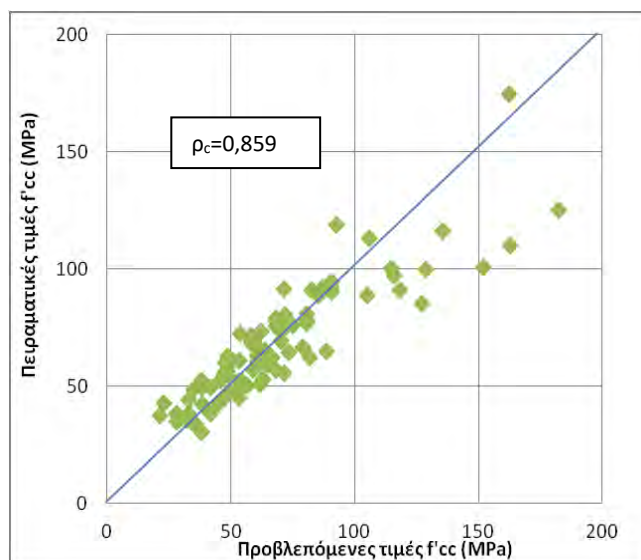




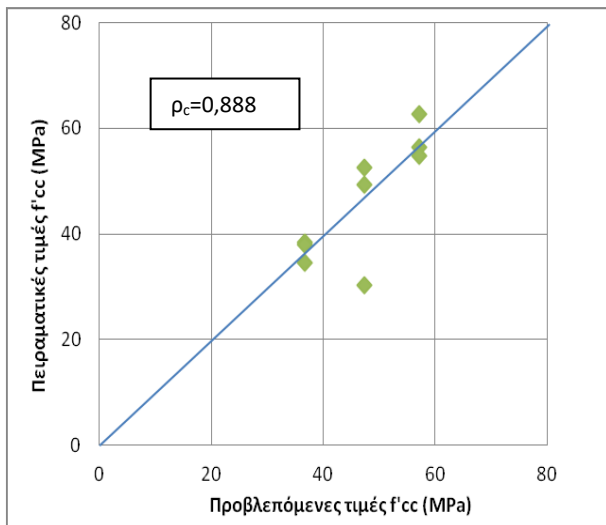
Σχήμα 4.2.1.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Spoelstra & Monti



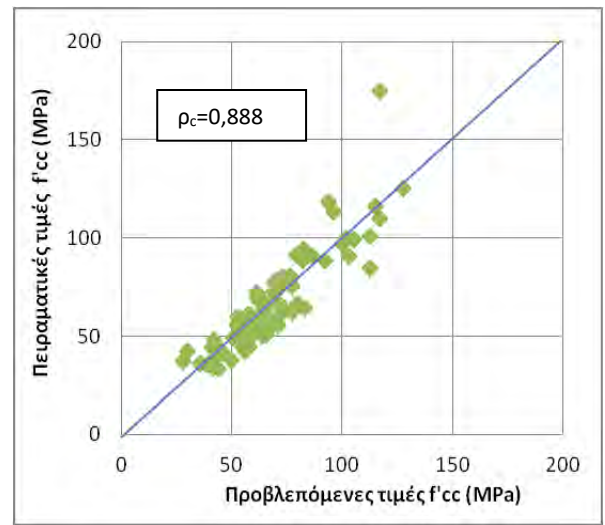
Σχήμα 4.2.1.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο του Ozbakaloglu



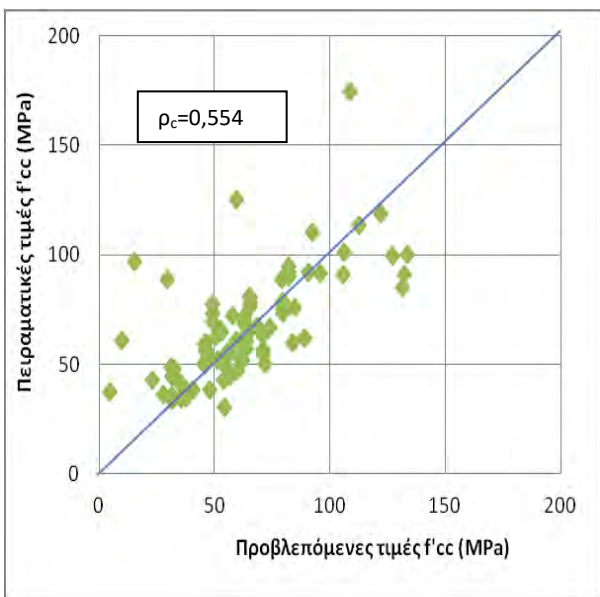
Σχήμα 4.2.1.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο του EC - 2



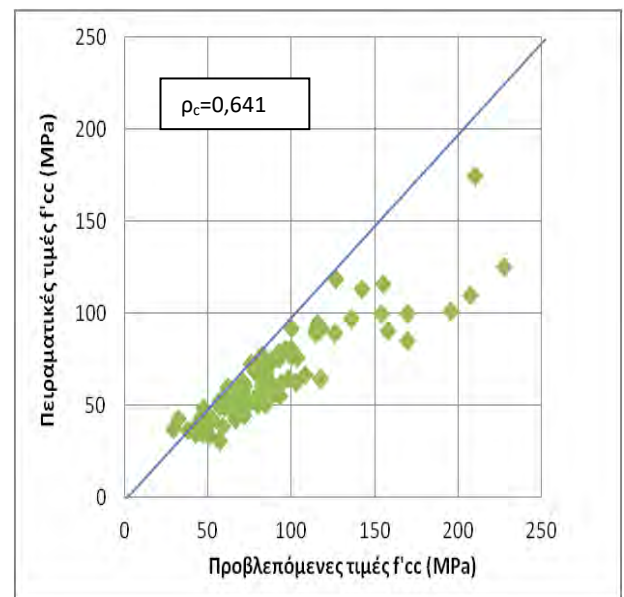
Σχήμα 4.2.1.10α Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο του Girgin για  $f'_{co}$  μέχρι 24 MPa



Σχήμα 4.2.1.10β Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο του Girgin για  $f'_{co}$  άνω των 24 MPa



Σχήμα 4.2.1.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu



Σχήμα 4.2.1.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με βάση το μοντέλο του Toutanji

#### 4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 50 MPa

Η κατηγοριοποίηση έγινε όπως πρωτύτερα ανάλογα την τιμή της  $f'_{co}$ . Έτσι, προέκυψαν τρεις διαφορετικές κατηγορίες για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP:

- α) Για  $f'_{co}$  από 0 έως 50 MPa
- β) Για  $f'_{co}$  από 0 έως 80 MPa
- γ) Για  $f'_{co}$  από 50 MPa έως  $f'_{co,max}$

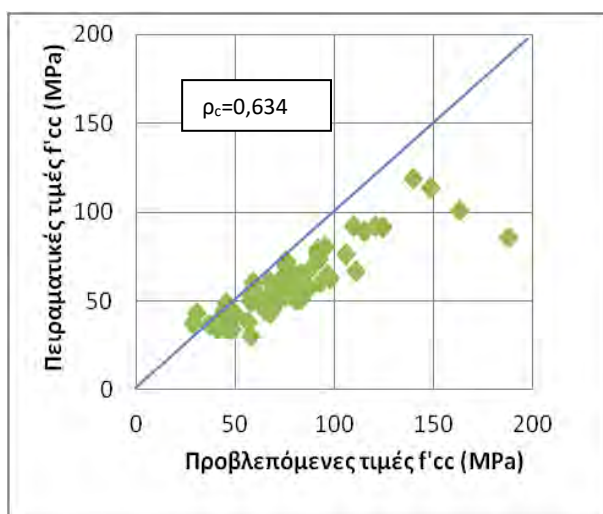
Η τιμή  $f'_{co,max}$  είναι ίση με 107,8 MPa για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP.

Σημειώνεται επίσης ότι για αντοχή  $f'_{co}$  ανώτερη των 50-60 MPa τα δοκίμια θεωρούνται υψηλής αντοχής, συνεπώς κρίθηκε σκόπιμη η εξέταση των δοκιμών χαμηλής - μέτριας αντοχής  $f'_{co}$  και υψηλής ξεχωριστά.

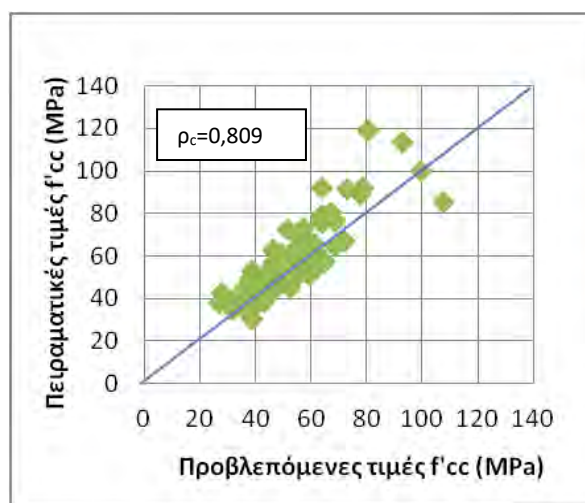
Στη συνέχεια, ακολουθείται η ίδια διαδικασία υπολογισμού προβλεπόμενων τιμών  $f'_{cc}$  με βάση τα αναλυτικά μοντέλα και η σύγκρισή τους με τις πειραματικές τιμές μέσω διαγραμμάτων προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για κάθε προσομοίωμα ξεχωριστά.

Στην υποενότητα αυτή θα εξετασθούν τα δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa.

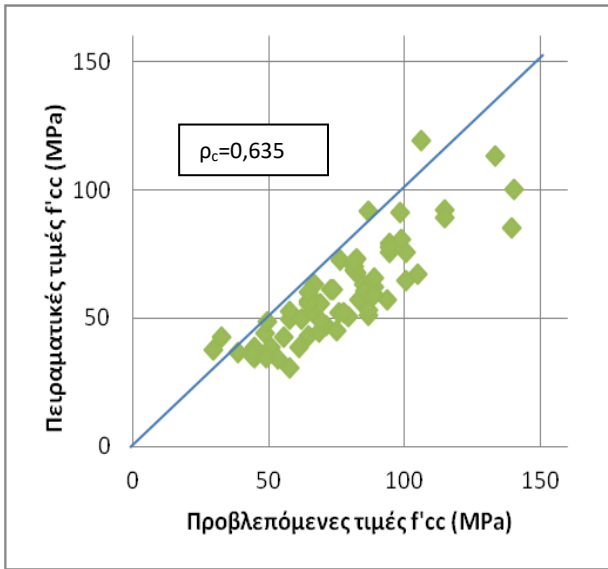
Τα σχήματα 4.2.2.1 έως 4.2.2.12 απεικονίζουν τη σχέση προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa και περίσφιγξη με μανδύα GFRP με βάση τα διαθέσιμα μοντέλα υπολογισμού.



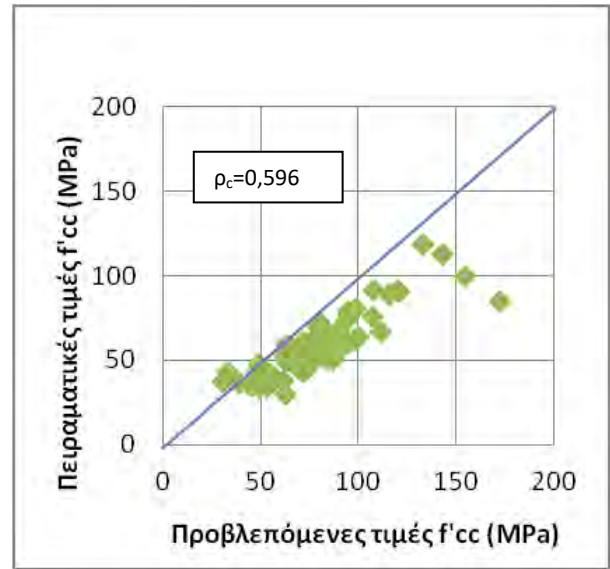
Σχήμα 4.2.2.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



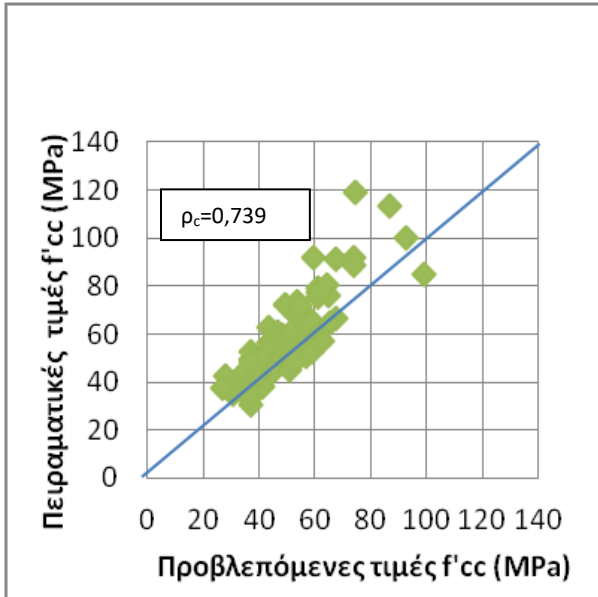
Σχήμα 4.2.2.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche - Kettab



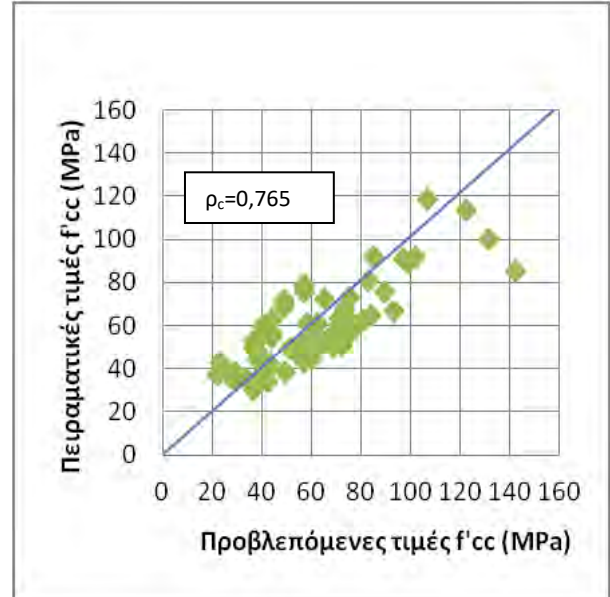
Σχήμα 4.2.2.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



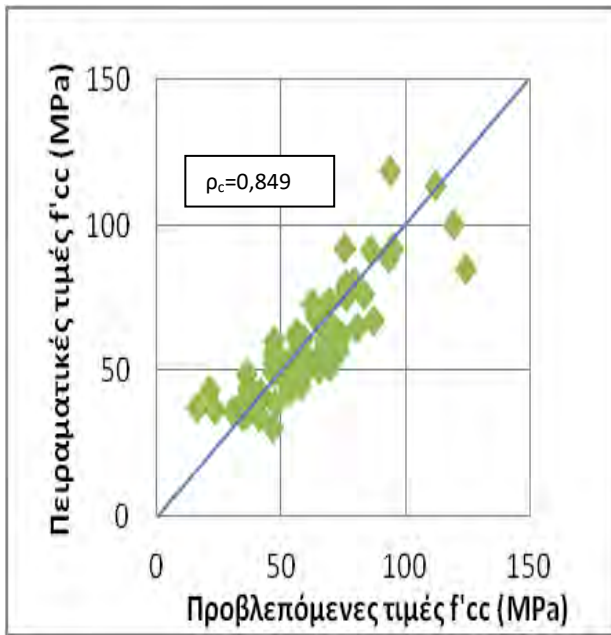
Σχήμα 4.2.2.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Aire, Casas, Gettu & Marques



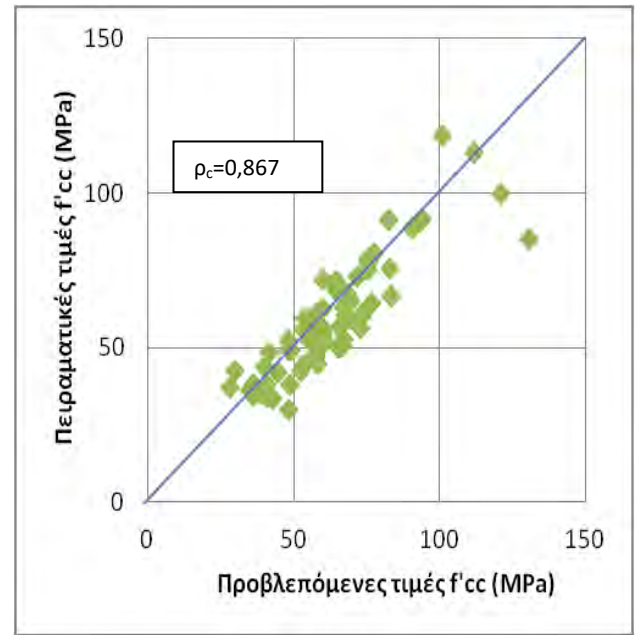
Σχήμα 4.2.2.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Benzaid et al.



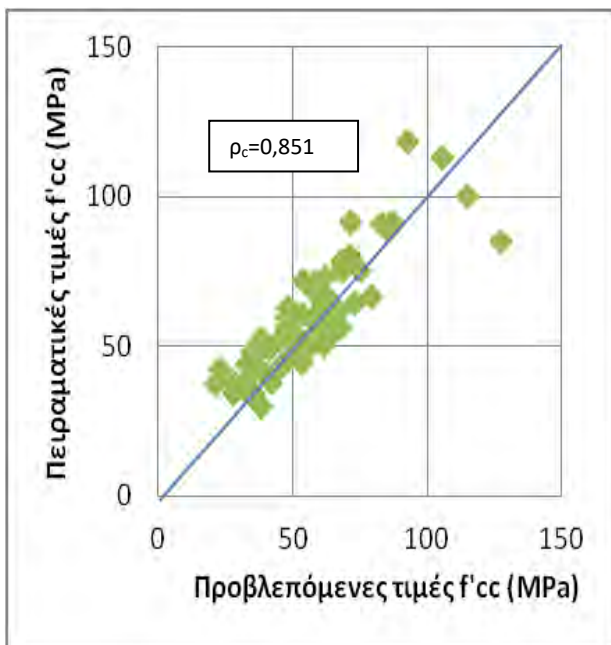
Σχήμα 4.2.2.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Berna't Csuka & La'zsló P Kollár



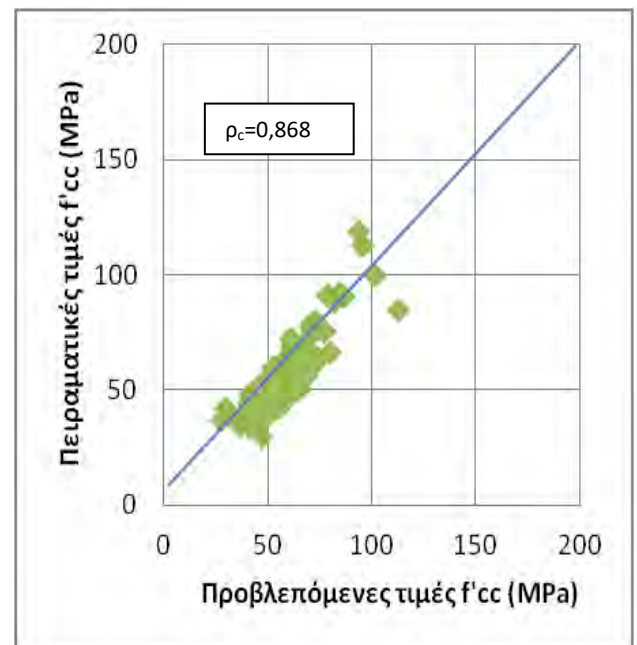
Σχήμα 4.2.2.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Spolstra & Monti



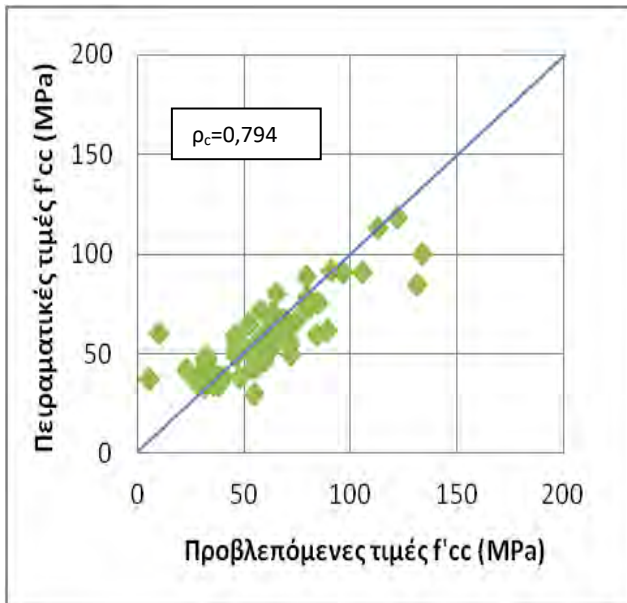
Σχήμα 4.2.2.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο του Ozbakkaloglu



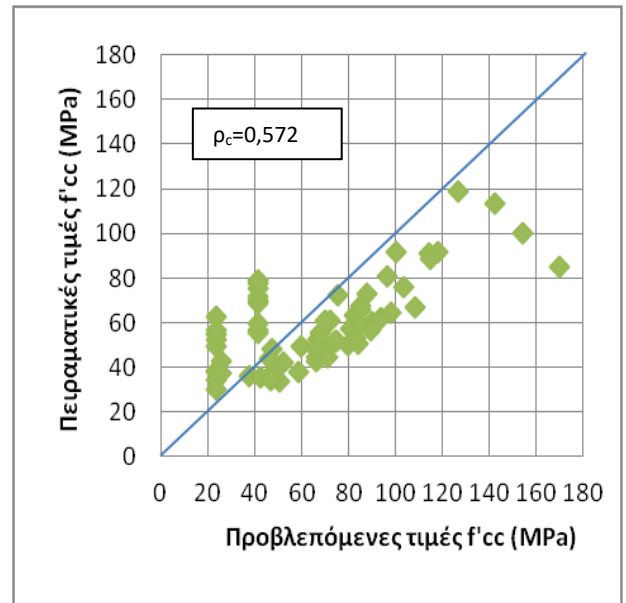
Σχήμα 4.2.2.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο του EC - 2



Σχήμα 4.2.2.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο του Girgin



Σχήμα 4.2.2.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu

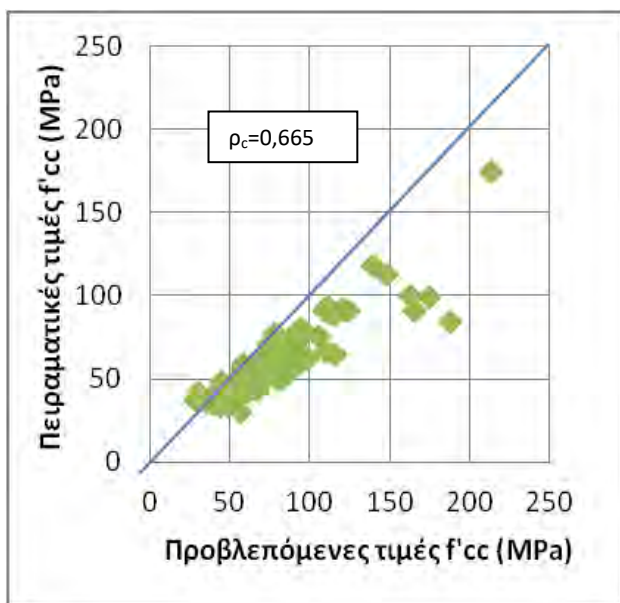


Σχήμα 4.2.2.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 50 MPa με βάση το μοντέλο του Toutanji

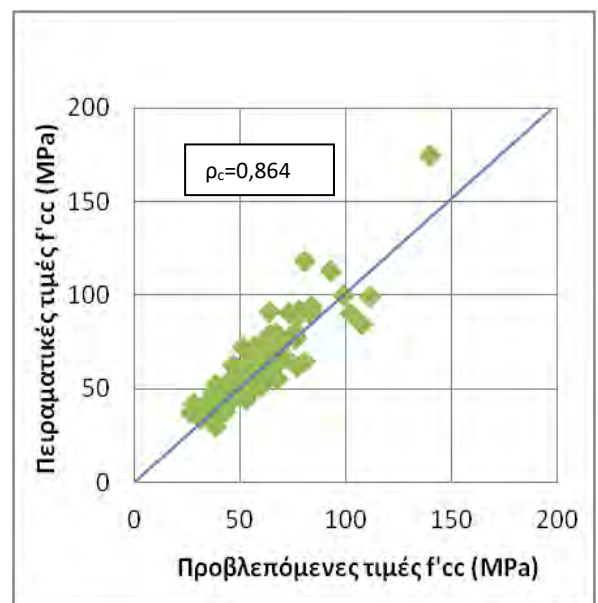


#### 4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΕΩΣ 80 MPa

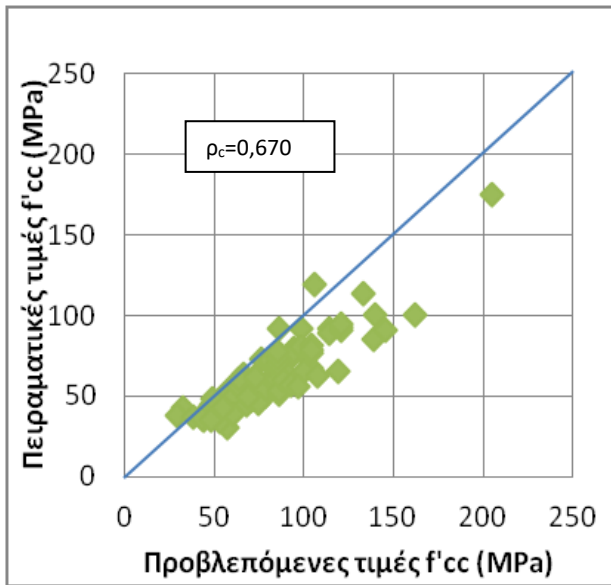
Τα σχήματα 4.2.3.1 έως 4.2.3.12 απεικονίζουν τη σχέση προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa και περίσφιγξη με μανδύα GFRP με βάση τα διαθέσιμα μοντέλα υπολογισμού.



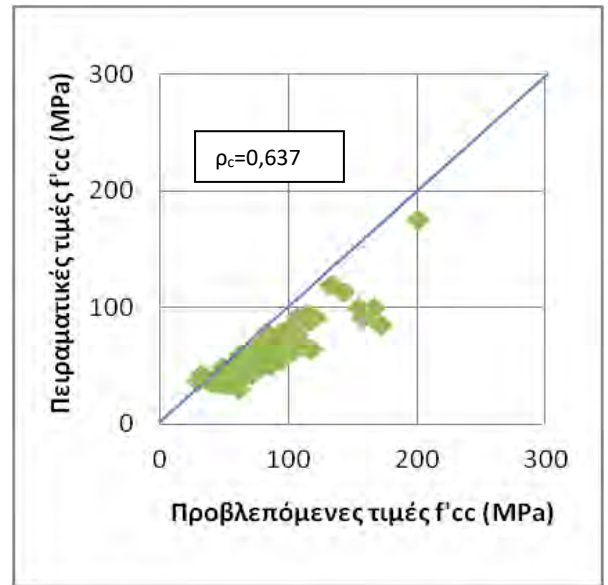
Σχήμα 4.2.3.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



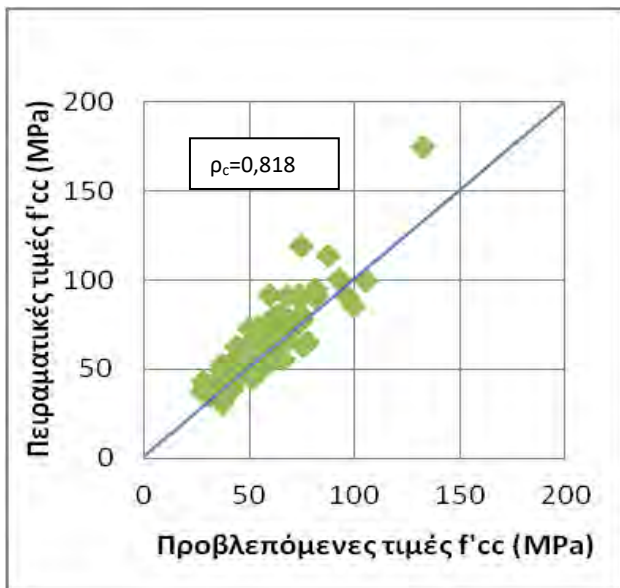
Σχήμα 4.2.3.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche - Kettab



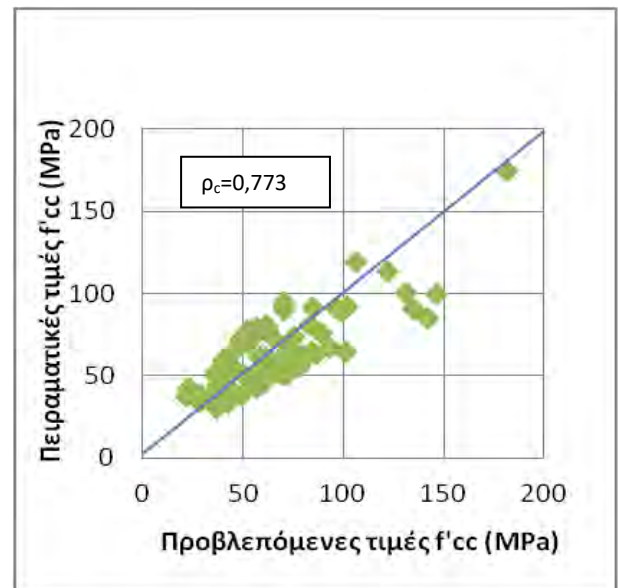
Σχήμα 4.2.3.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



Σχήμα 4.2.3.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques

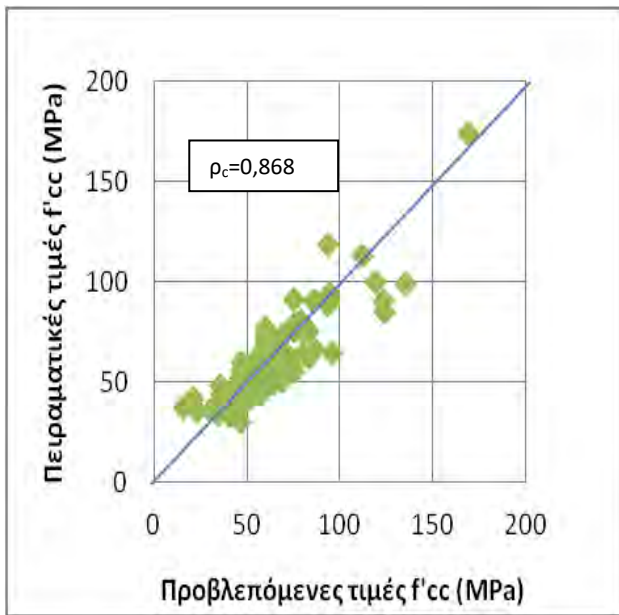


Σχήμα 4.2.3.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Benzaid et al.

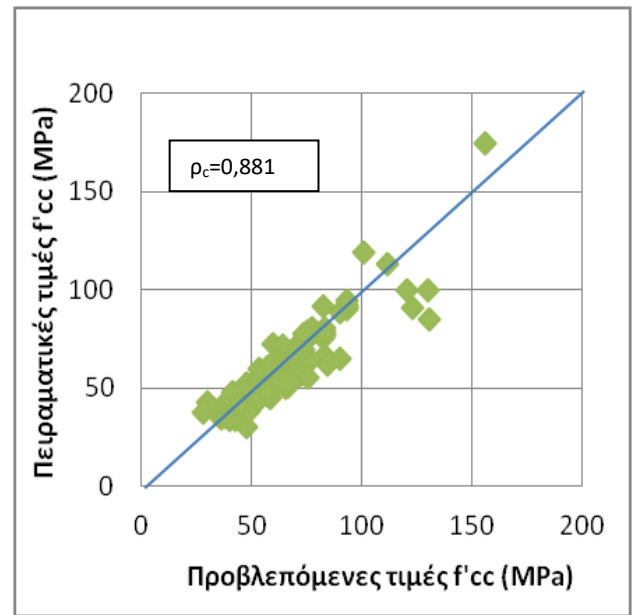


Σχήμα 4.2.3.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Berna't Csuka & La'zsló 'P Kolla'r

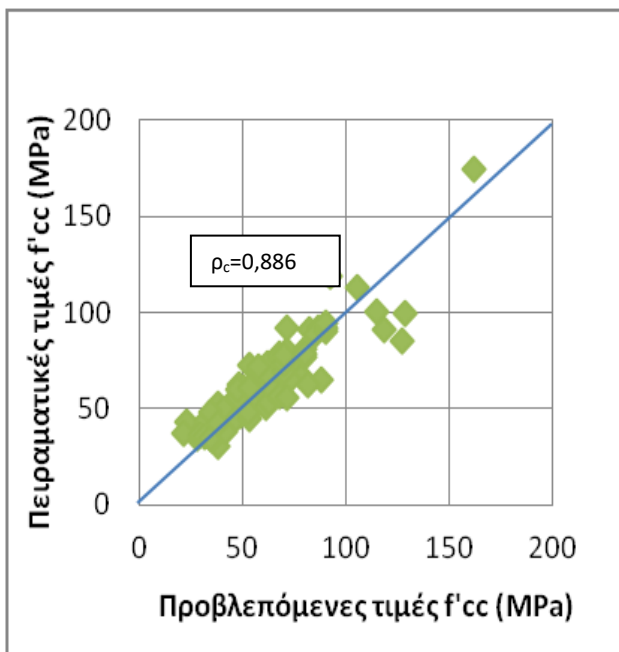




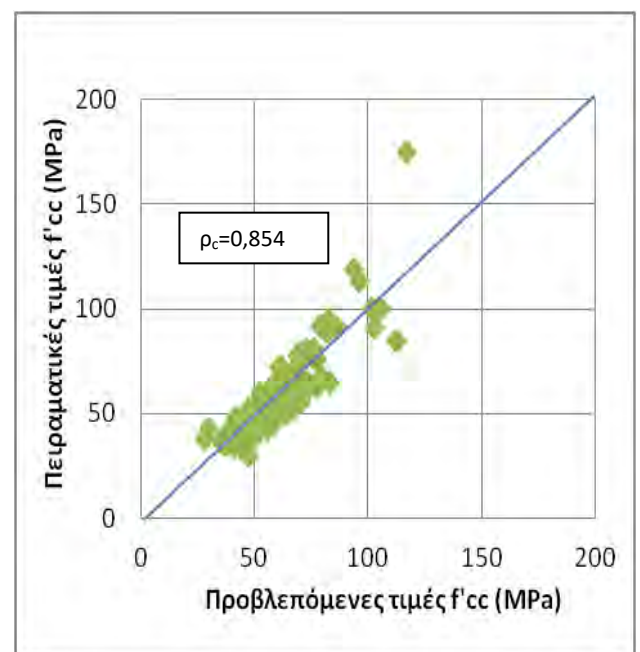
Σχήμα 4.2.3.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Spoolstra & Monti



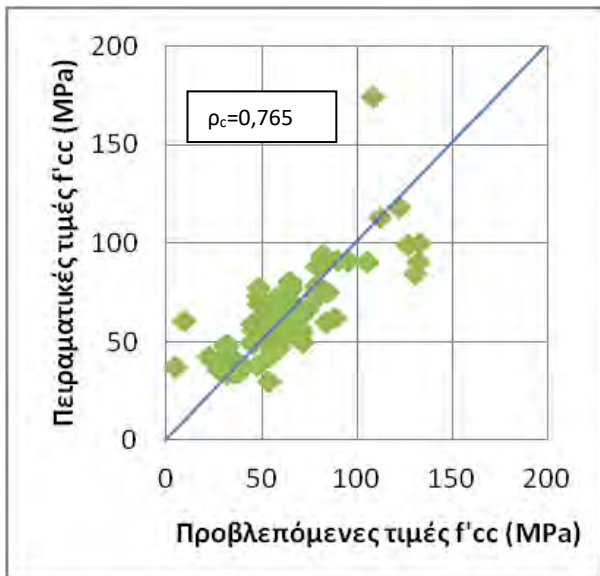
Σχήμα 4.2.3.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο του Ozbakcaloglu



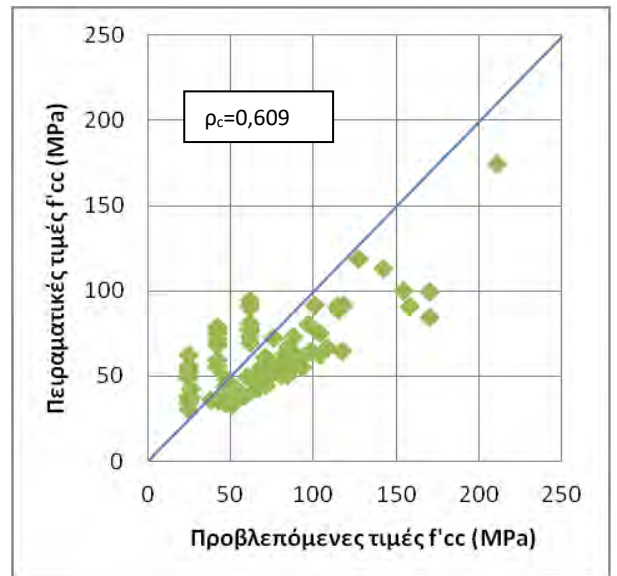
Σχήμα 4.2.3.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο του EC - 2



Σχήμα 4.2.3.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο του Girgin



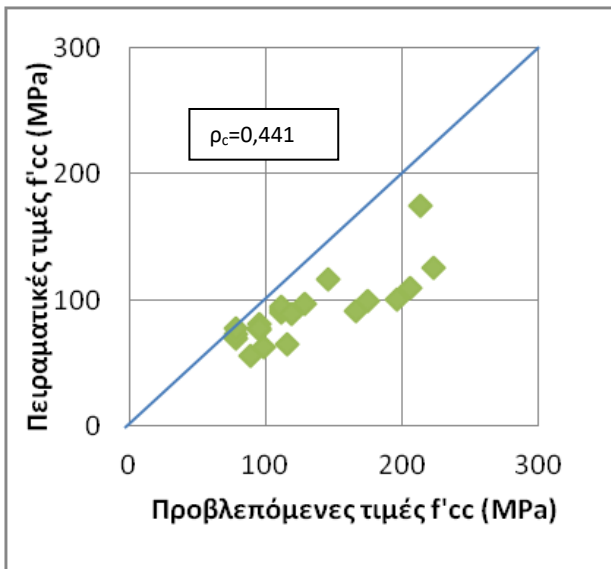
Σχήμα 4.2.3.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu



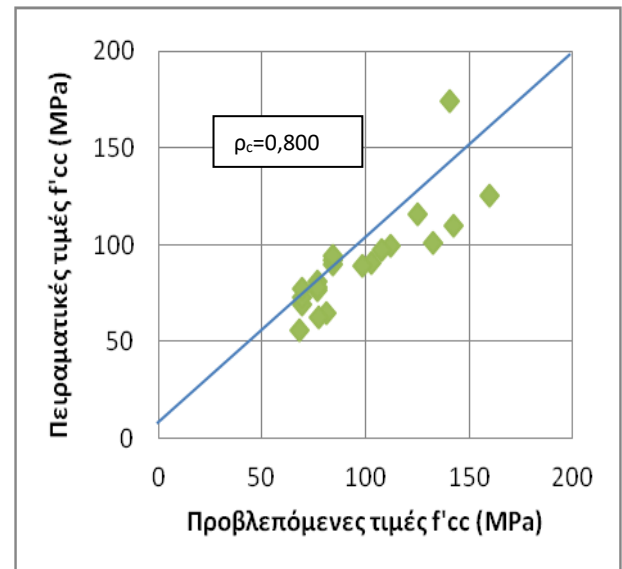
Σχήμα 4.2.3.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  έως 80 MPa με βάση το μοντέλο του Toutanji (1999)

#### 4.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP ΚΑΙ $f'_{co}$ ΑΠΟ 50 ΕΩΣ 107,8 MPa

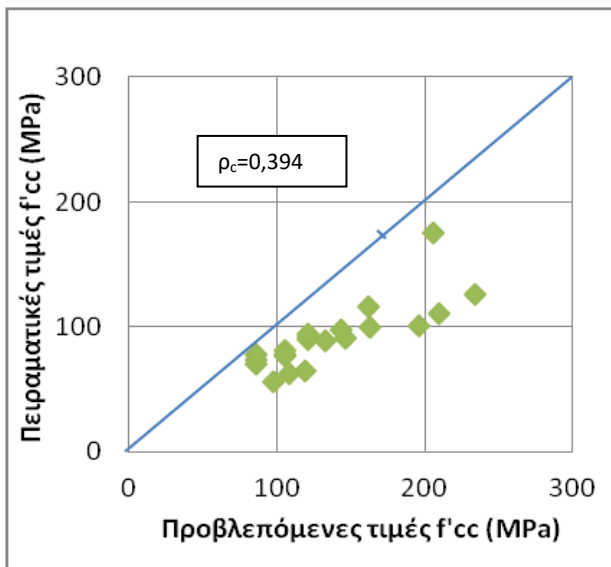
Τα σχήματα 4.2.4.1 έως 4.2.4.12 απεικονίζουν τη σχέση προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 107,8 MPa και περίσφιγξη με μανδύα GFRP με βάση τα διαθέσιμα μοντέλα υπολογισμού.



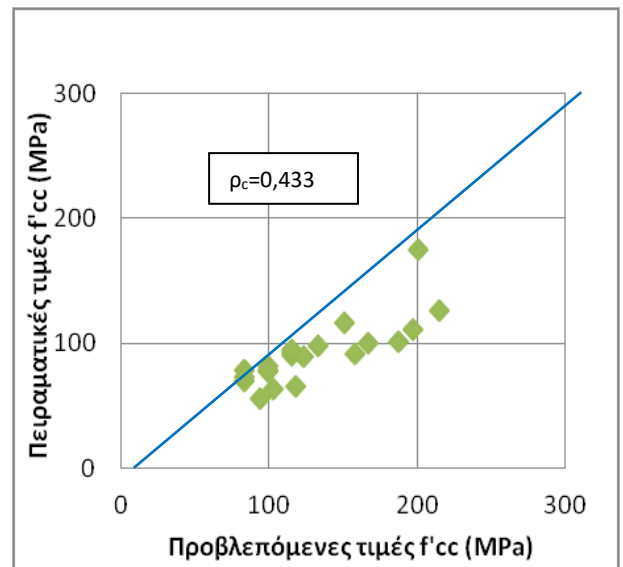
Σχήμα 4.2.4.1 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



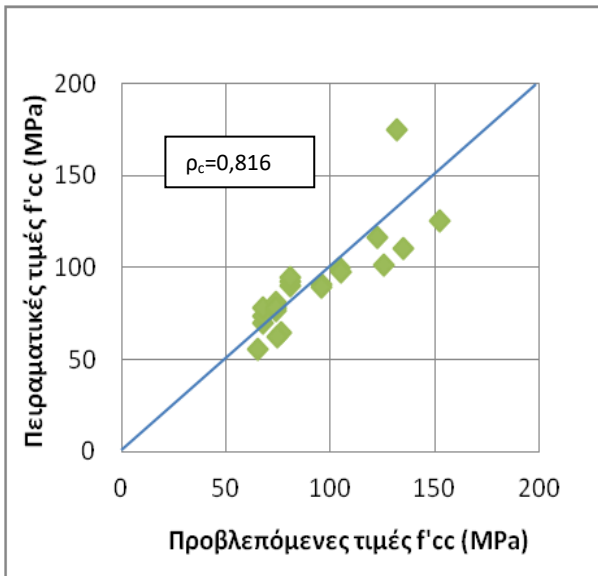
Σχήμα 4.2.4.2 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche-Kettab



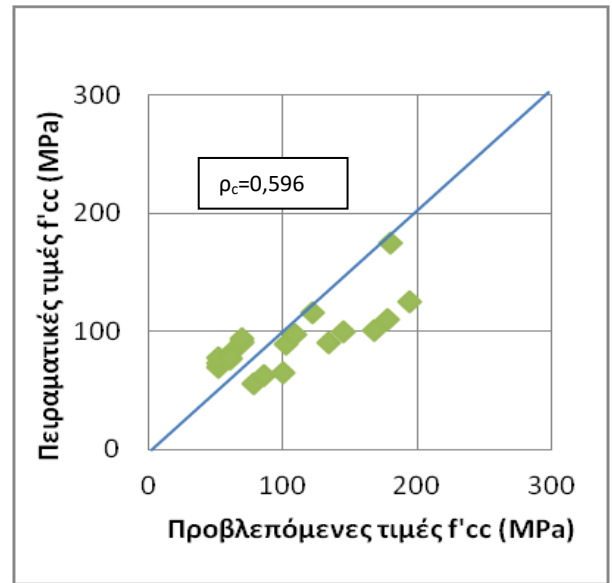
Σχήμα 4.2.4.3 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



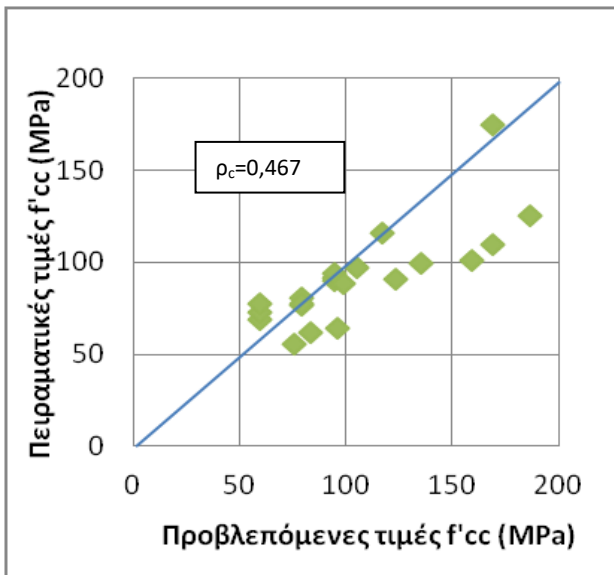
Σχήμα 4.2.4.4 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques



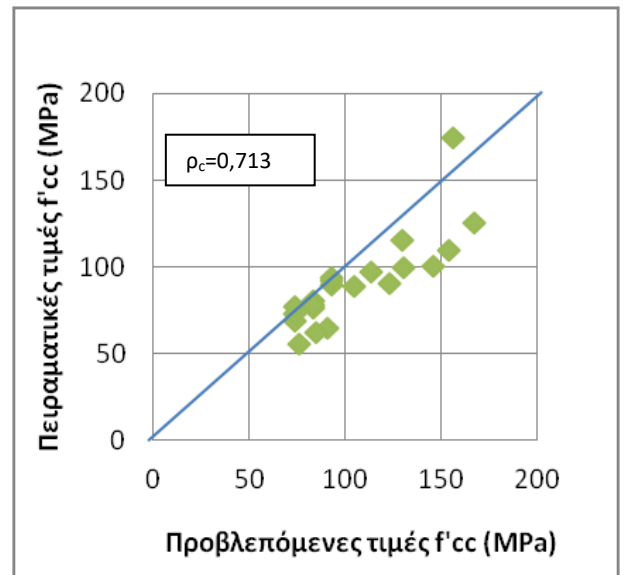
Σχήμα 4.2.4.5 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Benzaid et. al



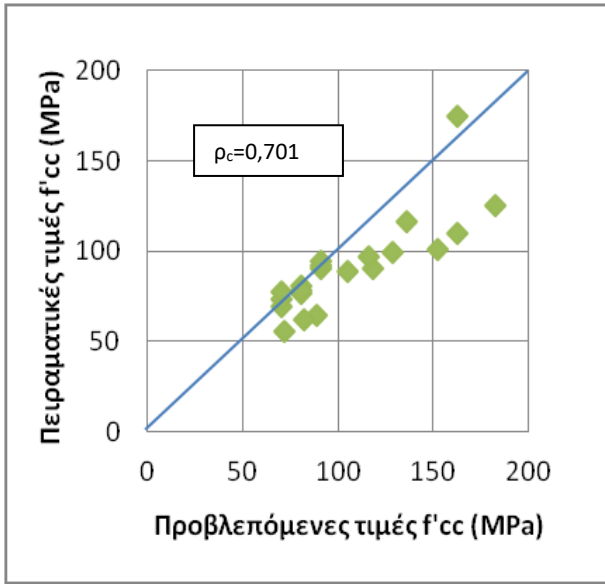
Σχήμα 4.2.4.6 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Berna't Csuka & La'zsló 'P Kolla'r



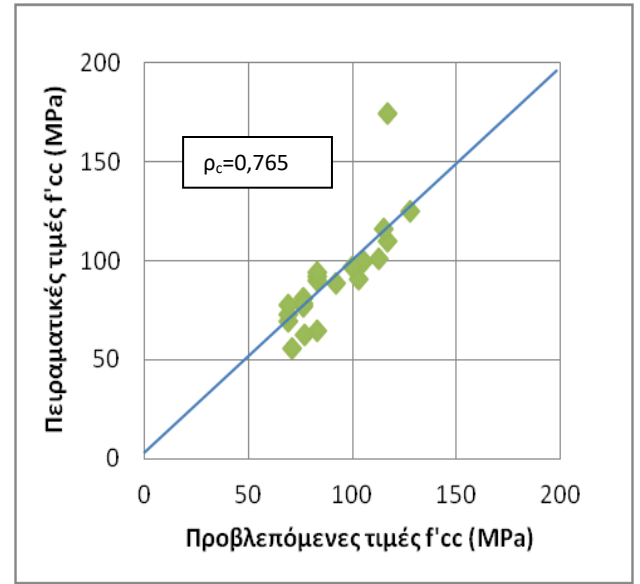
Σχήμα 4.2.4.7 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Spaelstra & Monti



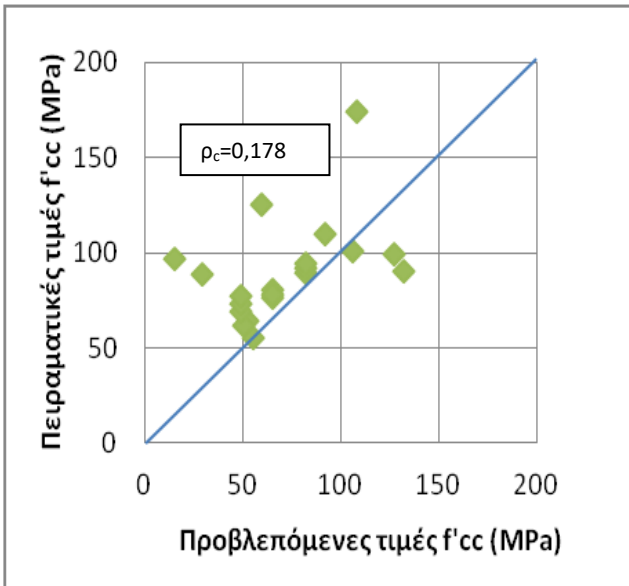
Σχήμα 4.2.4.8 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο του Ozbakaloglu



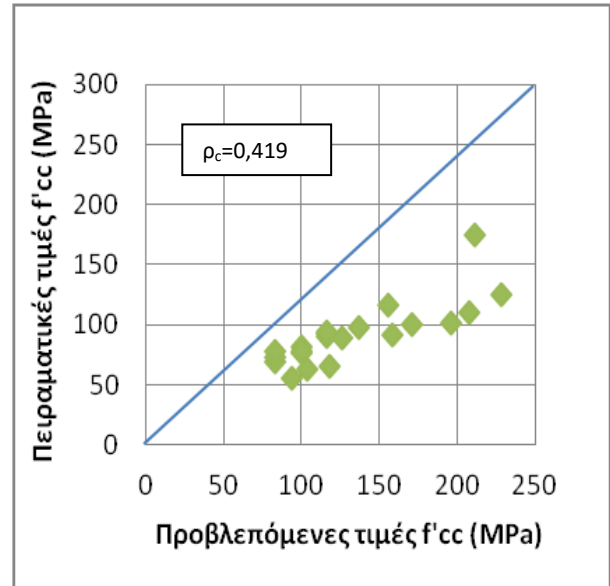
Σχήμα 4.2.4.9 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο του EC - 2



Σχήμα 4.2.4.10 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο του Girgin



Σχήμα 4.2.4.11 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu



Σχήμα 4.2.4.12 Διάγραμμα προβλεπόμενων – πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 έως 107,8 MPa με βάση το μοντέλο του Toutanji (1999)

### 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανά θεωρητικό μοντέλο

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν γίνεται αντιληπτό ότι σε κάποια υπάρχει σύγκλιση μεταξύ προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών σε μεγάλο βαθμό, ενώ σε κάποια άλλα παρατηρούνται ιδιαίτερες αποκλίσεις. Αναφορικά με αυτές τις αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών, σε όλα τα μοντέλα παρατηρείται μια γενικότερη τάση **υπερεκτίμησης** της τιμής  $f'_{cc}$  από πλευράς αναλυτικού προσδιορισμού της. Αυτό συμβαίνει διότι τα ινοπλισμένα πολυμερή σπανίως μπορούν να αναπτύξουν την πλήρη θεωρητική τους αντοχή.

Ξεκινώντας το σχολιασμό από τη συμπεριφορά των μοντέλων για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP, είναι φανερή η υπεροχή τριών μοντέλων έναντι των υπολοίπων:

α) Προσομοίωμα του Ozbakkaloglu

β) Προσομοίωμα του EC 2

γ) Προσομοίωμα των Spoelstra & Monti

Η πρόβλεψη της τιμής της  $f'_{cc}$  σε δοκίμια με μανδύα CFRP με βάση αυτά μοντέλα προσέγγιζε σε πολύ μεγάλο βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς στα συγκεκριμένα σχήματα (σχ.4.1.1.8, σχ. 4.1.1.7 και σχ. 4.1.1.10 α,β αντίστοιχα) τα ζεύγη των πειραματικών και αναλυτικά προβλεπόμενων τιμών  $f'_{cc}$  ακολουθούν μια σχετικά γραμμική τάση δίχως να «αποκλίνουν» σημαντικά από τη διεύθυνση της διαγώνιου. Αυτό μάλιστα φαίνεται και από το γεγονός ότι οι συντελεστές Lin's ( $\rho_c$ ) οι οποίοι αποτελούν χαρακτηριστική ένδειξη της σύγκλισης πειραματικών-προβλεπόμενων τιμών, είναι μεγαλύτεροι όλων και αρκετά κοντά στη μονάδα (0,900 , 0,880 και 0,879 αντίστοιχα). Αντίθετα, στα σχήματα 4.1.1.1 και 4.1.1.4 τα οποία εικονίζουν την ικανότητα πρόβλεψης της τιμής  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με τη χρήση των μοντέλων Fardis & Khalili και Aire, Gettu, Casas & Marques αντίστοιχα, κάποια αποτελέσματα αποκλίνουν κατά πολύ από τα αντίστοιχα πειραματικά. Με άλλα λόγια, στο σχ.4.1.1.4 για το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas and Marques, δοκίμια με πειραματική τιμή  $f'_{cc}$  που δεν ξεπερνούν τα 100 MPa δείχνουν να αποκτούν λόγω περίσφιγξης τελική αντοχή ανώτερη των 200 MPa. Όμοια στο σχήμα 4.1.1.1 στο προσομοίωμα του Fardis & Khalili δοκίμια με πειραματική τιμή  $f'_{cc}$  περίπου ίση με 200 και 300 δείχνουν να ξεπερνούν τις τιμές 300 και 400 αντίστοιχα στον οριζόντιο άξονα. Οι διαφορές αυτής της τάξης μεγέθους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όχι μόνο τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP αλλά συγχρόνως υπερεκτιμούν κατά πολύ τη δράση της περίσφιγξης εφόσον οι προκύπτουσες τιμές  $f'_{cc}$  είναι μεγαλύτερες και σε κάποια δοκίμια πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προσδιορίζονται πειραματικά. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό καθώς οι αντίστοιχες τιμές  $\rho_c$  είναι ίσες με 0,696 και 0,741 , αρκετά χαμηλές συγκριτικά με τις υπόλοιπες.

Σχετικά με τα υπόλοιπα προσομοιώματα, αυτό του Girgin δείχνει να προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως και τα μοντέλα των Touhari & Mitiche-Kettab και Benzaid et al. στα σχήματα 4.1.1.10 α, β , 4.1.1.2, και 4.1.1.5 αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν τιμές που αποκλίνουν και είναι

μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές. Συνεπώς, και τα συγκεκριμένα μοντέλα τείνουν να υπερεκτιμούν τη δράση της περίσφιγξης.

Όσον αφορά στα διαγράμματα για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνονται από το μοντέλο του Girgin. Σχετικά ικανοποιητικό δείχνει και το μοντέλο των Berna 't Csuka & La 'szlo ' P Kolla 'r (σχ. 4.2.1.6) στο οποίο κάποια αποτελέσματα δείχνουν να αποκλίνουν από τα πειραματικά, όπως και στο μοντέλο που προτάθηκε από τον Ozbakkaloglu (σχ. 4.2.1.8). Το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques (σχ. 4.2.1.4) δείχνει να είναι το πιο αναξιόπιστο και για δοκίμια με μανδύα GFRP σημειώνοντας αρκετά μεγάλες διαφορές μεταξύ θεωρητικά υπολογιζόμενων και πειραματικών τιμών. Τα παραπάνω επαληθεύονται και μέσω της τιμής  $\rho_c$  η οποία για τα μοντέλα του Girgin και Berna 't Csuka & La 'szlo ' P Kolla 'r είναι ίση με 0,888 και 0,762, αντίστοιχα, ενώ για αυτό των Aire, Gettu, Casas & Marques δεν ξεπερνά την τιμή 0,628.

Το γεγονός ότι ο Girgin πρότεινε δύο σχέσεις προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  ανάλογα την τιμή αντοχής  $f'_{co}$  οδήγησε στην κατασκευή δύο διαγραμμάτων (σχ. 4.2.1.10 α και 4.2.1.10 β) για χαμηλής αντοχής και μέσης-υψηλής αντοχής  $f'_{co}$  δοκίμια και κατ' επέκταση στην καλύτερη κατανόηση του προσομοιώματος. Είναι φανερό πως το μοντέλο που προτείνεται από τον Girgin φαίνεται να προσομοιάζει με επάρκεια την τιμή  $f'_{cc}$  τόσο για δοκίμια χαμηλής αντοχής  $f'_{co}$  και περίσφιγξη GFRP, όσο και σε δοκίμια υψηλότερης αντοχής  $f'_{co}$ .

Τα μοντέλα των EC 2, Spoolstra & Monti (σχ. 4.2.1.9, και 4.2.1.7 αντίστοιχα) δείχνουν να προσεγγίζουν τις πειραματικές τιμές ως ένα βαθμό, εμφανίζοντας ωστόσο μερικές αποκλίσεις και υπερεκτίμηση της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι το μοντέλο του Ozbakkaloglu εμφανίζει την υψηλότερη σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών συγκριτικά με τα υπόλοιπα για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. ( $\rho_c = \rho_{cmax} = 0,900$ )

Ομοίως, τα αποτελέσματα από το μοντέλο του Girgin δείχνουν να μην επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την χαμηλή ή υψηλή τιμή της  $f'_{co}$  ή από τον τύπο του μανδύα καθώς σε κάθε περίπτωση περίσφιγξης, τα αποτελέσματα δεν αποκλίνουν από τα αντίστοιχα πειραματικά (σχ. 4.1.1.10 α, β και σχ. 4.2.1.10 α, β) με τιμές  $\rho_c$  ίσες με 0,828 και 0,888 αντίστοιχα.

Αντίθετα, τα αποτελέσματα του προσομοιώματος των Aire, Gettu, Casas & Marques απέχουν κατά πολύ από τις πειραματικές τιμές ενώ αυτό του Ozbakkaloglu δείχνει πολύ σημαντική σύγκλιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για δοκίμια με μανδύα GFRP, όπως και για δοκίμια με μανδύα CFRP, εμφανίζοντας στην πρώτη περίπτωση εξίσου υψηλή τιμή  $\rho_c$  (0,869) με την αντίστοιχη τιμή 0,900 για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP.

Η καταλληλότητα του μοντέλου που προτείνει ο Girgin έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι προτείνει δύο διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό μιας παραμέτρου (M) στην τελική έκφραση της  $f'_{cc}$ , η οποία δείχνει υψηλή ευαισθησία στην τιμή της αντοχής  $f'_{co}$ . Συνεπώς, αυτός ο διαχωρισμός το καθιστά πιο αναλυτικό και αξιόπιστο από πλευράς αποτελεσμάτων.

Από την άλλη πλευρά, οι Aire, Gettu, Casas & Marques στο μοντέλο τους εκφράζουν την τελική τιμή της  $f'_{cc}$  ως συνάρτηση μόνο της  $f'_{co}$  και της  $f_t$ . Κανένας διαχωρισμός ή εισαγωγή επιπλέον παραμέτρων δεν προτάθηκαν και το μοντέλο δεν εμφάνισε ιδιαίτερα αντικειμενικά αποτελέσματα.

Στο μοντέλο του Ozbakkaloglu γίνονται διάφορες παραδοχές μία εκ των οποίων είναι η τιμή ενός συγκεκριμένου συντελεστή  $k_1$ , η τιμή του οποίου εξαρτάται από τον τύπο της περίσφιγξης. Βέβαια για συντηρητικά αποτελέσματα προτείνεται η τιμή 3,20 γενικά, είτε για περίσφιγξη με μανδύα CFRP είτε με GFRP. Στην περίπτωση που ληφθεί υπόψη ο διαχωρισμός αυτός, η αντίστοιχη τιμή για περίσφιγξη με μανδύα CFRP είναι 3,67 και για μανδύα GFRP είναι 2,49. Στο στάδιο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής 3,20 ανεξάρτητα του τύπου περίσφιγξης.

Με βάση τα διαγράμματα αντοχής  $f'_{cc}$  προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP για διάφορες τιμές  $f'_{co}$  πραγματοποιείται εύκολα σύγκριση των μοντέλων και γίνεται αντιληπτή η καταλληλότητα - αξιοπιστία τους.

Είναι φανερό ότι τα μοντέλα των Ozbakkaloglu, Spoelstra & Monti, και του Girgin εμφανίζονται πολύ ικανοποιητικά όσον αφορά στην πρόβλεψη της τιμής  $f'_{cc}$ , ανεξάρτητα της τιμής  $f'_{co}$  των δοκιμίων. Αντίθετα, οι τιμές που προκύπτουν από τα προσομοιώματα των Fardis & Khalili και Aire, Gettu, Casas & Marques απέχουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες προσδιοριζόμενες πειραματικά. Το γενικότερο συμπέρασμα που απορρέει λοιπόν είναι ότι για δοκίμια CFRP οι Ozbakkaloglu, Spoelstra & Monti, EC – 2 προέβλεψαν με μεγάλη επάρκεια τις τιμές της  $f'_{cc}$ , ενώ αντίθετα τα μοντέλα των Fardis & Khalili και Aire, Gettu, Casas & Marques δεν κρίνονται κατάλληλα για την πρόβλεψη της τιμής  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP.

Αναλυτικότερα:

- Το μοντέλο των Fardis και Khalili **δεν ανταποκρίνεται επαρκώς** στην πρόβλεψη των τιμών  $f'_{cc}$ . Οι τιμές που προκύπτουν απέχουν σημαντικά από τις αντίστοιχες πειραματικές, ειδικά για δοκίμια με  $f'_{co}$  μεταξύ 50 και 112,6 MPa (σχ. 4.1.4.1). Στις άλλες δύο κατηγορίες παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Οι προκύπτουσες τιμές είναι μεγαλύτερες των πειραματικών με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο μοντέλο να υπερεκτιμά κατά πολύ τη δράση της περίσφιγξης.



- Το μοντέλο των Fardis και Khalili, όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά ως προς την ικανότητα πρόβλεψης της  $f'_{cc}$  με αυτή στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Με την αύξηση της αντοχής  $f'_{co}$  των δοκιμίων με μανδύα GFRP, παρατηρείται ελάχιστη αύξηση της απόκλισης μεταξύ των αναλυτικών και των πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  εφόσον και στις περιπτώσεις που εξετάζονται (σχ. 4.2.2.1, και σχ. 4.2.3.1) παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές του  $\rho_c$  οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ του 0,60 και 0,70. Ειδικά όταν η τιμή της αντοχής είναι μεταξύ των 50 και 107, 8 MPa (σχ. 4.2.4.1) το μοντέλο θεωρείται πολύ **αναξιόπιστο** ( $\rho_c=0,441$ ).
- Το μοντέλο των Touhari και Mitiche-Kettab αποδεικνύεται **πολύ ικανοποιητικό** για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa καθώς παρατηρείται σύγκλιση των πειραματικών-αναλυτικών τιμών  $f'_{cc}$  στα αντίστοιχα διαγράμματα (σχ. 4.1.2.2 και σχ. 4.1.3.2 ), ωστόσο εμφανίζει κάποιες αποκλίσεις μεταξύ των αναλυτικών και πειραματικών τιμών της  $f'_{cc}$  στην περίπτωση δοκιμίων με  $f'_{co}$  από 80 μέχρι 112, 6 MPa (σχ. 4.1.4.2)
- Όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, το μοντέλο των Touhari και Mitiche-Kettab φαίνεται να προβλέπει επίσης **ικανοποιητικά** τις τιμές  $f'_{cc}$  όπως και τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση δοκιμίων με αντοχή  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 80 MPa αλλά και στην περίπτωση των δοκιμίων με εξαιρετικά υψηλή αντοχή  $f'_{co}$  το μοντέλο αποδίδει με επάρκεια τις τιμές  $f'_{cc}$ , ωστόσο στη δεύτερη περίπτωση η ικανότητα του εμφανίζεται εμφανώς μειωμένη συγκριτικά με την πρώτη. ( $\rho_c=0,864$  και  $\rho_c=0,800$  αντίστοιχα). (σχ.4.2.3.2 και σχ. 4.2.4.2).
- Το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh θεωρείται **δεν θεωρείται ικανοποιητικό** ως προς τον προσδιορισμό της  $f'_{cc}$  των δοκιμίων CFRP. Ωστόσο, σε δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  μεγαλύτερη αυτής των 80 MPa η ικανότητα του για ακριβή προσδιορισμό της  $f'_{cc}$  από το συγκεκριμένο μοντέλο μειώνεται περισσότερο (σχ.4.1.4.3 ).
- Αναφορικά με τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, το μοντέλο των Mander και Saadatmanesh **δεν αποδίδει ικανοποιητικά** τις τιμές της  $f'_{cc}$ . Στα αντίστοιχα διαγράμματα (σχ. 4.2.2.3 και σχ. 4.2.3.3) είναι εμφανείς οι αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών, και ιδιαίτερα για τα δοκίμια με πολύ υψηλή  $f'_{co}$ , ανώτερη των 80 MPa (σχ. 4.2.4.3), η αξιοπιστία του μοντέλου μειώνεται σημαντικά ( $\rho_c=0,394$ ).
- Το προσομοίωμα που προτάθηκε από τους Aire, Gettu, Casas και Marques υπερεκτιμά κατά πολύ την δράση της περίσφιγξης στα δοκίμια με μανδύα CFRP, καθώς αρκετές τιμές  $f'_{cc}$  που υπολογίζονται βάσει του συγκεκριμένου μοντέλου είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις προσδιοριζόμενες πειραματικά

(σχ. 4.1.2.4, 4.1.3.4 και 4.1.4.4 ). Ελάχιστα βελτιωμένη εμφανίζεται η συμπεριφορά του μοντέλου στον υπολογισμό των τιμών της  $f'_{cc}$  όταν πρόκειται για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa (σχ. 4.1.3.4), χωρίς ωστόσο να θεωρείται ικανοποιητική.

- Το προσομοίωμα των Aire, Gettu, Casas και Marques, στον υπολογισμό της  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, **δεν αποδίδει τιμές που να συγκλίνουν** με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Η απόκλιση τους είναι ιδιαίτερα εμφανής (σχ. 4.2.2.4, 4.2.3.4 και 4.2.4.4) και μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή που εμφανίζεται για τα δοκίμια με μανδύα CFRP (σχ. 4.1.2.4, 4.1.3.4 και 4.1.4.4). Η υψηλή τιμή της  $f'_{co}$  δείχνει να επηρεάζει ακόμη περισσότερο την απόδοση του μοντέλου ( $\rho_c=0,433$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP και αντοχή  $f'_{co}$  μεταξύ των 50 και 107,8 MPa).
- Το προσομοίωμα των Benzaid et al. θεωρείται **αρκετά αντιπροσωπευτικό** όσον αφορά στην πρόβλεψη των τιμών  $f'_{cc}$  συγκριτικά με τις αντίστοιχες πειραματικές για δοκίμια με μανδύα CFRP. Ιδιαίτερα για δοκίμια με αντοχή  $f'_{co}$  μεγαλύτερη αυτής των 80 MPa η αποδοτικότητα του μοντέλου αυξάνεται καθώς η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών  $f'_{cc}$  μειώνεται σημαντικά όπως φαίνεται και από την τιμή του  $\rho_c$  που είναι ίση με 0,925 (σχ. 4.1.3.5 και σχ.4.1.4.5 - συγκριτικά). Συνεπώς το μοντέλο είναι πολύ ικανοποιητικό για δοκίμια περίσφιγξης CFRP και υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ .
- Το μοντέλο των Benzaid et al. είναι επίσης **ικανοποιητικό** για τα δοκίμια με μανδύα GFRP όσο και για τα δοκίμια με περίσφιγξη με CFRP. Ιδιαίτερα για τα δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  μεγαλύτερης των 80 MPa (σχ. 4.2.4.5) το μοντέλο δείχνει να προσεγγίζει επίσης ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές, χωρίς να δείχνει ιδιαίτερη ευαισθησία στην αυξημένη τιμή της αντοχής  $f'_{co}$  των δοκιμίων.
- Σχετικά με το προσομοίωμα των Berna 't Csuka & La 'szlo ' P Kolla 'r, δείχνει **μέτρια ικανοποιητικό** όσον αφορά τις τιμές  $f'_{cc}$  που υπολογίζονται για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Ειδικά για δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  άνω των 80 MPa (σχ. 4.1.3.6 και 4.1.4.6 – συγκριτικά) η ικανότητα του μοντέλου να αποδίδει αντιπροσωπευτικές τιμές της  $f'_{cc}$  αυξάνεται σημαντικά (τιμές  $\rho_c=0,722$  και 0,840 αντίστοιχα).
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό της τιμής  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP με βάση το προτεινόμενο μοντέλο των Berna 't Csuka & La 'szlo ' P Kolla 'r δε θεωρούνται στον ίδιο βαθμό ικανοποιητικά σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP όσον αφορά στα δοκίμια με  $f'_{co}$  μεταξύ των 50 και 112, 6 MPa (σχ. 4.1.4.6 και σχ. 4.2.4.6). Αυτό φαίνεται και από τη διαφορά των τιμών  $\rho_c$  οι οποίες ισούνται με 0,840

και 0,596 αντίστοιχα. Ωστόσο, σε μικρότερης αντοχής δοκίμια GFRP το μοντέλο δείχνει να ανταποκρίνεται επαρκέστερα (σχ. 4.2.2.6 και σχ. 4.2.3.6, με  $\rho_c=0,765$  και 0,773 αντίστοιχα).

- Το μοντέλο των Spoelstra & Monti προσεγγίζει **πολύ ικανοποιητικά** τις τιμές  $f'_{cc}$  τόσο για δοκίμια χαμηλότερης αντοχής όσο και δοκίμια υψηλότερης αντοχής  $f'_{co}$  εξωτερικά επενδυμένα με CFRP. Ειδικότερα, καθώς η αντοχή των δοκιμίων αυξάνεται (ανώτερη των 50 MPa και ειδικά μεταξύ του εύρους 80 - 112,6 MPa) οι αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών της  $f'_{cc}$  μειώνονται περισσότερο.
- Όμοια με τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP, σε δοκίμια GFRP το μοντέλο των Spoelstra & Monti παρουσιάζει υψηλού βαθμού σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών  $f'_{cc}$ . Ωστόσο, σε δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  μεγαλύτερης των 80 MPa η σύγκλιση των αποτελεσμάτων μειώνεται ( $\rho_c=0,467$ , σχ. 4.2.4.7). Κύριος λόγος αυτού αποτελεί το γεγονός ότι οι Spoelstra & Monti πρότειναν το μοντέλο εργαζόμενοι σε δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  από 30 μέχρι 50 MPa. Ως εκ τούτου, πιθανές αποκλίσεις σε δοκίμια με  $f'_{co}$  μεγαλύτερη των 50 MPa αντοχής θεωρούνται λογικές αν και στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP δεν εντοπίζονται.
- Το προσομοίωμα που προτάθηκε από τον Ozbakkaloglu **αποδίδει άριστα** τις τιμές  $f'_{cc}$  σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Όπως είναι φανερό στα αντίστοιχα σχήματα (σχ. 4.1.2.8, 4.1.3.8 και 4.1.4.8) ελάχιστα είναι τα δοκίμια των οποίων οι πειραματικές τιμές απέχουν αισθητά από τις υπολογισμένες βάσει του συγκεκριμένου μοντέλου. Ακόμη, η τιμή της  $f'_{co}$  των δοκιμίων δείχνει να μην επηρεάζει την ικανότητα του μοντέλου να προβλέψει αντιπροσωπευτικά την τιμή  $f'_{cc}$  καθώς δεν διακρίνονται σημαντικές αποκλίσεις στα αντίστοιχα σχήματα (σχ. 4.1.2.8, 4.1.3.8 και 4.1.4.8) και ειδικά στην περίπτωση των δοκιμίων με υψηλή τιμή αντοχής  $f'_{co}$  (σχ. 4.1.4.8) η απόδοση του μοντέλου είναι άριστη ( $\rho_c=0,934$ ).
- Αναφορικά με τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP και την καταλληλότητα του μοντέλου του Ozbakkaloglu γι' αυτά, το μοντέλο **ανταποκρίνεται επαρκώς** όχι ωστόσο σε βαθμό τέτοιο όπως για τα δοκίμια CFRP. Ειδικά σε δοκίμια με περίσφιγξη GFRP πολύ υψηλής αντοχής (ανώτερης των 80 MPa) η καταλληλότητα του μοντέλου περιορίζεται (σχ.4.2.4.8,  $\rho_c=0,713$ ).
- Η αναλυτική σχέση υπολογισμού της  $f'_{cc}$  σε δοκίμια με περίσφιγξη CFRP με βάση την προτεινόμενη εξίσωση υπολογισμού από τον Κανονισμό (EC – 2, Part 1.1) είναι αρκετά αντιπροσωπευτική όσον αφορά στα αποτελέσματα που αποδίδει καθώς οι διαφορές μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών δεν είναι σημαντικές. Μικρές διαφορές απαντώνται στο σχήμα 4.1.3.9 για το οποίο η τιμή της  $f'_{co}$  είναι μέχρι 80 MPa και η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή  $\text{Lin}'s$  υπολογίστηκε ίση με 0,854. Ωστόσο, για υψηλής αντοχής δοκίμια (σχ.

4.1.4.9) η ικανότητα του μοντέλου για πρόβλεψη της  $f'_{cc}$  αυξάνεται σημαντικά ( $\rho_c=0,876$ ).

- Όμοια με την περίπτωση δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP, η αντοχή  $f'_{cc}$  των δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP προσεγγίζει σε πολύ υψηλό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα της  $f'_{cc}$  κατά την εφαρμογή του μοντέλου του Κανονισμού (EC - 2, Part 1.1) στα δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, για τιμές  $f'_{co}$  ανώτερες των 80 MPa, η σύγκλιση αυτή παρατηρείται μειωμένη (σχ. 4.2.4.9,  $\rho_c=0,701$ ). Συνεπώς, η υψηλή τιμή της  $f'_{co}$  δείχνει να επηρεάζει την αποδοτικότητα του συγκεκριμένου μοντέλου για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP. Για δοκίμια GFRP μικρότερων αντοχών  $f'_{co}$  το μοντέλο αποδίδει αποτελέσματα πλησιέστερα στα πειραματικά (σχ. 4.2.2.9 και σχ. 4.2.3.9)
- Σχετικά με το μοντέλο του Girgin, δείχνει να προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές  $f'_{cc}$  σε δοκίμια με περίσφιγξη CFRP (σχ.4.1.2.10, 4.1.3.10 ). Παρ' όλα αυτά, οι υψηλές τιμές της  $f'_{co}$  επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την αποτελεσματικότητα του μοντέλου καθώς στην περίπτωση που η  $f'_{co}$  ξεπερνά την τιμή των 80 MPa οι αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών γίνονται εμφανείς στο αντίστοιχο διάγραμμα, όπως επαληθεύει η χαμηλή τιμή του  $\rho_c=0,709$  (σχ. 4.1.4.10 ).
- Το μοντέλο του Girgin, αποδίδει εξίσου ικανοποιητικές τιμές  $f'_{cc}$  στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP όπως σε αυτά με CFRP. Παρόλο που εμφανίζεται πολύ αποδοτικό για δοκίμια μικρότερων αντοχών (σχ. 4.2.2.10 και σχ.4.2.3.10 με  $\rho_c$  ίσο με 0,868 και 0,854 αντίστοιχα), στην περίπτωση δοκιμίων GFRP πολύ υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ , μεταξύ των τιμών 51-107,8 MPa, η ικανότητα του μοντέλου μειώνεται ( $\rho_c=0,765$ ) (σχ. 4.2.4.10 )
- Το μοντέλο των Xiao & Wu, στην περίπτωση των δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP και αντοχή  $f'_{co}$  κατώτερη των 50 και 80 MPa, δε δείχνει να προσεγγίζει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τις πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  (σχ.4.1.2.11 και σχ. 4.1.3.11). Η ικανότητα πρόβλεψης των τιμών  $f'_{cc}$  αυξάνονται στη περίπτωση δοκιμίων με  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 112, 6 MPa (σχ. 4.1.4.11).
- Το μοντέλο των Xiao & Wu εμφανίζει ευδιάκριτες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών της  $f'_{cc}$  σε περιπτώσεις δοκιμίων GFRP και αντοχή  $f'_{co}$  μέχρι 50 και μέχρι 80 MPa (σχ. 4.2.2.11 και σχ. 4.2.3.11 αντίστοιχα). Ωστόσο, ιδιαίτερη απόκλιση παρουσιάζεται μεταξύ των πειραματικών και αναλυτικών τιμών για δοκίμια GFRP υψηλής αντοχής, δηλαδή για  $f'_{co}$  ανώτερη των 50 MPa (σχ. 4.2.4.11) καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται **το πλέον αναξιόπιστο** για υψηλής αντοχής δοκίμια περισφιγμένα με GFRP ( $\rho_c=0,178$ ).
- Το προσομοίωμα που προτάθηκε από τον Toutanji δείχνει να υπερεκτιμά τη δράση της περίσφιγξης σε κυλίνδρους CFRP, καθώς στα αντίστοιχα

διαγράμματα (σχ. 4.1.2.12 και σχ. 4.1.3.12) εντοπίζονται κάποιες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών με τις αναλυτικές να προκύπτουν αρκετά μεγαλύτερες από τις πειραματικές. Αυτή η «τάση» υπερεκτίμησης της δράσης της περίσφιγξης εμφανίζεται ανεξάρτητα της τιμής της αντοχής καθώς είναι εμφανής τόσο σε δοκίμια μέσης αντοχής  $f'_{co}$  όσο και σε δοκίμια υψηλής.

- Το μοντέλο του Toutanji δείχνει να μην προσεγγίζει **ικανοποιητικά** τις πειραματικές τιμές της  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP μέχρι 50 MPa (σχ. 4.2.2.12,  $\rho_c=0,572$ ). Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα για δοκίμια GFRP υψηλής αντοχής  $f'_{co}$  μεταξύ 50 και 107,8 MPa η προβλεψιμότητα του μοντέλου δείχνει να είναι ιδιαίτερα χαμηλή (σχ. 4.2.4.12,  $\rho_c=0,419$ ).

#### 4.4 Στατιστική ανάλυση

Η εξέταση του βαθμού συσχέτισης των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών τη  $f'_{cc}$  από στατιστικής άποψης οδήγησε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων με τη χρήση του προγράμματος SPSS. Με μεταφορά των αποτελεσμάτων των πειραματικών και αναλυτικών τιμών της  $f'_{cc}$  από το Microsoft excel και τη θεώρησή τους ως βασικές μεταβλητές, εξήχθη ο συντελεστής Spearman για αυτές τις μεταβλητές. Ο συντελεστής Spearman είναι ένας αριθμός μικρότερος της μονάδας που συμβολίζει από στατιστικής πλευράς το βαθμό εξάρτησης δύο μεταβλητών. Όσο κοντύτερα στη μονάδα βρίσκεται, τόσο καλύτερα μπορεί να περιγραφεί η σχέση των μεταβλητών με τη χρήση μιας μονότονης συνάρτησης.

Για κάθε μοντέλο λοιπόν εξήχθη ο συντελεστής Spearman μέσω του οποίου γίνεται ευκολότερα αντιληπτή η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και αναλυτικών τιμών του μοντέλου που εξετάζεται. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλα τα μοντέλα για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και GFRP χωριστά. Αρχικά λαμβάνονται όλα τα δοκίμια CFRP/GFRP, έπειτα μόνο αυτά με  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa, στη συνέχεια τα δοκίμια με  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa και τέλος τα δοκίμια με  $f'_{co}$  από 50 MPa μέχρι 112,6 MPa και 107,8 MPa για αυτά με περίσφιγξη CFRP και GFRP αντίστοιχα (Πίν. 4.4.1 έως 4.4.2).

Πίνακας 4.4.1 Συντελεστές συσχέτισης Spearman για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP

Δοκίμια CFRP με $f'_{co}$ :	Fardis & Khalili	Touhari & Mitiche-Kettab	Mander et al & Saadatmanesh et al	Aire, Gettu, Casas & Marques	Benzaïd et al.	Csuka & Kollar	Spoelstra & Monti	Ozbakkaloglu	EC - 2	Girgin	Xiao & Wu	Toutanji
Από 0 έως 112,6 MPa	0,880	0,884	0,859	0,881	0,860	0,796	0,870	0,880	0,876	0,875	0,810	0,876
Έως 50 MPa	0,860	0,860	0,826	0,859	0,831	0,775	0,843	0,855	0,850	0,849	0,811	0,848
Έως 80 MPa	0,872	0,876	0,850	0,874	0,851	0,783	0,862	0,873	0,868	0,867	0,800	0,868
Από 50 έως 112,6 MPa	0,872	0,877	0,883	0,875	0,895	0,714	0,871	0,888	0,875	0,877	0,856	0,870

Πίνακας 4.4.2 Συντελεστές συσχέτισης Spearman για δοκίμια με περίσφιξη GFRP

Δοκίμια GFRP με $f'_{co}$ :	Fardis & Khalili	Touhari & Mitiche-Kettab	Mander et al & Saadatmanesh et al	Aire, Gettu, Casas & Marques	Benzaid et al.	Csuka & Kollar	Spoelstra & Monti	Ozbakkaloglu	EC - 2	Girgin	Xiao & Wu	Toutanji
Από 0 έως 107,8 MPa	0,907	0,909	0,897	0,910	0,902	0,768	0,895	0,924	0,918	0,919	0,662	0,910
Έως 50 MPa	0,888	0,874	0,868	0,890	0,870	0,754	0,880	0,898	0,886	0,889	0,816	0,890
Έως 80 MPa	0,888	0,892	0,877	0,892	0,883	0,717	0,875	0,910	0,902	0,903	0,803	0,893
Από 50 έως 107,8 MPa	0,837	0,905	0,880	0,837	0,901	0,724	0,837	0,884	0,884	0,849	0,383	0,837

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 4.4.1 γίνεται εμφανές ότι για τα δοκίμια με περίσφιξη CFRP οι πειραματικές με τις αναλυτικά προβλεπόμενες τιμές της  $f'_{cc}$  είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένες σε όλα τα μοντέλα. Ειδικά τα μοντέλα Fardis & Khalili, Touhari & Mitiche-Kettab, Toutanji, EC2 και Ozbakkaloglu εμφανίζουν μεγάλο ποσοστό συσχέτισης όσον αφορά στις συγκεκριμένες τιμές. Ειδικά στην τελευταία σειρά του πίνακα 4.4.1 ο οποίος αναφέρεται στην περίπτωση δοκιμίων με περίσφιξη CFRP και αντοχή  $f'_{co}$  μεταξύ των 50 MPa και 112,6 MPa το προσομοίωμα του Benzaid et al. συσχετίζει πολύ ικανοποιητικά τις πειραματικές με τις αναλυτικές τιμές της  $f'_{cc}$  με συντελεστή Spearman 0,895. Αναφορικά με το τελευταίο, παρατηρείται επίσης ικανοποιητική συσχέτιση των μεταβλητών τόσο στα μοντέλα των, Ozbakkaloglu, Mander & Saadatmanesh, EC – 2, ενώ στην περίπτωση με  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa, τα προσομοιώματα των Fardis & Khalili και Touhari & Mitiche-Kettab δείχνουν να συσχετίζουν πειραματικές και αναλυτικές τιμές στο μεγαλύτερο βαθμό.

Για τα δοκίμια με περίσφιξη GFRP παρατηρείται μια γενικότερη άνοδος του συντελεστή Spearman σε όλα τα μοντέλα, είτε σε μικρότερο είτε σε μεγαλύτερο βαθμό. Στα μοντέλα των Ozbakkaloglu παρατηρείται υψηλή συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων ανεξάρτητα της τιμής  $f'_{co}$ . Αντίθετα, για GFRP δοκίμια

είτε μέσης είτε υψηλής αντοχής, το μοντέλο των Xiao & Wu εμφανίζει πολύ χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. (Πίν. 4.4.2), δηλαδή στην περίπτωση της περίσφιξης με GFRP το μοντέλο αυτό δεν συσχετίζει (πολύ μικρού βαθμού συσχέτιση) τις πειραματικές και αναλυτικές τιμές της  $f'_{cc}$  επαρκώς. Ειδικά στην περίπτωση των δοκιμών GFRP με αντοχή  $f'_{co}$  ανώτερη αυτής των 50 MPa (Πίν.4.4.2), στα μοντέλα των Touhari & Mitiche-Kettab, Benzaid et al, Ozbakkaloglu και EC-2 καταγράφονται οι μεγαλύτερες τιμές συσχέτισης. Δηλαδή, ενώ σε χαμηλότερες τιμές της  $f'_{co}$  τα συγκεκριμένα μοντέλα συσχετίζουν τις μεταβλητές ως ένα βαθμό, στην περίπτωση υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ , ανώτερη αυτής των 50 MPa (εύρος : 50~107,8 MPa), οι τιμές συνεχίζουν να συσχετίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό επίσης.

Εξάιρεση σε αυτό αποτελεί το προσομοίωμα του Toutanji, του οποίου η συσχέτιση ενώ δείχνει αρκετά ικανοποιητική, στην περίπτωση δοκιμών GFRP και  $f'_{co}$  ανώτερη των 80 MPa (Πίν. 4.4.2) μειώνεται από το 0,893 στο 0,837.

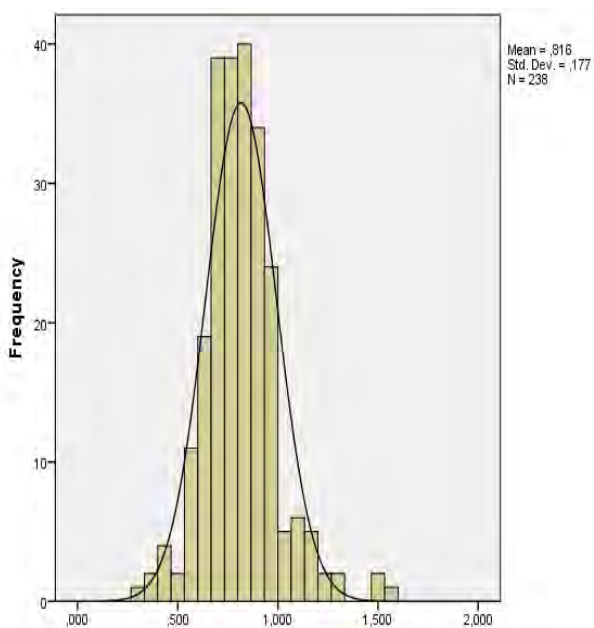


## 4.5 Σύγκριση της αξιοπιστίας των αναλυτικών προσομοιωμάτων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί γραφικά η αξιοπιστία κάθε μοντέλου με βάση το βαθμό κατά τον οποίο η αναλυτική τιμή της  $f'_{cc}$  προσεγγίζει την πειραματική για κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν διαγράμματα (ιστογράμματα) με τη βοήθεια του προγράμματος SPSS για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP ξεχωριστά. Έτσι, γίνεται εμφανής προσεγγιστικά η αποδοτικότητα κάθε μοντέλου ανάλογα τον τύπο περίσφιγξης κάθε δοκιμίου και την αρχική αντοχή  $f'_{co}$  και είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση. Στο κάθε γράφημα διακρίνεται η μέση τιμή του λόγου  $f'_{cc}^{πειραμ} / f'_{cc}^{προβλεπ}$  καθώς και η τυπική απόκλιση των τιμών  $f'_{cc}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}^{προβλεπ}$  για καθένα από τα δοκίμια της βάσης δεδομένων.

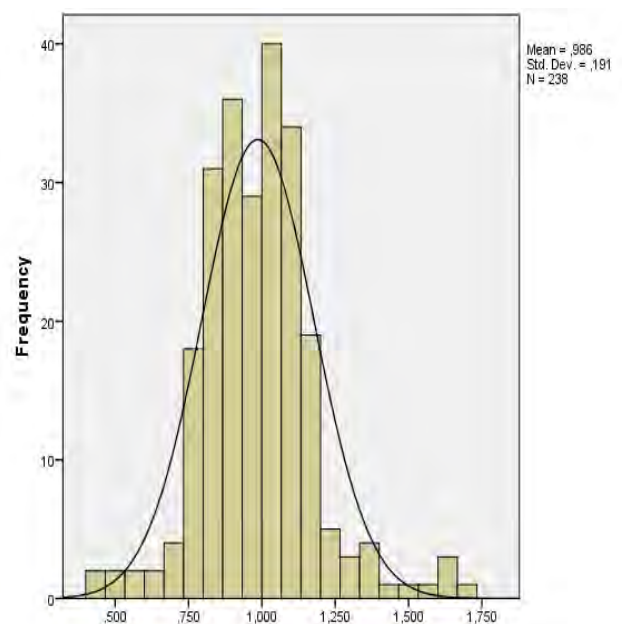
### 4.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ CFRP

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η αποτελεσματικότητα κάθε μοντέλου όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP για αντοχή  $f'_{co}$  από 0 έως 112,6 MPa (σχ. 4.5.1.1 έως 4.5.1.12).



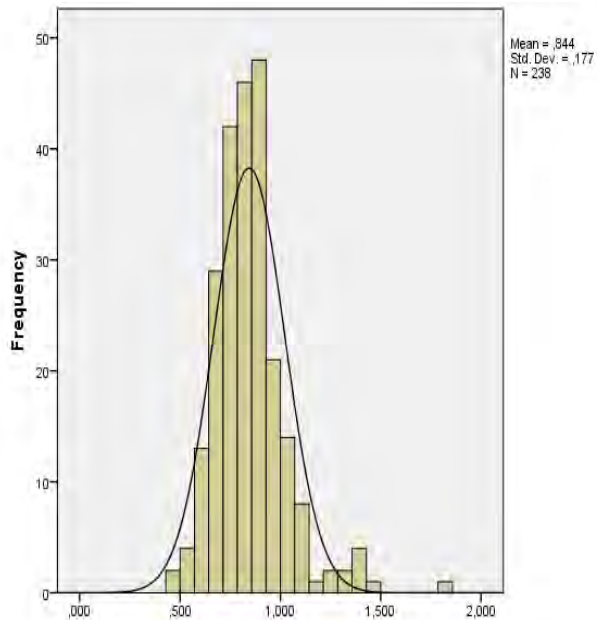
Σχ. 4.5.1.1

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



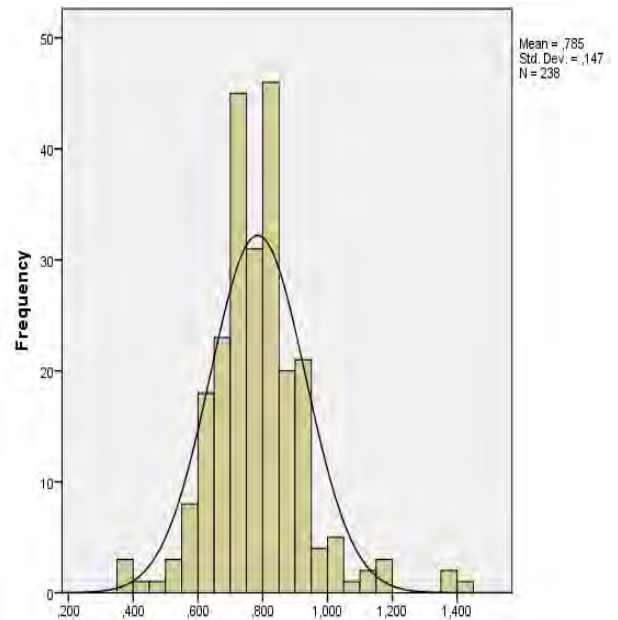
Σχ. 4.5.1.2

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche - Kettab



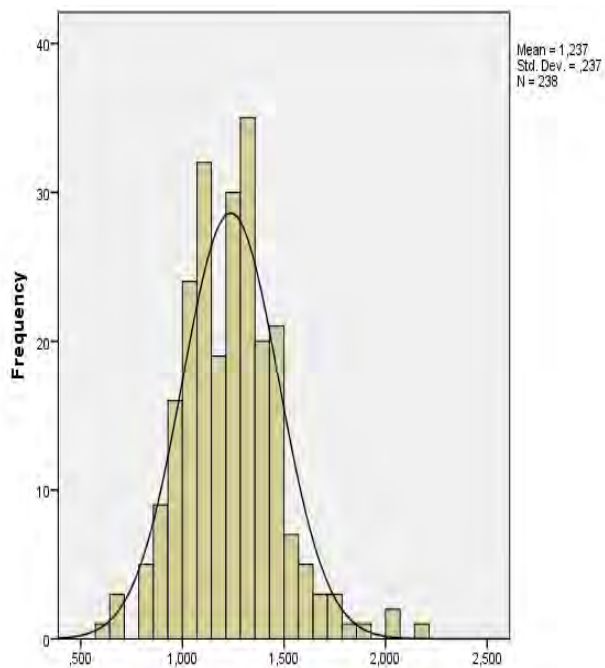
Σχ. 4.5.1.3

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



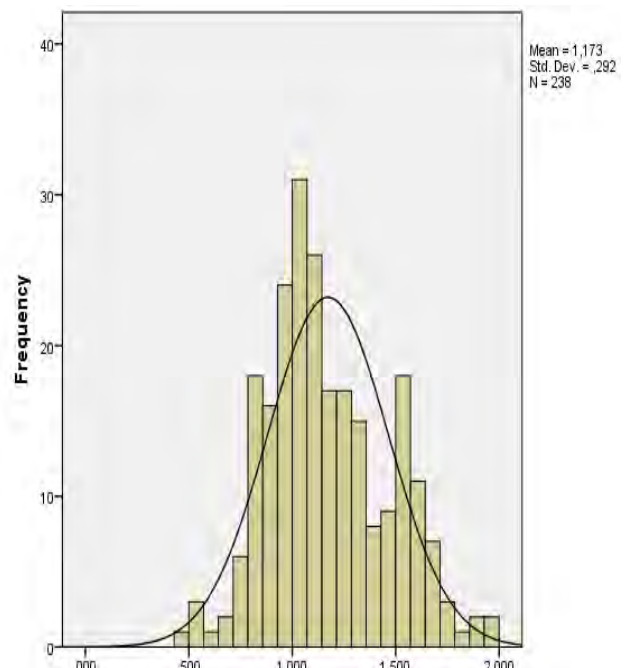
Σχ. 4.5.1.4

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques



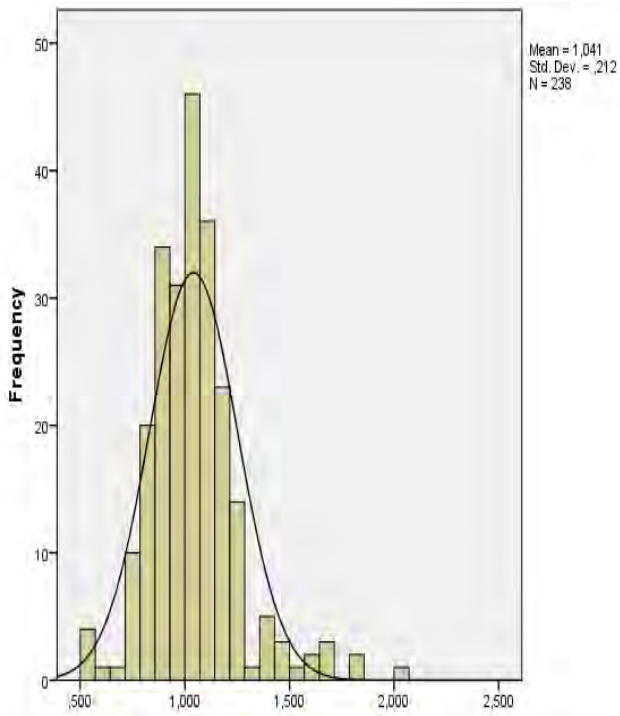
Σχ. 4.5.1.5

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Benzaid et al.



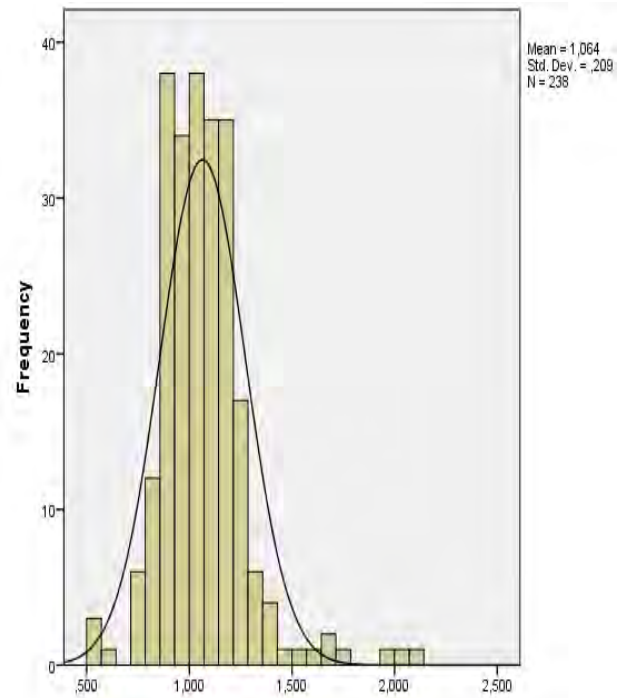
Σχ. 4.5.1.6

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Bernat' t Csuka & La szlo 'P Kolla 'r



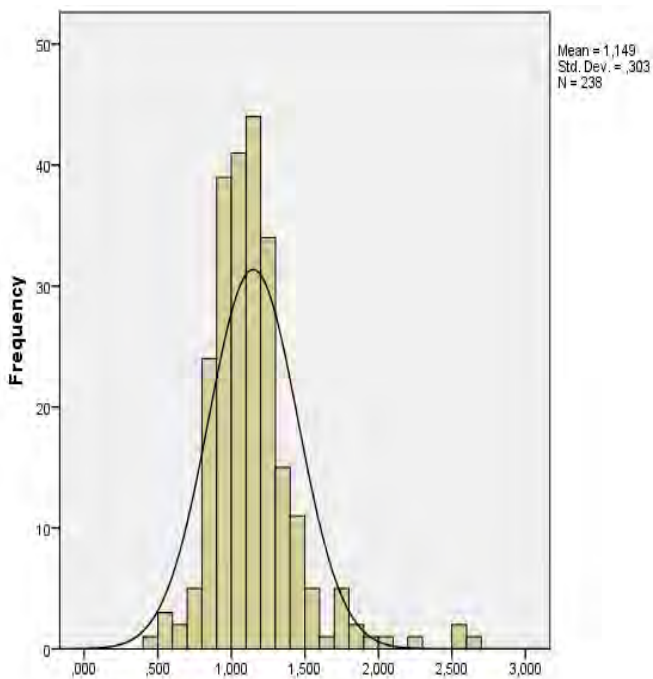
Σχ. 4.5.1.7

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο των Spolstra & Monti



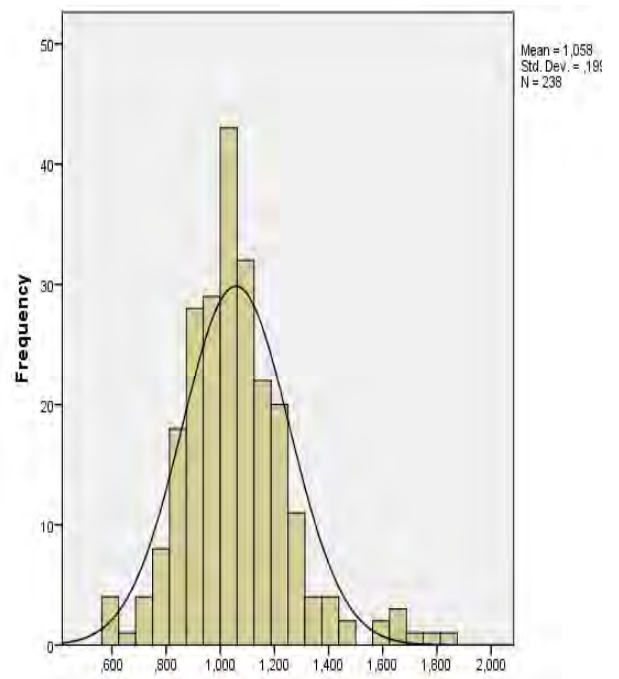
Σχ. 4.5.1.8

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο του Ozbakkaloglu



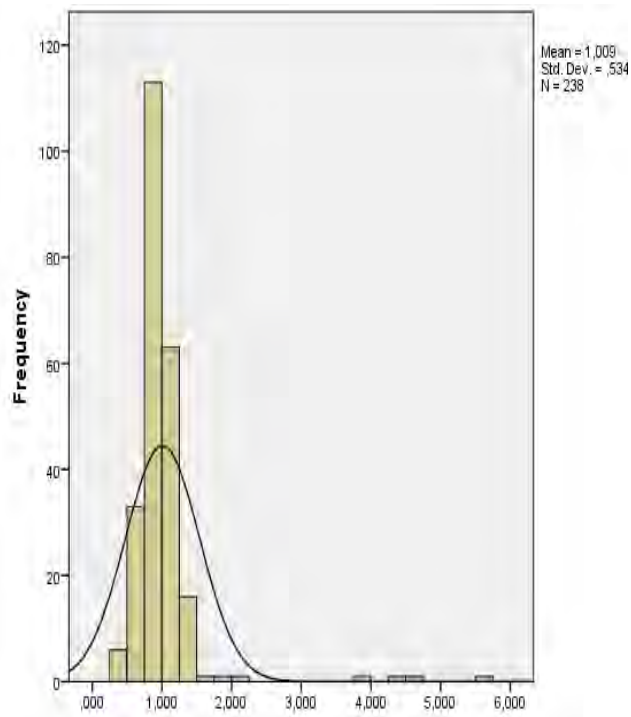
Σχ. 4.5.1.9

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο του EC - 2



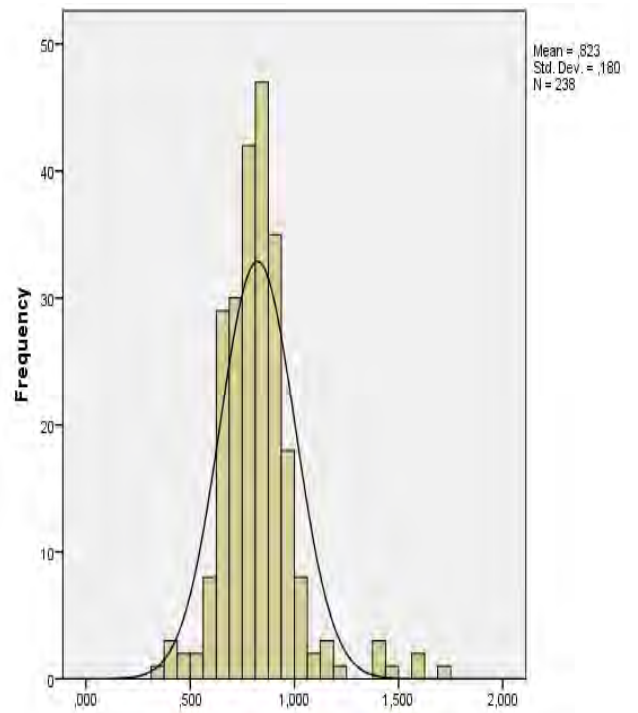
Σχ. 4.5.1.10

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη CFRP με βάση το μοντέλο του Girgin



Σχ. 4.5.1.11

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη CFRP με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu

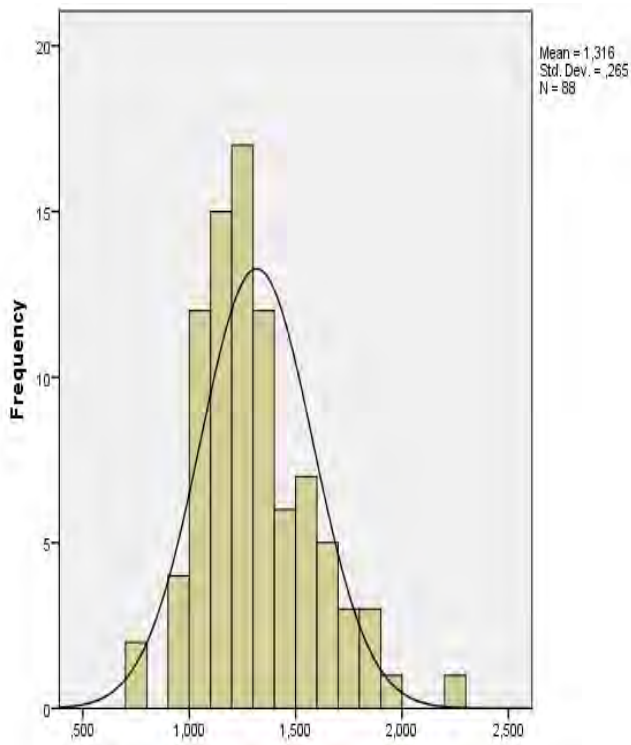


Σχ. 4.5.1.12

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f_{cc}^{πειρ}$  και  $f_{cc}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη CFRP με βάση το μοντέλο του Toutanji

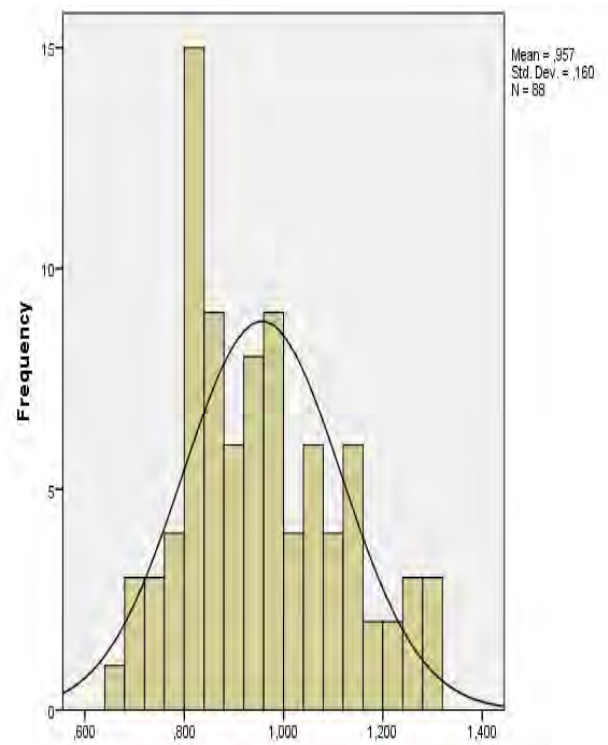
#### 4.5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ GFRP

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η αποτελεσματικότητα κάθε μοντέλου όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP για αντοχή  $f'_{co}$  από 0 έως 107,8 MPa (σχ. 4.5.2.1 έως σχ. 4.5.2.12).



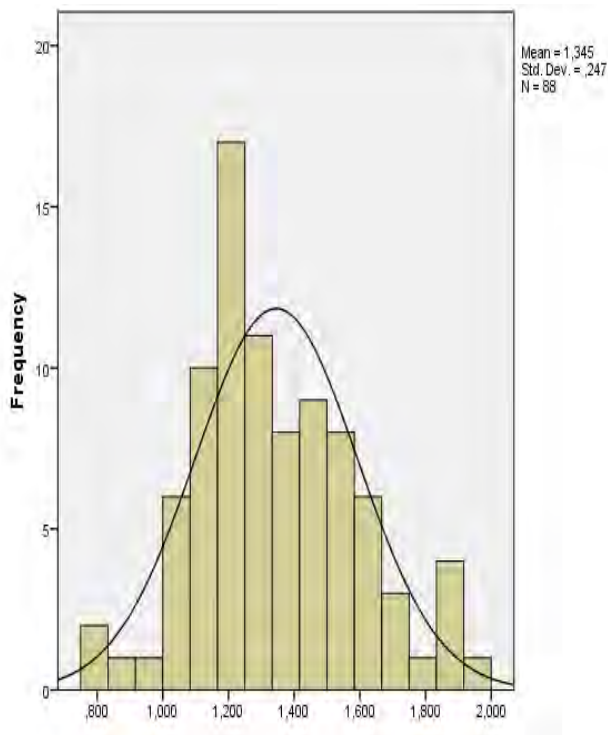
Σχ. 4.5.2.1

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}{}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}{}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο των Fardis & Khalili



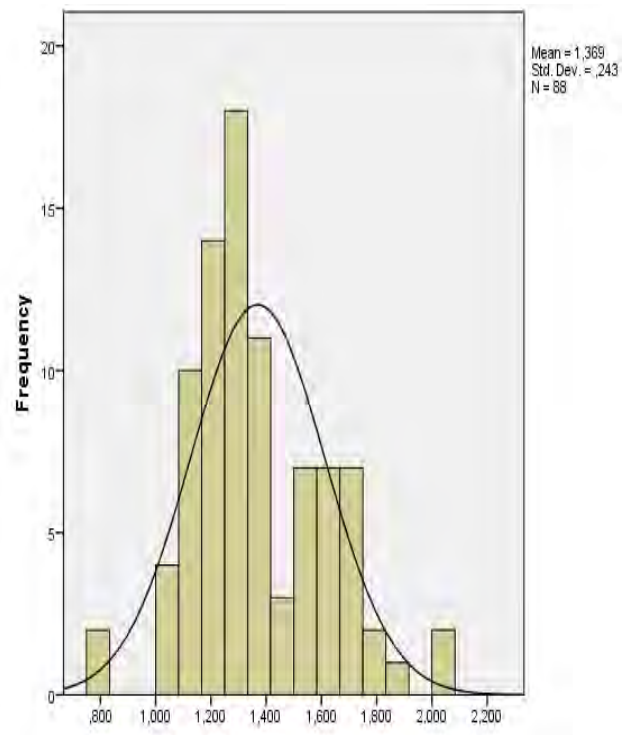
Σχ. 4.5.2.2

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}{}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}{}^{προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο των Touhari & Mitiche-Kettab



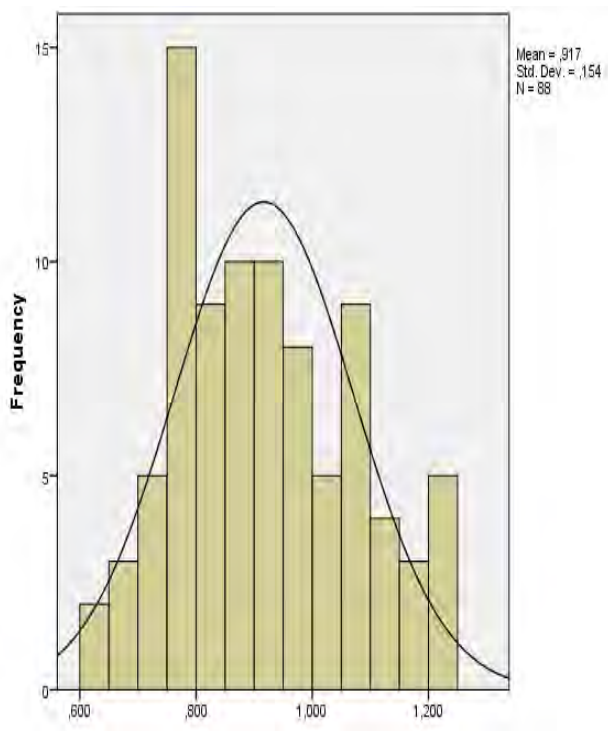
Σχ. 4.5.2.3

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη GFRP με βάση το μοντέλο των Mander & Saadatmanesh



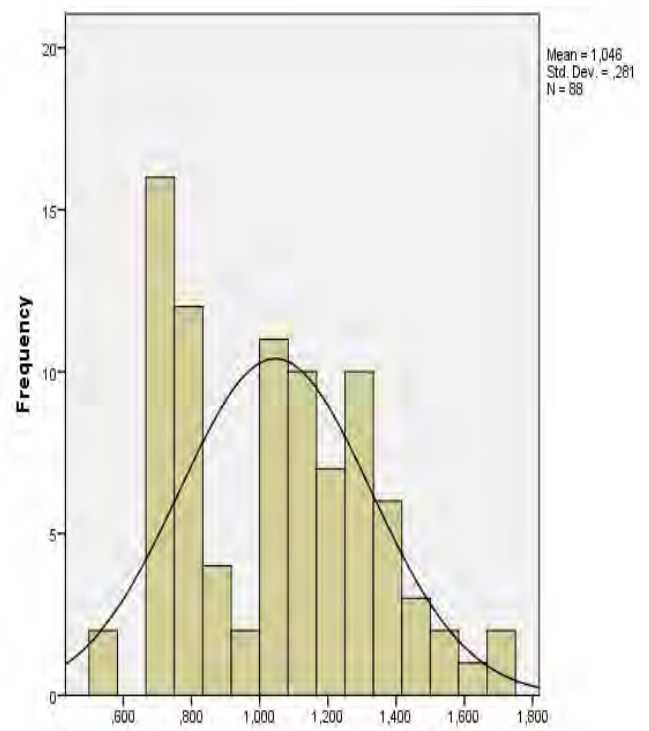
Σχ. 4.5.2.4

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη GFRP με βάση το μοντέλο των Aire, Gettu, Casas & Marques



Σχ. 4.5.2.5

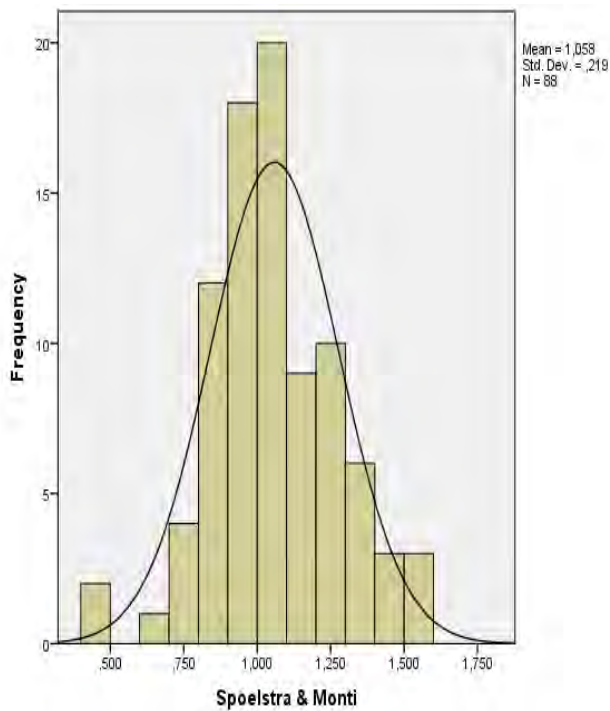
Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη GFRP με βάση το μοντέλο των Benzaid et al.



Σχ. 4.5.2.6

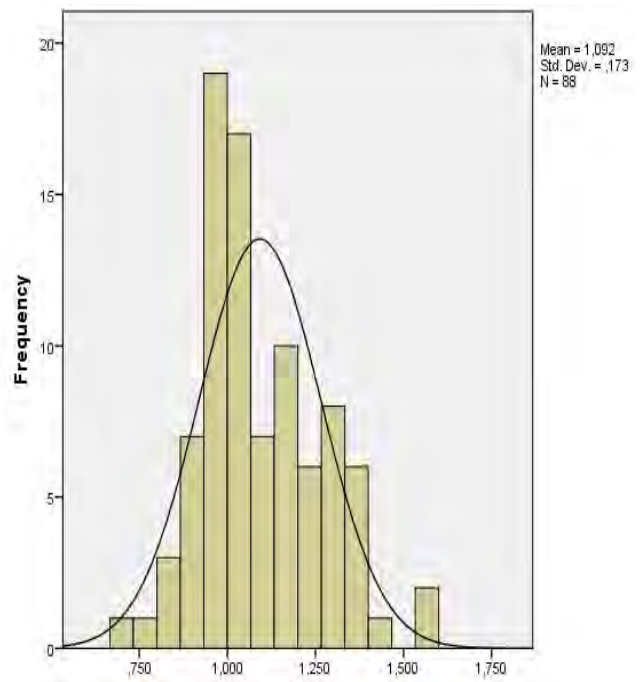
Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιξη GFRP με βάση το μοντέλο των Berna 't Csuka & La'szlo 'P Kolla 'r





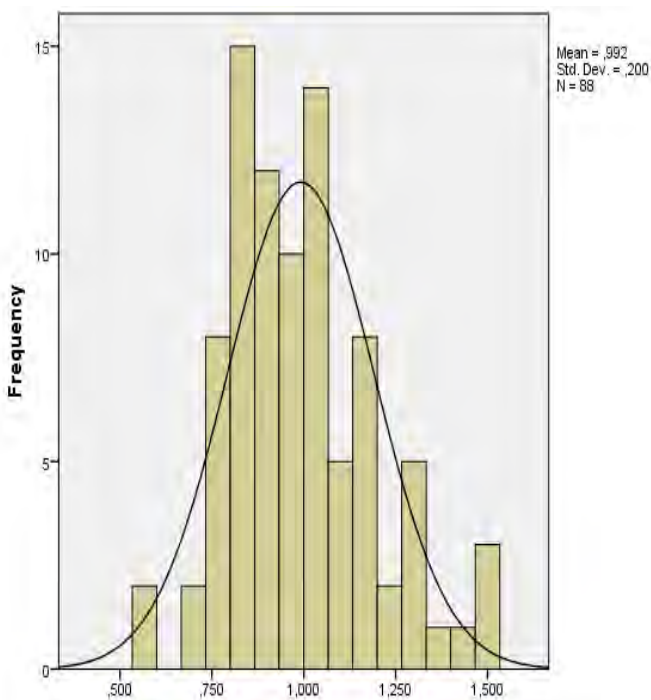
Σχ. 4.5.2.7

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο των Spoelstra & Monti



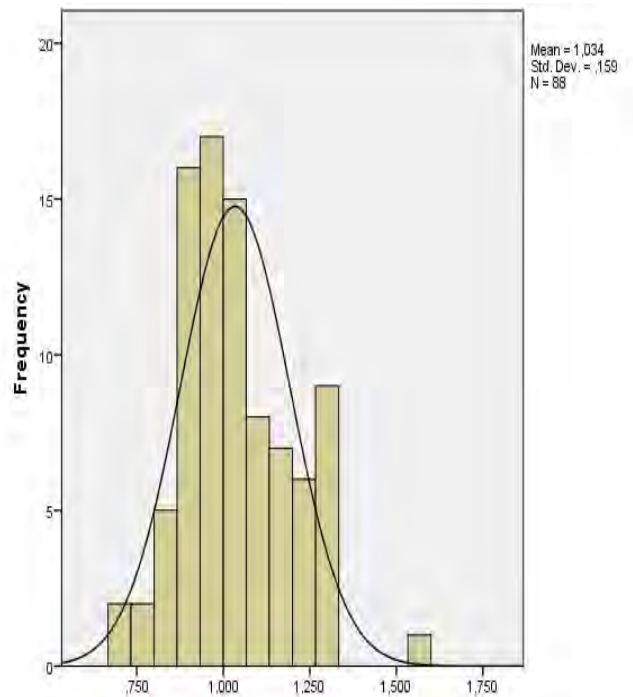
Σχ. 4.5.2.8

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο του Ozbakaloglu



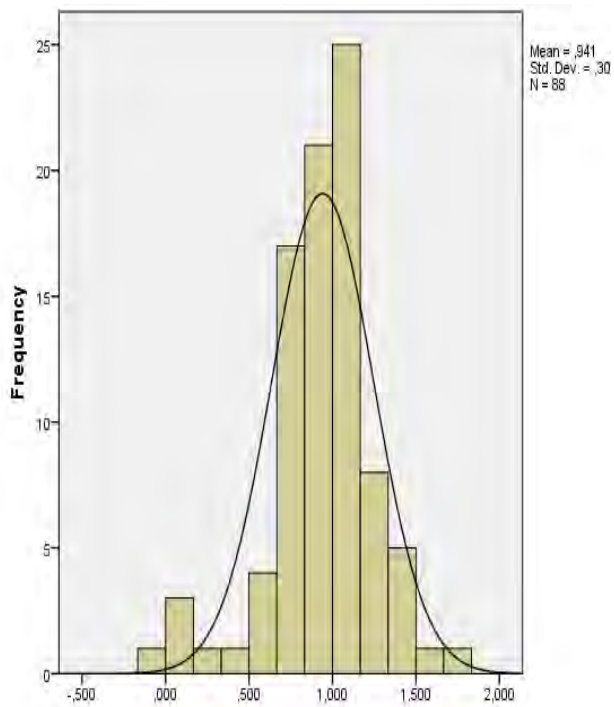
Σχ. 4.5.2.9

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο του EC - 2



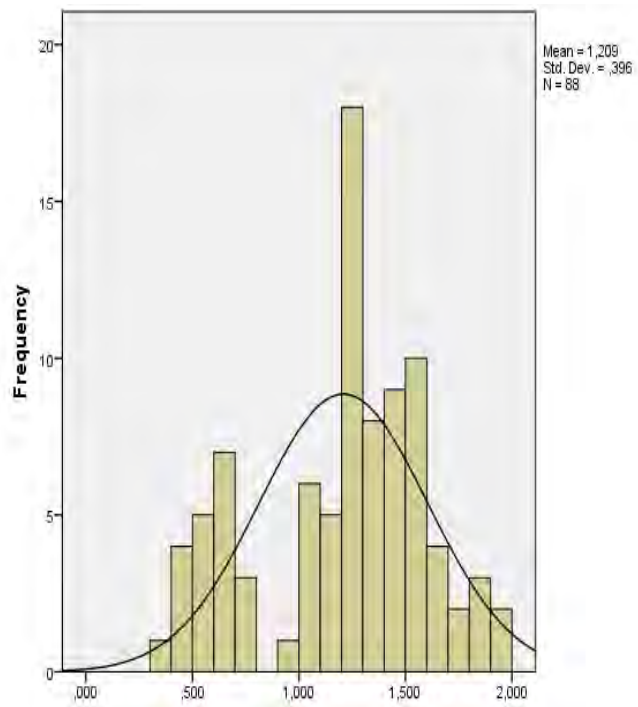
Σχ. 4.5.2.10

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc,πειρ}$  και  $f'_{cc,προβλεπ}$  δοκιμών με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο του Girgin



Σχ. 4.5.2.11

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}{}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}{}^{προβλεπ}$  δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο των Xiao & Wu



Σχ. 4.5.2.12

Ιστόγραμμα για τις τιμές  $f'_{cc}{}^{πειρ}$  και  $f'_{cc}{}^{προβλεπ}$  δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP με βάση το μοντέλο του Toutanji



Αναφορικά με τα σχήματα 4.5.1.1 έως 4.5.1.12, στον Πίνακα 4.5.1 φαίνονται συγκεντρωτικά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του λόγου  $f_{cc}^{πειραμ} / f_{cc}^{προβλεπ}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP ανάλογα τα αποτελέσματα  $f_{cc}^{προβλεπ}$  που προκύπτουν από κάθε εξεταζόμενο μοντέλο.

Πίνακας 4.5.1 Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του λόγου  $f_{cc}^{πειραμ} / f_{cc}^{προβλεπ}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP

Μοντέλα υπολογισμού $f_{cc}$ για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP	Μέση Τιμή λόγου $f_{cc}^{πειραμ} / f_{cc}^{προβλεπ}$	Τυπική απόκλιση λόγου $f_{cc}^{πειραμ} / f_{cc}^{προβλεπ}$
Fardis & Khalili	0,816	0,177
Touhari & Mitiche - Kettab	0,986	0,191
Mander & Saadatmanesh	0,844	0,177
Aire, Gettu, Casas & Marques	0,785	0,147
Benzaid et al.	1,237	0,237
Berna 't Csuka & La'szlo 'P Kolla 'r	1,173	0,292
Spoelstra & Monti	1,041	0,212
Ozbakkaloglu	1,064	0,209
EC - 2	1,149	0,303
Girgin	1,058	0,199
Xiao & Wu	1,009	0,534
Toutanji	0,823	0,180

Αναφορικά με τα σχήματα 4.5.2.1 έως 4.5.2.12, στον Πίνακα 4.5.2 φαίνονται συγκεντρωτικά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του λόγου  $f'_{cc} \text{ προβλεπ} / f'_{cc} \text{ πειραμ}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP ανάλογα τα αποτελέσματα  $f'_{cc} \text{ προβλεπ}$  που προκύπτουν από κάθε εξεταζόμενο μοντέλο.

Πίνακας 4.5.2 Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του λόγου  $f'_{cc} \text{ προβλεπ} / f'_{cc} \text{ πειραμ}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP

Μοντέλα υπολογισμού $f'_{cc}$ για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP	Μέση Τιμή λόγου $f'_{cc} \text{ προβλεπ} / f'_{cc} \text{ πειραμ}$	Τυπική απόκλιση λόγου $f'_{cc} \text{ προβλεπ} / f'_{cc} \text{ πειραμ}$
Fardis & Khalili	1,316	0,265
Touhari & Mitiche - Kettab	0,957	0,160
Mander & Saadatmanesh	1,345	0,247
Aire, Gettu, Casas & Marques	1,369	0,243
Benzaid et al.	0,917	0,154
Berna 't Csuka & La'szlo 'P Kolla 'r	1,046	0,281
Spoelstra & Monti	1,058	0,219
Ozbakkaloglu	1,092	0,173
EC – 2	0,992	0,200
Girgin	1,034	0,159
Xiao & Wu	0,941	0,307
Toutanji	1,209	0,396

Αναφορικά με τους Πίνακες 4.5.1 και 4.5.2 προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία και ικανότητα κάθε μοντέλου να προσεγγίσει επαρκώς τις πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  των δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP και GFRP αντίστοιχα. Εκτός από τη μέση τιμή του λόγου  $f'_{cc} \text{ πειραμ} / f'_{cc} \text{ προβλεπ}$ , η οποία όσο πλησιέστερα στη μονάδα βρίσκεται τόσο το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει αποτελέσματα που προσεγγίζουν τα πειραματικά, η τυπική απόκλιση παίζει κυρίαρχο ρόλο. Συγκεκριμένα, ένα μοντέλο που προσεγγίζει επαρκώς τις τιμές  $f'_{cc}$  θα πρέπει να εμφανίζει όσο το δυνατό πλησιέστερο στη μονάδα λόγο  $f'_{cc} \text{ πειραμ} / f'_{cc} \text{ προβλεπ}$  και συγχρόνως, όσο το δυνατό μικρότερη απόκλιση.

Συνεπώς, στον Πίνακα 4.5.1 για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων των Spoelstra & Monti, Ozbakkaloglu και Girgin προσεγγίζουν περισσότερο τα πειραματικά. Εξίσου καλή απόδοση εμφανίζει και το προσομοίωμα των Touhari & Mitiche - Kettab.

Αντίθετα, τα προσομοιώματα των Fardis & Khalili και Mander & Saadatmanesh δείχνουν να υπερεκτιμούν κατά πολύ την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης καθώς ο λόγος  $f'_{cc} \text{ πειραμ} / f'_{cc} \text{ προβλεπ}$  είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας.

Όσον αφορά στον Πίνακα 4.5.2, για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, το μοντέλο του Girgin δείχνει να ανταποκρίνεται επαρκέστερα όλων στην πρόβλεψη των τιμών  $f'_{cc}$ . Επίσης αποδοτικά είναι τα προσομοιώματα των Touhari & Mitiche - Kettab και των Benzaid et al., ενώ αυτό των Spoelstra & Monti εμφανίζει υψηλή απόκλιση σχετικά με τα υπόλοιπα που κρίνονται καταλληλότερα για αυτήν την περίπτωση.

#### 4.6 Κατάταξη των μοντέλων ανάλογα με την ικανότητα πρόβλεψης $f'_{cc}$ για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP/GFRP

Συμπερασματικά, η υποεπάρκεια αυτή αφορά στην κατάταξη των μοντέλων ανάλογα με την ακρίβεια προσδιορισμού της τιμής  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και GFRP ξεχωριστά (Πίνακες 4.6.1 και 4.6.2).

Πίνακας 4.6.1 Χαρακτηρισμός προβλεψιμότητας  $f'_{cc}$  δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP για κάθε μοντέλο (με βάση την τιμή  $\rho_c$ )

<b>Πολύ ικανοποιητική</b>	<b>Αρκετά Ικανοποιητική</b>	<b>Μέτρια ικανοποιητική</b>	<b>Κακή</b>
Spaelstra & Monti (0,879)	Benzaid et al. (0,828)	Toutanji (0,747)	Aire, Gettu, Casas, & Marques (0,741)
Ozbakkaloglu (0,900)	Berna 't Csuka & La'szlo 'P Kolla 'r (0,802)	Xiao & Wu (0,760)	Fardis & Khalili (0,696)
EC – 2 (0,880)	Girgin (0,828)	Mander & Saadatmanesh (0,772)	
	Touhari & Mitiche-Kettab (0,871)		

Πίνακας 4.6.2 Χαρακτηρισμός προβλεψιμότητας  $f'_{cc}$  δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP για κάθε μοντέλο

Πολύ ικανοποιητική	Αρκετά Ικανοποιητική	Μέτρια ικανοποιητική	Κακή
Girgin (0,888)	Spoelstra & Monti (0,838)	Fardis & Khalili (0,643)	Xiao & Wu (0,544)
	Ozbakkaloglu (0,869)		Toutanji (0,641)
	EC -2 (0,859)		Aire, Casas, Gettu & Marques (0,628)
	Benzaid et al (0,856)		Mander & Saadatmanesh (0,633)
	Berna 't Csuka & La'szlo 'P Kolla 'r (0,762)		
	Touhari & Mitiche- Kettab (0,878)		

Η εξίσωση του Fardis & Khalili αναφέρεται γενικά σε δοκίμια με περίσφιγξη, χωρίς να δίνει έμφαση στον τύπο της περίσφιγξης και προέκυψε από πειράματα σε δοκίμια αντοχών  $f'_{co}$  από 20 μέχρι 50 MPa.

Οι Touhari & Mitiche – Kettab διαθέτουν διαφορετικές εξισώσεις προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP και GFRP καθώς βασίστηκαν σε αποτελέσματα δειγμάτων με περίσφιγξη και αντοχή  $f'_{co}$  25, 40, 60 MPa. Βέβαια σε υψηλές τιμές  $f'_{co}$  η ικανότητα του μοντέλου για ακριβή προσδιορισμό της  $f'_{cc}$  μειώνεται. Συνεπώς το μοντέλο είναι ευαίσθητο σε αύξηση της τιμής της  $f'_{cc}$  άνω των 50 MPa.

Οι Mander & Saadatmanesh αποδίδουν μια έκφραση προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  ανεξάρτητα του τύπου FRP και εξαρτώμενη μόνο από το λόγο  $f_i/f'_{co}$ . Η ικανότητα του μοντέλου μειώνεται ακόμη περισσότερο σε περίπτωση υψηλής  $f'_{co}$  (άνω των 50 MPa).

Το μοντέλο των Aire, Casas, Gettu & Marques δείχνει άμεσα εξαρτώμενο από την τιμή  $f'_{co}$  και  $f_i$  καθώς και από τα πειραματικά αποτελέσματα  $\epsilon_{cc}$ . Δείχνει αρκετά αναξιόπιστο και στην περίπτωση μέτριας και υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ .

Το προσομοίωμα των Benzaid et al. προέκυψε βασιζόμενο σε αποτελέσματα δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP και αντοχή από 29 μέχρι 62 MPa. Ωστόσο η ικανότητα του να προβλεπει επαρκώς την  $f'_{cc}$  και για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP δείχνει να μην επηρεάζεται από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των ινών.

Οι Berna't et al. πρότειναν δύο διαφορετικές εξισώσεις ανάλογα τον τύπο περίσφιγξης (CFRP/ GFRP). Είναι άμεσα εξαρτώμενες από τον συντελεστή  $k_e$  του οποίου η τιμή προσδιορίζεται πειραματικά και αφορά στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Έτσι, αποδίδει επαρκώς σε κάθε περίπτωση- αν και στα δοκίμια υψηλής αντοχής με GFRP περίσφιγξη δείχνουν αδυναμία ακριβή προσδιορισμού της  $f'_{cc}$ .

Οι Spoelstra & Monti πρότειναν ένα μοντέλο υπολογισμού το οποίο βασίστηκε σε δοκίμια αντοχής  $f'_{co}$  από 30 μέχρι 50 MPa. Στην περίπτωση των δοκιμίων με περίσφιγξη CFRP αποδίδει πολύ ικανοποιητικά ανεξαρτήτως της τιμής  $f'_{co}$ , αλλά για τα GFRP εμφανίζει ευαισθησία σε τιμές  $f'_{co} > 50$  MPa. Ακόμη λαμβάνει υπόψη του την τιμή του  $E_{FRP}$  - όχι μόνο μέσω της  $f_i$  όπως τα υπόλοιπα προσομοιώματα- .

Το μοντέλο του Ozbakkaloglu υπολογίστηκε βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα δοκιμίων αντοχής μέχρι 120 MPa, συνεπώς η ικανότητά του δεν επηρεάζεται από τα υψηλής αντοχής δοκίμια. Επίσης λαμβάνει υπόψη την διαφορετική τιμή του  $E_{FRP}$ . Ωστόσο η θεώρηση του συντελεστή  $k_1$  ίσο με 3,20 για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP αποτελεί συντηρητική θεώρηση και καταλήγει σε αποτελέσματα που συγκλίνουν με τα πειραματικά.

Το μοντέλο που προτείνεται από τον EC - 2 είναι ικανοποιητικό καθώς λαμβάνει υπόψη του τη σχέση των τιμών  $f'_i$  και  $f'_{ck}$ , αλλά δεν αναφέρεται ξεχωριστά στις διαφορές των ιδιοτήτων των FRPs παρά παρέχει μόνο μια γενική έκφραση για τον προσδιορισμό της  $f'_{cc\text{προβλεπ}}$  για δοκίμια είτε με περίσφιγξη CFRP είτε με περίσφιγξη GFRP.

Οι εκφράσεις υπολογισμού της  $f'_{cc}$  από τον Girgin βασίστηκαν σε ένα ευρύ πειραματικό δείγμα δοκιμίων με  $f'_{cc}$  από 24 μέχρι 108 MPa και στην τιμή συντελεστών άμεσα εξαρτώμενων από την αντοχή  $f'_{co}$  των δοκιμίων. Συνεπώς, η ικανότητα πρόβλεψης δείχνει να μην επηρεάζεται από την πολύ υψηλή  $f'_{co}$  κάποιων δοκιμίων αφού αποδίδει ικανοποιητικά και στα μέσης και πολύ υψηλής αντοχής ειδικά για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP.

Οι Xiao & Wu εργάστηκαν σε δοκίμια CFRP μόνο και η σχέση που προτείνεται εξήχθη βάσει αυτών των δεδομένων. Για το λόγο αυτόν πιθανόν να μην καλά για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP. Παρ' όλα αυτά, σε κάθε περίπτωση εμφανίζει αδυναμία ικανοποιητικής πρόβλεψης της  $f'_{cc}$  για δοκίμια υψηλών αντοχών  $f'_{co}$ .

Τέλος, το προσομοίωμα του Toutanji βασίζεται μόνο στον λόγο  $f_i/f'_{co}$  και προτείνει μια σχέση υπολογισμού της  $f'_{cc}$  για δοκίμιο οποιουδήποτε τύπου περίσφιγξης. Η ικανότητα πρόβλεψής του δείχνει να επηρεάζεται αρκετά όταν η τιμή του  $E_{FRP}$  μειώνεται, καθώς στα δοκίμια GFRP παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις.

## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται κυρίως σε δύο από τα δώδεκα αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού της περισφιγμένης αντοχής του σκυροδέματος ( $f'_{cc}$ ), αυτά του Ozbakkaloglu (2013) και του Toutanji (1999), με σκοπό την προσπάθεια βελτίωσης τους. Η επιλογή των συγκεκριμένων μοντέλων έγινε βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ειδικότερα, διερευνάται η επιρροή που έχει η αλλαγή της τιμής του συντελεστή  $k_1$  στην εξίσωση του Ozbakkaloglu στο τελικό αποτέλεσμα ανάλογα με το αν πρόκειται για δοκίμιο με περίσφιγξη CFRP ή GFRP καθώς και η δυνατότητα βελτίωσης του μοντέλου που προτάθηκε από τον Toutanji. Αναφορικά με το τελευταίο, το μοντέλο του Toutanji, αν και είναι πολύ απλό στη χρήση του αποδίδει σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP. Το πρόβλημα εμφανίζεται στα δοκίμια υψηλής αντοχής (άνω των 80 MPa) καθώς και στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP. Σημειώνεται ότι το μοντέλο αυτό προήλθε από στατιστική ανάλυση σχετικά λίγων πειραματικών δεδομένων και κυρίως από δοκίμια ενισχυμένα με ανθρακονήματα. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η εξέταση βελτίωσης του, ώστε να αποδίδει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την τιμή της  $f'_{cc}$  για όλα τα δοκίμια ανεξαρτήτως του τύπου περίσφιγξης και της τιμής της αντοχής  $f'_{co}$ .

### 5.1 Μοντέλο Ozbakkaloglu- συντελεστής $k_1$

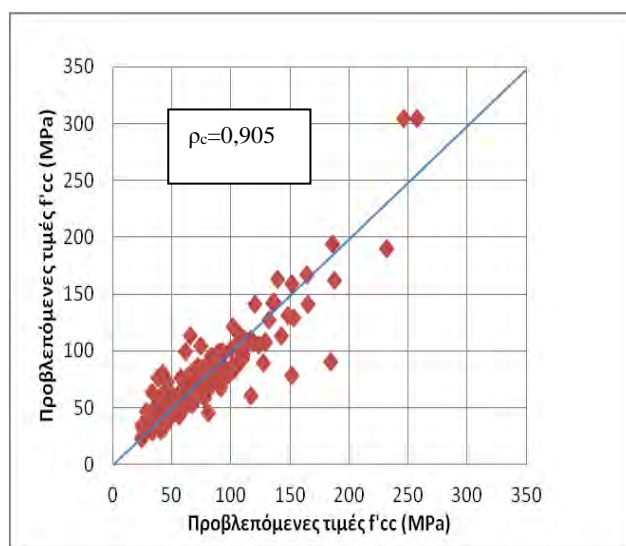
Στο μοντέλο του Ozbakkaloglu, το οποίο βασίστηκε σε μια εκτενή βάση δεδομένων από πειράματα σε κυλίνδρους με περίσφιγξη CFRP και GFRP, γίνονται κάποιες παραδοχές όσον αφορά στην τιμή του συντελεστή ενίσχυσης της αντοχής λόγω περίσφιγξης  $k_1$ . Η τιμή του συντελεστή λήφθηκε ίση με 3,20 για όλα τα δοκίμια, ανεξάρτητα του τύπου περίσφιγξης καθώς ο Ozbakkaloglu (2013) παρατήρησε πως με την εφαρμογή αυτής της τιμής στην τελική σχέση υπολογισμού της  $f'_{cc}$  προέκυπταν συντηρητικά αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, με την αλλαγή της τιμής του  $k_1$  ανάλογα τον τύπο περίσφιγξης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε δοκίμιο παρατηρήθηκε μεγαλύτερη σύγκλιση των πειραματικών και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών της  $f'_{cc}$ .

Η διαφορά των χαρακτηριστικών των τύπων FRP και της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης που προσδίδουν οδήγησε στο διαχωρισμό των δοκιμίων ανάλογα τον τύπο περίσφιγξης και στη δοκιμή διαφορετικής τιμής  $k_1$  από την τιμή 3,20. Συγκεκριμένα ο Ozbakkaloglu δοκίμασε την τιμή 3,67 για τον υπολογισμό της  $f'_{cc}$  σε δοκίμια με συνεχή (χωρίς κενά) περίσφιγξη CFRP και την τιμή 2,49 για τον υπολογισμό της  $f'_{cc}$  σε δοκίμια με συνεχή (χωρίς κενά) περίσφιγξη GFRP. Αυτές οι τιμές αποδείχθηκαν ως αρκετά αντιπροσωπευτικές όσον αφορά στα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο για την τιμή της  $f'_{cc}$ . Ωστόσο, η εφαρμογή των συγκεκριμένων τιμών σε εκτενέστερη βάση δεδομένων κρίνεται απαραίτητη ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους.

### 5.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=3,67$

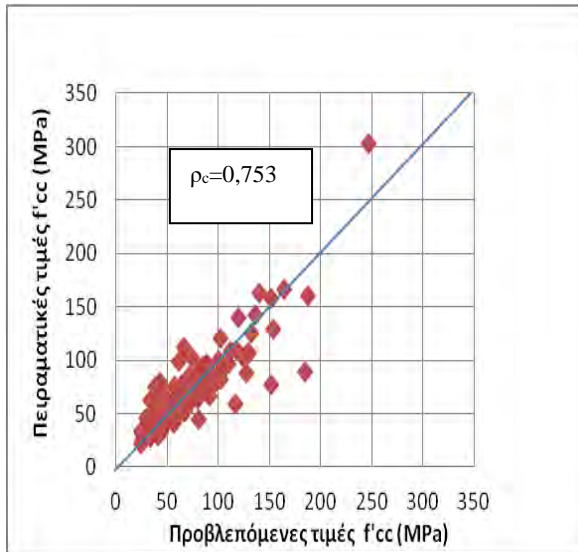
Στο πλαίσιο της εργασίας, αρχικά το προσομοίωμα του Ozbakkaloglu εφαρμόστηκε στη βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας την τιμή 3,20 για όλα τα δοκίμια και τα διαγράμματα πειραματικών και αναλυτικών τιμών για την  $f'_{cc}$  καθώς και οι συντελεστές συσχέτισης Spearman παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Στη συνέχεια τα διαγράμματα των σχημάτων 5.1.1.1, 5.1.1.2, 5.1.1.3 και 5.1.1.4 δείχνουν τη σύγκλιση των τιμών που προέκυψαν αναλυτικά με αυτές που προέκυψαν πειραματικά για τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP των οποίων η αντοχή  $f'_{co}$  είναι από 0 μέχρι 112,6 MPa, από 0 μέχρι 50 MPa, από 0 μέχρι 80 MPa και μεταξύ των τιμών 50 και 112,6 MPa αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την τιμή 3,67 για το συντελεστή  $k_1$  στο αναλυτικό μοντέλο προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  του Ozbakkaloglu.



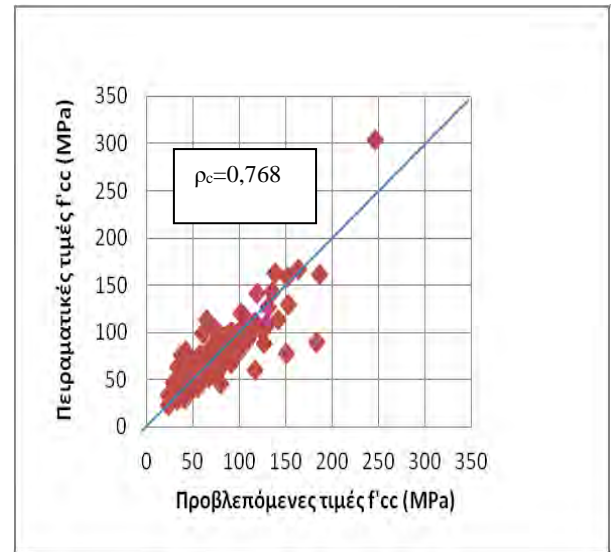
Σχ. 5.1.1.1

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 112,6 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,67$



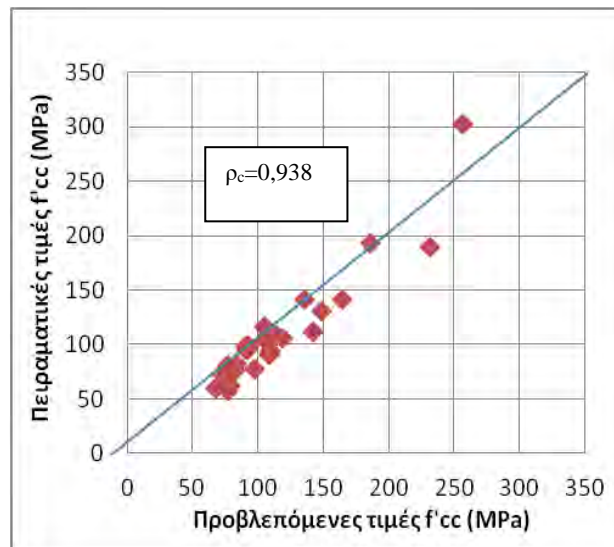
Σχ. 5.1.1.2

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 50 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,67$



Σχ. 5.1.1.3

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 80 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,67$



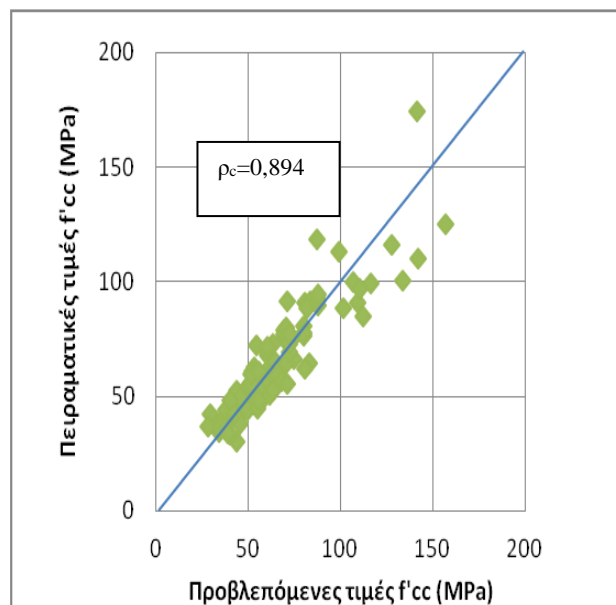
Σχ. 5.1.1.4

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 112,6 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,67$



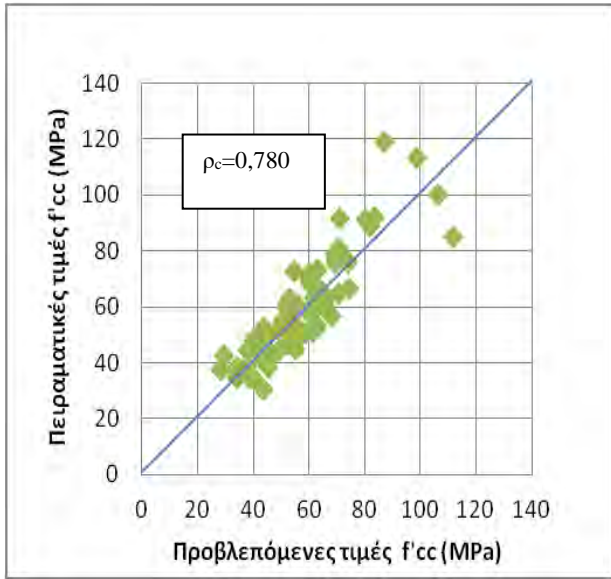
### 5.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=2,49$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα των σχημάτων 5.1.2.1, 5.1.2.2, 5.1.2.3 και 5.1.2.4. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν τη σύγκλιση των τιμών που προέκυψαν αναλυτικά με αυτές που προέκυψαν πειραματικά για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP των οποίων η αντοχή είναι από 0 μέχρι 107,8 MPa, από 0 μέχρι 50 MPa, από 0 μέχρι 80 MPa και μεταξύ των τιμών 50 με 107,8 MPa αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την τιμή 2,49 για το συντελεστή  $k_1$  στο αναλυτικό μοντέλο προσδιορισμού της  $f'_{cc}$  του Ozbakkaloglu.



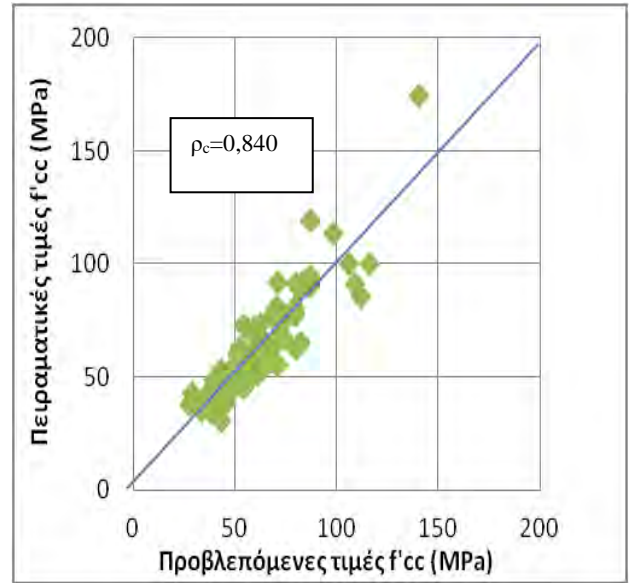
Σχ. 5.1.2.1

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 107,8 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=2,49$



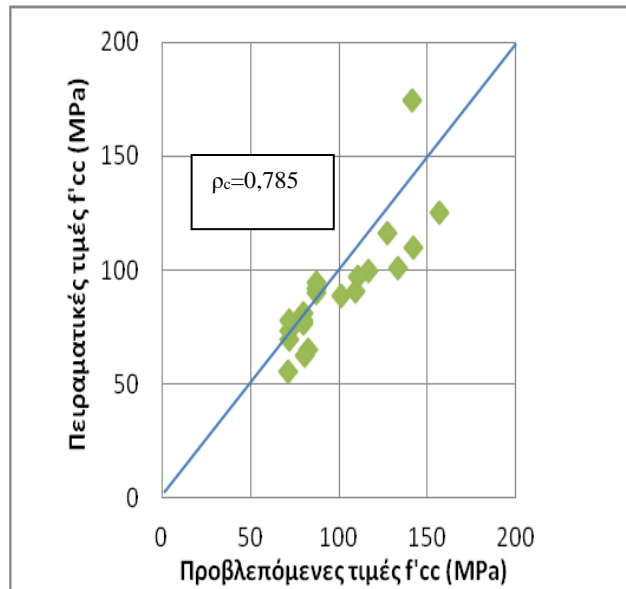
Σχ. 5.1.2.2

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 50 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=2,49$



Σχ. 5.1.2.3

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 80 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=2,49$

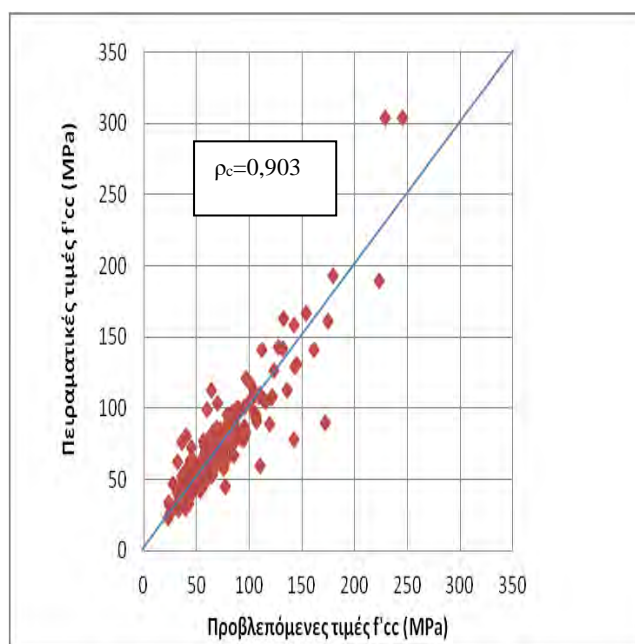


Σχ. 5.1.2.4

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 107,8 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=2,49$

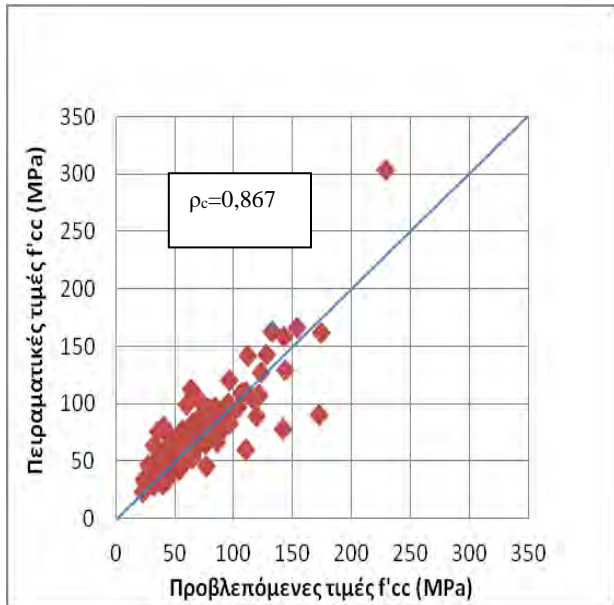
### 5.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ $k_1=3,30$

Στη συνέχεια, τα σχήματα 5.1.3.1 μέχρι 5.1.3.8 αποτελούν τα αποτελέσματα σύγκλισης μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών της  $f'_{cc}$  από την εφαρμογή της τιμής 3,30 ως  $k_1$  στην εξίσωση του Ozbakkaloglu για δοκίμια CFRP και GFRP, ώστε να εξετασθεί η επιρροή της αύξησης της τιμής του  $k_1$  από 3,20 που προτάθηκε από τον Ozbakkaloglu σε 3,30 στην συμπεριφορά του μοντέλου.



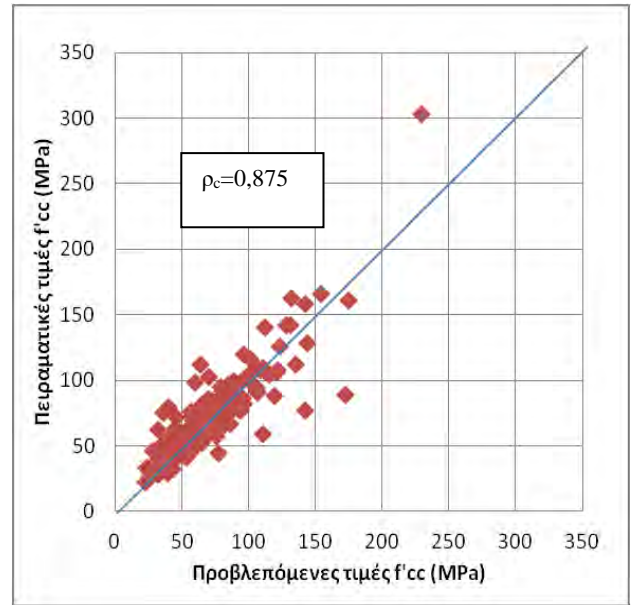
Σχ. 5.1.3.1

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 112,6 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



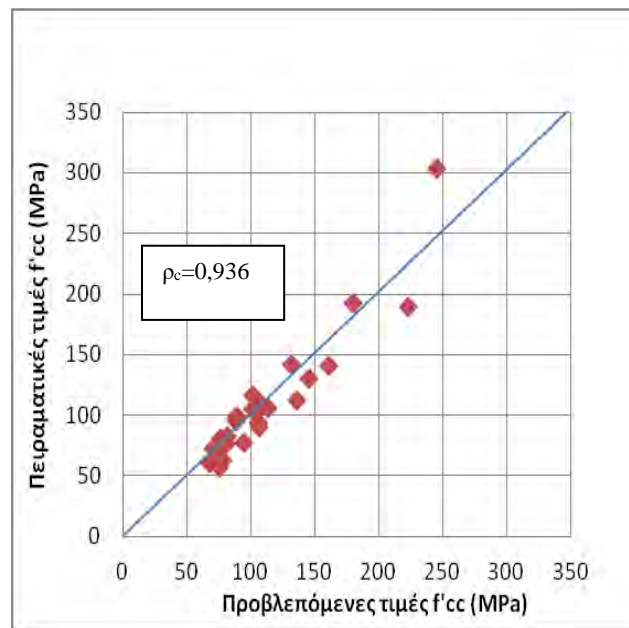
Σχ. 5.1.3.2

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 50 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



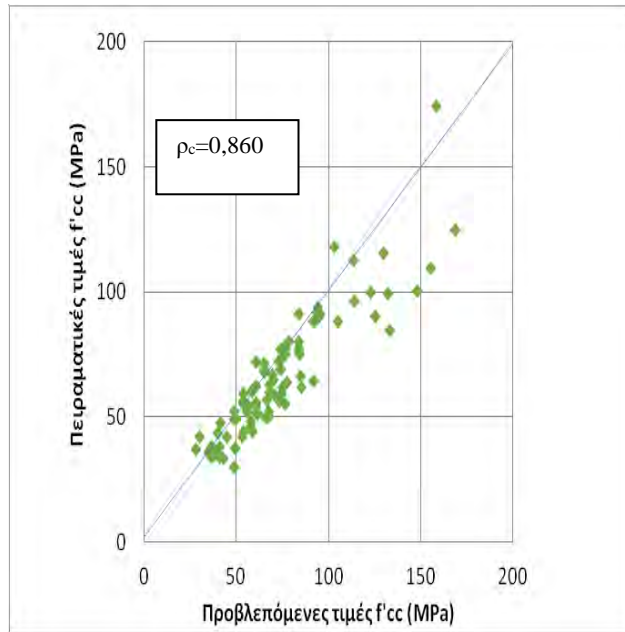
Σχ. 5.1.3.3

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 80 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



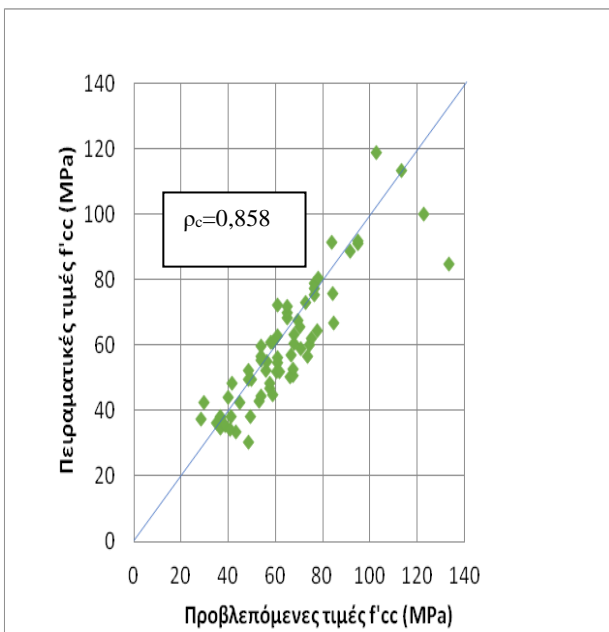
Σχ. 5.1.3.4

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια CFRP με  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 112,6 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



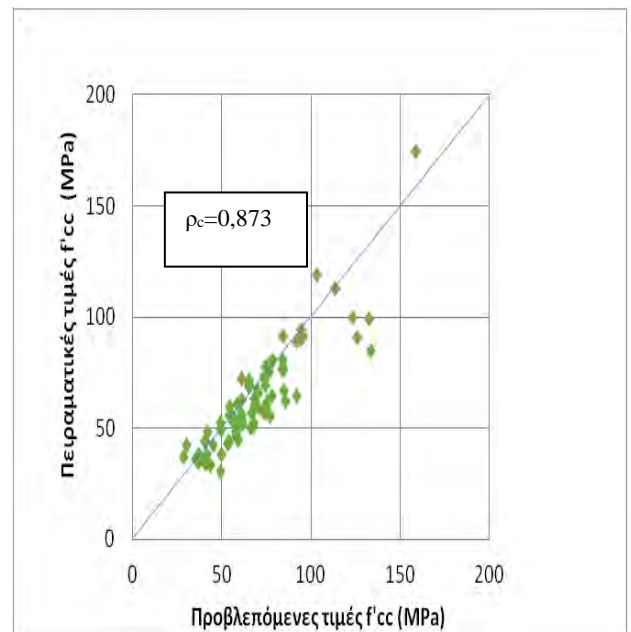
Σχ. 5.1.3.5

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 107,8 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



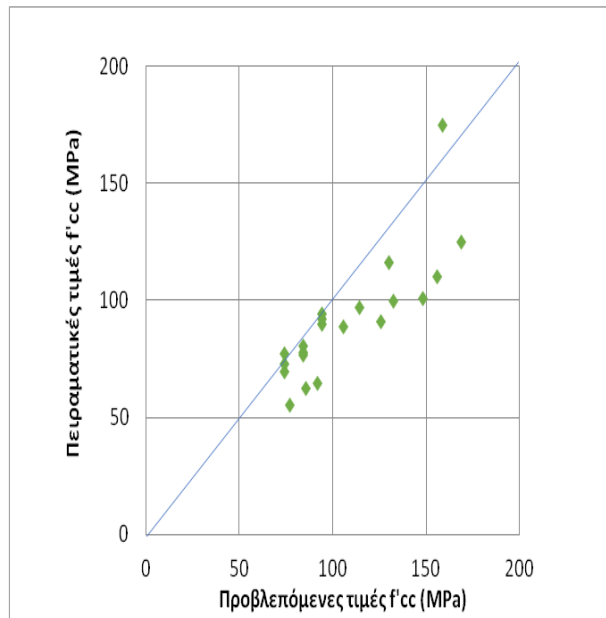
Σχ. 5.1.3.6

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 50 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



Σχ. 5.1.3.7

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 0 μέχρι 80 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$



Σχ. 5.1.3.8

Προβλεπόμενες - πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$  για δοκίμια GFRP με  $f'_{co}$  από 50 μέχρι 107,8 MPa με χρήση του συντελεστή  $k_1=3,30$

Όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP, ανεξάρτητα από την τιμή της αντοχής  $f'_{co}$ , η τιμή  $k_1$  για την οποία τα αναλυτικά αποτελέσματα  $f'_{cc}$  του μοντέλου προσεγγίζουν περισσότερο τα πειραματικά είναι η 3,30 (σχ. 5.1.3.1, 5.1.3.2, 5.1.3.3, και 5.1.3.4). Πράγματι, με τη χρήση του συντελεστή  $k_1$  ίσο με 3,30 προκύπτουν αποτελέσματα πολύ αντιπροσωπευτικά, συγκριτικά με τη χρήση της τιμής 3,67, ειδικά αν κρίνουμε από το γεγονός ότι για μέτριες αντοχές  $f'_{co}$  οι προβλεπόμενες τιμές αποκλίνουν αισθητά από τις πειραματικές όπως δείχνουν και οι συντελεστές Lin's (0,753 και 0,768 στα σχ. 5.1.1.2, σχ. 5.1.1.3 αντίστοιχα). Παράλληλα, τα αντίστοιχα γραφήματα για τα οποία ο συντελεστής  $k_1$  θεωρήθηκε ίσος με 3,20 (Κεφ.4, σχ. 4.1.1.8, 4.1.2.8, και 4.1.3.8) εμφανίζουν κάποιες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών, όχι ωστόσο ιδιαίτερα σημαντικές, με τις αναλυτικές τιμές να προκύπτουν μεγαλύτερες. Ωστόσο, στην περίπτωση δοκιμίων με υψηλή  $f'_{co}$  (άνω των 50 MPa) η τιμή του συντελεστή  $k_1$  επηρεάζει ελάχιστα το αποτέλεσμα καθώς το μοντέλο αποδίδει άριστα. Οι αντίστοιχες τιμές  $\rho_c$  για εφαρμογή της τιμής 3,67, 3,20 και 3,30 ως  $k_1$  είναι 0,938, 0,934 και 0,936 αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά, σε γενικές γραμμές το μοντέλο παρουσιάζει την πιο ικανοποιητική εικόνα όταν η τιμή  $k_1$  θεωρηθεί ίση με 3,30.

Σχετικά με τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, παρατηρείται πως η χρήση της τιμής 3,20 καταλήγει σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς στο αντίστοιχο διάγραμμα (σχ. 4.2.1.8) εμφανίζονται αρκετές τιμές να συγκλίνουν με τις αντίστοιχες πειραματικές. Από την άλλη πλευρά, η θεώρηση του συντελεστή  $k_1$  ίσο με 2,49 παρέχει λιγότερο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα στα σχ. 5.1.2.2 και σχ. 5.1.2.3) για  $f'_{co}$  μέχρι 50 MPa και μέχρι 80 MPa αντίστοιχα, ενώ για την περίπτωση δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP και  $f'_{co}$  ανώτερη των 50 MPa η τιμή 2,49 ως  $k_1$  κρίνεται καταλληλότερη (σχ. 5.1.2.4).

Αναφορικά με τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP, η εφαρμογή της τιμής 3,30 δεν θεωρείται τόσο ικανοποιητική όσο η τιμή 2,49 στην περίπτωση **υψηλής  $f'_{co}$** , αφού στα αντίστοιχα διαγράμματα είναι εμφανής η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών όταν πρόκειται για την εφαρμογή της τιμής 3,30 έναντι της τιμής 2,49. (σχ. 5.1.3.8 και σχ. 5.1.2.4 αντίστοιχα). Παρατηρείται μάλιστα ότι όσο αυξάνεται η τιμή του  $k_1$  τόσο περισσότερες αποκλίσεις παρατηρούνται γεγονός που υποδηλώνει ότι για τα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP η χρήση τιμών μικρότερων του 3,20 (όπως η 2,49 που προτάθηκε από τον Ozbakkaloglu) για το συντελεστή  $k_1$  κρίνεται απαραίτητη.

Στον Πίνακα 5.1.1 αναφέρονται οι τιμές του συντελεστή  $L_{in}$  συγκριτικά για κάθε περίπτωση συντελεστή  $k_1$  για τα δοκίμια με περίσφιξη CFRP και GFRP αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.1 Τιμές του συντελεστή  $L_{in}$  συγκριτικά για κάθε περίπτωση συντελεστή  $k_1$  για τα δοκίμια με περίσφιξη CFRP/GFRP

<b><math>k_1</math></b>	<b>3,30</b>	<b>3,20</b>	<b>3,67/2,49</b>
CFRP (από 0 έως 112,6 MPa)	0,903	0,900	0,905
CFRP (από 0 έως 50 MPa)	0,867	0,863	0,753
CFRP (από 0 έως 80 MPa)	0,875	0,872	0,768
CFRP (από 50 έως 112,6 MPa)	0,936	0,934	0,938
GFRP (από 0 έως 107,8 MPa)	0,86	0,869	0,894
GFRP (από 0 έως 50 MPa)	0,858	0,867	0,780
GFRP (από 0 έως 80 MPa)	0,873	0,881	0,840
GFRP (από 50 έως 107,8 MPa)	0,700	0,713	0,785



#### 5.1.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο στάδιο αυτό, θεωρήθηκε σκόπιμο να υπολογιστούν οι συντελεστές Spearman για δοκίμια CFRP/GFRP των παραπάνω αντοχών  $f'_{co}$  ανάλογα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την εφαρμογή των τιμών 3,20, 3,30 και 3,67 ή 2,49 αντίστοιχα με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η αποτελεσματικότητα των συντελεστών. Στους πίνακες 5.1.4.1 έως 5.1.4.8 περιέχονται οι αντίστοιχες τιμές.

Πίνακας 5.1.4.1

Συντελεστές Spearman για δοκίμια περισφιγμένα CFRP

	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=3,67$	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=3,20$	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=3,30$
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια CFRP ( $0 < f'_{co} < 112,6$ MPa)	0,88	0,88	0,882
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια CFRP ( $0 < f'_{co} < 50$ MPa)	0,855	0,855	0,856
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια CFRP ( $0 < f'_{co} < 80$ MPa)	0,872	0,873	0,874
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια CFRP ( $50 < f'_{co} < 112,6$ MPa)	0,884	0,888	0,888

Πίνακας 5.1.4.2

Συντελεστές Spearman για δοκίμια περισφιγμένα με GFRP

	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=2,49$	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=3,20$	Αναλυτική τιμή $f'_{cc}$ με $k_1=3,30$
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ ( $0 < f'_{co} < 107,8$ MPa)	0,918	0,924	0,924
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια GFRP ( $0 < f'_{co} < 80$ MPa)	0,903	0,910	0,910
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια GFRP ( $0 < f'_{co} < 50$ MPa)	0,888	0,898	0,899
Πειραματική τιμή $f'_{cc}$ για δοκίμια GFRP ( $50 < f'_{co} < 107,8$ MPa)	0,905	0,884	0,884

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των συντελεστών Spearman σύμφωνα με τους πίνακες 5.1.4.1 μέχρι 5.1.4.2 προκύπτει το συμπέρασμα ότι στα δοκίμια GFRP η αλλαγή της τιμής του  $k_1$  από 3,20 σε 3,30 δεν προκαλεί ιδιαίτερη μεταβολή στη συσχέτιση μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών. Από την άλλη, με την εφαρμογή της τιμής 2,49 ως  $k_1$  η συσχέτιση μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών μειώνεται. Εξαιρέση σε αυτό αποτελεί η τελευταία περίπτωση, αυτή των δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP και αντοχή  $f'_{co}$  μεταξύ 50 και 107,8 MPa (Πιν. 5.1.4.8), στην οποία με την εφαρμογή της τιμής 2,49 στην εξίσωση του Ozbakaloglu η συσχέτιση των αναλυτικών και πειραματικών τιμών αυξάνεται σε ποσοστό 90,5% – μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα με την εφαρμογή των τιμών 3,20 και 3,30 ως  $k_1$  - . Συνεπώς, στην περίπτωση δοκιμίων με περίσφιγξη GFRP και υψηλή αντοχή  $f'_{co}$  η εφαρμογή της τιμής 2,49 ως  $k_1$  καταλήγει σε μεγαλύτερη συσχέτιση των δύο βασικών μεταβλητών (αναλυτικές και πειραματικές τιμές  $f'_{cc}$ ).

Όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP τιμή 3,67 δεν βελτιώνει την συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Με την εφαρμογή της τιμής 3,30 από την άλλη φαίνεται μικρή βελτίωση χωρίς ωστόσο ιδιαίτερη διαφορά από τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την εφαρμογή των τιμών 3,67 και 3,20.

## 5.2 Ανάλυση αναλυτικού προσομοιώματος Toutanji (1999) και προσπάθεια βελτίωσής του

Το προσομοίωμα του Toutanji (1999) προέκυψε έπειτα από μια πειραματική διαδικασία κατά την οποία ο Toutanji κατέληξε σε μια τελική εξίσωση υπολογισμού της  $f'_{cc}$ . Με βάση το άρθρο του Toutanji (1999) σχεδιάστηκε ένα διάγραμμα  $k_{1eff} - f_i/f'_{co}$  όπου  $k_{1eff}$  ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) για τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων που διέθετε.

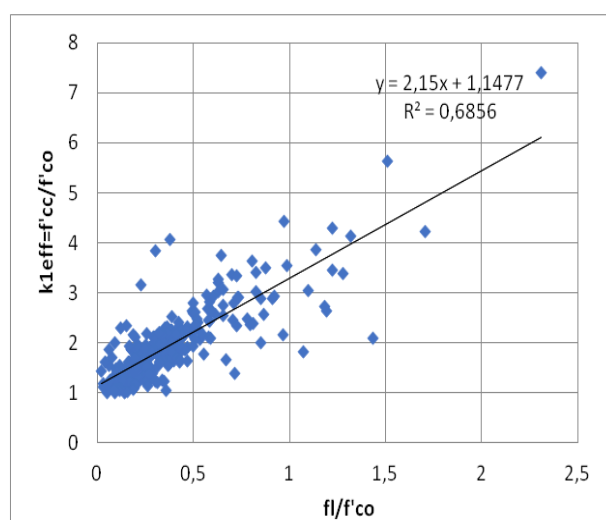
Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν τρία διαγράμματα  $k_{1eff} - f_i/f'_{co}$ . Το πρώτο αφορούσε όλα τα δοκίμια ανεξαρτήτου τύπου περίσφιγξης και τα άλλα δύο τα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και GFRP. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε μια γραμμική εξίσωση που συσχέτιζε τις δύο μεταβλητές των γραφημάτων. Δεδομένου ότι ο συντελεστής αποδοτικότητας  $k_{1eff}$  είναι ίσος με τον λόγο της αντοχής του σκυροδέματος μετά την περίσφιγξη ( $f'_{cc}$ ) προς την αντοχή του σκυροδέματος πριν την περίσφιγξη ( $f'_{co}$ ), προκύπτει ουσιαστικά μια εξίσωση που συσχετίζει την αρχική με την τελική αντοχή του δοκιμίου. Συμπερασματικά, προέκυψαν τρεις εξισώσεις (μία από κάθε διάγραμμα). Η πρώτη είναι μια **γενική εξίσωση** που μπορεί να έχει εφαρμογή σε κάθε δοκίμιο ανεξαρτήτως του τύπου περίσφιγξης που διαθέτει. Οι επόμενες δύο εξισώσεις είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό της αντοχής  $f'_{cc}$  των δοκιμίων που περισιφίγονται με CFRP και GFRP ξεχωριστά.

Όπως είναι φανερό παρακάτω, κάθε εξίσωση συσχετίζει τις αντοχές  $f'_{cc}$ ,  $f'_{co}$  και την πλευρική τάση  $f_i$  με έναν συγκεκριμένο βαθμό αξιοπιστίας (R) ο οποίος όσο πιο

κοντά στη μονάδα βρίσκεται τόσο η εκάστοτε εξίσωση θεωρείται ότι αποδίδει περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα. Στη δική μας περίπτωση σε κάθε εξίσωση ο βαθμός αξιοπιστίας ξεπερνά το 0,82. Συνεπώς η αξιοπιστία μπορεί να θεωρηθεί ως πολύ καλή - ειδικά αν συγκριθεί με την αντίστοιχη τιμή στη μελέτη του Toutanji (1999), η οποία ήταν ίση με 0,80.

### 5.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ CFRP ΚΑΙ GFRP ΔΟΚΙΜΙΑ

Στην υποενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης για τον προσδιορισμό της αντοχής κάθε περισφιγμένου δοκιμίου ανεξάρτητα αν αυτό έχει περισφιχθεί με μανδύα CFRP ή GFRP. Για το λόγο αυτόν σχεδιάστηκε το διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δοκίμια της βάσης δεδομένων (Σχ. 5.2.1.1).

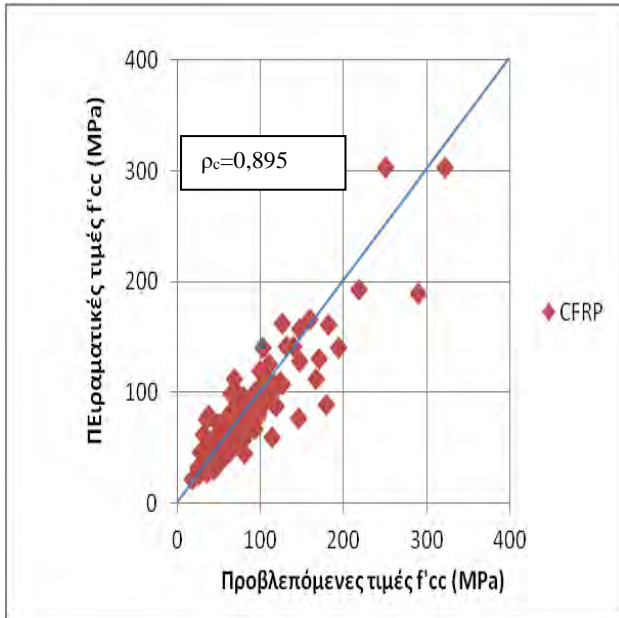


Σχ.5.2.1.1 Διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  για δοκίμια με περίσφιξη CFRP/GFRP

Η εξίσωση που προέκυψε για τον υπολογισμό της περισφιγμένης αντοχής του σκυροδέματος και περιγράφει με αξιοπιστία 82,8 % την τάση του διαγράμματος του σχήματος 5.2.1.1 είναι η ακόλουθη:

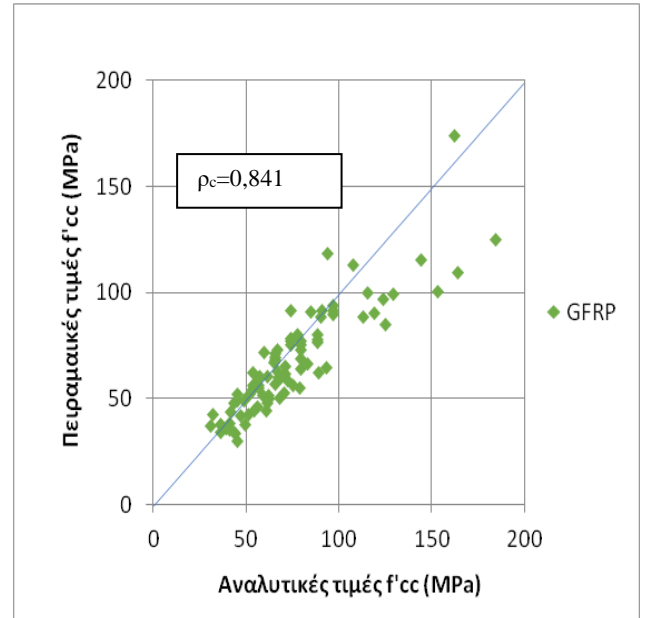
$$f'_{cc} = f'_{co} * \left\{ 2,15 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) + 1,1477 \right\} \quad \text{Εξ. 5.2.1.1}$$

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης εξίσωσης στη βάση δεδομένων που διαθέτουμε προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα αναλυτικών προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια CFRP και GFRP (Σχ. 5.2.1.2 και σχ. 5.2.1.3 αντίστοιχα).



Σχ.5.2.1.2

Διάγραμμα αναλυτικά προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP με βάση την εξίσωση 5.2.1.1

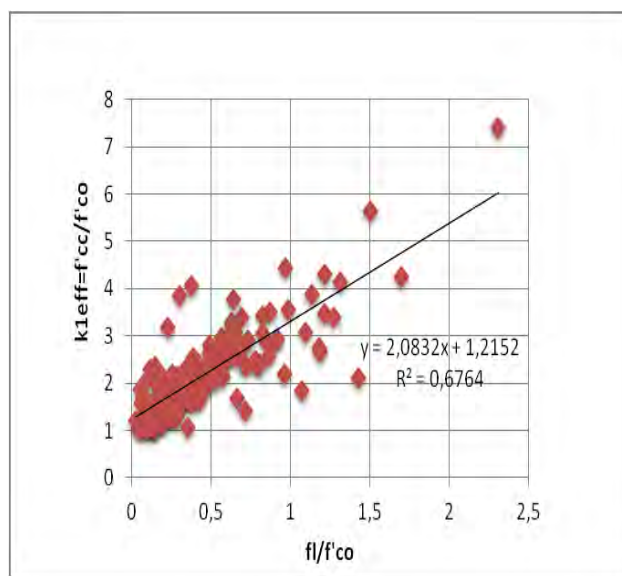


Σχ.5.2.1.3

Διάγραμμα αναλυτικά προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP με βάση την εξίσωση 5.2.1.1

## 5.2.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ CFRP ΔΟΚΙΜΙΑ

Στην υποενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης για τον προσδιορισμό της αντοχής κάθε περισφιγμένου δοκιμίου που έχει περισφιχθεί με μανδύα CFRP. Για το λόγο αυτόν σχεδιάστηκε το διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δοκίμια της βάσης δεδομένων με περίσφιξη CFRP (Σχ. 5.2.2.1).



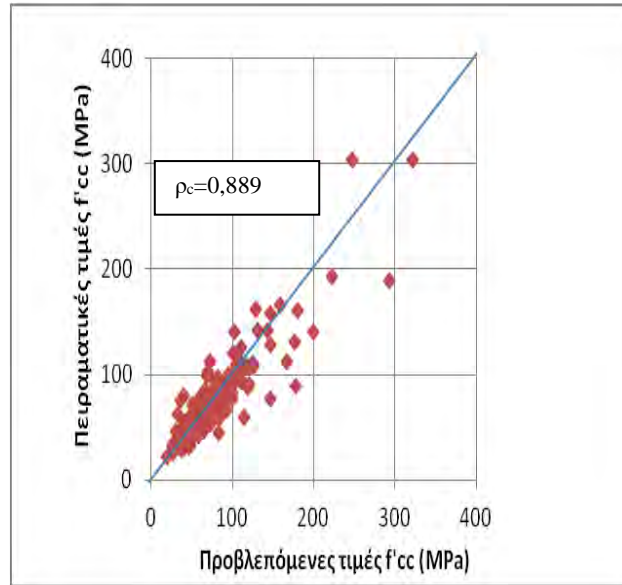
Σχ.5.2.2.1

Διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  για δοκίμια με περίσφιξη CFRP

Η εξίσωση που προέκυψε για τον υπολογισμό της περισφιγμένης αντοχής του σκυροδέματος και περιγράφει με αξιοπιστία 82,3 % την τάση του διαγράμματος του σχήματος 5.2.2.1 είναι η ακόλουθη:

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left\{ 2,0832 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) + 1,2152 \right\} \quad \text{Εξ. 5.2.2.1}$$

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης εξίσωσης στη βάση δεδομένων που διαθέτουμε προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα αναλυτικών προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια CFRP (Σχ. 5.2.2.2).

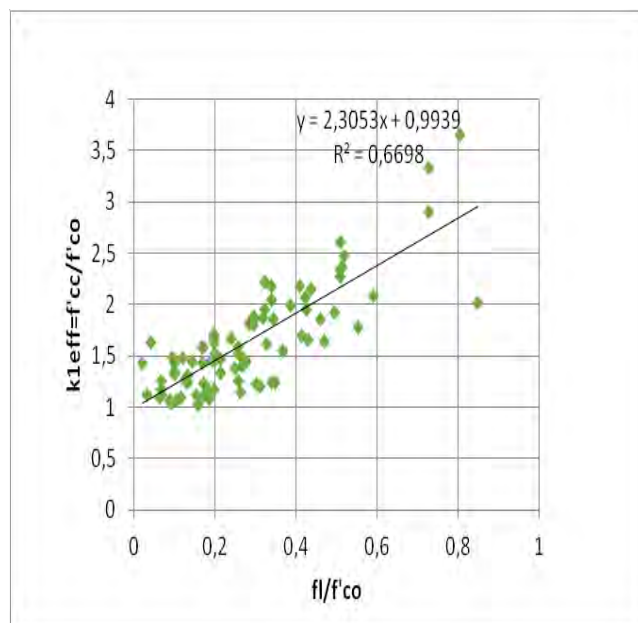


Σχ.5.2.2.2

Διάγραμμα αναλυτικά προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP με βάση την εξίσωση 5.2.2.1

### 5.2.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $f'_{cc}$ ΓΙΑ GFRP ΔΟΚΙΜΙΑ

Στην υποενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης για τον προσδιορισμό της αντοχής κάθε περισφιγμένου δοκιμίου που έχει περισφιχθεί με μανδύα GFRP. Για το λόγο αυτόν σχεδιάστηκε το διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δοκίμια της βάσης δεδομένων με περίσφιγξη GFRP (Σχ. 5.2.3.1).



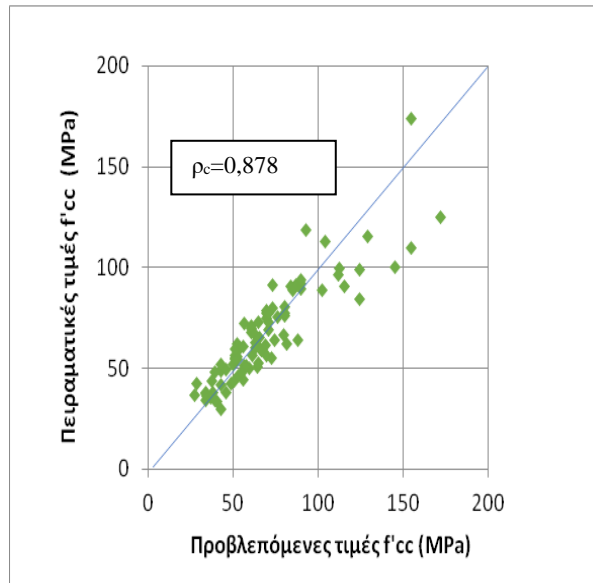
Σχ.5.2.3.1

Διάγραμμα  $k_{1eff} - f_l/f'_{co}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP

Η εξίσωση που προέκυψε για τον υπολογισμό της περισφιγμένης αντοχής του σκυροδέματος και περιγράφει με αξιοπιστία 81,8 % την τάση του διαγράμματος του σχήματος 5.2.3.1 είναι η ακόλουθη:

$$f'_{cc} = f'_{co} * \left\{ 2,3053 * \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) + 0,9939 \right\} \quad \text{Εξ. 5.2.3.1}$$

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης εξίσωσης στη βάση δεδομένων που διαθέτουμε προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα αναλυτικών προβλεπόμενων - πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για τα δοκίμια GFRP (Σχ. 5.2.3.2).



Σχ.5.2.3.2

Διάγραμμα αναλυτικά προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιγξη GFRP με βάση την εξίσωση 5.2.3.1

Σύμφωνα με τα σχήματα τα οποία προέκυψαν με την εφαρμογή της γενικής εξίσωσης 5.2.1.1 στα δεδομένα (σχ. 5.2.1.2 και σχ. 5.2.1.3) προκύπτει ότι οι αναλυτικές τιμές  $f'_{cc}$  προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τις αντίστοιχες πειραματικές όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP (σχ.5.2.1.2). Το ίδιο ικανοποιητική εικόνα παρουσιάζει και το διάγραμμα που προέκυψε με την εφαρμογή της εξίσωσης 5.2.2.1 στα δοκίμια με περίσφιγξη CFRP (σχ. 5.2.2.2) (Τιμές  $\rho_c$  ίσες με 0,895 και 0,889 αντίστοιχα). Ωστόσο, είτε με την εφαρμογή της εξίσωσης 5.2.1.1 είτε της εξίσωσης 5.2.2.1 τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζουν για κάποια δοκίμια CFRP μικρή απόκλιση μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$ . Τα συγκεκριμένα δοκίμια χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή αντοχή  $f'_{co}$  (άνω των 90 MPa), συνεπώς η ικανότητα πρόβλεψης των τιμών  $f'_{cc}$  μειώνεται για δοκίμια με περίσφιγξη CFRP και πολύ υψηλή αντοχή  $f'_{co}$ .

Όσον αφορά στα δοκίμια με περίσφιγξη GFRP η εφαρμογή της εξίσωσης 5.2.3.1 καταλήγει σε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα, χωρίς ωστόσο να απουσιάζουν αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο προτεινόμενο μοντέλο υπολογισμού δείχνει υψηλή ευαισθησία στην πολύ υψηλή τιμή της  $f'_{co}$ , αφού για τα δοκίμια με  $f'_{co}$  ανώτερη των 80 MPa παρατηρούνται αρκετές αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών  $f'_{cc}$ , με τις αναλυτικές να είναι μεγαλύτερες των πειραματικών (υπερεκτίμηση της δράσης της περίσφιγξης) (σχ. 5.2.3.2). Παρ' όλα αυτά η εικόνα που παρουσιάζει είναι σαφώς βελτιωμένη σε σχέση με αυτήν του Toutanji (Κεφ. 4,



σχ. 4.2.1.12), εμφανίζοντας ιδιαίτερα χαμηλή τιμή  $\rho_c$  ίση με 0,641 ενώ η αντίστοιχη στο βελτιωμένο μοντέλο είναι ίση με 0,878 (σχ. 5.2.3.2).

#### 5.2.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο σημείο αυτό, κρίθηκε σκόπιμο να προσδιορισθεί ο βαθμός συσχέτισης των μεταβλητών  $f'_{co}$  και  $f'_{cc}$  τόσο για τη γενική περίπτωση δοκιμίων CFRP και GFRP γενικά, όσο και για την περίπτωση μέσης ή υψηλής/πολύ υψηλής αντοχής  $f'_{co}$  με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των προτεινόμενων εξισώσεων 5.2.2.1 και 5.2.3.1 καθώς και αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης του Toutanji.

Πίνακας 5.2.4.1

Συντελεστές Spearman για δοκίμια περισφιγμένα με CFRP για το βελτιωμένο μοντέλο

Δοκίμια με περισφιγξη CFRP	Συντελεστής Spearman (Μοντέλο Toutanji, 1999)	Συντελεστής Spearman (βελτίωση μοντέλου Toutanji - εξίσωση 5.2.2.1)
CFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 112,6 MPa)	0,876	0,880
CFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 50 MPa)	0,848	0,850
CFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 80 MPa)	0,868	0,868
CFRP ( $f'_{co}$ από 50 μέχρι 112,6 MPa)	0,87	0,900

Πίνακας 5.2.4.2

Συντελεστές Spearman για δοκίμια περισφιγμένα με GFRP για το βελτιωμένο μοντέλο

Δοκίμια με περισφιγξη GFRP	Συντελεστής Spearman (Μοντέλο Toutanji, 1999)	Συντελεστής Spearman (βελτίωση μοντέλου Toutanji - εξίσωση 5.2.2.1)
GFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 107,8MPa)	0,910	0,922
GFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 50 MPa)	0,890	0,89
GFRP ( $f'_{co}$ από 0 μέχρι 80 MPa)	0,893	0,893
GFRP ( $f'_{co}$ από 50 μέχρι 107,8 MPa)	0,837	0,909

Παρατηρείται ότι με τη χρήση διαφορετικής εξίσωσης από αυτήν που προτείνει ο Toutanji (Toutanji, 1999), (εξ. 5.2.3.1) στα δοκίμια GFRP υπάρχει υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ αναλυτικά προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών. Συγκεκριμένα, για δοκίμια GFRP αντοχής  $f'_{co}$  άνω των 80 MPa για τα οποία το προσομοίωμα του Toutanji δείχνει να μην αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα, δείχνουν να βελτιώνονται και να προσεγγίζουν περισσότερο τα αντίστοιχα πειραματικά αν χρησιμοποιηθεί η προτεινόμενη εξίσωση 5.2.3.1. Δεδομένου λοιπόν ότι ο Toutanji στην εξίσωση που προτείνει χρησιμοποιεί μεγαλύτερο πολλαπλασιαστή στον όρο  $f_i/f'_{co}$  (1,1926 φορές μεγαλύτερο) συγκριτικά με αυτόν της εξίσωσης 5.2.3.1 δείχνει να υπερεκτιμά αρκετά τη συνεισφορά της περισφιγξης καταλήγοντας σε αποτελέσματα αρκετά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα πειραματικά.

Συμπερασματικά, η ικανότητα του μοντέλου του Toutanji συγκρινόμενη με αυτή του βελτιωμένου προσομοιώματος γίνεται αντιληπτή αν συγκριθούν οι τιμές  $\rho_c$  για περίπτωση δοκιμίων με περισφιξη CFRP και GFRP αντίστοιχα. (Πίνακας 5.2.4.3)

Πίνακας 5.2.4.3

	Toutanji (1999)	Βελτιωμένο μοντέλο με βάση τις εξ. 5.2.2.1 και 5.2.3.1
CFRP (από 0 έως 112,6 MPa)	0,747	0,889
GFRP (από 0 έως 107,8 MPa)	0,641	0,878

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα και το σχολιασμό της παρούσας εργασίας.

- Το μοντέλο του **Girgin** είναι το πιο αντιπροσωπευτικό για δοκίμια με περίσφιξη GFRP, ωστόσο είναι ευαίσθητο στην αύξηση της  $f'_{co}$  των δοκιμίων.
- Τα αναλυτικά προσομοιώματα που προτείνονται από τους **Spoelstra & Monti, Ozbakkaloglu & Lim** και **EC – 2** δείχνουν τα πιο αντιπροσωπευτικά για την περίπτωση δοκιμίων CFRP χωρίς να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητά τους για χαμηλές και υψηλές τιμές  $f'_{co}$  των δοκιμίων.
- Το προσομοίωμα των **Benzaid et al.** είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό της  $f'_{cc}$  σε δοκίμια CFRP και GFRP υψηλής αντοχής  $f'_{co}$ .
- Το προσομοίωμα των **Touhari & Mitiche - Kettab** αποδίδει επαρκώς τις τιμές της  $f'_{cc}$  για δοκίμια με περίσφιξη GFRP και  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa. Η αύξηση της  $f'_{co}$  άνω των 80 MPa επηρεάζει αρνητικά κατά πολύ την ικανότητα του μοντέλου.
- Η αποδοτικότητα των προσομοιωμάτων των **Spoelstra & Monti** και **Ozbakkaloglu & Lim** μειώνεται για υψηλής αντοχής ( $f'_{co}$ ) δοκίμια με περίσφιξη GFRP.
- Η αποδοτικότητα του μοντέλου του **Toutanji** δείχνει πολύ ευαίσθητη στις υψηλές τιμές  $f'_{co}$  για δοκίμια CFRP και GFRP.
- Η τιμή του συντελεστή **k<sub>1</sub>** στο μοντέλο του Ozbakkaloglu επηρεάζει ελάχιστα την απόδοσή του όσον αφορά στα δοκίμια υψηλής αντοχής με περίσφιξη CFRP.
- Η τιμή του συντελεστή **k<sub>1</sub>** επηρεάζεται εμφανώς από την απερίσφικτη αντοχή ( $f'_{co}$ ) των δοκιμίων με περίσφιξη GFRP, για τα οποία προτείνεται η χρήση της τιμής **k<sub>1</sub>=2,49** για την περίπτωση που η τιμή της αντοχής  $f'_{co}$  ξεπερνά τα 50 MPa, και η τιμή **k<sub>1</sub>=3,20** για αντοχή  $f'_{co}$  μικρότερη των 50 MPa.
- Η χρήση της προτεινόμενης εξίσωσης (Εξ. 5.2.2.1, Κεφ. 5) για τα δοκίμια CFRP εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα και συνίσταται για τον προσδιορισμό της  $f'_{cc}$  στα δοκίμια CFRP μέσης και υψηλής αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι 90 MPa.
- Η χρήση της προτεινόμενης εξίσωσης (Εξ. 5.2.3.1, Κεφ. 5) για τα δοκίμια GFRP εμφανίζει σαφώς βελτιωμένα αποτελέσματα από αυτά του Toutanji και συνίσταται για τον προσδιορισμό της  $f'_{cc}$  στα δοκίμια GFRP μέσης και υψηλής αντοχής  $f'_{co}$  μέχρι 80 MPa.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη βιβλιογραφία

Abdelrahman, K., and El-Hacha, R., 2012, "Behavior of Large-Scale Concrete Columns Wrapped with CFRP and SFRP Sheets," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 16, No. 4, pp. 430-439.

Almusallam, T. H., 2007, "Behavior of Normal and High-Strength Concrete Cylinders Confined with E-Glass/Epoxy Composite Laminates," *Composites Part B: Engineering*, V. 38, No. 5-6, pp. 629-639.

Benzaid, R.; Mesbah, H.; Chikh, N. FRP-confined concrete cylinders: Axial compression experiments and strength model. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2010, 29, 2469–2488.

Berna ´t Csuka and La ´szlo ´ P Kolla ´r (2010). FRP-confined circular concrete columns subjected to concentric loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.

Bullo, S., 2003, "Experimental Study of the Effects of the Ultimate Strain of Fiber Reinforced Plastic Jackets on the Behavior of Confined Concrete," *Proceedings of the International Conference on Composites in Construction*, Cosenza, Italy, pp. 465-470.

Carey, S. A., and Harries, K. A. (2005). Axial Behavior and Modeling of Confined Small-, Medium-, and Large-Scale Circular Sections with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Jackets. *ACI Structural Journal*, 102, 4, 596-604.

Cui, C., and Sheikh, S. A., 2010, "Experimental Study of Normal- and High-Strength Concrete Confined with Fiber-Reinforced Polymers," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 14, No. 5, pp. 553-561.

C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas, S., D. Marques, (2008). Concrete laterally confined with fibre-reinforced polymers (FRP): experimental study and theoretical model, *Materiales de Construcción* Vol. 60, 297, 19-31 enero-marzo 2010 ISSN: 0465-2746 eISSN: 1988-3226 doi: 10.3989/mc.2010.45608.

Demers, M., and Neale, K. W., 1994, "Strengthening of Concrete Columns with Unidirectional Composite Sheets," *Proceedings of the 4th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Montreal, QC, Canada, pp. 895-905.

Dias da Silva, V., and Santos, J. M. C., 2001, "Strengthening of Axially Loaded Concrete Cylinders by Surface Composites," *Proceedings of the International Conference on Composites in Constructions*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, the Netherlands, pp. 257-262.

Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Design Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004 (E) 2

Fardis, M.N.; Khalili, H. Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic. *ACI Struct. J.* 1981, 78, 440–445.

Harmon, T. G., and Slattery, K. T., 1992, "Advanced Composite Confinement of Concrete," *Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Composite Materials in*

Bridges and Structures, Canadian Society for Civil Engineering, Sherbrooke, QC, Canada, pp. 299-306.

Houssam A. Toutanji (1999), "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", ACI MATERIALS JOURNAL TECHNICAL PAPER, Title no. 96-M50.

Howie, I., and Karbhari, V. M., 1995, "Effect of Tow Sheet Composite Wrap Architecture on Strengthening of Concrete due to Confinement. I: Experimental Studies," Journal of Reinforced Plastics and Composites, V. 14, No. 9, pp. 1008-1030.

H. Bouchelaghem, A. Bezazi, F. Scarpa (2011) "Compressive behavior of concrete cylindrical FRP- confined columns to a new sequential loading technique", Composites: Part B, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/compositesb](http://www.elsevier.com/locate/compositesb) .

Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., and Kumbasar, N. (2008). FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns. Journal of Materials in Civil Engineering 10.1061/ (ASCE) 0899-1561 (2008)20:2(169), 169-188.

J. F Berthet, E. Ferrier, P.Hamelin (2005). Compressive Behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study, Construction and Building Materials 19 (2005) 223-232.

Jiang, T., and Teng, J. G., 2007, "Analysis-Oriented Models for FRP-Confined Concrete: A Comparative Assessment," Engineering Structures, V. 29, No. 11, pp. 2968-2986.

Kent A. Harries, Gayatri Kharel (2002), "Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete", aDepartment of Civil and Environmental Engineering, University of South Carolina, 300 Main Street, Columbia, SC 29208, USA South Carolina Department of Transportation, Columbia, SC 29201, USA, Cement and Concrete Research 33 (2003) 873–880.

Kono, S.; Inazumi, M.; and Kaku, T., 1998, "Evaluation of Confining Effects of CFRP Sheets on Reinforced Concrete Members," Proceedings of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure, University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 343-355.

Kshirsagar, S.; Lopez-Anido, R. A.; and Gupta, R. K., 2000, "Environmental Aging of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Cylinders," ACI Materials Journal, V. 97, No. 6, Nov.-Dec., pp. 703-712

Lam, L., and Teng, J. G., 2004, "Ultimate Condition of Fiber-Reinforced Polymer-Confined Concrete," Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 8, No. 6, pp. 539-548

Li, Y. -F., Fang, T.- S., and Chern, C.-C. (2003). A Constitutive Model for Concrete Cylinder Confined by Steel Reinforcement and Carbon Fibre Sheet. Pacific conference on earthquake engineering, Christchurch, New Zealand 13-15 February 2003, 167, 1-18.

Mahfoud Touhari, Ratiba Mitiche-Kettab (2016). Behaviour of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Investigation and Strength Model, *Revista Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), pp. 647–660, 2016 DOI: 10.3311/PPci.8759 Creative Commons Attribution.

Mander, J.B.; Priestley, J.N.; Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. J. Struct. Eng. 1988, 114, 1804–1826

Marques, P. F., and Chastre, C., 2012, "Performance Analysis of Load-Strain Models for Circular Columns Confined with FRP Composites," *Composite Structures*, V. 94, No. 11, pp. 3115-3131.

Maslueli, M. A (2013), *Fiber Reinforced Polymers - The technology applied for concrete repair*. InTech, DOI: 10.5772/3162

Mastrapa, J. C., 1997, "The Effect of Construction Bond on Confinement with FRP Composites," master's thesis, University of Central Florida, Orlando, FL, 98 pp

Matthys, S., Toutanji, H., and Taerwe, L. (2006). Stress-Strain Behavior of Large Scale Circular Columns Confined with FRP Composites. *Journal of Structural Engineering ASCE* (2006), 132, 123-133.

Micelli, F.; Myers, J. J.; and Murthy, S., 2001, "Effect of Environmental Cycles on Concrete Cylinders Confined with FRP," *Proceedings of the International Conference on Composites in Constructions*, A. A. Balkema Publishers, Lisse, the Netherlands, pp. 317-322

Modarelli, R.; Micelli, F.; and Manni, O., 2005, "FRP-Confinement of Hollow Concrete Cylinders and Prisms," *7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, SP-230, C. K. Shield, J. P. Busel, S. L. Walkup, and D. D. Gremel, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1029-1046.

M. Fernández-Cánovas, M.N. González-García, J.Á. Piñero, A. Cobo (2015). Compressive strength behavior of low- and medium-strength concrete specimens confined with carbon fibres in defective implementation conditions: an experimental study, *Materiales de Construcción* Vol. 66, Issue 324, October–December 2016, e103 ISSN-L: 0465-2746.

M. Shahawya, A. Mirmiran, T. Beitelmana (2000). Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns, *Composites: Part B* 31 (2000) 471±480.

Pessiki, S.; Harries, K. A.; Kestner, J.; Sause, R.; and Ricles, J. M., 2001, "The Axial Behavior of Concrete Confined with Fiber Reinforced Composite Jackets," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 5, No. 4, pp. 237-245.

Picher, F.; Rochette, P.; and Labossiere, P., 1996, "Confinement of Concrete Cylinders with CFRP," *Proceedings of the 1st International Conference on Composites for Infrastructures*, University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 829-841.

Pedram Sadeghian and Amir Fam, A Rational Approach toward Strain Efficiency Factor of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Columns, *ACI STRUCTURAL JOURNAL TECHNICAL PAPER*, Title No. 111-S13.

Rochette, P., and Labossiere, P., 2000, "Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 4, No. 3, pp. 129-136

Saadatmanesh, H.; Ehsani, M.R.; Li, M.W. Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. *ACI Struct. J.* 1994, 91, 434–447.

- Shehata, I. A. E. M.; Carneiro, L. A. V.; and Shehata, L. C. D., 2002, "Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets," *Materials and Structures*, V. 35, No. 1, pp. 50-58.
- Silva, M. A. G., and Rodrigues, C. C., 2006, "Size and Relative Stiffness Effects on Compressive Failure of Concrete Columns Wrapped with Glass FRP," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, V. 18, No. 3, pp. 334-342.
- Spoelstra, M.R.; Monti,(1999). G. FRP-confined concrete model *J. Compos. Constr.* 1999, 3, 143–150.
- Togay Ozbakkaloglu and Jian C. Lim (2013). Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design - oriented model, *Composites, Part B* 55 (2013) 607-634.
- Toutanji, H., and Deng, Y., 2001, "Performance of Concrete Columns Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Composite Sheets," *Advanced Composite Materials*, V. 10, No. 2-3, pp. 159-168
- Wang, L. M., and Wu, Y. F. (2008), "Effect of Corner Radius on the Performance of CFRP-Confined Square Concrete Columns: Test," *Engineering Structures*, V. 30, No. 2, pp. 493-505.
- Wang, P., and Cheong, K. K., 2001, "RC Columns Strengthened by FRP under Uniaxial Compression," *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, pp. 327-334.
- Wang , Z., Wang, D., Smith, S. T., and Lu, D. (2012). Experimental testing and analytical modeling of CFRP confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression, *Engineering Structures* 40, 64 -74.
- Watanabe, K.; Nakamura, H.; Honda, T.; Toyoshima, M.; Iso, M.; Fujimaki, T.; Kaneto, M.; and Shirai, N., (1997), "Confinement Effect of FRP Sheet on Strength and Ductility of Concrete Cylinders under Uniaxial Compression," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structures*, V. 1, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, pp. 233-240.
- [www.buddyrhodes.com](http://www.buddyrhodes.com), (2017).
- Xiao Y., Wu H. (2000). "Compressive Behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets", *J. Mater. Civil Eng. ASCE* 2000;12(2):139-46.
- Youssef, M. N., 2003, "Stress Strain Model for Concrete Confined by FRP Composites," doctoral dissertation, University of California-Irvine, Irvine, CA, 310 pp.
- Zehra Canan Girgin (2013), Modified Johnston Failure Criterion from Rock Mechanics to Predict the Ultimate Strength of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Confined Columns. ISSN 2073-4360 [www.mdpi.com/journal/polymers](http://www.mdpi.com/journal/polymers) .
- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%8C%CE%BD%CE%B7%CE%BC%CE%B1> (2017).
- [http://www.owenscorningindia.com/ocindia/composites/pdf/oc\\_chemical\\_resistance\\_guide\\_edition.pdf](http://www.owenscorningindia.com/ocindia/composites/pdf/oc_chemical_resistance_guide_edition.pdf) .

## Ελληνική βιβλιογραφία

Καλογεράκης, Ε. (2013). Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιξη κυλίνδρων σκυροδέματος (Διπλωματική εργασία). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.

Καραδήμας Γ. (2011). “Θεωρητική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιξη κυλίνδρων σκυροδέματος” (Διπλωματική εργασία). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.

Μηλιώκας Ε. (2016). “Ενίσχυση υποστυλωμάτων Ω.Σ. με λυγισμό του διαμήκη σπλισμού μέσω περίσφιξης με ινοπλισμένα πολυμερή” (Διπλωματική εργασία). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.

Παππά Ε., Ποταμού Λυδία (2006). “Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες από Ο.Σ. και FRP. Σύγκριση μεθόδων”, 12ο Φοιτητικό Συνέδριο, Πάτρα, 2006.

Παπαρίζος Ι. (2016). “Αναλυτική και πειραματική αξιολόγηση προσομοιωμάτων για την περίσφιξη θλιβόμενων στοιχείων από σπλισμένο σκυρόδεμα μέσω ινοπλισμένων πολυμερών” (Διπλωματική εργασία). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.

Σύνθετα Υλικά, Ε.Μ.Π. (2017).

[https://www.google.gr/url?sa=t&trct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwig4J7bl9vUAhXDiRoKHQ\\_ICn8QFgghMAA&url=http%3A%2F%2Fcourseware.mech.ntua.gr%2Fml00001%2Fmathimata%2FC1\\_Sintheta\\_ilika.pdf&usg=AFQjCNEXTB14\\_vo1CoCrvLLykErbY-BadA](https://www.google.gr/url?sa=t&trct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwig4J7bl9vUAhXDiRoKHQ_ICn8QFgghMAA&url=http%3A%2F%2Fcourseware.mech.ntua.gr%2Fml00001%2Fmathimata%2FC1_Sintheta_ilika.pdf&usg=AFQjCNEXTB14_vo1CoCrvLLykErbY-BadA).

Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, «Ενισχύσεις κατασκευών σπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά», Πάτρα 2006

























