



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

## Διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών Ω.Σ

Φοιτητής            Γιάνα Νέμοβα

Επιβλέπων        Κωνσταντίνος Ρεπαπής



ΑΘΗΝΑ 2020

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Πτυχιακή Διατριβή**

**Τίτλος Εργασίας: «Διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών Ω.Σ»**

**Φοιτητής**

Γιάνα Νέμοβα

**Επιβλέπων**

Κωνσταντίνος Ρεπαπής

**Ημερομηνία υποβολής 03/07/2020**

## Περίληψη

---

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τις διαδικασίες και πρακτικές ενίσχυσης δομών σκυροδέματος, οπλισμένες με μεταλλικές ίνες. Πιο συγκεκριμένα γίνεται έρευνα και ανάλυση - πέρα από τη θεωρητική προσέγγιση αναβάθμισης ενός κατασκευαστικού υλικού μέσα από την πρόσμιξη του με διαφορετικής φύσης υλικά κατά την παραγωγή του-για την διατμητική αντοχή του σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα σκοπός της εργασίας, είναι να εξετάσει αναλυτικά τα πρότυπα και τις προδιαγραφές διατμητικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος με τη χρήση μεταλλικών ινών. Η παραπάνω διαδικασία εμπεριέχει αρχικά την βιβλιογραφική έρευνα όπως αυτή προκύπτει από την συλλογή βιβλιογραφικών δεδομένων από δημοσιευμένα εργαστηριακά αποτελέσματα αντοχής σκυροδέματος και το πως αυτές επιδρούν σε ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία του, αλλά και το πόσο επηρεάζουν τις κατασκευές, τόσο από πλευράς ασφαλείας, όσο και από οικονομικής απόψεως.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι η βιβλιογραφική αναζήτηση σε διεθνείς βάσεις δεδομένων, όπως είναι το Scopus και το Google Scholar, με ιδιαίτερα έμφαση σε τεχνικά περιοδικά, όπου αναλύουν κυρίως θέματα κατασκευών. Επίσης, αξιοποιήθηκαν συγγράμματα αλλά και υλικό που προέρχεται από την βιβλιοθήκη του τμήματος.

Τέλος σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στην μέθοδο διαχείρισης των συλλεγμένων δεδομένων μιας και μέσα από την καταγραφή και μαθηματική διαχείριση αυτών προκύπτει η βέλτιστη σχέση υπολογισμού της προβλεπόμενης διατμητικής αντοχής αντίστοιχων δοκών σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της σύγκρισης των συνολικών δημοσιευμένων δεδομένων.

**Λέξεις Κλειδιά:** σκυρόδεμα, διατμητική αντοχή, μεταλλικές ίνες, ινοπλισμένο σκυρόδεμα

## Abstract

---

This dissertation examines the processes and practices of concrete structures reinforced with steel fibers. More specifically, research and analysis is carried out, beyond the theoretical approach of upgrading a construction material by mixing it with materials of a different nature during its production, for its shear resistance in a laboratory environment.

More specifically, the purpose of the thesis is to examine in detail the standards and specifications of shear strength of sintered concrete using steel fibers. The above procedure contains initially the bibliographic research as it results from the collection of bibliographic data from published laboratory results of concrete strength and from the way in which it influences the whole of its production process, but also based on how it affects constructions both in terms of safety as also from an economic point of view.

The methodology used in this thesis can be explained as a bibliographic search in international databases, such as Scopus and Google Scholar, with particular emphasis on technical journals, focusing mainly on building issues. Also, manuals and material from the department library were used.

Finally, reference should be made to the method of management of collected data and also to the process of recording and mathematical management of the collected data. The optimum relation of calculating the predicted shear strength of corresponding concrete beams results from the comparison of the total published data.

**Keywords: concrete, shear strength, steel fibers, fiber reinforced concrete**

## Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση της παρούσας προπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της καθώς και σε αυτούς που συνέβαλαν συνολικά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή για την ανάθεση και την επίβλεψη της προπτυχιακής μου διατριβής, καθώς και για την αψεγάδιαστη συνεργασία και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλο τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής και όλους τους διδάσκοντες του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών για τις γνώσεις που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε και σε αυτό το στάδιο των σπουδών μου.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract.....	4
Ευχαριστίες .....	5
Πίνακας Περιεχομένων .....	6
Κατάλογος Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	8
Δομή & Σκοπός.....	9
1.0 Εισαγωγή.....	10
1.1 Η έννοια της έρευνας στο σκυρόδεμα .....	10
1.2 Ενισχυμένο Σκυρόδεμα.....	12
1.3 Ιστορική Αναδρομή .....	15
1.4 Πρώτες Σύγχρονες Εφαρμογές.....	15
1.5 Φύση ινών ενίσχυσης.....	18
1.5.1 Υαλο-ινοπλισμένο σκυρόδεμα (GFRC).....	20
1.5.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες (SFRC).....	21
1.5.3 Ενισχυμένο σκυρόδεμα από ίνες προπυλένιου (PFR) .....	23
2.0 Διατμητική συμπεριφορά δοκών .....	24
3.0 Ερευνητικές Προσεγγίσεις .....	28
3.1 Βιβλιογραφική Μελέτη – Ανασκόπηση.....	28
3.2 Εξισώσεις εκτίμησης διατμητικής αντοχής.....	30
3.2.1 Sharma A. K. (1986) .....	30
3.2.2 Narayanan και Darwish (1987).....	31
3.2.3 Ashour, Hasanain και Wafa. (1992) .....	32
3.2.4 Khuntia, Stojadinovic και Goel (1999) .....	33
3.2.5 Swamy, Jones Chiam (1993) .....	33

3.2.6 Shin, Oh και Ghosh (1994).....	34
3.2.7 Kwak <i>et al.</i> (2002) .....	34
3.2.8 Slater, Moni και Alam (2012).....	34
3.3 Προγενέστερες Προσεγγίσεις.....	35
3.3.1 Roberts and Ho (1982) .....	35
3.3.2 Lim <i>et al.</i> , (1987) .....	36
3.3.3 Kwak <i>et al.</i> , (2002) .....	36
3.3.3 Cucchiara <i>et al.</i> , (2004).....	37
3.3.3 Parra-Montesinos <i>et al.</i> , (2006) .....	38
3.3.3 Dinh <i>et al.</i> , (2010).....	38
4.0 Μεθοδολογία – Προσέγγιση .....	40
4.1 Συγκέντρωση δειγμάτων .....	40
4.2 Παράμετροι των δειγμάτων.....	41
4.3 EC8 & Sammy <i>et al.</i> (1993).....	45
4.4 Swamy <i>et al.</i> (1993) and ACI 318M-14 (2014) .....	45
4.5 Gandomi (2017) & Swamy <i>et al.</i> (1993).....	47
4.6 Swamy (1993) & Russo, Mitri, Pauletta (2013).....	48
4.7 Khuntia (2011) & ACI .....	49
4.8 Shama (1986) .....	50
4.9 Shin <i>et al.</i> (1994) .....	51
4.10 Narayanan and Darwish (1987).....	52
4.11 Ashour (1992) (2 <sup>nd</sup> Expression).....	53
4.12 Slater (2012) (for $a/d < 3$ and low concrete strength ( $20 < f_c < 50$ MPa) .....	54
4.13 Kwak (2002).....	55
Βιβλιογραφία .....	56

## Κατάλογος Σχημάτων

---

Εικόνα 1 .....	13
Εικόνα 2 .....	16
Εικόνα 3 .....	17
Εικόνα 4 .....	22
Εικόνα 5 .....	25
Εικόνα 6 .....	26
Εικόνα 7 .....	44
Εικόνα 8 .....	45
Εικόνα 9 .....	46
Εικόνα 10 .....	47
Εικόνα 11 .....	48
Εικόνα 12 .....	49
Εικόνα 13 .....	50
Εικόνα 14 .....	51
Εικόνα 15 .....	52
Εικόνα 16 .....	53
Εικόνα 17 .....	54
Εικόνα 18 .....	55
Εικόνα 19 .....	59

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 1 .....	21
Πίνακας 2 .....	43
Πίνακας 3 .....	59



## Δομή & Σκοπός

---

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στην Αθήνα (06./2020) ως κομμάτι του ακαδημαϊκού κύκλου σπουδών του προπτυχιακού προγράμματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής .

Η πτυχιακή κάνει μια εισαγωγική αναφορά στην έννοια της έρευνας στο τομέα του σκυροδέματος ως κατασκευαστικό υλικό και πιο συγκεκριμένα στο θεωρητικό πλαίσιο της ενίσχυσης του σκυροδέματος με οπλισμό από ίνες. Παράλληλα γίνεται αναφορά στην δύση των ινών που χρησιμοποιούνται. Τα επόμενα κεφάλαια κάνουν αναφορά στην διατμητική συμπεριφορά των δοκών και παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων.

Κύριος σκοπός της παρακάτω προπτυχιακής διατριβής αποτελεί η ενδελεχής βιβλιογραφική έρευνα στο ευρύτερο θέμα της έννοιας της ποιότητας στο χώρο του σκυροδέματος με ότι συνεπάγεται για τη βιομηχανία αλλά και το παραγόμενο προϊόν. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται μια στατιστική ανάλυση μεταξύ βασικών εξισώσεων προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών σκυροδέματος από ίνες χάλυβα. Για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των υπό μελέτη εξισώσεων ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων συλλέχθηκε από δημοσιευμένες πηγές. Μέσω της χρήσης των παραμέτρων της κάθε πειραματικής δοκιμής πραγματοποιήθηκε η επίλυση της εκάστοτε εξίσωσης. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η ερμηνεία του βαθμού συσχετισμού καθώς και η εκτίμηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των πειραματικών και εκτιμώμενων δεδομένων με σκοπό τον εντοπισμό της καλύτερης εξίσωσης.

## 1.0 Εισαγωγή

---

### 1.1 Η έννοια της έρευνας στο σκυρόδεμα

Ιδιαίτερα σημαντικό και καθοριστικό υλικό στην έρευνα των τεχνικών και δομικών κατασκευών αποτελεί το σκυρόδεμα. Όντας το βασικό και κυρίαρχο υλικό κατά την μηχανική κατασκευή, καθολικά σχεδόν όλων των τεχνικών έργων, αποτελεί και εξαιρετικά σημαντικό αντικείμενο μελέτης. Βασικός στόχος στην συνεχή έρευνα - μελέτη που υπόκειται, είναι οι διαδικασίες ενίσχυσης του, κατανόησης των νέων ελαστικών παραμέτρων που προκύπτουν στο τροποποιημένο προϊόν, όπως επίσης και η δυνατότητα νέων εφαρμογών με φιλικότερα προς το περιβάλλον μέσα και πρακτικές.

Από τις αρχές του 1800, οι κατασκευαστές που χρησιμοποιούσαν τις πρώιμες μορφές του υλικού άρχισαν να αντιλαμβάνονται ότι το σκυρόδεμα είναι υπό προϋποθέσεις ένα εύθραυστο υλικό το οποίο συχνά εμφάνιζε αδυναμίες / αστοχίες βρισκόμενο υπό φορτίο.

Η παραπάνω αδυναμία αντοχής ιδίως σε εφελκυστικές τάσεις, σε συνδυασμό με την εύθραυστη συμπεριφορά του σαν υλικό είχε ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται συχνά ξαφνικές αστοχίες εφελκυστικού χαρακτήρα. Όπως είναι ευκόλως κατανοητό η μηχανική αυτή συμπεριφορά δεν είναι επιθυμητή για οποιοδήποτε κατασκευαστικό υλικό.

Έτσι, η διαδικασία ενίσχυσης του με διάφορα και ποικίλα υλικά εξυπηρετεί το ρόλο μιας μορφή ενδυνάμωσης με σκοπό να αντισταθμίσει την εύθραυστη συμπεριφορά του και να βελτιώσει την δυναμική αντοχή του όπως και την ικανότητα του ενάντια στην παραμόρφωση για χρήση σε δομικές εφαρμογές (Behbahani *et al.*, 2011).

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος στη φύση του υλικού αλλά και στις διαδικασίες παραγωγής του συνολικά είναι και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αυτών. Τις τελευταίες δεκαετίες, ο κατασκευαστικός κλάδος έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους βιομηχανικούς κλάδους με τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς οι

εργασίες κατασκευής και κατεδάφισης οδηγούν σε σημαντική και υπολογίσιμη παραγωγή αποβλήτων.

Επιπλέον, η παραγωγή δομικών υλικών αντιπροσωπεύει έναν από τους σημαντικότερους καταναλωτές φυσικών πόρων και ενέργειας παγκοσμίως (Braga *et al.* 2017; Dahlbo *et al.* 2015; Rangel *et al.* 2019).

Το σκυρόδεμα σαν υλικό, είναι συνήθως κατασκευασμένο από τσιμέντο, συσσωματώματα, χημικές προσμίξεις, ανόργανα πρόσμικτα και νερό. Αποτελεί σε μέγεθος και συχνότητα χρήσης το μεγαλύτερο από όλα τα ανθρωπογενή παρασκευάσματα. Το ενεργό συστατικό του, είναι η πάστα τσιμέντου και η απόδοση του καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το τσιμέντο επικόλλησης.

Τα διάφορα προσμίγματα στο μίγμα κατά την κατασκευή του, προσδίδουν αρκετά και άκρως ωφέλιμα αποτελέσματα τα οποία και σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του τσιμέντου με αυτά όπως: α) επιτάχυνση, β) επιβράδυνση παραλαβής αέρα, γ) μείωση ποσοστού υγρασίας / νερού και δ) πλαστικότητα. Κάποια από τα ορυκτά πρόσμικτα τα οποία συμβάλουν και σε μεγάλο βαθμό στη συνολική βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος αναφορικά είναι η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα και ο καπνός διοξειδίου του πυριτίου.

Η απόδοση του σκυροδέματος σαν υλικό εξαρτάται από την ποιότητα των συστατικών του, τις αναλογίες τους και στη συνέχεια την τελική τοποθέτηση καθώς και τις συνθήκες έκθεσης του. Για παράδειγμα παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα την αντίδραση του σκυροδέματος κατά την έκθεση του σε φορτίο ή στο περιβάλλον: α) η ποιότητα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του, β) οι συνθήκες πρόσμιξης, γ) η λεπτότητα και το μέγεθος των σωματιδίων του τσιμέντου, δ) οι σχετικές αναλογίες των φάσεων και ε) η ποσότητα του νερού ανάμιξης μιας και επηρεάζει τη φυσικοχημική συμπεριφορά της πάστας του τσιμέντου.

Αντίστοιχα, κατά την παραγωγή - κατασκευή του σκυροδέματος: α) το ποσό και το είδος του τσιμέντου, β) τα λεπτά και χοντρά αδρανή, γ) το νερό, δ) η θερμοκρασία ανάμειξης - πρόσμιξης και ε) το περιβάλλον στην οποία εκτίθεται. Η σωστή και χρονισμένη επιμέλεια των παραπάνω κριτηρίων / συνθηκών, είναι και αυτή που θα καθορίσει τη φυσική και χημική σύσταση του καθώς επίσης εξίσου σημαντικά και την αντοχή του (συμπεριφορά σε φορτίο).

Κατά την μελέτη και επιστημονική ανάλυση της διαδικασίας κατασκευής του σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται διάφορες αναλυτικές τεχνικές για το καθορισμό της επίδρασης των διαφόρων υλικών μίξης στις διάφορες παραμέτρους και συνθήκες που υπόκεινται για σκοπούς ποιοτικού ελέγχου. Η μελλοντική ανάπτυξη και παραγωγή σκυροδέματος με βάση τα νέα πρότυπα και προδιαγραφές είναι, σε πολλές περιπτώσεις, άμεσο αποτέλεσμα του έργου που συνεπάγεται από τη χρήση και έρευνα των διαφόρων προαναφερθέντων αναλυτικών τεχνικών.

## 1.2 Ενισχυμένο Σκυρόδεμα

Με βάση τον Singh (2017), είναι πλέον γνωστό ότι οι ιδιότητες οποιουδήποτε στερεού υλικού, προέρχονται και βασίζονται σε μεγάλο βαθμό, από την εσωτερική μικροδομή του (microstructure). Υπάρχει μια ουσιαστική σύνδεση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και της μικροδομής που κατέχει. Οποιαδήποτε τροποποίηση στις παραμέτρους της μίας έχει σημαντική επίδραση στη φύση και κατάσταση της άλλης.

Η προαναφερθείσα παρατήρηση / φαινόμενο, επιτρέπει στον μελετητή του υλικού αλλά και τον εκάστοτε κατασκευαστή, να τροποποιήσει τις μηχανικές ιδιότητες του, στην προκειμένη το υλικό ενδιαφέροντος και μελέτης είναι το σκυρόδεμα, εφαρμόζοντας τις κατάλληλες αλλαγές στη μικροδομή του. Αυτό κατά την κατασκευαστική διαδικασία του σκυροδέματος συσχετίζεται με: α) τον τύπο, β) την έκταση, γ) το μέγεθος, δ) τη μορφή και ε) την κατανομή των διαφόρων φάσεων που υπάρχουν στη μήτρα υλικού.

Λαμβάνοντας υπό όψη το γεγονός πως, η «δύναμη / αντοχή» ενός υλικού διανέμεται κατά κύριο λόγο στο στερεό μέρος του, τα κενά που προκύπτουν επομένως στο υλικό κατά την κατασκευή του μέσα από διάφορες διεργασίες (πχ πρόσμιξη, πορώδες κτλ.), δρύνουν επιζήμια όσον αφορά την δομή και τελική αντοχή του (Singh, 2017).

Το σκυρόδεμα αποτελείται συνήθως από τρία διαφορετικά υλικά που αναμιγνύονται μαζί με νερό. Το τσιμέντο ενεργεί ως μέσον σύνδεσης και σχηματίζει μια στερεά μάζα, μέσω της προσκόλλησης του με το προστιθέμενο λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο συνήθως αποτελείται από άμμο, και χονδροειδούς περιεκτικότητας αδρανή υλικά.

Η διαδικασία κατασκευή του σκυροδέματος σηματοδοτείται όταν προστίθεται νερό στο μείγμα αυτών των τριών βασικών συστατικών υλικών, που ενεργοποιεί τις αντιδράσεις ενυδάτωσης στο τσιμέντο. Στο πηγμένο σκυρόδεμα, σε μακροσκοπική κλίμακα η εικόνα του (Εικόνα 1), αποτελείται από δύο φάσεις: (α) τα συσσωματώματα διαφόρων μεγεθών και (β) το συνδετικό ύφασμα, το οποίο αποτελείται από μια ασυνάρτητη μάζα της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου. Οι δοκιμές έδειξαν ότι στην ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου, εντοπίζεται πάντα η εικόνα μια ασυνεχούς μάζας, λόγω της μη ομοιογενούς κατανομής των στερεών καθώς και των κενών μεταξύ τους (Singh, 2017).



*Εικόνα 1 Φωτογραφική απεικόνιση τσιμέντου σε σκληρή/στερεή κατάσταση (Singh, 2017)*

Σε αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει αναφορά στο γεγονός όπου, οι διαφορετικές φυσικές ιδιότητες των συστατικών υλικών στο μείγμα του σκυροδέματος οδηγούν στον σχηματισμό μιας μικρής επιφάνειας η οποία λειτουργεί σαν επικαλυπτικό «φίλμ» και ονομάζεται / ορίζεται ως, περιοχή ασυνέχειας. Η προαναφερθείσα περιοχή εμφανίζεται ειδικά, στη διαχωριστική επιφάνεια των χονδρόκοκκων σωματιδίων και της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου.

Σχετικά με την περιοχή ασυνέχειας, η απελευθέρωση της θερμότητας στη μάζα του σκυροδέματος, κυρίως λόγω της διαδικασίας ενυδάτωσης προκαλεί διαφορική διαστολή των συσσωματωμάτων που είναι ενσωματωμένα στην ενυδατωμένη πάστα

τσιμέντου και με την πάροδο του χρόνου οδηγεί στον σχηματισμό μιας ζώνης διαχωρισμού γύρω από τα χονδρόκοκκα σωματίδια όταν επιστρέφουν την κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος με το πέρας του χρόνου.

Τα χοντρά συσσωματώματα που είναι δομικά ισχυρότερα από τα λεπτά και η ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου στο σκυρόδεμα συνήθως δεν έχουν άμεση επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος, εκτός εάν το σκυρόδεμα κατασκευάζεται με πορώδη και ασθενή αδρανή όπως παραδείγματος χάριν η ελαφρόπετρα.

Ωστόσο, το μέγεθος και το σχήμα (χαρακτηριστικά των χονδροειδούς συσσωματωμάτων) ασκούν σημαντική επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος. Μεγάλα μεγέθη χονδροειδών συσσωματωμάτων, ιδιαίτερα επιμήκεις είτε ακόμα και σε σχήμα νιφάδας, τείνουν να συσσωρεύουν φιλμ νερού στην επιφάνεια τους.

Αυτό το φαινόμενο, γνωστό και ως «αιμορραγία», οδηγεί στην περαιτέρω αποδυνάμωση της ζώνης μεταβατικής διεπαφής στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να γίνεται συγκριτικά πιο επιρρεπής σε φαινόμενα φόρτισης από ότι άλλες περιοχές στη μάζα του τελικού προϊόντος.

Η παρουσία της προαναφερθείσας διεπιφανειακής ζώνης μετάβασης γύρω από την επιφάνεια των χονδροειδών συσσωματωμάτων στη μάζα του σκυροδέματος είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο το υλικό εμφανίζει περιορισμένη αντοχή σε συνθήκες φόρτισης καθώς όπως και άλλων χαρακτηριστικών αστοχιών που παρουσιάζει το σκυρόδεμα κατά την χρήση του στο κατασκευαστικό τομέα.

Με γνώμονα λοιπόν, την ιδιαίτερη σημασία που φέρει το σκυρόδεμα σαν υλικό αλλά και το ποσοστό χρήσης του κατά την κατασκευαστική διαδικασία, αυξάνεται η σημασία μελέτης των μηχανικών αντοχών και συμπεριφορών του. Είναι επομένως εξαιρετικά σημαντικό και επιτακτική ανάγκη κατά την σύγχρονη κατασκευαστική διαδικασία να συμπληρωθούν, μέσω διάφορων τεχνικών που θα αναλυθούν παρακάτω, τα προαναφερθέντα σχηματιζόμενα διάκενα προσθέτοντας υλικά σωματίδια κατά τη στιγμή της παραγωγής του συγκεκριμένου προϊόντος (διαδικασία ενίσχυσης), ή να προστεθεί κάτι που γεμίζει τους κενούς χώρους στο πλέγμα συνδυάζοντας το με τα προϊόντα αντίδρασης της ενυδάτωσης. Συνήθως τα παραπάνω προστιθέμενα προϊόντα / υλικά είναι επιτακτικά λεπτότερα από τα σωματίδια του τσιμέντου.

Όπως και άλλοι επιστημονικοί και τεχνικοί κλάδοι, η συγκεκριμένη τεχνολογία του ενισχυμένου σκυροδέματος υπόκειται σε αυξανόμενο βαθμό εξειδίκευσης. Η ενσωμάτωση ινών σε τσιμεντοειδείς μήτρες για να σχηματίσουν σύνθετα υλικά είναι ένα παράδειγμα εξειδίκευσης στο πλαίσιο της τεχνολογίας του σκυροδέματος (Εικόνα 2 και Εικόνα 3). Απαιτεί γνώση των εννοιών που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ινών και της πάστας τσιμέντου, του κονιάματος ή του σκυροδέματος που επηρεάζουν την κατασκευή και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

### 1.3 Ιστορική Αναδρομή

Η έννοια της ενίσχυσης εύθραυστων δομικών υλικών με την προσθήκη διάφορων μορφών ινών είναι γνωστή από την αρχαιότητα (Johnston, 2010). Κύριος διαχωρισμός των προαναφερθέντων ινών είναι τα δομικά χαρακτηριστικά τους όπως α) η προέλευση τους (π.χ. φυσικής ή τεχνητής προέλευσης) και β) το σχήμα τους.

Η χρήση τους βρήκε εφαρμογή με σκοπό οι κατασκευαστές να αυξήσουν τη φέρουσα ικανότητα των παραγόμενων δομικών μελών. Η χρήση τους στην Ευρώπη χρονολογείται για πρώτη φορά στη ρωμαϊκή περίοδο (300 π.Χ.-476 μ.Χ.), όπου το αρχικό σκυρόδεμα μελετήθηκε και βρέθηκε να περιέχει οργανικές ίνες. Σε παράλληλο πλαίσιο πλίνθοι ενισχυμένοι με άχυρο βρέθηκαν σε μια σειρά αρχαίων χώρων στη Μέση Ανατολή που χρονολογούνται πριν από περίπου 10.000 χρόνια. Επίσης οι αυτόχθονες κάτοικοι των Η.Π.Α. χρησιμοποιούσαν τα αποξηραμένα στον ήλιο τούβλα, που πιστεύεται ότι κατασκευάστηκαν με τη χρήση μείγματος άμμου, πηλού και αχύρου (Singh, 2017).

Σε συνέχεια αυτής της σύντομης ιστορική αναδρομής, οι καλύβες λάσπης που κατασκευάζονταν με ψημένο πηλό ενισχυμένο με κονίαμα και μορφές τοιχοποιίας ενισχυμένες με τρίχες ζώων αποτελούν πρώιμα παραδείγματα υλικών ενισχυμένων με ίνες κατά την κατασκευή τους.

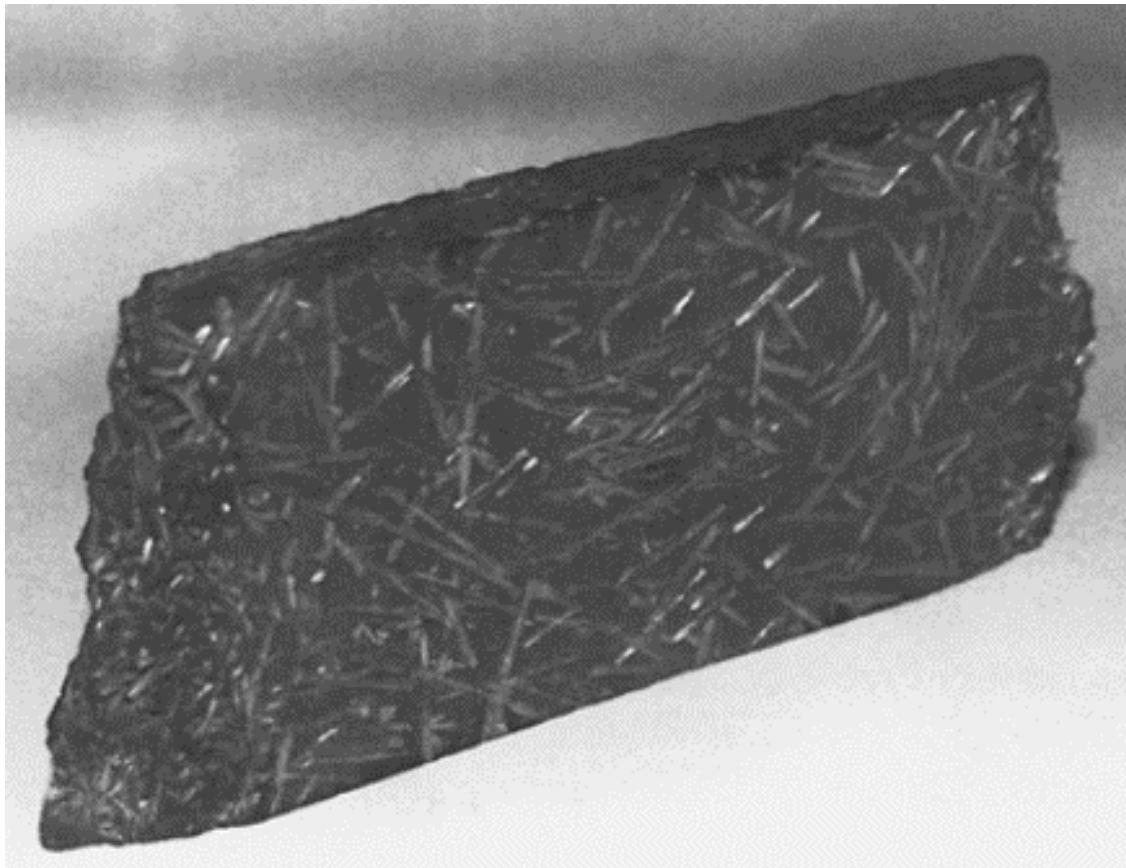
### 1.4 Πρώτες Σύγχρονες Εφαρμογές

Τις τελευταίες δεκαετίες κατά την σύγχρονη ιστορία του κατασκευαστικού τομέα, το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το ενισχυμένο με ίνες σκυρόδεμα υποβλήθηκε στην Καλιφόρνια (1874) από τον Bernard. Ένα αντίστοιχο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αποτελεί

αυτό του Alfsen στη Γαλλία (1918), το οποίο ακολουθήθηκε από τον Martin στην Καλιφόρνια (1927) για τους σωλήνες που κατασκευάζονταν με τη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος από χάλυβα.

Μια αντίστοιχη εφαρμογή, κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Etheridge (1931) σχετικά με τη χρήση των χαλύβδινων δακτυλίων για την αντιμετώπιση της αγκύρωσης των ινών χάλυβα (Singh, 2017).

Η εκτεταμένη χρήση των παραπάνω εφαρμογών, αντίστοιχου υλικού στην συνήθη κατασκευαστική πρακτική αρχικά παρεμποδίστηκε, κυρίως από το υψηλό κόστος του, τις ανεπαρκείς εγκαταστάσεις δοκιμών και πιο σημαντικά, από την ταχεία, παράλληλη και άκρως πιο οικονομική ανάπτυξη της χρήσης σκυροδέματος ενισχυμένου από χαλύβδινες ράβδους και καλώδια.



---

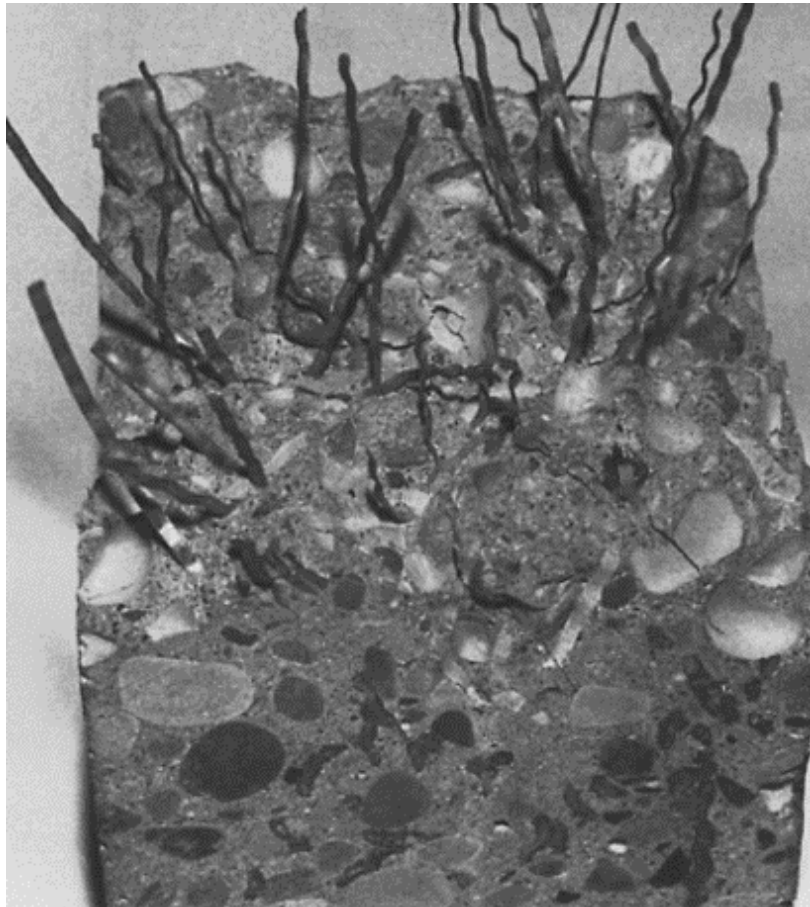
*Εικόνα 2 Απεικόνιση εργαστηριακού δείγματος από ενισχυμένο σκυροδέμα με ίνες γυαλιού (Johnston, 2010)*

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στο κομβικό σημείο όπου μετά από τα πειράματα των Romualdi and Ramey (1965) προέκυψε μια σαφέστερη κατανόηση των ιδιοτήτων του ενισχυμένου σκυροδέματος από χαλύβδινες ίνες (Steel



Fiber Reinforced Concrete) η εξέλιξη της οποίας συνεχίζεται τα τελευταία χρόνια μέσω εκτενών ερευνητικών προσπαθειών σε αυτή την κατεύθυνση.

Ο βασικός στόχος των παραπάνω ερευνητικών διαδικασιών είναι να πλαισιώσουν τις κατευθυντήριες γραμμές και τους κώδικες κατασκευής σχετικά με τις μεθόδους δοκιμής και σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μόνο χαλύβδινες ίνες ή παράλληλα με την εισαγωγή ινών συνθετικής φύσης.



---

*Εικόνα 3 ,Απεικόνιση εργαστηριακού δείγματος από ενισχυμένο σκυρόδεμα με ίνες από ασάλι (Johnston, 2010) Ο κύριος λόγος επιλογής και χρήσης ινών στην κατασκευή και μελέτη του παραγόμενου σύνθετου υλικού ήταν να ενισχυθούν οι ιδιότητες ενός εγγενώς αδύναμου, εύθραυστου τσιμεντοειδούς πλέγματος. Ανάλογα με τον τύπο των ινών και την ποσοστιαία περιεκτικότητά τους σε σύνολο, αυτή η ενίσχυση μπορεί να περιλαμβάνει ποικίλους βαθμούς αντοχής σε εφελκυσμό ή κάμψη, ολκιμότητα, σκληρότητα ή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, αντίσταση στην κρούση,*

αντίσταση στην κόπωση, αντίσταση στην εμφάνιση ρωγμής, διαπερατότητα και ανθεκτικότητα.

### 1.5 Φύση ινών ενίσχυσης

Η επιλογή των κατάλληλα ενισχυμένων δομών σκυροδέματος λόγω του παραπάνω από ικανού πλήθους που παράγεται από τους κατασκευαστές τους, ο χρήστης (μελετητής – κατασκευαστής) καλείται ανά περίπτωση να αναγνωρίσει ότι η ποσότητα των ινών που υπάρχει είναι ένας κύριος παράγοντας που επηρεάζει εν δυνάμει την έκταση και το βαθμό της βελτίωσης της επικείμενης κατασκευής του.

Η ενσωμάτωση των διάφορων ινών επηρεάζει όπως είναι εύκολα αντιληπτό τις σύνθετες ιδιότητες του τελικού σώματος, τόσο στις πρόσφατα αναμεμειγμένες όσο και στις στερεοποιημένες εκφάνσεις του σκυροδέματος.

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες τείνει φυσικά να βελτιώσει τον βαθμό αύξησης πολλών ιδιοτήτων κατά την κατάσταση στερεοποίησης, αλλά επίσης παράλληλα μειώνει τη ρευστότητα του μίγματος στην πρόσφατα αναμεμειγμένη του κατάσταση, μέχρις ότου σε κάποια μέγιστη περιεκτικότητα σε ίνες η παραγωγική διαδικασία δεν είναι πλέον ικανή να παράγει ομοιόμορφη διανομή ινών σε ένα μείγμα και να μην μπορεί να ενοποιηθεί σωστά (Johnston, 2010). Αυτό συνεπάγεται ότι η πιθανή ενίσχυση των ιδιοτήτων στην στερεή κατάσταση του σκυροδέματος δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρως είτε λόγω μη ομοιόμορφης κατανομής ινών είτε λόγω ελλιπούς ενοποίησης ή και των δύο.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι ταξινόμησης των ινών σύμφωνα με το μέτρο ελαστικότητάς τους ή την προέλευση τους. Υπό το πρίσμα του συντελεστή ελαστικότητας, οι ίνες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, δηλαδή εκείνες που έχουν υψηλότερο συντελεστή ελαστικότητας από το μίγμα σκυροδέματος (hard intrusion) και αυτές με χαμηλότερο ελαστικό συντελεστή από το μείγμα σκυροδέματος (soft intrusion). Ο χάλυβας, ο άνθρακας και το γυαλί έχουν υψηλότερο συντελεστή ελαστικότητας από το πλέγμα τσιμεντοκονίας, ενώ οι φυτικές όπως και οι ίνες από προπυλένιο ταξινομούνται ως ίνες μέσης ελαστικότητας.

Οι υψηλής ελαστικότητας ίνες μπορούν ταυτόχρονα να βελτιώσουν την αντοχή στην κάμψη και την κρούση. ενώ χαμηλής ελαστικότητας ίνες μπορούν να βελτιώσουν την αντοχή σε κρούση του σκυροδέματος αλλά δεν συμβάλλουν πολύ στην αντοχή του σε συνθήκες κάμψης.

Σύμφωνα με την προέλευση τους, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες

- Μεταλλικής προέλευσης ίνες (όπως χάλυβας, ανθρακούχος χάλυβας και ανοξείδωτος χάλυβας),
- Ορυκτής προέλευσης ίνες (όπως αμίαντος και ίνες γυαλιού)
- Οργανικής προέλευσης ίνες.

Οι οργανικές ίνες μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε φυσικές και τεχνητές ίνες. Οι φυσικές ίνες μπορούν να ταξινομηθούν σε φυτική προέλευση ή «σιζάλ» (όπως ίνες ξύλου και ίνες φύλλων) και ζωικής προέλευσης (όπως ίνες τρίχας και μετάξι). Οι τεχνητές ίνες μπορούν επίσης να χωριστούν σε δύο ομάδες ως φυσικό πολυμερές (όπως ίνες κυτταρίνης και πρωτεΐνης) και συνθετικές ίνες (όπως νάιλον και πολυπροπυλένιο) ([Hamid et al., 2011](#)).

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία ενίσχυσης έχουν την φύση - έννοια προσθήκης μακρών λεπτών σωματιδίων γεωμετρίας / μορφής βελόνας σε κανονική πάστα τσιμέντου, κονίαμα ή μήτρα σκυροδέματος.

Για κάποια από τα διαθέσιμα είδη η απόκριση στην κάμψη διαφέρει. Όπως γίνεται αναφορά και παραπάνω, ίνες από χάλυβα, παρουσιάζονται σχετικά άκαμπτες, ενώ άλλες, όπως το γυαλί ή το πολυπροπυλένιο, είναι αρκετά εύκαμπτες.

Οι συνηθισμένες μορφές των διαφόρων ινών εμφανίζουν τις παρακάτω γεωμετρίες ([Johnston, 2010](#)):

- ως απλά νήματα ή μονόκλωνα,
- ως παράλληλα μόνιμα συνδεδεμένα πολύκλωστα νήματα με 200 περίπου μονόκλωνα σε κάθε μονάδα,
- ως προσωρινά συνδεδεμένες δεσμίδες
- ως δισδιάστατες ταινίες τύπου πλέγματος που προορίζονται να διαχωριστούν σε διακλαδισμένα μονονημάτια κατά τη διάρκεια της ανάμειξης.

Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των συνδυασμών ινών-μήτρας στην πρόσφατα αναμεμιγμένη κατάσταση (ρευστό στάδιο σκυροδέματος) εξαρτώνται από τον τύπο και τη μορφή των παραπάνω ινών, τη φύση και τις αναλογίες των συστατικών μήτρας και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση αυτών των ινών στην μήτρα.

#### 1.5.1 Ύαλο-ινοπλισμένο σκυρόδεμα (GFRC)

Τα μίγματα από σκυρόδεμα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού περιέχουν ίνες υάλου υψηλής αντοχής που περιβάλλονται από ένα τσιμεντοειδές μέσο. Σε αυτό το σύστημα, τόσο οι ίνες όσο και το περιβάλλον τους, διατηρούν τα φυσικά ατομικά - χημικά χαρακτηριστικά τους. Ωστόσο, το παραγόμενο σκυρόδεμα έχει βελτιωμένες προκύπτουσες ιδιότητες που δεν μπορούν να επιτευχθούν αν οποιοδήποτε από τα συστατικά χρησιμοποιείται ξεχωριστά.

Οι γυάλινες ίνες είναι τα κύρια στοιχεία που φέρουν το φορτίο, ενώ η κλειστή μήτρα κρατά τις ίνες στην προτιμώμενη θέση και κατεύθυνση. Το μέσο διευκολύνει τη μεταφορά του φορτίου στις ίνες και παράλληλα προστατεύεται από τις αστοχίες που οφείλονται και προκύπτουν στο περιβάλλον.

Επιπροσθέτως, οι συγκεκριμένης φύσεως ίνες μπορούν να ενσωματωθούν στη μήτρα είτε σε σταθερά είτε σε ακανόνιστα μήκη. Το πιο διαδεδομένο σχήμα στο οποίο χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες υάλου σε δομικές εφαρμογές είναι γνωστό ως πολυστρωματικό υλικό ([Aggeliki, 2011](#)).

Αυτή η μορφή επιτυγχάνεται με την ενοποίηση στρωμάτων λεπτών ινών και μιας μήτρας στο επιθυμητό μέγεθος. Ο προσανατολισμός των ινών σε κάθε στρώμα και η ακολουθία στοίβαξης των στρωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μιας σειράς μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Όλες αυτές οι ιδιότητες συνδυάζονται με το γεγονός ότι το τελικό προϊόν μοιάζει με στερεό σκυρόδεμα, αν και ζυγίζει μόνο το ένα τρίτο του αρχικού βάρους ενός κοινού στερεού σκυροδέματος.

Ίνες	Διάμετρος ( $\mu\text{m}$ )	Ειδικό Βάρος	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (GPa)	Επιμήκυνση σε αστοχία (%)
<i>Chrysotile Asbestos</i>	0.02-20	2,55	164	3,1	2-3
<i>Crocidolite Asbestos</i>	0.1-20	2,55	196	3,5	2-3
<i>E-Glass</i>	9-15	2,56	77	2-3.5	2-3.5
<i>A R-Glass</i>	9-15	2,71	80	2-2.8	2-3
<i>Fibrillated Polypropylene</i>	20-200	0,91	5	0,5	20
<i>Steel</i>	5-500	7,84	200	1-3	3-4
<i>Stainless Steel</i>	5-500	7,84	160	2,1	3
<i>Carbon Type I</i>	3	1,90	380	1,8	0,5
<i>Carbon Type II</i>	9	1,90	230	2,6	1,0
<i>Aramiil (Kevlar)</i>	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
<i>Cellulose</i>	-	1,2	10	0,4	-
<i>Wood</i>	-	1,5	71	0,9	-
<i>Nylon (Type 242)</i>	>4	1,14	4	0,9	15

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών ενίσχυσης σκυροδέματος (*Johnston, 1982*).

### 1.5.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες (SFRC)

Τα τελευταία χρόνια, το οπλισμένο σκυρόδεμα από χαλύβδινες ίνες έχει προχωρήσει σταδιακά από ένα προσδοκώμενα χρήσιμο υλικό σε ένα υλικό το οποίο έχει πλέον αναγνωριστεί σε πολλές εφαρμογές μηχανικής (*Aggeliki, 2016*). Τον τελευταίο καιρό γίνεται συχνότερη η αντικατάσταση του χαλύβδινου οπλισμού με οπλισμένο σκυρόδεμα από χαλύβδινες ίνες.

Διάφοροι τύποι ινών χάλυβα χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του σκυροδέματος. Οι κυκλικές ίνες είναι ο συνηθέστερος τύπος και η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 mm. Οι ορθογώνιες ίνες χάλυβα έχουν συνήθως πάχος 0,25 mm, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σύρματα 0,3 έως 0,5 mm (*Aggeliki, 2016*).

Χρησιμοποιούνται επίσης παραμορφωμένες ίνες με τη μορφή δέσμης. Το κύριο πλεονέκτημα των παραμορφωμένων ινών είναι η ικανότητά τους να κατανέμονται ομοιόμορφα εντός της μήτρας. Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός πως η χρήση των προαναφερθέντων μεταλλικών ινών είναι συγκριτικά πιο ακριβή διαδικασία από τις έτερες επιλογές και αυτό ενδεχομένως να περιορίζει τη χρήση τους σε κάποιο βαθμό.

Όπως αναφέρει ο Singh (2017), αποτελεί καθιερωμένο γεγονός μέχρι τώρα ότι όταν το σχετικά μικρές και διακριτές ίνες μιγνύονται στο σκυρόδεμα τυχαία, αλλά πάντοτε ομοιόμορφα (Εικόνα 4), σε όλη τη μάζα του σκυροδέματος, το τελικό παράγωγο επιδεικνύει καλύτερη απόδοση όχι μόνο στα στατικά φορτία, αλλά και υπό εξέταση κόπωσης, σοκ και παρόμοιου τύπου φορτίσεις.



*Εικόνα 4 . Απεικόνιση εργαστηριακού δείγματος από ενισχυμένο σκυρόδεμα με ίνες από ασάλι (Singh, 2017)*

Η χρήση αντίστοιχων ινών διαπιστώθηκε ότι είναι πιο αποτελεσματικές όταν η αντοχή εφελκυσμού των ινών που χρησιμοποιούνται στο μείγμα σκυροδέματος είναι συγκρίσιμη με την αντοχή της μήτρας κονιάματος. Αναφέρεται ότι οι βραχείες και διακριτές ίνες χάλυβα είναι πιο αποτελεσματικές στη βελτίωση των εύθραυστων χαρακτηριστικών του σκυροδέματος από τις συνθετικές ίνες.

### 1.5.3 Ενισχυμένο σκυρόδεμα από ίνες προπυλενίου (PFR)

Η τροποποίηση και κατ' επέκταση αναβάθμιση όπως και ενίσχυση δομών σκυροδέματος με την χρήση πολυμερών υλικών έχει μελετηθεί εδώ και τέσσερις δεκαετίες (Dodson, 1989). Οι ίνες πολυπροπυλενίου προτάθηκαν για πρώτη φορά ως πρόσμικτο υλικό στο σκυρόδεμα το 1965 για την κατασκευή κτιρίων ανθεκτικών στην πιθανότητα έκρηξης από τον αμερικανικό στρατό και το αντίστοιχο Σώμα Μηχανικών (Singh, 2011).

Από τότε η χρήση αυτών των ινών έχει αυξηθεί σημαντικά στην κατασκευή δομικών έργων, επειδή η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα βελτιώνει την ανθεκτικότητα, την αντοχή στην κάμψη, την αντοχή σε εφελκυσμό και την αντοχή στην κρούση, καθώς και τη λειτουργία σε πιθανή έκθεση αστοχίας του σκυροδέματος. Οι παραγόμενες ίνες από πολυπροπυλένιο είναι φτηνές στην κατασκευή, άφθονες και ευκόλως διαθέσιμες. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά που κατατάσσουν την αυξημένη χρήση τέτοιας φύσεως υλικού στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι τα γεγονόσ πως υπάρχει μια στερεοχημική ατομική διάταξη στο πολυμερές μόριο και υψηλή κρυσταλλικότητα.

Η χημική αδράνεια του υλικού καθιστά τις ίνες ανθεκτικές στις περισσότερες χημικές ουσίες. Οποιαδήποτε χημική ουσία που δεν θα προσβάλει τα συστατικά του σκυροδέματος δεν θα έχει καμία επίδραση στις ίνες. Η υδρόφοβη επιφάνεια του υλικού δεν απορροφά υγρασία από την πάστα τσιμέντου με αποτέλεσμα να βοηθά στην αποτροπή της διάλυσης των τεμαχισμένων ινών κατά τη διάρκεια της ανάμειξης. Επίσης ο προσανατολισμός τους αφήνει την μεμβράνη αδύναμη στην πλάγια της κατεύθυνση η οποία διευκολύνει τις μαρμαρυγές. Η μήτρα τσιμέντου μπορεί ως εκ τούτου να διεισδύσει στη δομή πλέγματος μεταξύ των μεμονωμένων ινών και να δημιουργήσει έναν μηχανικό δεσμό μεταξύ της μήτρας και των ινών (Singh, 2011).

## 2.0 Διατμητική συμπεριφορά δοκών

---

Η αντίθεση με ένα απλό σκυρόδεμα, από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες είναι ότι διαθέτει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες με ενισχυμένη αντοχή σε συνθήκες εφελκυσμού καθώς και γενικότερα αυξημένη αντοχή λόγω των χαλύβδινων ινών που κατανέμονται τυχαία και προσανατολίζονται στο μίγμα σκυροδέματος.

Οι προαναφερθείσες ίνες μεταφέρουν τις εφελκυστικές τάσεις που τους ασκούνται, κατά μήκος των συμπλεγμάτων που σχηματίζονται εσωτερικά στο δομικό μέλος μόλις η τάση που προκαλείται από εξωτερική φόρτιση υπερβεί την περιοριστική τάση ρωγμών του υλικού. Η παρουσία των ινών στο σώμα του προϊόντος καθυστερεί σημαντικά τη δημιουργία, πιθανή διεύρυνση και την επακόλουθη διάδοση ρωγμών στο υπόλοιπο σώμα του μέλους.

Η ενισχυμένη αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος οδηγεί επίσης στη βελτίωση της διατμητικής ικανότητας του μέλους. Εξαιτίας αυτού, η χρήση της δοκών τύπου SFRC (steel fiber reinforced concrete) συμβάλλει στην εκπλήρωση των απαραίτητων απαιτήσεων διατμητικής ενίσχυσης στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος και αυτό επίσης συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης των συμβατικών ράβδων χαλύβδινης τάσης που απαιτούνται υπό μορφή συνδετήρων, που παρέχονται στα μέλη για να αντιστέκονται στις τάσεις διατμήσεως υψηλότερες από την ικανότητα διάτμησης του σκυροδέματος (Ahmed et al. 2015; Khuntia and Stojadinovic 1999; Sharma 1986; Swamy and Mangat 1974).

Οι δοκοί από σκυρόδεμα (που οπλίζονται είτε με συμβατικές διαμήκειες ράβδους είτε με τις χαλύβδινες ίνες) πριν από την αστοχία τους, συμπεριφέρονται παρόμοια με τις δοκούς που κατασκευάζονται από χάλυβα ή οποιοδήποτε άλλο παρόμοιο δομικό υλικό. Φέρουν λοιπόν τις τάσεις κάμψης καθώς και τις τάσεις διάτμησης που προκαλούνται στο τμήμα λόγω της εξωτερικής φόρτισης.

Κατά την φόρτιση μιας δοκού παρατηρούνται τα κάτωθι: α) στην κορυφή της δοκού καθώς και στην κάτω επιφάνεια της, η τάση διάτμησης είναι μηδέν, β) μία από τις κύριες τάσεις ενεργεί σε κατεύθυνση παράλληλη προς την κύρια επιφάνεια της δοκού ενώ γ) οι άλλες επενεργούν κάθετα προς αυτήν.

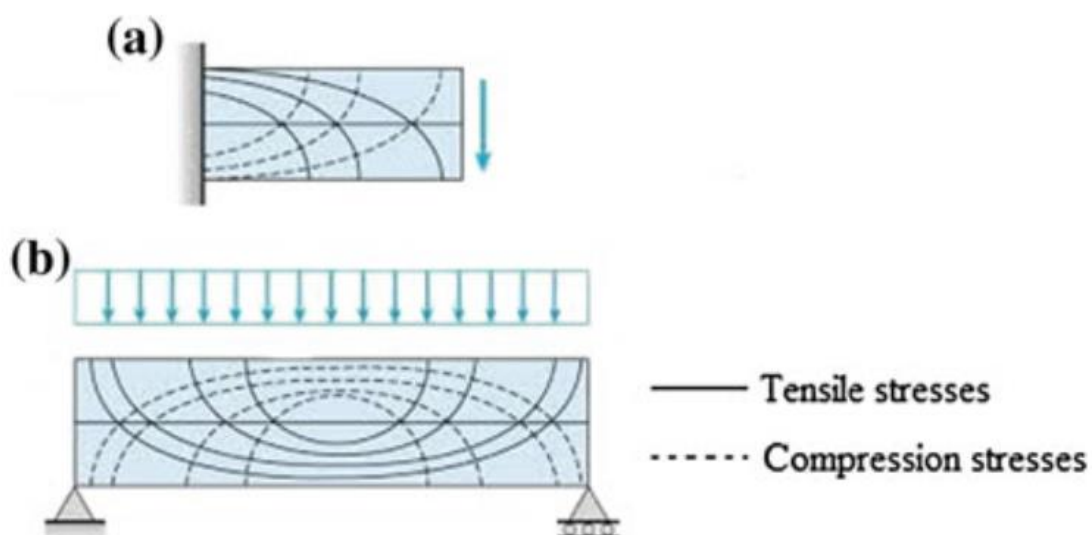


Επομένως, η μη μηδενική τάση η οποία δρα παράλληλα με την άνω όψη είναι πάντα σε συνθήκη συμπίεσης, ενώ στην κατώτερη επιφάνεια της δέσμης κάτω από τις συνθήκες φορτίου βαρύτητας εφελκυστικής φύσης

Μια αλλαγή στην κατεύθυνση της φόρτισης αντιστρέφει τη φύση των τάσεων στην κορυφή της δοκού και στην κάτω της επιφάνεια αντίστοιχα. Συνεπώς, σε ένα υλικό το οποίο είναι ασθενές, ειδικά σε συνθήκες φόρτισης, π.χ. το απλό σκυρόδεμα, οι ρωγμές εφελκυσμού που θα προκύψουν σχηματίζονται κατά κατεύθυνση κάθετη προς τον άξονα των κύριων τροχιών της εφελκυστικής τάσης μόλις το μέγεθος της τάσης που προκαλείται από το φορτίο υπερβεί την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος.

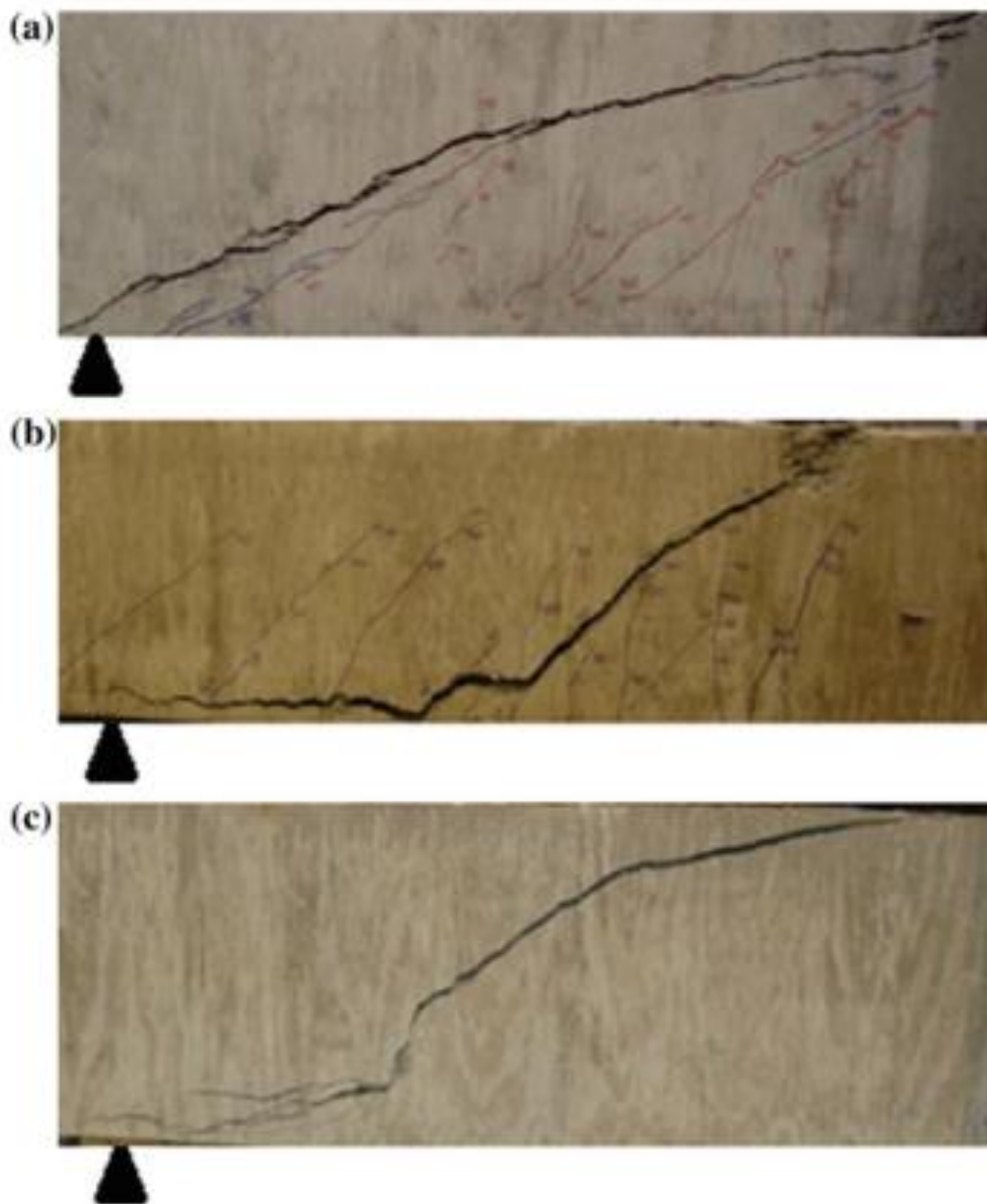
Καθώς η κύρια τάση θλίψεως σε μια δοκό ενεργεί κανονικά με την αντίστοιχη τάση εφελκυσμού, οι τροχιές που δείχνουν τη μεταβολή της τάσης συμπίεσης (Εικόνα 5) υποδεικνύουν την πιθανή διεύθυνση των ρωγμών που θα αναπτυχθούν σε αυτό το σημείο το οποίο υπέρκειται της τροχιάς τάσης εφελκυσμού.

Στη μέση απόσταση της δοκού, συνεπώς οι ρωγμές εφελκυσμού προέρχονται από την κάτω επιφάνεια της (που συνήθως φέρουν την υψηλότερη δυνατή τιμή της τάσης εφελκυσμού) και εκτείνονται προς το τμήμα του ουδέτερου άξονα ενώ, κοντά στην ακραία ζώνη της δοκού, φαίνεται σε κάποια γωνία προς τον άξονα δέσμης.



Εικόνα 5 Γραφική απεικόνιση δοκών υπό φορτίο. α) μία δοκός που φέρει συγκεντρωμένο φορτίο στο ελεύθερο άκρο της. β) δοκός υπό ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο καθ' όλο το εύρος της (Singh 2017)

Οι ρωγμές και οι αστοχίες αναπτύσσονται σε μια δοκό μόλις η τάση εφελκυσμού στο μέλος υπερβεί τη δύναμη / αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος. Δύναται να συμβεί οπουδήποτε στην ακτίνα κατά μήκος του διαστήματος. Κατά κύριο λόγο έχει παρατηρηθεί ότι η ρωγή αστοχίας σχηματίζεται κοντά στο μέσο άνοιγμα της δοκού, σε περίπτωση που αυτή δεν είναι επαρκώς ενισχυμένη (Εικόνα 6).



Εικόνα 6 Τυπική απεικόνιση αστοχίας σε τρεις (3) δοκούς από σκυρόδεμα κατά την πειραματική διαδικασία μελέτης της διατμητικής αντοχής τους (Singh, 2017)

Παράλληλα, όταν το αποτέλεσμα της διατμητικής δύναμης κυριαρχεί επί των αποτελεσμάτων κάμψης, οι πιέσεις διαγώνιου εφελκυσμού και οι πιέσεις διαγώνιας-συμπίσεως δρουν ταυτόχρονα σε ένα τμήμα της δέσμης, οδηγώντας έτσι στο σχηματισμό διαγώνιας ρωγμής στον ιστό της δοκού.

Αυτό συμβαίνει κανονικά όταν το μέγεθος της διαγώνιας τάσης ισούται με την περιοριστική αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος. Εντούτοις, στην περίπτωση που η δοκός ενισχύεται επαρκώς με συνδετήρες, το τμήμα αποτυγχάνει με θραύση του σκυροδέματος όταν η τιμή του της διαγώνιας τάσης συμπίεσης φθάνει τη δύναμη θραύσης του σκυροδέματος.

Η δοκός η οποία έχει υποστεί διαγώνια ρήξη, συνεχίζει να φέρει τη δύναμη διάτμησης μέσω ενός αριθμού μηχανισμών μεταφοράς αυτής (Singh, 2011).

Σε αυτό το σημείο φέρει σημασία το γεγονός πως κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας γίνεται ανακατανομή στις φέρουσες τάσεις. Επί του παρόντος, εντοπίζονται πέντε τύποι μηχανισμών μεταφοράς της διατμητικής τάσης, οι οποίοι πιστεύεται ότι είναι υπεύθυνοι για τη αντίστοιχη αντοχή ενάντια στη διάτμηση που παρουσιάζει ένα τμήμα οπλισμένου σκυροδέματος:

1. Μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα που εντοπίζεται στη ζώνη εφελκυσμού – συμπίεσης.
2. Μετατόπιση διατμητικής τάσης που προκύπτει λόγω συσσώρευσης αδρανών (aggregates).
3. Δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού.
4. Τοξοειδής αστοχία (arch action)
5. Τάσεις παραμένοντος εφελκυσμού που μεταδίδονται απ 'ευθείας κατά μήκος των ρωγμών.

## 3.0 Ερευνητικές Προσεγγίσεις

---

### 3.1 Βιβλιογραφική Μελέτη – Ανασκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις προγενέστερες από την χρονολογία συγγραφής της πτυχιακής εργασίας επιστημονικές / ερευνητικές προσεγγίσεις στο μείζονος σημασίας εγχείρημα της ενίσχυσης δοκών σκυροδέματος με τη χρήση μεταλλικών ινών.

Διάφοροι κανονισμοί και ερευνητές έχουν προτείνει εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες με ή χωρίς συμβατικό μεταλλικό οπλισμό (συνδετήρες), βάσει πειραματικών ερευνών.

Σε αντίθεση με ένα απλό (καθαρό) μέλος σκυροδέματος, μια δοκός με ινοπλισμένο σκυροδέμα διαθέτει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες με ενισχυμένη αντοχή σε πιθανές εφελκυστικές τάσεις λόγω των χαλύβδινων ινών που κατανέμονται και προσανατολίζονται τυχαία στο μίγμα σκυροδέματος. Αυτές οι ίνες μεταφέρουν τις εφελκυστικές τάσεις κατά μήκος των ρωγμών που σχηματίζονται στο δομικό μέλος μόλις η τάση που προκαλείται από εξωτερική φόρτιση υπερβεί την κρίσιμη τάση ρηγμάτωσης του υλικού. Οι ίνες καθυστερούν σημαντικά τη διεύρυνση των ρωγμών και την επακόλουθη διάδοσή τους στο μέλος.

Η ενισχυμένη αντοχή στον εφελκυσμό του σκυροδέματος οδηγεί επίσης στη βελτίωση της ικανότητας αντοχής ενάντια στη διάτμηση του μέλους. Εξαιτίας αυτού, η χρήση των προαναφερθέντων ινών συμβάλλει στην εκπλήρωση των ελάχιστων απαιτήσεων διατμητικής ενίσχυσης στα δομικά στοιχεία από σκυροδέμα και αυτό επίσης συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης της συμβατικής τάσης η οποία απαιτείται από τις χαλύβδινες ράβδους που ενισχύουν την δοκό με τη μορφή συνδετήρων, παρέχοντας στα μέλη για να αντιστέκονται στις τάσεις διάτμησης αντοχές, υψηλότερες από την ικανότητα διάτμησης του απλού (καθαρού) σκυροδέματος.

Οι ίνες χάλυβα σαν προσθετικό / ενισχυτικό υλικό, αυξάνουν την αντοχή διάτμησης και το φορτίο που αντιστοιχεί για την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Η αποτελεσματικότητα αυτή των ινών για την αύξηση της διατμητικής αντοχής, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τις ιδιότητες της μήτρας, τις ιδιότητες των ινών καθαυτών (π.χ. ιδιότητες υλικών, όψη, αναλογία και σχήμα), την ποσοστιαία περιεκτικότητα της δοκού σε ίνες καθώς και την τάση συγκόλλησης έναντι της απόκρισης ολίσθησης αυτών.

Το 1987, οι Narayanan και Darwish ισχυρίστηκαν ότι η τελική τιμή αντοχής ενάντια στη διάτμηση αυξήθηκε σε υψηλότερο βαθμό όταν χρησιμοποιήθηκαν αυξημένες τιμές αναλογίας των διαστάσεων των ινών. Χρησιμοποιώντας στην συνέχεια αντίστοιχα υψηλότερες τιμές το παρατηρούμενο αποτέλεσμα είχε μια σχετικά μικρή βελτίωση συνολικά στις αντοχές διάτμησης (Narayanan, 1987).

Αφ' ετέρου, άλλοι ερευνητές ισχυρίστηκαν το αντίθετο. Στην πραγματικότητα, άλλοι συγγραφείς ανέφεραν στο ερευνητικό τους έργο, ότι η αντοχή στη διάτμηση του σκυροδέματος θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά ακόμα και με τη χρήση μικρότερων ποσοστών χαλύβδινων ινών (Conforti 2014; Oh et al. 1999; di Prisco et al., 2013). Ο Conforti (2014) επίσης υποστήριξε πως οι ίνες μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο οι δοκοί σκυροδέματος οδηγούνται στην αστοχία ενισχύοντας την ολκιμότητα και τη φέρουσα ικανότητα των ινών.

Άλλοι συγγραφείς εστιάζουν στα φυσικά χαρακτηριστικά των ινών και όχι την ποσότητα τους σε σχέση με την δοκό σκυροδέματος. Για την ακρίβεια και πιο συγκεκριμένα συνδέουν την αύξηση της διατμητικής αντοχής με τον όγκο των ινών. Οι Greenough και Nehdi (2008) έδειξαν ότι ένα ποσοστό ινών χάλυβα ίσο με 1% μπορεί να αυξήσει την ικανότητα διάτμησης έως και 128% όσον αφορά τις δοκούς αναφοράς. Βέβαια σε συσχετισμό με το παραπάνω οι Dinh et al. (2010) έδειξαν ότι πέρα από το ποσοστό όγκου της τάξης του 1% η αύξηση της διατμητικής αντοχής είναι σχετικά μικρή. Οι Majdzadeh et al. (2006) επιβεβαίωσαν ότι το όριο ποσοστού όγκου στο 1% αποτελεί και το βέλτιστο και δεν ανιχνεύονται οφέλη με ποσοστά άνω του 1%. Αντίθετα, οι Oh et al. (1999) αναφέρουν ότι η αύξηση ήταν συνολικά περίπου 100% για ποσοστό όγκου ινών μεταξύ 0 και 2%.

## 3.2 Εξισώσεις εκτίμησης διατμητικής αντοχής

Από την δεκαετία του '80 οι ερευνητές πρότειναν εξισώσεις για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής ( $v_u$ ), οι περισσότερες από τις οποίες περιέχουν τον συντελεστή γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών ( $F$ ), ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο διαστάσεων των ινών και το ποσοστό ινών ( $v_f$ ). Επιπλέον, πολλοί από αυτούς περιέχουν τον λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ).

Πιο συγκεκριμένα στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται μια μεστή και συνοπτική αναφορά με χρονολογική σειρά (αυξητική), στην αρχική θεώρηση του κάθε ερευνητή/ων κατά την προσέγγιση της μελέτης της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Επιπροσθέτως παρουσιάζονται οι μαθηματικές φόρμουλες και εξισώσεις που προκύπτουν από την έρευνα για τον υπολογισμό αυτής και τέλος τα γενικά συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η κάθε αναφορά.

Τα ακριβή στοιχεία από τα δημοσιευμένα πειράματα έχουν συλλεχθεί από δύο (2) συγκεντρωτικές δημοσιεύσεις ([Abbas and Khan, 2016](#); [Zhang et al., 2016](#)) από τις οποίες κατέστη δυνατή η συλλογή, καταγραφή και χρήση τους για τους σκοπούς της ερευνητικής διαδικασίας που παρουσιάζεται στην παρούσα πτυχιακή εργασία.

### 3.2.1 Sharma A. K. (1986)

Στην παρούσα έρευνα, προτάθηκε η ακόλουθη, απλή εμπειρική εξίσωση, βασισμένη σε ίδια αποτελέσματα για την πρόβλεψη της αντοχής διατμήσεως των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος από χαλύβδινη ίνα (Sharma, 1986) :

$$v_u = k f_t' \left( \frac{a}{d} \right)^{0.25} (MPa) \quad (1)$$

όπου:  $v_u$  είναι η διατμητική τάση σε βλάβη με μετρούμενη μονάδα μέτρησης τα MPa,  $a$  είναι το διατμητικό ύψος,  $d$  είναι το στατικό ύψος, η σταθερά  $k$  αντιστοιχεί σε 1,0 εάν το  $f_t'$  λαμβάνεται με άμεση δοκιμή τάσης, σε 2/3 εάν το  $f_t'$  λαμβάνεται με έμμεση δοκιμή τάσης, ενώ σε 4/9 εάν το  $f_t'$  λαμβάνεται χρησιμοποιώντας μέτρο ρηγμάτωσης. Η μεταβλητή  $f_t'$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Η απλότητα της εξίσωσης (1) την καθιστά ελκυστική στη χρήση, αλλά σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στο γεγονός πως η παραπάνω εξίσωση δεν αναφέρει ρητά παράγοντες που είναι γνωστό ότι επηρεάζουν σημαντικά την διατμητική αντοχή, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού των ινών, του σχήματος των ινών και του λόγου κάμψης.

Επιπλέον, η εξίσωση (1) υποτιμά την επίδραση του λόγου ( $a/d$ ). Κατά συνέπεια θεωρείται υπερβολικά συντηρητική για χαμηλές τιμές  $a/d$  και μη συντηρητική για υψηλές τιμές. Ο μέσος όρος του λόγου της μετρούμενης διατμητικής αντοχής και της υπολογιζόμενης διατμητικής αντοχής ήταν 1,26 για τις 139 δοκιμές και ο συντελεστής μεταβολής αυτής της αναλογίας ήταν 37% (Sharma, 1986).

### 3.2.2 Narayanan και Darwish (1987)

Οι Narayanan και Darwish (1987), προτείνουν μια εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης διατμητικής τάσης στην αστοχία  $v_u$ :

$$v_u = e \left[ 0.24 f_{spfc} + 80 \rho \frac{d}{a} \right] + v_b (MPa) \quad (2)$$

όπου  $e$  είναι ο παράγοντας δράσης της ασπίδας και ισούται με 1,0 για ( $a/d \geq 2,8$ ) και 2,8  $d/a$  για ( $a/d < 2,8$ ),  $f_{spfc}$  είναι η αντοχή κυλίνδρου σε διάρρηξη μετρούμενη σε (MPa) και προκύπτει από την παρακάτω φόρμουλα:

$$f_{spfc} = \frac{f_{cuf}}{(20 - \sqrt{F})} 0,7 + 1\sqrt{F} \quad (2.1)$$

Η μεταβλητή  $f_{cuf}$  είναι η αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε MPa,  $\rho$  είναι ο λόγος διαμήκους ενίσχυσης,  $v_b$  είναι η αύξηση της διατμητικής τάσης λόγω της προσθήκης ινών χάλυβα, και συσχετίζεται με την εξίσωση  $v_b = 0,41 \tau F$ , όπου  $\tau$  είναι η μέση τάση συνάφειας ινών και σκυροδέματος,  $L_f$  είναι το μήκος της ίνας σε mm,  $l_f$  είναι η διάμετρος της ίνας (mm),  $v_f$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό των ινών και  $D_f$  είναι ένας συντελεστής δεσμού, ίσος με 1,0 για τις αγκιστρωμένες ίνες (hooked fibers).

Σύμφωνα με τους συγγραφείς της παρούσας έρευνας, ο πρώτος όρος στις παρενθέσεις στην εξίσωση (2) αντιπροσωπεύει την συνεισφορά των ινών σε σχέση με την αντοχή του κυλινδρικού δοκιμίου, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τη θωράκιση, και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει την συνεισφορά των ινών σε μια κεκλιμένη ρωγμή.

Ο συντελεστής γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών  $F$  για τον υπολογισμό της εξίσωσης μέσω της οποίας προκύπτει η μεταβλητή ( $f_{spfc}$ ) δεν αφορά μόνο τον όγκο και την όψη των ινών αλλά και τον συντελεστή δεσμού  $df$ .

Η εξίσωση (2) θεωρεί τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή, συμπεριλαμβανομένου του όγκου και του σχήματος των ινών, του λόγου ( $a/d$ ) της αντοχής του σκυροδέματος.

### 3.2.3 Ashour, Hasanain και Wafa. (1992)

Οι Ashour *et al.* (1992), μέσω της έρευνας τους προτείνουν την παρακάτω εξίσωση (3), για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής μιας δοκού τύπου SFRC. Δοκιμάστηκαν στο σύνολο δεκαοχτώ (18) δοκοί από υψηλής αντοχής σκυρόδεμα ενισχυμένο με μεταλλικές ίνες. Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα που προέκυψαν τους οδήγησαν στο να προτείνουν δύο εξισώσεις (3 & 4) για την εκτίμηση της αντοχής αυτών των δοκών:

για  $a/d \geq 2.5$

$$v_u = \left( 2.11^3 \sqrt{f'_c + 7F} \right) \left( \rho \frac{d}{\alpha} \right)^{0.333} \text{ (MPa)} \quad (3\alpha)$$

για  $a/d < 2.5$

$$v_u = \left( \left( 2.11^3 \sqrt{f'_c + 7F} \right) \left( \rho \frac{d}{\alpha} \right)^{0.333} \right) \frac{2.5}{a/d} + v_b \left( 2.5 - \frac{a}{d} \right) \text{ (MPa)} \quad (3\beta)$$

Όσον αφορά την πρώτη εξίσωση (3) είναι παρόμοια με αυτή που είχε εκφραστεί στην εργασία του Zsutty (1971) τροποποιημένη πάντα για το γεγονός πως οι δοκοί στη νέα περίπτωση έχουν ενισχυθεί από ίνες.



Όσον αφορά την δεύτερη εμπειρική εξίσωση (4), προέκυψε από την τροποποίηση μιας παρόμοια εξίσωσης όπως παρουσιάστηκε στο ACI Committee (1999) προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος της διατομής ( $a/d$ ), της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος ( $f_c$ ), του συντελεστή ινών  $F$  και ποσοστού οπλισμού  $\rho$ .

$$v_u = (0.7 \sqrt{f'_c} + 7 F) \frac{d}{a} + 17.20 \rho \frac{d}{a} (MPa) \quad (4)$$

### 3.2.4 Khuntia, Stojadinovic και Goel (1999)

Κατά την ερευνητική τους διαδικασία οι Khuntia *et al.* (1999), προτείνουν την παρακάτω εξίσωση μέσω της οποίας προκύπτει η δικιά τους υπολογιστική προσέγγιση για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής :

$$v_u = (0.167 a + 0.25 F) \sqrt{f'_c} (MPa) \quad (5)$$

Όπου  $a = 1,0$  για  $(a/d) \geq 2,5$  και  $2,5 d/a$  για  $(a/d) < 2,5$

### 3.2.5 Swamy, Jones Chiam (1993)

Οι Swamy *et al.* (1993) πρότειναν την παρακάτω σχέση για την διατμητική αντοχή των δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες :

$$v_u = 0.37 \tau \frac{l_f}{d_f} v_f + v_c (MPa) \quad (6)$$

όπου  $v_c$  είναι η διατμητική συνεισφορά του σκυροδέματος. Συνιστάται να υπολογίζεται σύμφωνα με τον Κανονισμό (ACI Committee, 1999) που δίνεται από την εξίσωση. (7)

$$v_c = 0.167 \sqrt{f'_c} (MPa) \quad (7)$$

### 3.2.6 Shin, Oh και Ghosh (1994)

Με την σειρά τους οι Shin *et al.* (1994) πρότειναν την παρακάτω μαθηματική εξίσωση για  $(a/d) < 3$  :

$$v_u = 0.22 f_{spfc} + 217 \rho \frac{d}{a} + 0.834 F(MPa) \quad (8)$$

Όπως και για  $(a/d) > 3$  :

$$v_u = 0.19 f_{spfc} + 93 \rho \frac{d}{a} + 0.834 F(MPa) \quad (9)$$

### 3.2.7 Kwak *et al.* (2002)

Οι Kwak *et al.* (2002) ανέπτυξαν μια νέα εξίσωση για την διατμητική αντοχή συνδυάζοντας τη μορφή της εξίσωσης του Zsutty (1971) ώστε να καθίσταται δυνατή η διαδικασία υπολογισμού της επίδραση της αντοχής σε εφέλκυσμό με ένα πρόσθετο όρο ινών για να ληφθεί υπόψη η άμεση συμβολή των ινών στην αντοχή σε διάτμηση.

$$v_u = 3.7 e f_{spfc}^{\frac{2}{3}} \left( \rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.8 v_b^{0.97} (MPa) \quad (10)$$

Σε αυτή την εξίσωση, η τιμή του  $e$  είναι ίση με 1,0 για  $(a/d > a/d_{transition})$ . Η εξίσωση αυτή παρείχε μέση τιμή 1,0 για το λόγο της μέτρησης της διατμητικής αντοχής σε υπολογισμένη διατμητική αντοχή και ελαχιστοποιεί τον συντελεστή μεταβολής (COV = 14,9%) για τις ακόλουθες τιμές των σταθερών:  $A = 2,1$ ,  $B = 0,8$ ,  $a / d_{transition} = 3,5$ .

### 3.2.8 Slater, Moni και Alam (2012)

Οι Slater *et al.* (2012), πρότειναν μια διαφορετική εμπειρική εξίσωση για την διατμητική αντοχή των δοκών τύπου SFRC για λόγο διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος  $(a / d)$  μικρότερο και μεγαλύτερο από 3, για υψηλή και χαμηλή αντοχή

σε θλίψη και για αγκιστρωμένες, απλές ή πτυχωτές ίνες, χρησιμοποιώντας γραμμική και μη γραμμική παλινδρόμηση (linear regression). Η παρακάτω εξίσωση (11), αφορά  $(a/d) < 3.0$ , χαμηλή αντοχή σε θλίψη ( $20 \text{ MPa} < f_c' < 50 \text{ MPa}$ ) και αγκιστρωμένες ίνες χρησιμοποιώντας ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης.

$$v_u = \frac{7}{500} + \frac{176}{5} (f_c')^{-\frac{22}{55}} + \frac{11}{50} \rho^{-\frac{27}{50}} + 545 \rho \frac{d}{a} - \frac{23}{5} F^{-\frac{3}{20}} (\text{MPa}) \quad (11)$$

όπου το  $F$  είναι η παράμετρος της φύσης της ίνας και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$F = \frac{l_f}{d_f} v_f$$

### 3.3 Προγενέστερες Προσεγγίσεις

Στο παρόν σημείο κρίθηκε χρήσιμο να γίνει μια σχετικά εκτενής αναφορά στις προγενέστερες εργασίες πάνω στις οποίες στηρίχθηκε και η αρχική θεώρηση της παρούσας πτυχιακής. Για την ακρίβεια το ερευνητικό κομμάτι της πτυχιακής στηρίχθηκε στην συλλογή ποσοτικών στοιχείων πειραμάτων για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής από τις παρακάτω βιβλιογραφικές αναφορές. Τα στοιχεία παρουσιάζονται εκτενέστερα στα παρακάτω κεφάλαια.

#### 3.3.1 Roberts and Ho (1982)

Κατά την έρευνα τους οι Roberts και Ho (1982), παρουσιάζουν τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών ενισχυμένων με μεταλλικές ίνες δοκών από σκυρόδεμα. Οι δοκοί που χρησιμοποιήθηκαν περιείχαν συμβατικά ενισχυμένες δοκούς σκυροδέματος από χάλυβα αλλά και επιπλέον ενίσχυση από διαφορετικά ανά δοκό ποσοστά ινών χάλυβα. Όλα τα δείγματα τέθηκαν υπό συνθήκες φόρτισης από ένα κεντρικό φορτίο κατανεμημένο μέσω δύο πλάκων. Τα αποτελέσματα που παρουσίασαν επιβεβαιώνουν ότι η χρήση ενίσχυσης μέσα από ίνες χάλυβα μπορεί να αποτρέψει την αστοχία διάτμησης.

### 3.3.2 Lim *et al.* (1987)

Στη παρούσα εργασία οι Lim *et al.*, (1987) παρουσιάζουν μια αναλυτική προσέγγιση για την πρόβλεψη και εκτίμηση της φερόμενης αντοχής ενάντια στη διάτμηση και τη δυναμικότητα ροπής του ενισχυμένου από μεταλλικές ίνες σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα αναλύσεις πλαστικότητας για την ικανότητα ενάντια στη διάτμηση των δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα επεκτάθηκε σε δοκούς ενισχυμένους από ίνες χάλυβα. Η ανάλυση της δυναμικής ροπής πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη συνηθισμένη - ανάλυση διατομών, πλαστικοποιημένων καταπονήσεων και δυνάμεων. Καθορίζοντας τις σχετικές ικανότητες για ένα δεδομένο δείγμα δοκών υπό φόρτιση σε μια σειρά λόγων μήκους/πλάτους, η ικανότητα και ο τρόπος διαχείρισης της αστοχία μπόρεσαν να εκτιμηθούν.

Τα παρατηρούμενα κρίσιμα φορτία αστοχίας καθώς και οι τρόποι αστοχίας για 22 δοκιμαστικές δοκοί παρουσίασαν αποδεκτή συμφωνία με τις αρχικές προβλέψεις. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν από τους ερευνητές με σκοπό την τελική εκτίμηση τους. Η παρούσα προσέγγιση επέτρεψε όπως αναφέρουν την άμεση σύγκριση μεταξύ της αποτελεσματικότητας των τεχνητών υλών και των ινών ως ενίσχυση ενάντια στη διάτμηση. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι οι ίνες μπορούν να αντικαταστήσουν τους συνδετήρες εν μέρει ή και καθολικά.

### 3.3.3 Kwak *et al.* (2002)

Στην κομβική εργασία των Kwak *et al.*, (2002), δώδεκα δοκιμές διεξήχθησαν σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος. Οι παράμετροι των προαναφερθέντων ξεχωρίζουν σε τρία ποσοστά χάλυβα (0, 0,5 και 0,75%), τρεις αναλογίες βάθους διάτμησης (2, 3 και 4) και δύο τιμές αντοχής θλίψεως σκυροδέματος (31 και 65 MPa).

Τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά κατέδειξαν ότι η κρίσιμη αντοχή κατά τη θλίψη και η τελική αντοχή σε πιθανή αστοχία λόγω της διατμητικής αντοχής, αυξανόταν με τον σε συσχετισμό του ποσοστού όγκου των ινών, με τη μείωση του λόγου διατομής της κλίμακας διάτμησης και την αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Καθώς αυξάνονταν η

περιεκτικότητα σε ίνες, η λειτουργία της πιθανής αστοχίας άλλαζε από τη κατάσταση διάτμησης σε κατάσταση κάμψης.

Τα αποτελέσματα από 139 δοκιμές ενισχυμένου σκυροδέματος χωρίς συνδετήρες χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των υφιστάμενων και προτεινόμενων εμπειρικών εξισώσεων για την εκτίμηση της αντοχής σε διάτμηση.

Ο δοκιμαστικός πληθυσμός περιελάμβανε δοκούς με μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων. Άξιο αναφοράς το γεγονός πως οι περισσότερες δοκοί ήταν αναλογικά μικρές.

Η αξιολόγηση έδειξε ότι οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Narayanan και Darwish καθώς και οι εξισώσεις που προτείνονται στην εργασία τους παρείχαν τις πιο ακριβείς εκτιμήσεις της αντοχής σε διάτμηση όπως και το σημείο έναρξης της αστοχίας.

#### 3.3.4 Cucchiara *et al.* (2004)

Στην παρούσα εργασία οι Cucchiara *et al.*, (2004) παρουσίασαν τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, που πραγματοποιήθηκαν σε ορθογώνιου σχήματος, απλά υποστηριζόμενες δοκούς. Οι συγκεκριμένες είχαν ενισχυθεί από αγκιστρωτές χαλύβδινες ίνες με ή και χωρίς συνδετήρες. Για την εκτέλεση των δοκιμών τα δείγματα υποβλήθηκαν σε συμμετρικά, κάθετα φορτία.

Οι δοκιμές, έγιναν με ελεγχόμενες μετατοπίσεις, καθώς έτσι επιτρέπουν την καταγραφή πλήρων καμπυλών φορτίου-εκτροπής μέσω των οποίων είναι δυνατόν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα διάχυσης και την όλκιμη συμπεριφορά μέχρι την αναμενόμενη αστοχία.

Ανάλογα με το μέγεθος της εγκάρσιας φόρτισης, το ογκομετρικό ποσοστό των ινών που προστίθενται στο μίγμα και το διάκενο διατμήσεως, ο μηχανισμός της αστοχίας οφείλεται σε κυρίαρχη διάτμηση ή κάμψη, που δείχνει την επίδραση των προαναφερθέντων διαρθρωτικών παραμέτρων στην ικανότητα αντίστασης στο φορτίο και τη συμπεριφορά μετά την κορυφή του.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συμπερίληψη ινών σε επαρκές ποσοστό μπορεί να αλλάξει τον τρόπο αστοχίας, χαρακτηρίζοντας την κατάρρευση της διάτμησης σε έναν ελαστικό μηχανισμό κάμψης, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα

επίτευξης ανάλογων επιδόσεων χρησιμοποιώντας ενισχυτικές ίνες αντί να αυξήσει την ποσότητα εγκάρσιου οπλισμού.

Οι τελικές τιμές των διατμητικών τάσεων που καταγράφονται πειραματικά συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από ήμι-εμπειρικές (semi empirical) εξισώσεις που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία και ο συσχετισμός που προκύπτει αξιολογήθηκε ως ικανοποιητικός.

### 3.3.5 Parra-Montesinos *et al.* (2006)

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο υποστηρίζουν τη χρήση σχηματικά τροποποιημένων χαλύβδινων ιών (π.χ. αγκιστρωτών) σαν εναλλακτική λύση σε ελάχιστες εγκάρσιες διατμητικές οπές (συνδετήρες ή στεφάνια) για δοκούς που υποβάλλονται σε διατμητικές δυνάμεις που κυμαίνονται από  $0,085 \sqrt{f_c}$  έως  $0,17 \sqrt{f_c} b_w d$ .

Αυτές οι τιμές τυπικά αντιστοιχούν στα  $0.5V_c$  και  $V_c$ , αντίστοιχα. Όλες οι δοκοί FRC που περιείχαν  $V_f \geq 0,75\%$  παρουσίασαν τάση διατμήσεως σε αποτυχία μεγαλύτερη από τη συντηρητική τιμή κατώτερου ορίου  $0,3 \sqrt{f_c}$ .

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαρκής απόδοση των υλικών και να ληφθεί υπόψη η χρήση παραμορφωμένων ιών χάλυβα εκτός εκείνων που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων, πρέπει να χρησιμοποιούνται κριτήρια απόδοσης για την αποδοχή των χαλύβδινων ιών ως ελάχιστη ενίσχυση διάτμησης. Μέχρι να καταστούν διαθέσιμα περαιτέρω δεδομένα, συνιστάται ελάχιστο  $V_f = 0,75\%$ .

### 3.3.6 Dinh *et al.* (2010)

Στην συγκεκριμένη εργασία οι συντελεστές της παρέχουν ένα απλό μοντέλο για την εκτίμηση της αντοχής διατμήσεως δοκών ενισχυμένων από μεταλλικές ίνες χωρίς συνδετήρες. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση τις παρατηρήσεις από τις δοκιμές 27 δοκών μεγάλης κλίμακας υπό μονοτονική αύξηση θλιπτικής φόρτισης.

Τρεις τύποι αγκιστρωμένων ιών χάλυβα αξιολογήθηκαν σε ογκομετρικά ποσοστά κυμαινόμενα μεταξύ 0,75% ( $59 \text{ kg} / \text{m}^3$  ή  $100 \text{ lb} / \text{yd}^3$ ) και 1,5% ( $118 \text{ kg} / \text{m}^3$  ή  $200 \text{ lb} / \text{yd}^3$ ).

Όλες εκτός από μία από τις δοκούς εμφάνισαν αστοχία σε συνθήκες θλίψης είτε πριν είτε μετά την κάμψη. Στο προτεινόμενο μοντέλο, η αντοχή στην αστοχία σε δοκούς σκυροδέματος ενισχυμένες με μεταλλικές ίνες θεωρείται ότι ευθύνεται στο γεγονός ότι η διατμητική τάση, μεταφέρεται στη ζώνη συμπίεσης και η τάση μεταφέρεται κατά μήκος διαγώνιες ρωγμές από ίνες χάλυβα. Η διάτμηση που μεταφέρεται στη ζώνη συμπίεσης εκτιμάται χρησιμοποιώντας το κριτήριο αποτυχίας για το υποκείμενο σκυρόδεμα συνδυασμένη συμπίεση και διάτμηση που προτάθηκε από τους Bresler και Pister.

Η συμβολή από την ενίσχυση των ιών σε δύναμη διάτμησης, από την άλλη το χέρι συνδέεται με την απόδοση του υλικού που επιτυγχάνεται με τις τυπικές δοκιμές κάμψης ASTM 1609 τεσσάρων σημείων.

Σύγκριση των προβλεπόμενων έναντι οι πειραματικές αντοχές διάτμησης για μεγάλο αριθμό δοκών FRC που δοκιμάστηκαν σε αυτή και άλλες έρευνες δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι σε θέση να προβλέψει τη δύναμη διάτμησης των δοκών FRC από χάλυβα με λογική ακρίβεια. οι μέσες τιμές και οι τιμές τυπικής απόκλισης είναι 0,79 και 0,12, αντίστοιχα.

## 4.0 Μεθοδολογία – Προσέγγιση

---

### 4.1 Συγκέντρωση δειγμάτων

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η σύγκριση και ανάλυση των προτεινόμενων μαθηματικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της εκτιμώμενης διατμητικής αντοχής ινοοπλισμένων δοκών σκυροδέματος όπως αυτές συλλέχθηκαν κατά την επικαιροποιημένη βιβλιογραφική έρευνα και αναφέρθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο.

Τα στοιχεία για την εκπόνηση της προαναφερθείσας ερευνητικής διαδικασίας προέρχονται από το έργο δύο (2) δημοσιευμένων εργασιών ([Abbas and Khan, 2016](#); [Zhang et al., 2016](#)) εκ των οποίων συγκεντρώθηκαν στοιχεία από 184 πειράματα αντοχής σκυροδέματος. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στο γεγονός πως τα βιβλιογραφικά δεδομένα, αν και παρουσιάζουν αποδεκτή σαφήνεια και συμβατότητα μεταξύ τους δεν είναι καθολικά πλήρης ποσοτικά. Πιο συγκεκριμένα οι Abbas και Khan (2016) , καθώς και οι Zhang et al. (2016) συλλέξαν ένα σεβαστό όγκο δεδομένων αλλά δεν καταγράφονται τα ίδια ποσοτικά στοιχεία των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της πτυχιακής. Αυτό όπως είναι κατανοητό είχε ως αποτέλεσμα μετά την συγκέντρωση των δεδομένων να ακολουθήσει μια διαδικασία επεξεργασίας αυτών ώστε η πλειονότητα των προγραμματισμένων υπολογισμών να καθίσταται δυνατή.

Η πρακτική η οποία ακολουθήθηκε για την εκπόνηση των υπολογισμών χωρίζεται σε δύο (2) βασικά τμήματα:

α) Σε πρώτο χρόνο δημιουργήθηκε ένας αρχικός πίνακας στον οποίο και έγινε η καταγραφή των ποσοτικών δεδομένων από κάθε πειραματική δοκιμή των δημοσιευμένων εργασιών που συγκέντρωσαν οι δύο προαναφερθείσες ερευνητικές ομάδες. Στο πίνακα αυτό αναγράφονται επίσης και οι ποιοτικές πληροφορίες, δηλαδή από πιά εργασία προκύπτουν, την χρονολογία της δοκιμής, καθώς και οι κώδικες / ονομασίες των στελεχών. Συνολικά οι παράμετροι (σ.σ. πληρέστερη περιγραφή αυτών γίνεται στη συνέχεια του κεφαλαίου) για κάθε δείγμα ήταν συνολικά δεκαεννέα (19) εκ των οποίων οι δεκατέσσερις (14) συμπληρώθηκαν στο 100%.



β) Σε δεύτερο χρόνο και αφού ολοκληρώθηκε η συλλογή των δεδομένων, δημιουργήθηκαν έντεκα (11) πεδία κάθε ένα εκ των οποίων αφορά μια βασική εξίσωση υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής των δοκών. Για τον υπολογισμό της αντοχής των δοκών με βάση την κάθε εξίσωση οι αντίστοιχες παράμετροι διαμορφώθηκαν και τροποποιήθηκαν ανάλογα.

## 4.2 Παράμετροι των δειγμάτων

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω το υπολογιστικό μέρος της έρευνας της παρούσας πτυχιακής, σχεδιάστηκε με γνώμονα τον επιτυχή υπολογισμό της διατμητικής αντοχής πραγματικών δειγμάτων τα οποία έχουν τεθεί πειραματικά υπό φόρτιση και στη συνέχεια η σύγκριση των πειραματικών τιμών με αυτές από τον υπολογισμό των εξισώσεων. Όπως παρουσιάζεται και στους πίνακες των Zhang *et al.* (2016, p. 113) και Abbas και Khan (2016, p. 1489), τα στοιχεία τα οποία επιλέχθηκαν προς χρήση προέρχονται από μια πληθώρα εργασιών (Roberts and Ho, 1982; Swamy and Bahia, 1985; Limz *et al.*, 1987; Ashour and Hassanain, 1992; Swamy *et al.*, 1993; Tan, Murugappan and Paramasivam, 1993; Adebar *et al.*, 1997; Oh *et al.*, 1999; Kwak *et al.*, 2002; Dupont and Vandewalle, 2003; J and M, 2003; Cucchiara *et al.*, 2004; G *et al.*, 2006; Dinh *et al.*, 2010) αφορούν τα κάτωθι και συμβάλουν στον επιτυχή υπολογισμό των παρακάτω εξισώσεων:

### Ποιοτικές Πληροφορίες

- Το όνομα των συντελεστών του κάθε πειράματος
- Τις κωδικές ονομασίες του κάθε στελέχους
- Την γεωμετρία των μεταλλικών ινών ποσοστό των οποίων εισήχθη στο συνολικό μείγμα κατά την παρασκευή των δοκών

### Ποσοτικές Πληροφορίες

- Τις διαστάσεις των εκάστοτε δοκών  $b$ ,  $d$  και  $L$  (mm)
- Το λόγο μήκους της δοκού προς το στατικό ύψος της διατομής  $L/d$
- Τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$  (MPa)
- Την τάση του διαμήκους οπλισμού  $f_{y,long}$  και του διατμητικού οπλισμού  $f_{y,tran}$  (MPa)
- Το διατμητικό μήκος  $a$  και το λόγο του με το στατικό ύψος  $a/d$  (mm)

- Το ποσοστό του διαμήκους  $\rho$  (long) και του διατμητικού οπλισμού  $\rho$  (tran) (%)
- Το ογκομετρικό ποσοστό των ινών  $v_f$  (volume fraction)
- Το μήκος των ινών  $l_f$ , την διάμετρο των ινών  $d_f$  (mm) και τον λόγο  $l_f/d_f$  (fiber aspect ratio)

#### Εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν

- 1) Η εξίσωση από την εργασία των Swamy et al. (1993) μαζί με τον κώδικα EC8.
- 2) Η εξίσωση από την εργασία των Swamy et al. (1993) μαζί με τον κώδικα ACI 318M-14 του 2014.
- 3) Οι εξισώσεις των Gandomi et al. (2017) και των Swamy et al. (1993).
- 4) Οι εξισώσεις των Swamy et al. (1993) και των Russo, Mitri και Pauletta (2013).
- 5) Η εξίσωση του Khuntia (2011) και του κώδικα ACI.
- 6) Η εξίσωση του Sharma (1986).
- 7) Η εξίσωση του Shin (1994).
- 8) Η εξίσωση των Narayanan και Darwish (1987).
- 9) Η εξίσωση των Ashour και Hassanain (1992).
- 10) Η εξίσωση των Slater, Moni και Alam (2012) για  $a/d < 3$ ,  $20 < f_c < 50$ MPa.
- 11) Η εξίσωση των Kwak, Eberhard και Kim (2002).

#### Στατιστική αποτύπωση των παραμέτρων

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ακραίες τιμές των ποσοτικών παραμέτρων από το κάθε ένα από τα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική έρευνα τις πτυχιακής. Ο βασικός σκοπός αυτού του πίνακα είναι να δώσει μια γρήγορη συνολική εικόνα για τη φύση των δοκών που εξετάστηκαν όπως αυτή προκύπτει παραδείγματος χάριν από την αξιολόγηση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών του μήκους, πλάτους και στατικού ύψους των δοκών.

Πίνακας 2 Συγκεντρωτική στατιστική απεικόνιση των ποσοτικών παραμέτρων των δειγμάτων

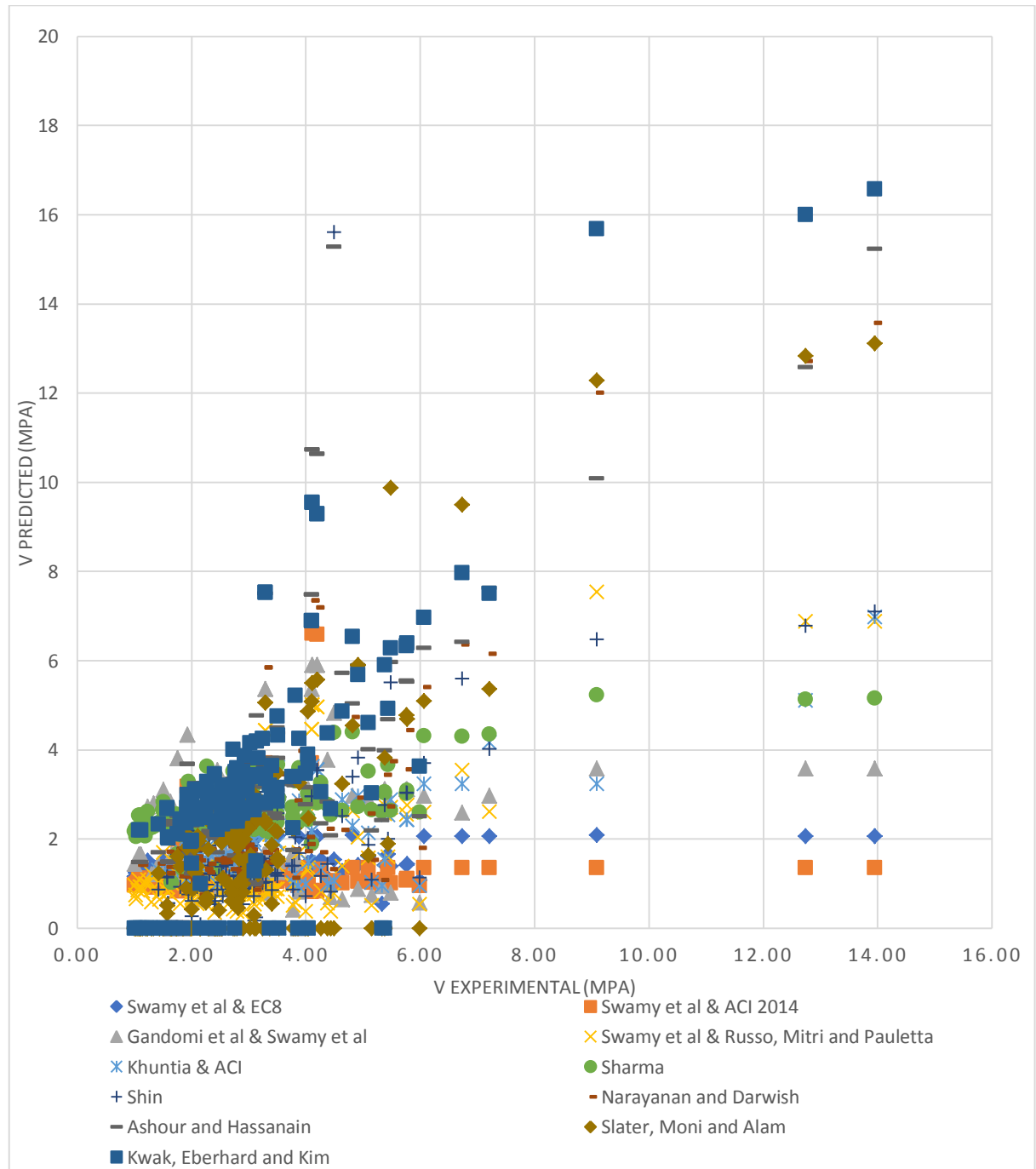
Παράμετρος		Min	Max
b	(mm)	50	254
d	(mm)	130	610
L	(mm)	100	100
$f_c$	(MPa)	22,61	99,1
$f_{ct}$	(MPa)	1,9	4,18
$f_{y(\text{long.})}$	(MPa)	410	590
$f_{y(\text{tran.})}$	(MPa)	410	590
a	(mm)	43,4	2135
a/d	(-)	0,310	6,000
$\rho$ (long.)	(%)	0,00	4,58
$\rho$ (tran.)	(%)	0	0
L/d	(-)	0,71	0,77
G	(-)	1,00	3,00
$v_f$	(-)	0	2
$l_f$	(mm)	0	60
$d_f$	(mm)	0	1,333333
$l_f/d_f$	(-)	-	-
Df	(-)	1,00	1,00
F	(-)	-	-

#### 4.3 Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής με βάση την βιβλιογραφία

Το επόμενο στάδιο μετά την συγκέντρωση και οργάνωση των δεδομένων σε ένα βασικό πίνακα, καθώς και τη υπολογιστική διαμόρφωση της κάθε μιας από της συνολικά έντεκα (11) εξισώσεις, αφορούσε τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής για τη κάθε δοκό που τέθηκε σε πειραματικό έλεγχο ( $V_{pred}$ ). Στη συνέχεια για κάθε μια από τις μεθόδους / εξισώσεις δημιουργήθηκαν συνολικά δώδεκα διαφορετικά διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται: α) η σχέση των πειραματικών τιμών  $V_{exp}$  σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από την λύση της εκάστοτε εξίσωση και β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τις προαναφερθείσες ποσοτικές παραμέτρους (σ.σ. μήκος, πλάτος δοκού, ογκομετρικό ποσοστό ινών στη δοκό κτλ.).

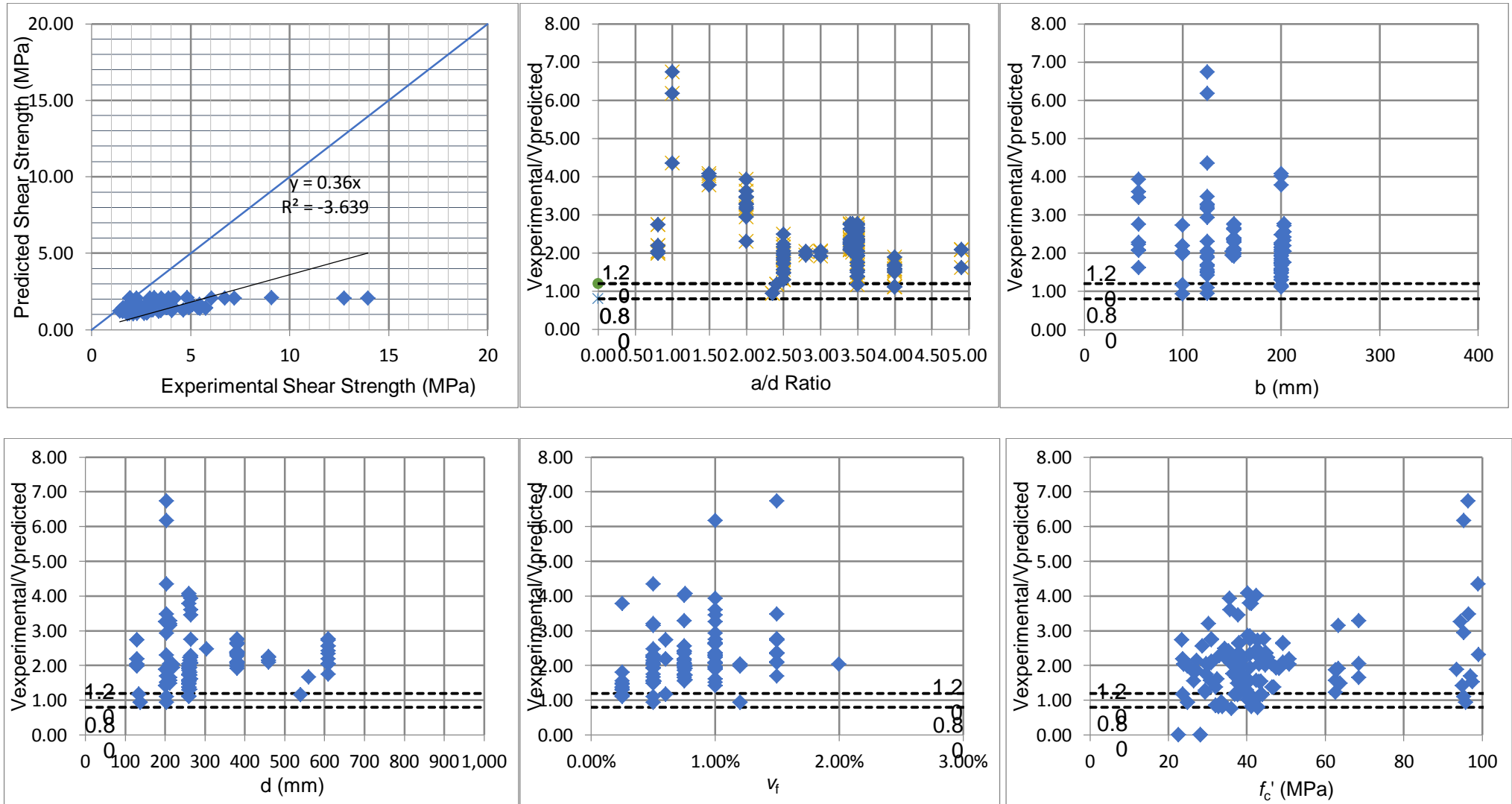
Τα παρακάτω υπό-κεφάλαια παρουσιάζουν τα έξι (6) βασικά διαγράμματα για την κάθε λύση. Σε αυτό σημείο είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στο λόγο για τον οποίο επιλέχθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα. Όπως αναφέρουν και στην ανάλυση τους οι Zhang et al. (2016), αν και πολλές σημαντικές μεταβλητές επηρεάζουν τη διατημητική συμπεριφορά των δοκών τύπου SFRC, στη συγκεκριμένη μελέτη μεγάλη

σημασία έχουν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ο λόγος του διατμητικού μήκους σε σχέση με το στατικό ύψος, τα δομικά χαρακτηριστικά των δοκών, καθώς και το ποσοστό όγκου ινών χάλυβα τα οποία επηρεάζουν σε υψηλό βαθμό προβλεπόμενες τιμές διατμητικής αντοχής.



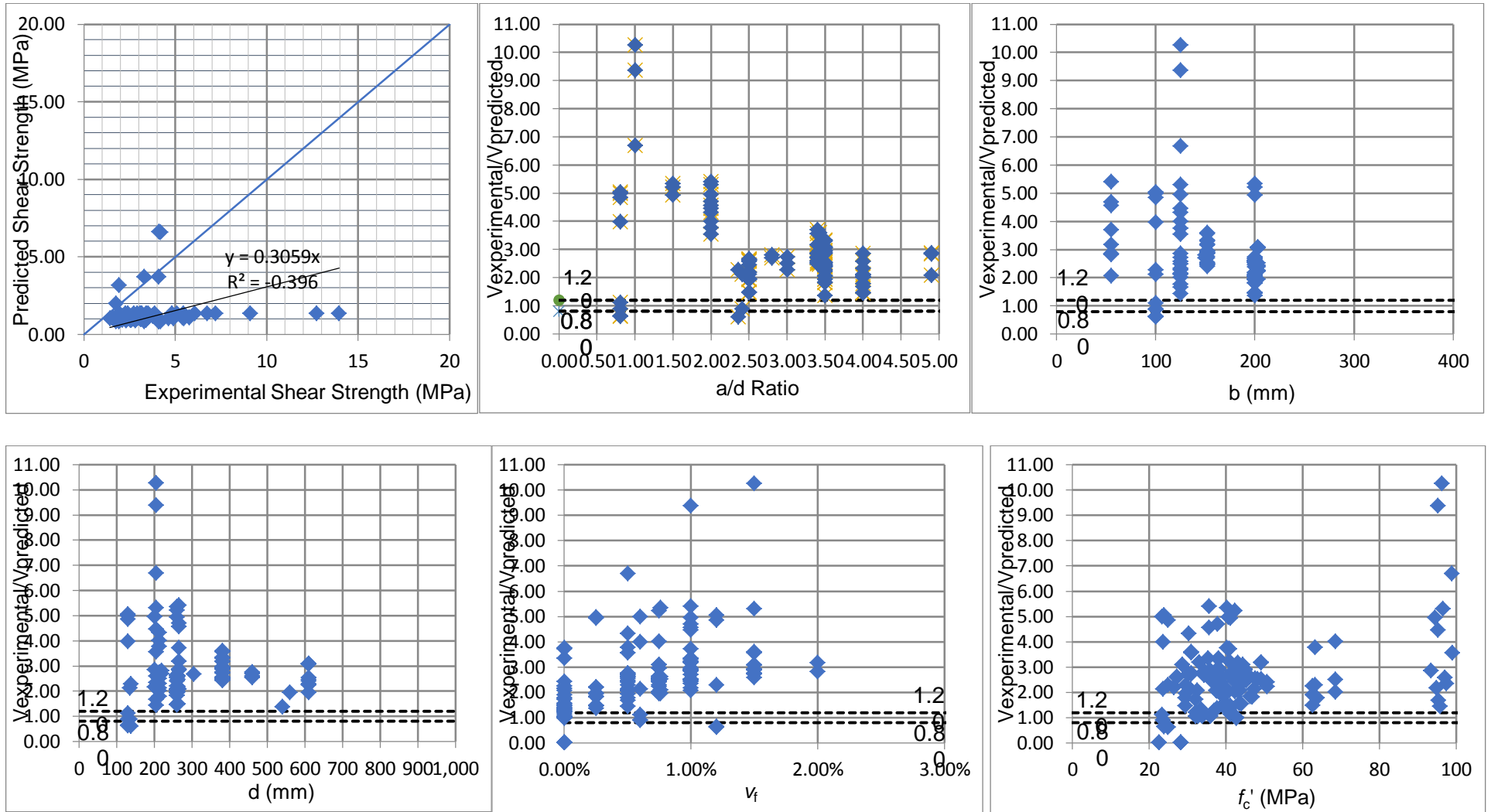
Εικόνα 7 Σύγκριση μεταξύ πειραματικής και υπολογισμένης θλιπτικής ικανότητας για 11 μεθόδους / εξισώσεις από τη βιβλιογραφία.

### 4.3.1 EC8 & Swamy et al. (1993)



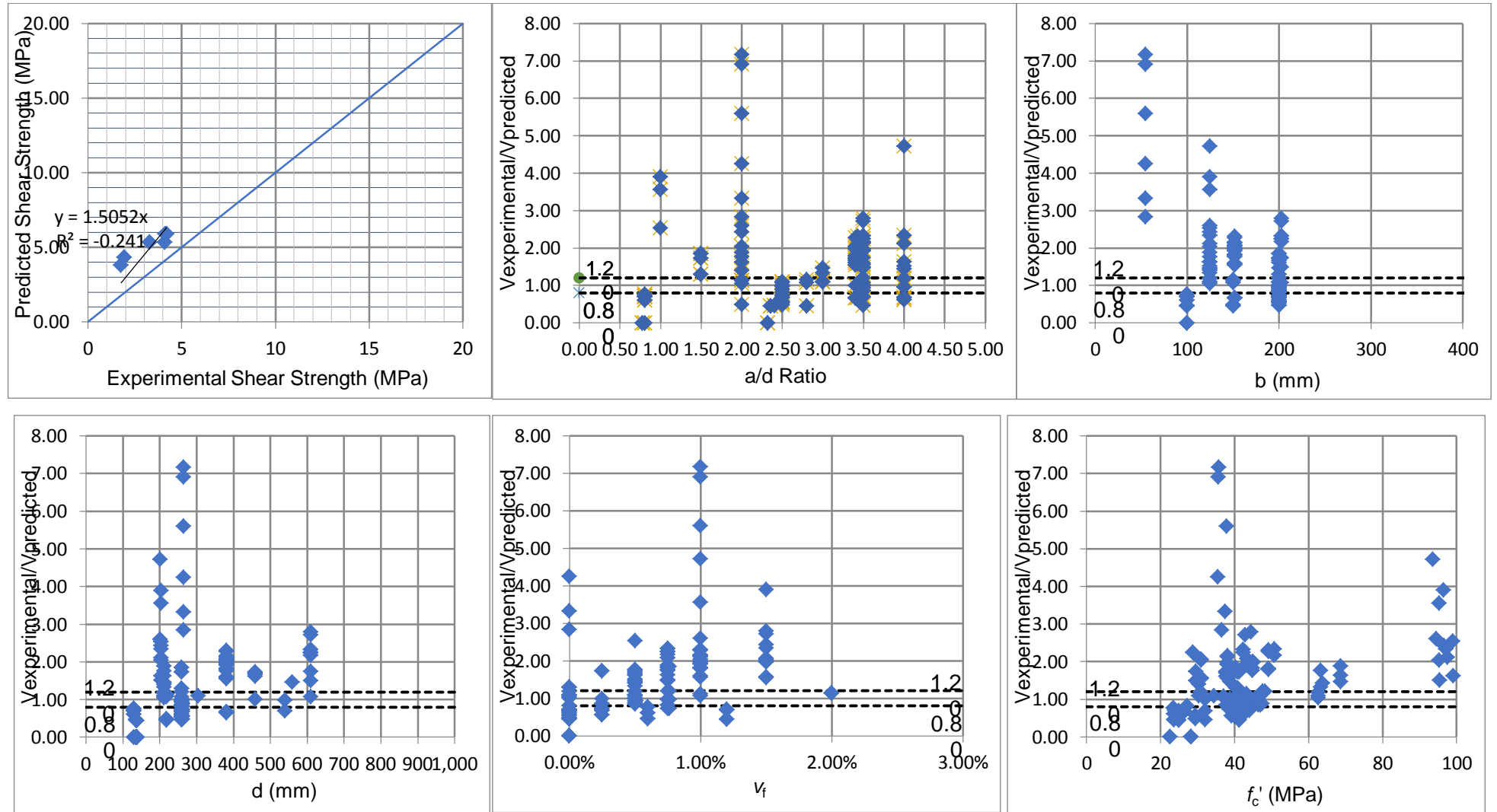
Εικόνα 8 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης των Swamy et al.(1993) και του κώδικα EC8. Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαροβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

4.3.2 Swamy et al. (1993) and ACI 318M-14 (2014)



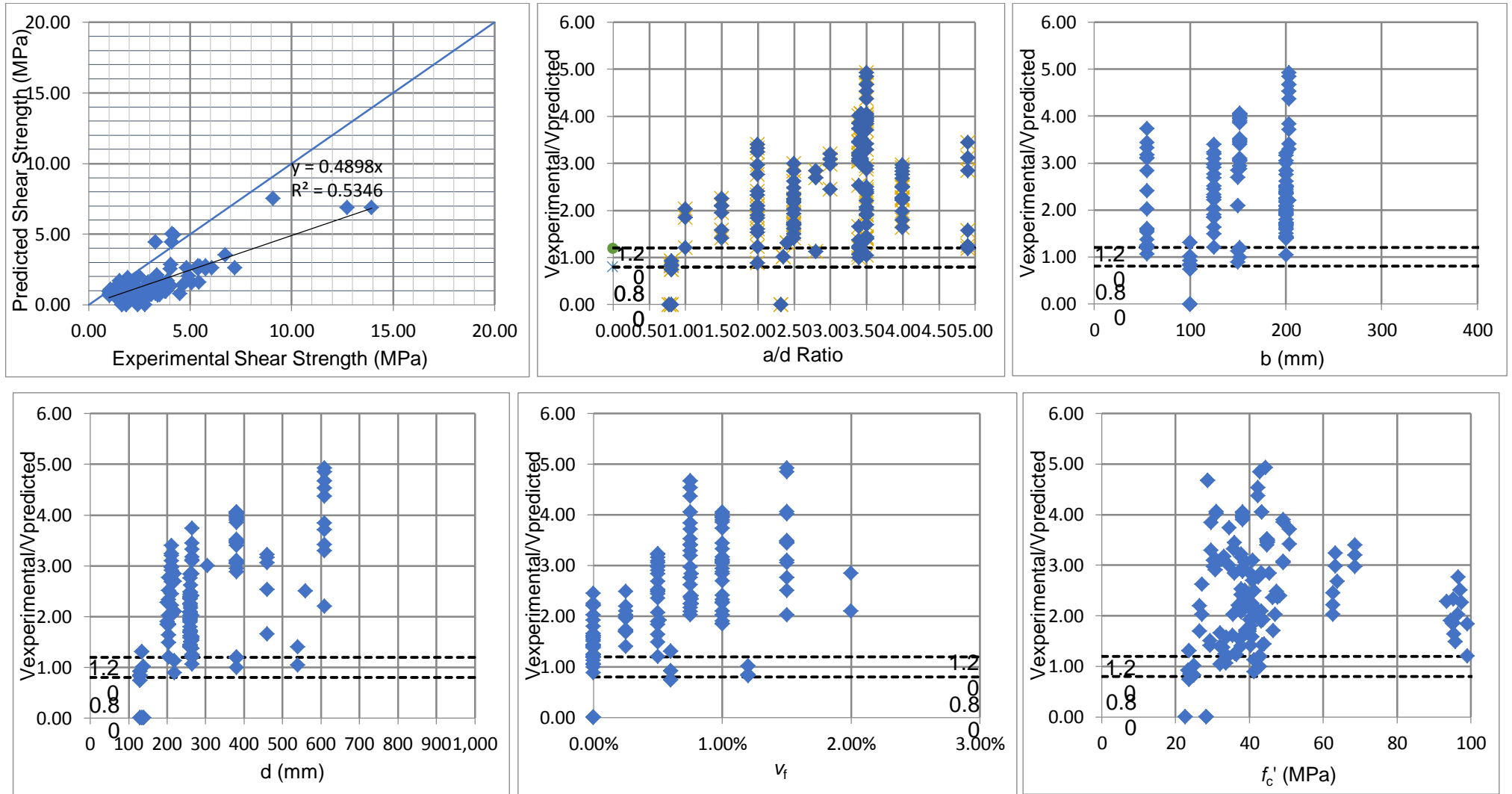
Εικόνα 9 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης των Swamy et al. και του κώδικα ACI 318M-14 (2014). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαροβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

### 4.3.3 Gandomi (2017) & Swamy et al. (1993)



Εικόνα 10 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση των εξισώσεων των Gandomi (2017) και Swamy et al. (1993). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαράθεση των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

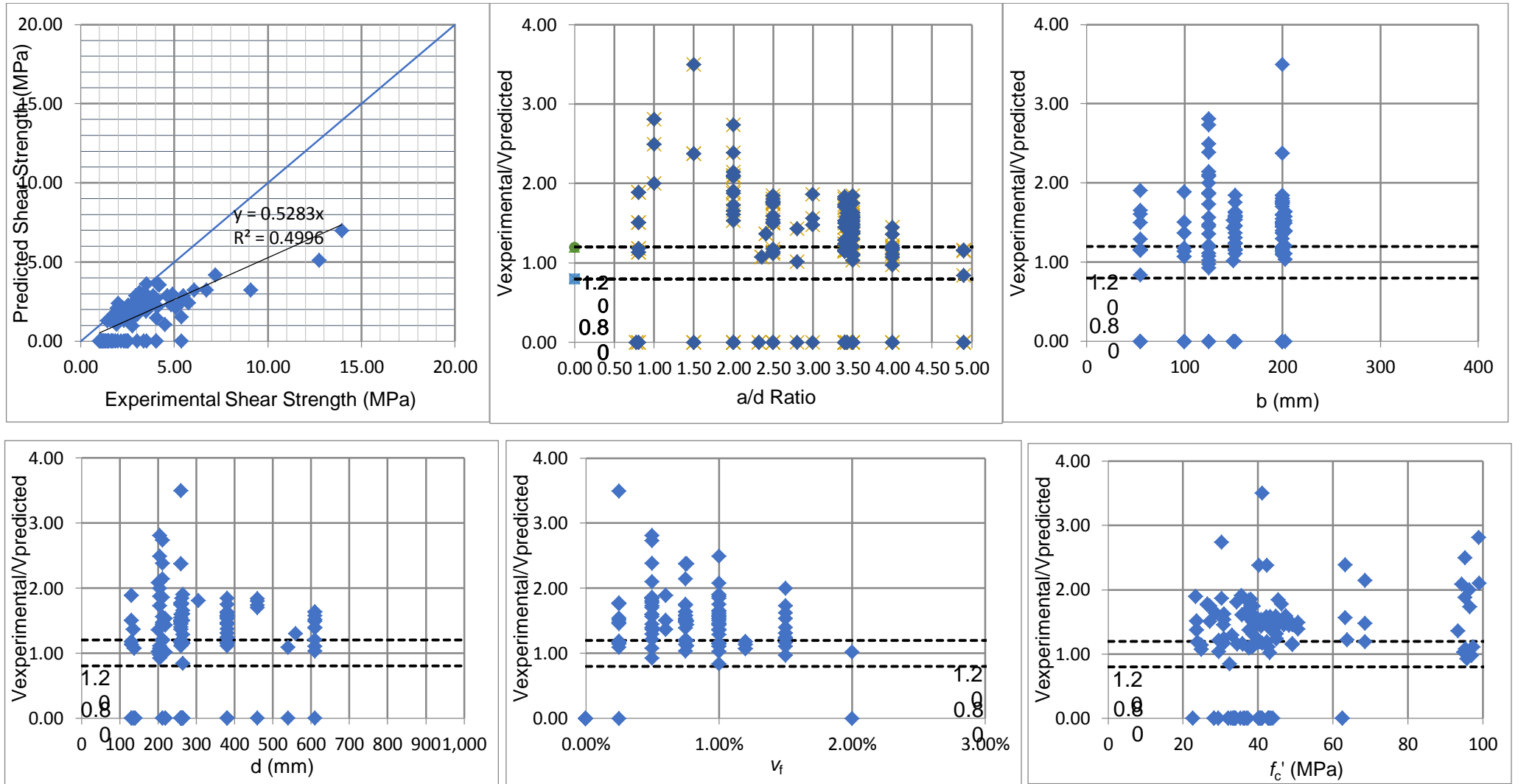
4.3.4 Swamy (1993) & Russo, Mitri, Pauletta (2013)



Εικόνα 11 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση των εξισώσεων των Gandomi (2017) και Swamy et al. (1993). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαραβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$ ), β) ο λόγος  $V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{\text{exp}}/V_{\text{pred}}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

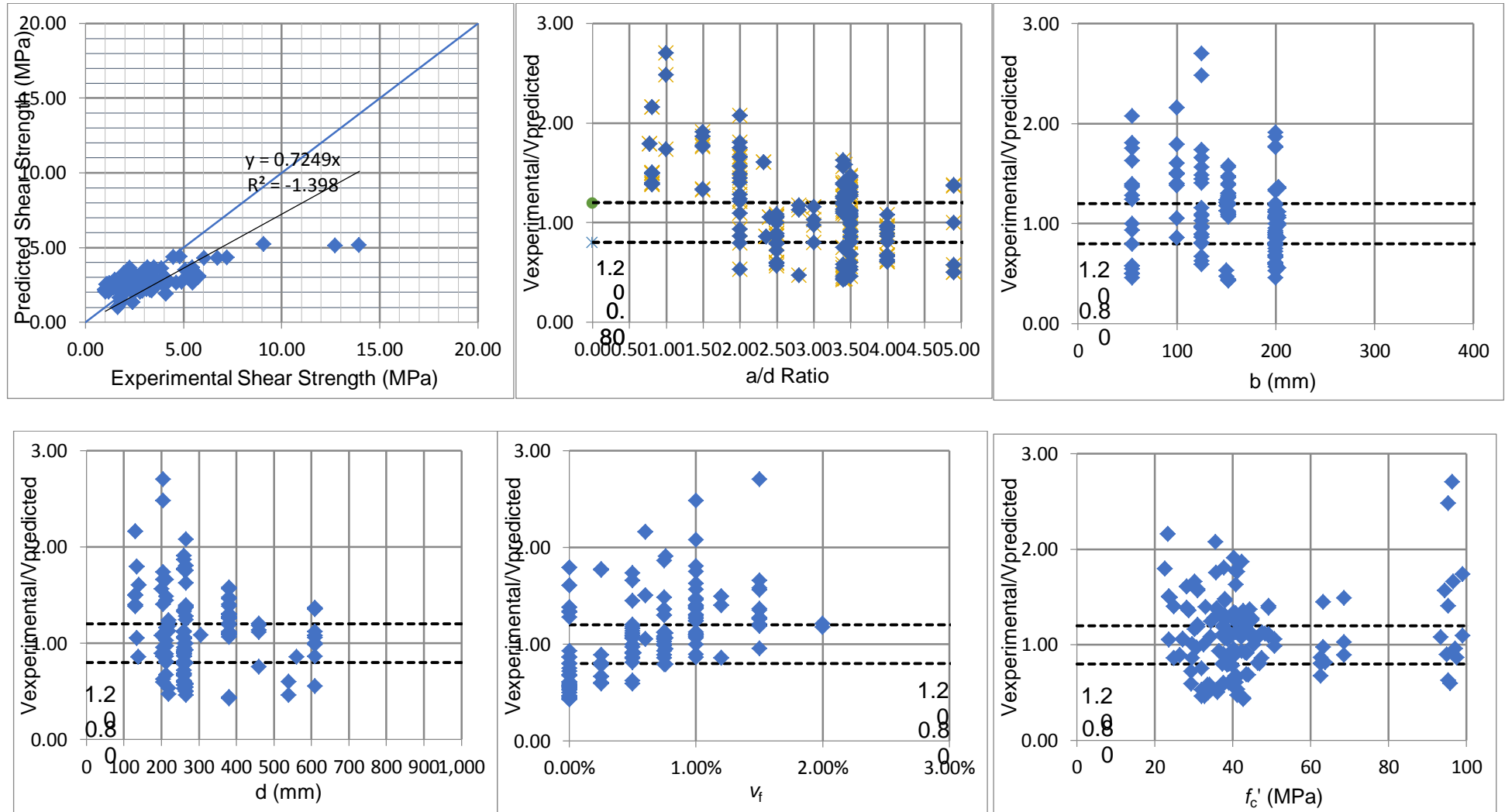


#### 4.3.5 Khuntia (2011) & ACI



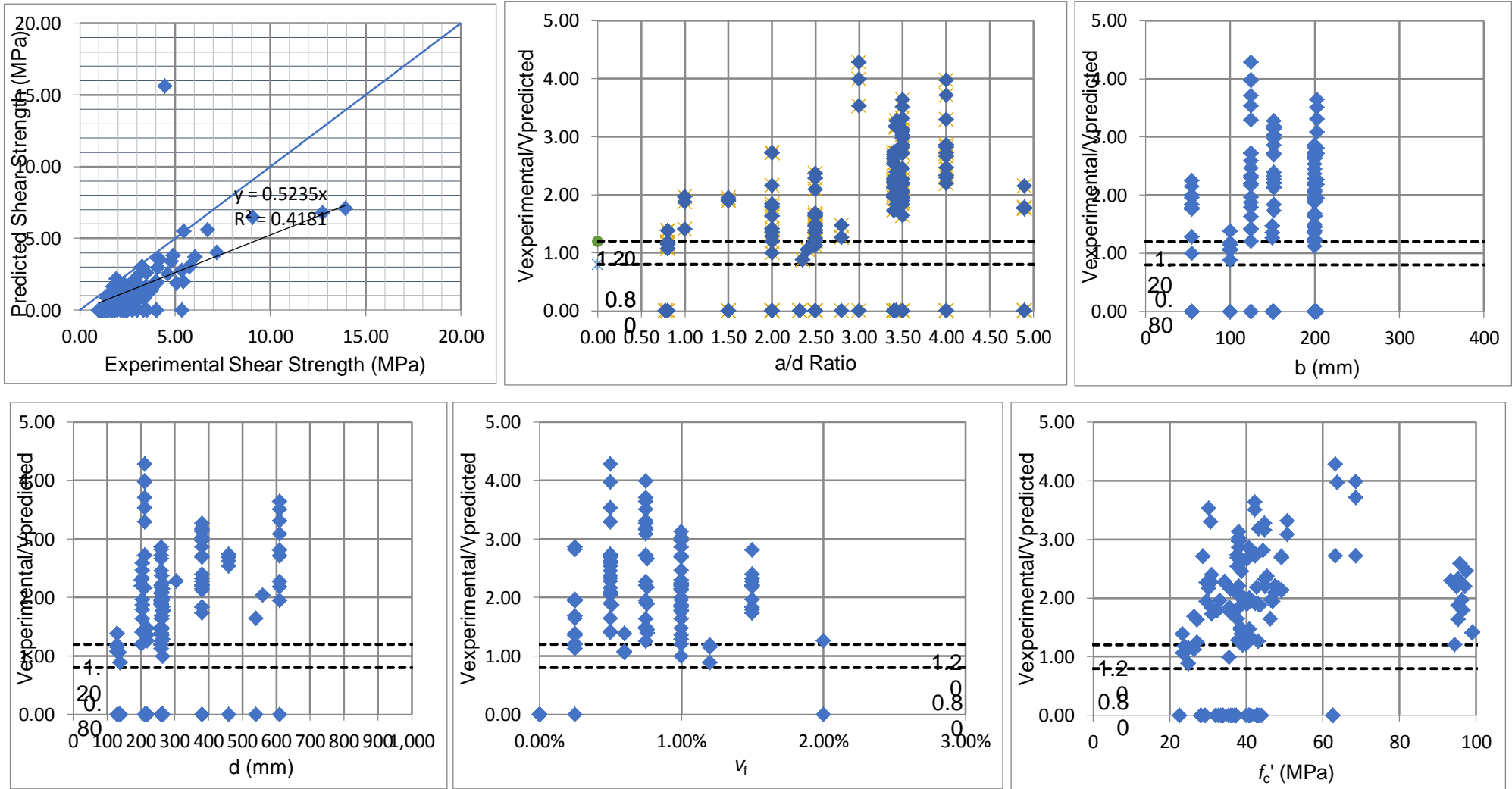
Εικόνα 12 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης του Khuntia (2011) και του κώδικα ACI. Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαροβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

#### 4.3.6 Shama (1986)



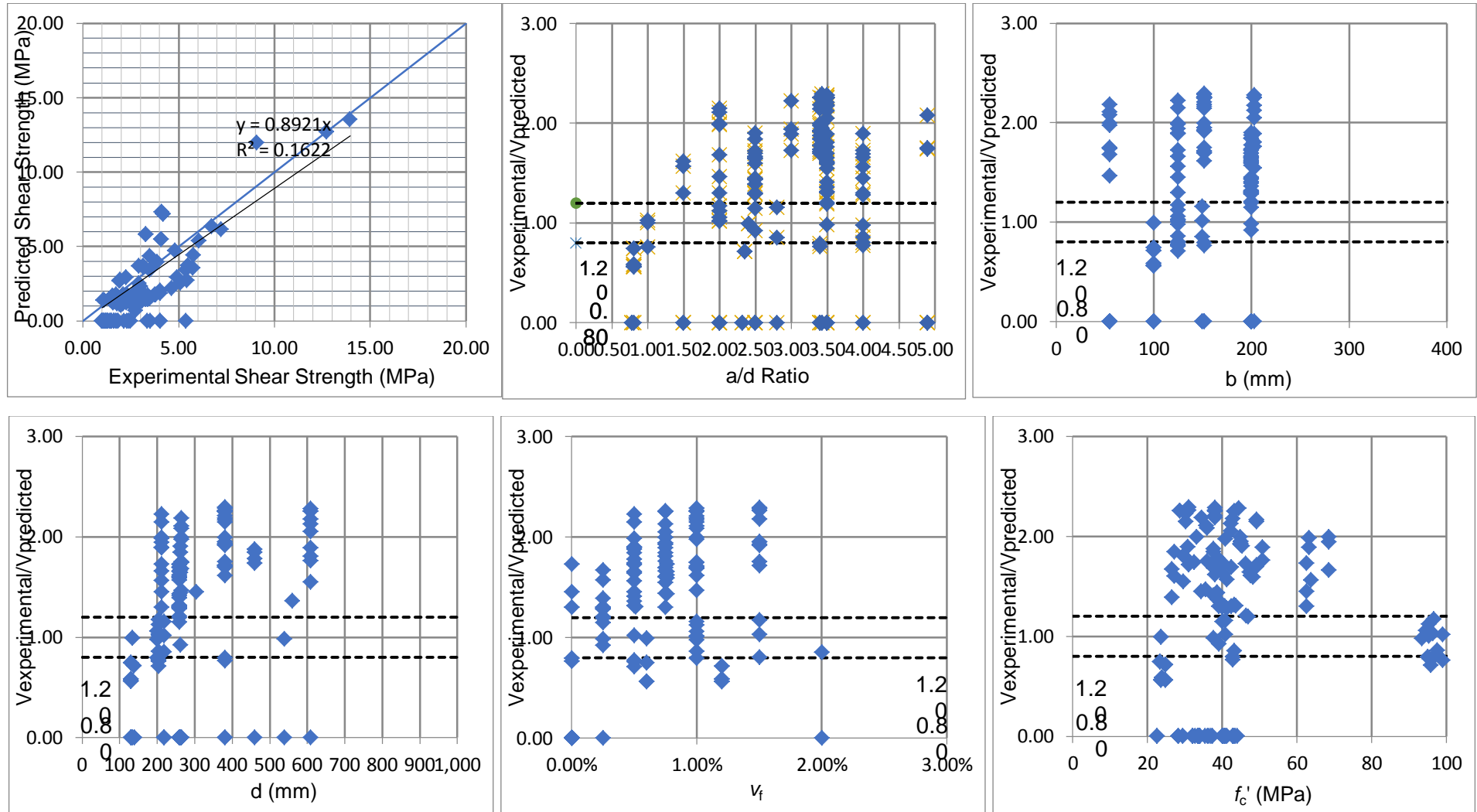
Εικόνα 13 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης του Shama (1986). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαράβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

4.3.7 Shin et al. (1994)



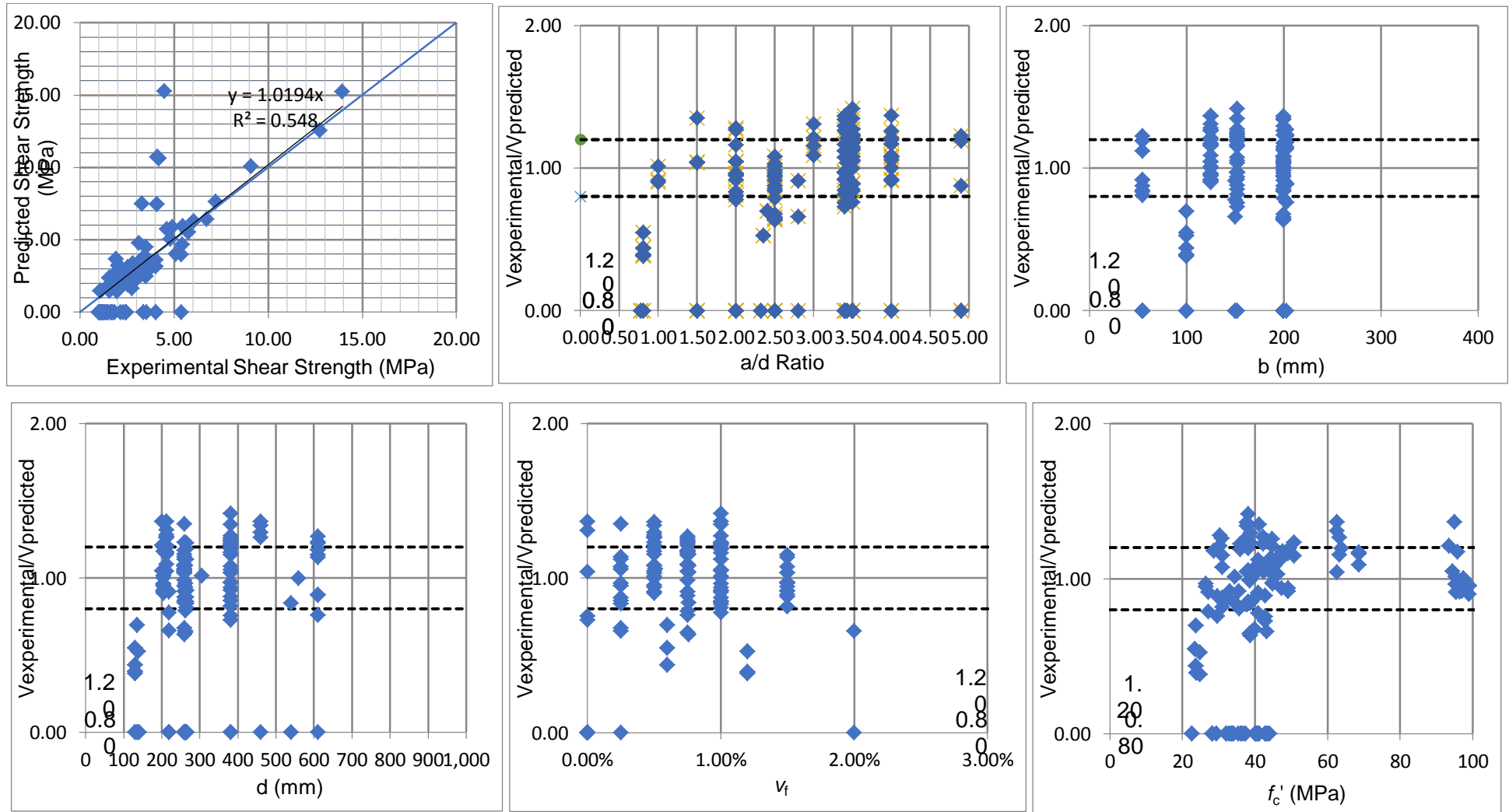
Εικόνα 14 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης των Shin et al. (1994). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαραβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $\nu_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

#### 4.3.8 Narayanan and Darwish (1987)



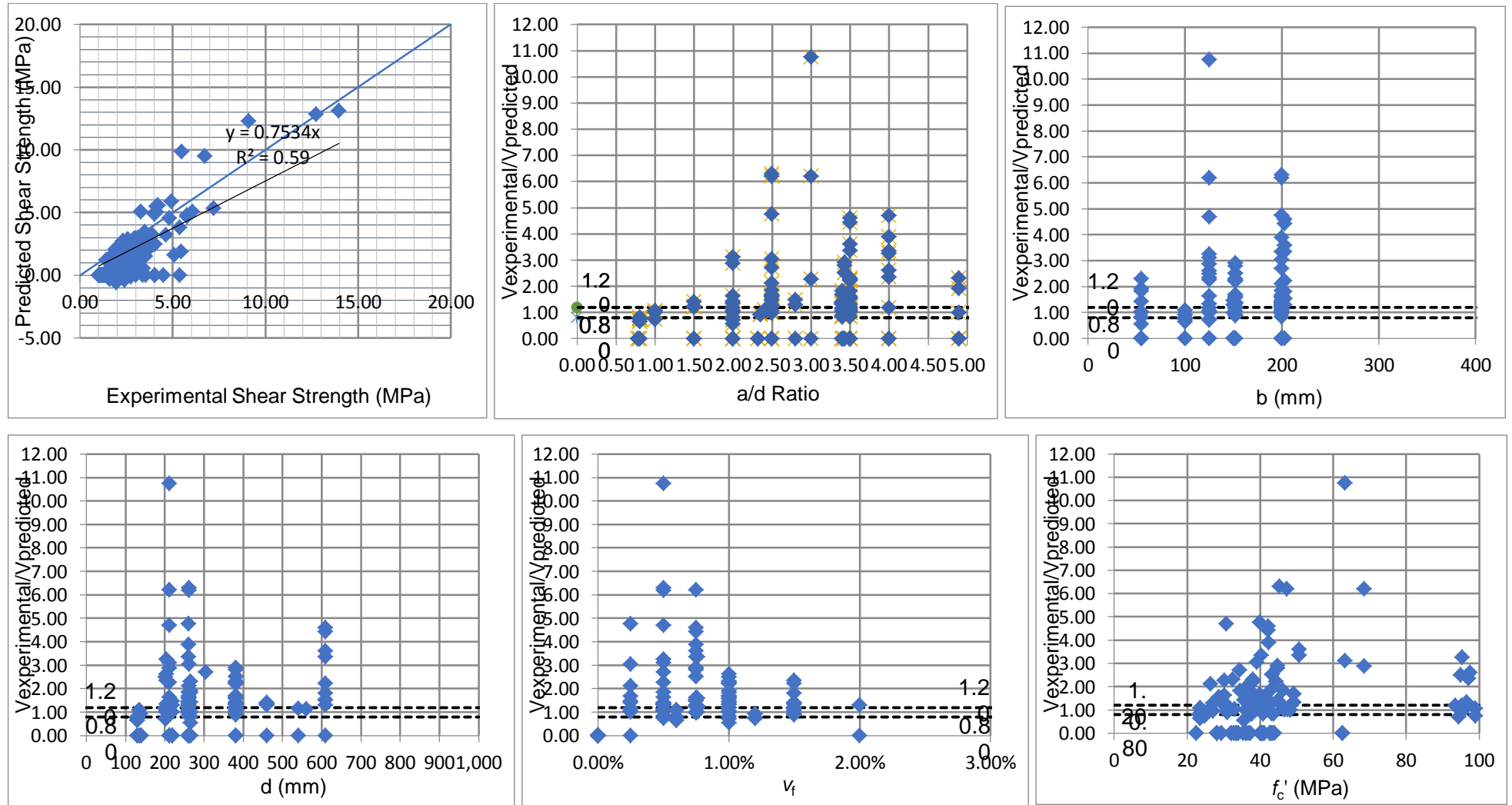
Εικόνα 15 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης των Narayanan and Darwish (1987). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαροβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ύψος και πλάτος της δοκού (b & d), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

#### 4.3.9 Ashour (1992) (2<sup>nd</sup> Expression)



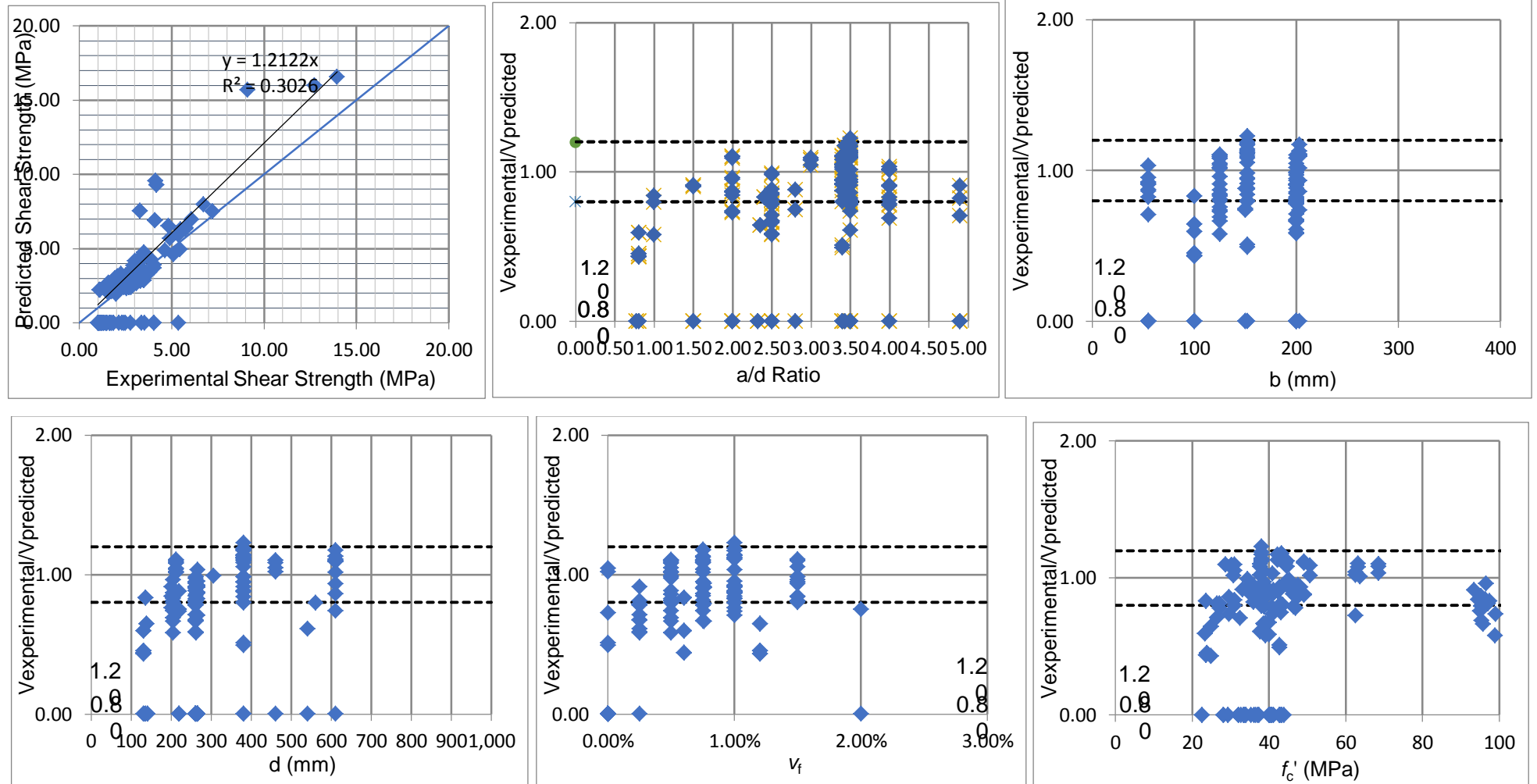
Εικόνα 16 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης τουσ Ashour (1992). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαραβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

4.3.10 Slater (2012) (for  $a/d < 3$  and low concrete strength ( $20 < f_c < 50$  MPa))



Εικόνα 17 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης του Slater (2012). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαραβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

4.3.11 Kwak, Eberhard and Kim (2002)



Εικόνα 18 Βασικά διαγράμματα που προέκυψαν από την χρήση της εξίσωσης των Kwak, Eberhard και Kim (2002). Από αριστερά προς δεξιά διακρίνονται, α) η αντιπαράβολή των πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής ( $V_{exp}/V_{pred}$ ), β) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  και ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το πλάτος και ύψος της δοκού ( $b$  &  $d$ ), δ) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $v_f$ ) και ε) ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f'_c$ ).

## 4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

### 4.4.1 Γραμμική Παλινδρόμηση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών διατμητικής αντοχής( $V_{exp}/V_{pred}$ ).

Η εφαρμογή της γραμμικής παλινδρόμησης βασίζεται στο γεγονός ότι προσπαθεί να μοντελοποιήσει τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών προσαρμόζοντας μια γραμμική εξίσωση στα παρατηρούμενα δεδομένα. Η μία μεταβλητή θεωρείται ως εξηγηματική μεταβλητή και η άλλη θεωρείται εξαρτημένη μεταβλητή. Η βασική ιδέα της εφαρμογής της μεθόδου είναι η εφαρμογή της γραμμής που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα. Η καλύτερη γραμμή προσαρμογής είναι αυτή για την οποία το συνολικό σφάλμα (η απόσταση μεταξύ του σημείου προς τη γραμμή παλινδρόμησης) πρόβλεψης (όλα τα σημεία δεδομένων) είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι ένα μέτρο καλής προσαρμογής για τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης. και δείχνει το ποσοστό της διακύμανσης μεταξύ των δυο μεταβλητών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των εξισώσεων και των πειραματικών δεδομένων με τους μεγαλύτερους συντελεστές προσδιορισμού είναι αυτές των Sharma (1986) 0,857, και των Gandomi (2017) και Swamy et al. (1993) 0,972, ενώ το χαμηλότερο αυτή των Narayanan and Darwish (1987) . 0,311.

### 4.4.2 Σχέση λόγου $V_{exp}/V_{pred}$ και λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ )

Τα διαγράμματα ( $\beta$ ) για κάθε μια από τις Εικόνες (8-18), δείχνουν τις μεταβολές του λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με την αναλογία  $a/d$ . Αρχικά σαν γενική εικόνα όλα τα αποτελέσματα από τις εξισώσεις/ μοντέλα παρουσιάζονται διάσπαρτα με κάποια να δίνουν και αρκετά χαοτική εικόνα. Για την καλύτερη εκτίμηση των διαγραμμάτων όπως και στα περισσότερα από αυτά, ένα διάστημα τιμών από 0,8 και 1,2 έχει ορισθεί για την καλύτερη παρατήρηση των στατιστικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Narayanan and Darwish (1987) και το μοντέλο Shin et al. (1994) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη διασπορά σε σύγκριση με εκείνα που λαμβάνονται παραδείγματος χάριν από το μοντέλο του Ashour (1992) και των Kwak, Eberhard and Kim (2002), με αποτέλεσμα να προκύπτουν σημαντικές διαφορές σε όλες τις τιμές  $a/d$  που εξετάζονται.



#### 4.4.3 Σχέση λόγου $V_{exp}/V_{pred}$ σε σχέση με τα δομικά χαρακτηριστικά των δοκών (b,d)

Τα διαγράμματα ( $\gamma$ ) για κάθε μια από τις Εικόνες (8-18), δείχνουν τις μεταβολές του λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τα δομικά χαρακτηριστικά των δοκών όπως το στατικό ύψος και ογκομετρικό ποσοστό των ινών στις ενισχυμένες δοκούς. Όπως και στα περισσότερα διαγράμματα και εδώ έχει οριστεί το διάστημα μεταξύ 0,8 και 1,2 ώστε να είναι ευκολότερη η ερμηνεία των στατιστικών αποτελεσμάτων. Κρίνοντας ανάλογα το στατικό ύψος και μήκος των δοκών η πλειονότητα αυτών δίνει τιμή λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  κοντά στο 1 για ύψη 200-450 mm και πλάτη 100-200 mm.

#### 4.4.4 Σχέση λόγου $V_{exp}/V_{pred}$ σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $V_f$ )

Τα διαγράμματα ( $\delta$ ) για κάθε μια από τις Εικόνες (8-18), δείχνουν τις μεταβολές του λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με ογκομετρικό ποσοστό των ινών στις ενισχυμένες δοκούς. Η πλειονότητα των μοντέλων για τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζουν μια μέση τιμή του λόγου που είναι υψηλότερη από το όριο τιμής 1. Παράλληλα ο συγκεκριμένος τύπος διαγράμματος είναι και αυτός που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διασπορά. Πιο συγκεκριμένα την καλύτερη εικόνα παρουσιάζουν οι τιμές από τα μοντέλα των Shama (1986), Ashour (1992) και Kwak, Eberhard και Kim (2002). Επιπλέον χαρακτηριστική εικόνα είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών που εντοπίζονται στο διάστημα 0,8 και 1,2 είναι κατά κύριο λόγο σε ποσοστιαίες τιμές μεταξύ 0 – 1 %.

#### 4.4.5 Σχέση λόγου $V_{exp}/V_{pred}$ και τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος $f_c'$

Τα διαγράμματα ( $\epsilon$ ) για κάθε μια από τις Εικόνες (8-18), παρουσιάζουν τη σχέση του λόγου της πειραματικής διατμητικής αντοχής με την υπολογισμένη από την εκάστοτε εξίσωση σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η εικόνα των διαγραμμάτων δείχνει ότι το ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  κυμαίνεται μεταξύ 0,8 και 1,5 όταν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι μεταξύ 30 MPa και 50 MPa. Πέρα από την παραπάνω παραδοχή, σε αρκετά μοντέλα / εξισώσεις ο μεγαλύτερος όγκος της διασποράς συγκεντρώνεται σε τιμές υψηλότερες του 2,0. Αντίστοιχη διακύμανση παρουσιάζουν και οι τιμές του λόγου για θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη των 50 MPa στις οποίες σε άλλα μοντέλα εκτοξεύονται ενώ σε άλλα επιστρέφουν στο σταθερό διάστημα μεταξύ 0,8 και 1,2. Πιο συγκεκριμένα ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα

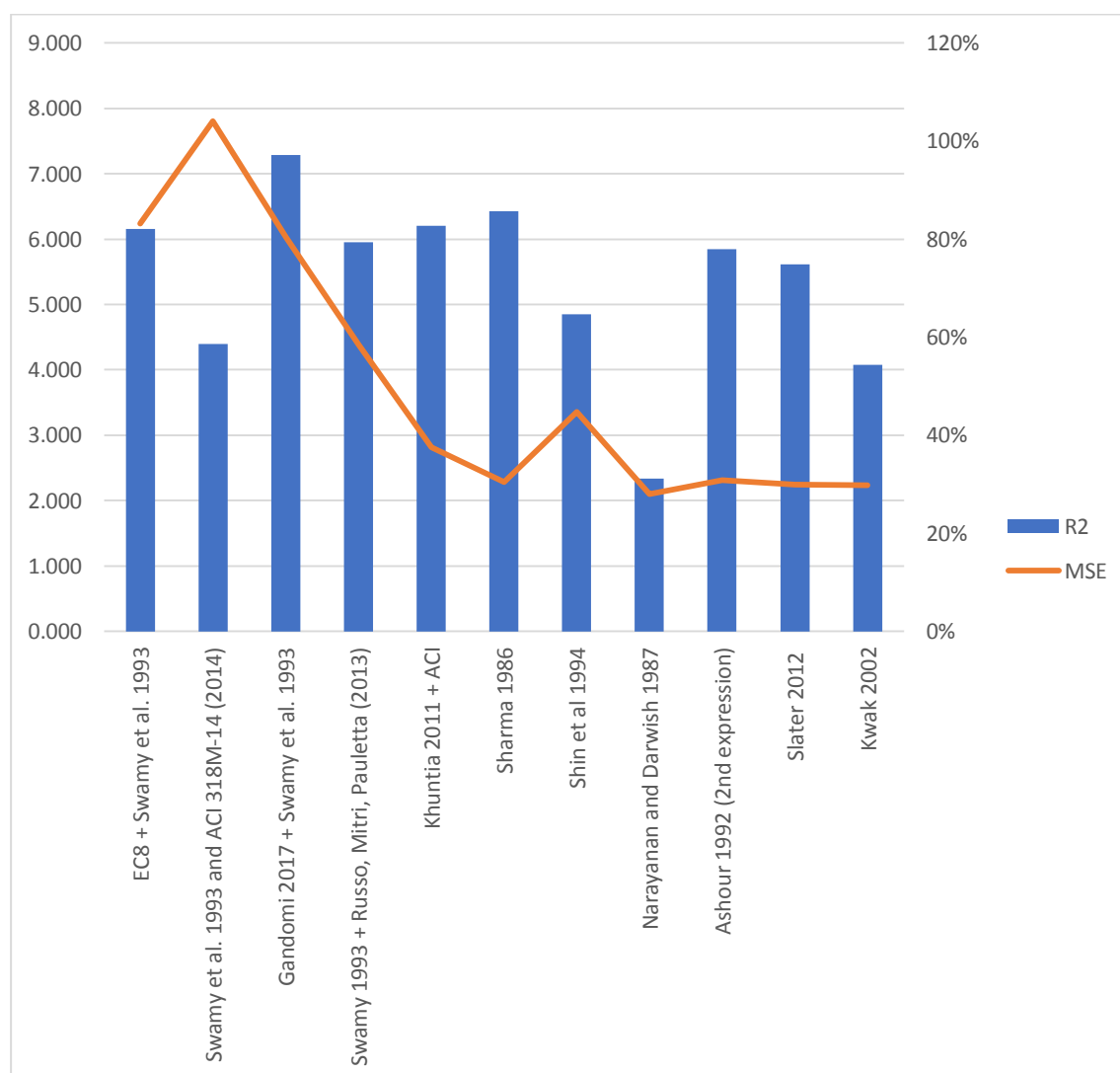
μοντέλα των Narayanan and Darwish (1987) όπου ο μεγαλύτερος όγκος της διασποράς εντοπίζεται σε υψηλότερες τιμές από τα έτερα μοντέλα, Οι Khuntia et al, Ashour (1992) και των Swamy (1993) και Russo, Mitri, Pauletta (2013) αποφέρουν εμφανώς διάσπαρτα αποτελέσματα για το φάσμα τιμών αντοχής σκυροδέματος που εξετάζονται. Οι τιμές του λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με χρήση των μοντέλων των Kwak, Eberhard and Kim (2002), και του μοντέλου των Sharma (1986) εμφανίζουν μικρότερη διαφορά σε σύγκριση με αυτά των άλλων μοντέλων.

#### 4.4.6 Συνολική στατιστική αποτίμηση των μοντέλων

Συνολικά η στατιστική ανάλυση των σχέσεων υπό μελέτη παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3), ο οποίος παρουσιάζει δύο βασικά κριτήρια των μοντέλων που υπολογίστηκαν. Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100% και συνδέεται στενά με το μέσο σφάλμα (MSE). Ουσιαστικά αντικατοπτρίζει το ποσοστό της διακύμανσης στην εξαρτημένη μεταβλητή που είναι προβλέψιμη από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Έτσι, αν είναι 100%, οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται τέλεια, δηλαδή, χωρίς καθόλου διακύμανση. Μια χαμηλή τιμή θα έδειχνε ένα χαμηλό επίπεδο συσχέτισης, που σημαίνει ότι το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης στερείται εγκυρότητας. Όσον αφορά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) είναι ο μέσος όρος του τετραγώνου των σφαλμάτων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα. Το σφάλμα σε αυτήν την περίπτωση σημαίνει τη διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων τιμών και των προβλεπόμενων τιμών. Ο τετραγωνισμός κάθε διαφοράς πραγματοποιείται ώστε οι αρνητικές και θετικές τιμές να μην ακυρώνονται μεταξύ τους. Η απόδοση των δυο συντελεστών παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στο παρακάτω πίνακα και γραφικά στην Εικόνα 19.

Πίνακας 3 Συντελεστής προσδιορισμού και μέσο τετραγωνικό σφάλμα της ανάλυσης των 11 εξισώσεων

Εξισώσεις	R <sup>2</sup>	MSE
EC8 + Swamy et al. 1993	0,821	6,239
Swamy et al. 1993 and ACI 318M-14 (2014)	0,586	7,809
Gandomi 2017 + Swamy et al. 1993	0,972	6,028
Swamy 1993 + Russo, Mitri, Pauletta (2013)	0,794	4,381
Khuntia 2011 + ACI	0,827	2,812
Sharma 1986	0,857	2,286
Shin et al 1994	0,647	3,360
Narayanan and Darwish 1987	0,311	2,095
Ashour 1992 (2nd expression)	0,780	2,313
Slater 2012	0,748	2,239
Kwak 2002	0,544	2,231



Εικόνα 19 Γραφική απεικόνιση του συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup> και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) για κάθε μία από τις 11 εξισώσεις.

## 5.0 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εστίασε στον ευρύτερο χώρο του προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες. Αρχικά παρουσιάστηκαν οι βασικές εξισώσεις προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής όπως αυτές προέκυψαν από την βιβλιογραφική επισκόπησή (έντεκα στο σύνολο). Στη συνέχεια έγινε η συλλογή μιας ικανής βάσης δεδομένων σε ότι αναφορά το πλήθος των δεδομένων (116 πειραματικά δείγματα) από δημοσιευμένες πηγές. Τα δεδομένα μετά την κατάλληλη επεξεργασία τους χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της εκάστοτε εξίσωσης. Μετά το πέρας του υπολογισμού των αντίστοιχων εκτιμώμενων τιμών θλιπτικής αντοχής, προχωρήσαμε στην στατιστική ανάλυση και απόδοση αυτής σε πέντε βασικούς συσχετισμούς: α) την εφαρμογή της γραμμικής παλινδρόμησης των πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών, β) τη σχέση λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  και λόγου διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ), γ) τη σχέση λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με τα δομικά χαρακτηριστικά των δοκών ( $b,d$ ), δ) τη σχέση λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  σε σχέση με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών ( $V_f$ ) και ε) τη σχέση λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  και τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$ .

Η ανάλυση των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων από τη βάση δεδομένων είχε ως αποτέλεσμα τις εξής παρατηρήσεις:

- Τα περισσότερα πειράματα που συλλέχθηκαν πραγματοποιούνται σε μικρά δείγματα από δοκούς.
- Ο λόγος των πειραματικών έναντι των εκτιμώμενων τιμών της θλιπτικής αντοχής των δοκών παρουσιάζει μεγάλη διασπορά σε συνάρτηση με τις ελεγχόμενες παραμέτρους.
- Ο λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος ( $a/d$ ) δίνει χαμηλό συσχετισμό με το λόγο  $V_{exp}/V_{pred}$ .
- Για ύψη 200-450 mm και πλάτη 100-200 mm των δοκών η πλειονότητα αυτών δίνει τιμή λόγου  $V_{exp}/V_{pred}$  κοντά στο 1.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών  $V_f$  που εντοπίζονται στο διάστημα 0,8 και 1,2  $V_{exp}/V_{pred}$  είναι κατά κύριο λόγο μεταξύ 0 – 1 %.
- Ο λόγος  $V_{exp}/V_{pred}$  κυμαίνεται μεταξύ 0,8 και 1,5 όταν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι μεταξύ 30 MPa και 50 MPa.

Όσον αφορά το βασικό σκοπό της εργασίας και την αξιολόγηση των υπό μελέτη εξισώσεων ο καλύτερος συνδυασμός του συντελεστή προσδιορισμού και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος είναι αυτή των Gandomi (2017) και Swamy et al. (1993).

Η ανάλυση σε αυτό το έργο δείχνει την ανάγκη για την καλύτερη κατανόηση της αντοχής των ινοπλισμένων δοκών σκυροδέματος. Απαιτείται η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς της διάτμησης ώστε να επιτραπεί μια ευρύτερη χρήση αυτών στον κατασκευαστικό τομέα.

## Βιβλιογραφία

---

Abbas, Y. M. and Khan, M. I. (2016) ‘Influence of fiber properties on shear failure of steel fiber reinforced beams without web reinforcement: ANN modeling’, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(8), pp. 1483–1498. doi: 10.1590/1679-78252851.

ACI Committee (1999) ‘318 Building Code Requirements for Structural Concrete’, *American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.*, p. 391.

Adebar, P., Mindess, S., Pierre, D. S., & Olund, B. (1997) ‘Shear tests of fiber concrete beams without stirrups’, *Structural Journal*, 94(1), pp. 68–76.

Aggeliki K. (2011) *What is Glass Fiber Reinforced Concrete?*, *Bright Hub Engineering*. Available at: <https://test-bright-hub-engineering.pantheonsite.io/concrete-technology/52308-glass-fiber-reinforced-concrete-gfrc/> (Accessed: 4 February 2019).

Aggeliki K. (2016) *What is Steel Fiber Reinforced Concrete?*, *Bright Hub Engineering*. Available at: <https://test-bright-hub-engineering.pantheonsite.io/concrete-technology/52076-steel-fiber-reinforced-concrete/> (Accessed: 4 February 2019).

Ahmed, E., Legeron, F. and Ouahla, M. (2015) ‘Steel fiber as replacement of minimum shear reinforcement for one-way thick bridge slab’, *Construction and Building Materials*, 78, pp. 303–314. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.095.

Ashour SA, Hassanain GS, W. F. (1992) ‘Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams’, *ACI Structural Journal*, 89(2). doi: 10.14359/2946.

Behbahani, H., Nematollahi, B. and Farasatpour, M. (2011) ‘Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review’, *Icsecm*, (December 2011), pp. 1–13. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/266174465\\_Steel\\_Fiber\\_Reinforced\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/266174465_Steel_Fiber_Reinforced_Concrete_A_Review).

Braga, A. M., Silvestre, J. D. and de Brito, J. (2017) ‘Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse

aggregates', *Journal of Cleaner Production*, 162, pp. 529–543. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.057.

Conforti, A. (2014) *Shear behavior of deep and wide-shallow beams in fiber reinforced concrete*. University of Brescia.

Cucchiara, C., La Mendola, L. and Papia, M. (2004) 'Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement', *Cement and concrete composites*. Elsevier, 26(7), pp. 777–786.

Dahlbo, H., Bach er, J., LCahtinen, K., Jouttijearvi, T., Suoheimo, P., Mattila, T., Sironen, S. and Myllymaa, T., Saramcaki, K. (2015) 'Construction and demolition waste managementea holistic evaluation of environmental performance. J.', *Clean. Prod.*, 107, pp. 333-341.

Di Prisco, M., Ferrara, L., & Lamperti, M. G. (2013). Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. *Materials and structures*, 46(11), 1893-1918.

Dinh, H.H., G.J. Parra-Montesinos, and J. K. Wight (2010) 'Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement', *ACI Structural Journal*, 107(05). doi: 10.14359/51663913.

Dinh, H. H., Parra-Montesinos, G. J. and Wight, J. K. (2011) 'Shear strength model for steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement', *Journal of Structural Engineering*. American Society of Civil Engineers, 137(10), pp. 1039–1051.

Dodson, V. (1989) *Concrete and Mixtures*. New York: Van Nostrand Reinhold: Structural Engineering Series.

Dupont, D. and Vandewalle, L. (2003) 'Shear capacity of concrete beams containing longitudinal reinforcement and steel fibers', *Special Publication*, 216, pp. 79–94.

Gandomi, A. H. *et al.* (2017) 'Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part II: With shear reinforcement', *Measurement*, 95, pp. 367–376. doi: 10.1016/j.measurement.2016.10.024.

Greenough, T., and M. N. (2008) 'Shear Behavior of Fiber-Reinforced Self-

Consolidating Concrete Slender Beams’, *ACI Materials Journal*, 105(5). doi: 10.14359/19976.

J, R. and M, T. (2003) *Trial beams in shear Brite/Euram Project 97-4163, Final Rep., Sub Task 4.2.*

Johnston, C.D. (1982) ‘Fibre Reinforced Concrete.’, *Progress in Concrete Technology CANMET, Energy, Mines and Resources*, pp. 215–236.

Johnston, C. D. (1982). Steel fibre-reinforced concrete-present and future in engineering construction. *Composites*, 13(2), 113-121.

Johnston, C. (2010) *Fiber Reinforced Cements and Concretes*, Gordon and Breach Science Publishers. London and New York: Taylor & Francis Group.

Khuntia M, Stojadinovic B, G. S. (1999) ‘Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups’, *ACI Structural Journal*, 96(2). doi: 10.14359/620.

Kwak YK, Eberhard MO, Kim WS, K. J. (2002) ‘Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups’, *ACI Structural Journal*, 99(4). doi: 10.14359/12122.

Lim, T. Y., Paramasivam, P. and Lee, S. L. (1987) ‘Shear and moment capacity of reinforced steel-fibre-concrete beams’, *Magazine of Concrete Research*, 39(140), pp. 148–160. doi: 10.1680/macr.1987.39.140.148.

Majdzadeh, F., Soleimani, S. M. and Banthia, N. (2006) ‘Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix’, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(6), pp. 726–734. doi: 10.1139/105-118.

Narayanan R, D. I. (1987) ‘Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement’, *ACI Structural Journal*, 84(3). doi: 10.14359/2654.

Oh, B., D. Lim, K. Hong, S. Yoo, and S. C. (1999) ‘Structural behavior of steel fiber reinforced concrete beams in shear.’, *ACI Special Publication*, 182, pp. 9–27.

Para-Montesinos, G. J., Wight, J. K., Dinh, H. H., Libbrecht, A., & Padilla, C. (2006) *Shear strength of fiber reinforced concrete beams without stirrups*, Ann Arbor (MI): University of Michigan.



- Parra-Montesinos, G. J. (2006) 'Shear strength of beams with deformed steel fibers', *Concrete International*, 28(11), pp. 57–66.
- Rangel, C. S. , Toledo Filho, R. D., Amario, M., Pepe, M., de Castro Polisseni, G., & de Andrade, G. P. (2019) 'Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 208, pp. 589–601. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.110.
- Roberts, T. M. and Ho, N. L. (1982) 'Shear failure of deep fibre reinforced concrete beams', *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(3), pp. 145–152. doi: 10.1016/0262-5075(82)90040-9.
- Romualdi, J. P. and Ramey, M. R. (1965) *Effects of impulsive loads on fiber-reinforced concrete beams*. doi: 10.21236/AD0630843.
- Russo, G., Mitri, D. and Pauletta, M. (2013) 'Shear strength design formula for RC beams with stirrups', *Engineering Structures*. Elsevier, 51, pp. 226–235.
- Sharma, A. (1986) 'Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams', *ACI Journal Proceedings*, 83(4). doi: 10.14359/10559.
- Shin S.W., Oh J.G., Ghost S.K. (1994) 'Shear behavior of laboratory-sized high-strength concrete beams reinforced with bars and steel fibers', *Special Publication*, 1(142), pp. 181–200.
- Singh, H. (2017) *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Singapore: Springer Singapore (Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering). doi: 10.1007/978-981-10-2507-5.
- Singh S.K. (2011) *Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: An Overview*, *NBMCW*. Available at: <https://www.nbmcw.com/tech-articles/concrete/26929-pfrc.html> (Accessed: 4 February 2019).
- Slater, E., Moni, M. and Alam, M. S. (2012) 'Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams', *Construction and Building Materials*, 26(1), pp. 423–436. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.042.
- Swamy, R. N., Jones, R., & Chiam, A. T. (1993) 'Influence of Steel fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams', *ACI Structural Journal*, 90(1).

doi: 10.14359/4201.

Swamy, R. N. and Bahia, H. M. (1985) 'The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement', *Concrete International*, 7(3), pp. 35–40.

Swamy, R. N. and Mangat, P. S. (1974) 'Influence of fibre-aggregate interaction on some properties of steel fibre reinforced concrete', *Matériaux et Constructions*, 7(5), pp. 307–314. doi: 10.1007/BF02473840.

Tan, K. H., Murugappan, K. and Paramasivam, P. (1993) 'Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams', *Structural Journal*, 90(1), pp. 3–11.

Zhang, F., Ding, Y., Xu, J., Zhang, Y., Zhu, W., & Shi, Y. (2016) 'Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups', *Engineering Structures*. Elsevier Ltd, 127, pp. 101–116. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.08.012.

Zsutty, T. (1971) 'Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests.', *ACI JOURNAL, Proceedings V.*, 68(2), pp. 138–143.