



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ “ΠΡΑΣΙΝΟΥ” ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ»**

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : ΚΑΤΣΙΑΝΑΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

© 2019 Κατσιάνας Σταύρος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, για καθοδήγηση και την άμεση και ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Κούτα Λάμπρο, για την πολύτιμη συμβολή του και τις χρήσιμες υποδείξεις του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Κωνσταντίνο Στρομπούλη, σε συνεργασία με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι φάσεις κατασκευής των δοκιμών και η πειραματική διαδικασία καθώς και τον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, ΕΤΕΠ, και τον υποψήφιο διδάκτορα Παπαθεοχάρη Θεοχάρη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την συμφοιτήτρια μου Μανιατάκη Ελίζα για την υποστήριξη και την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: **Παπακωνσταντίνου Χρήστος**
(Επιβλέπων) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Επίκουρος καθηγητής

Δεύτερος Εξεταστής: **Κούτας Λάμπρος**
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Επίκουρος Καθηγητής

Τρίτος Εξεταστής: **Κωνσταντίνος Τζάρος**
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Διδάσκων

«ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ “ΠΡΑΣΙΝΟΥ” ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά πειραματικά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος με πρόσμιξη κόκκων ανακυκλωμένου καουτσούκ (Rubberized Concrete) με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου μίγματος με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Οι νέες ιδιότητες και η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη 24 δοκιμών σκυροδέματος με διαφορετικές περιεκτικότητες σε Rubber αξιολογήθηκαν. Εξετάστηκαν παράμετροι όπως το ποσοστό αντικατάστασης των αδρανών με κόκκους καουτσούκ και η περίσφιξη των δοκιμών με ίνες άνθρακα.

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών μπορούμε πλέον να αποφανθούμε πως η χρήση του ανακυκλωμένου καουτσούκ στο σκυρόδεμα, ελαττώνει την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη. Ωστόσο είναι μεγάλης σημασίας το γεγονός ότι η χρήση του βελτιώνει την ικανότητα του σκυροδέματος να παραμορφώνεται ελαστικά, τόσο στα ενισχυμένα όσο και στα μη ενισχυμένα δοκίμια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	2
1.2.1 ΔΟΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	2
1.2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	3
1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗΣ	5
1.4 ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	10
1.4.1 ΠΡΩΤΟΑΡΘΡΟ: «ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΜΙΞΗ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗ».....	10
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	11
1.4.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΑΡΘΡΟ: «ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΜΕ FRP ΚΑΙ ΑΠΕΡΙΣΦΙΧΤΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ».....	12
(Samar Raffoul, Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial loading, 2017)	12
1.4.3 ΤΡΙΤΟ ΑΡΘΡΟ: «ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ: ΜΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ»	14
1.5 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITES).....	17
1.5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	17
1.5.2 ΤΑ ΙΟΠ ΩΣ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	19
1.5.3 ΙΝΕΣ	20
1.5.4 ΜΗΤΡΕΣ.....	24
1.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP ...	25
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	28
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	28

2.1.1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ	32
2.1.2 ΠΡΩΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (control mix).....	33
2.1.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (100% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm).....	33
2.1.4 ΤΡΙΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (75% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm).....	34
2.1.5 ΤΕΤΑΡΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (50% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm).....	35
2.1.6 ΠΕΜΠΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (25% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm).....	36
2.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	37
2.2.1 ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ.....	37
2.2.2 ΑΝΑΜΙΞΗ – ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ	40
2.2.3 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ	41
2.2.4 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	41
2.2.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	42
2.2.6 ΕΠΙΠΕΔΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	44
2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	46
2.3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	46
2.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ STRAIN GAUGE ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	47
2.3.3 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	48
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	49
3.1 ΑΠΕΡΙΣΦΙΓΚΤΑ.....	50
3.1.1 ΠΡΩΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, Control Mix (UCM)	50
3.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR25	52
3.1.3 ΤΡΙΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR50	54

3.1.4 ΤΕΤΑΡΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR75	56
3.2 ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΑ	58
3.2.1 ΠΡΩΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, Control Mix (CCM).....	58
3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR25	60
3.2.3 ΤΡΙΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR50	62
3.2.4 ΤΕΤΑΡΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR75	64
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	66
4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	66
4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	67
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	68
4.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ “ΠΡΑΣΙΝΟΥ” ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΥΤΗ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ	75
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕ ΤΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ	76
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	79
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	82
Βιβλιογραφία	83

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε μία εποχή στην οποία ακμάζουν οι επιστήμες και η τεχνολογία δεν δικαιολογείται η εθελουφλία απέναντι στην καταστροφή του περιβάλλοντος. Μια βιώσιμη πολιτική για την προστασία του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων απαιτεί την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας. Ένας τομέας στον οποίο κρίνεται επιτακτική η ανάγκη ανακύκλωσης είναι ο κατασκευαστικός τομέας. Στα πλαίσια λοιπόν αυτά αναζητήθηκαν δράσεις και τεχνικές έτσι ώστε να εναρμονιστεί η κατασκευαστική και οικοδομική τεχνολογία με ενέργειες επαναχρησιμοποίησης υλικών.

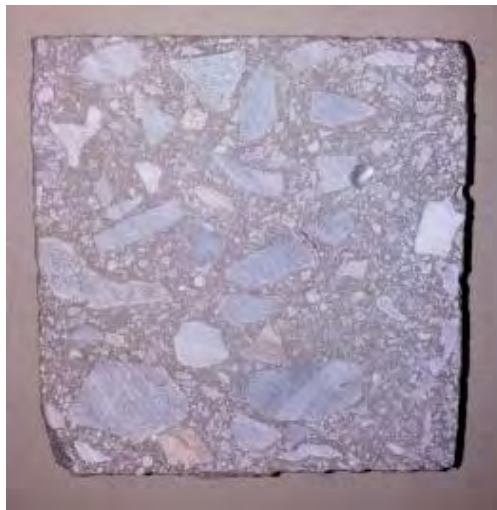
Ένα υλικό το οποίο ταυτίζεται με αυτά τα πρότυπα είναι το μεταχειρισμένο ελαστικό οχημάτων (ανακυκλωμένο καουτσούκ), καθώς υπολογίζεται ότι στην Ε.Ε γίνεται ετησίως διαχείριση περισσότερων των τριών (3) εκατομμυρίων τόνων αυτών. Έτσι λοιπόν, η παρούσα διπλωματική στράφηκε στην έρευνα και στη μελέτη ενός «ελαστικού σκυροδέματος» ,το οποίο προκύπτει από αντικατάσταση ποσοστού αδρανών με κόκκους ανακυκλωμένου καουτσούκ αντίστοιχης κοκκομετρίας.

Βέβαια, κίνητρο της παρούσας διπλωματικής δεν αποτελεί μονάχα η περιβαλλοντική ανησυχία, αλλά και η δημιουργία ενός νέου μίγματος, με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η χρήση του στον κατασκευαστικό κλάδο.

1.2 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.2.1 ΔΟΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή διαφόρων σχημάτων και μεγεθών που είναι συγκολλημένα μεταξύ τους και περιβάλλονται από ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό. Τα αδρανή διακρίνονται με το μέγεθος των κόκκων τους, καθώς και με τη μορφή τους και καθορίζουν το βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και την μεταβολή όγκου του σκυροδέματος. Σημαντικοί παράγοντες για τις ιδιότητες του σκυροδέματος είναι το πορώδες, το σχήμα και η υφή των αδρανών. Ο τσιμεντοπολτός είναι το προϊόν αντίδρασης του τσιμέντου με το νερό και η παρασκευή του γίνεται με ανάμιξη των δύο υλικών. Ο τσιμεντοπολτός με την πάροδο του χρόνου σκληραίνεται και αναπτύσσει συνάφεια με τα αδρανή και τον χάλυβα σχηματίζοντας μια λεπτή κρυσταλλική δομή κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Η διαδικασία ενυδάτωσης αφορά τη χημική αντίδραση μεταξύ τσιμέντου και νερού. Το τσιμέντο τύπου Portland που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι βιομηχανικό προϊόν σε μορφή γκριζοπράσινης σκόνης και αποτελείται από κόκκους διαστάσεων 1-50 μm και παρασκευάζεται με άλεσμα σβόλων διαμέτρου λίγων εκατοστών που λέγονται κλίνκερ με μικρή ποσότητα προσμίξεων. (Κοτσόβος, 2016)



Σχήμα 1.1: Τομή σκυροδέματος

1.2.2 ANTOXH SKYPODEMATOS

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι η αντοχή του καθώς αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του το οποίο συνδέεται άμεσα με την χρησιμότητα στην διαστασιολόγηση των κατασκευών από το υλικό αυτό. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά και για αυτό πολλές μηχανικές ιδιότητες του υλικού εκφράζονται συναρτήσει αυτού του μεγέθους. Οι ιδιότητες του σκληρυσμένου σκυροδέματος βελτιώνονται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος η οποία σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του.

Μέτρο ελαστικότητας

$$E_{cm} = 9.50 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (1.1)$$

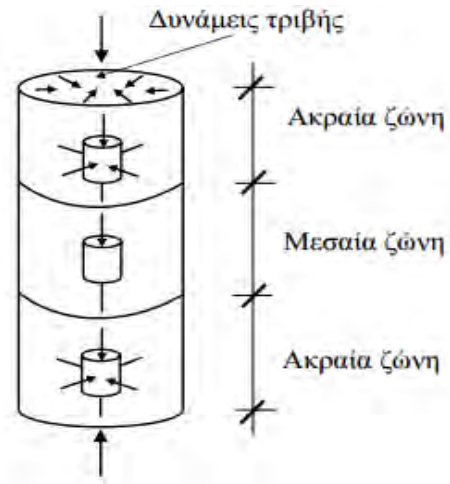
Μέγιστη τάση θραύσης

$$f_{ck} = P_{max} / A \quad (1.2)$$

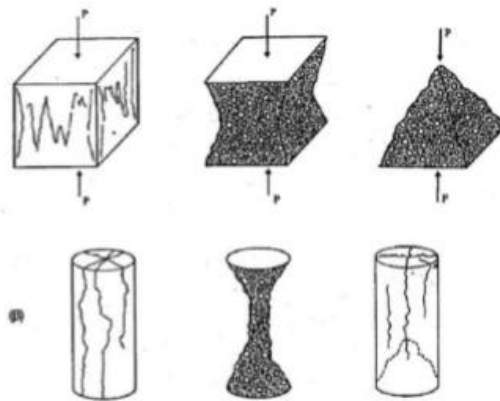
Η αντοχή προσδιορίζεται συνήθως με πειράματα μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικό ή τετραγωνικό δοκίμιο. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό, οπότε σε αυτό θα γίνει εστίαση. (Τσαμασφύρος, 1991)

Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψης αποτελεί μια δοκιμή κατά την οποία το δοκίμιο φορτίζεται υπό την επίδραση δυο δυνάμεων, ίσου μέτρου, ίδιας διεύθυνσεως, αντίθετης όμως φοράς, τέτοιας ώστε να προκαλείται συμπίεση του υλικού

Κατά τη δοκιμή, το δοκίμιο αναπτύσσει εγκάρσιες παραμορφώσεις (διόγκωση), οι οποίες εμποδίζονται σημαντικά λόγω δυνάμεων τριβής στην περιοχή των επιφανειών επαφής με τις άκαμπτες πλάκες της μηχανής φόρτισης. Η εγκάρσια αυτή παρεμπόδιση επιβραδύνει την ανάπτυξη και επέκταση κατακόρυφων μικρορωγμών και άρα αυξάνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Ο 'εγκιβωτισμός' αυτός του υλικού είναι έντονος μόνο στις ακραίες περιοχές του δοκιμίου, γι' αυτό και η επίδρασή του στο αποτέλεσμα της δοκιμής μειώνεται αυξάνοντας τον λόγο ύψους προς βάση. Στο Σχήμα 1.2(β) φαίνεται ο τρόπος αστοχίας κυλινδρικού και κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.



(α)



(β)

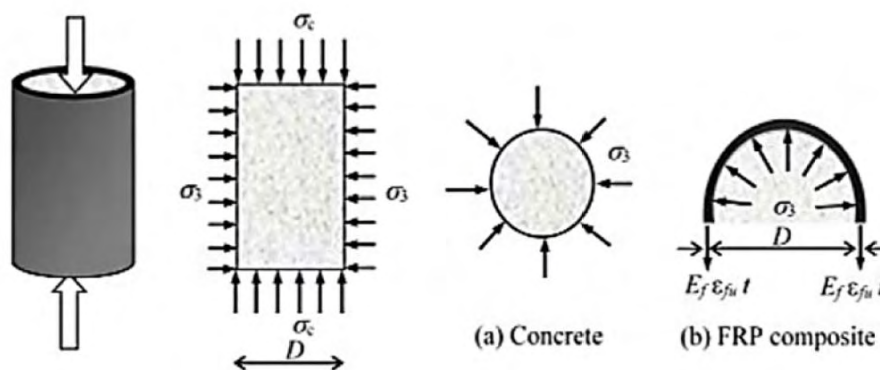
Σχήμα 1.2: α) Εντατική Κατάσταση κυλίνδρου υπό αξονική θλίψη σε πραγματικές συνθήκες (πηγή: **(Κοτσόβος, 2016)**)
 β) Τρόποι Αστοχίας δοκιμίων σε καθαρή θλίψη (πηγή: **(Πατρας)**)

1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗΣ

Η περίσφιξη του σκυροδέματος με ΙΟΠ προσδίδει αύξηση στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αλλά και πλαστιμότητας του στοιχείου στο φορτίο που καλείται να αναλάβει. Στην παρούσα φάση θα μελετήσουμε τη θλιπτική αντοχή και όχι την αύξηση πλαστιμότητας. Κατά την αξονική καταπόνηση ενός υποστυλώματος (λόγω κάμψης ή θλιπτικού φορτίου) το σκυρόδεμα του υποστυλώματος διογκώνεται εγκάρσια. Στο σημείο αυτό ενεργοποιείται ο μανδύας που το περιβάλλει καθώς αναπτύσσονται σε αυτόν εγκάρσιες εφελκυστικές παραμορφώσεις στις ίνες του, ενώ ο μανδύας ασκεί με τη σειρά του εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις περίσφιξης κάθετα στον άξονα του μέλους (Ρίστας, 2018). Με αυτό τον τρόπο η περίσφιξη επιτυγχάνει συγκεκριμένα αποτελέσματα στο υποστύλωμα:

- Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και αύξηση παραμορφωσιμότητας (μέγιστη παραμόρφωση μέχρι τη θλιπτική αστοχία).
- Αύξηση πλαστιμότητας, λόγω αύξησης παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος στις περιοχές των ματίσεων και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.

Η χρήση συνθετικών υλικών παρουσιάζει σημαντικά ευνοϊκότερα αποτελέσματα εν συγκρίσει με τη χρήση μεταλλικών μανδυνών ίσης δυσκαμψίας. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η λειτουργία του μανδύα από συνθετικά υλικά καθώς και οι εγκάρσιες τάσεις περίσφιξης που αναπτύσσονται.



Σχήμα 1.3: Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών και ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης

Σε κυλινδρικό υποστύλωμα οι εγκάρσιες τάσεις που προσφέρει η περίσφιγξη από τον μανδύα, ασκούνται στο σκυρόδεμα ως ίσες με αντίθετη φορά. Οι τάσεις αυτές δίδονται από τη σχέση:

$$\sigma_3 = \frac{2 \cdot t_{FRP} \cdot \sigma_{FRP}}{D} \quad (1.3)$$

Όπου:

σ_3 : Οι εγκάρσιες τάσεις από την περίσφιγξη που προκαλεί ο μανδύας (MPa)

σ_c : Οι τάσεις που αναπτύσσονται από την αξονική – θλιπτική φόρτιση (MPa)

σ_{FRP} : Οι διατμητικές τάσεις του μανδύα (FRP) (MPa)

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

ϵ_{FRP} : Οι παραμορφώσεις του FRP

t_{FRP} : Το πάχος του FRP (m)

D : Η διάμετρος του υποστυλώματος (λαμβάνομένου υπόψη του πάχους του FRP) (m)

Με την επιβολή της περίσφιγξης επιτυγχάνεται παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης, αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας έως ότου φτάσει στα επίπεδα θραύσης του μανδύα οπότε αυτό ορίζει και την αντοχή του στοιχείου εφόσον δεν έχει προηγηθεί αποκόλληση του μανδύα από το σκυρόδεμα. Η εφελκυστική αντοχή του μανδύα εφαρμοσμένου σε υποστύλωμα παρουσιάζει μικρότερες τιμές σε σχέση με τις εργαστηριακές δοκιμές του υλικού σε καθαρό εφελκυσμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε πολλές παραμέτρους όπως:

- Συγκέντρωση τάσεων σε ακμές και γωνίες
- Πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στο μανδύα του ΙΟΠ
- Στην ύπαρξη πολλών στρώσεων υλικού
- Στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα και στην επαρκή συγκόλληση με το σκυρόδεμα

Για να ληφθεί υπόψη η διαφορά στην εφελκυστική αντοχή του μανδύα του ΙΟΠ, λαμβάνεται υπόψη ένας μειωτικός συντελεστής ώστε να προσδώσει ρεαλιστικότερη αντοχή στο υλικό.

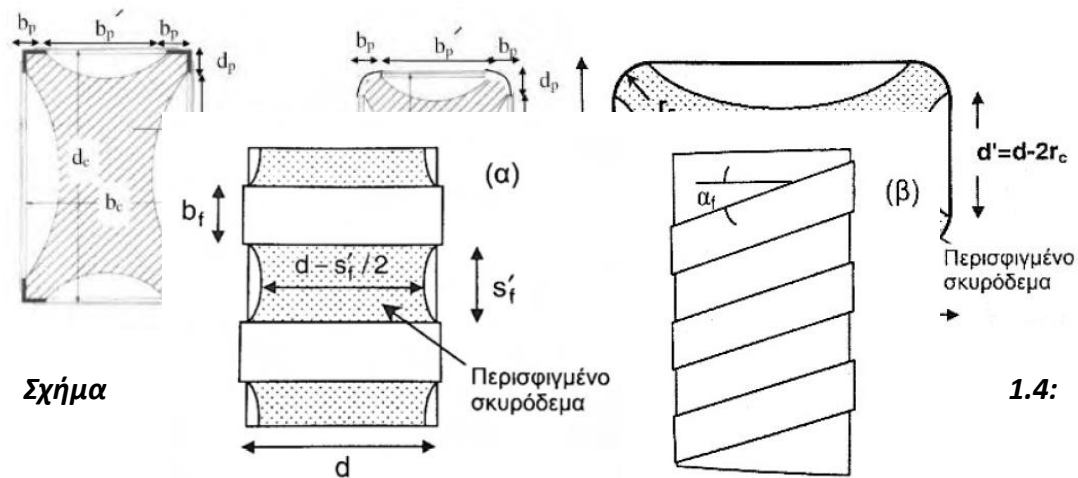
$$f_{fde} = n_e \times f_{fd} \quad (1.4)$$

f_{fde} : Μειωμένη εφελκυστική αντοχή του μανδύα (MPa)

n_e : Μειωτικός συντελεστής (0,7 – 0,9)

f_{fd} : Αρχική εφελκυστική αντοχή του μανδύα (MPa)

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνει σημαντικά με την περίσφιγξη του. Σε περίπτωση ορθογωνικού υποστυλώματος η περίσφιγξη δεν παρουσιάζεται σε όλη την περίμετρο του υποστυλώματος αλλά από τις γωνίες και προς το κέντρο του υποστυλώματος. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η λειτουργία της περίσφιγξης σε ορθογωνικό υποστυλώμα. Παρατηρείται η μεγάλη σημασία της ακτίνας καμπυλότητας των γωνιών του υποστυλώματος η οποία όσο μεγαλύτερη είναι (τείνοντας προς κυκλικό υποστυλώμα) τόσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδό του υποστυλώματος που δέχεται την περίσφιγξη.

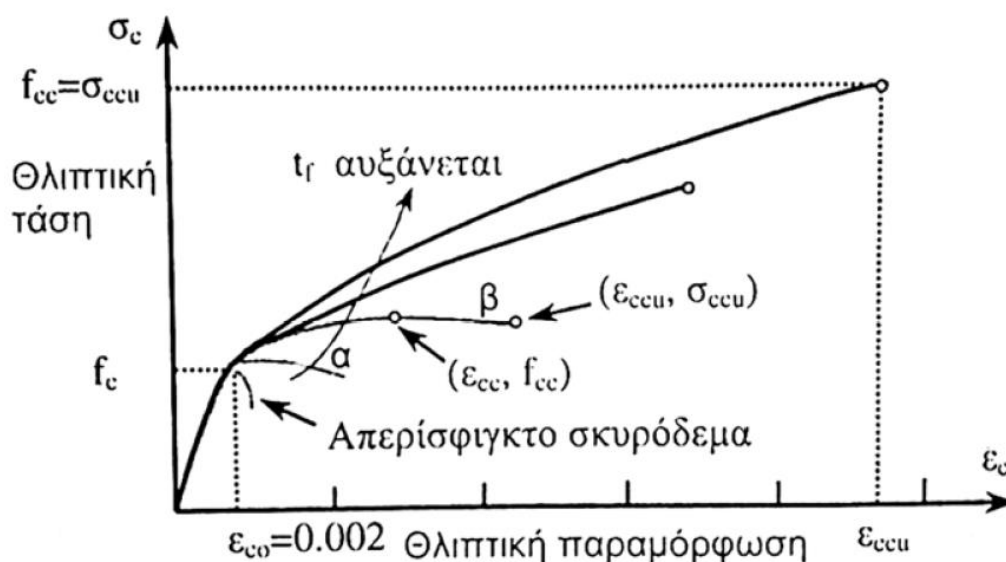


Σχήμα

Περίσφιγξη ορθογωνικού υποστυλώματος. Αριστερά περίσφιγξη με μανδύα από χαλύβδινες λάμες. Κέντρο και δεξιά περίσφιγξη με FRP

Σχήμα 1.5: Αριστερά περίσφιγξη με λωρίδες σε απόσταση μεταξύ τους εγκάρσια στο στοιχείο.

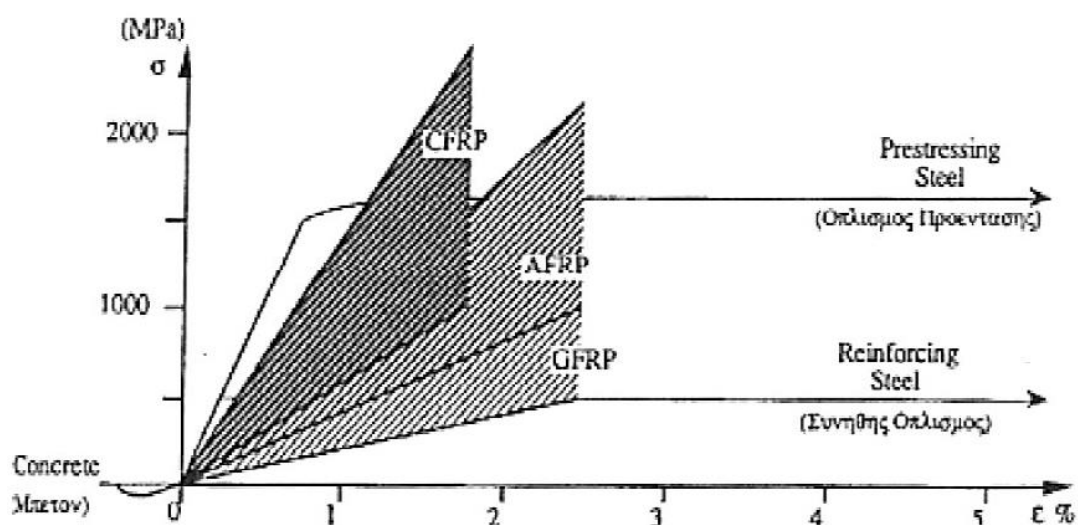
Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται δύο διαφορετικού τύπου περίσφιγξης υποστυλώματος. Αριστερά ο μανδύας τοποθετείται εγκάρσια (κάθετα) στον άξονα του υποστυλώματος σε στρώσεις αφήνοντας αποστάσεις μεταξύ των λωρίδων. Δεξιά οι λωρίδες τοποθετούνται υπό γωνία α_0 ως προς την κάθετο στον άξονα του υποστυλώματος. Σε κάθε περίπτωση η περίσφιγξη από μανδύα ΙΟΠ στο υποστυλώμα μπορεί να είναι συνεχής. Σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις μελετάται το επίπεδο αύξησης της αντοχής καθώς και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που προσδίδονται και επιλέγεται ο κατάλληλος τρόπος περίσφιγξης.



Σχήμα 1.6: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με FRP

Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος περισφιγμένου και μη. Παρατηρούμε ότι όλα τα υλικά παρουσιάζουν μια γραμμική ελαστική περιοχή και έπειτα στο σημείο καμψής ($\epsilon_{cu} = 0.002$), το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα θραύεται πολύ γρήγορα, ενώ το περισφιγμένο με αυξανόμενο πάχος μανδύα (αύξηση στρώσεων) παρουσιάζει βελτίωση τόσο σε θλιπτική αντοχή ενώ παράλληλα παρουσιάζει και σημαντική παραμόρφωση. Όσο αυξάνει το πάχος της στρώσης του μανδύα τόσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του (2 – 2,5 φορές αναλογικά με την κλίμακα του διαγράμματος) καθώς και η παραμόρφωση του εν συγκρίσει με το περισφιγμένο με μικρότερο πάχος στρώσης. Μεταξύ των CFRP και GFRP τα οποία

έχουν το ίδιο πάχος μανδύα, το ΙΟΠ με ίνες άνθρακα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη, ενώ το GFRP παρουσιάζει μεγαλύτερη παραμόρφωση.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για σκυρόδεμα με οπλισμό και με περίσφιγξη από σύνθετα υλικά

Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος με τη χρήση συμβατικού οπλισμού, με περίσφιγξη με ΙΟΠ διαφόρων τύπων και με προεντεταμένο χάλυβα. Παρατηρείται ότι η χρήση FRPs βελτιώνει σημαντικά την αντοχή του σκυροδέματος έναντι του κοινού χάλυβα και εν μέρει έναντι του προεντεταμένου χάλυβα. Το CFRP αυξάνει σημαντικά την αντοχή του δομικού μέρους αλλά όχι τόσο την παραμόρφωσή του καθώς ο χάλυβας προσφέρει μεγαλύτερη παραμόρφωση. Ωστόσο το AFRP παρουσιάζει μικρότερη αντοχή από το CFRP αλλά μεγαλύτερη δυνατότητα παραμόρφωσης. Το GFRP παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή από τα τρία ΙΟΠ αλλά μεγαλύτερη από τον κοινό χάλυβα. Ωστόσο η δυνατότητα του σε παραμόρφωση, η σημαντική αύξηση της αντοχής (διπλάσια από τον κοινό χάλυβα) και το σχετικά μικρό του κόστος το κάνουν αρκετά ελκυστικό στις δομικές κατασκευές.

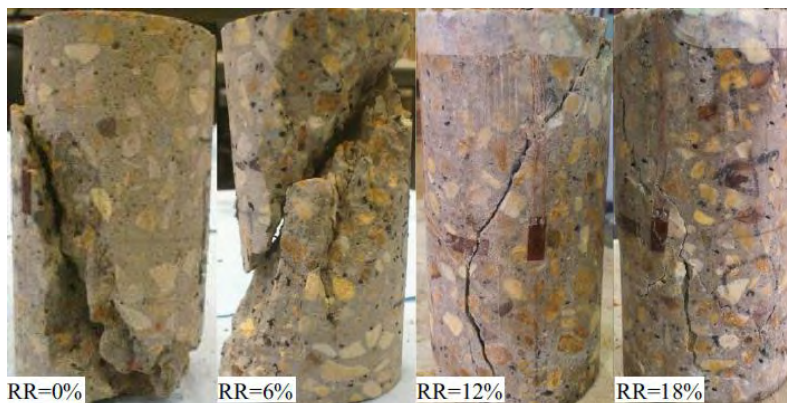
1.4 ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες, αποτελέσματα και συμπεράσματα από πειραματικές έρευνες αναφορικά με τη χρήση ανακυκλωμένου καουτσούκ στο σκυρόδεμα. Πρόκειται για μία σύντομη αναφορά βασικών σημείων της κάθε έρευνας, τα οποία αποτέλεσαν και κίνητρο για τη δόμηση και τον προγραμματισμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

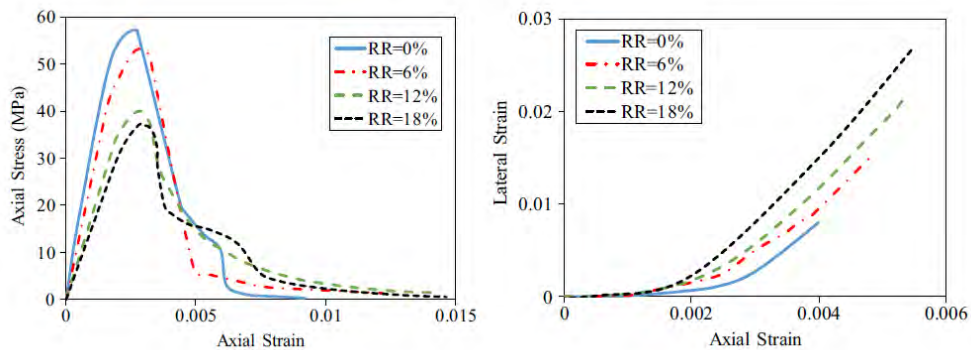
1.4.1 ΠΡΩΤΟΑΡΘΡΟ: «ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΜΙΞΗ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗ»

(Aliakbar Gholampour, 2017)

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης για την αξονική θλιπτική συμπεριφορά του Rubberized concrete υπό ενεργή περίσφιξη. Τέσσερα διαφορετικά μίγματα σκυροδέματος με αντικατάσταση από rubber σε αναλογίες 0%, 6%, 12% και 18% παράχθηκαν (Σχήμα 1.8). Τα αποτελέσματα του λόγου αντικατάστασης του καουτσούκ και της περισφικτικής τάσης επί της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος εξετάστηκαν μέσω των δοκιμών, τόσο σε απερίσφικτους όσο και σε περισφιγμένους κλειστούς κυλίνδρους σκυροδέματος. Η περίσφιξη εφαρμόστηκε από ένα «κύτταρο Hoek» σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων, συμπεριλαμβανομένων των 5, 7,5, 10, 15, 20 και 25 MPa.



Σχήμα 1.8: Μορφές αστοχίας δοκιμών σε θλίψη για διαφορετικές αναλογίες αντικατάστασης



Σχήμα 1.9: (α) Διάγραμμα Τάσης – Αξονικής Παραμόρφωσης(β)Διάγραμμα Αξονικής Παραμόρφωσης – Οριζόντιας Παραμόρφωσης

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Δεδομένης μιας ομοιόμορφης ανάπτυξης ρηγματώσεων, η ανελαστική ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος βελτιώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ. Αυτή η επιρροή γίνεται πιο έντονη με αυξανόμενη τάση περίσφιξης.
- Σε μια σταθερή περισφικτική τάση, μια αύξηση στην αναλογία του καουτσούκ οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος για δεδομένο αξονικό φορτίο. Αυτό δείχνει ότι ο ρυθμός διόγκωσης του σκυροδέματος αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε καουτσούκ.
- Η αξονική αντοχή τόσο του Rubberized concrete όσο και του συμβατικού, αυξάνεται με την ταυτόχρονη αύξηση της περισφικτικής τάσης (Σχήμα 1.9).

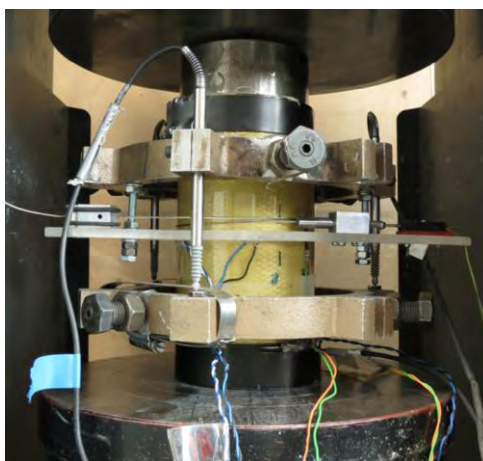
1.4.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΑΡΘΡΟ: «ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΜΕ FRP ΚΑΙ ΑΠΕΡΙΣΦΙΧΤΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ»

(Samar Raffoul, Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial loading, 2017)

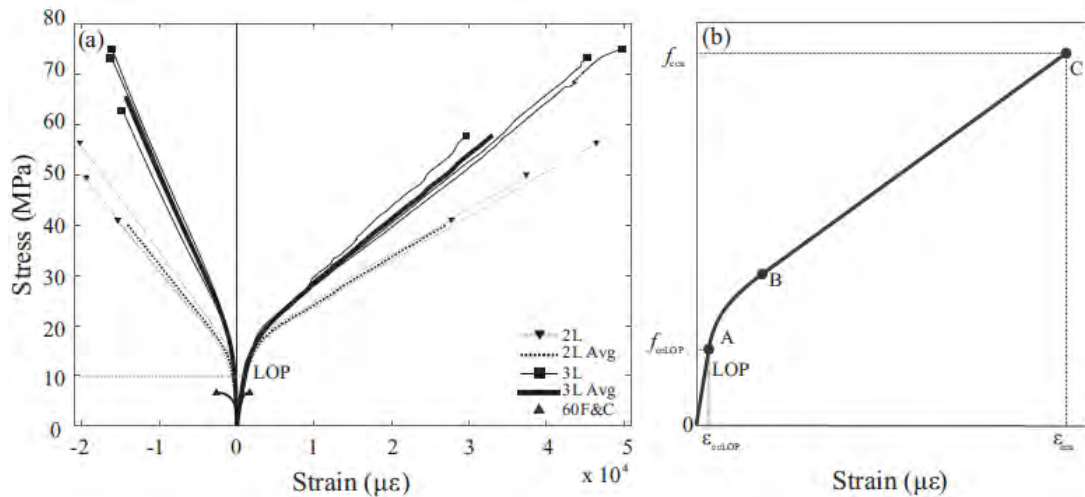
Το συγκεκριμένο άρθρο διερευνά τη χρήση σύνθετων υλικών (FRP) για την ανάπτυξη ενός νέου, υψηλής αντοχής, υψηλής παραμορφοσιμότητας Rubberized concrete με περίσφιξη (CRuC). Εξήντα δοκίμια Rubberized concrete (RuC) εξετάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Οι κύλινδροι παράγονται από ανακυκλωμένο rubber το οποίο προέρχεται από ελαστικά αυτοκινήτων με σκοπό να αντικαταστήσει:

- 0-100% λεπτόκοκκων ή χονδρόκοκκων αδρανών
- 40% ή 60% του συνόλου των αδρανών

Έξι κύλινδροι του τελευταίου μίγματος περισφίχτηκαν με δύο ή τρεις στρώσεις ινών αραμιδίου (FRAM Aramid).



Σχήμα 1.10: Γενική εικόνα πειραματικής διάταξης



Σχήμα 1.11: (α) Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων CRuC κυλίνδρων (β) Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων συμβατικών κυλίνδρων με FRP

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η σχέση τάσης παραμόρφωσης των κυλίνδρων από σκυρόδεμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ (λιγότερο από 18% του συνολικού όγκου αδρανούς) είναι παρόμοια με εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος. Ωστόσο, ακόμη και τόσο μικρά ποσοστά αντικατάστασης οδήγησαν σε μεγάλες μειώσεις σε αντοχή σε θλίψη (μέχρι 40% με 11% συνολικά συνολική αντικατάσταση) (Σχήμα 1.11).
- Η αντικατάσταση των αδρανών με καουτσούκ μειώνει επίσης την αξονική παραμόρφωση του προκύπτοντάς σκυροδέματος σε μέγιστη τάση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα εμφανές για υψηλά περιεχόμενα ελαστικού (> 27% του συνολικού όγκου αδρανούς υλικού). Καθώς αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, η μείωση στην αξονική παραμόρφωση συνοδεύονταν από πρόωρη εμφάνιση ρηγματώσεων.
- Η διαφορά στη θλιπτική αντοχή όταν συγκριθεί η μερική αντικατάσταση λεπτόκοκκων ή χονδρόκοκκων αδρανών υλικών με την καθολική αντικατάστασή τους είναι οριακή. Η συνδυασμένη αντικατάσταση του όγκου των χονδρόκοκκων και το λεπτόκοκκων αδρανών είναι η καλύτερη επιλογή για μεγιστοποίηση της

περιεκτικότητας σε καουτσούκ, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται επαρκής εργασιμότητα.

- Η αντικατάσταση των αδρανών με καουτσούκ αυξάνει την πλευρική παραμόρφωση RuC έως και 300% σε σχέση με το απλό μίγμα. Η δε περίσφιξη του RuC με δύο και τρία στρώματα AFRP αύξησε το θλιπτική αντοχή έως και 10,1 φορές ($f_{cc} = 75 \text{ MPa}$) πάνω από το μίγμα ελέγχου. Επιπλέον, επιτεύχθηκαν μέσες αξονικές τελικές παραμορφώσεις μέχρι 5% (δηλ. 14 φορές περισσότερο από το συμβατικό σκυρόδεμα). Αυτό δείχνει ότι το CRuC είναι κατάλληλο για δομικές εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη παραμόρφωση.
- Η πλευρική περίσφιξη τροποποίησε την ογκομετρική συμπεριφορά του CRuC. Δείγματα με 2 στρώματα AFRP είχαν ογκομετρική διόγκωση μετά το LOP, ενώ εκείνοι που διατηρούν 3 στρώματα AFRP διατήρησαν ογκομετρική συστολή. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδίδεται στην ασυμπίεστη φύση των ελαστικών σωματιδίων, που μπορεί να γεμίσει τα κενά στο σκυρόδεμα υπό έντονη περίσφιξη, οδηγώντας σε συνολική συστολή των κυλίνδρων με 3 AFRP στρώματα.

1.4.3 ΤΡΙΤΟ ΑΡΘΡΟ: «ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ: ΜΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ» (Samar Raffoul, 2017)

Στο άρθρο διερευνάται πειραματικά τη συμπεριφορά του Rubberized concrete (RuC) με υψηλό ποσοστό από rubber, έτσι ώστε να αξιοποιούνται πλήρως οι μηχανικές ιδιότητες του βουλκανισμένου καουτσούκ. Οι νέες ιδιότητες και η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη 40 μιγμάτων Rubberized concrete εξετάστηκαν με παραμέτρους όπως ο όγκος (0 έως 100%) και ο τύπος των ορυκτών αδρανών (λεπτό ή χοντρό), το νερό, ο τύπος του συνδετικού υλικού, οι ιδιότητες των σωματιδίων καουτσούκ και η προεπεξεργασία επιφανειών από καουτσούκ. Αυτή η αρχική μελέτη οδήγησε στην ανάπτυξη ενός "βέλτιστου" μείγματος RuC, που περιλαμβάνει παραμέτρους ανάμιξης που οδηγούν στην υψηλότερη εργασιμότητα και αντοχή σε όλα τα περιεχόμενα ελαστικού. Σε σύγκριση με ένα μη βελτιστοποιημένο σκυρόδεμα με 100% αντικατάσταση του λεπτόκοκκων αδρανών με καουτσούκ, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με βελτιστοποιημένο συνδετικό υλικό και μέτρια αναλογία νερού / συνδετικού υλικού ενισχύθηκε έως και κατά 160% και η λειτουργικότητα

βελτιώθηκε σημαντικά. Η βελτιστοποίηση που προτείνεται σε αυτή τη μελέτη θα οδηγήσει σε καουτσούκ RuC κατάλληλο για βιώσιμες εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Επιδράσεις του καουτσούκ:
 - Υψηλότερα περιεχόμενα από καουτσούκ μειώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος, την πυκνότητα σκυροδέματος και την θλιπτική του αντοχή.
 - Η αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τον συνολικό όγκο καουτσούκ και όχι από τον τύπο αντικατάστασης καουτσούκ-αδρανών(αντικατάσταση ακατέργαστου ή λεπτού αδρανούς). Παρόλα αυτά, οι νέες ιδιότητες του RuC ήταν ελαφρώς κατώτερες σε υψηλά επίπεδα αντικατάστασης λεπτών αδρανών. Οι συνδυασμοί η αντικατάστασης λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών συμβάλουν στην επίτευξη υψηλών περιεκτικοτήτων σε καουτσούκ με ελάχιστη αρνητική επιρροή στην αντοχή και την εργασιμότητα.
- Βελτιστοποίηση ανάμειξης:
 - Η βελτιστοποίηση ανάμειξης ελαχιστοποιεί τις δυσμενείς επιπτώσεις του καουτσούκ στο σκυρόδεμα , ως προς τις «fresh and hardened» μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, η κατά 40% αντικατάσταση των λεπτόκοκκων αδρανών με καουτσούκ μείωσε την αντοχή του αρχικού μίγματος (O) κατά 70%, ενώ η μείωση αυτή ήταν μόλις 49% στο βελτιστοποιημένο μίγμα (D).
 - Τα βελτιστοποιημένα μείγματα RuC (D) επέτρεψαν τη χρήση υψηλών περιεκτικοτήτων σε καουτσούκ (έως και 60% συνολική αντικατάσταση όγκου αδρανών) διατηρώντας παράλληλα μια αποδεκτή εργασιμότητα και αντοχή σε θλίψη 7 MPa σε 7 ημέρες.
 - Η χρησιμοποίηση SF και PFA για την αντικατάσταση του 20% της μάζας τσιμέντου αύξησε τη ρευστότητα του σκυροδέματος κατά 20% και την

αντοχή κατά 42%. Το SF και το PFA είχαν αποτέλεσμα γεμίματος (βελτιώνοντας έτσι τη συσκευασία) και μια ποζολανική αντίδραση με τα προϊόντα ενυδάτωσης τσιμέντου.

- Η πρόπλυση του ελαστικού με νερό ή η προ-επίστρωση με SF δεν βελτίωσε την απόδοση του RuC.

1.5 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITES)

ΟΡΙΣΜΟΣ (Agarwal, 1990) :Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα, ως σύνθετα υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν αυτά τα οποία προκύπτουν από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους. Ομοίως, και το ίδιο το σύνθετο υλικό που συντίθεται από αυτά, πρέπει να έχει και αυτό διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των συστατικών του.

Από αυτά τα συστατικά, κατά κανόνα, το ένα καλείται συστατικό ενίσχυσης και είναι αυτό που προσδίδει στο τελικό προϊόν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και το άλλο μήτρα. Η μήτρα προσδίδει στο σύνθετο υλικό την δυνατότητα να εκμεταλλεύεται πλήρως τις ιδιότητες της ενίσχυσης.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή σήμερα είναι το κατεξοχήν σύνθετο υλικό και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στον κατασκευαστικό τομέα, χάρη στις ευεργετικές ιδιότητες που προσδίδουν στα υλικά με τα οποία συνεργάζονται.



Σχήμα 1.12: Συστατικά σύνθετων υλικών

1.5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η συμβολή των ΙΟΠ στην ενίσχυση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πλέον αναγνωρίσιμη τα τελευταία χρόνια και η συνεργασία αυτή κρίνεται απαραίτητη σε περιπτώσεις όπως:

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



Σχήμα 1.13: Ενίσχυση δοκών με FRP (carbon fiber)

1.5.2 ΤΑ ΙΟΠ ΩΣ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως συστατικό αποτελούνται από ίνες (συστατικό ενίσχυσης) και την μήτρα. Οι ίνες στα ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηρίζονται για την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και τη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά τους κατά την αστοχία. (Καλογεράκης, 2013). Οι μήτρες από της άλλη, προσδίδουν συνέχεια, προστασία και σύνδεση στις ίνες.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΟΠ

- Άριστες Μηχανικές Ιδιότητες
- Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία
- Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες
- Αντίσταση στη διάβρωση
- Απόσβεση ταλαντώσεων (ηχομόνωση)
- Μείωση βάρους κατασκευής
- Αντοχή σε κρούσεις ψηλής ενέργειας

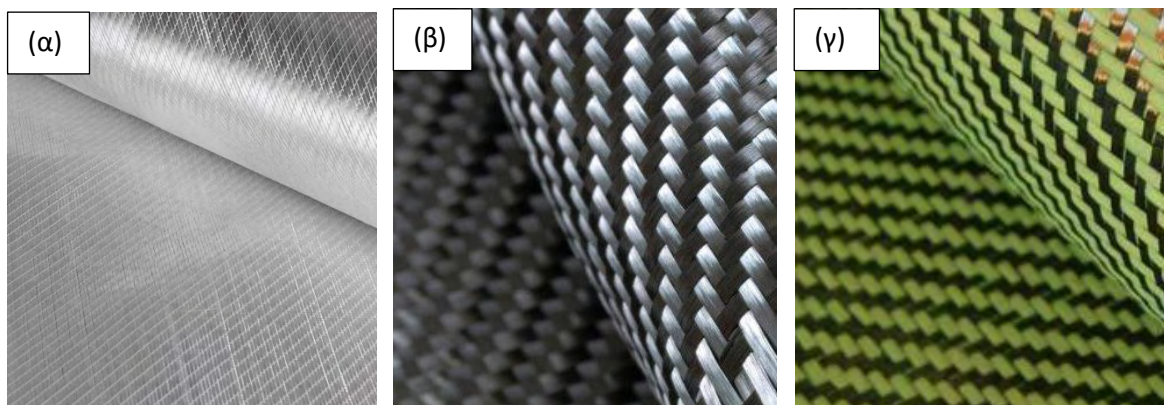
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΟΠ

- Υψηλό κόστος παρασκευής
- Ο μηχανικός χαρακτηρισμός των ΙΟΠ είναι πολύ πιο δύσκολος συγκριτικά με ένα ομοιογενές ισότροπο υλικό
- Η επισκευή των ΙΟΠ είναι περίπλοκη/αδύνατη
- Τα ΙΟΠ δεν έχουν υψηλό συνδυασμό αντοχής και δυσθραυστότητας
- Τα ΙΟΠ δεν αποτελούν το χρυσό δισκοπότηρο στην επιστήμη των υλικών (αντοχή, παραμορφωσιμότητα, δυσθραυστότητα, συγκολλησιμότητα, χαμηλό κόστος και αντοχή σε διάρκεια.) (Παπακωνσταντίνου, 2015)

1.5.3 ΙΝΕΣ

Οι ίνες είναι αυτές που κάνουν τα σύνθετα υλικά ισχυρότερα, πιο δύσκαμπτα και πιο σκληρά. Οι μορφές των ινών που συναντάμε είναι: (Σχήμα 1.14)

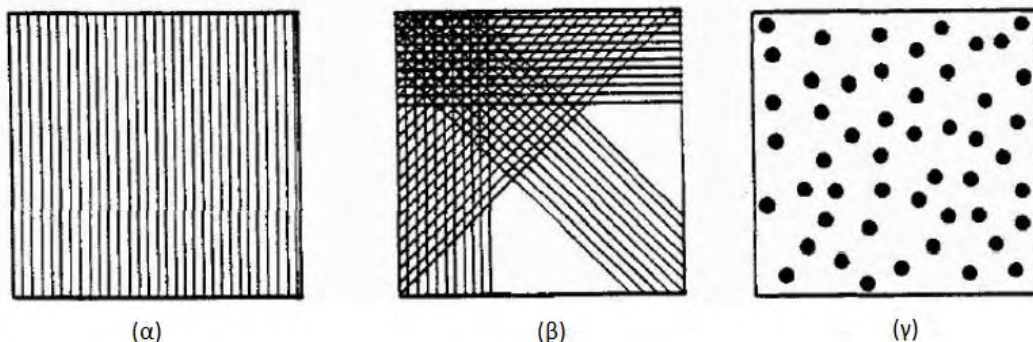
- Ίνες Γυαλιού
- Ίνες Άνθρακα
- Ίνες Κέβλαρ
- Ίνες Πυριτίου
- Ίνες Βορίου



Σχήμα 1.14: (α) Ίνες γυαλιού, (β) Ίνες άνθρακα (γ) Ίνες κέβλαρ

Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες διαφόρων τύπων και κατηγοριοποιούνται σε:

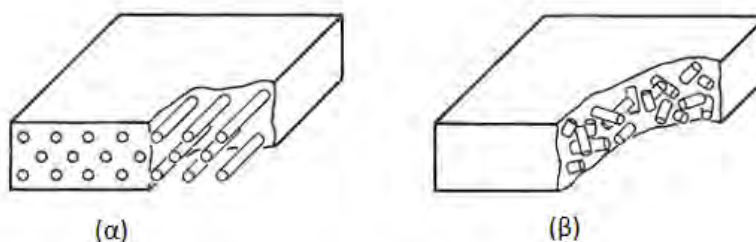
- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.



Σχήμα 1.15: (α) Ινώδη σύνθετα υλικά, (β) Σύνθετα υλικά στρωμάτων, (γ) Σύνθετα υλικά σωματιδίων

Τα σύνθετα υλικά, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών, κατηγοριοποιούνται σε:

- Προσανατολισμένα (directional), με ίνες συνεχείς και ίδιας διεύθυνσης.
- Μη προσανατολισμένα (random), με ίνες τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό.

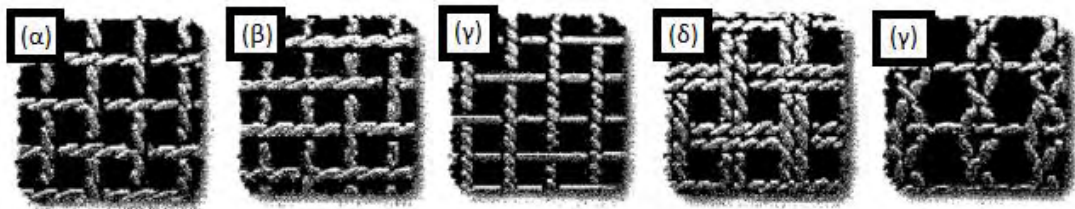


Σχήμα 1.16: (α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό, (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό

Τα ΙΟΠ προκύπτουν από σύνθεση ινών, δηλαδή η οποία αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των υφασμάτων καθώς προσδίδει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και αντοχή σε εφελκυσμό. Μέσω της πλέξης μεταφέρονται και διαμορφώνονται οι τάσεις που δέχεται το ύφασμα κατά την καταπόνηση. Η βασική διάκριση όσο αφορά την πλέξη και τα υφάσματα είναι στην πλέξη σε μία ή δύο διευθύνσεις.

- Πλέξη μίας διεύθυνσης : οι ίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους στην ίδια διεύθυνση με αυτή του υφάσματος.
- Πλέξη δύο διευθύνσεων : η πλέξη μπορεί να είναι απλή, διαγώνια, τύπου Satin, καλαθωτή ,Leno. Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζεται η μορφή των πλέξεων αυτών.

- ❖ Απλή πλέξη (plain wave) : Οι διαμήκεις και εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη.
- ❖ Διαγώνια πλέξη (Twill) : Χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας από ότι η απλή πλέξη.
- ❖ Satin : η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από διαμήκεις θυσάνους ινών με διαφορετική μορφή σε κάθε όψη του υφάσματος (μπρος – πίσω).
- ❖ Leno : η πλέξη αυτή χαρακτηρίζεται ως μια «κλειδωμένη» πλέξη καθώς περιορίζει στο ελάχιστο την μετατόπιση των θυσάνων.



Σχήμα 1.17: (α) Απλή πλέξη, (β) Διαγώνια πλέξη, (γ) Satin, (δ) Καλαθωτή πλέξη, (ε) Leno

(Παπακωνσταντίνου, 2015)

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ορισμένες ιδιότητες των ινών:

Πίνακας 1.1: Βασικές ιδιότητες των FRP

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPA)	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚ Η ΑΝΤΟΧΗ (GPA)	ΟΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (%)
Άνθρακας			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπέρ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μ. ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπέρ-υψηλού μ. ελαστικ.	500-700	2100-2400	0.2-0.4
Γυαλί			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z ή AZ	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (κέβλαρ 49)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

1.5.4 ΜΗΤΡΕΣ

Οι μήτρες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τις οργανικές, τις μεταλλικές και τις κεραμικές. Ο κύριος σκοπός χρήσης τους αφορά την ανάπτυξη μιας ισχυρής μηχανικής και χημικής σύνδεσης μεταξύ ινών και ρητίνης.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη, η οποία ανήκει στην ομάδα των οργανικών μητρών.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των εποξειδικών ρητινών είναι :

- Μεγάλη αντοχή
- Αυξημένη συγκολλητική ικανότητα
- Αυξημένη ανθεκτικότητα σε κόπωση
- Χαμηλή χημική διάβρωση
- Χαμηλή συστολή ξηράνσεως

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των εποξειδικών ρητινών αποτελεί το υψηλό κόστος τους.

1.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά, ορισμένα αναλυτικά προσομοιώματα περισφιγμένου σκυροδέματος από μελετητές που ασχολήθηκαν με ενισχύσεις σκυροδέματος με FRP.

Πίνακας 1.2: Αναλυτικά προσομοιώματα περισφιγμένου σκυροδέματος με FRP

	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΕΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ
1	Fardis	1982	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.1 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}}$
2	Saadmanesh	1994	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \times \sqrt{1 + 7.94 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}}} - 2 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}} - 1.254$
3	Mirmiran	1996	$f'_{cc} = f'_{co} + 4.269 \times f_{lu}^{0.587}$
4	Karbahari	1997	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.1 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{0.87}$
5	Miyauchi	1997	$f'_{cc} = f'_{co} + k_{e1} \times 4.1 \times f_{lu}$ $Avf_{lu} < 50 \text{ Mpa} \rightarrow k_{e1} = 0.85$
6	Samaan	1998	$f'_{cc} = f'_{co} + 6 \times f_{lu}^{0.7}$
7	Miyauchi	1999	$f'_{cc} = f'_{co} + 2.98 \times f_{lu}$
8	Saafi	1999	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \times f_{lu}$ $k_1 = 2.2 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{-0.16}$
9	Spoelstra	1999	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{0.85}$
10	Toutanji	1999	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \times f_{lu}$
11	Jolly	2000	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.83 + 0.05 \times \left(\frac{E_l}{f'_{co}}\right)$
12	Theriault	2000	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$

13	Xiao	2000	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.1 + k_1 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) \rightarrow CFRP$ $k_1 = 4.1 - 0.75 \times \left(\frac{E_l}{f'_{co}}\right)^{-1.0}$
14	Lin	2001	$f'_{cc} = f'_{co} + 2.0 \times f_{lu}$
15	Ilki	2002	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.227 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right) \rightarrow CFRP$
16	Lam	2002	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$
17	Moran	2002	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$ <p>$k_1 = 4.14$ for bonded FRP shell $k_1 = 2.33$ for unbonded FRP shell</p>
18	Shehata	2002	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$
19	Lam	2003	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$
20	Vitzileou	2007	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.8 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$
21	Yan	2007	<ul style="list-style-type: none"> • if $\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \geq 0.2 \rightarrow$ $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 4.721 \times \sqrt{1 + 4.193 \times \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} + 1 - 2 \times \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}}$ <p style="text-align: center;">- 4.322</p> <ul style="list-style-type: none"> • if $\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} < 0.2 \rightarrow$ $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.0768 \times \ln\left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) + 1.122$
22	Teng	2007	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$
23	Youssef	2007	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.25 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{\frac{5}{4}}$
24	Wang	2011	$f_{cu} = \frac{(1 + 5.54 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}} \times f'_{co})}{\sqrt{1 + \frac{(h-d)}{353} \times (1 - 1.49 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}})}}$ $f_{ct} = \frac{(1.2 + 3.85 \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}} \times f'_{co})}{\sqrt{1 + \frac{(h-d)}{545}}}$

25	Xiao	2010	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.24 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{0.80}$
26	Al	2016	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.06 + 5.54 \times e^{-0.00042 \times (f'_{co} + 25.6)^2 - 0.083 \times (f_{lu} - 18.67)^2}$
27	Wu	2010	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_{lu}}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}^{0.42}} - \frac{f'_{co}^{0.42}}{16.7}\right) \times \frac{f_{lu}}{f'_{co}} + 1}$
28	Realfonso	2011	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.57 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)^{0.86} \rightarrow CFRP$ $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.49 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) \rightarrow ALL$
29	Touchari	2016	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.58 \times \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}}\right)^{0.997} \rightarrow CFRP$
30	EC2	1994	$f_{ck,c} = f_{ck} \times \left(1 + 5 \times \frac{\sigma^2}{f_{ck,c}}\right) \rightarrow$ $\sigma^2 \leq 0.05 f_{ck}$ $f_{ck,c} = f_{ck} \times \left(1.125 + 2.55 \times \frac{\sigma^2}{f_{ck,c}}\right) \rightarrow$ $\sigma^2 > 0.05 f_{ck}$ $e_{fj} = \min(e_{cu}; 0.015)$ $p_f E_f = \left(\frac{4 \times t_{frp}}{D}\right) \times E_{frp} \times 1000$ $\sigma^2 = f_{lu} = 0.5 \times p_f E_f \times \varepsilon_{fj}$
31	Wu	2010	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.4 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) \rightarrow AFRP$
32	Park	2011	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.7 + 3.7 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) \rightarrow TUBES$
33	Παπακωνσταντίνου Ρίστας	2018	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.139 + 2.2701 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right) \rightarrow CFRP_N$

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

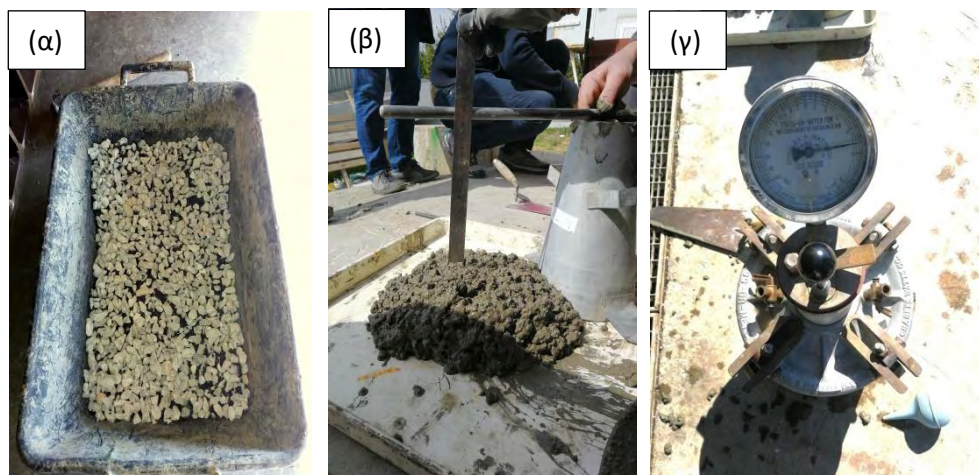
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκαν συνολικά 170 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 100x200mm, με συγκεκριμένες αναλογίες αντικατάστασης αδρανών με rubber.

Αρχικά δημιουργήθηκαν δύο μίγματα «ελέγχου» (control mix) των 6 λίτρων το καθένα, έτσι ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία της επιλεγμένης κοκκομετρίας. Το πρώτο μίγμα αποτελούταν αποκλειστικά από αδρανή και το δεύτερο από αδρανή με 100% αντικατάσταση των κόκκων 4-8mm και 2-4mm με κόκκους rubber. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Ποσότητες υλικών των δύο αρχικών μιγμάτων

Μείγμα 1		Μείγμα 2	
Δοκίμια με αδρανή		Δοκίμια με αδρανή και rubber	
Διάμετρος	Ποσότητα (Kg)	Διάμετρος	Ποσότητα (Kg)
8-16mm	5.13	8-16mm	5.13
4-8mm	1.47	4-8mm	440
2-4mm	1.10	2-4mm	330
1-2mm	1.34	1-2mm	1.34
0.5-1mm	7.32	0.5-1mm	7.32
Πούδρα	9.76	Πούδρα	9.76
		Ποσότητα (Kg)	
		Νερό	1.55
		Τσιμέντο	3.36
		Ρευστοποιητής	0.06

Αφού δημιουργήθηκαν τα μείγματα ,πραγματοποιήθηκαν δοκιμές «κάθισης» και «συμπίεσης αέρα» (Σχήμα 2.1). Τα δοκίμια παρέμειναν σε συνθήκες ξηρασίας για 7 ημέρες και την έβδομη ημέρα πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές θλίψης αυτών στην πρέσα του εργαστηρίου σκυροδέματος.



Σχήμα 2.1: α) Μίγμα σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση rubber
(β) Δοκιμή κάθισης (γ) Δοκιμή συμπίεσης αέρα

Στον Πίνακα 2.2 αναφέρονται οι αντοχές που προέκυψαν:

Πίνακας 2.2: Θλιπτικές αντοχές αρχικών μιγμάτων

Δοκιμές σύνθλιψης (28/02)		
	Control (Mpa)	Rubber (Mpa)
1	34.37	16.55
2	34.76	16.17
3	34.22	15.28
M.O	33.45	16

Έτσι λοιπόν, προχωρήσαμε στη δημιουργία 5 μιγμάτων με τα εξής ποσοστά αντικατάστασης:

- Πρώτο μίγμα (0% αντικατάσταση)
- Δεύτερο μίγμα (100% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm)
- Τρίτο μίγμα (75% αντικατάσταση)
- Τέταρτο μίγμα (50% αντικατάσταση)
- Πέμπτο μίγμα (25% αντικατάσταση)

Επίσης πραγματοποιήθηκε «splitting test» προκειμένου να διερευνηθεί η κατανομή του καουτσούκ στο όγκο του κυλίνδρου (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Κατανομή των κόκκων καουτσούκ στο σύνολο του κυλινδρικού δοκιμίου

2.1.1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ

Προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξεργασία, η ερμηνεία και η ανάγνωση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε συγκεκριμένη ονοματολογία για κάθε κύλινδρο, ανάλογα με την ομάδα που ανήκει και την περισφιξη η μη. Έτσι λοιπόν προκύπτουν οι εξής κωδικοποιήσεις:

Πίνακας 2.3: Κωδικοποίηση κυλίνδρων

ΟΜΑΔΑ	ΑΡ. ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ	ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗ(UNCONFINED)	ΜΕ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗ CONFINED
CM (control mix)	1	UCM_1	CCM_1
	2	UCM_2	CCM_2
	3	UCM_3	CCM_3
R25 (25% αντικατάσταση με rubber)	1	UR25_1	CR25_1
	2	UR25_2	CR25_2
	3	UR25_3	CR25_3
R50 (50% αντικατάσταση με rubber)	1	UR50_1	CR50_1
	2	UR50_2	CR50_2
	3	UR50_3	CR50_3
R75 (75% αντικατάσταση με rubber)	1	UR75_1	CR75_1
	2	UR75_2	CR75_2
	3	UR75_3	CR75_3

2.1.2 ΠΡΩΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (control mix)

Το μίγμα αυτό παρασκευάστηκε την Πέμπτη 28 Φεβρουαρίου. Η ανάμειξη των υλικών πραγματοποιήθηκε με την μπετονιέρα του εργαστήριου. Στον πίνακα 2.4 αναφέρονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.4: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 28/02

Μίγμα 28/02	
Αδρανή	
Διάμετρος	Ποσότητα (Kg)
8-16mm	51.25
4-8mm	14.64
2-4mm	10.98
1-2mm	13.42
0.5-1mm	7.32
Πούδρα	9.76

	Ποσότητα (Kg)
Νερό	15.1
Τσιμέντο	33.55
Ρευστοποιητής	0.06

Έπειτα από κάθε μίξη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης (slump test) και ποσοστού συμπίεσης αέρα.

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και την Τρίτη 05/03, αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

2.1.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (100% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm)

Το μείγμα αυτό παρασκευάστηκε την Πέμπτη 7 Μαρτίου. Στον πίνακα 2.5 αναφέρονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.5: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 07/03

Μείγμα 07/03		
Διάμετρος	Ποσότητα αδρανών (Kg)	Ποσότητα rubber (Kg)
8-16mm	51.25	-
4-8mm	-	4.39
2-4mm	-	3.29
1-2mm	13.42	-
0.5-1mm	7.32	-
Πούδρα	9.76	-
	Ποσότητα (Kg)	
Νερό	15.1	
Τσιμέντο	33.55	
Ρευστοποιητής	0.06	

Έπειτα από κάθε μίξη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης (slump test) και ποσοστού συμπίεσης αέρα.

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και την Τρίτη 12/03, αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

2.1.4 ΤΡΙΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (75% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm)

Το μίγμα αυτό παρασκευάστηκε την Πέμπτη 14 Μαρτίου. Στον πίνακα 2.6 αναφέρονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.6: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 14/03

Μίγμα 14/03		
Διάμετρος	Ποσότητα Agr (Kg)	Ποσότητα Rub (Kg)
8-16mm	51.25	
4-8mm	3.66	3.29
2-4mm	2.745	2.47
1-2mm	13.42	
0.5-1mm	7.32	
Πούδρα	9.76	
	Ποσότητα (Kg)	
Νερό	15.1	
Τσιμέντο	33.55	
Ρευστοποιητής	0.06	

Έπειτα από κάθε μίξη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης (slump test) και ποσοστού συμπίεσης αέρα.

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και την Τρίτη 19/03, αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

2.1.5 ΤΕΤΑΡΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (50% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm)

Το μίγμα αυτό παρασκευάστηκε την Πέμπτη 21 Μαρτίου. Στον πίνακα 2.7 αναφέρονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.7: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 21/03

Μίγμα 21/03		
Διάμετρος	Ποσότητα Agr (Kg)	Ποσότητα Rub (Kg)
8-16mm	51.25	
4-8mm	7.32	2.20
2-4mm	5.49	1.65
1-2mm	13.42	
0.5-1mm	7.32	
Πούδρα	9.76	
	Ποσότητα (Kg)	
Νερό	15.1	
Τσιμέντο	33.55	
Ρευστοποιητής	0.06	

Έπειτα από κάθε μίξη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης (slump test) και ποσοστού συμπίεσης αέρα.

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και την Τρίτη 26/03, αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

2.1.6 ΠΕΜΠΤΟ ΜΙΓΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (25% αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ των κόκκων 4-8mm και 2-4mm)

Το μείγμα αυτό παρασκευάστηκε την Πέμπτη 4Απριλίου. Στον πίνακα 2.8 αναφέρονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.8: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 28/03

Μίγμα 28/03		
Διάμετρος	Ποσότητα Agr (Kg)	Ποσότητα Rub (Kg)
8-16mm	51.25	
4-8mm	11.05	1.10
2-4mm	8.29	0.82
1-2mm	13.42	
0.5-1mm	7.32	
Πούδρα	9.76	
	Ποσότητα (Kg)	
Νερό	15.1	
Τσιμέντο	33.55	
Ρευστοποιητής	0.06	

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και την Τρίτη 02/04, αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

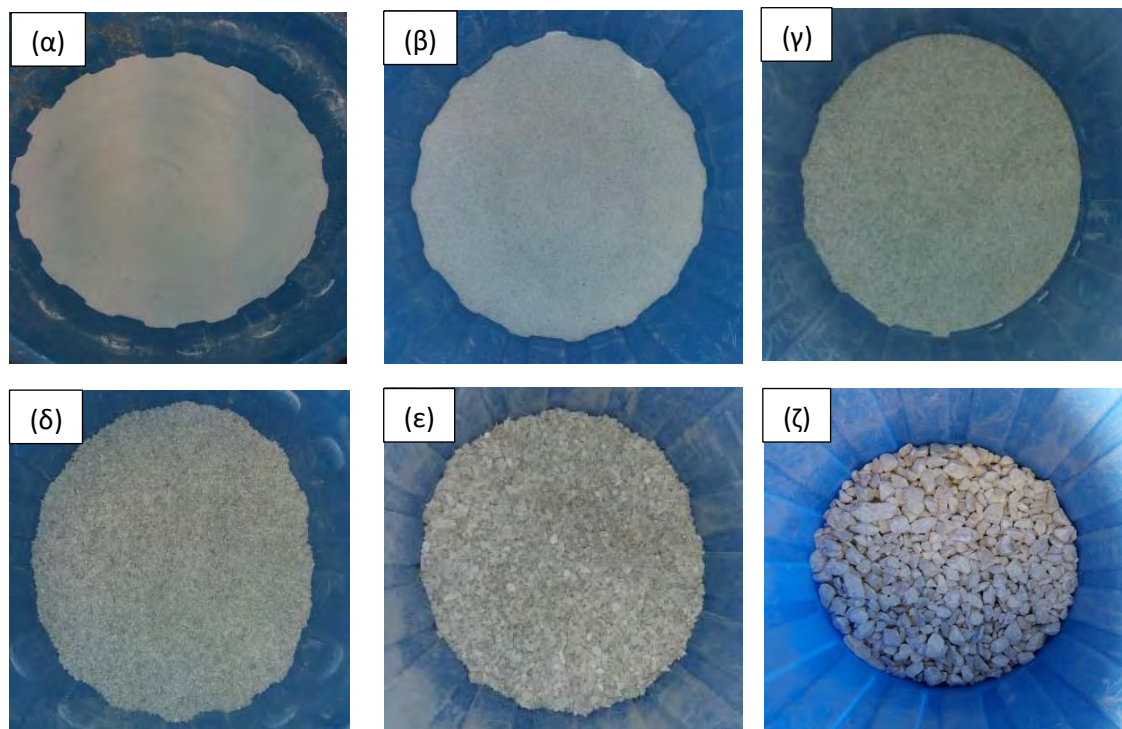
2.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.2.1 ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ

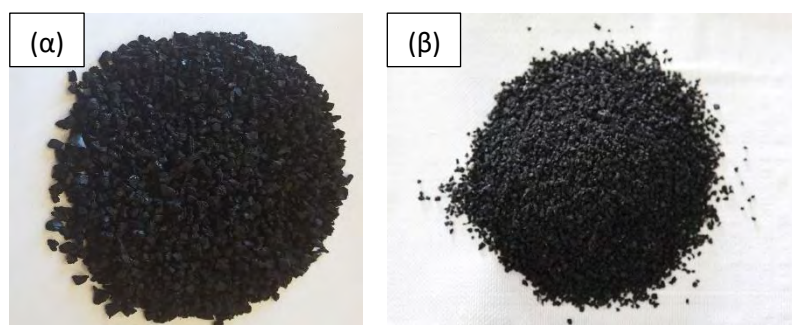
Σε πρώτη φάση, με τη χρήση του κόσκινου του εργαστηρίου κοσκινίστηκαν σημαντικές ποσότητες αδρανών και rubber (Σχήμα 2.3, Σχήμα 2.4) και αυτά διαχωρίστηκαν σε διαμέτρους:

- 8-16mm
- 4-8mm

- 2-4mm
- 1-2mm
- 0.5-1mm
- Πούδρα



Σχήμα 2.3: Κοσκινισμένα φυσικά αδρανή, (α) πούδρα, (β) 0,5-1mm, (γ) 1-2mm, (δ) 2-4mm, (ε) 4-8mm, (στ) 8-16mm



Σχήμα 2.4: Κοσκινισμένοι κόκκοι Rubber: (α) 4-8mm, (β) 2-4mm

Το κοσκίνισμα των αδρανών και του rubber πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του κόσκινου που ανήκει στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος (Σχήμα 2.5). Πρόκειται για ένα υδραυλικό μηχάνημα το οποίο κινείται παλινδρομικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Σε κάθε επίπεδο υπάρχει και ένα διαφορετικό κόσκινο σε διάταξη από μεγαλύτερη διάμετρο προς την μικρότερη έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός κοκκομετρικός διαχωρισμός .



Σχήμα 2.5: Συσκευή κοσκίνισματος

2.2.2 ΑΝΑΜΙΞΗ – ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ

Η ανάμιξη των υλικών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μπετονιέρας (Σχήμα 2.6). Μετά την ανάμιξη πραγματοποιήθηκε «δοκιμή κάθισης» και «δοκιμή συμπιεσμένου αέρα». Το νωπό σκυρόδεμα στη συνέχεια τοποθετήθηκε στα καλούπια και δονήθηκε με ράβδο σύμφωνα με τα πρότυπα.

Έπειτα με χρήση σπάτουλας, επιπεδώθηκε και εξομαλύνθηκε η άνω επιφάνεια του κυλίνδρου (Σχήμα 2.7). Η ενυδάτωση των δοκιμίων μέχρι να αφαιρεθούν τα καλούπια ήταν καθημερινή και πραγματοποιήθηκε με βρεγμένα λινά.



Σχήμα 2.6: Σκυροδέτηση - Μπετονιέρα



Σχήμα 2.7: Νωπό σκυρόδεμα στα καλούπια

1.2.3 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Η αφαίρεση των καλουπιών προγραμματίστηκε πέντε ημέρες μετά από κάθε σκυροδέτηση. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και ξεκαλουπώματος (Πίνακας 2.9).

Πίνακας 2.9: Ημερομηνίες σκυροδέτησης και ξεκαλουπώματος

Σκυροδέτηση	Αφαίρεση καλουπιού
28/02	05/03
06/03	12/03
14/03	19/03
21/03	26/03
28/03	02/04

2.2.4 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΡΘΑΚΑ

Στα μίγματα control mix, μίγμα 25%, μίγμα 50%, μίγμα 75%, αποφασίστηκε να ενισχυθούν σετ των 5 δοκιμών από το κάθε μίγμα για μία και δύο στρώσεις carbon. Δηλαδή, πιο συγκεκριμένα ενισχύθηκαν:

- 5 δοκίμια cm με μία στρώση carbon
- 5 δοκίμια R25 με μία στρώση carbon
- 5 δοκίμια R50 με μία στρώση carbon
- 5 δοκίμια R75 με μία στρώση carbon
- 5 δοκίμια cm με δύο στρώσεις carbon
- 5 δοκίμια R25 με δύο στρώσεις carbon
- 5 δοκίμια R50 με δύο στρώσεις carbon
- 5 δοκίμια R75 με δύο στρώσεις carbon

Επιπλέον επιλέχθηκε μήκος επικάλυψης (overlap) ίσο με το 1/3 της περιμέτρου του κυλίνδρου (10.47cm). Συνεπώς τα υφάσματα είχαν διαστάσεις :

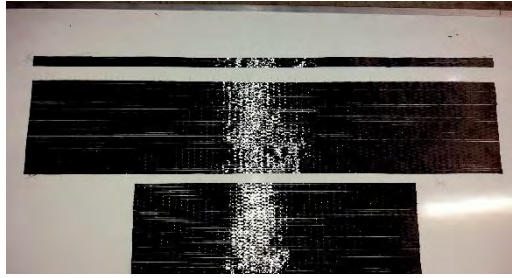
- Μία στρώση carbon: $2 \cdot \pi \cdot r + \text{overlap} = 31.42 + 10.47 = \mathbf{42\text{cm}}$
- Δύο στρώσεις carbon: $2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r + \text{overlap} = 62.84 + 10.47 = \mathbf{74\text{cm}}$

Για την ενίσχυση επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ίνες άνθρακα SikaWrap®-230C και εποξειδική ρητίνη Sikadur®-300. Τα υλικά αυτά αποτελούν προϊόντα της SIKAHellas.

2.2.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Αρχικά πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των δοκιμίων και πλευρική επιφάνεια τους τραχύνθηκε ελαφρώς για βέλτιστη συνεργασία σκυροδέματος –ινών. Έπειτα πραγματοποιήθηκε ανάμιξη της εποξειδικής ρητίνης Sikadur®-300 με αναλογία 1:2.9 . Με την ρητίνη αυτή πραγματοποιήθηκε επάλειψη της πλευρικής επιφάνειας του κυλίνδρου και των δύο πλευρών του κομμένου σε διαστάσεις 19cmX42cm υφάσματος άνθρακα. Η επάλειψη υλοποιήθηκε με τη χρήση ειδικού ρολού. Το ύφασμα στη συνέχεια επικολλήθηκε στον κύλινδρο με προσοχή, έτσι ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη αέρα και σκόνης στη διεπιφάνεια του κυλίνδρου και του υφάσματος και με τη χρήση ενός ειδικού σκληρού ρολού απομακρύνθηκαν τυχών εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα. Τέλος, στα άνω και κάτω άκρα του κυλίνδρου επικολλήθηκαν δύο πρόσθετες λωρίδες ινών άνθρακα δύο εκατοστών η καθεμία για να αποφευχθεί η αστοχία εκτός του πυρήνα (Σχήματα 2.8, 2.9, 2.10, 2.11).

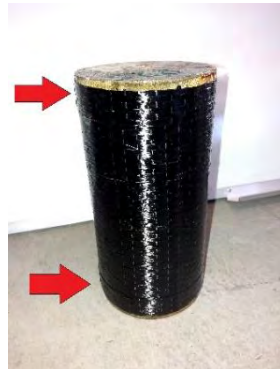
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις ινών άνθρακα. Στη συνέχεια οι κύλινδροι αφέθηκαν να στεγνώσουν, έτσι ώστε να ακολουθήσει η διαδικασία επιπέδωσης.



Σχήμα 2.8: Πρόσθετη λωρίδα ινών άνθρακα, ύφασμα δύο στρώσεων ύφασμα μιας στρώσης



Σχήμα 2.9: Ενίσχυση δοκιμίων με ίνες



Σχήμα 2.10: Τοποθέτηση πρόσθετων λωρίδων 2cm στα άνω και κάτω άκρα



Σχήμα 2.11: Εποξειδική ρητίνη Sikadur®-300

2.2.6 ΕΠΙΠΕΔΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Κατά την παραγωγή των δοκιμών, δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί επιπεδότητα των επιφανειών φόρτισης, δηλαδή διατήρηση καθετότητας μεταξύ της βάσης και του εγκάρσιου άξονα των δοκιμών (carring). Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη carring με χρήση θειώδους κονιάματος (Σχήμα 2.12). Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει την παρακάτω βάση επιπεδότητας (Σχήμα 2.13), ένα ηλεκτρικό μάτι και μία απλή ανοξείδωτη κατσαρόλα στην οποία ρευστοποιείται το κονίαμα.



Σχήμα 2.12: Υλικό carring, grayiron 9000



Σχήμα 2.13: Βάση επιπεδότητας

Το Gilson Gray Iron 9000 Capping Compound είναι ένα νέο και βελτιωμένο θειώδες κονίαμα που εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή φορτίου κατά τη δοκιμή αντοχής σκυροδέματος. Σε ενδεχόμενη υπερθέρμανση, το μείγμα παραμένει χρήσιμο μετά από ψύξη και το στερεοποιημένο υλικό μπορεί να τηχτεί χωρίς απώλεια ιδιοτήτων. Η αντοχή σε θλίψη υπερβαίνει τα 55.16 MPa σε δύο ώρες. Οι ιδιότητες αντοχής και σύνδεσης των καλυμμένων δειγμάτων δεν υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου, ακόμη και όταν αποθηκεύονται σε υγρές συνθήκες.

Το θειώδες κονίαμα αφού έτηξε στο ανοξείδωτο σκεύος, τοποθετήθηκε στη βάση επιπεδότητας και αμέσως μετά προστέθηκε στη διάταξη ο κύλινδρος, με αποτέλεσμα το κονίαμα να πήξει άμεσα στις βάσεις του δοκιμίου. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 2.14: Δοκίμια με επιπεδωμένες επιφάνειες φόρτισης

2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

2.3.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων από την πειραματική αυτή διαδικασία, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μέτρηση των παραμορφώσεων. Με γνώμονα λοιπόν αυτή την απαίτηση, επιλέχθηκε η χρήση αισθητήρων «strain gauge».

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν τόσο στους «απλούς», όσο και στους ενισχυμένους κύλινδρους. Παρακάτω αναφέρεται ο προγραμματισμός τοποθέτησης των αισθητήρων:

➤ Στα δοκίμια χωρίς ενίσχυση

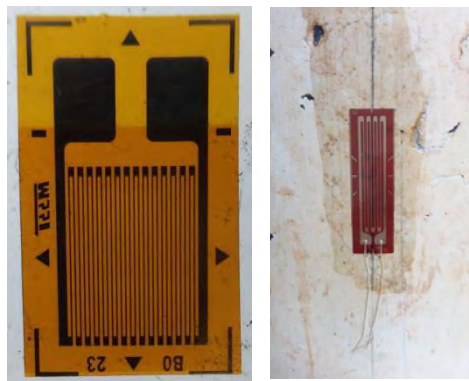
- I. Σετ CM: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες με σκοπό να λάβουμε το Μ.Ο αυτών για μεγαλύτερη ακρίβεια.
- II. Σετ R25: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες.
- III. Σετ R50: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες.
- IV. Σετ R75: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες.

➤ Στα δοκίμια με ενίσχυση

- I. Σετ CM: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες και ένα οριζόντιο με σκοπό να λάβουμε το Μ.Ο αυτών για μεγαλύτερη ακρίβεια.
- II. Σετ R25: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες και ένα οριζόντιο.
- III. Σετ R50: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες και ένα οριζόντιο.
- IV. Σετ R75: Δύο κύλινδροι με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο αισθητήρα και ένας κύλινδρος με δύο κατακόρυφους αισθητήρες και ένα οριζόντιο.

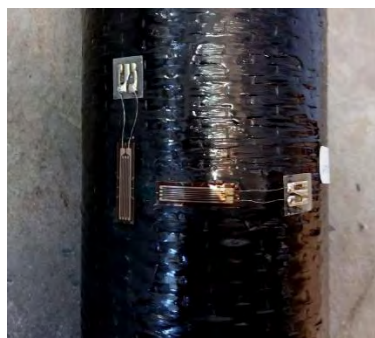
2.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ STRAIN GAUGE ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των δοκιμών από τυχούσες σκόνες και σωματίδια. Στη συνέχεια σημειώθηκαν στην πλευρική επιφάνεια δύο κατακόρυφες ευθείες παράλληλες μεταξύ τους και συμμετρικές ως προς το κέντρο του κυλίνδρου. Στο μέσο αυτών τοποθετήθηκε κόλλα δύο συστατικών η οποία αποτέλεσε ένα λείο υπόστρωμα για να τοποθετηθεί πάνω του το strain gauge (Σχήμα 2.15) . Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για την τοποθέτηση των εγκάρσιων αισθητήρων.



Σχήμα 2.15: Τυπική μορφή *strainingauge* και τοποθετημένος αισθητήρας σε μη ενισχυμένο δοκίμιο

Μετά την εφαρμογή των αισθητήρων, τοποθετήθηκαν ειδικά τσιπ στα οποία συγκολλούνται αργότερα τα καλώδια τα οποία μεταφέρουν τα δεδομένα παραμορφώσεων κατά τη δοκιμή.



Σχήμα 2.16: Εγκάρσιο και διαμήκες *strain gauge* σε ενισχυμένο δοκίμιο.

2.3.3 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Η δοκιμές μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν στην υδραυλική πρέσα, η οποία ανήκει στον εξοπλισμό του εργαστηρίου οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Οι κύλινδροι που δοκιμάστηκαν είναι οι εξής:

- **Μη ενισχυμένοι κύλινδροι:**
 - Τρεις κύλινδροι CM
 - Τρεις κύλινδροι R25
 - Τρεις κύλινδροι R50
 - Τρεις κύλινδροι R75

- **Ενισχυμένοι κύλινδροι (με μία στρώση ινών άνθρακα)**
 - Τρεις κύλινδροι CM
 - Τρεις κύλινδροι R25
 - Τρεις κύλινδροι R50
 - Τρεις κύλινδροι R75

Οι κύλινδροι, αφού προετοιμάστηκαν όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2, εισήχθησαν στην πρέσα προκειμένου να υποστούν δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Κάθε ένας από αυτούς συνδέθηκε στο σύστημα καταγραφής δεδομένων με καλωδίωση, προκειμένου να ληφθούν τα δεδομένα παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη δοκιμών στην πρέσα

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές συλλέχτηκαν σε μορφή xls, επεξεργάστηκαν και από αυτά εξήχθησαν διαγράμματα της μορφής Τάσης – Παραμόρφωσης. Τα δεδομένα έδωσαν πληροφορίες ως προς το επιβαλλόμενο φορτίο σε KN, οριζόντιες και κατακόρυφες παραμορφώσεις σε μstrain και την κατακόρυφη μετατόπιση της κεφαλής της πρέσας σε mm. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν έως ότου αστοχήσουν τα δοκίμια και τηρήθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Στη συνέχεια παραθέτονται με τη σειρά τα αποτελέσματα από την επεξεργασία της κάθε ομάδας δοκιμών.



Σχήμα 3.1: Δοκίμιο με ενίσχυση GFRP κατά τη δοκιμή θλίψης

3.1 ΑΠΕΡΙΣΦΙΓΚΤΑ

3.1.1 ΠΡΩΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, Control Mix (UCM)

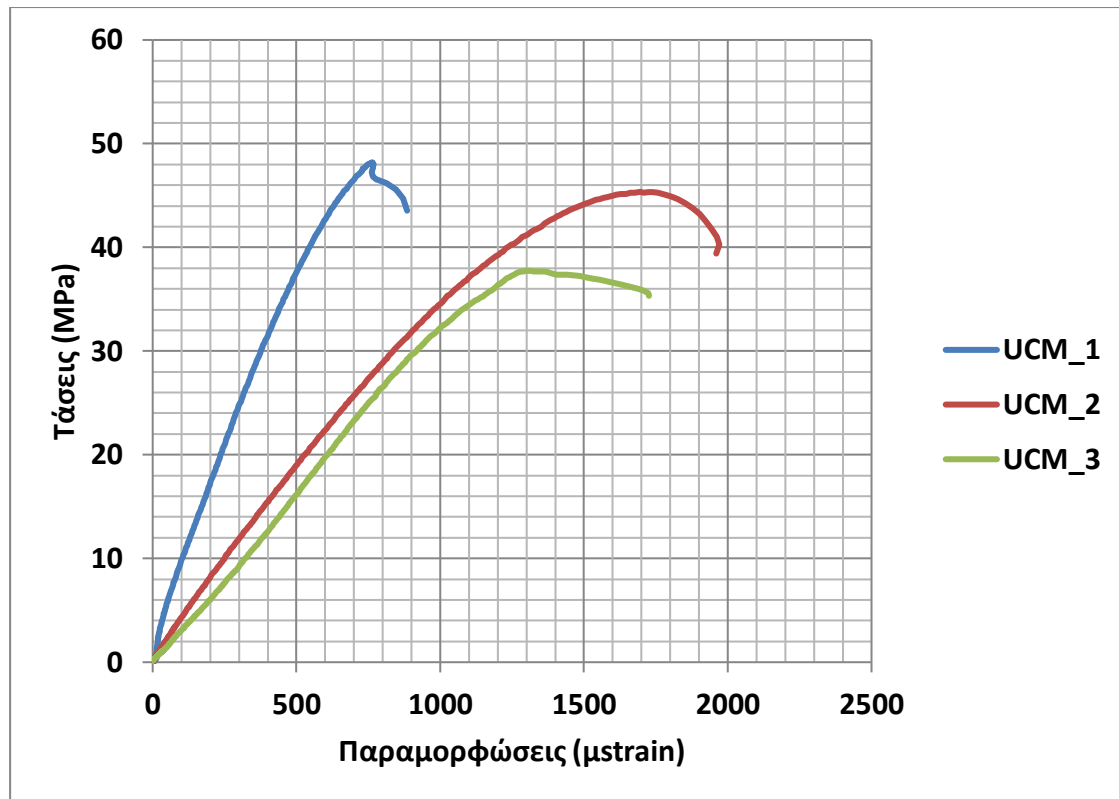
Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.2), πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών νωπού σκυροδέματος (Πίνακας 3.1), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.3) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.2).



Σχήμα 3.2: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CM μετά τη δοκιμή.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος CM

Μείγμα 28/02	
Δοκιμή κάθισης:	19 cm
Ποσοστό αέρα:	1.4%



Σχήμα 3.3: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UCM

Πίνακας 3.2: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UCM

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	ε_{i,ult}(μstrain)
UCM_1	48,20*	71,57	761,08*
UCM_2	45,35	40,64	1694,8
UCM_3	37,75	35,15	1302,37
Average	41,55		1498,59
St. deviation	3,80		196,22

Παρατηρείται ότι η καμπύλη του δοκιμίου UCM_1 διαφέρει κατά πολύ από τις άλλες δύο. Συνεπώς θεωρούμε ότι δεν αντιπροσωπεύει την ομάδα και τα δεδομένα του εξαιρούνται από την διαδικασία της επεξεργασίας.

3.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR25

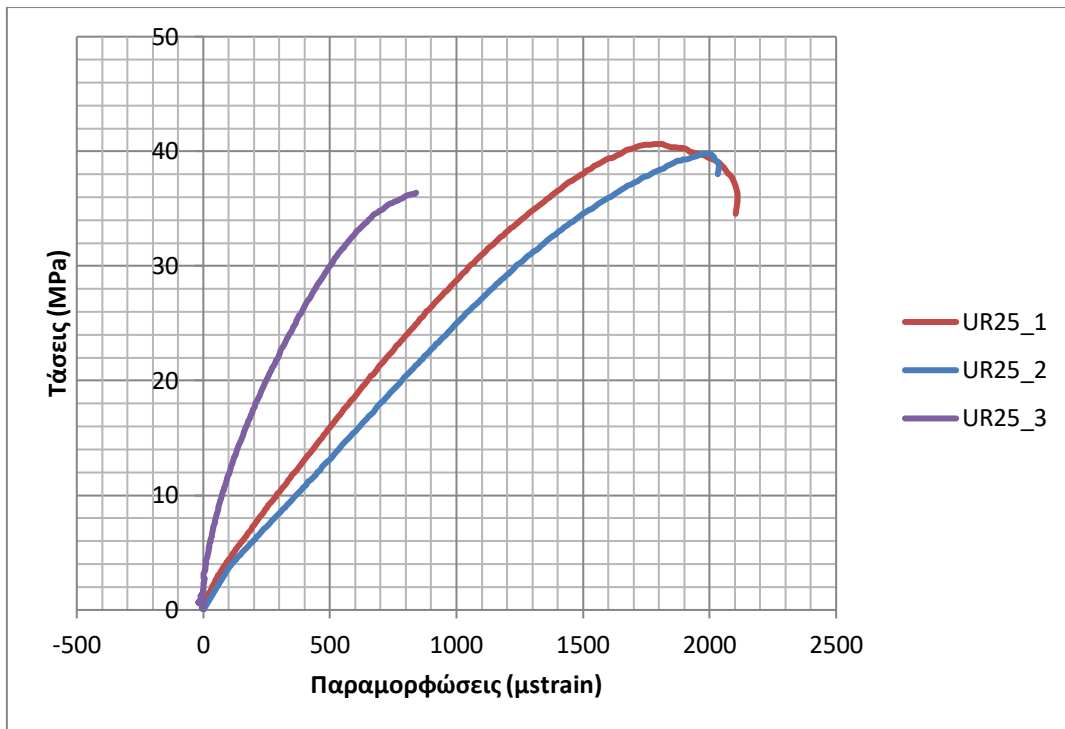
Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.14), πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών νωπού σκυροδέματος (Πίνακας 3.3), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης (Σχήμα 3.15) της ομάδας καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.4).

Σχήμα 3.4: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων UR25



Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος R25

Μείγμα 21/03	
Δοκιμή κάθισης:	20.5cm
Ποσοστό αέρα:	1.4%



Σχήμα 3.5: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR25

Πίνακας 3.4: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR25

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{l,ult}$ (μstrain)
UR25_1	40,65	30,95	1811,61
UR25_2	39,8	22,04	1887,18
UR25_3	36,39*	79,08	839,88*
Average	40,23		1849,40
St. deviation	0,43		37,79

Παρατηρείται ότι η καμπύλη του δοκιμίου UR25_3 διαφέρει κατά πολύ από τις άλλες δύο. Συνεπώς θεωρούμε ότι δεν αντιπροσωπεύει την ομάδα και τα δεδομένα του εξαιρούνται από την διαδικασία της επεξεργασίας.

3.1.3 ΤΡΙΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR50

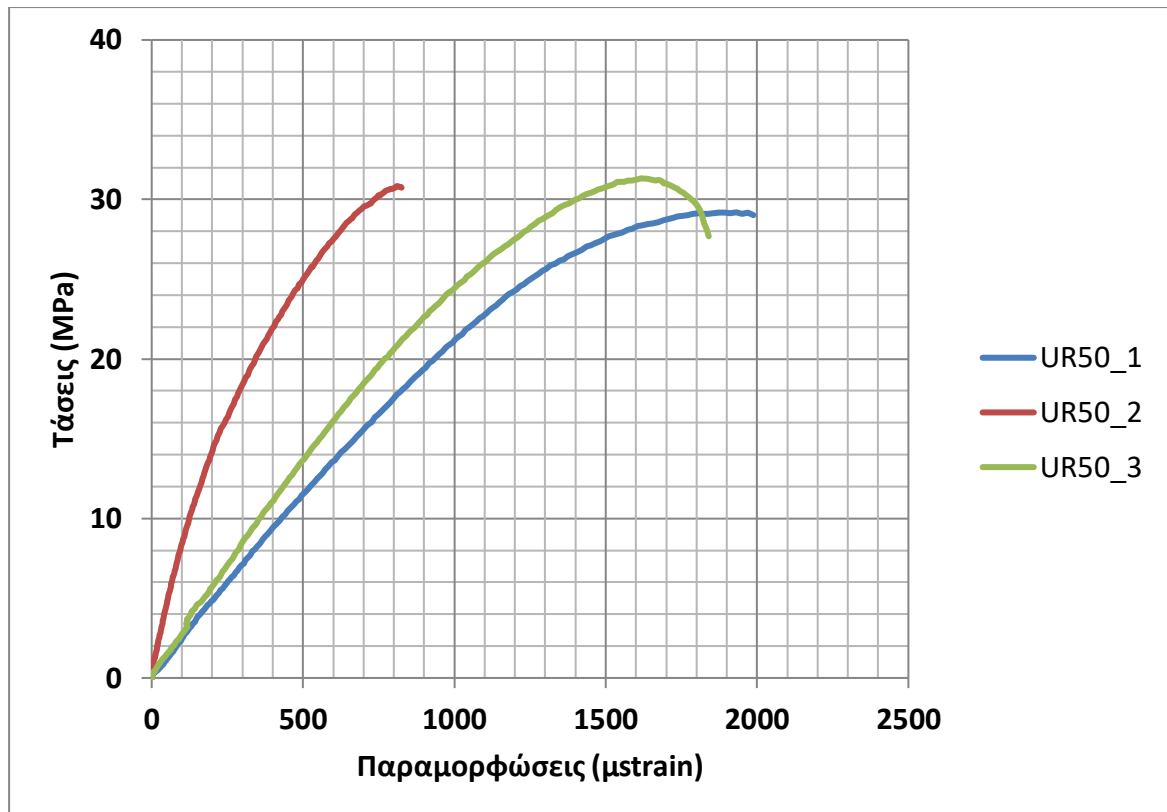
Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.6), πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών νωπού σκυροδέματος (Πίνακας 3.5), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.7) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών.



Πίνακας 3.5:
Αποτελέσματα
δοκιμών νωπού
σκυροδέματος R50

Σχήμα 3.6: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων R25 μετά τη δοκιμή

Μείγμα 21/03	
Δοκιμή κάθισης:	22.5cm
Ποσοστό αέρα:	1.4%



Σχήμα 3.7: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR50

Πίνακας 3.6: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR50

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{l,ult}$ (μstrain)
UR50_1	29,19	19,25	1931,12
UR50_2	30,84*	47,96	810,22*
UR50_3	31,33	26,10	1618,07
Average	30,26		1774,60
St. deviation	1,07		156,53

Παρατηρείται ότι η καμπύλη του δοκιμίου UR50_2 διαφέρει κατά πολύ από τις άλλες δύο. Συνεπώς θεωρούμε ότι δεν αντιπροσωπεύει την ομάδα και τα δεδομένα του εξαιρούνται από την διαδικασία της επεξεργασίας.

3.1.4 ΤΕΤΑΡΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, UR75

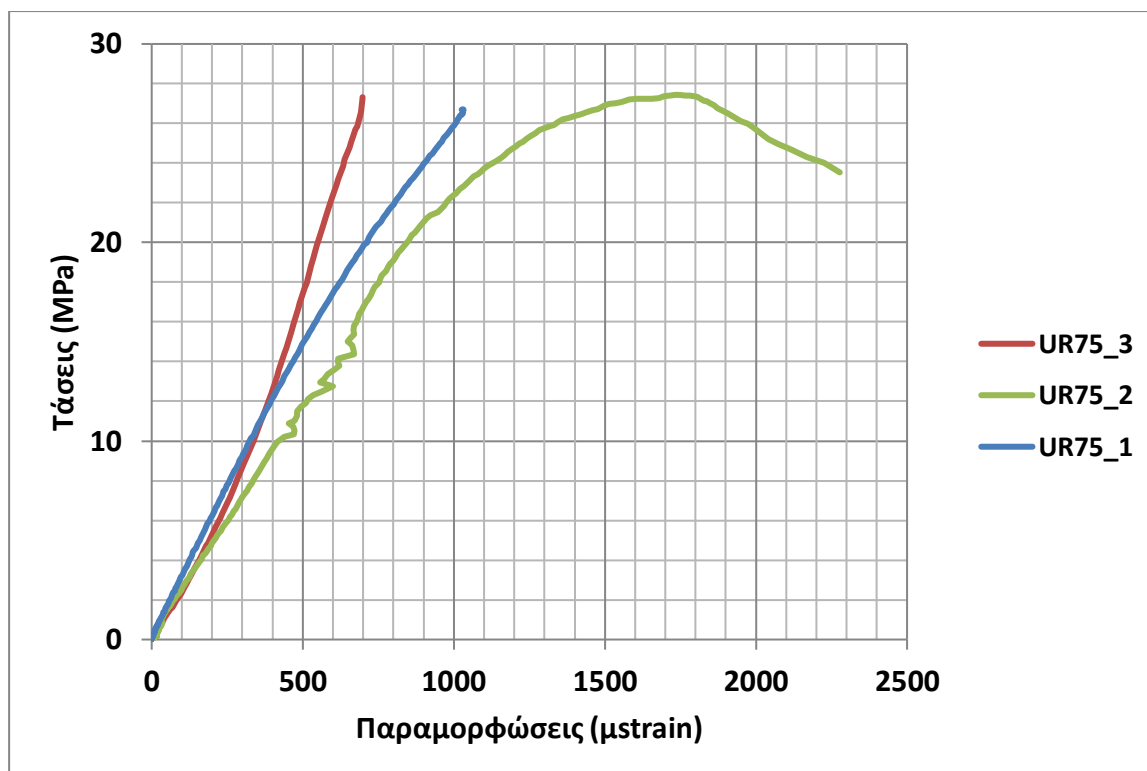
Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.8), πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών νωπού σκυροδέματος (Πίνακας 3.7), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.9) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.8).



Σχήμα 3.8: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων R75 μετά τη δοκιμή.

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος R75

Μείγμα 14/03	
Δοκιμή κάθισης:	20.5cm
Ποσοστό αέρα:	1.7%



Σχήμα 3.9: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR75

Πίνακας 3.8: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR75

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{i,ult}$ (μstrain)
UR75_1	26,72*	28,63	1031,63*
UR75_2	27,44	22,73	1733,59
UR75_3	28,29*	33,61	671,87*
Average	27,44		1733,59
St. deviation	0,00		0,00

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η αντιπροσωπευτική καμπύλη για την ομάδα UR75 είναι αυτή του UR75_2. Συνεπώς τα δεδομένα μόνο αυτής θα συμμετάσχουν στην επεξεργασία.

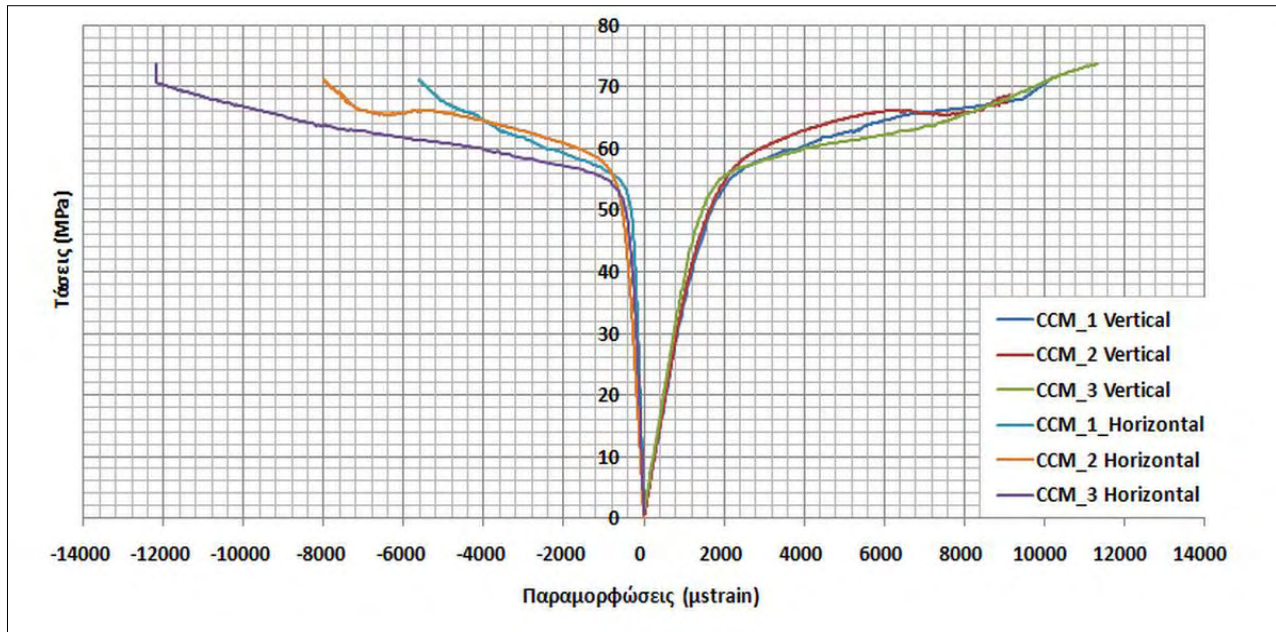
3.2 ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΑ

3.2.1 ΠΡΩΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, Control Mix (CCM)

Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Επιπλέον έχει τοποθετηθεί σε κάθε κύλινδρο και από ένας εγκάρσιος αισθητήρας. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.10), πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών νωπού σκυροδέματος (Πίνακας 3.9), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.11) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.10).



Σχήμα 3.10: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CCM μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 3.11: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CCM

Πίνακας 3.9: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CCM

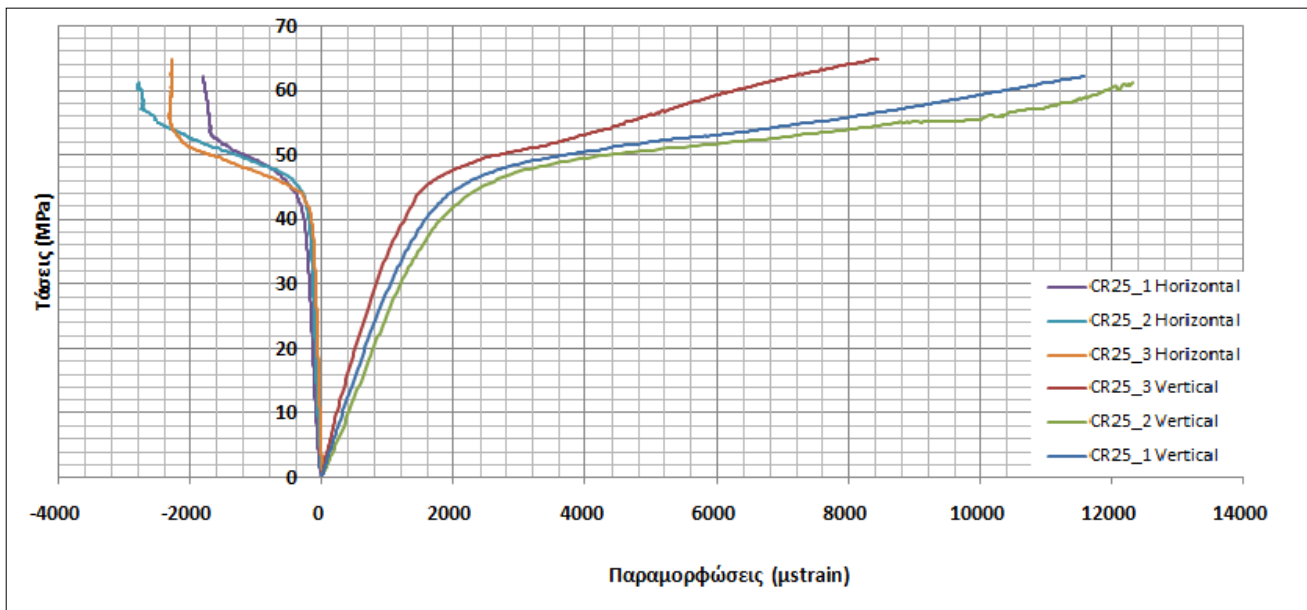
	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{l,ult}$ (μstrain)	$\epsilon_{h,ult}$ (μstrain)
CCM_1	71,15	30,33	10148,39	5612,28*
CCM_2	66,28	35,32	6273,61	5462,19*
CCM_3	73,64	37,93	11328,70	12188,01
Average	70,36		9250,23	12188,01
St. deviation	3,06		2159,24	0,00

Στο Σχήμα 3.11 παρατηρείται ότι η αντιπροσωπευτική καμπύλη είναι αυτή του CCM_3. Επίσης φαίνεται ότι το strain gauge του CMM_3 «τερμάτισε» στο τέλος της καταγραφής του.

3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR25

Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Επιπλέον έχει τοποθετηθεί σε κάθε κύλινδρο και από ένας εγκάρσιος αισθητήρας. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.12), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3,13) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.10).





Σχήμα 3.13: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR25

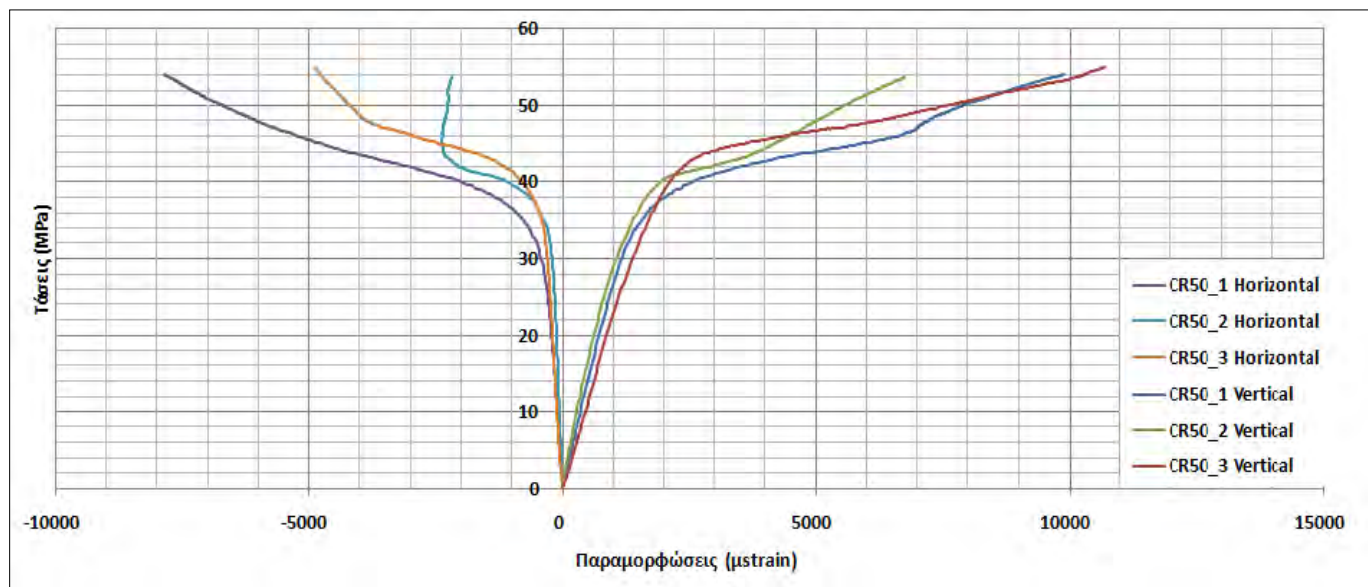
Πίνακας 3.10: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR25

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{l,ult}$ (μ strain)	$\epsilon_{h,ult}$ (μ strain)
CR25_1	61,6	26,73	11160,36	1792,34
CR25_2	61,11	21,60	12314,30	2785,40
CR25_3	64,78	28,90	8441,45	2265,75
Average	62,50		10638,70	2525,58
St. deviation	1,63		1623,54	259,82

3.2.3 ΤΡΙΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR50

Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Επιπλέον έχει τοποθετηθεί σε κάθε κύλινδρο και από ένας εγκάρσιος αισθητήρας. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.14), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.15) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.10).





Σχήμα 3.15: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR50

Πίνακας 3.11: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR50

	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	$\epsilon_{l,ult}$ (μ strain)	$\epsilon_{h,ult}$ (μ strain)
C R50_1	54,13	26,75	10687,67	7858,86
C R50_2	53,68	26,15	6760,37	2183,88*
C R50_3	54,13	20,86	9896,81	4881,47*
Average	54,25		9114,95	7858,86
St. deviation	0,52		1695,96	0,00

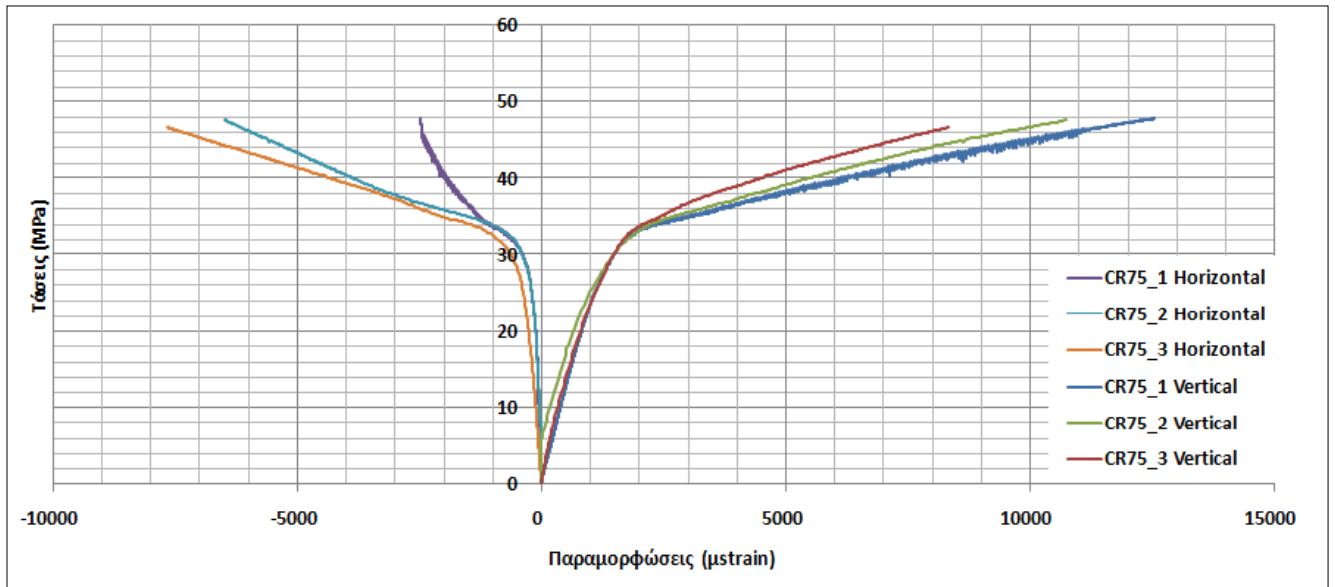
Από τις καμπύλες «Hoop», φαίνεται ότι η αντιπροσωπευτική καμπύλη είναι η CR50_1.

3.2.4 ΤΕΤΑΡΤΗ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, CR75

Όπως αναφέρθηκε και πριν, πρόκειται για μια ομάδα τριών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα έχει δύο κατακόρυφα strain gauges και τα άλλα δύο από ένα κατακόρυφο strain gauge. Επιπλέον έχει τοποθετηθεί σε κάθε κύλινδρο και από ένας εγκάρσιος αισθητήρας. Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής (Σχήμα 3.16), το συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης της ομάδας (Σχήμα 3.17) καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών (Πίνακας 3.12).



Σχήμα 3.16: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CR75 μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 3.17: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR75

Πίνακας 3.12: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR75

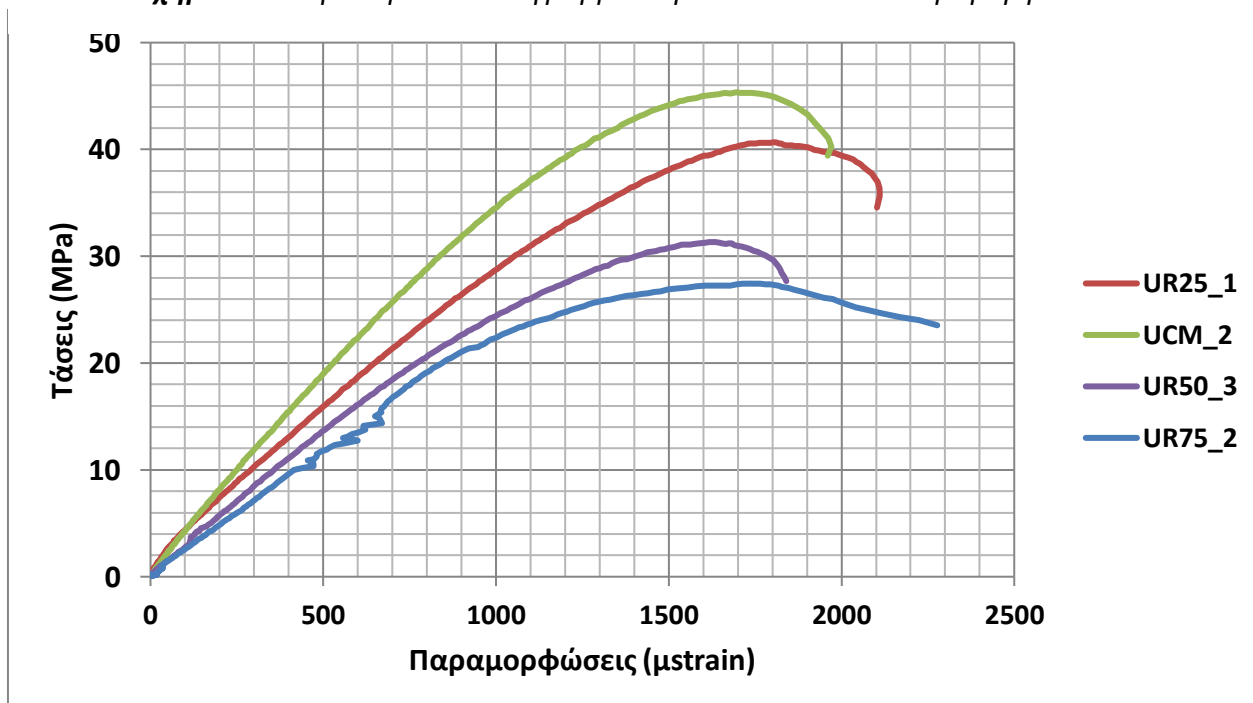
	f_c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	$\epsilon_{v,ult}$ (μstrain)	$\epsilon_{h,ult}$ (μstrain)
CR75_1	47,89	21,14	12548,89	2472,77*
CR75_2	47,70	17,47	10732,82	6482,87
CR75_3	46,63	19,18	8314,12	7677,40
Average	47,41		10531,94	7080,14
St. deviation	0,56		1734,66	597,27

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για κάθε ομάδα κυλίνδρων επιλέχθηκε από μία καμπύλη, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των τάσεων και των παραμορφώσεων της κάθε ομάδας μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν, για την ομάδα UCM επιλέχθηκε η καμπύλη UCM_2, για την ομάδα UR25 επιλέχθηκε η καμπύλη UR25_1, για την UR50 η UR50_3 και για την UR75 η UR75_2. Οι καμπύλες αυτές συγκεντρώθηκαν σε ένα διάγραμμα, στο (Σχήμα 4.1).

Σχήμα 4.1: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Καμπυλών Τάσεων-Παραμορφώσεων



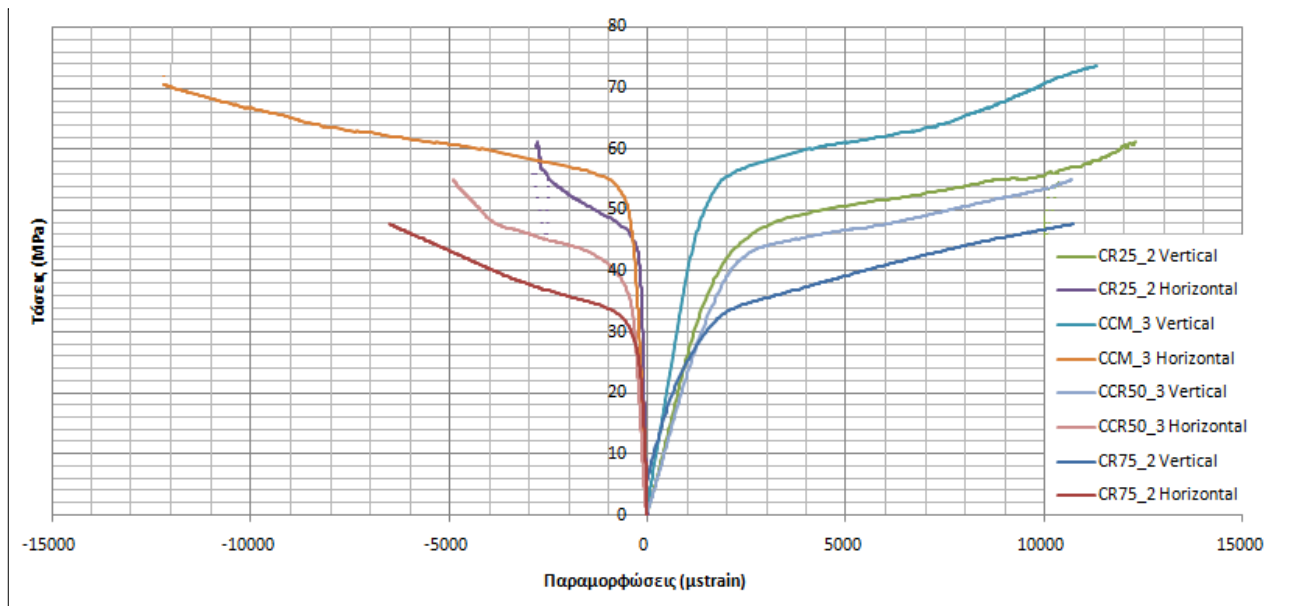
Στο Σχήμα 4.1 είναι φανερό ότι η αντιπροσωπευτική καμπύλη UCM_2 έχει την μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τις άλλες. Δεύτερη ακολουθεί η UR25_1, έπειτα η UR50_3 και τελευταία η UR75_2. Το ίδιο συμβαίνει και με τα μέτρα ελαστικότητας (E). Το μεγαλύτερο E το έχει το UCM και με τη σειρά ακολουθούν το UR25, UR50 και UR75. Είναι εύκολο λοιπόν να συμπεράνουμε ότι καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, μειώνεται η αντοχή και παράλληλα μειώνεται και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων.

Από την άλλη, οι μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις αυξάνονται καθώς αυξάνεται και η περιεκτικότητα σε καουτσούκ. Το συμπέρασμα αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι το Rubber είναι ένα κατεξοχήν ελαστικό υλικό.

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για κάθε ομάδα κυλίνδρων επιλέχθηκε από μία καμπύλη, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των τάσεων και των παραμορφώσεων της κάθε ομάδας μεταξύ τους. Έτσι λοιπόν, για την ομάδα CCM επιλέχθηκε η καμπύλη CCM_3, για την Εγκάρσιες επιλέχθηκε η καμπύλη CR25_2, για την CR50 η CR50_3 και η Διαμήκεις η CR75_2. Οι καμπύλες αυτές συγκεντρώθηκαν σε ένα διάγραμμα, στο (Σχήμα 4.2).

Σχήμα 4.2: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Καμπυλών Τάσεων-Παραμορφώσεων



Ομοίως με πριν, στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι η αντιπροσωπευτική καμπύλη CCM_3 έχει την μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τις άλλες. Δεύτερη ακολουθεί η CR25_2, έπειτα η CR50_3 και τελευταία η CR75_2. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται τόσο στις διαμήκεις παραμορφώσεις όσο και στις εγκάρσιες. Το ίδιο συμβαίνει και με τα μέτρα ελαστικότητας (E). Το μεγαλύτερο E το έχει το CCM και με τη σειρά ακολουθούν το CR25, CR50 και CR75. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η καθοδική

τάση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ παρατηρείται και στα ενισχυμένα δοκίμια.

Ωστόσο, οι μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις δεν εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση. Δυστυχώς δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις εγκάρσιες παραμορφώσεις καθώς τα strain gauges που χρησιμοποιήθηκαν απέτυχαν να μετρήσουν τις παραμορφώσεις σε όλο το φάσμα τους, καθιστώντας δυσχερή τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Το πρόβλημα αυτό ίσως ήταν μικρότερο με χρήση παραπάνω αισθητήρων.

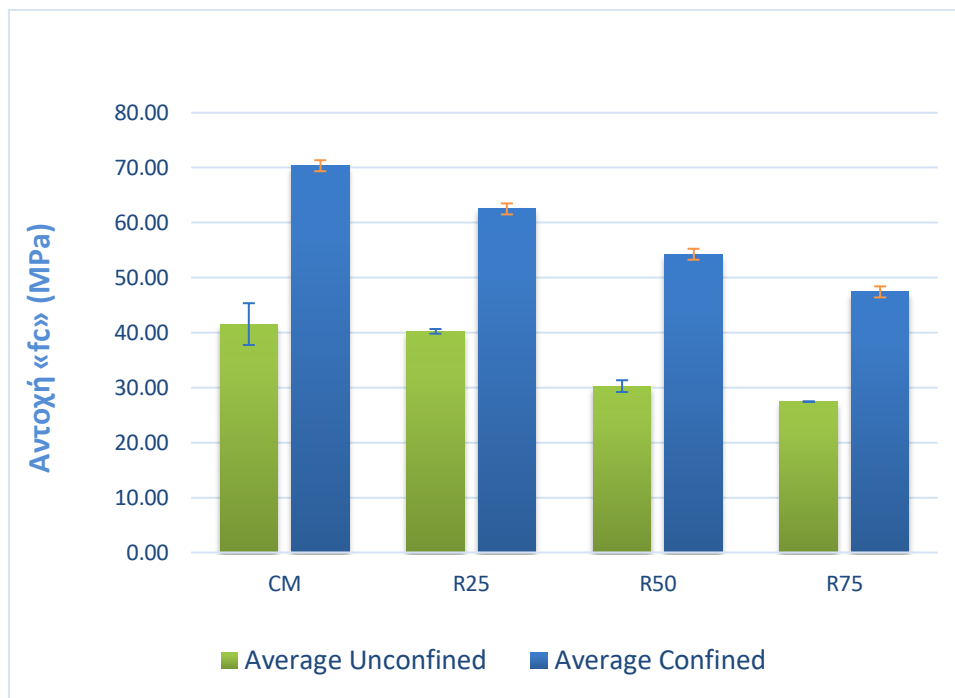
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4.1) των αποτελεσμάτων με σκοπό την σύγκριση περισφιγμένων και μη περισφιγμένων δοκιμίων ως προς την αντοχή, την κατακόρυφη και οριζόντια παραμόρφωση.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση περισφιγμένων και μη περισφιγμένων δοκιμίων

	Unconfined				Confined					
	f _c (Mpa)		ε _{v_ult} (μstrain)		f _c (Mpa)		E _{L_ult} (μstrain)		ε _{h_ult} (μstrain)	
	Average	ST dev	Average	ST dev	Average	ST dev	Average	ST dev	Average	ST dev
CM	41,55	3,80	1498,59	196,22	70,36	3,06	9250,23	2159,24	12188,01	0,00
R25	40,23	0,43	1849,40	37,79	62,50	1,63	10638,70	1623,54	2525,58	259,82
R50	30,26	1,07	1774,60	156,53	54,25	0,52	9114,95	1695,96	7858,86	0,00
R75	27,44	0,00	1733,59	0,00	47,41	0,56	10531,94	1734,66	7080,14	597,27

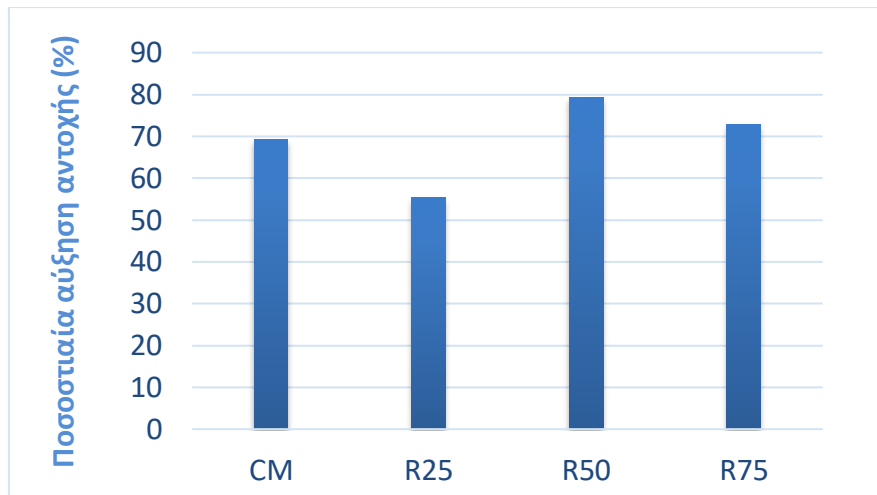
Με βάση λοιπόν αυτόν τον πίνακα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα, τα οποία θα διευκολύνουν την σύγκριση μεταξύ περισφιγμένων και μη περισφιγμένων δοκιμίων.



Σχήμα 4.3: Σύγκριση τιμών Αντοχής μεταξύ περισφιγμένων και μη περισφιγμένων Δοκιμίων

Στο Σχήμα 4.3 είναι φανερή η καθοδική τάση των μέγιστων αντοχών καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε rubber τόσο στα ενισχυμένα όσο και στα μη ενισχυμένα. Επίσης, στα άνω άκρα των στηλών τοποθετήθηκαν «γραμμές σφάλματος» (error bars) οι οποίες αναπαριστούν τις τυπικές αποκλίσεις. Μεγάλη τυπική απόκλιση παρατηρείται στη στήλη CM unconfined, καθιστώντας αμφίβολη την σχετική μείωση της αντοχής μεταξύ των στηλών CM και R25.

Στο διάγραμμα είναι εύκολο να παρατηρήσει κάποιος την σημαντική αύξηση της αντοχής από τα απερίσφιγχα στα περισφιγμένα δοκίμια. Αυτή η σημαντική αύξηση παρατηρείται σε όλες τις ομάδες δοκιμίων.



Σχήμα 4.4: Ποσοστιαία αύξηση αντοχής λόγω περίσφιξης

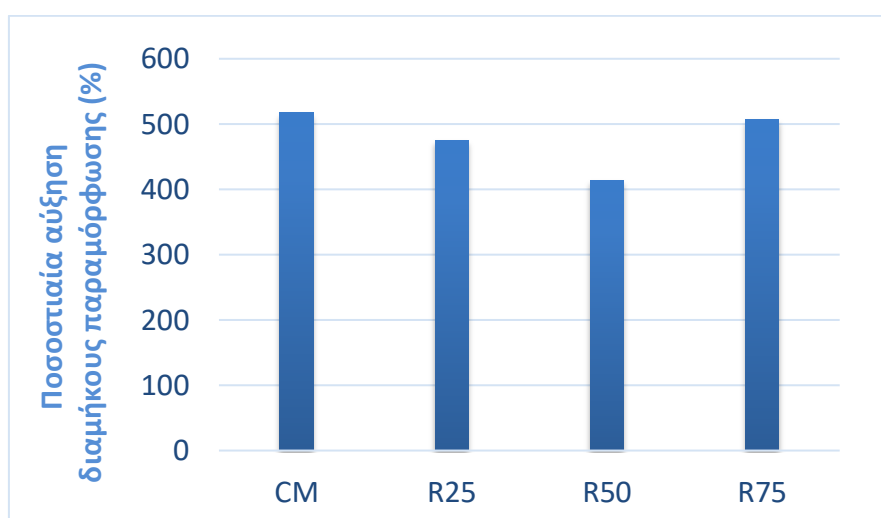
Στο γράφημα του Σχήματος 4.4, παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες αυξήσεις στην μέγιστη αντοχή των δοκιμίων, λόγω περίσφιξης. Το γράφημα μας επιτρέπει να συγκρίνουμε τις αυξήσεις μεταξύ τους. Παρατηρούμε πως οι ποσοστιαίες αυξήσεις των στηλών R50 και R75 ξεπερνούν αυτήν του CM. Δεν ισχύει το ίδιο όμως στη στήλη του R25.



Σχήμα 4.5: Σύγκριση τιμών διαμήκους παραμόρφωσης μεταξύ περισιφιγμένων και μη περισιφιγμένων δοκιμίων

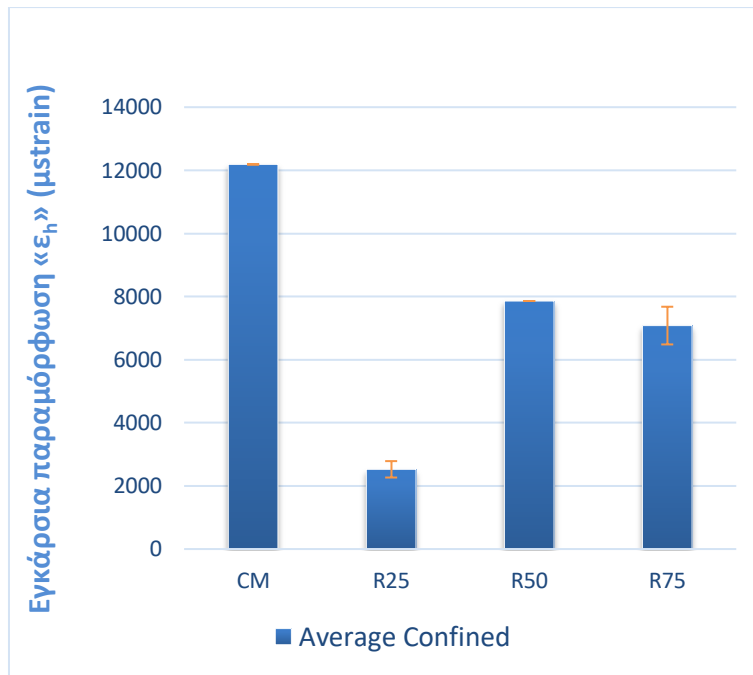
Το διάγραμμα του σχήματος 4.5 απεικονίζει τις μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις, σε περισφιγμένα και μη περισφιγμένα δοκίμια. Στα άνω άκρα των στηλών έχουν τοποθετηθεί error bars τα οποία αναπαριστούν την τυπική απόκλιση. Ολοφάνερη είναι η επιρροή της περίσφιξης στην αύξηση των μέγιστων διαμηκών παραμορφώσεων. Υπάρχει μια διαφορά της τάξης των 6.500 μ strain. Βέβαια, στα δεδομένα των περισφιγμένων δοκιμίων παρατηρούνται μεγάλες τυπικές αποκλίσεις.

Η συμπεριφορά που θα αναμέναμε ήταν μία σταδιακή αύξηση των μέγιστων παραμορφώσεων. Αυτό συμβαίνει σε γενικές γραμμές στα δεδομένα των μη περισφιγμένων αλλά όχι σε αυτά των περισφιγμένων. Οι στήλες των R25, R50 και R75 έχουν ξεπεράσει την τιμή του CM (εκτός του R50 confined) γεγονός το οποίο μας επιτρέπει να θεωρήσουμε τον συνδυασμό προσθήκης του Rubber και περίσφιξης με CFRP ευεργετική στην αύξηση μέγιστων διαμηκών παραμορφώσεων.



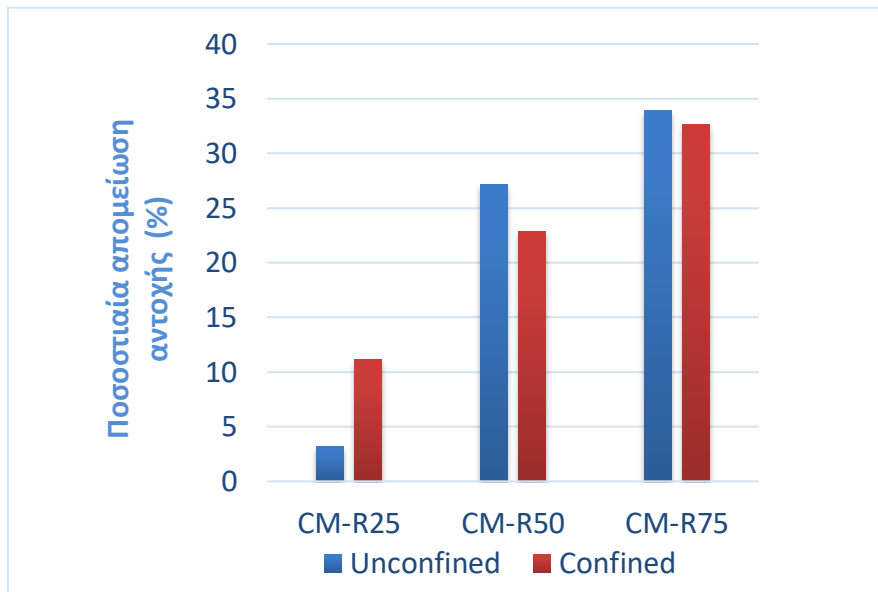
Σχήμα 4.6: Ποσοστιαία αύξηση διαμήκους παραμόρφωσης λόγω περίσφιξης

Το γράφημα του Σχήματος 4.6 αναπαριστά τις ποσοστιαίες αυξήσεις στις διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω περίσφιξης. Είναι φανερό πως η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στην ομάδα των CM. Έπειτα ακολουθεί η ομάδα R75, ενώ οι άλλες δύο ομάδες έχουν μικρότερο ποσοστό αύξησης.



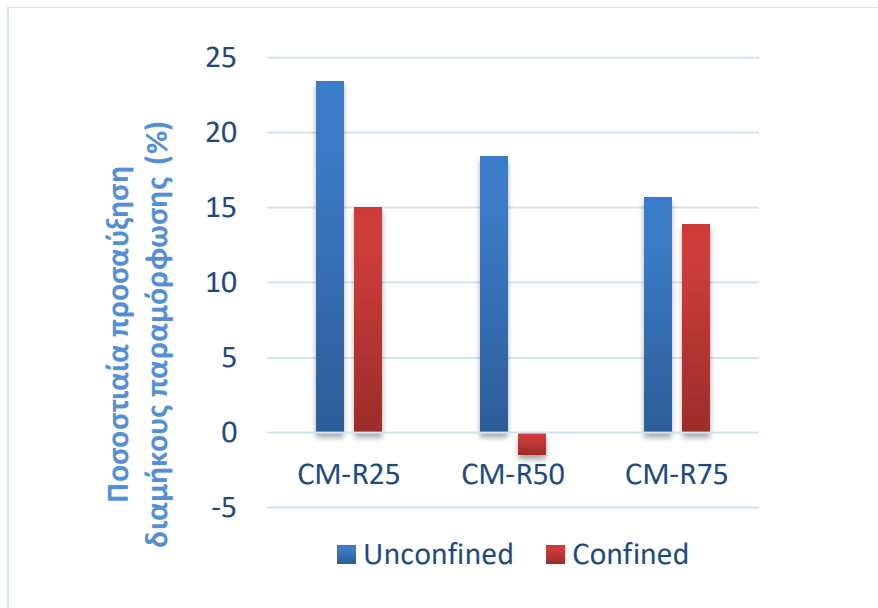
Σχήμα 4.7: Σύγκριση τιμών εγκάρσιας πα παραμόρφωσης μεταξύ περισφιγμένων δοκιμίων

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις των περισφιγμένων δοκιμίων. Οι παραμορφώσεις αυτές δεν ακολουθούν κάποια αναμενόμενη πορεία και αυτό συμβαίνει διότι οι αισθητήρες δεν κατάφεραν να μετρήσουν πλήρως τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα εκτός του ότι οι εγκάρσιες παραμορφώσεις της ομάδας CM έφτασαν τα 12188 μstrain και ίσως παραπάνω καθώς ο αισθητήρας στο σημείο αυτό τερμάτισε.



Σχήμα 4.8: Ποσοστιαία απομείωση αντοχής λόγω πρόσμιξης καουτσούκ

Το γράφημα του Σχήματος 4.8 παρουσιάζει την σχετική απομείωση της μέγιστης αντοχής των ομάδων R25, R50, R75, σε σχέση με την ομάδα CM. Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι πως καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, γίνεται ολοένα και εντονότερη η απομείωση, τόσο στα ενισχυμένα, όσο και στα μη ενισχυμένα δοκίμια. Ειδικά στην ομάδα R75, η απομείωση κυμαίνεται από 30% μέχρι 35%, το 1/3 δηλαδή της απομείωσης της R25 (3%-12%). Επιπλέον ενδιαφέρον έχει να σχολιαστεί το γεγονός ότι στην ομάδα R25 η απομείωση στα μη ενισχυμένα είναι μικρότερη από ότι στα ενισχυμένα, κάτι που δεν συμβαίνει στις άλλες δύο ομάδες.



Σχήμα 4.9: Ποσοστιαία προσαύξηση διαμήκους παραμόρφωσης λόγω πρόσμιξης καουτσού

Αν εξαιρέσουμε τη στήλη της ομάδας R50 confined, σε γενικές γραμμές μπορούμε να σχολιάσουμε πως καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, η διαμήκεις παραμορφώσεις αυξάνονται αλλά με ολοένα και μικρότερο βαθμό, τόσο στα ενισχυμένα όσο και στα μη ενισχυμένα.

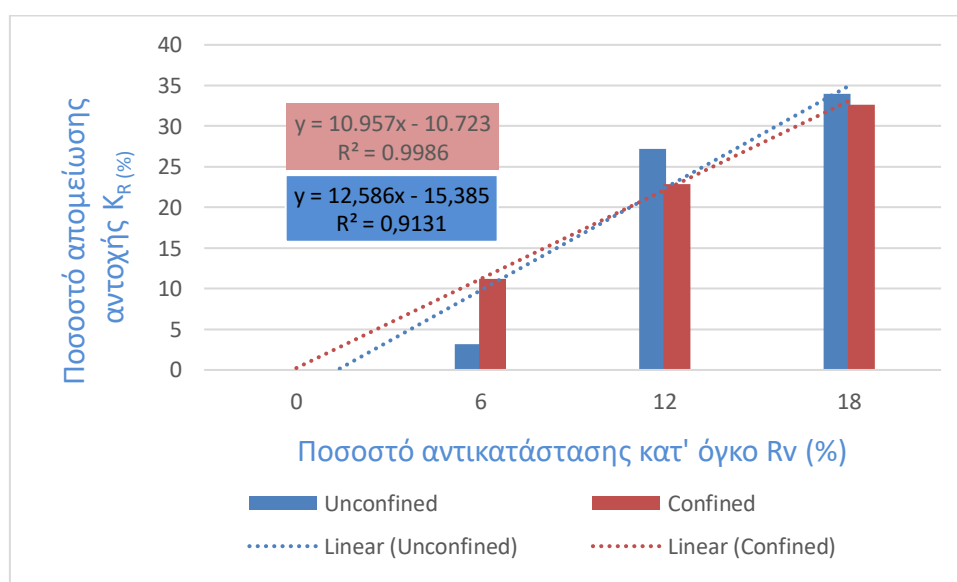
4.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ “ΠΡΑΣΙΝΟΥ” ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΥΤΗ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε αναγωγή των ποσοστών αντικατάστασης των διαμέτρων 2-4mm 4-8mm σε ποσοστό συνολικού όγκου (Πίνακας 4.2). Η ενέργεια αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να βρεθούν εξισώσεις που να συνδέουν την αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος με την αντοχή του πράσινου σκυροδέματος (Σχήμα 4.10).

$$F_{Rc}=(1-k_R)f'_c \quad (4.1)$$

Πίνακας 4.2: Έυρεση ποσοστών αντικατάστασης στο σύνολο του όγκου και σύνδεση αυτών με το ποσοστό απομείωσης

	%V	$k_{R,Uncon}$	$k_{R,Con}$
CM	0	0	0
R25	6	3,19	11,17
R50	12	27,17	22,89
R75	18	33,96	32,62



Σχήμα 4.10: Εξισώσεις σύνδεσης αντοχών

4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕ ΤΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Μετά το πέρας των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σύγκριση της περισφιγμένης αντοχής, όπως αυτή προέκυψε από την πειραματική διαδικασία, με αυτές των αναλυτικών προσομοιωμάτων. Τα προσομοιώματα που επιλέχθηκαν προς σύγκριση είναι του (Χiao, 2010), (Touchari, 2016), (Teng, 2007) (Βιτζιλαίου, 2007) καθώς και το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον κύριο Χρήστο Παπακωνσταντίνου σε συνεργασία με τον κύριο Γεώργιο Ρίστα (2018).

Πίνακας 4.3: Σύγκριση πειραματικής περισφιγμένης αντοχής f_{cc}' με αυτές των αναλυτικών προσομοιωμάτων

Πειραματική τιμή (Μpa)	Παπακωνσταντίνου (2018)		Χiao (2010)		Touchari (2016)		Teng (2007)		Βιτζιλαίου (2007)	
	f_{cc}' (Μpa)	St. dev	f_{cc}' (Μpa)	St. dev	f_{cc}' (Μpa)	St. dev	f_{cc}' (Μpa)	St. dev	f_{cc}' (Μpa)	St. dev
70,36	65,66	2,35	78,51	4,07	71,25	0,45	70,45	0,04	64,67	2,85
62,50	64,15	0,83	76,94	7,22	69,92	3,71	69,12	3,31	63,34	0,42
54,25	52,80	0,72	64,94	5,35	59,93	2,84	59,16	2,45	53,38	0,44
47,41	49,59	1,09	61,45	7,02	57,10	4,85	56,34	4,46	50,56	1,57

Πίνακας 4.4: Εξισώσεις ερευνητών

ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ	ΕΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ
Παπακωνσταντίνου Ρίστας	2018	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.139 + 2.2701 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right) \rightarrow CFRP_N$
Χiao	2010	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.24 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)^{0.80}$
Touchari	2016	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.58 \times \left(\frac{f_{l,eff}}{f'_{co}}\right)^{0.997} \rightarrow CFRP$
Teng	2007	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \times \left(\frac{f_{lu}}{f'_{co}}\right)$
Vitzileou	2007	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.8 \times \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right)$

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται σχολιασμός των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και εξαγωγή συμπερασμάτων. Συνοψίζοντας λοιπόν και με βάση το Κεφάλαιο 4, μπορούμε να προβούμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα μειώνει την μέγιστη αντοχή του.
- Όσο περισσότερο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε rubber, τόσο εντονότερη είναι η απομείωση της αντοχής. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο στα περισφιγμένα, όσο και στα μη περισφιγμένα δοκίμια.
- Η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα μειώνει το μέτρο ελαστικότητας E του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, τόσο περισσότερο μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας E. Η τάση αυτή παρατηρείται σε ενισχυμένα και μη ενισχυμένα δοκίμια.
- Η περίσφιγξη των δοκιμίων με ίνες άνθρακα αυξάνει κατά πολύ την μέγιστη αντοχή των δοκιμίων. Βέβαια η προσαύξηση αυτή μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του μίγματος σε rubber.
- Η περίσφιγξη των δοκιμίων βελτιώνει τις μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις των δοκιμίων. Αν εξαιρέσουμε την τιμή των μέγιστων διαμηκών παραμορφώσεων της ομάδας CR50, οι τιμές των παραμορφώσεων των ομάδων με προσθήκη rubber ξεπερνούν την τιμή των ομάδων συμβατικού σκυροδέματος (UCM, CCM). Συνεπώς μπορούμε γενικεύοντας να θεωρήσουμε τον συνδυασμό προσθήκης καουτσούκ και ενίσχυσης CFRP ευεργετική ως προς τις διαμήκεις παραμορφώσεις.
- Αν εξαιρέσουμε τα αποτελέσματα της ομάδας CR50, σε γενικές γραμμές μπορούμε να σχολιάσουμε πως καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ, οι διαμήκεις παραμορφώσεις αυξάνονται αλλά με ολοένα και μικρότερο βαθμό, τόσο στα ενισχυμένα όσο και στα μη ενισχυμένα δοκίμια.
- Ως προς τις εγκάρσιες παραμορφώσεις, δεν ήταν εφικτό να εξαχθεί κάποιο αποτέλεσμα, καθώς οι αισθητήρες απέτυχαν να καταγράψουν

πλήρως τις παραμορφώσεις και τα αποτελέσματα δεν ήταν αρκετά για επεξεργασία και σχολιασμό.

- Από την σύγκριση των πειραματικών τιμών με αυτές των προσομοιωμάτων, προέκυψε ότι τα προσομοιώματα με την μικρότερη τυπική απόκλιση ήταν το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου σε συνεργασία με τον κ. Γεώργιο Ρίστα (2019) καθώς και το μοντέλο της Βιτζιλιάου (2007). Και τα υπόλοιπα προσομοιώματα ωστόσο προσέγγισαν αρκετά τις πειραματικές τιμές.
- Από τις δοκιμές νωπού σκυροδέματος προέκυψε ότι η εργασιμότητα του «πράσινου» σκυροδέματος βελτιώνεται σε σχέση με αυτή του συμβατικού. Οι βελτίωση αυτή είναι της τάξης του 1%-2%.
- Για τη δοκιμή περιεκτικότητας αέρα δεν υπάρχει κάτι αξιοσημείωτο, καθώς οι τιμές παρέμειναν ίδιες παρά τις αντικαταστάσεις με καουτσούκ.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Τομή σκυροδέματος	2
Σχήμα 1.2: α)Εντατική Κατάσταση κυλίνδρου υπό αξονική θλίψη σε πραγματικές συνθήκες (πηγή: (Κοτσόβος, 2016)) β)Τρόποι Αστοχίας δοκιμίων σε καθαρή θλίψη (πηγή: (Πατρας))	4
Σχήμα 1.3: Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών και ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης	5
Σχήμα 1.4: Περίσφιγξη ορθογωνικού υποστυλώματος. Αριστερά περίσφιγξη με μανδύα από χαλύβδινες λάμες. Κέντρο και δεξιά περίσφιγξη με FRP.....	7
Σχήμα 1.5: Αριστερά περίσφιγξη με λωρίδες σε απόσταση μεταξύ τους εγκάρσια στο στοιχείο.	8
Σχήμα 1.6: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με FRP.....	8
Σχήμα 1.7: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για σκυρόδεμα με οπλισμό και με περίσφιγξη από σύνθετα υλικά.....	9
Σχήμα 1.8: Μορφές αστοχίας δοκιμίων σε θλίψη για διαφορετικές αναλογίες αντικατάστασης	10
Σχήμα 1.9: (α) Διάγραμμα Τάσης – Αξονικής Παραμόρφωσης(β)Διάγραμμα Αξονικής Παραμόρφωσης – Οριζόντιας Παραμόρφωσης	11
Σχήμα 1.10:Γενική εικόνα πειραματικής διάταξης	12
Σχήμα 1.11: (α) Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων CRuC κυλίνδρων (b) Διάγραμμα Τάσεων – Παραμορφώσεων συμβατικών κυλίνδρων με FRP	13
Σχήμα 1.12: Συστατικά σύνθετων υλικών	17
Σχήμα 1.13: Ενίσχυση δοκών με FRP (carbon fiber)	18
Σχήμα 1.14: (α) Ίνες γυαλιού, (β) Ίνες άνθρακα (γ) Ίνες κέβλαρ	20
Σχήμα 1.15: (α) Ινώδη σύνθετα υλικά, (β) Σύνθετα υλικά στρωμάτων,(γ) Σύνθετα υλικά σωματιδίων	21
Σχήμα 1.16: (α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό, (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό	21
Σχήμα 1.17: (α) Απλή πλέξη, (β) Διαγώνια πλέξη, (γ) Satin, (δ) Καλαθωτή πλέξη, (ε) Leno	22

Σχήμα 2.1: α) Μίγμα σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση rubber (β) Δοκιμή κάθισης (γ) Δοκιμή συμπίεσης αέρα.....	29
Σχήμα 2.2: Κατανομή των κόκκων καουτσούκ στο σύνολο του κυλινδρικού δοκιμίου	30
Σχήμα 2.3: Κοσκινισμένα φυσικά αδρανή, (α) πούδρα, (β) 0,5-1mm, (γ) 1-2mm, (δ) 2-4mm, (ε) 4-8mm, (στ) 8-16mm	38
Σχήμα 2.4: Κοσκινισμένοι κόκκοι Rubber: (α) 4-8mm, (β) 2-4mm	38
Σχήμα 2.5: Συσκευή κοσκινίσματος	39
Σχήμα 2.6: Σκυροδέτηση - Μπετονιέρα	40
Σχήμα 2.7: Νωπό σκυρόδεμα στα καλούπια	40
Σχήμα 2.8: Πρόσθετη λωρίδα ινών άνθρακα, ύφασμα δύο στρώσεων ύφασμα μιας στρώσης	43
Σχήμα 2.9: Ενίσχυση δοκιμίων με ίνες	43
Σχήμα 2.10: Τοποθέτηση πρόσθετων λωρίδων 2cm στα άνω και κάτω άκρα	43
Σχήμα 2.11: Εποξειδική ρητίνη Sikadur®-300	43
Σχήμα 2.12: Υλικό capping, grayiron 9000	44
Σχήμα 2.13: Βάση επιπεδότητας	44
Σχήμα 2.14: Δοκίμια με επιπεδωμένες επιφάνειες φόρτισης	45
Σχήμα 2.15: Τυπική μορφή strain gauge και τοποθετημένος αισθητήρας σε μη ενισχυμένο δοκίμιο	47
Σχήμα 2.16: Εγκάρσιο και διαμήκες strain gauge σε ενισχυμένο δοκίμιο.	47
Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη δοκιμίων στην πρέσα	48
Σχήμα 3.1: Δοκίμιο με ενίσχυση GFRP κατά τη δοκιμή θλίψης.....	49
Σχήμα 3.2: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CM μετά τη δοκιμή.	50
Σχήμα 3.3: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UCM	51
Σχήμα 3.4: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Παραμορφώσεων UR25	52
Σχήμα 3.5: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR25	53
Σχήμα 3.6: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων R25 μετά τη δοκιμή.....	54
Σχήμα 3.7: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR50	55
Σχήμα 3.8: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων R75 μετά τη δοκιμή.	56
Σχήμα 3.9: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων- Διαμηκών Παραμορφώσεων UR75	57
Σχήμα 3.10: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CCM μετά τη δοκιμή.	58

Σχήμα 3.11: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CCM	59
Σχήμα 3.12: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CR25 μετά τη δοκιμή.	60
Σχήμα 3.13: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR25.....	61
Σχήμα 3.14: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CR50 μετά τη δοκιμή.	62
Σχήμα 3.15: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR50.....	63
Σχήμα 3.16: Μορφές αστοχίας των κυλίνδρων CR75 μετά τη δοκιμή.	64
Σχήμα 3.17: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τάσεων-Παραμορφώσεων CR75.....	65
Σχήμα 4.1: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Καμπυλών Τάσεων-Παραμορφώσεων	66
Σχήμα 4.2: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Καμπυλών Τάσεων-Παραμορφώσεων	67
Σχήμα 4.3: Σύγκριση τιμών Αντοχής μεταξύ περισφιγμένων και μη περισφιγμένων	69
Σχήμα 4.4: Ποσοστιαία αύξηση αντοχής λόγω περίσφιξης	70
Σχήμα 4.5: Σύγκριση τιμών διαμήκους παραμόρφωσης μεταξύ περισφιγμένων και μη περισφιγμένων δοκιμίων	70
Σχήμα 4.6: Ποσοστιαία αύξηση διαμήκους παραμόρφωσης λόγω περίσφιξης	71
Σχήμα 4.7: Σύγκριση τιμών εγκάρσιας πα παραμόρφωσης μεταξύ περισφιγμένων δοκιμίων	72
Σχήμα 4.8: Ποσοστιαία απομείωση αντοχής λόγω πρόσμιξης καουτσούκ	73
Σχήμα 4.9: Ποσοστιαία προσαύξηση διαμήκους παραμόρφωσης λόγω πρόσμιξης καουτσού	74
Σχήμα 4.10: Εξισώσεις σύνδεσης αντοχών.....	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Βασικές ιδιότητες των FRP	23
Πίνακας 1.2: Αναλυτικά προσομοιώματα περισφιγμένου σκυροδέματος με FRP	25
Πίνακας 2.1: Ποσότητες υλικών των δύο αρχικών μιγμάτων	28
Πίνακας 2.2: Θλιπτικές αντοχές αρχικών μιγμάτων	29
Πίνακας 2.3: Κωδικοποίηση κυλίνδρων	32
Πίνακας 2.4: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 28/02	33
Πίνακας 2.5: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 07/03	34
Πίνακας 2.6: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 14/03	35
Πίνακας 2.7: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 21/03	36
Πίνακας 2.8: Αναλυτικές ποσότητες συστατικών του μίγματος 28/03	36
Πίνακας 2.9: Ημερομηνίες ξεκαλουπώματος	41
Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος CM	50
Πίνακας 3.2: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UCM	51
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος R25	52
Πίνακας 3.4: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR25	53
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος R50	54
Πίνακας 3.6: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR50	55
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού σκυροδέματος R75	56
Πίνακας 3.8: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης UR75	57
Πίνακας 3.9: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CCM	59
Πίνακας 3.10: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR25	61
Πίνακας 3.12: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR50	63
Πίνακας 3.13: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης CR75	65
Πίνακας 4.1: Σύγκριση περισφιγμένων και μη περισφιγμένων δοκιμών	68
Πίνακας 4.2: Έυρεση ποσοστών αντικατάστασης στο σύνολο του όγκου και σύνδεση αυτών με το ποσοστό απομείωσης	75
Πίνακας 4.3: Σύγκριση πειραματικής περισφιγμένης αντοχής f_{cc}' με αυτές των αναλυτικών προσομοιωμάτων	76

Βιβλιογραφία

Agarwal. (1990).

Aliakbar Gholampour, T. O. (2017). Behavior of rubberized concrete under active confinement. *ELSEVIER*.

Samar Raffoul, R. G.-M. (2017, Απρίλιος). Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial loading. *ELSEVIER*.

Samar Raffoul, R. G.-M. (2017, Ιανουάριος). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content. *ELSEVIER*.

Teng. (2007).

Touchari. (2016).

Χiao. (2010).

Βιτζιλαίου. (2007).

Καλογεράκης. (2013).

Κοτσόβος, Γ. (2016). http://www.metal.ntua.gr/uploads/4239/Kotsovos_KEF_2.pdf.
Ανάκτηση 11 1, 2016

Παπακωνσταντίνου. (2015). Σύνθετα Υλικά.

Πατρας, Π. (n.d.). <https://eclass.upatras.gr/>. Ανάκτηση 11 1, 2016, από
<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1502/%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%91%20%CE%92%CE%99%CE%92%CE%9B%CE%99%CE%9F%CE%A5/6a%20%CE%A3%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1.pdf>

Ρίστας. (2018).

Τσαμασφύρος. (1991). *Μηχανική παραμορφώσιμων σωμάτων*.