

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΚΟΚΚΟΥΣ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΑΠΟ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΤΡΟΥΜΠΟΥΛΗΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2020

© 2020 Κωνσταντίνος Στρομπούλης

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).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

- Πρώτος Εξεταστής Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας
- Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μυστακίδης Ευριπίδης
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Τρίτος Εξεταστής Δρ. Κούτας Λάμπρος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Κούτα Λάμπρο ο οποίος ήταν και αυτός παρών σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, είμαι ευγνώμων και στο τελευταίο μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Μυστακίδη Ευριπίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις του. Οφείλω ευχαριστίες στον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, μέλος ΕΤΕΠ, τον υποψήφιο διδάκτορα Παπαθεοχάρη Χάρη καθώς και στον συμφοιτητή και πρόσφατο απόφοιτο του τμήματος μας Κατσιανά Σταύρο για την πολύτιμη βοήθεια αλλά και στήριξη που μου προσέφεραν. Ευχαριστώ τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους στην προσπάθειά μου και την υπομονή τους όλο αυτό τον καιρό. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αθανάσιο Στρομπούλη και Ελβήρα Γιαννάκου αλλά και στα αδέρφια μου Μαρία και Θωμά Στρομπούλη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια και πόσο μάλλον για την κατανόηση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου.

Κωνσταντίνος Στρομπούλης

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΚΟΚΚΟΥΣ ΚΑΟΥΤΣΟΥΚ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Κωνσταντίνος Στρομπούλης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε πειραματικά η συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος με πρόσμιξη κόκκων από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων (Rubberized concrete). Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επιρροής του ποσοστού τριμμάτων ελαστικών καθώς και του υλικού περίσφιγξης στη συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά. Συνολικά παρασκευάστηκαν 100 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100x200mm με δυο βασικές παραμέτρους: (α) το ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο των φυσικών αδρανών από κόκκους καουτσούκ και (β) το υλικό των ινοπλισμένων πολυμερών καθώς και τον αριθμό των στρώσεων τους. Τα δοκίμια στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε μονοτονική μονοαξονική θλίψη και καταγράφηκε το θλιπτικό φορτίο, οι διαμήκεις και οι εγκάρσιες παραμορφώσεις. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η χρήση κόκκων καουτσούκ μειώνει τη θλιπτική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος, αλλά βελτιώνει την ικανότητα του σκυροδέματος να παραμορφώνεται ελαστικά τόσο στα περισφιγμένα όσο και στα απερίσφικτα δοκίμια, ανεξαρτήτου τρόπου περίσφιγξης. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων περίσφιγξης αυξάνει την αντοχή των δοκιμίων.

Abstract

The main goal of this project was to investigate the mechanical behavior of confined “rubberized” concrete cylindrical specimens with composite materials. Rubberized concrete was fabricated using crumb rubber from recycled tires instead of typical natural aggregate. More specifically, a series of concrete mixtures with different aggregate replacement ratios were fabricated. The replacement ratios varied from 25% to 100% of fine aggregates. A total of 100 cylindrical specimens with dimensions of 100x200 mm were fabricated using different aggregate replacement ratios as well as different number and type of confining fibers. The cylinders were tested in uniaxial compression. The analysis of the experimental results shows that replacement ratios, fiber types and number of layers do affect the compressive strength and the axial deformation of the concrete mixtures. The compressive strength increase is related to the axial rigidity of the confining material and it is more pronounced in mixtures with higher replacement ratios.

Key words: Rubberized concrete, FRP confinement, recycling, experimental investigation.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Χρήση ανακυκλωμένων υλικών στο σκυρόδεμα	1
1.2 Χρήση κόκκων καουτσούκ από ελαστικά αυτοκινήτων	2
1.3 Αντικείμενο της εργασίας	4
Κεφάλαιο 2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 Περίσφιξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά γενικά για σύνθετες σκυροδέματα.....	5
2.2 Επιρροή της χρήσης καουτσούκ στη μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος.....	8
2.3 Περίσφιξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά, ειδικά για σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ	
20	
Κεφάλαιο 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	24
3.1 Ονοματολογία δοκιμών.....	24
3.2 Σύνθεση μιγμάτων σκυροδέτησης	25
3.2.1 Πρώτο μίγμα σκυροδέτησης (συμβατικό σκυρόδεμα).....	28
3.2.2 Δεύτερο μίγμα σκυροδέτησης (100%)	29
3.2.3 Τρίτο μίγμα σκυροδέτησης (75%)	30
3.2.4 Τέταρτο μίγμα σκυροδέτησης (50%).....	31
3.2.5 Πέμπτο μίγμα σκυροδέτησης (25%)	32
3.3 Προετοιμασία μιγμάτων.....	33
3.3.1 Κοσκίνισμα αδρανών.....	33
3.3.2 Ανάμιξη - Σκυροδέτηση	35
3.4 Περίσφιξη με σύνθετα υλικά.....	36
3.4.1 Ιδιότητες υλικών.....	36
3.4.2 Ίνες σύνθετων υλικών	37
3.4.3 Μήτρες σύνθετων υλικών	41
3.4.4 Μεθοδολογία περίσφιξης.....	42
3.4.5 Διαδικασία περίσφιξης.....	43
3.5 Πειραματική διάταξη.....	45
3.5.1 Επιπέδωση επιφανειών φόρτισης.....	45
3.5.2 Τοποθέτηση αισθητήρων	47
3.5.3 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	50
Κεφάλαιο 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	53
Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	78
Κεφάλαιο 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	83

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1: Αποτελέσματα απερίσφικτων δοκιμίων. (Raffoul et al.,2017)</i>	17
<i>Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα απερίσφικτων δοκιμίων. (Raffoul et al., 2018)</i>	19
<i>Πίνακας 3: Αποτελέσματα περισφιγμένων δοκιμίων. (Raffoul et al., 2018).....</i>	21
<i>Πίνακας 4: Ομάδες δοκιμίων</i>	24
<i>Πίνακας 5: Υπό ομάδες δοκιμίων</i>	24
<i>Πίνακας 6: Ονοματολογία δοκιμίων πειραματικού προγράμματος</i>	25
<i>Πίνακας 7: Δοσολογίες αδρανών για την κατασκευή μιγμάτων «ελέγχου».....</i>	26
<i>Πίνακας 8: Θλιπτικές αντοχές δοκιμίων «ελέγχου»</i>	27
<i>Πίνακας 9: Μίγματα που παρασκευάστηκαν και ημερομηνίες παρασκευής και ξεκαλουπώματος δοκιμίων.....</i>	27
<i>Πίνακας 10: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμίων CM</i>	28
<i>Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμίων CM.....</i>	28
<i>Πίνακας 12: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμίων R100.....</i>	29
<i>Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμίων R100</i>	29
<i>Πίνακας 14: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμίων R75.....</i>	30
<i>Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμίων R75</i>	30
<i>Πίνακας 16: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμίων R50.....</i>	31
<i>Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμίων R50</i>	31
<i>Πίνακας 18: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμίων R25.....</i>	32
<i>Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμίων R25</i>	32
<i>Πίνακας 20: Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Τριανταφύλλου, 2004).....</i>	39
<i>Πίνακας 21: Τρόπος περισφιγξης κάθε δοκιμίου.....</i>	42
<i>Πίνακας 22: Βασικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν.....</i>	43
<i>Πίνακας 23: Αριθμός strain gauge που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο.....</i>	47

<i>Πίνακας 24: Ηλικίες δοκιμίων κατά την ενίσχυση και κατά την δοκιμή θλίψης.....</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων των κυλίνδρων που εξετάστηκαν.....</i>	<i>54</i>
<i>Πίνακας 26: συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής «κάθισης» σκυροδέματος (Concrete Slump Test) και της δοκιμής μέτρησης εγκλωβισμένου αέρα.</i>	<i>55</i>

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τα διάφορα στάδια κατά τη διάρκεια της ζωής ενός ελαστικού αυτοκινήτου. (Siddika et al., 2019)	3
Σχήμα 1.2: Βιομηχανική διαδικασία παραγωγής αδρανών από καουτσούκ χρησιμοποιώντας φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων. (Siddika et al., 2019)	3
Σχήμα 2.1: (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης (Τριανταφύλλου, 2004)	6
Σχήμα 2.2: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά (Τριανταφύλλου, 2004).....	7
Σχήμα 2.3: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στο βάρος των δοκιμίων (Youssf et al., 2017).....	14
Σχήμα 2.4: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Youssf et al., 2017)	15
Σχήμα 2.5: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (Youssf et al., 2017)	16
Σχήμα 2.6: (α) Γενική εικόνα διάταξης πειράματος. (β) Τυπική απεικόνιση οργάνου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των κυλίνδρων σκυροδέματος. (Raffoul et al., 2017)	17
Σχήμα 3.1: (α) Μίγμα σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση κόκκων καουτσούκ (β) Δοκιμή κάθισης (γ) Δοκιμή περιεκτικότητας σε αέρα	26
Σχήμα 3.2: Συσκευή κοσκινίσματος.....	33
Σχήμα 3.3: Κοσκινισμένα φυσικά αδρανή (α) Πούδρα (β) 0.5-1 mm (γ) 1-2 mm (δ) 2-4 mm (ε) 4-8 mm (ζ) 8-16 mm	34
Σχήμα 3.4: Κοσκινισμένοι κόκκοι καουτσούκ (α) 4-8 mm (β) 2-4 mm	34
Σχήμα 3.5: Μπετονιέρα εργαστηρίου.....	35
Σχήμα 3.6: Νωπό σκυρόδεμα σε καλούπια.....	35
Σχήμα 3.7: Συστατικά σύνθετων υλικών. (Κατσιάνας, 2019).....	36

Σχήμα 3.8: Ίνες ινοπλισμένων πολυμερών. (α) Ίνες γυαλιού (β) Ίνες άνθρακα (γ) Ίνες κέβλαρ	38
Σχήμα 3.9: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα. (Τριανταφύλλου, 2004) ...	38
Σχήμα 3.10: (α) Ινώδη σύνθετα υλικά, (β) Σύνθετα υλικά στρωμάτων,(γ) Σύνθετα υλικά σωματιδίων	40
Σχήμα 3.11: (α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό, (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό	40
Σχήμα 3.12: Εποξειδική ρητίνη Sikadur®-300	44
Σχήμα 3.13: Υφάσματα άνθρακα διπλής και μονής στρώσης περισφιγξης.....	44
Σχήμα 3.14: Ενίσχυση δοκιμίων (α) με ίνες άνθρακα, (β) με ίνες γυαλιού	45
Σχήμα 3.15: Τοποθέτηση πρόσθετων λωρίδων πάχους 2 cm στα άνω και κάτω άκρα	45
Σχήμα 3.16: Θειώδεις κονίαμα Gilson Gray Iron 9000 Capping Compound	46
Σχήμα 3.17: Βάση για την επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης.....	46
Σχήμα 3.18: (α) Τυπική μορφή αισθητήρα strain gauge (β) Τοποθετημένος αισθητήρας σε απερίσφικτο δοκίμιο.....	48
Σχήμα 3.19: Μαρκάρισμα κάθετων ευθειών προκειμένου να τοποθετηθεί το strain gauge στη μέση του δοκιμίου	49
Σχήμα 3.20: Εγκάρσιο και διαμήκες strain gauge με πόλους σε ενισχυμένο δοκίμιο (α) με ίνες άνθρακα, (β) με ίνες γυαλιού	50
Σχήμα 3.21: Πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης δοκιμίου περισφιγμένου με ίνες άνθρακα	52
Σχήμα 4.1: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης απερίσφικτου δοκιμίου ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας απερίσφικτου δοκιμίου ομάδας CM σε θλίψη.....	56
Σχήμα 4.2: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.....	57

Σχήμα 4.3: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.....	58
Σχήμα 4.4: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.....	59
Σχήμα 4.5: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.....	60
Σχήμα 4.6: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ομάδας CM	61
Σχήμα 4.7: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ομάδας R25	62
Σχήμα 4.8: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ομάδας R50	63
Σχήμα 4.9: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ομάδας R75	63
Σχήμα 4.10: Μέση θλιπτική αντοχή απερίσφικτων δοκιμίων	65
Σχήμα 4.11: Μέση θλιπτική αντοχή περισφιγμένων δοκιμίων με (α) μία και (β) δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα	65
Σχήμα 4.12: Μέση θλιπτική αντοχή περισφιγμένων δοκιμίων με (α) μία και (β) δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.....	65
Σχήμα 4.13: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων CM.....	66
Σχήμα 4.14: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R25	67
Σχήμα 4.15: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R50	68
Σχήμα 4.16: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R75.	69
Σχήμα 4.17: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων απερίσφικτων δοκιμίων	70
Σχήμα 4.18: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα.....	71

Σχήμα 4.19: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.....	72
Σχήμα 4.20: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα	73
Σχήμα 4.21: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.....	74
Σχήμα 4.22: Ποσοστιαία αύξηση αντοχών ανάλογα την περίσφιγξη.	75
Σχήμα 4.23: Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διαμήκους παραμόρφωσης.....	76
Σχήμα 4.24: Ποσοστιαία μείωση αντοχών ανάλογα το ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ	77

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Χρήση ανακυκλωμένων υλικών στο σκυρόδεμα

Ζούμε σε μια εποχή όπου η ανάγκη για μια βιώσιμη πολιτική με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων είναι επιτακτική. Είναι επίσης αδικαιολόγητο ενώ ακμάζουν οι επιστήμες και η τεχνολογία να μην μπορεί να γίνει κάτι ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του περιβάλλοντος. Η πολιτική της ανακύκλωσης έχει μεν εφαρμοστεί στην καθημερινότητα των πολιτών σχεδόν σε όλο τον κόσμο αλλά υπάρχουν άλλοι κλάδοι οι οποίοι βλάπτουν το περιβάλλον σε μεγαλύτερο ποσοστό και η ιδέα της ανακύκλωσης ή δεν είναι ευρέως διαδεδομένη ακόμα ή απλά δεν εφαρμόζεται. Ένας τέτοιος κλάδος λοιπόν, είναι ο κατασκευαστικός και πιο συγκεκριμένα το κομμάτι της παραγωγής σκυροδέματος. Προκειμένου λοιπόν να εναρμονιστεί η κατασκευαστική και οικοδομική τεχνολογία με ενέργειες επαναχρησιμοποίησης υλικών αναζητήθηκαν νέες δράσεις και τεχνικές.

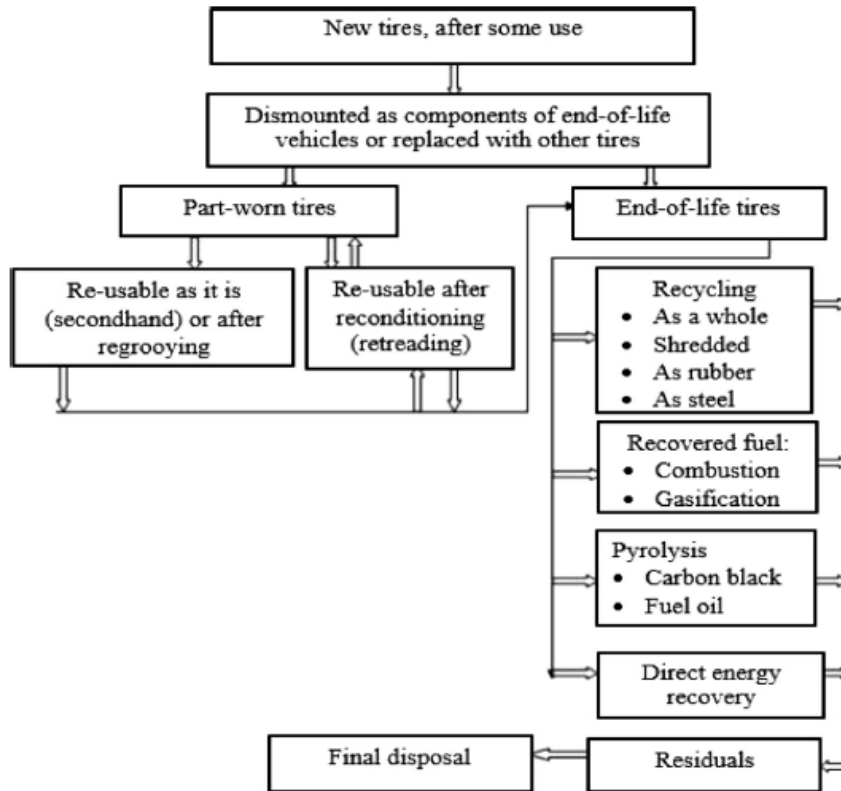
Το σκυρόδεμα λοιπόν αποτελείται από τσιμέντο, νερό και από διάφορες κοκκομετρίες φυσικών αδρανών. Το τσιμέντο όπως όλοι γνωρίζουν είναι το πιο διαδεδομένο οικοδομικό υλικό στον κόσμο αλλά ο κόσμος δεν γνωρίζει το πόσο ρυπογόνο είναι και σε τι βαθμό βλάπτει το περιβάλλον. Αξίζει να αναφερθεί πως η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου ευθύνεται για το 5% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, όπως αναφέρουν διάφορες έρευνες της Ε.Ε., ποσοστό το οποίο ξεπερνά αυτό που αντιστοιχεί στις αερομεταφορές και είναι αρκετά δυσάρεστο το γεγονός πως η παραγωγή τσιμέντου όλο και αυξάνεται καθώς οι ανάγκες για οικοδόμηση και ανάπτυξη αυξάνονται με σκοπό να υπάρξει μεγαλύτερη επιβάρυνση στο κλίμα. Βέβαια χάρη σε διάφορες πρωτοποριακές έρευνες συζητιέται πλέον μια εναλλακτική και πολύ «πράσινη» λύση η οποία ακούει στο όνομα τσιμέντο Portland, το οποίο μπορεί να παραχθεί με δραστικά μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και κάνει το τσιμέντο σε ένα αρκετά υψηλό βαθμό πιο οικολογικό.

Πέρα από την αλλαγή στον τρόπο παραγωγής του τσιμέντου, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να συνδράμουν στην παραγωγή σκυροδέματος από ανακυκλωμένα υλικά. Τα τελευταία 20-25 χρόνια μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας, κράτη, οργανισμοί και επιχειρήσεις έχουν στραφεί στη χρήση ανακυκλωμένων υλικών ως ανακυκλωμένα αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος. Ως ανακυκλωμένα αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν αδρανή υλικά από κατεδαφίσεις κτηρίων και κατασκευών, υλικά που ανακτήθηκαν από οικιακά σκουπίδια αλλά και βιομηχανικές μεθόδους. Επομένως στα πλαίσια της διαχείρισης των πόρων μειώνεται η ανάγκη για παρθένα αδρανή υλικά και κατά συνέπεια οι καταστροφικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις

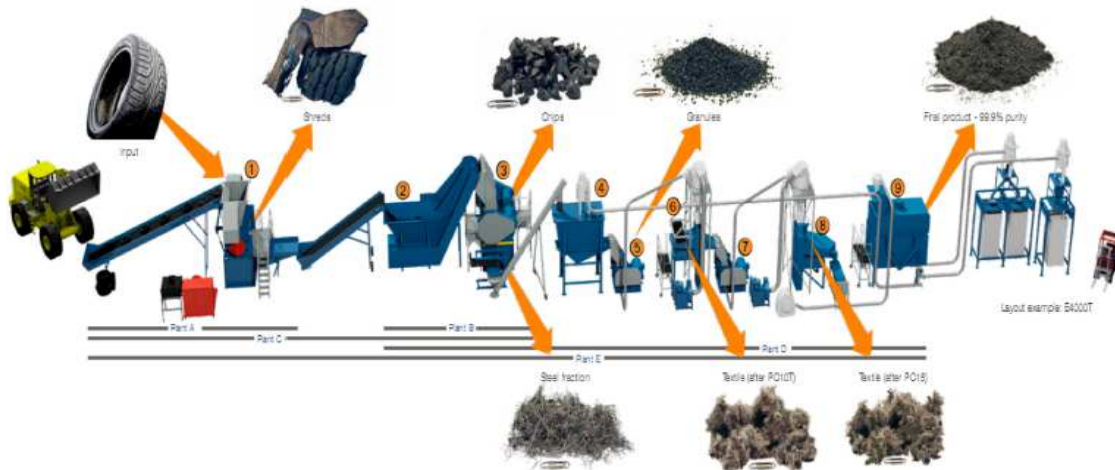
κατά τη διαδικασία εξαγωγής. Παρόλα αυτά σημαντική είναι η συνεισφορά τους και στην απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα από τον περιβάλλοντα χώρο καθώς η φυσική διαδικασία ενανθράκωσης εμφανίζεται πάντα από την επιφάνεια του σκυροδέματος προς τα μέσα.

1.2 Χρήση κόκκων καουτσούκ από ελαστικά αυτοκινήτων

Αναφορικά με τη χρήση των κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα είναι μια τεχνική, στην οποία χρησιμοποιείται μεταχειρισμένο ελαστικό οχημάτων (ανακυκλωμένο καουτσούκ), που εκτός από ότι είναι φιλικότερη ως προς το περιβάλλον μέσω της διαδικασίας της ανακύκλωσης έχει και ως στόχο την εξερεύνηση ενός μίγματος με νέες και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Είναι ευρέως γνωστό πως κάθε χρόνο περισσότερα από 300 εκατομμύρια ελαστικά αυτοκινήτων ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ρυθμίζεται πλέον από την περιβαλλοντική νομοθεσία η τελική διάθεση των μεταχειρισμένων ελαστικών καθώς αποτελεί αυξανόμενο πρόβλημα. Έναντι λοιπόν της υγειονομικής ταφής ή της καύσης τους, δράσεις που έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά ρυπογόνες και καταστροφικές ως προς το περιβάλλον, εξετάζεται από τις βιομηχανίες και τα διάφορα ερευνητικά κέντρα η εύρεση εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης τους. Ο κύκλος ζωής των ελαστικών απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.1 ενώ στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται ο τρόπος παραγωγής αδρανών από καουτσούκ. Μια εφαρμογή, αρκετά συζητήσιμη θα ήταν η χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος αντικαθιστώντας ένα ποσοστό φυσικών αδρανών. Πέρα όμως από το περιβαλλοντικό κομμάτι, βάση ερευνητικών εργασιών έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση κόκκων καουτσούκ κάνει το σκυρόδεμα αρκετά πιο ελαστικό με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις και να απορροφά περισσότερη ενέργεια το οποίο εν κατακλείδι έχει ως αποτέλεσμα να προειδοποιεί αρκετά πριν την αστοχία και να σώζει ανθρώπινες ζωές. Δυστυχώς όμως έχει και αρνητικές επιδράσεις στο σκυρόδεμα με κύρια επίπτωση τη μείωση της αντοχής του γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές αυτού του νέου μίγματος. Φυσικά για όλα υπάρχουν λύσεις και προκειμένου να αυξηθεί η εφαρμοσιμότητα ενός σκυροδέματος με πρωτοπόρες μηχανικές ιδιότητες συνδυάστηκε με τη τεχνική της ενίσχυσης και πιο συγκεκριμένα όσο αφορά αυτή τη διπλωματική με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης.



Σχήμα 1.1: Τα διάφορα στάδια κατά τη διάρκεια της ζωής ενός ελαστικού αυτοκινήτου. (Siddika et al., 2019)



Σχήμα 1.2: Βιομηχανική διαδικασία παραγωγής αδρανών από καουτσούκ χρησιμοποιώντας φαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων. (Siddika et al., 2019)

1.3 Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την πειραματική μελέτη περίσφιγξης σκυροδέματος, που περιέχει κόκκους καουτσούκ από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων, με σύνθετα υλικά. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μια σύγκριση θλιπτικής συμπεριφοράς κυλινδρικών δοκιμίων διαστάσεων 100x200mm από συμβατικό σκυρόδεμα τόσο με δοκίμια τα οποία περιέχουν αδρανή από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων σε διάφορες αναλογίες ποσοστού αντικατάστασης κατ' όγκο με το συμβατικό σκυρόδεμα, όσο και με περισφιγμένα δοκίμια με δύο ειδών σύνθετα υλικά (CFRP, GFRP) αλλά και διαφορετικών στρώσεων. Παράλληλα αντικείμενο της εργασίας αποτελεί και η σύγκριση των περισφιγμένων δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ με τα απερίσφικτα κατά τη σύνθλιψη τους. Όλα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις θλιπτικές δοκιμές θα αναλυθούν και θα συγκριθούν με προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο θέμα μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Στόχος είναι τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης που διεξήχθη στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας να είναι αρκετά κοντά στις ήδη παρατηρήσεις που έχουν γίνει αλλά ταυτόχρονα να βγούνε συμπεράσματα όσο αφορά στη σύγκριση της συμπεριφοράς του απερίσφικτου συμβατικού σκυροδέματος με το απερίσφικτο σκυρόδεμα που αποτελείται από κόκκους καουτσούκ και του περισφιγμένου συμβατικού σκυροδέματος με το περισφιγμένο σκυρόδεμα που αποτελείται από κόκκους καουτσούκ.

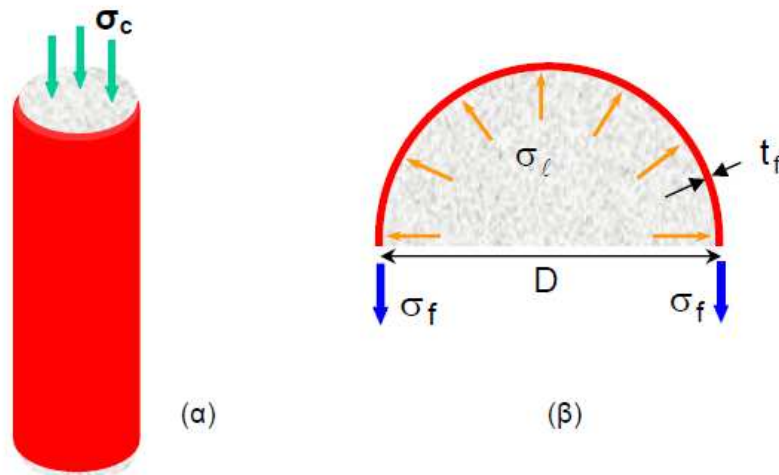
Κεφάλαιο 2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Περίσφιγξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά γενικά για σύνηθες σκυρόδεμα

Κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος, τα σύνθετα υλικά δρουν πάρα πολύ ευνοϊκά και αποτελεσματικά προκειμένου να αυξηθεί τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και η παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος. Αυτό γιατί, καθώς το υποστύλωμα καταπονείται αξονικά, το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας που το περιβάλλει να ενεργοποιείται εφόσον οι ίνες του παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις, επιβάλλοντας ο ίδιος στην συνέχεια εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις περίσφιγξης κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρι τη στιγμή αστοχίας του. Με την ανάπτυξη των τάσεων περίσφιγξης επιτυγχάνονται τα εξής:

- Αύξηση της θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος και της μέγιστης παραμόρφωσης που καταγράφεται στο σκυρόδεμα μέχρις ότου αστοχήσει.
- Αύξηση της πλαστιμότητας, κατά συνέπεια της αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.

Η συμπεριφορά του μανδύα περίσφιγξης καθώς και οι εγκάρσιες τάσεις που αναπτύσσονται λόγω διόγκωσης του σκυροδέματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης (Τριανταφύλλου, 2004)

Οι εγκάρσιες κατά την ακτινική διεύθυνση τάσεις που αναπτύσσονται στο μανδύα με αποτέλεσμα να ασκούνται ίσες και αντίθετες στο σκυρόδεμα, δίνονται από την σχέση:

$$\sigma_l = \frac{2 \times \varepsilon_f}{d} \times \sigma_f = \frac{2 \times \varepsilon_f}{d} \times E_f \times \varepsilon_f \quad (2.1)$$

Όπου:

σ_l : Οι τάσεις περίσφιγξης λόγω διόγκωσης κατά την ακτινική διεύθυνση σε (MPa)

σ_f : Η εφελκυστική τάση στο μανδύα σε (MPa)

ε_f : Οι παραμορφώσεις του μανδύα

E_f : Το μετρό ελαστικότητας του μανδύα σε (GPa)

t_f : Το πάχος του μανδύα σε (m)

d : Η διάμετρος του υποστυλώματος συμπεριλαμβανομένου του πάχους του μανδύα σε (m)

Αποτέλεσμα αυτών των τάσεων περίσφιγξης είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και κατά συνέπεια η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της δυνατότητας παραμόρφωσης του σκυροδέματος, έως ότου η εφελκυστική τάση φθάσει την αντοχή του μανδύα και προκαλέσει την θραύση του, που

αυτομάτως αποτελεί και την αντοχή του περισφιγμένου πλέον στοιχείου, εφόσον φυσικά δεν έχει προηγηθεί αποκόλληση των σύνθετων υλικών από το σκυρόδεμα.

Σημειώνεται βέβαια ότι η εφελκυστική αντοχή του εφαρμοσμένου μανδύα είναι μικρότερη σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή των ινών των σύνθετων υλικών βάση εργαστηριακών δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στις εξής παραμέτρους:

- Πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στον μανδύα
- Τυχόν συγκεντρώσεις τάσεων κοντά σε γωνίες
- Ύπαρξη αρκετών στρώσεων περίσφιγξης
- Ποιότητα εφαρμογής του μανδύα

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η διαφορά εισάγεται ένας μειωτικός συντελεστής, οποίος μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσος με 0.7-0.9:

$$f_{fde} = \eta_e \times f_{fd} \quad (2.2)$$

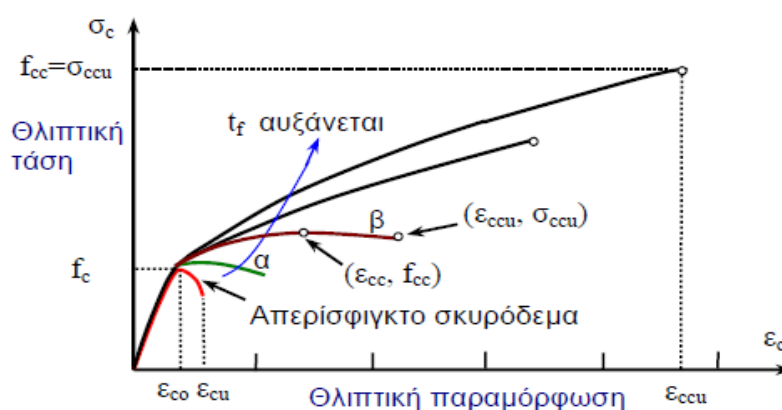
Όπου:

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

η_e : Μειωτικός συντελεστής προσεγγιστικά ίσος με 0.7-0.9

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

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος περισφιγμένου και μη.



Σχήμα 2.2: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά (Τριανταφύλλου, 2004)

Βάση πειραματικών αποτελεσμάτων και παρατηρώντας κανείς την εικόνα, μπορεί εύκολα να εξάγει τα εξής συμπεράσματα:

- Σε γενικές γραμμές η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι διγραμμικού τύπου, με αλλαγή κλίσης στο σημείο καμψής και πιο συγκεκριμένα στην παραμόρφωση $\varepsilon_{co}=0.002$, η οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος, f_c .
- Όπως φαίνεται και από την καμπύλη α του Σχήματος 2.2, μανδύες εξαιρετικά μικρού πάχους συμβάλλουν μόνο στην αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης.
- Όπως φαίνεται από την καμπύλη β του Σχήματος 2.2, για μανδύες σχετικά μικρού πάχους η μέγιστη αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ε_{cc} , μικρότερη από την μέγιστη παραμόρφωση ε_{ccu} , καθώς από ένα σημείο και μετά ακολουθεί μειωτικός κλάδος στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης.
- Επίσης όπως αναγράφεται στο Σχήμα 2.2 η αντοχή f_{cc} και η μέγιστη παραμόρφωση ε_{ccu} του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα για δεδομένο τύπο σύνθετων υλικών.
- Για μανδύες ίσου πάχους αλλά διαφορετικού τύπου ινών (π.χ. άνθρακας, γυαλί), η αντοχή f_{cc} αυξάνεται ανάλογα με την αντοχή του μανδύα f_{fd} . Συνεπώς ο μανδύας από άνθρακα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή λόγω της εφελκυστικής αντοχής των ινών του. Αντιθέτως οι μανδύες από ίνες γυαλιού πλεονεκτούν έναντι αυτών από άνθρακα όσον αφορά την μέγιστη παραμόρφωση του μανδύα $\varepsilon_{fd,e}$.
- Για μανδύες ίσης δυστένειας, όπως αυτή εκφράζεται από το γινόμενο $E_f t_f$, η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με τη μέγιστη παραμόρφωση του μανδύα $\varepsilon_{fd,e}$. (Τριανταφύλλου, 2004)

2.2 Επιρροή της χρήσης καουτσούκ στη μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος

Στο παρόν υπό κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες, αποτελέσματα και συμπεράσματα από κάποια άρθρα πειραματικών ερευνών. Πρόκειται για μια σύντομη αναφορά βασικών σημείων από διάφορες έρευνες προκειμένου να υπάρξει μετέπειτα σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην έρευνα τους οι Medina et al., (2018) μελέτησαν τις πιθανότητες της χρήσης ανακυκλωμένων κόκκων καουτσούκ στον κατασκευαστικό κλάδο, συνόψισαν τις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες και έκαναν αναφορά σε μεθόδους ανακύκλωσης και παραγωγής των κόκκων

αυτών αλλά και στα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωση τους σε διάφορα συνθετικά.

Οι κόκκοι καουτσούκ έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορων τύπων βιομηχανικές εφαρμογές από το πέρας της βιομηχανικής επανάστασης έως σήμερα. Πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη της διαδικασίας του βουλκανισμού επέτρεψε την οικονομικά αποτελεσματική παραγωγή τεράστιων όγκων υψηλής ποιότητας καουτσούκ. Η τωρινή παγκόσμια παραγωγή καουτσούκ ανέρχεται στους 26.7 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων οι 12.31 είναι φυσικό και οι 14.46 συνθετικό καουτσούκ, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ελαστικών αυτοκινήτων και άλλων βιομηχανικών και καταναλωτικών προϊόντων.

Το βουλκανισμένο καουτσούκ είναι εξαιρετικά ανθεκτικό, ισχυρό, ελαστικό και μπορεί να διατηρεί τον όγκο του υπό φόρτιση, συνεπώς το καθιστά ιδανικό για να χρησιμοποιηθεί σαν αδρανές για την παραγωγή συνθετικών. Παρόλα αυτά, το περισσότερο καουτσούκ που ανακτάται από ελαστικά αυτοκινήτων καίγεται σαν καύσιμο, μια διαδικασία που παράγει καταστροφικά για την υγεία αέρια και ανακτά μόνο το 25% της ενέργειας που καταναλώνεται για την παραγωγή του καουτσούκ. Βέβαια έχουν δημιουργηθεί πολύ πιο φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες για την ανάκτηση καουτσούκ, οι οποίες είναι σχετικά ακριβές.

Τις τελευταίες δεκαετίες, διεξοδικές έρευνες έχουν διερευνήσει τη χρήση ανακυκλωμένου καουτσούκ σε συνθετικά και ειδικά στην κατασκευαστική βιομηχανία, που είναι η κύρια καταναλωτής παρθένων υλικών παγκοσμίως. Στα πλαίσια αυτά έχει μελετηθεί και η χρήση τους στο σκυρόδεμα σαν αντικατάσταση κάποιου ποσοστού των φυσικών αδρανών. Παρόλα αυτά η προσθήκη τους μειώνει την εργασιμότητα και την αντοχή του σκυροδέματος και αυξάνει τις μικρό-ρωγμές και την εγκάρσια παραμόρφωση υπό μονοαξονική θλίψη. Συνεπώς, η χρήση σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ σε υψηλής σημαντικότητας υποδομές είναι πολύ περιορισμένη μέχρι σήμερα. Το συγκεκριμένο άρθρο αποσκοπεί στην διερεύνηση των χημικών ιδιοτήτων του καουτσούκ καθώς και στην ποσοτικοποίηση της επιρροής του στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τόσο του νωπού όσο και του σκληρού σκυροδέματος.

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το καουτσούκ έχει επιρροές στην συμπεριφορά των συνθετικών που έχουν ως βάση το τσιμέντο. Η προσθήκη καουτσούκ στο σκυρόδεμα, πόσο μάλλον στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, επηρεάζει δυσμενώς τα χαρακτηριστικά του νωπού μίγματος και μειώνει την αντοχή σε θλίψη. Στη πραγματικότητα η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα τροποποιεί την ρευστότητα του, περιορίζοντας έτσι τη

ποσότητα καουτσούκ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, σε μικρούς όγκους.

- Η περιεκτικότητα του αέρα στο νωπό σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ είναι υψηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι το καουτσούκ είναι υδρόφοβο υλικό και έτσι παγιδεύεται αέρας στη διεπιφάνεια του με το υπόλοιπο μίγμα.
- Συγκρινόμενο με το συμβατικό κονίαμα, το κονίαμα που εμπεριέχει καουτσούκ έχει λιγότερες πλαστικές συρρικνώσεις καθώς οι κόκκοι καουτσούκ περιορίζουν τον πολλαπλασιασμό των ρωγμών.
- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ δεν επηρεάζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του καουτσούκ, το μέγεθος των κόκκων δηλαδή που αντικαθιστούν τα φυσικά αδρανή αλλά επηρεάζεται από τον συνολικό όγκο των αδρανών που αντικαθίστανται στο μίγμα. Στις περισσότερες έρευνες δεν γίνεται αναφορά στον τρόπο επεξεργασίας του καουτσούκ παρόλο που αυτή η διαδικασία επηρεάζει την εξωτερική επιφάνεια και συνεπώς τη συνάφεια. Όπως αναμενόταν, η αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από κόκκους καουτσούκ έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής, αλλά η απομείωση της θλιπτικής αντοχής εξαρτάται από τα πρόσθετα ή την επεξεργασία που έχει υποστεί το καουτσούκ.
- Όσον αφορά το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων καουτσούκ προτείνονται τα στρογγυλότερα αδρανή. Παρόλα αυτά όμως, για ίδιο όγκο κόκκων καουτσούκ, το σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα αδρανή από καουτσούκ είναι πιο εργάσιμο από αυτό με πιο λεπτόκοκκα, παρόλο που το πρώτο έχει χαμηλότερη αντοχή και μεγαλύτερη διαπερατότητα.
- Η χρήση χαλύβδινων ινών συνδυασμένων με κόκκους καουτσούκ κάνει το μίγμα πιο δύσπλαστο και μειώνει την αντοχή κατά 27%. Προκειμένου να περιοριστεί η βλαβερή επίπτωση των χαλύβδινων ινών στην θλιπτική αντοχή, οι Papakonstantinou and Tobolski (2006) πρότεινε τη χρήση τους έως το πολύ 2%. Παράλληλα, η χρήση βιομηχανικών χαλύβδινων ινών ελέγχουν την ρηγμάτωση και αυξάνουν την καμπτική αντοχή.
- Συγκρινόμενο με το συμβατικό σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα που εμπεριέχει κόκκους καουτσούκ έχει υψηλότερο συντελεστή απόσβεσης και μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η ευθραυστότητα μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ και τείνει προς το μηδέν για συνθετικά σκυροδέματος

που περιέχουν 40% αδρανή από καουτσούκ. Η περιεκτικότητα σε αδρανή από καουτσούκ μέχρι ένα ποσοστό αυξάνει επίσης την σκληρότητα του σκυροδέματος, έπειτα από αυτό όσο πιο πολύ καουτσούκ προστίθεται η σκληρότητα μειώνεται λόγω της πολύ χαμηλής θλιπτικής αντοχής. Η σκληρότητα και η πλαστιμότητα του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ μικρής αντικατάστασης φυσικών αδρανών σε όγκο (1-3%) μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω αν προστεθούν χαλύβδινες ίνες. Ομοίως οι κόκκοι καουτσούκ μπορούν να αυξήσουν τις παραμορφώσεις του κονιάματος πριν συμβούν μικρό-ρωγμές.

- Η περίσφιγξη ελέγχει την διόγκωση του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ καθώς η εγκάρσια παραμόρφωση του και ο λόγος Poisson είναι μεγαλύτερα από το συμβατικό σκυρόδεμα.

Παράλληλα οι Siddika et al., (2019) παρουσίασαν άρθρο, το οποίο συνοψίζει την πρόοδο όσον αφορά τη χρήση κόκκων καουτσούκ από ελαστικά αυτοκινήτων στο σκυρόδεμα μαζί με την αποδοτικότητα των ιδιοτήτων, χρήσεων, ανθεκτικότητας και χρησιμότητας των υλικών αυτών. Επίσης η συγκεκριμένη έρευνα αποσκοπεί στην παροχή μιας θεμελιώδους εικόνας όσον αφορά ενσωματωμένες εφαρμογές του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ για την βελτίωση κατασκευαστικών μεθόδων συμπεριλαμβανομένων και των εφαρμογών για την βελτίωση περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των κατασκευών από σκυρόδεμα στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η πυκνότητα του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ είναι χαμηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Γενικότερα η πυκνότητα του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ μειώνεται καθώς αυξάνεται η ποσότητα και το μέγεθος των κόκκων καουτσούκ.
- Το μίγμα σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ είναι πιο δύσπλαστο. Η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα το κάνει πορώδες και ελαφρύτερο λόγω της συνάφειας του αέρα και την υδροφοβικότητα του καουτσούκ τα οποία είναι χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων αλλά και την περιεκτικότητα του μίγματος σε κόκκους καουτσούκ. Γενικότερα, χρήσεις πιο χονδρόκοκκων αδρανών από καουτσούκ, παράγωγου πιο πορώδεις μήτρες σκυροδέματος αλλά αυτό μπορεί να είναι και αμφιλεγόμενο σε ειδικές περιπτώσεις.

- Γενικά, η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα μπορεί να ρίξει τις μηχανικές ιδιότητες του και η τάση αυτή αυξάνεται με το μέγεθος και το περιεχόμενο σε κόκκους καουτσούκ. Μια ευρεία και πορώδης αδυναμία παρατηρήθηκε στο σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ λόγω της χαμηλής συνάφειας των κόκκων καουτσούκ με το τσιμεντένιο κονίαμα. Η μείωση σε εφελκυστική και καμπτική αντοχή ήταν μικρότερη από τη μείωση σε θλιπτική αντοχή.
- Η πλαστιμότητα και η ικανότητα παραμόρφωσης σκυροδέματος είναι υψηλότερη μετά την προσθήκη κόκκων καουτσούκ. Καθώς το καουτσούκ είναι μαλακό υλικό, αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και την ικανότητα «διαρροής» χωρίς εμφάνιση ρωγμών. Το μέγεθος και η ποσότητα των κόκκων καουτσούκ επηρεάζει αρνητικά το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.
- Το σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ έχει πολύ υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αλλά χαμηλή αντίσταση σε τριβή εξαιτίας της μαλακής φύσης του καουτσούκ και του χαμηλού ειδικού βάρους του. Η μαλακή και ελαστική φύση του καουτσούκ το κάνει δύσκολο για το σκυρόδεμα να απορροφήσει ξαφνικούς κραδασμούς αλλά η τελική παραλαβή φορτίου του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ είναι χαμηλότερη από του συμβατικού σκυροδέματος. Η αντίσταση στην επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση και ο συντελεστής απόσβεσης του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ βελτιώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. Αυτό το χαρακτηριστικό βοηθά στη βελτίωση της κόπωσης, απορρόφησης θορύβου και σεισμικής αντίστασης των κατασκευών.

Σε αντίστοιχη έρευνα οι Raffoul et al., (2016) διερεύνησαν πειραματικά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος με υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, έτσι ώστε να αξιοποιούνται πλήρως οι μηχανικές ιδιότητες του βουλκανισμένου καουτσούκ. Οι νέες ιδιότητες και η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη 40 μιγμάτων σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ 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 των κόκκων από καουτσούκ. Αυτή η αρχική μελέτη οδήγησε στην ανάπτυξη ενός "βέλτιστου" μείγματος σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ, 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 των λεπτόκοκκων αδρανών με κόκκους 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 εύπλαστο υψηλής περιεκτικότητας σε καουτσούκ μίγμα σκυροδέματος κατάλληλο για βιώσιμες εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Επιδράσεις του καουτσούκ στο σκυρόδεμα:**
 - Υψηλότερη περιεκτικότητα σε καουτσούκ μειώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος, την πυκνότητα και την θλιπτική του αντοχή.
 - Η αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τον συνολικό όγκο καουτσούκ που περιέχει το μίγμα και όχι από τον τύπο αντικατάστασης καουτσούκ (αντικατάσταση χονδρόκοκκων ή λεπτόκοκκων αδρανών). Παρόλα αυτά, οι νέες ιδιότητες του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ ήταν ελαφρώς κατώτερες σε υψηλά επίπεδα αντικατάστασης λεπτόκοκκων αδρανών. Η συνδυασμένη αντικατάσταση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών βοηθά στο να επιτευχθεί μίγμα υψηλής περιεκτικότητας σε καουτσούκ με ελάχιστη αρνητική επιρροή στην αντοχή και την εργασιμότητα.

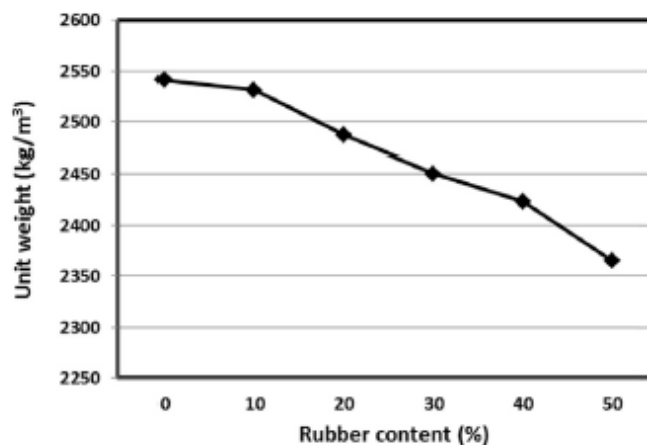
- **Βελτιστοποίηση ανάμειξης:**
 - Η βελτιστοποίηση ανάμειξης ελαχιστοποιεί τις δυσμενείς επιπτώσεις του καουτσούκ στο σκυρόδεμα, ως προς τις μηχανικές ιδιότητες τόσο στο νωπό σκυρόδεμα όσο και στο σκληρό. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση 40% των λεπτόκοκκων φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ μείωσε την αντοχή του αρχικού μίγματος κατά 70%, ενώ η μείωση αυτή ήταν μόλις 49% στο βελτιστοποιημένο μίγμα.
 - Τα βελτιστοποιημένα μείγματα σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ επέτρεψαν τη χρήση υψηλών περιεκτικότητας σε καουτσούκ (έως και 60% συνολική αντικατάσταση όγκου αδρανών) διατηρώντας παράλληλα μια αποδεκτή εργασιμότητα και αντοχή σε θλίψη της τάξεως 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 ένα συμπληρωματικό αποτέλεσμα 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 σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ.

Οι Youssf et al., (2017) διεξήγαγαν μια έρευνα της οποίας κύριος σκοπός είναι να προσφέρει μια πιο κοντινή ματιά στις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες του περισφιγμένου με ινοπλισμένα πολυμερή σκυροδέματος και μη, με υψηλή περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. Σε αυτή την έρευνα παράχθηκαν 6 μίγματα σκυροδέματος με 0, 10, 20, 30, 40, 50% αντικατάσταση κατ' όγκο της άμμου με κόκκους καουτσούκ. Μετρήθηκαν διάφορες μηχανικές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένου της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας, του βάρους των δοκιμίων, την αντοχή στην κρούση, την απορρόφηση του νερού, την επίδραση της θερμοκρασίας, την συμπεριφορά τάσης – παραμόρφωσης και την επίδραση περισφιγξης με ινοπλισμένα πολυμερή.

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η χρήση καουτσούκ στο σκυρόδεμα γενικά είχε μια μικρή επίπτωση στο βάρος των δοκιμίων σκυροδέματος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3. Για παράδειγμα για αντικατάσταση του 50% των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ, το βάρος του δοκιμίου μειώνεται μόνο κατά 6.9%.

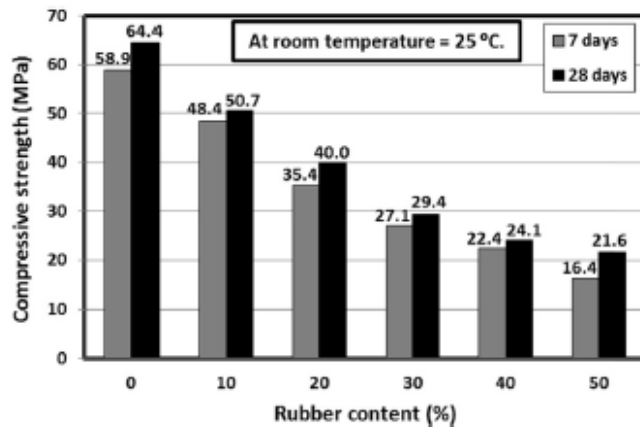


Σχήμα 2.3: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στο βάρος των δοκιμίων (Youssf et al., 2017)

- Αντικατάσταση μέχρι και 10% των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ δεν έχει σημαντική επίπτωση στην απορρόφηση νερού του σκυροδέματος. Πέρα από αυτό η απορρόφηση νερού αυξάνεται γραμμικά με δυο τιμές. Μέχρι 30%

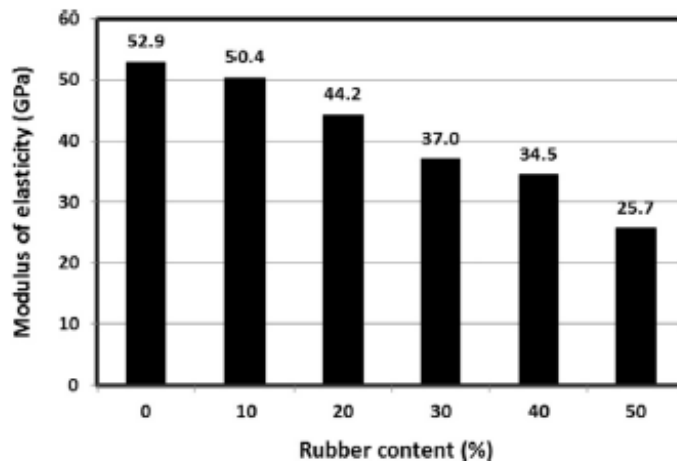
αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ η απορρόφηση νερού αυξάνεται κατά 31% και μετά για 50% αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ η απορρόφηση νερού αυξάνεται κατά 46% συγκρινόμενα φυσικά με το συμβατικό σκυρόδεμα.

- Όσο αφορά τις θλιπτικές αντοχές των μιγμάτων παρατηρείται μια αυξανόμενη μείωση με την αύξηση του ποσοστού περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Youssf et al., 2017)

- Όμοια με τις αντοχές παρατηρείται μείωση και των μέτρων ελαστικότητας των μιγμάτων σκυροδέματος με την αύξηση του ποσοστού περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



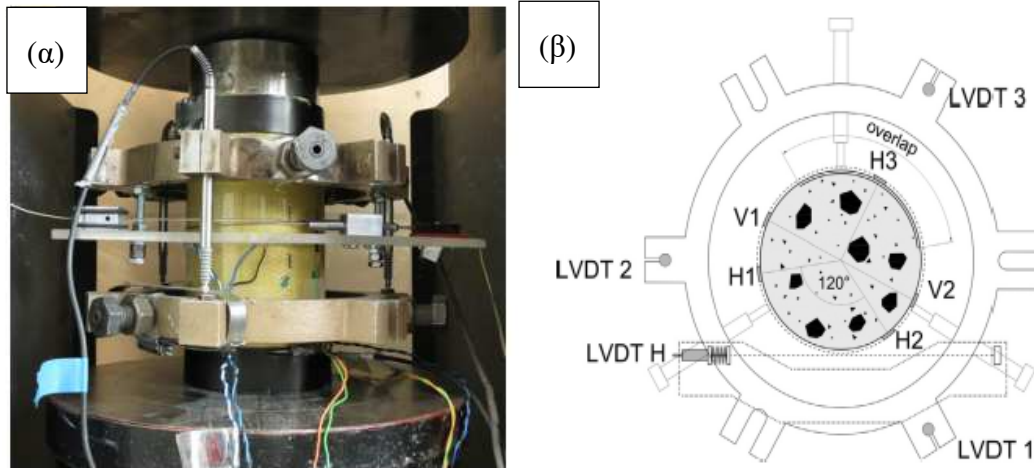
Σχήμα 2.5: Επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (Youssf et al., 2017)

Τα συμπεράσματα που αφορούν στην περίσφιγξη των δοκιμίων πρόκειται να παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 2.3.

Σε παρόμοια έρευνα οι Raffoul et al., (2017) διερεύνησαν τη χρήση σύνθετων υλικών (FRP) για την ανάπτυξη ενός νέου, υψηλής αντοχής και παραμορφωσιμότητας περισφιγμένου σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ. Εξήντα δοκίμια σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ εξετάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Οι κύλινδροι παράγονται από ανακυκλωμένο καουτσούκ το οποίο προέρχεται από ελαστικά αυτοκινήτων με σκοπό να αντικαταστήσει:

- 0-100% λεπτόκοκκων ή χονδρόκοκκων αδρανών κατ' όγκο
- 40% ή 60% του συνολικού όγκο των αδρανών

Έξι κύλινδροι του τελευταίου μίγματος περισφίχτηκαν με δύο ή τρεις στρώσεις ιών αραμιδίου σε διάταξη, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: (α) Γενική εικόνα διάταξης πειράματος. (β) Τυπική απεικόνιση οργάνου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των κυλίνδρων σκυροδέματος. (Raffoul et al., 2017)

Τα αποτελέσματα των απερίσφικτων δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα απερίσφικτων δοκιμών. (Raffoul et al., 2017)

ID	Total aggregate replaced (%)	f_c (MPa)	$\epsilon_{c,0.05}$ (μΕ)	ϵ_{sp} (μΕ)	ϵ_{sp} (μΕ)	E_c (GPa)	$\epsilon_{sp}/\epsilon_{c,0.05}$
Plain	0	61.7 ± 4.1	550	2180	885	39.4	3.96
10F	4.5	53.4 ± 2.1	560	1900	890	38.8	3.39
20F	9.0	43.2 ± 4.3	415	1840	1000	35.6	4.43
40F	18.0	32.0 ± 0.9	- ^b	- ^b	1745	- ^b	NA
60F	27.0	20.6 ± 1.0	- ^b	- ^b	1280	- ^b	NA
100F	45.0	9.6 ± 0.7	150	1140	1925	19.9	7.60
10C	5.5	45.9 ± 3.1	390	1830	695	38.7	4.69
20C	11.0	35.5 ± 6.4	310	1590	700	37.0	5.13
40C	22.0	25.3 ± 4.0	290	1670	- ^b	26.9	5.76
60C	33.0	15.8 ± 4.3	230	1430	3040	20.5	6.22
100C	55.0	8.7 ± 1.4	150	1080	1440 ^b	14.0	7.20
40F&C	40.0	10.5 ± 0.0*	125	1320	3005	18.3	10.56
60F&C	60.0	7.1 ± 1.2	135	1420	3565	11.4	10.52

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η σχέση τάσης παραμόρφωσης των κυλίνδρων από σκυρόδεμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ (λιγότερο από 18% του συνολικού όγκου των αδρανών) είναι παρόμοια με εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος. Ωστόσο, ακόμη και τόσο μικρά ποσοστά αντικατάστασης κατ' όγκο οδήγησαν σε μεγάλες μειώσεις της θλιπτικής αντοχής (μέχρι 40% με 11% συνολική αντικατάσταση αδρανών).
- Η αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ μειώνει επίσης την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ σε μέγιστη τάση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα εμφανές για μείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε καουτσούκ (> 27% του συνολικού όγκου των αδρανών). 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 με την καθολική αντικατάσταση τους είναι οριακή. Η συνδυασμένη αντικατάσταση χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών είναι η καλύτερη επιλογή για μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ και της δυναμικότητας της παραμορφωσιμότητας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται επαρκής εργασιμότητα.

Τα συμπεράσματα που αφορούν την περίσφιξη των δοκιμίων πρόκειται να παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 2.3.

Παράλληλα διερευνήθηκε πειραματικά από τους Raffoul et al., (2018) η θλιπτική συμπεριφορά σκυροδέματος που περιέχει αδρανή από καουτσούκ, τα οποία προέρχονται από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων, ως αντικατάσταση των φυσικών αδρανών, με σκοπό την αύξηση της ικανότητας θλιπτικής παραμόρφωσης και τελικό στόχο την χρήση σε εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις. Το πειραματικό πρόγραμμα χωρίστηκε σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος εξετάστηκαν 13 μίγματα με διάφορα ποσοστά αντικατάστασης των φυσικών αδρανών. Το δεύτερο μέρος της μελέτης εστίασε στη συμπεριφορά του καλύτερου μίγματος από την πρώτη μελέτη, αλλά περισφιγμένο με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών αποτελούμενων από 2, 3 ή 4 στρώσεις υφασμάτων αραμιδίου ή άνθρακα. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική θλιπτική φόρτιση. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι είναι εφικτή η δημιουργία σκυροδέματος υψηλής αντοχής (έως και 95 MPa) και πολύ υψηλής παραμορφωσιμότητας (έως και 6.4%), συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα από τη χρήση καουτσούκ και μανδύων ινοπλισμένων πολυμερών. Στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά μόνο του πρώτου μέρους και το δεύτερο μέρος θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.3.

Στο πρώτο μέρος λοιπόν του πειραματικού προγράμματος εξετάστηκε η θλιπτική συμπεριφορά απερίσφικτου σκυροδέματος που περιέχει αδρανή από καουτσούκ. Συνολικά παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν 52 κυλινδρικά δοκίμια (ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm), με βάση 13 διαφορετικά μίγματα (4 δοκίμια ανά μίγμα). Επιλέχθηκε η αντικατάσταση είτε των α) μόνο λεπτόκοκκων αδρανών σε ποσοστά 10, 20, 40, 60 ή 100% κατ' όγκο, β) μόνο χονδρόκοκκων σε ποσοστά 10, 20, 40, 60 ή 100% κατ' όγκο, ή γ) λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών σε ποσοστά 40% και 60% κατ' όγκο.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα από τα απερίσφικτα δοκίμια. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 είναι οι μέσοι όροι από τέσσερα δοκίμια.

Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα απερίσφικτων δοκιμίων. (Raffoul et al., 2018)

Δοκίμιο	Κατ' ογκο αντικατάσταση αδρανών με καουτσούκ (%)	Θλιπτική αντοχή, f_c (MPa)	Αξονική παραμόρφωση θράυσης, ε_{cu} (με)	Πλευρική παραμόρφωση κατά τη θράυση, ε_{cl} (με)	Μέτρο ελαστικότητας, E_c (GPa)
Συμβατικό σκυρόδεμα	-	61.7	2180	885	39.4
10FR	4.5	53.4	1900	890	38.8
20FR	9.0	43.2	1840	1000	35.6
40FR	18.0	32.0	-	1745	-
60FR	27.0	20.6	-	1280	-
100FR	45.0	9.6	1140	1925	19.9
10CR	5.5	45.9	1830	695	38.7
20CR	11.0	35.5	1590	700	37.0
40CR	22.0	25.3	1670	-	26.9
60CR	33.0	15.8	1430	3040	20.5
100CR	55.0	8.7	1080	1440	14.0
40FR40CR	40.0	10.5	1320	3005	18.3
60FR60CR	60.0	7.1	1420	3565	11.4

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και η ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης μειώνονται όσο η περιεκτικότητα σε καουτσούκ αυξάνεται, ανεξάρτητα από τον τύπο των αδρανών που αντικαθίστανται. Αντίθετα, η ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης αυξήθηκε σημαντικά, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ.
- Για σχετικά μικρό ποσοστό περιεκτικότητας λεπτόκοκκων αδρανών από καουτσούκ, η θλιπτική συμπεριφορά του απερίσφικτου σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ, δεν επηρεάστηκε σημαντικά. Συγκεκριμένα, για τα μίγματα 10FR και 20FR, η θλιπτική αντοχή μειώθηκε κατά 12% και 27% σε σχέση με το μίγμα συμβατικού σκυροδέματος, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, για υψηλότερα ποσοστά περιεκτικότητας σε καουτσούκ, η θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ επηρεάστηκε σημαντικά. Για το μίγμα 100FR, η θλιπτική αντοχή μειώθηκε κατά 84% ενώ η πλευρική παραμόρφωση αυξήθηκε κατά 118% σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.
- Στην περίπτωση αντικατάστασης των χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών με καουτσούκ, η θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ ήταν

παρόμοια με τη συμπεριφορά για την περίπτωση αντικατάστασης των λεπτόκοκκων αδρανών. Παρατηρήθηκε ότι όλα τα μίγματα παρουσίασαν μία μείωση στην ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης και μία αύξηση στην ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης (εξαιρουμένων των μιγμάτων 10CR και 20CR όπου μειώθηκε η πλευρική παραμόρφωση), με την αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ. Η επιρροή της προσθήκης κόκκων καουτσούκ στη συμπεριφορά τάσης- παραμόρφωσης του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ ήταν πιο εμφανής στα μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ.

2.3 Περίσφιξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά, ειδικά για σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ

Στο παρόν υπό κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες, αποτελέσματα και συμπεράσματα από κάποια άρθρα πειραματικών ερευνών. Πρόκειται για μια σύντομη αναφορά βασικών σημείων από διάφορες έρευνες προκειμένου να υπάρξει μετέπειτα σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην έρευνα των Gholampour et al., (2017) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης για την αξονική θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ υπό ενεργή περίσφιξη. Τέσσερα διαφορετικά μίγματα σκυροδέματος με αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από κόκκους καουτσούκ σε αναλογίες 0%, 6%, 12% και 18% παράχθηκαν. Τα αποτελέσματα του λόγου αντικατάστασης του καουτσούκ και της τάσης περίσφιξης επί της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος εξετάστηκαν μέσω των δοκιμών, τόσο σε απερίσφικτους όσο και σε περισφιγμένους κλειστούς κυλίνδρους σκυροδέματος. Η περίσφιξη εφαρμόστηκε από μία δυναμοκυψέλη «Hoek» σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων, συμπεριλαμβανομένων των 5, 7,5, 10, 15, 20 και 25 MPa.

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- 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 τάση περίσφιξης, μια αύξηση στην περιεκτικότητα του μίγματος σε 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 σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ όσο και του συμβατικού, αυξάνεται με την ταυτόχρονη αύξηση της τάσης περίσφιγξης.

Τα συμπεράσματα του άρθρου των Raffoul et al., (2018) σχετικά με το δεύτερο μέρος του προγράμματος που αφορούσε την περίσφιγξη του σκυροδέματος, παρουσιάζονται παρακάτω :

Στο δεύτερο μέρος, εξετάστηκε κατά πόσο η εξωτερική περίσφιγξη μπορεί να καθυστερήσει τη ρηγμάτωση και να περιορίσει την απομείωση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω της χρήσης αδρανών από καουτσούκ. Στοχεύοντας σε υψηλές τιμές αξονικής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ, επιλέχθηκε προς διερεύνηση το καλύτερο μίγμα της πρώτης σειράς δοκιμών. Ο λόγος της επιλογής ήταν η πολύ υψηλή ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης του συγκεκριμένου μίγματος, η οποία θα βοηθούσε στην καλύτερη ενεργοποίηση του εξωτερικού μανδύα περίσφιγξης. Η θλιπτική συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ εξετάστηκε πειραματικά μέσω δοκιμών μονοτονικής φόρτισης σε 12 κυλινδρικά δοκίμια. Οι κύλινδροι είχαν τις ίδιες διαστάσεις με τα δοκίμια του πρώτου μέρους (ύψος 200 mm και διάμετρο 100 mm) και περισφίχθηκαν με 2, 3 ή 4 στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές από ίνες αραμιδίου ή ινοπλισμένο πολυμερές από ίνες άνθρακα.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τα δοκίμια περισφιγμένα με ινοπλισμένο πολυμερές αραμιδίου και ινοπλισμένο πολυμερές άνθρακα και περιλαμβάνει το λόγο των αντοχών f_{cc}/f_c , που αντικατοπτρίζει την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος με αδρανή από καουτσούκ.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα περισφιγμένων δοκιμών. (Raffoul et al., 2018)

Δοκίμιο	Υλικό και αριθμός στρώσεων μανδύα ΙΟΠ	Θλιπτική ή αντοχή, f_c ή f_{cc} (MPa)	Αξονική παραμόρφωση θράυσης, ϵ_{cu} (με)	Πλευρική παραμόρφωση κατά τη θράυση, ϵ_{clm} (με)	Λόγος f_{cc}/f_c
60FR60CR	-	8.2	-	-	-
2LA-M	Αραμίδιο: 2	42.3	41910	16745	5.15
3LA-M	Αραμίδιο: 3	69.9	52408	15094	8.52
4LA-M	Αραμίδιο: 4	96.0	64307	16056	11.72
60FR60CR	-	6.8	-	-	-
2LC-M	Άνθρακας: 2	31.7	21873	6803	4.66
3LC-M	Άνθρακας: 3	48.8	25947	8279	7.18
4LC-M	Άνθρακας: 4	62.6	36574	8051	9.21

Κάποια από τα συμπεράσματα της έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η περίσφιγξη με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών οδήγησε στην άρση των δυσμενών επιπτώσεων του καουτσούκ στη συμπεριφορά του σκυροδέματος.
- Παρά την υψηλή περιεκτικότητα σε καουτσούκ και τη χαμηλή θλιπτική αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος, η περίσφιγξη με 4 στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς αραμιδίου ή άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με πολύ υψηλή ικανότητα θλιπτικής παραμόρφωσης με ποικίλες δυνατές εφαρμογές.

Τα συμπεράσματα του άρθρου των Youssf et al., (2017) σχετικά με το κομμάτι που περιλαμβάνει την περίσφιγξη του σκυροδέματος, παρουσιάζονται παρακάτω :

- Αυξάνοντας το πάχος της περίσφιγξης, αυξάνεται η αναλογία βελτίωσης της αντοχής και για το συμβατικό σκυρόδεμα αλλά και για το σκυρόδεμα με τρίμματα καουτσούκ.
- Αυξάνοντας το πάχος της περίσφιγξης, αυξάνεται και η πλαστιμότητα του σκυροδέματος. Η πλαστιμότητα του σκυροδέματος με τρίμματα καουτσούκ ήταν μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος.

Αναφορά στα συμπεράσματα του άρθρου των Raffoul et al., (2017) σχετικά με το κομμάτι που περιλαμβάνει την περίσφιγξη του σκυροδέματος, παρουσιάζονται παρακάτω :

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

σκυρόδεμα υπό έντονη περίσφιξη, οδηγώντας σε συνολική συστολή των κυλίνδρων με 3 AFRP στρώσεις.

Κεφάλαιο 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

3.1 Ονοματολογία δοκιμών

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρασκευάστηκαν συνολικά 136 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος (34 ανά κατηγορία) διαστάσεων 100mmx200mm, με συγκεκριμένα ποσοστά αντικατάστασης αδρανών με κόκκους καουτσούκ. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κατηγορίες μιγμάτων (Πίνακας 4) και πιο συγκεκριμένα με 0, 25%, 50% και 75% ποσοστιαία αντικατάσταση κατ' όγκο φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ. Παράλληλα, αναγκαίος κρίνεται και ο διαχωρισμός των δοκιμών σε υπό-ομάδες (Πίνακας 5) ανάλογα με τον τρόπο περισφιγξης τους αλλά και τον αριθμό στρώσεων στην κάθε περίπτωση. Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4: Ομάδες δοκιμών

ΟΜΑΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	
CM	R50
R25	R75

Πίνακας 5: Υπό ομάδες δοκιμών

ΥΠΟ ΟΜΑΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	
UNCONFINED	UC
1 LAYER CARBON CONFINED	LC
2 LAYER CARBON CONFINED	
1 LAYER GLASS CONFINED	LG
2 LAYER GLASS CONFINED	

Προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξεργασία, η ερμηνεία και η ανάγνωση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε συγκεκριμένη ονοματολογία για κάθε κύλινδρο, ανάλογα με την ομάδα και την υπό ομάδα στην οποία ανήκει όπως φαίνεται στον Πίνακα 6:

Πίνακας 6: Ονοματολογία δοκιμών πειραματικού προγράμματος

ΟΜΑΔΑ	ΑΡ. ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ	UNCONFINED	CONFINED			
			CARBON		GLASS	
			1 LAYER	2 LAYERS	1 LAYER	2 LAYERS
CM (control mix)	1	CM_UC_1	CM_1LC_1	CM_2LC_1	CM_1LG_1	CM_2LG_1
	2	CM_UC_2	CM_1LC_2	CM_2LC_2	CM_1LG_2	CM_2LG_2
	3	CM_UC_3	CM_1LC_3	CM_2LC_3	CM_1LG_3	CM_2LG_3
	4	CM_UC_4	CM_1LC_4	CM_2LC_4	CM_1LG_4	CM_2LG_4
	5	CM_UC_5	CM_1LC_5	CM_2LC_5	CM_1LG_5	CM_2LG_5
R25 (25% rubber replacement)	1	R25_UC_1	R25_1LC_1	R25_2LC_1	R25_1LG_1	R25_2LG_1
	2	R25_UC_2	R25_1LC_2	R25_2LC_2	R25_1LG_2	R25_2LG_2
	3	R25_UC_3	R25_1LC_3	R25_2LC_3	R25_1LG_3	R25_2LG_3
	4	R25_UC_4	R25_1LC_4	R25_2LC_4	R25_1LG_4	R25_2LG_4
	5	R25_UC_5	R25_1LC_5	R25_2LC_5	R25_1LG_5	R25_2LG_5
R50 (50% rubber replacement)	1	R50_UC_1	R50_1LC_1	R50_2LC_1	R50_1LG_1	R50_2LG_1
	2	R50_UC_2	R50_1LC_2	R50_2LC_2	R50_1LG_2	R50_2LG_2
	3	R50_UC_3	R50_1LC_3	R50_2LC_3	R50_1LG_3	R50_2LG_3
	4	R50_UC_4	R50_1LC_4	R50_2LC_4	R50_1LG_4	R50_2LG_4
	5	R50_UC_5	R50_1LC_5	R50_2LC_5	R50_1LG_5	R50_2LG_5
R75 (75% rubber replacement)	1	R75_UC_1	R75_1LC_1	R75_2LC_1	R75_1LG_1	R75_2LG_1
	2	R75_UC_2	R75_1LC_2	R75_2LC_2	R75_1LG_2	R75_2LG_2
	3	R75_UC_3	R75_1LC_3	R75_2LC_3	R75_1LG_3	R75_2LG_3
	4	R75_UC_4	R75_1LC_4	R75_2LC_4	R75_1LG_4	R75_2LG_4
	5	R75_UC_5	R75_1LC_5	R75_2LC_5	R75_1LG_5	R75_2LG_5

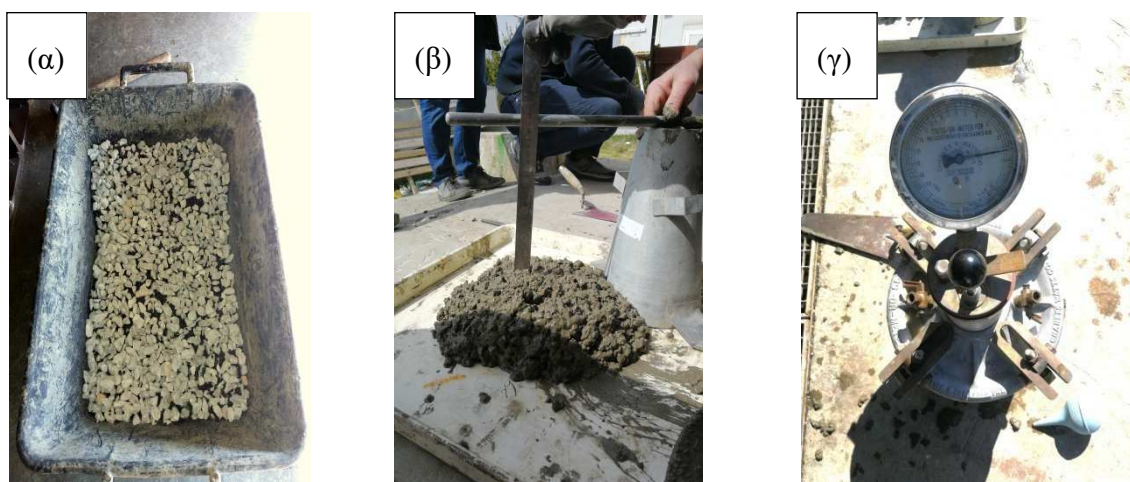
3.2 Σύνθεση μιγμάτων σκυροδέτησης

Αρχικά δημιουργήθηκαν δύο μίγματα «ελέγχου» των 6 λίτρων το καθένα, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της επιλεγμένης κοκκομετρίας όσον αφορά τη ποιότητα του σκυροδέματος βάση της αντοχής που θα πρόκυπτε κατά τη δοκιμή θλίψης. Το πρώτο μίγμα αποτελούταν αποκλειστικά από φυσικά αδρανή όπως το συμβατικό σκυρόδεμα και το δεύτερο είχε 100% αντικατάσταση με κόκκους καουτσούκ των φυσικών αδρανών των κόκκων 4-8mm και 2-4mm. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή των μιγμάτων.

Πίνακας 7: Δοσολογίες αδρανών για την κατασκευή μιγμάτων «ελέγχου».

Μείγμα 1		Μείγμα 2									
Δοκίμια με φυσικά αδρανή		Δοκίμια με 100% αντικατάσταση των φυσικών αδρανών									
Διάμετρος	Ποσότητα (kg)	Διάμετρος	Ποσότητα (kg)								
8-16mm	51.250	8-16mm	51.250								
4-8mm	14.670	4-8mm	4.400								
2-4mm	11.000	2-4mm	3.300								
1-2mm	13.420	1-2mm	13.420								
0.5-1mm	7.320	0.5-1mm	7.320								
Πούδρα	9.760	Πούδρα	9.760								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ποσότητα (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Νερό</td> <td>15.500</td> </tr> <tr> <td>Τσιμέντο</td> <td>33.550</td> </tr> <tr> <td>Ρευστοποιητής</td> <td>0.005</td> </tr> </tbody> </table>			Ποσότητα (kg)	Νερό	15.500	Τσιμέντο	33.550	Ρευστοποιητής	0.005
	Ποσότητα (kg)										
Νερό	15.500										
Τσιμέντο	33.550										
Ρευστοποιητής	0.005										

Αφού δημιουργήθηκαν τα μίγματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές «κάθισης» και δοκιμές «περιεκτικότητας σε αέρα» (Σχήμα 3.1). Έπειτα τα δοκίμια παρέμειναν σε συνθήκες ξηρασίας για 7 ημέρες ώστε την έβδομη ημέρα να πραγματοποιηθεί η δοκιμή θλίψης των δοκιμίων στην υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου προκειμένου να εξεταστούν οι αντοχές τους.



Σχήμα 3.1: (α) Μίγμα σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση κόκκων καουτσούκ (β) Δοκιμή κάθισης (γ) Δοκιμή περιεκτικότητας σε αέρα

Από τις δοκιμές θλίψης προέκυψαν οι αντοχές που αναγράφονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Θλιπτικές αντοχές δοκιμίων «ελέγχου»

Δοκίμιο	Θλιπτικές αντοχές δοκιμίων (MPa)	
	Δοκίμια με φυσικά αδρανή (MPa)	Δοκίμια με 100% αντικατάσταση των φυσικών αδρανών (MPa)
1	34.37	16.55
2	34.76	16.17
3	34.22	15.28
M.O	34.45	16

Από τις αντοχές που προέκυψαν παρατηρήσαμε ότι πρόκειται για μια κοκκομετρία που εξασφαλίζει τη παραγωγή σκυροδέματος μέσης θλιπτικής αντοχής άνω των 30 MPa. Εφόσον όλα τα δείγματα μας ήταν κοντά σε αντοχές προχωρήσαμε στην παρασκευή 5 (πέντε) μιγμάτων με τα εξής ποσοστά αντικατάστασης φυσικών αδρανών με κόκκων καουτσούκ στις κατηγορίες διαμέτρων 4-8mm και 2-4mm όπως φαίνεται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9: Μίγματα που παρασκευάστηκαν και ημερομηνίες παρασκευής και ξεκαλουπώματος δοκιμίων.

	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (%)	ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΞΕΚΑΛΟΥΠΩΜΑΤΟΣ
ΜΙΓΜΑΤΑ	0	CM	28/2/2019	5/3/2019
	100	R100	6/3/2019	12/3/2019
	75	R75	14/3/2019	19/3/2019
	50	R50	21/3/2019	26/3/2019
	25	R25	28/3/2019	2/4/2019

3.2.1 Πρώτο μίγμα σκυροδέτησης (συμβατικό σκυρόδεμα)

Το πρώτο μίγμα παρασκευάστηκε από φυσικά αδρανή χωρίς καμία αντικατάσταση με κόκκους από καουτσούκ χρησιμοποιώντας τη μπετονιέρα του εργαστηρίου για την ανάμειξη των υλικών και αποτελεί το Control Mix (CM). Στον Πίνακα 10 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή του:

Πίνακας 10: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμών CM

CONTROL MIX (CM)	
Διάμετρος	Ποσότητα (kg)
8-16mm	51.250
4-8mm	14.640
2-4mm	10.980
1-2mm	13.420
0.5-1mm	7.320
Πούδρα	9.760
	Ποσότητα (kg)
Νερό	15.100
Τσιμέντο	33.550
Ρευστοποιητής	0.006

Έπειτα από τη μίξη, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές «κάθισης» (Slump Test) και περιεκτικότητας ποσοστού αέρα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμών CM

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Control Mix (CM)	19	1.4

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.2.2 Δεύτερο μίγμα σκυροδέτησης (100%)

Το δεύτερο μίγμα παρασκευάστηκε με πλήρη αντικατάσταση με κόκκους από καουτσούκ χρησιμοποιώντας τη μπετονιέρα του εργαστηρίου για την ανάμειξη των υλικών και αποτελεί το Rubber100 Mix (R100). Στον Πίνακα 12 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή του.

Πίνακας 12: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμών R100

RUBBER100 MIX (R100)		
Διάμετρος	Ποσότητα φυσικών αδρανών (kg)	Ποσότητα αδρανών από rubber (kg)
8-16mm	51.250	-
4-8mm	-	4.392
2-4mm	-	3.294
1-2mm	13.420	-
0.5-1mm	7.320	-
Πούδρα	9.760	-
	Ποσότητα (kg)	
Νερό	15.100	
Τσιμέντο	33.550	
Ρευστοποιητής	0.006	

Έπειτα από τη μίξη, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές «κάθισης» και περιεκτικότητας ποσοστού αέρα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμών R100

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Rubber100 Mix (R100)	20.5	4.5

Για 6 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.2.3 Τρίτο μίγμα σκυροδέτησης (75%)

Το τρίτο μίγμα παρασκευάστηκε με 75% αντικατάσταση με κόκκους από καουτσούκ χρησιμοποιώντας τη μπετονιέρα του εργαστηρίου για την ανάμειξη των υλικών και αποτελεί το Rubber75 Mix (R75). Στον Πίνακα 14 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή του.

Πίνακας 14: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμών R75

RUBBER75 MIX (R75)		
Διάμετρος	Ποσότητα φυσικών αδρανών (kg)	Ποσότητα αδρανών από rubber (kg)
8-16mm	51.250	-
4-8mm	3.660	3.294
2-4mm	2.745	2.470,5
1-2mm	13.420	-
0.5-1mm	7.320	-
Πούδρα	9.760	-
	Ποσότητα (kg)	
Νερό	15.100	
Τσιμέντο	33.550	
Ρευστοποιητής	0.006	

Έπειτα από τη μίξη, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές «κάθισης» και περιεκτικότητας ποσοστού αέρα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμών R75

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Rubber75 Mix (R75)	20.5	1.7

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.2.4 Τέταρτο μίγμα σκυροδέτησης (50%)

Το τέταρτο μίγμα παρασκευάστηκε με 50% αντικατάσταση με κόκκους από καουτσούκ χρησιμοποιώντας τη μπετονιέρα του εργαστηρίου για την ανάμειξη των υλικών και αποτελεί το Rubber50 Mix (R50). Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή του.

Πίνακας 16: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμών R50

RUBBER50 MIX (R50)		
Διάμετρος	Ποσότητα φυσικών αδρανών (kg)	Ποσότητα αδρανών από rubber (kg)
8-16mm	51.250	-
4-8mm	7.320	2.196
2-4mm	5.490	1.647
1-2mm	13.420	-
0.5-1mm	7.320	-
Πούδρα	9.760	-
	Ποσότητα (kg)	
Νερό	15.100	
Τσιμέντο	33.550	
Ρευστοποιητής	0.006	

Έπειτα από τη μίξη, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές «κάθισης» και περιεκτικότητας ποσοστού αέρα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμών R50

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Rubber50 Mix (R50)	22.5	1.4

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.2.5 Πέμπτο μίγμα σκυροδέτησης (25%)

Το πέμπτο μίγμα παρασκευάστηκε με 25% αντικατάσταση με κόκκους από καουτσούκ χρησιμοποιώντας τη μπετονιέρα του εργαστηρίου για την ανάμειξη των υλικών και αποτελεί το Rubber25 Mix (R25). Στον Πίνακα 18 παρουσιάζεται αναλυτικά η δοσολογία των αδρανών για την κατασκευή του.

Πίνακας 18: Δοσολογία αδρανών για την κατασκευή ομάδας δοκιμών R25

RUBBER25 MIX (R25)		
Διάμετρος	Ποσότητα φυσικών αδρανών (kg)	Ποσότητα αδρανών από rubber (kg)
8-16mm	51.250	-
4-8mm	11.053	1.098
2-4mm	8.289	0.823
1-2mm	13.420	-
0.5-1mm	7.320	-
Πούδρα	9.760	-
	Ποσότητα (kg)	
Νερό	15.100	
Τσιμέντο	33.550	
Ρευστοποιητής	0.006	

Έπειτα από τη μίξη, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές «κάθισης» και περιεκτικότητας ποσοστού αέρα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 19.

Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμών «κάθισης» και αέρα για ομάδα δοκιμών R25

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Rubber25 Mix (R25)	20.5	1.6

Για 5 ημέρες τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.3 Προετοιμασία μιγμάτων

3.3.1 Κοσκίνισμα αδρανών

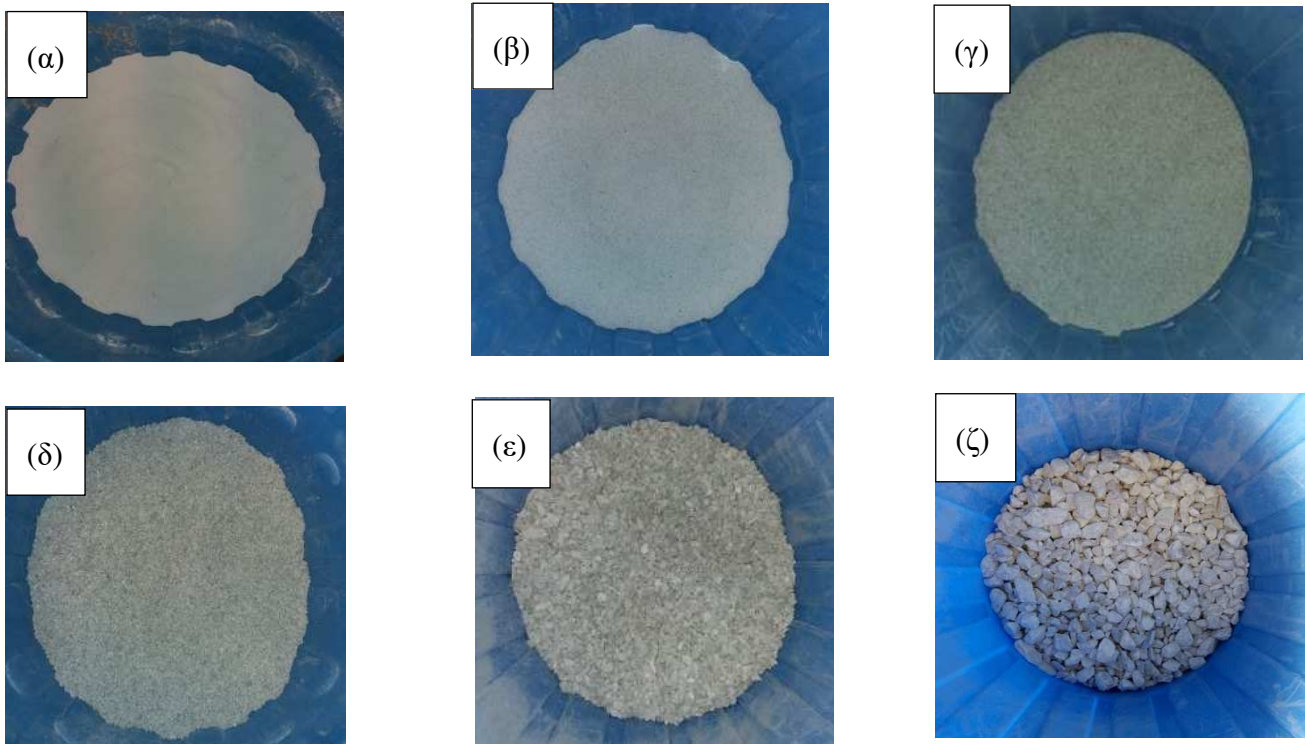
Σε πρώτη φάση και βάση της κοκκομετρίας που είχε επιλεχτεί για την σκυροδέτηση των μιγμάτων, κοσκινίστηκαν σημαντικές ποσότητες τόσο των φυσικών αδρανών όσο και των αδρανών από κόκκους καουτσούκ με τη χρήση του κόσκινου που ανήκει στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Συσκευή κοσκινίσματος.

Πρόκειται για ένα υδραυλικό μηχάνημα, το οποίο σε κάθε επίπεδο έχει και ένα διαφορετικό κόσκινο, σε διάταξη τέτοια ώστε να επιτρέπει στα λεπτόκοκκα αδρανή να διαπερνάν τα διάφορα αυτά επίπεδα και να παρεμποδίζει τα πιο χονδρόκοκκα όσο αυτό κινείται παλινδρομικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Έτσι λοιπόν επιτυγχάνεται ο επιθυμητός κοκκομετρικός διαχωρισμός. Οι διάμετροι που συλλέχτηκαν όσο αφορά τα φυσικά αδρανή ήταν οι εξής (Σχήμα 3.3):

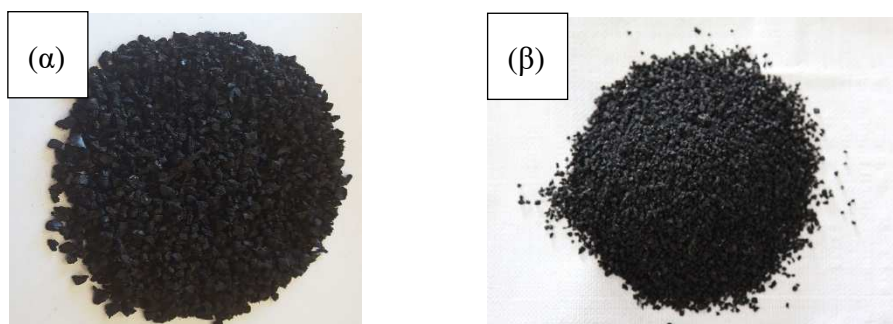
- 8-16mm
- 4-8mm
- 2-4mm
- 1-2mm
- 0.5-1mm
- Πούδρα



Σχήμα 3.3: Κοσκινισμένα φυσικά αδρανή (α) Πούδρα (β) 0.5-1 mm (γ) 1-2 mm (δ) 2-4 mm (ε) 4-8 mm (ζ) 8-16 mm

Οι διάμετροι που συλλέχτηκαν όσο αφορά τα αδρανή από κόκκους καουτσούκ ήταν οι εξής (Σχήμα 3.4):

- 4-8mm
- 2-4mm



Σχήμα 3.4: Κοσκινισμένοι κόκκοι καουτσούκ (α) 4-8 mm (β) 2-4 mm

3.3.2 Ανάμιξη - Σκυροδέτηση

Η ανάμιξη των υλικών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Σκυροδέματος του τμήματος με τη χρήση της μπετονιέρας που διαθέτει (Σχήμα 3.5). Μετά από κάποια λεπτά ανάμιξης που απαιτούνται ώστε να δημιουργηθεί ένα ομογενές μίγμα σκυροδέματος έγινε η δοκιμή «κάθισης» και η δοκιμή «συμπιεσμένου αέρα» και στη συνέχεια το νωπό σκυρόδεμα τοποθετήθηκε στα κυλινδρικά πλαστικά καλούπια διαστάσεων 100x200mm και δονήθηκε με ειδική χαλύβδινη ράβδο σύμφωνα με τα πρότυπα προκειμένου να καλυφθούν όλα τα κενά (Σχήμα 3.6). Αφού τοποθετήθηκε όλο το μίγμα στα καλούπια, εξομαλύνθηκαν και επιπεδώθηκαν οι άνω επιφάνειες των κυλίνδρων με την χρήση σπάτουλας.



Σχήμα 3.5: Μπετονιέρα εργαστηρίου



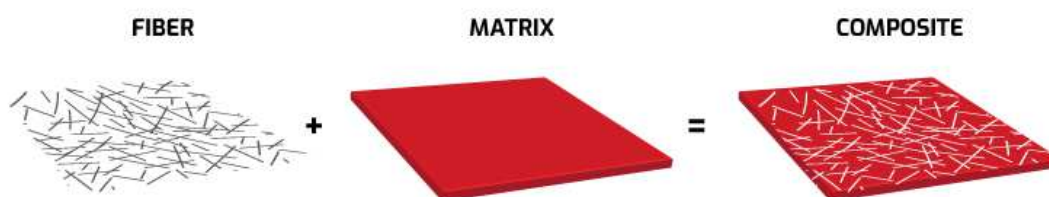
Σχήμα 3.6: Νωπό σκυρόδεμα σε καλούπια

Τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας σκεπασμένα με λινά τα οποία βρεχόντουσαν καθημερινά για πέντε ημέρες και στην συνέχεια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια τους και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό.

3.4 Περίσφιγξη με σύνθετα υλικά

3.4.1 Ιδιότητες υλικών

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. Σύνθετα υλικά είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Συστατικά σύνθετων υλικών. (Κατσιάνας, 2019)

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. Όπως όλα τα υλικά έτσι και αυτό έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατά τη χρήση του. Πιο συγκεκριμένα ως πλεονεκτήματα ορίζονται τα εξής:

- 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

Ως μειονεκτήματα θα μπορούσαν να αναφερθούν τα εξής:

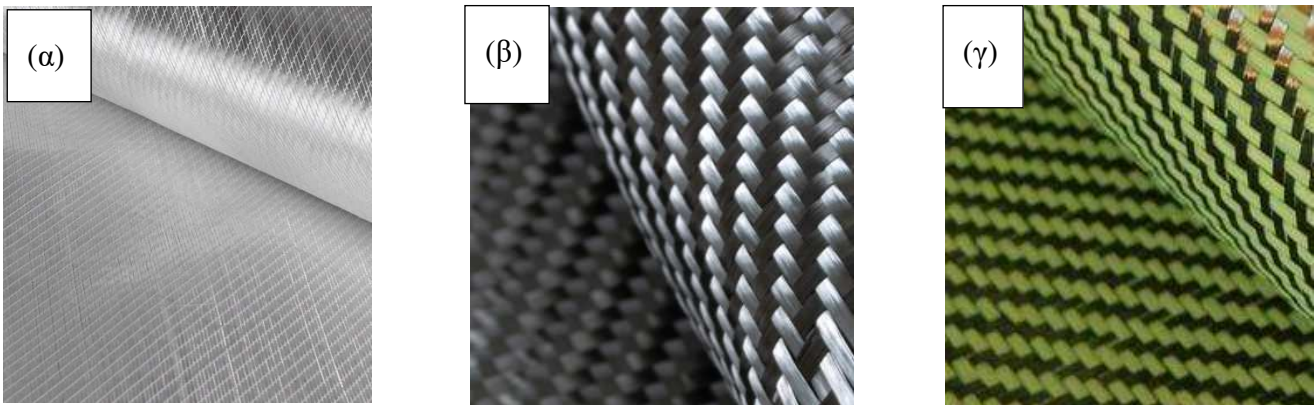
- Υψηλό κόστος παρασκευής
- Ο μηχανικός χαρακτηρισμός τους είναι πολύ πιο δύσκολος συγκριτικά με ένα ομοιογενές ισότροπο υλικό
- Η επισκευή τους είναι περίπλοκη/αδύνατη
- Δεν έχουν υψηλό συνδυασμό αντοχής και δυσθραυστότητας

Κατσιάνας, (2019)

3.4.2 Ίνες σύνθετων υλικών

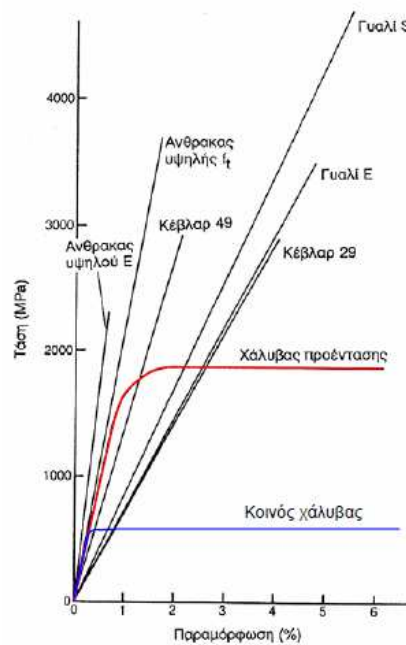
Οι ίνες στα ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηρίζονται για την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και τη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά τους κατά την αστοχία. Επομένως είναι αυτές που κάνουν τα σύνθετα υλικά ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα. Οι μορφές ινών που συναντάμε είναι οι εξής (Σχήμα 3.8):

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



Σχήμα 3.8: Ίνες ινοπλισμένων πολυμερών. (α) Ίνες γυαλιού (β) Ίνες άνθρακα (γ) Ίνες κέβλαρ

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η συμπεριφορά διαφόρων τύπων ινών μέσω τυπικών καμπυλών εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης. Παρατηρείται λοιπόν αυξημένη ικανότητα όλων των ΙΟΠ σε αντοχή και σχετική ικανότητα παραμόρφωσης έναντι του κοινού χάλυβα ή ακόμα έναντι του χάλυβα προέντασης. Ανάλογα βέβαια το υλικό μεταβάλλεται η δυνατότητα είτε μέγιστης αντοχής είτε μέγιστης παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.9: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα. (Τριανταφύλλου, 2004)

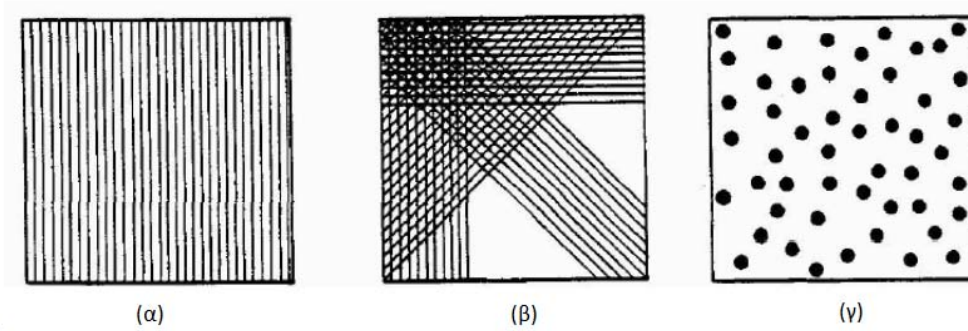
Οι ιδιότητες των κυριότερων υλικών από τα οποία παράγονται ίνες παρουσιάζονται στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20: Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Τριανταφύλλου, 2004)

	ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPA)	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΟΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (%)
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
	Υπέρ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
	Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
	Υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0.2-0.4
ΓΥΑΛΙ	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
ΑΡΑΜΙΔΙΟ	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

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες διαφόρων τύπων όπως είδαμε παραπάνω και διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Σχήμα 3.10).

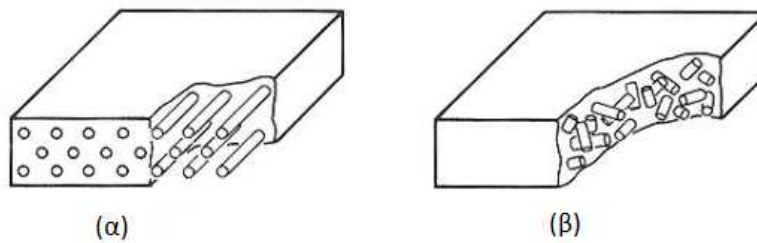
- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.



Σχήμα 3.10: (α) Ινώδη σύνθετα υλικά, (β) Σύνθετα υλικά στρωμάτων, (γ) Σύνθετα υλικά σωματιδίων

Παράλληλα, τα σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν και ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών (Σχήμα 3.11).

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



Σχήμα 3.11: (α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό, (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό

3.4.3 Μήτρες σύνθετων υλικών

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Ο ρόλος της προσδιορίζεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Συνδέει τις ίνες μεταξύ τους.
- Προστατεύει τις ίνες από τυχόν φθορές.
- Εξασφαλίζει τη μεταφορά δυνάμεων στις ίνες.
- Καθορίζει αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.
- Ενισχύει την αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, τη διατμητική και τη θλιπτική αντοχή τους.
- Ανακόπτει τη διάδοση ρωγμών που ξεκινούν από τη θραύση ινών.
- Εξασφαλίζει την ηλεκτρική μόνωση του υλικού της ίνας.

(Τριανταφύλλου, 2004)

Παράλληλα, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη και κάποιες άλλες σημαντικές ιδιότητες της μήτρας όπως η ολκιμότητα, η ανθεκτικότητα, η σχετική ευκαμψία, το μεγαλύτερο σημείο τήξης από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Οι μήτρες των συνθετικών υλικών μπορεί να είναι οργανικές (ρητίνες) ή ανόργανες. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι οργανικές ενώσεις ως συνδετικά υλικά με πιο διαδεδομένες και πιο σημαντικές τις εξής κατηγορίες:

- Εποξικές ρητίνες
- Πολυεστερικές ρητίνες
- Βινυλεστερικές ρητίνες

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατά τη διαδικασία περίσφιγξης χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη, η οποία έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

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

Από την άλλη ως μειονέκτημα θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε το υψηλό κόστος τους.

3.4.4 Μεθοδολογία περίσφιγξης

Αρχικά για τον σκοπό αυτής της διπλωματικής επιλέχθηκαν να περισφιχθούν 20 δοκίμια για κάθε ομάδα (CM, R25, R50, R75). Πιο συγκεκριμένα από κάθε ομάδα δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν 10 δοκίμια για περίσφιγξη με ίνες άνθρακα (CFRP), από τα οποία τα 5 περισφίχθηκαν με μία στρώση και τα άλλα 5 με δυο, καθώς και 10 δοκίμια για περίσφιγξη με ίνες γυαλιού (GFRP), όμοια με αυτά στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ίνες από άνθρακα. Στον Πίνακα 21 παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος περίσφιγξης κάθε δοκιμίου ανά πεντάδες:

Πίνακας 21: Τρόπος περίσφιγξης κάθε δοκιμίου.

Δοκίμιο	Υλικό περίσφιγξης	Αρ. Στρώσεων Περίσφιγξης	Ονομαστικό πάχος 1 στρώσης (mm)	Συνολικό πάχος μανδύα περίσφιγξης	Μέτρο Ελαστικότητας των ινών (Gpa)
CM_UC	-	-	-	-	-
CM_1LC	CARBON	1	0.129	0.129	225
CM_2LC	CARBON	2	0.129	0.258	225
CM_1LG	GLASS	1	0.363	0.363	71.2
CM_2LG	GLASS	2	0.363	0.726	71.2
R25_UC	-	-	-	-	-
R25_1LC	CARBON	1	0.129	0.129	225
R25_2LC	CARBON	2	0.129	0.258	225
R25_1LG	GLASS	1	0.363	0.363	71.2
R25_2LG	GLASS	2	0.363	0.726	71.2
R50_UC	-	-	-	-	-
R50_1LC	CARBON	1	0.129	0.129	225
R50_2LC	CARBON	2	0.129	0.258	225
R50_1LG	GLASS	1	0.363	0.363	71.2
R50_2LG	GLASS	2	0.363	0.726	71.2
R75_UC	-	-	-	-	-
R75_1LC	CARBON	1	0.129	0.129	225
R75_2LC	CARBON	2	0.129	0.258	225
R75_1LG	GLASS	1	0.363	0.363	71.2
R75_2LG	GLASS	2	0.363	0.726	71.2

Τα δεδομένα του Πίνακα 21 προκύπτουν βάση του τύπου των υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά τα οποία είναι όλα προϊόντα της SIKA :

- Ποιότητα ινών άνθρακα: SikaWrap®-230C
- Ποιότητα ινών γυαλιού: SikaWrap®-930G

- Ποιότητα εποξειδικής ρητίνης: Sikadur®-300

Οι βασικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 22.

Πίνακας 22: Βασικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ			
Ποιότητα ινών		SikaWrap®-230C	SikaWrap®-930G
Όνομαστικό πάχος διαστρωμάτωσης (mm)		0.129	0.363
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέσο	225	71.2
	Χαρακτηριστικό	220	67.1
Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέση	3500	2053
	Χαρακτηριστική	3200	1944
Παραμόρφωση θραύσης ινών		1.70%	2.80%

Βάση κανονισμών, κάθε περίσφιγξη πρέπει να έχει και το κατάλληλο μήκος επικάλυψης ίσο με το 1/3 της περιμέτρου του κυλίνδρου προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Πιο αναλυτικά τα υφάσματα χρειάστηκαν να κοπούν στα εξής μήκη:

- Μία στρώση υφάσματος: $2\pi r + \text{overlap} = 31.42 + 10.47 = \mathbf{42\text{cm}}$
- Δύο στρώσεις υφάσματος: $4\pi r + \text{overlap} = 62.84 + 10.47 = \mathbf{74\text{cm}}$

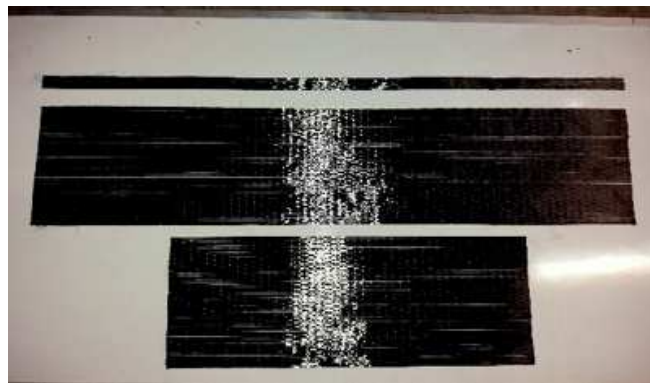
3.4.5 Διαδικασία περίσφιγξης

Αρχικά αφότου τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από την δεξαμενή με το νερό πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των δοκιμίων από τα άλατα και έπειτα η πλευρική επιφάνεια των δοκιμίων τραχύνθηκε ελαφρώς προκειμένου να υπάρχει καλύτερη συνεργασία σκυροδέματος – σύνθετων υλικών. Αφού δημιουργήθηκε η μήτρα από την ανάμιξη της εποξειδικής ρητίνης Sikadur®-300 (Σχήμα 3.12) με αναλογία 1:2.9, πραγματοποιήθηκε επάλειψη με τη χρήση ειδικού ρολού τόσο περιμετρικά των δοκιμίων όσο και στα κομμάτια υφάσματος που είχαν κοπεί για την περίσφιγξη αυτών τα οποία είχαν διαστάσεις 19x42 (cm²) για μονής στρώσης περίσφιγξη και 19x74 (cm²) για διπλής στρώσης περίσφιγξη (Σχήμα 3.13). Το ύφασμα στη συνέχεια επικολλήθηκε στον κύλινδρο με ιδιαίτερη προσοχή, προκειμένου να αποφευχθεί η ύπαρξη αέρα και σκόνης στη διεπιφάνεια του κυλίνδρου και του υφάσματος και έπειτα, με τη χρήση ενός άλλου ρολού, πιο σκληρό από τον προηγούμενο απομακρύνθηκαν τυχόν εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (Σχήμα 3.14). Τέλος προκειμένου να

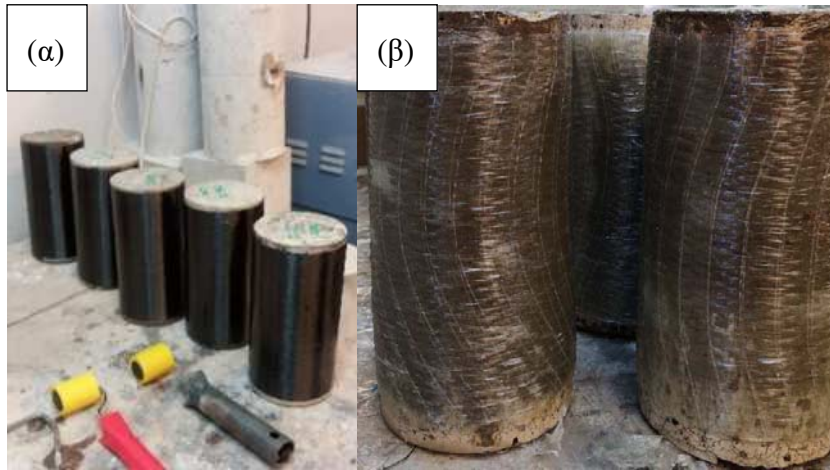
αποφευχθεί η αστοχία του δοκιμίου κατά τη δοκιμή θλίψης στα άνω και κάτω άκρα όπου οι πιέσεις είναι πιο έντονες και να επιτευχθεί αστοχία εντός του πυρήνα του δοκιμίου, ενισχύθηκαν επιπλέον τα άκρα του με δυο πρόσθετες λωρίδες σύνθετου υλικού πάχους δυο εκατοστών η κάθε μια (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.12: Εποξειδική ρητίνη Sikadur®-300



Σχήμα 3.13: Υφάσματα άνθρακα διπλής και μονής στρώσης περισφιγξης



Σχήμα 3.14: Ενίσχυση δοκιμίων (α) με ίνες άνθρακα, (β) με ίνες γυαλιού



Σχήμα 3.15: Τοποθέτηση πρόσθετων λωρίδων πάχους 2 cm στα άνω και κάτω άκρα

3.5 Πειραματική διάταξη

Έπειτα από την σκυροδέτηση και την περισφιγξη των δοκιμίων με ίνες από άνθρακα και ίνες από γυαλί μίας και δύο στρώσεων προκειμένου να γίνουν οι θλιπτικές δοκιμές ήταν απαραίτητη η επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης των δοκιμίων αλλά και η τοποθέτηση αισθητήρων.

3.5.1 Επιπέδωση επιφανειών φόρτισης

Προκειμένου κατά τη διάρκεια της φόρτισης να έχουμε όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε θλιπτική συμπεριφορά, είναι αναγκαίο οι επιφάνειες φόρτισης είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετες στην επιβολή του φορτίου. Κατά τη παρασκευή των δοκιμίων ήταν σχεδόν

αδύνατο να επιτευχθεί επιπεδότητα των επιφανειών φόρτισης, δηλαδή διατήρηση της καθετότητας μεταξύ της βάσης και του εγκάρσιου άξονα των δοκιμίων. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε να γίνει επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης ή αλλιώς capping με χρήση θειώδους κονιάματος. Πιο συγκεκριμένα το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Gilson Gray Iron 9000 Capping Compound (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16: Θειώδεις κονιάμα Gilson Gray Iron 9000 Capping Compound

Προκειμένου όμως να χρησιμοποιηθεί αυτό το υλικό και να επιτευχθεί η ομοιόμορφη κατανομή φορτίου κατά τη δοκιμή φόρτισης είναι απαραίτητη η τήξη του χωρίς βέβαια να χάνει τις ιδιότητες του. Η διάταξη του όλου συστήματος λοιπόν, προϋποθέτει μια βάση για την επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης (Σχήμα 3.17), τη χρήση ενός ηλεκτρικού ματιού, μια ανοξείδωτη καταρόλα στην οποία ρευστοποιείται το κονιάμα και μια ανοξείδωτη κουτάλα με την οποία μεταφέρεται το κονιάμα στην βάση αυτή.



Σχήμα 3.17: Βάση για την επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης

Αφού τοποθετηθεί το ρευστοποιημένο κονίαμα στην βάση για την επιπέδωση των επιφανειών φόρτισης προστίθεται άμεσα στη διάταξη το δοκίμιο με αποτέλεσμα εντός ολίγων λεπτών να πήξει εφαρμοσμένο στην βάση του δοκιμίου.

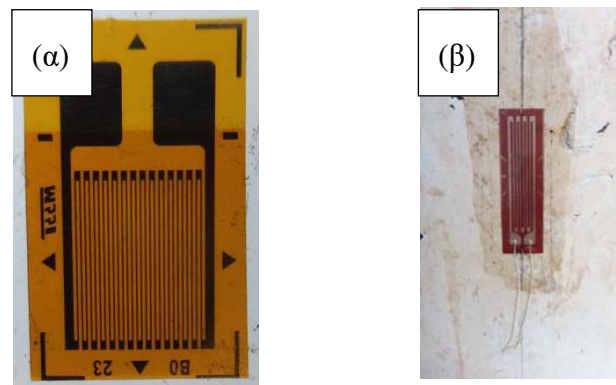
3.5.2 Τοποθέτηση αισθητήρων

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 ηλεκτρικών μηχανομετρών «strain gauges» (Σχήμα 3.18). Στον Πίνακα 23 αναφέρεται αναλυτικά ο αριθμός των strain gauges τοποθετήθηκαν σε κάθε κύλινδρο.

Πίνακας 23: Αριθμός strain gauge που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο

Δοκίμιο	Αριθμός εγκάρσιων SG	Αριθμός διαμήκων SG	Δοκίμιο	Αριθμός εγκάρσιων SG	Αριθμός διαμήκων SG
CM_UC_1	-	1	R50_UC_1	-	1
CM_UC_2	-	1	R50_UC_2	-	1
CM_UC_3	-	2	R50_UC_3	-	2
CM_UC_4	-	-	R50_UC_4	-	-
CM_UC_5	-	-	R50_UC_5	-	-
CM_1LC_1	1	1	R50_1LC_1	1	1
CM_1LC_2	1	1	R50_1LC_2	1	1
CM_1LC_3	1	2	R50_1LC_3	1	2
CM_1LC_4	-	-	R50_1LC_4	-	-
CM_1LC_5	-	-	R50_1LC_5	-	-
CM_2LC_1	2	2	R50_2LC_1	2	2
CM_2LC_2	2	2	R50_2LC_2	2	2
CM_2LC_3	2	2	R50_2LC_3	2	2
CM_2LC_4	-	-	R50_2LC_4	-	2
CM_2LC_5	-	-	R50_2LC_5	-	-
CM_1LG_1	2	2	R50_1LG_1	2	2
CM_1LG_2	-	-	R50_1LG_2	-	-
CM_1LG_3	-	-	R50_1LG_3	-	-
CM_1LG_4	-	2	R50_1LG_4	-	-
CM_1LG_5	-	-	R50_1LG_5	-	-
CM_2LG_1	2	2	R50_2LG_1	2	2
CM_2LG_2	-	-	R50_2LG_2	-	-
CM_2LG_3	-	-	R50_2LG_3	-	-
CM_2LG_4	-	2	R50_2LG_4	-	2
CM_2LG_5	-	-	R50_2LG_5	2	-
R25_UC_1	-	1	R75_UC_1	-	1
R25_UC_2	-	1	R75_UC_2	-	1

Δοκίμιο	Αριθμός εγκάρσιων SG	Αριθμός διαμήκων SG	Δοκίμιο	Αριθμός εγκάρσιων SG	Αριθμός διαμήκων SG
R25_UC_3	-	2	R75_UC_3	-	2
R25_UC_4	-	-	R75_UC_4	-	-
R25_UC_5	-	-	R75_UC_5	-	-
R25_1LC_1	1	1	R75_1LC_1	1	1
R25_1LC_2	1	1	R75_1LC_2	1	1
R25_1LC_3	1	2	R75_1LC_3	1	2
R25_1LC_4	-	-	R75_1LC_4	-	-
R25_1LC_5	-	-	R75_1LC_5	-	-
R25_2LC_1	2	2	R75_2LC_1	2	2
R25_2LC_2	2	2	R75_2LC_2	2	2
R25_2LC_3	2	2	R75_2LC_3	2	2
R25_2LC_4	-	-	R75_2LC_4	-	2
R25_2LC_5	-	-	R75_2LC_5	-	-
R25_1LG_1	2	2	R75_1LG_1	2	2
R25_1LG_2	-	-	R75_1LG_2	-	-
R25_1LG_3	-	-	R75_1LG_3	-	-
R25_1LG_4	-	-	R75_1LG_4	-	-
R25_1LG_5	-	-	R75_1LG_5	-	-
R25_2LG_1	2	2	R75_2LG_1	2	2
R25_2LG_2	-	-	R75_2LG_2	-	-
R25_2LG_3	-	-	R75_2LG_3	-	-
R25_2LG_4	-	-	R75_2LG_4	-	-
R25_2LG_5	-	-	R75_2LG_5	-	-



Σχήμα 3.18: (α) Τυπική μορφή αισθητήρα strain gauge (β) Τοποθετημένος αισθητήρας σε απερίσφικτο δοκίμιο.

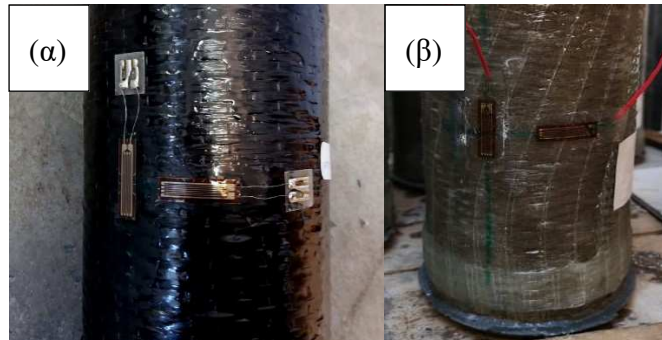
Αρχικά, αφού καθαρίστηκε η επιφάνεια του κυλίνδρου από τυχόν σκόνες και σωματίδια, σημειώθηκαν στην πλευρική επιφάνεια δυο ευθείες παράλληλες μεταξύ τους και συμμετρικές ως

προς το κέντρο του κυλίνδρου για να τοποθετηθούν συμμετρικά τα strain gauges. Αναγκαία ήταν βέβαια η τοποθέτηση τους ακριβώς στο κέντρο της ευθείας οπότε κάθετα στις δυο ευθείες σημειώθηκαν άλλες δυο, οι οποίες στην περίπτωση τοποθέτησης μόνο διαμήκων strain gauge χρησιμοποιηθήκαν απλά ως κεντράρισμα της θέσης τοποθέτησης τους ενώ στην περίπτωση τοποθέτησης και εγκάρσιων strain gauges χρησιμοποιήθηκαν και ως θέσεις τοποθέτησης των εγκάρσιων strain gauges (Σχήμα 3.19). Προκειμένου όμως να τοποθετηθούν τα strain gauges έπρεπε να δημιουργηθεί ένα λείο και καθαρό υπόστρωμα το οποίο επετεύχθη με τη χρήση κόλλας δυο συστατικών και έπειτα χρησιμοποιώντας γάζες βρεγμένες αρχικά με ένα όξινο ρευστό και στην συνέχεια με ένα βασικό ρευστό.



Σχήμα 3.19: Μαρκάρισμα κάθετων ευθειών προκειμένου να τοποθετηθεί το strain gauge στη μέση του δοκιμίου

Αφού τοποθετήθηκαν τα strain gauge στο δοκίμιο συνδέθηκαν με πόλους οι οποίοι στη συνέχεια θα συνδέονταν με καλώδια και θα μετέφεραν τις ενδείξεις των παραμορφώσεων στην κάρτα καταγραφής δεδομένων του υπολογιστή (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20: Εγκάρσιο και διαμήκες strain gauge με πόλους σε ενισχυμένο δοκίμιο (α) με ίνες άνθρακα, (β) με ίνες γυαλιού

3.5.3 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν στην υδραυλική πρέσα που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνολογίας & Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας σε διάστημα δέκα μηνών. Στον Πίνακα 24 παρουσιάζεται η ηλικία κάθε δοκιμίου σε ημέρες από την μέρα παραγωγής τους στην ημέρα περίσφιγξης τους αλλά και στην ημέρα θλιπτικής δοκιμής τους. Θα έπρεπε να σημειωθεί ότι τα πειράματα διεξήχθησαν σε δοκίμια ηλικίας τουλάχιστον 66 ημερών. Πέραν αυτής της ηλικίας το σκυρόδεμα είναι γνωστό ότι δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική αύξηση αντοχής (Τριανταφύλλου 2013).

Πίνακας 24: Ηλικίες δοκιμίων κατά την ενίσχυση και κατά την δοκιμή θλίψης

Δοκίμιο	Ηλικία κατά την ενίσχυση (ημέρες)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (ημέρες)	Δοκίμιο	Ηλικία κατά την ενίσχυση (ημέρες)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (ημέρες)
CM_UC_1	-	97	R50_UC_1	-	73
CM_UC_2	-	97	R50_UC_2	-	73
CM_UC_3	-	97	R50_UC_3	-	73
CM_UC_4	-	294	R50_UC_4	-	271
CM_UC_5	-	294	R50_UC_5	-	271
CM_1LC_1	75	98	R50_1LC_1	55	74
CM_1LC_2	75	98	R50_1LC_2	55	74
CM_1LC_3	75	98	R50_1LC_3	55	74
CM_1LC_4	75	287	R50_1LC_4	55	263
CM_1LC_5	75	291	R50_1LC_5	55	267
CM_2LC_1	77	115	R50_2LC_1	57	75

Δοκίμιο	Ηλικία κατά την ενίσχυση (ημέρες)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (ημέρες)	Δοκίμιο	Ηλικία κατά την ενίσχυση (ημέρες)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (ημέρες)
CM_2LC_2	77	115	R50_2LC_2	57	91
CM_2LC_3	77	115	R50_2LC_3	57	91
CM_2LC_4	77	287	R50_2LC_4	57	263
CM_2LC_5	77	291	R50_2LC_5	57	267
CM_1LG_1	159	271	R50_1LG_1	135	247
CM_1LG_2	159	280	R50_1LG_2	135	256
CM_1LG_3	159	280	R50_1LG_3	135	256
CM_1LG_4	159	286	R50_1LG_4	135	262
CM_1LG_5	159	286	R50_1LG_5	135	262
CM_2LG_1	160	271	R50_2LG_1	136	247
CM_2LG_2	160	280	R50_2LG_2	136	256
CM_2LG_3	160	280	R50_2LG_3	136	256
CM_2LG_4	160	286	R50_2LG_4	136	262
CM_2LG_5	160	286	R50_2LG_5	136	262
R25_UC_1	-	66	R75_UC_1	-	80
R25_UC_2	-	66	R75_UC_2	-	80
R25_UC_3	-	66	R75_UC_3	-	80
R25_UC_4	-	264	R75_UC_4	-	278
R25_UC_5	-	264	R75_UC_5	-	278
R25_1LC_1	48	67	R75_1LC_1	62	81
R25_1LC_2	48	67	R75_1LC_2	62	81
R25_1LC_3	48	67	R75_1LC_3	62	81
R25_1LC_4	48	256	R75_1LC_4	62	270
R25_1LC_5	48	260	R75_1LC_5	62	274
R25_2LC_1	50	84	R75_2LC_1	64	82
R25_2LC_2	50	84	R75_2LC_2	64	82
R25_2LC_3	50	84	R75_2LC_3	64	82
R25_2LC_4	50	256	R75_2LC_4	64	270
R25_2LC_5	50	260	R75_2LC_5	64	274
R25_1LG_1	128	240	R75_1LG_1	142	254
R25_1LG_2	128	249	R75_1LG_2	142	263
R25_1LG_3	128	249	R75_1LG_3	142	263
R25_1LG_4	128	255	R75_1LG_4	142	269
R25_1LG_5	128	255	R75_1LG_5	142	269
R25_2LG_1	129	240	R75_2LG_1	143	254
R25_2LG_2	129	249	R75_2LG_2	143	263
R25_2LG_3	129	249	R75_2LG_3	143	263
R25_2LG_4	129	255	R75_2LG_4	143	269
R25_2LG_5	129	255	R75_2LG_5	143	269

Οι κύλινδροι, αφού προετοιμάστηκαν κατάλληλα όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, εισήχθησαν στην πρέσα προκειμένου να υποβληθούν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Σχήμα 3.21). Κάθε ένας από αυτούς συνδέθηκε στο σύστημα καταγραφής δεδομένων, προκειμένου να καταγραφούν τα απαραίτητα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.21: Πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης δοκιμίου περισιφισμένου με ίνες άνθρακα

Κεφάλαιο 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών και επεξεργάστηκαν με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς κάθε ομάδας δοκιμών σε θλίψη αλλά και τη σύγκριση μεταξύ τους σε επίπεδο τάσεων και παραμορφώσεων. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν βάσει διεθνών προτύπων (ASTM, 2018). Στον Πίνακα 25 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων τάσεων – παραμόρφωσης αλλά και των γραφημάτων, που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Τα αναλυτικά τα αποτελέσματα για το κάθε δοκίμιο παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

Με μια πρώτη ματιά είναι αρκετά εμφανές ότι υπάρχει αύξηση στις μέσες θλιπτικές αντοχές αλλά και στις διαμήκεις παραμορφώσεις καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων περίσφιγξης αλλά και ταυτόχρονα όσο αυξάνεται και το ποσοστό αύξησης περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ κατ' όγκο στο μίγμα η μέση θλιπτική αντοχή μειώνεται διατηρώντας όμως την ικανότητα μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας.

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων των κυλίνδρων που εξετάστηκαν.

ΥΠΟ ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΟΜΑΔΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (μstrain)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (μstrain)
UC	CM	42.38	3.815	1902.71	-
	R25	37.83	2.184	2102.07	-
	R50	29.90	1.030	2101.77	-
	R75	25.94	2.577	2277.27	-
1LC	CM	70.05	2.436	11328.72	12188.0
	R25	61.65	1.827	15150.06	2785.4
	R50	55.87	2.320	12100.23	7858.9
	R75	48.43	2.270	16500.83	7677.4
2LC	CM	109.97	5.112	22076.24	18240.0
	R25	96.75	5.005	26888.87	15686.1
	R50	83.56	4.244	28000.27	15533.6
	R75	76.91	3.572	30000.17	12177.5
1LG	CM	71.55	5.605	5900.08	6913.6
	R25	61.90	1.994	19000.14	19539.1
	R50	56.88	3.643	15987.48	17287.9
	R75	51.98	1.931	17223.07	16634.4
2LG	CM	105.14	8.992	14489.32	14982.7
	R25	98.56	5.262	18366.96	19845.1
	R50	86.36	2.417	21800.44	18067.0
	R75	78.26	3.966	33000.68	17357.0

Κρίνεται σημαντικό να γίνει αναφορά στην δυστένεια της κάθε υπό ομάδας δοκιμίων καθώς θεωρείται ότι παίζει ρόλο το πάχος και το υλικό του υφάσματος που χρησιμοποιήθηκε για την περίσφιγξη τους, προκειμένου στη συνέχεια να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα από το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα αλλά και να συγκριθούν με την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία. Επομένως πρόκειται να υπολογιστεί η δυστένεια των δοκιμίων που είναι περισφιγμένα με μια και δυο στρώσεις από ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα βάση της σχέσης (4.1):

$$\Delta = \rho_f \times E_f \quad (4.1)$$

Όπου:

ρ_f : Ποσοστό οπλισμού FRP στο δοκίμιο

E_f : Μέτρο ελαστικότητας σύνθετου υλικού (GPa)

Το ρ_f υπολογίζεται από την σχέση (4.2)

$$\rho_f = \frac{4 \times t_f}{D} \quad (4.2)$$

Όπου:

t_f : Τελικό πάχος σύνθετου υλικού (mm)

D : Διάμετρος δοκιμίου (mm)

Βάση λοιπόν των σχέσεων (4.1) και (4.2) μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τη δυστένεια των δοκιμών για κάθε υπό ομάδα παίρνοντας τα δεδομένα από τον Πίνακα 21.

$$\Delta_{1LC} = (4 \times 0.129 \times 225) / 100 = 1.161 \text{ kN/mm}^2$$

$$\Delta_{2LC} = (4 \times 0.258 \times 225) / 100 = 2.322 \text{ kN/mm}^2$$

$$\Delta_{1LG} = (4 \times 0.363 \times 71.2) / 100 = 1.034 \text{ kN/mm}^2$$

$$\Delta_{2LG} = (4 \times 0.726 \times 71.2) / 100 = 2.068 \text{ kN/mm}^2$$

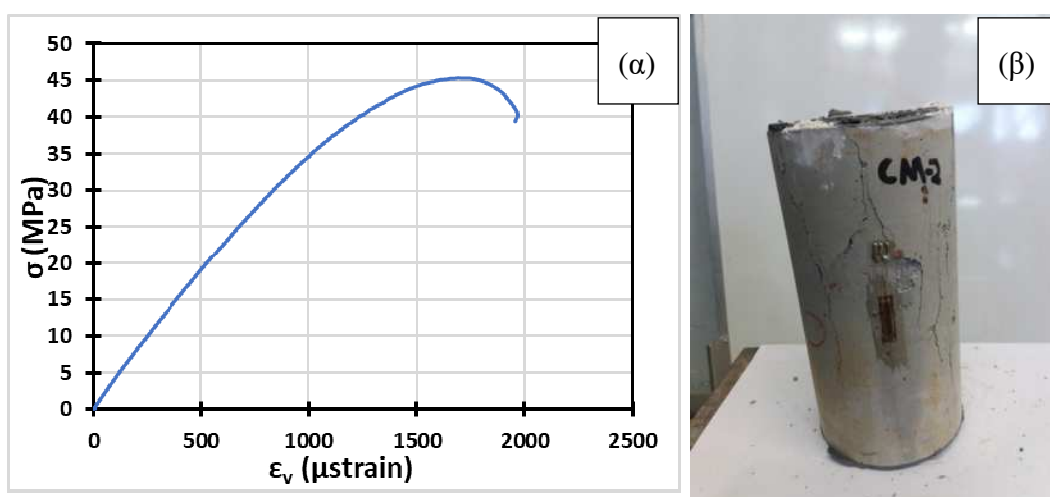
Στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής «κάθισης» σκυροδέματος (Concrete Slump Test) καθώς και της δοκιμής μέτρησης εγκλωβισμένου αέρα, προκειμένου να σχολιαστεί η επίπτωση της προσθήκης κόκκων καουτσούκ στην εργασιμότητα του σκυροδέματος.

Πίνακας 26: συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής «κάθισης» σκυροδέματος (Concrete Slump Test) και της δοκιμής μέτρησης εγκλωβισμένου αέρα.

	ΔΟΚΙΜΕΣ	
	κάθισης (cm)	ποσοστού αέρα (%)
Control Mix (CM)	19	1.4
Rubber100 Mix (R100)	20.5	4.5
Rubber75 Mix (R75)	20.5	1.7
Rubber50 Mix (R50)	22.5	1.4
Rubber25 Mix (R25)	20.5	1.6

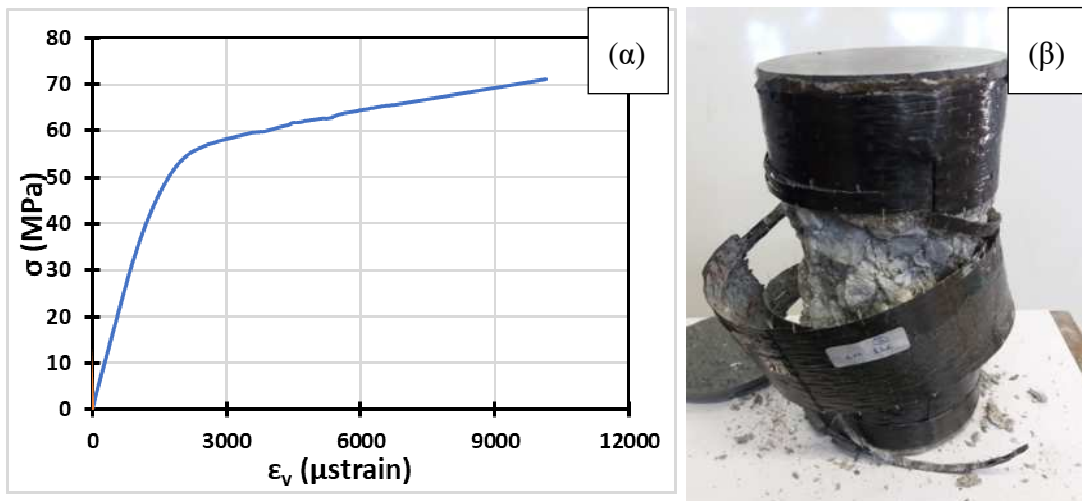
Παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα του αέρα στα μίγματα σκυροδέματος που περιέχουν κόκκους καουτσούκ είναι υψηλότερη από αυτή του μίγματος συμβατικού σκυροδέματος. Το ίδιο ακριβώς είχαν διαπιστώσει και οι Medina et al., (2018). Αντιθέτως τόσο οι ίδιοι όσο και οι Siddika et al. (2019), αναφέρουν πως η προσθήκη κόκκων καουτσούκ μειώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος, γεγονός που δεν συμβαδίζει με τις μετρήσεις που πήραμε με τη διεξαγωγή δοκιμών «κάθισης» στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα καθώς τα μίγματα με κόκκους καουτσούκ παρουσίασαν μεγαλύτερη κάθιση από αυτό του συμβατικού σκυροδέματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης για κάθε τύπο δοκιμίου που εξετάστηκε μαζί με φωτογραφίες από τα δοκίμια μετά τη θραύση.



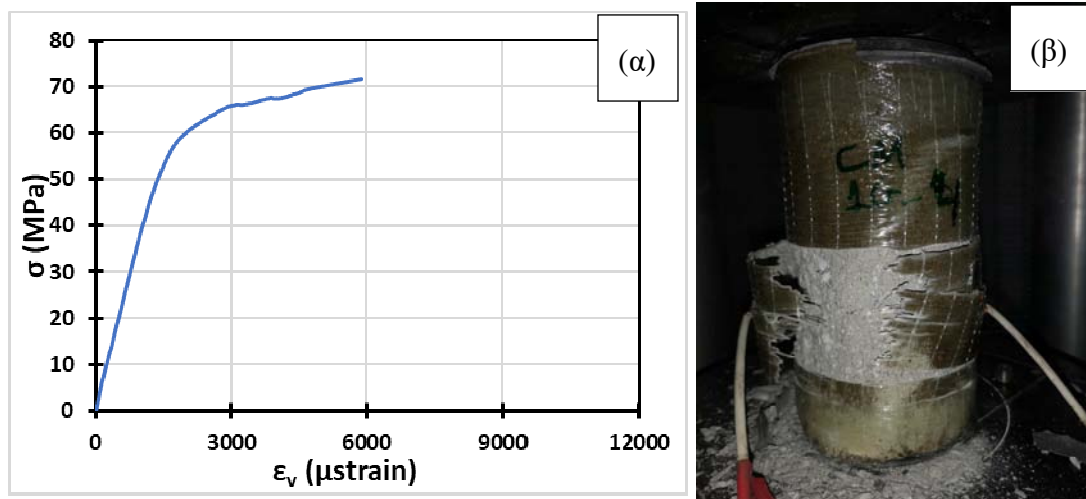
Σχήμα 4.1: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης απερίσφικτου δοκιμίου ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας απερίσφικτου δοκιμίου ομάδας CM σε θλίψη.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης καθώς και η μορφή αστοχίας του απερίσφικτου δοκιμίου της ομάδας CM. Το δοκίμιο αστόχησε σε τάση περίπου 45 MPa. Χαρακτηριστικό είναι ότι η μέγιστη διαμήκης παραμόρφωση ήταν περίπου 2000 με.



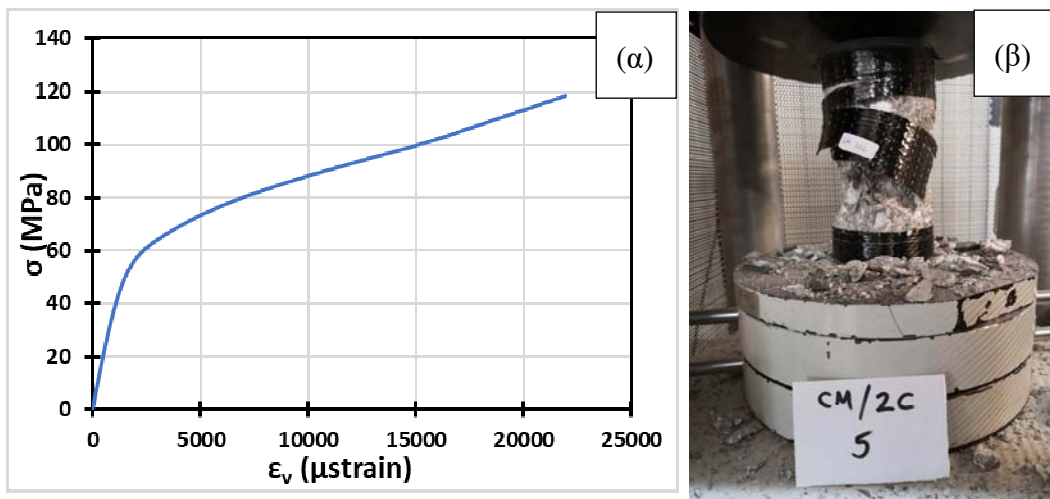
Σχήμα 4.2: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης καθώς και η μορφή αστοχίας του περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου της ομάδας CM. Το δοκίμιο αστόχησε σε τάση περίπου 70 MPa, σαφώς μεγαλύτερη από την τάση αστοχίας του απερίσφικτου δοκιμίου και παράλληλα έφτασε και σε κατά πολύ μεγαλύτερες διαμήκεις παραμορφώσεις. Η αστοχία του δοκιμίου ήταν αρκετά ψαθυρή και θα μπορούσε μάλιστα να χαρακτηριστεί ως «εκρηκτική». Λόγω της έξτρα περίσφιξης του δοκιμίου στις παρειές των βάσεων αποφεύχθηκε η αστοχία στις επιφάνειες φόρτισης και οδηγήθηκε στο μέσο του δοκιμίου με αποτέλεσμα να έχουμε μια κωνοειδή μορφή αστοχίας του δοκιμίου. Παρατηρείται ότι το διάγραμμα είναι διγραμμικό με τον πρώτο κλάδο να είναι παρόμοιος αυτού του απερίσφικτου. Μετά τα 55MPa το ρηγματωμένο πλέον σκυρόδεμα προσπαθεί να διογκωθεί και αναγκάζει τον μανδύα να αντιδράσει. Ο δεύτερος γραμμικός κλάδος έχει σαφέστατα μικρότερη κλίση σε σχέση με τον πρώτο αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή και παραμόρφωση.



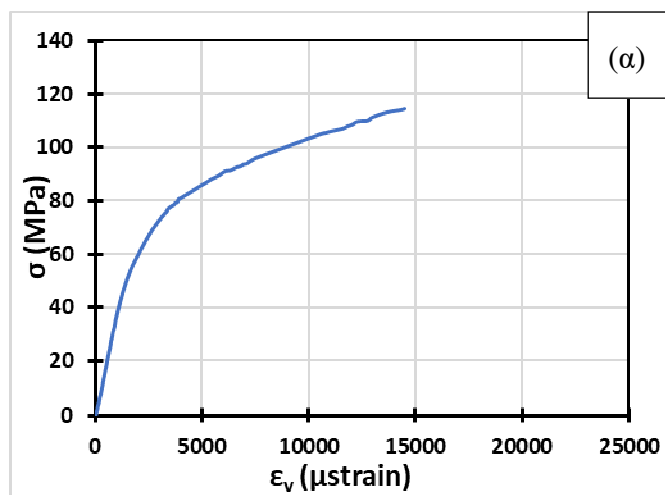
Σχήμα 4.3: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης καθώς και η μορφή αστοχίας του περισφιγμένου με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου της ομάδας CM. Το δοκίμιο αστόχησε σε τάση περίπου 70 MPa, σαφώς μεγαλύτερη από την τάση αστοχίας του απερίσφικτου δοκιμίου αλλά ίδιας κλίμακας σε σχέση με το περισφιγμένο δοκίμιο με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα της ίδιας ομάδας δοκιμίων. Παράλληλα έφτασε σε μεγαλύτερες διαμήκεις παραμορφώσεις από το απερίσφικτο δοκίμιο αλλά σε μικρότερες σε σύγκριση με το περισφιγμένο με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα. Η αστοχία του δοκιμίου δεν ήταν τόσο ψαθυρή όσο του περισφιγμένου δοκιμίου με μια στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Μικρής κλίμακας θραύσεις του μανδύα μαρτυρούσαν την τελική θραύση, παρότι δε φαίνεται πτώση της κλίσης του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος. Λόγω της επιπρόσθετης περισφιγξης του δοκιμίου στις παρειές των βάσεων αποφεύχθηκε η αστοχία κοντά στις επιφάνειες φόρτισης και οδηγήθηκε στο μέσο του δοκιμίου. Η μορφή της αστοχίας δεν ήταν τόσο κωνοειδής καθώς δεν είχε συνθλιβεί πλήρως το σκυρόδεμα αλλά ήταν ανίκανο να παραλάβει παραπάνω φορτίο.



Σχήμα 4.4: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.

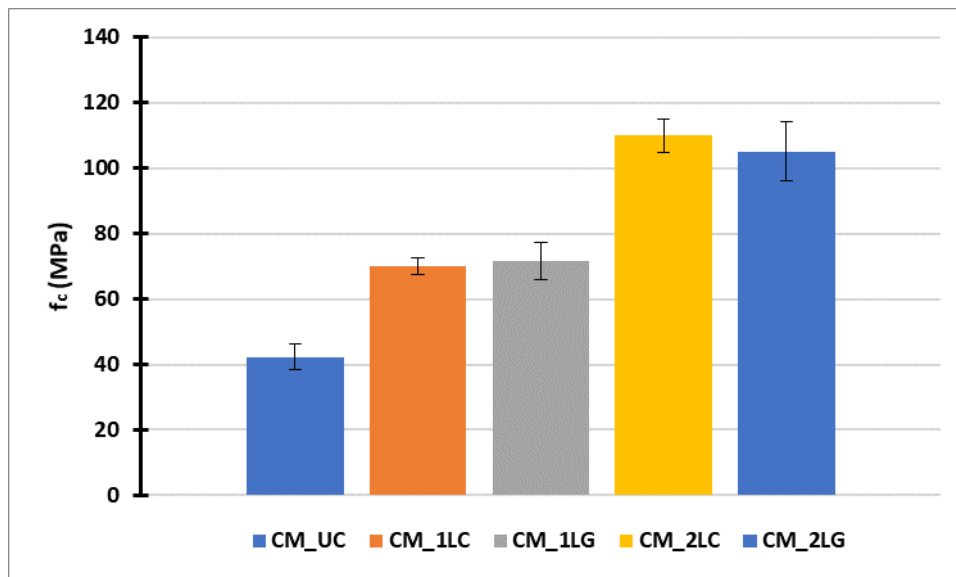
Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης καθώς και η μορφή αστοχίας του περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα δοκιμίου της ομάδας CM. Το δοκίμιο αστόχησε σε τάση περίπου ίση με 120 MPa, σημαντικά μεγαλύτερη από την τάση αστοχίας του περισφιγμένου δοκιμίου με μία στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες του ίδιου υλικού. Παράλληλα έφτασε και σε ακόμα μεγαλύτερες διαμήκειες παραμορφώσεις. Η αστοχία του δοκιμίου ήταν ακόμα πιο ψαθυρή και η θραύση ακόμα πιο απότομη σε σχέση με αυτή των περισφιγμένων δοκιμίων με μια στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες του ίδιου υλικού. Λόγω της έξτρα περισφιγξης του δοκιμίου στις παρειές των βάσεων αποφεύχθηκε η αστοχία στις επιφάνειες φόρτισης και οδηγήθηκε στο μέσο του δοκιμίου με αποτέλεσμα να έχουμε μια κωνοειδή μορφή αστοχίας του δοκιμίου με τις ακμές του κώνου να έχουν μικρότερη κλίση.



Σχήμα 4.5: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM, (β) μορφή αστοχίας περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου, ομάδας CM σε θλίψη.

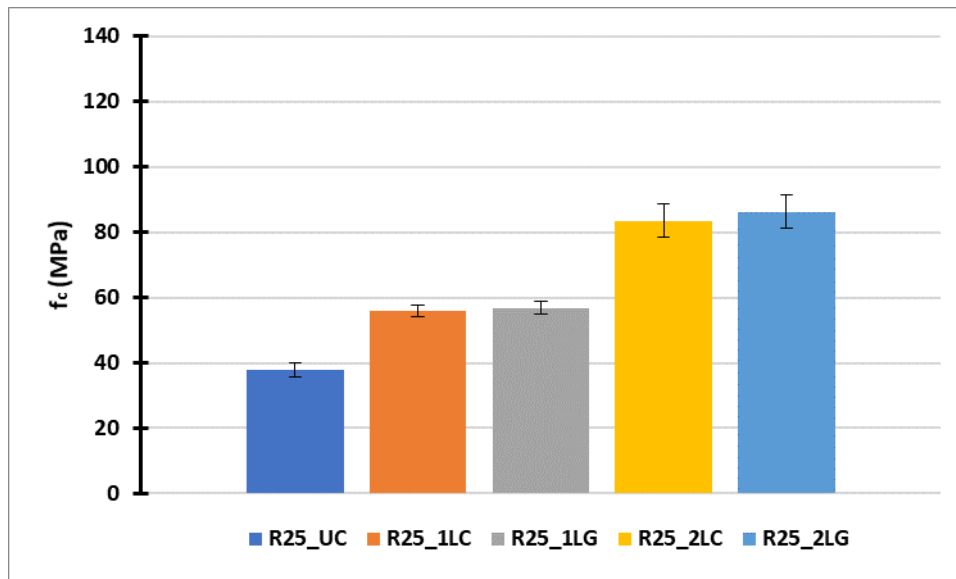
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης καθώς και η μορφή αστοχίας του περισφιγμένου με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού δοκιμίου της ομάδας CM. Το δοκίμιο αστόχησε σε τάση περίπου ίση με 120 MPa, σημαντικά μεγαλύτερη από την τάση αστοχίας του περισφιγμένου δοκιμίου με μία στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες του ίδιου υλικού αλλά ίδιας κλίμακας σε σχέση με το περισφιγμένο δοκίμιο με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα της ίδιας ομάδας δοκιμίων. Παράλληλα έφτασε σε μεγαλύτερες διαμήκειες παραμορφώσεις από το περισφιγμένο δοκίμιο με μία στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες τους ίδιου υλικού αλλά σε μικρότερες σε σύγκριση με το περισφιγμένο με δυο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα. Η αστοχία του δοκιμίου δεν ήταν τόσο ψαθυρή όσο του περισφιγμένου δοκιμίου με δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Λόγω της έξτρα περισφιγξης του δοκιμίου στις παρειές των βάσεων αποφεύχθηκε η αστοχία στις επιφάνειες φόρτισης και οδηγήθηκε στο μέσο του δοκιμίου.

Στα Σχήματα 4.6-4.9 παρουσιάζονται οι μέσες θλιπτικές αντοχές ανά ομάδα δοκιμών προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή της περισφιγξης. Να σημειωθεί πως σε όλα τα διαγράμματα οι άξονες είναι σε ίδια κλίμακα.



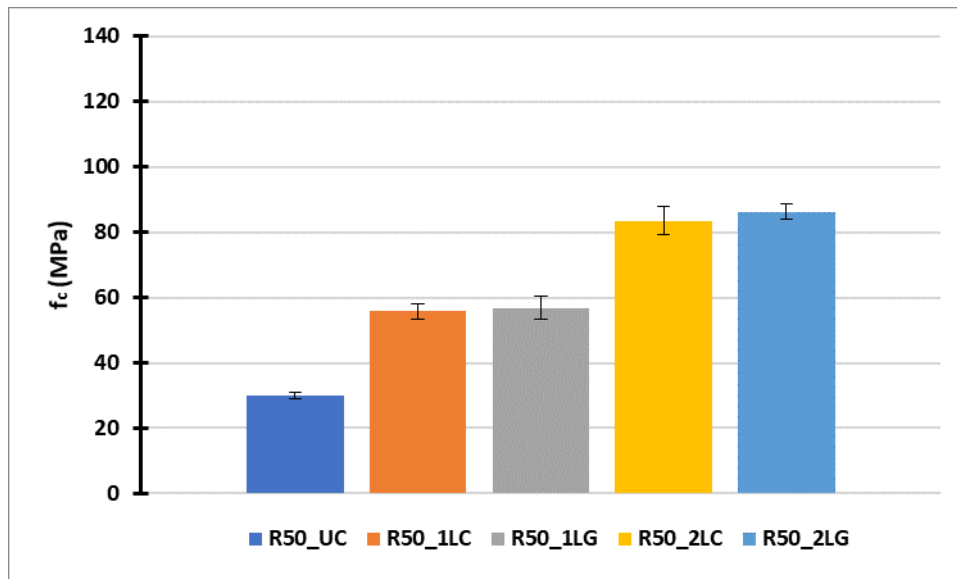
Σχήμα 4.6: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμών ομάδας CM

Στο Σχήμα 4.6 για την ομάδα δοκιμών CM παρατηρείται ότι τα ενισχυμένα δοκίμια φτάνουν σε υψηλότερες αντοχές και μάλιστα αυξάνοντας και το ποσοστό της περισφιγξης, η αντοχή αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Παρατηρείται επίσης πως η περισφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού προσδίδει αντίστοιχη περίπου αντοχή στα δοκίμια σε σχέση με τη περισφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Αντίστοιχα σχεδόν παρόμοιες τιμές θλιπτικής αντοχής επιτυγχάνονται στην περίπτωση περισφιγξης με δυο στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών.



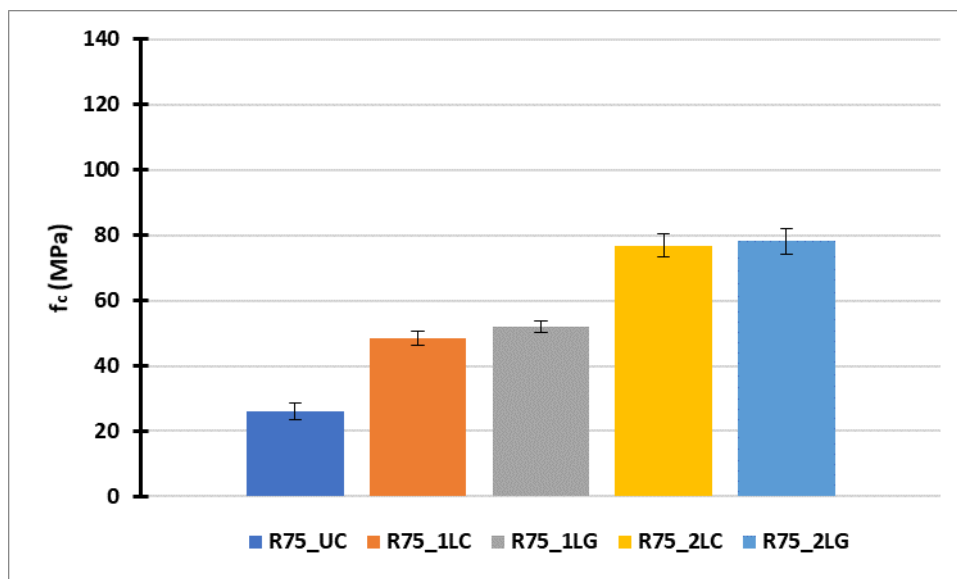
Σχήμα 4.7: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμίων ομάδας R25

Στο Σχήμα 4.7 για την ομάδα δοκιμίων R25 παρατηρείται ότι τα ενισχυμένα δοκίμια φτάνουν σε υψηλότερες αντοχές και μάλιστα αυξάνοντας και το ποσοστό της περίσφιγξης, η αντοχή αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Παρατηρείται επίσης πως η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού προσδίδει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια από ότι η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Στην συγκεκριμένη ομάδα το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των δυο στρώσεων περίσφιγξης, παρότι η δυστένεια των ινών άνθρακα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη αυτών του γυαλιού.



Σχήμα 4.8: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμών ομάδας R50

Στο Σχήμα 4.8 για την ομάδα δοκιμών R50 παρατηρείται ότι τα ενισχυμένα δοκίμια φτάνουν σε υψηλότερες αντοχές και μάλιστα αυξάνοντας και το ποσοστό της περίσφιγξης, η αντοχή αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Παρατηρείται επίσης πως η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού προσδίδει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια από ότι η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Στην συγκεκριμένη ομάδα το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των δυο στρώσεων περίσφιγξης.



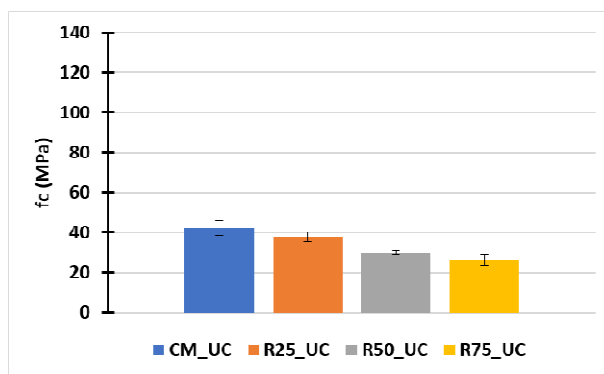
Σχήμα 4.9: Μέση θλιπτική αντοχή δοκιμών ομάδας R75

Στο Σχήμα 4.9 για την ομάδα δοκιμίων R75 παρατηρείται ότι τα ενισχυμένα δοκίμια φτάνουν σε υψηλότερες αντοχές και μάλιστα αυξάνοντας και το ποσοστό της περίσφιγξης, η αντοχή αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Παρατηρείται επίσης πως η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού προσδίδει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια από ότι η περίσφιγξη με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Στην συγκεκριμένη ομάδα το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των δυο στρώσεων περίσφιγξης.

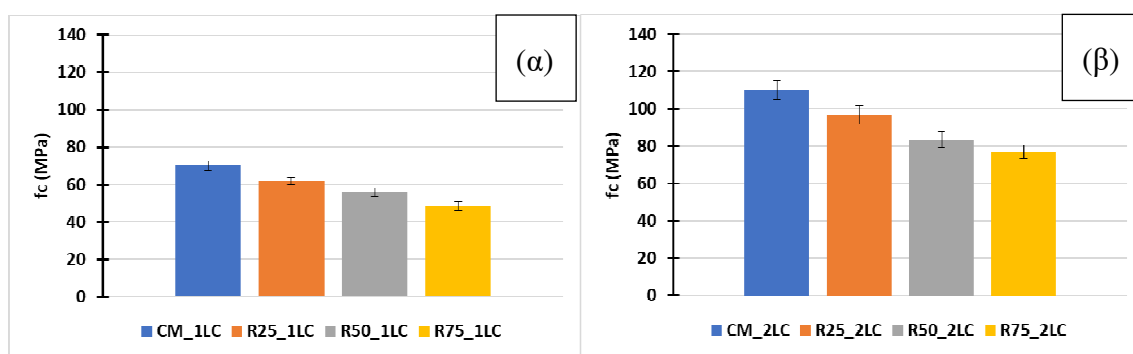
Στα Σχήματα 4.6-4.9 έχουν συμπεριληφθεί και τα error bars ανάλογα την τυπική απόκλιση που είχαν οι πεντάδες των δοκιμίων. Είναι εμφανές σε όλες τις ομάδες δοκιμίων πως τα περισφιγμένα δοκίμια έχουν υψηλότερη αντοχή και μάλιστα αυξάνοντας το ποσοστό της περίσφιγξης αυξάνεται ακόμα περισσότερο η αντοχή των περισφιγμένων δοκιμίων.

Αν εξαιρεθεί η ομάδα δοκιμίων CM, θα μπορούσε να συμπεριληφθεί και αυτή στην παραπάνω παρατήρηση. Βέβαια βάσει της δυστένειας των περισφιγμένων δοκιμίων που έχει υπολογισθεί παραπάνω, θα αναμέναμε τα περισφιγμένα δοκίμια με ίνες άνθρακα να παρουσιάζουν ενδεχομένως ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή. Παρόλα αυτά, το υλικό περίσφιγξης δε φαίνεται να επηρεάζει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων. Η μέγιστη παραμορφωσιμότητα των ΙΟΠ φαίνεται να παίζει το σημαντικότερο ρόλο, όταν συγκρίνεται ο ίδιος αριθμός στρώσεων.

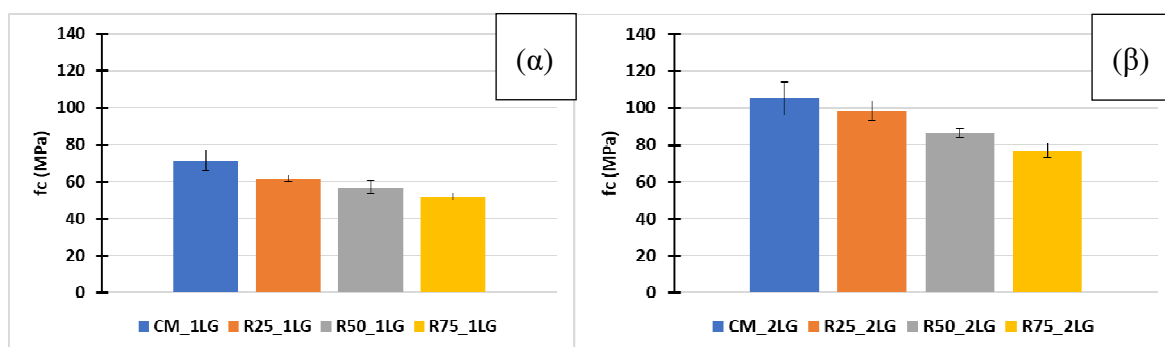
Στα Σχήματα 4.10-4.14 παρουσιάζονται οι μέσες θλιπτικές αντοχές ανά υπό ομάδα δοκιμίων προκειμένου να συγκριθεί η επιρροή της αντικατάστασης κατ' όγκο των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ. Να σημειωθεί πως σε όλα τα διαγράμματα οι άξονες είναι σε ίδια κλίμακα.



Σχήμα 4.10: Μέση θλιπτική αντοχή απερίσφικτων δοκιμίων



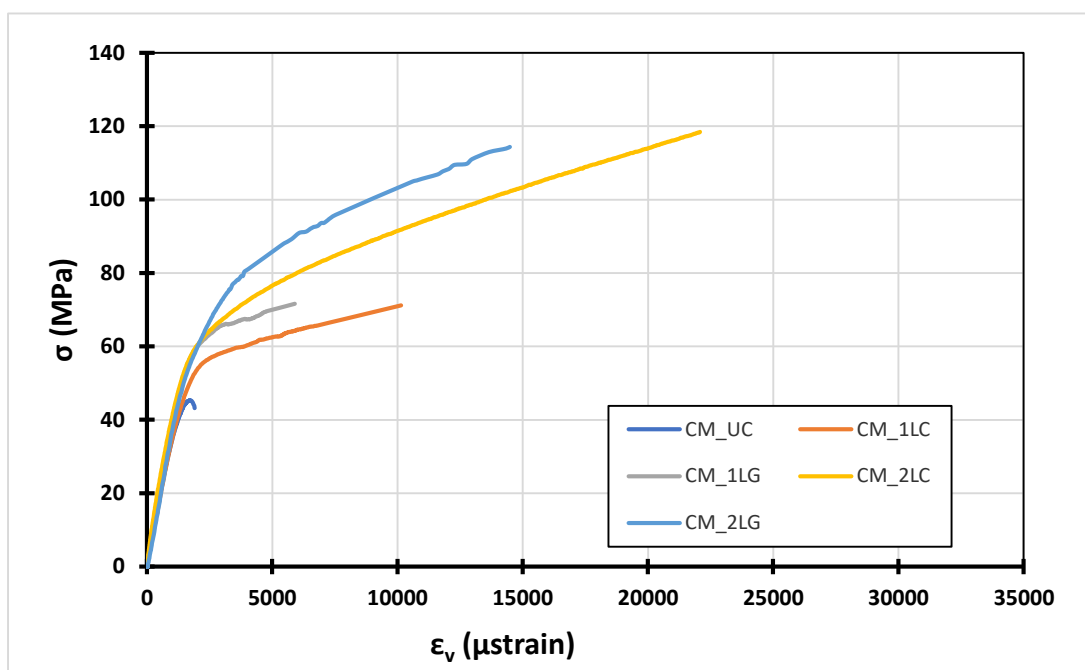
Σχήμα 4.11: Μέση θλιπτική αντοχή περισιγμένων δοκιμίων με (α) μία και (β) δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα



Σχήμα 4.12: Μέση θλιπτική αντοχή περισιγμένων δοκιμίων με (α) μία και (β) δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.

Στα Σχήματα 4.10-4.12 παρουσιάζονται και τα error bars ανάλογα την τυπική απόκλιση που είχαν οι πεντάδες των δοκιμίων. Παρατηρούμε πως τόσο στα απερίσφικτα όσο και στα περισφιγμένα δοκίμια, ανεξαρτήτως τρόπου περισφιγξης εμφανίζεται μια μείωση στη μέση θλιπτική αντοχή με την αύξηση της περιεκτικότητας των μιγμάτων σε κόκκους καουτσούκ.

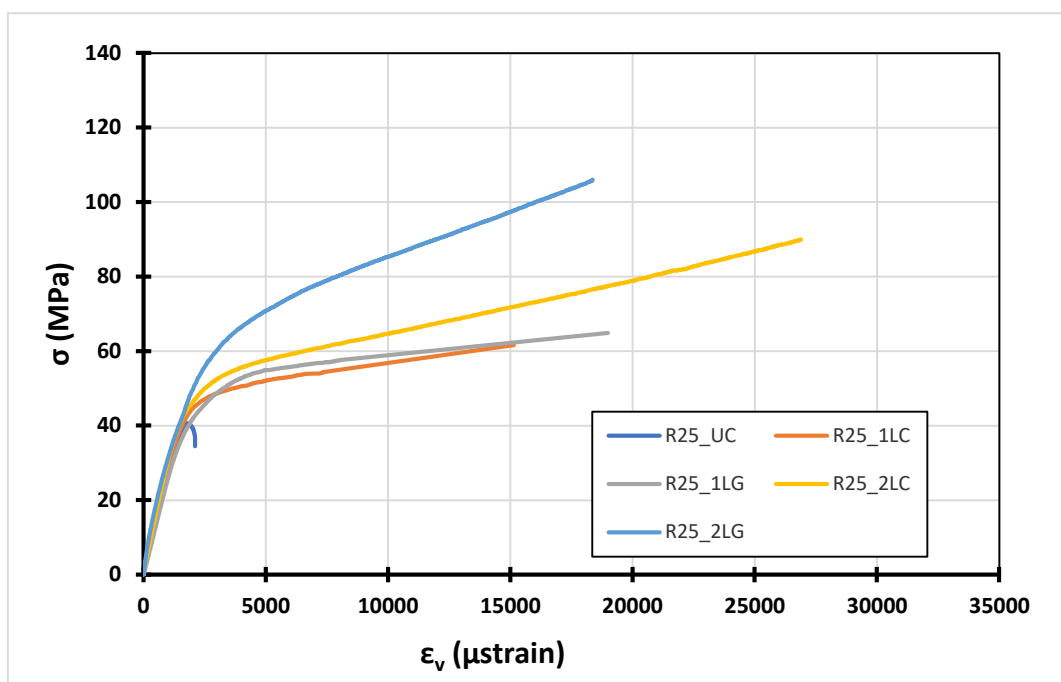
Για να εξεταστεί η επίδραση του υλικού και ποσοστού περισφιγξης στη συμπεριφορά των δοκιμίων σχεδιάστηκαν διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ανά τύπο σκυροδέματος (Σχήματα 4.13-4.16). Σημειώνεται πως σε όλα τα διαγράμματα οι άξονες έχουν την ίδια κλίμακα προκειμένου να γίνεται εύκολα αντιληπτή η διαφορά τόσο και στις τάσεις αλλά και στις παραμορφώσεις ανάλογα την ομάδα δοκιμίων.



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων CM

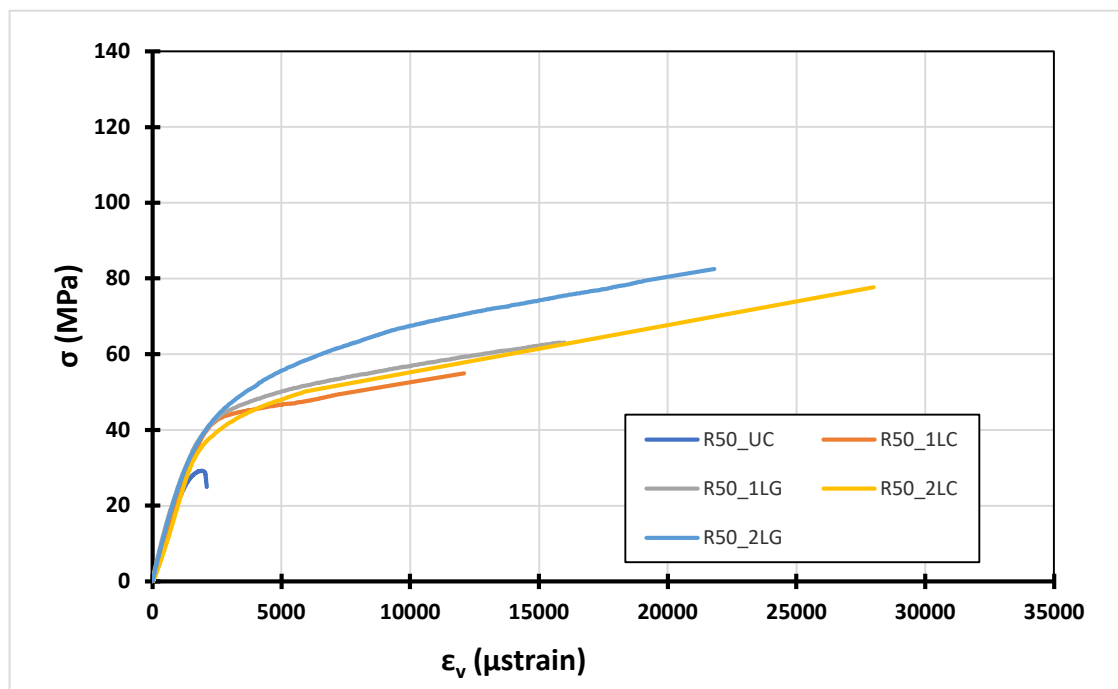
Για την ομάδα δοκιμίων CM, παρατηρείται από το Σχήμα 4.15 πως τα περισφιγμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και παραμορφώσεις έναντι των απερίσφικτων. Μάλιστα όσο αυξάνεται το ποσοστό της περισφιγξης, αυξάνεται και η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου. Παρατηρούμε επίσης πως οι καμπύλες των περισφιγμένων δοκιμίων είναι διγραμμικού τύπου και πως το αρχικό μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Σε σύγκριση όμως με τα απερίσφικτα, αν γίνει αλλαγή της κλίμακας των αξόνων και ξεχωρίσει ο ελαστικός κλάδος θα γίνει εμφανές πως τα περισφιγμένα δοκίμια έχουν ελαφρώς μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Παράλληλα φαίνεται τα περισφιγμένα δοκίμια με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και παραμόρφωση σε σύγκριση με αυτά που είναι ενισχυμένα με

ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού. Η συγκεκριμένη παρατήρηση ήταν αναμενόμενη καθώς τα περισφιγμένα δοκίμια με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα υπολογίστηκαν να έχουν μεγαλύτερη δυστένεια από τα περισφιγμένα δοκίμια με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.



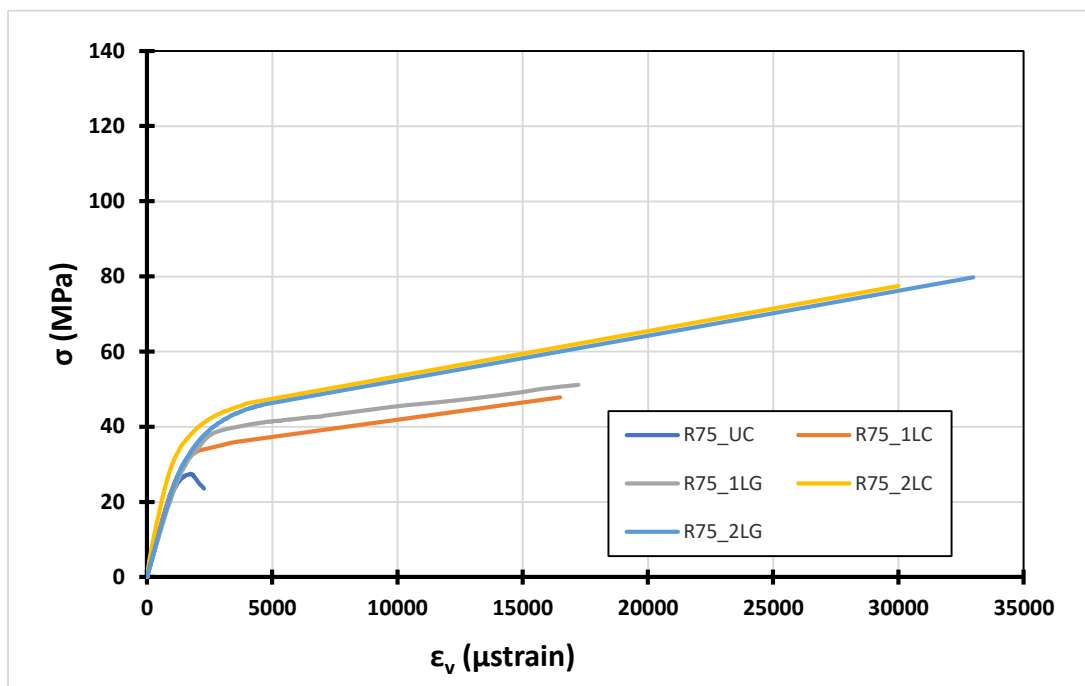
Σχήμα 4.14: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R25

Για την ομάδα δοκιμίων R25, παρατηρείται από το Σχήμα 4.16 πως τα περισφιγμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και παραμορφώσεις έναντι των απερίσφικτων. Μάλιστα όσο αυξάνεται το ποσοστό της περίσφιγξης, αυξάνεται και η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου. Παρατηρούμε επίσης πως οι καμπύλες των περισφιγμένων δοκιμίων είναι διγραμμικού τύπου και πως το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Όσον αφορά στην αντοχή και στην παραμόρφωση, δεν είναι ξεκάθαρο ποιο υλικό υφάσματος προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα στο δοκίμιο.



Σχήμα 4.15: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R50

Για την ομάδα δοκιμίων R50 παρατηρείται από το Σχήμα 4.17 πως τα περισφιγμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και παραμορφώσεις έναντι των απερίσφικτων. Μάλιστα όσο αυξάνεται το ποσοστό της περίσφιξης, αυξάνεται και η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου. Παρατηρούμε επίσης πως οι καμπύλες των περισφιγμένων δοκιμίων είναι διγραμμικού τύπου και πως το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Όσον αφορά στην αντοχή και την παραμόρφωση, δεν είναι ξεκάθαρο ποιο υλικό υφάσματος προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα στο δοκίμιο.



Σχήμα 4.16: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ομάδας δοκιμίων R75.

Για την ομάδα δοκιμίων R75, παρατηρείται από το Σχήμα 4.18 πως τα περισφιγμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και παραμορφώσεις έναντι των απερίσφικτων. Μάλιστα όσο αυξάνεται το ποσοστό της περίσφιγξης, αυξάνεται και η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου. Παρατηρούμε επίσης πως οι καμπύλες των περισφιγμένων δοκιμίων είναι διγραμμικού τύπου και πως το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Παράλληλα φαίνεται τα περισφιγμένα δοκίμια με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και παραμόρφωση σε σύγκριση με αυτά που είναι ενισχυμένα με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα.

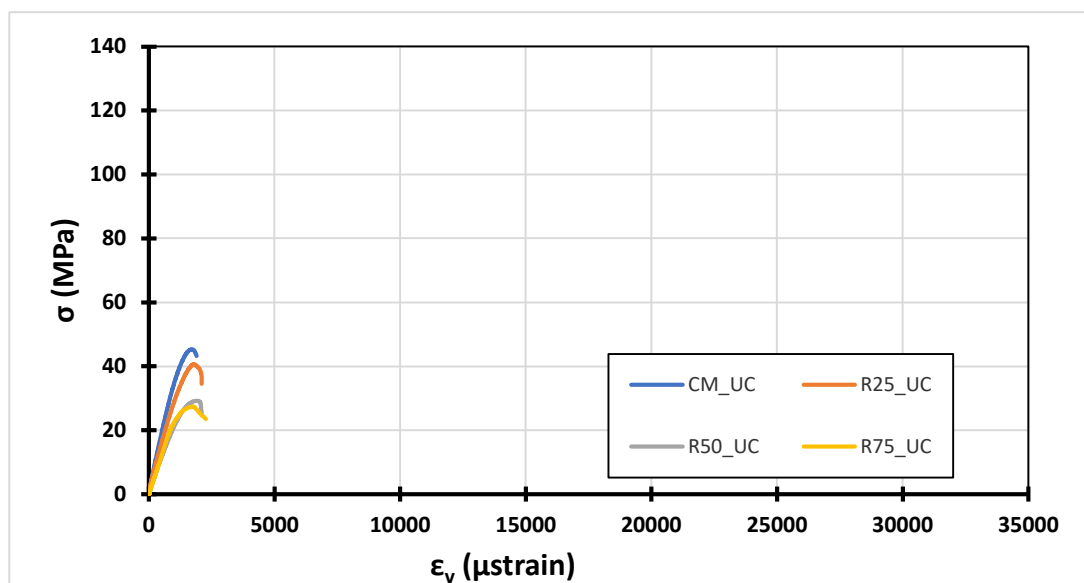
Συνοψίζοντας:

Αρχικά παρατηρείται ότι η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι διγραμμική ανεξαρτήτως περιεκτικότητας σε καουτσούκ, τύπου περίσφιγξης ή και συνδυασμού των δύο.

Η διαφορά απερίσφικτων και περισφιγμένων δοκιμίων είναι σημαντική τόσο στην αύξηση αντοχής όσο και στην αύξηση των παραμορφώσεων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων περίσφιγξης αυξάνεται η μέγιστη θλιπτική αντοχή και η μέγιστη διαμήκης παραμόρφωση σε κάθε ομάδα δοκιμίων.

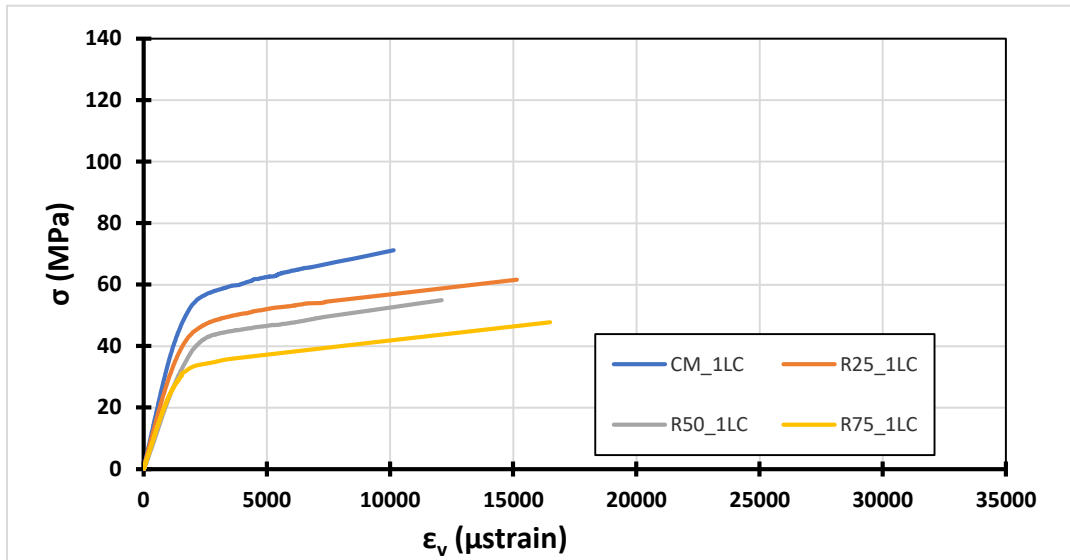
Παρατηρείται πως τα μίγματα με περισσότερη περιεκτικότητα σε καουτσούκ παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερες παραμορφώσεις, αλλά συμβαίνει το αντίστροφο όσο αφορά στην αντοχή τους.

Στα Σχήματα 4.17-4.21 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των υπό ομάδων δοκιμίων. Να σημειωθεί πως διατηρήθηκε η ίδια κλίμακα σε όλα τα γραφήματα προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η σύγκριση, και να παρατηρούνται τυχόν διαφορές.



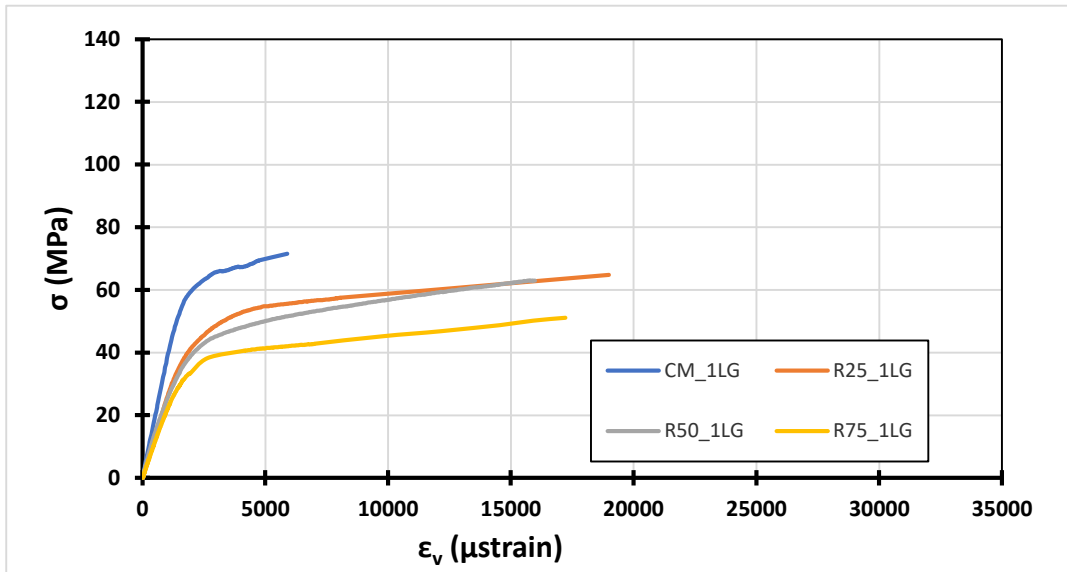
Σχήμα 4.17: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων απερίσφικτων δοκιμίων

Από το Σχήμα 4.17, για τα απερίσφικτα δοκίμια κάθε ομάδας, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ στο μίγμα μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων αλλά αυξάνεται η παραμορφωσιμότητά τους. Επίσης όσο μικρότερη είναι η αντικατάσταση των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών στο μίγμα τόσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας. Φαίνεται και από το σχήμα 4.17 ότι η καμπύλη του δοκιμίου από συμβατικό σκυρόδεμα (CM_UC) έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτές των δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ έναντι φυσικών αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο.



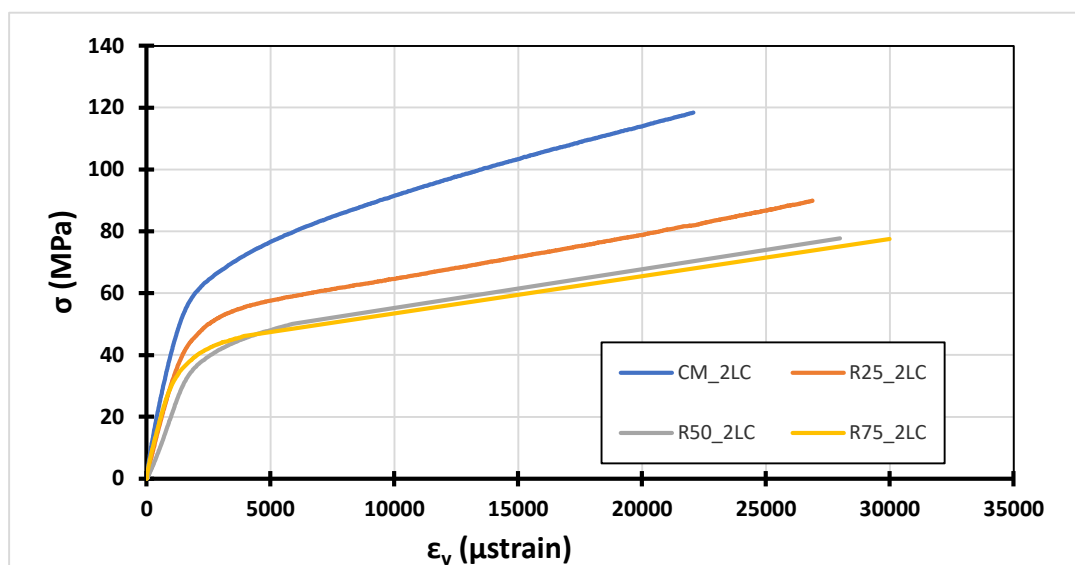
Σχήμα 4.18: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα

Από το Σχήμα 4.18, για τα περισφιγμένα δοκίμια με μια στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα κάθε ομάδας, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ στο μίγμα τόσο μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων αλλά αυξάνεται η παραμορφωσιμότητά τους. Επίσης όσο μικρότερη είναι η αντικατάσταση των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών στο μίγμα τόσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας. Επίσης είναι εμφανές ότι η καμπύλη του δοκιμίου από συμβατικό σκυρόδεμα (CM_1LC) έχει μεγαλύτερη αρχική κλίση (Μέτρο Ελαστικότητας) από αυτές των δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ έναντι φυσικών αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο.



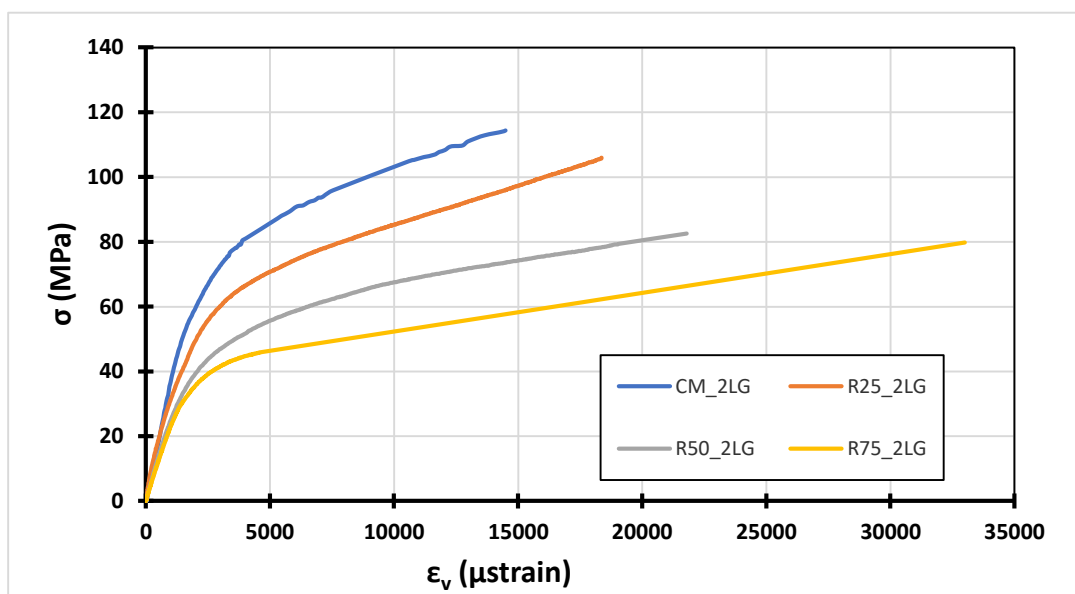
Σχήμα 4.19: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με μία στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.

Από το Σχήμα 4.19, για τα περισφιγμένα δοκίμια με μια στρώση από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού κάθε ομάδα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ στο μίγμα μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων. Βεβαία κάποια παρατήρηση για την παραμορφωσιμότητα δεν μπορεί να βγει στη συγκεκριμένη περίπτωση πέρα από το ότι τα δοκίμια που περιέχουν ένα ποσοστό κόκκων καουτσούκ φτάνουν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από αυτά που αποτελούνται από συμβατικό σκυρόδεμα. Επίσης όσο μικρότερη είναι η αντικατάσταση των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών στο μίγμα τόσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας. Είναι εμφανές ότι το δοκίμιο από συμβατικό σκυρόδεμα (CM_1LG) έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με αυτά των δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ έναντι φυσικών αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο.



Σχήμα 4.20: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα

Από το Σχήμα 4.20, για τα περισφιγμένα δοκίμια με δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα κάθε ομάδα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ στο μίγμα μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων αλλά αυξάνεται η παραμορφωσιμότητα τους. Για τη συγκεκριμένη υπό ομάδα είναι αρκετά ξεκάθαρη η διαβάθμιση των καμπυλών βάση της περιεκτικότητας του μίγματος σε κόκκους καουτσούκ. Επίσης όσο μικρότερη είναι η αντικατάσταση των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών στο μίγμα τόσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας. Είναι εμφανές ότι η καμπύλη του δοκιμίου από συμβατικό σκυρόδεμα (CM_2LC) έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτές των δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ έναντι φυσικών αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο.



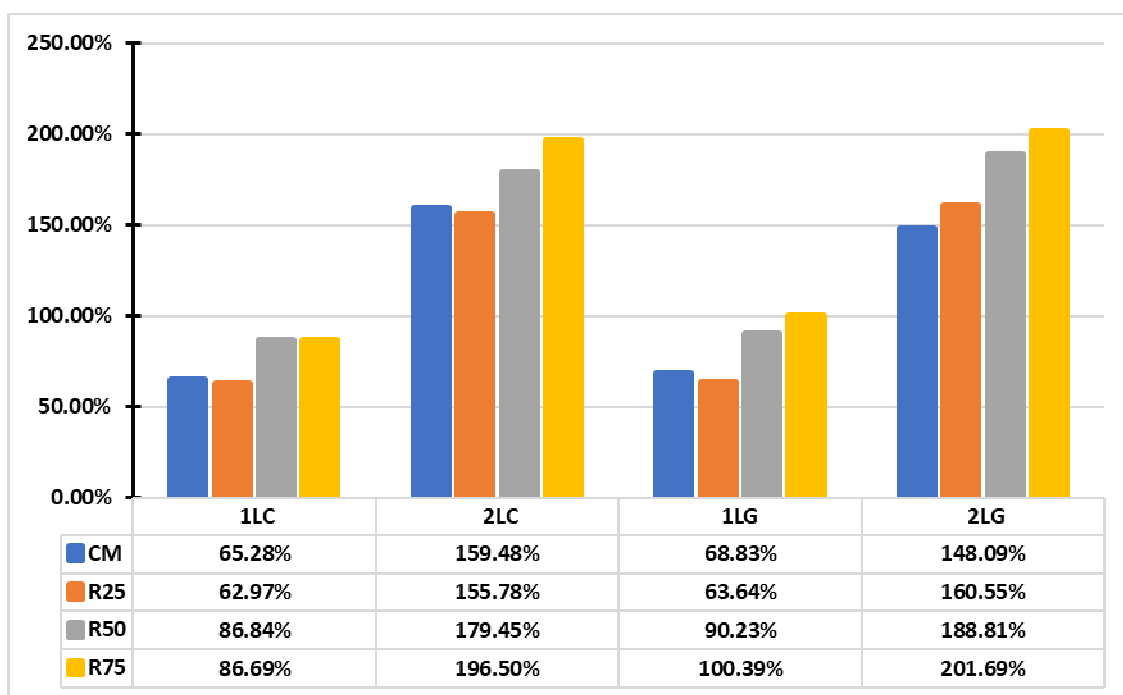
Σχήμα 4.21: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων περισφιγμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού.

Από το Σχήμα 4.21, για τα περισφιγμένα δοκίμια με δυο στρώσεις από ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού κάθε ομάδας, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ στο μίγμα μειώνεται η αντοχή των δοκιμίων αλλά αυξάνεται η παραμορφωσιμότητά τους. Για τη συγκεκριμένη υπό ομάδα είναι αρκετά ξεκάθαρη η διαβάθμιση των καμπυλών, σχεδόν τέλεια θα έλεγε κανείς, βάση της περιεκτικότητας του μίγματος σε κόκκους καουτσούκ. Επίσης όσο μικρότερη είναι η αντικατάσταση των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών στο μίγμα τόσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας. Είναι εμφανές ότι η καμπύλη του δοκιμίου από συμβατικό σκυρόδεμα (CM_2LG) έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτές των δοκιμίων που περιέχουν κόκκους καουτσούκ έναντι φυσικών αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης κατ' όγκο.

Από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.17-4.21 παρατηρείται αρχικά η διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας ανάλογα την περιεκτικότητα του μίγματος σε καουτσούκ. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας τόσο στα απερίσφικτα δοκίμια, όσο και στα περισφιγμένα ανεξαρτήτου τρόπου περισφιγξης.

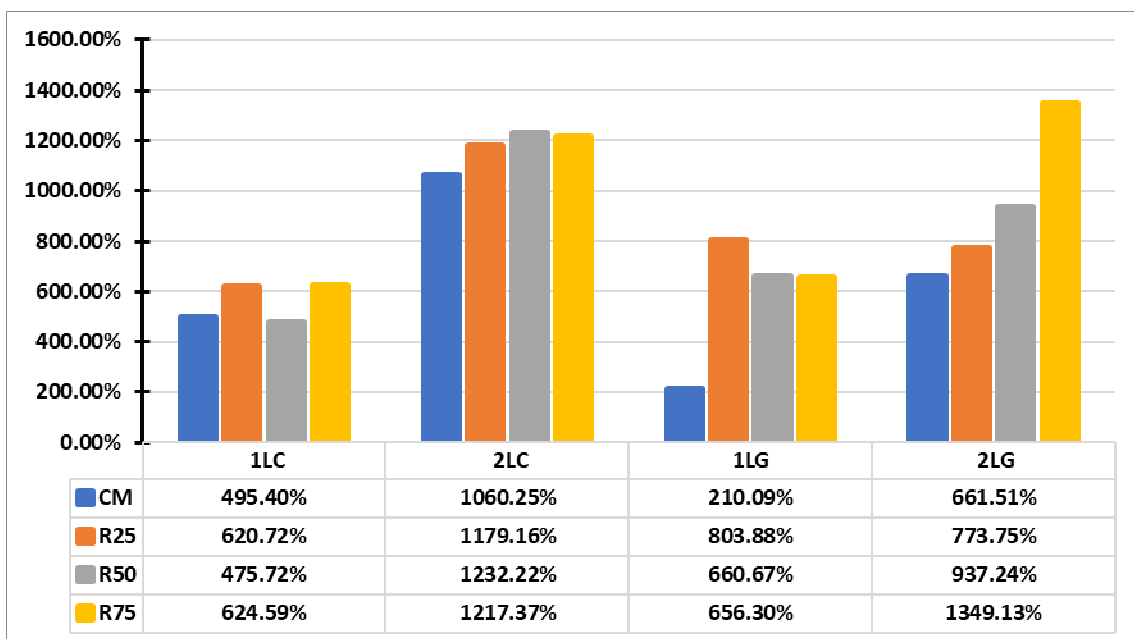
Παράλληλα, παρατηρείται ότι τόσο στα περισφιγμένα όσο και στα απερίσφικτα δοκίμια όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητα σε καουτσούκ τόσο υψηλότερη είναι η αντοχή. Αντιστρόφως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ αυξάνεται και η παραμορφωσιμότητα των δοκιμίων.

Επίσης δημιουργήθηκαν τρία ακόμα διαγράμματα σε μορφή ποσοστών με σκοπό να δώσουν μια συνολική εικόνα της πειραματικής αυτής διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα του Σχήματος 4.2 παρουσιάζεται η ποσοστιαία αύξηση των αντοχών ανάλογα το υλικό περίσφιξης. Σε αυτό του Σχήματος 4.23 η ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διαμήκους παραμόρφωσης ενώ στο διάγραμμα του Σχήματος 4.24 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μείωση των αντοχών ανάλογα το ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ.



Σχήμα 4.22: Ποσοστιαία αύξηση αντοχών ανάλογα την περίσφιξη.

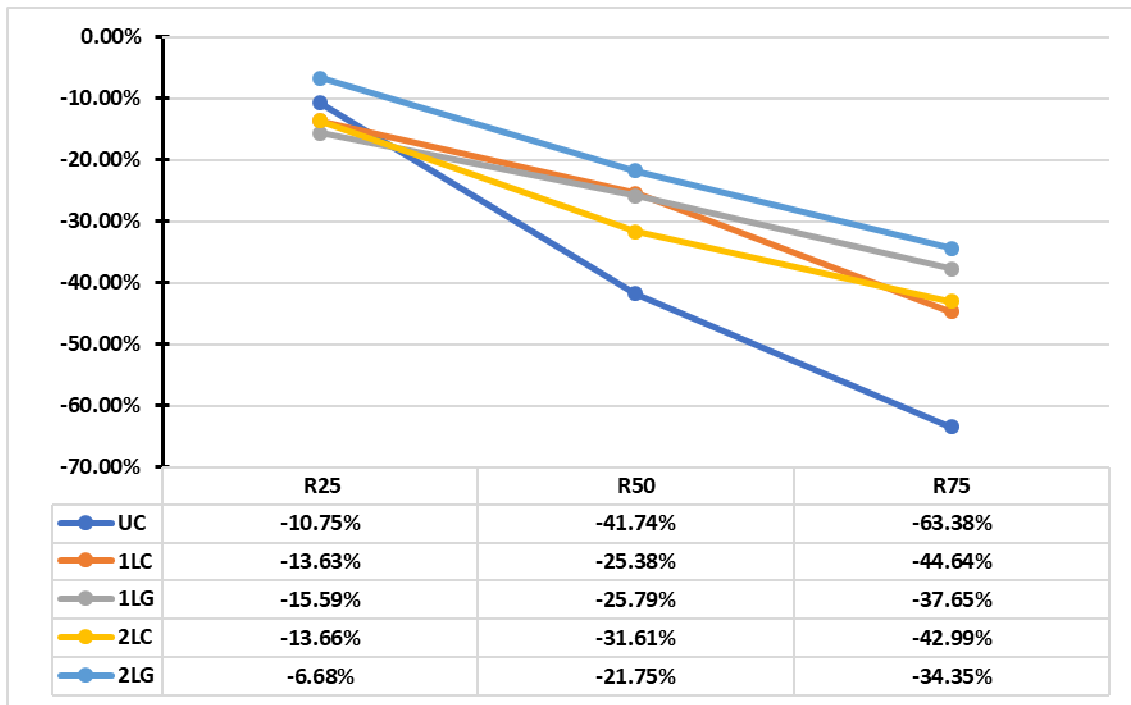
Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η ποσοστιαία αύξηση των αντοχών σε σχέση με το απερίσφικτο σκυρόδεμα με σκοπό να συγκριθεί η αποδοτικότητα της περίσφιξης. Για κάθε τύπο ενίσχυσης το μίγμα με 75% αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό άυξησης της θλιπτικής αντοχής. Η αποδοτικότητα της περίσφιξης είναι εντονότερη όταν αυξάνονται οι στρώσεις του μανδύα και όταν αυξάνεται το ποσοστό των αδρανών από καουτσούκ στο μίγμα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σκυροδέματα με αδρανή από καουτσούκ διογκώνονται περισσότερο με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο μανδύας από ΙΟΠ περισσότερο.



Σχήμα 4.23: Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διαμήκους παραμόρφωσης.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διαμήκους παραμόρφωσης σε σχέση με το απερίσφικτο σκυρόδεμα με σκοπό να συγκριθεί η αποδοτικότητα της περίσφιξης. Όσον αφορά στις παραμορφώσεις τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ ξεκάθαρα αλλά είναι πολύ εμφανές το γεγονός ότι τα ποσοστά αύξησης είναι πολύ υψηλά και φτάνουν τα μέγιστα στις περιπτώσεις περίσφιξης των δοκιμίων με δυο στρώσεις από ΙΟΠ και 75% αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ.

Οπότε εν ολίγης μπορούμε να αυξήσουμε και την παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος αυξάνοντας την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε καουτσούκ αλλά ταυτόχρονα να αυξήσουμε έως και 200% την αντοχή του μίγματος αυτού λόγω περίσφιξης.



Σχήμα 4.24: Ποσοστιαία μείωση αντοχών ανάλογα το ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους από καουτσούκ

Παρατηρώντας ωστόσο το Σχήμα 4.24 βλέπουμε ότι η μείωση στην αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη για τα απερίσφικτα δοκίμια ενώ αυξάνοντας τις στρώσεις περίσφιξης το ποσοστό μείωσης της αντοχής πέφτει. Αυτό εξακριβώνει και το προηγούμενο σχόλιο που αναφερόταν στην ποσοστιαία αύξηση της αντοχής λόγω της περίσφιξης. Για άλλη μια φορά παρατηρούμε ότι η αντοχή μειώνεται λιγότερο στην περίπτωση των δυο στρώσεων ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες γυαλιού.

Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που προηγήθηκε αι λαμβάνοντας υπόψη το σχολιασμό που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούμε να προβούμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όσο αυξάνεται το ποσοστό περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ κατ' όγκο στο μίγμα η μέση θλιπτική αντοχή μειώνεται τόσο στα περισφιγμένα ανεξαρτήτου αριθμού στρώσεων περισφιγξης όσο και στα απερίσφικτα δοκίμια.
- Τα περισφιγμένα δοκίμια έχουν υψηλότερη αντοχή και μάλιστα αυξάνοντας τον αριθμό των στρώσεων της περισφιγξης αυξάνεται ακόμα περισσότερο η αντοχή τους.
- Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας τόσο στα απερίσφικτα δοκίμια, όσο και στα περισφιγμένα δοκίμια ανεξαρτήτου τρόπου περισφιγξης.
- Η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι διγραμμικού τύπου ανεξαρτήτως περιεκτικότητας σε καουτσούκ, τύπου περισφιγξης ή και ο συνδυασμός των δύο. Το ίδιο συμπέρασμα έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία (Τριανταφύλλου, 2004).
- Η περιεκτικότητα του αέρα στα μίγματα σκυροδέματος που περιέχουν κόκκους καουτσούκ είναι υψηλότερη από αυτή του μίγματος συμβατικού σκυροδέματος. Το ίδιο συμπέρασμα έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία (Medina et al., 2018).
- Αντίθετα από την βιβλιογραφία (Siddika et al., 2019), (Medina et al., 2018) τα μίγματα με κόκκους καουτσούκ παρουσίασαν μεγαλύτερη κάθιση από αυτό του συμβατικού σκυροδέματος επομένως το σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ εμφανίζει μεγαλύτερη εργασιμότητα.
- Όσο αυξάνονται οι στρώσεις περισφιγξης αυξάνεται και η αντοχή και η διαμήκης παραμόρφωση σε κάθε ομάδα δοκιμίων.
- Τόσο στα περισφιγμένα όσο και στα απερίσφικτα δοκίμια όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητα σε καουτσούκ τόσο υψηλότερη είναι η αντοχή. Αντιστρόφως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ αυξάνεται και η παραμορφωσιμότητα των δοκιμίων.
- Όσο πιο μεγάλη ήταν η περιεκτικότητα του μίγματος σε καουτσούκ τόσο αυξάνεται η αποδοτικότητα της περισφιγξης.
- Η μείωση στην αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη για τα απερίσφικτα δοκίμια ενώ αυξάνοντας τις στρώσεις περισφιγξης το ποσοστό μείωσης της αντοχής μειώνεται.
- Η ενίσχυση με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες από γυαλί συμπεριφέρεται καλύτερα έναντι στην ενίσχυση με ινοπλισμένο πολυμερές από άνθρακα όσο αφορά τη δυνατότητα παραμόρφωσης όπως επίσης είχε συμπεράνει και ο Τριανταφύλλου (2004).

- Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της αντοχής στα μίγματα που περιέχουν κόκκους καουτσούκ και είναι περισφιγμένα με μανδύα από ίνες γυαλιού έναντι αυτών από ίνες άνθρακα.
- Παρόλο που αλλάζει το υλικών των υφασμάτων περισφιγξης οι αντοχές των ομάδων δοκιμών κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα για ίσο αριθμό στρώσεων.
- Μόνο στα δοκίμια της ομάδας CM επιβεβαιώθηκε η μεγαλύτερη αντοχή των περισφιγμένων δοκιμών με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα, το οποίο αναμενόταν βάσει της δυστένειας που είχε υπολογισθεί. Στις άλλες ομάδες η περισφιγξη με ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού πρόσδιδε μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια.
- Όσον αφορά στην καταγραφή των εγκάρσιων παραμορφώσεων, τα αποτελέσματα κρίνονται αναξιόπιστα και δεν παρουσιάζονται σε διαγράμματα καθώς παρατηρήθηκε ότι η καταγραφή των παραμορφώσεων αφορούσε σε σημειακές τιμές και όχι σε μέσους όρους. Θα έπρεπε να μπει μεγάλο πλήθος αισθητήρων σε όλη τη περίμετρο του κυλίνδρου προκειμένου να καταγραφούν οι μέγιστες παραμορφώσεις.

Κεφάλαιο 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASTM C39 / C39M-18, (2018) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA
2. Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T. and Hassanli, R. (2017). Behavior of rubberized concrete under active confinement. *Construction and Building Materials*, 138, pp.372-382.
3. Grc.sika.com. (2020). *Sika Hellas ABEE group*. [online] Available at: <https://grc.sika.com> [Accessed 17 Feb. 2020].
4. Medina, N., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. and Raffoul, S. (2018). Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. *Construction and Building Materials*, 188, pp.884-897.
5. Papakonstantinou C., Tobolski M., (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete, *Cem. Concr. Res.* 36 1686–1691.
6. Raffoul, S., Garcia, R., Escolano-Margarit, D., Guadagnini, M., Hajirasouliha, I. and Pilakoutas, K. (2017). Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression. *Construction and Building Materials*, 147, pp.388-397.
7. Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. and Medina, N. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 124, pp.391-404.
8. Raffoul, S., Garcia, R., Κούτας, Λ., Αθανασοπούλου, Σ. and Πηλακούτας, Κ. (2018). Χρήση καουτσούκ από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων για τη δημιουργία σκυροδέματος υψηλής παραμορφωσιμότητας. In: *Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*. Αθήνα.
9. Siddika, A., Mamun, M., Alyousef, R., Amran, Y., Aslani, F. and Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, pp.711-731.
10. Youssf, O., Hassanli, R. and Mills, J. (2017). Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content. *Journal of Building Engineering*, 11, pp.115-126.
11. Κατσιάνας, Σ. (2019). *Μηχανικές Ιδιότητες “Πράσινου” Σκυροδέματος με Ινοπλισμένα Πολυμερή*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2019
12. Ρίστας, Γ. (2018). *Σύγκριση Μοντέλων Ανάλυσης Περισιφισμένης Αντοχής Σκυροδέματος με Χρήση Σύνθετων Υλικών*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2018

13. Τριανταφύλλου, Α. (2004). *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)*. 2^η έκδοση Πάτρα: [Α. Χ. Τριανταφύλλου].
14. Τριανταφύλλου, Α. (2013). *Δομικά Υλικά*. 10^η έκδοση Πάτρα: [Α. Χ. Τριανταφύλλου].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παράρτημα Α παρατίθεται για λόγους πληρότητας το ημερολόγιο των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης του πειραματικού προγράμματος αυτής της διπλωματικής.

Ημερομηνία	Περιγραφή
21/02	Παρασκευή 6 δοκιμαστικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος αλλά και δοκιμών με 100% αντικατάσταση σε rubber προκειμένου να δούμε τι αντοχή βγάζει το συγκεκριμένο μίγμα
28/02	Πειραματική δοκιμή των 6 δοκιμαστικών δοκιμών
28/02	Σκυροδέτηση 60lt μίγματος συμβατικού σκυροδέματος (Control Mix)
05/03	Ξεκαλούπωμα των δοκιμών
06/03	Σκυροδέτηση 60lt μίγματος με 100% αντικατάσταση αδρανών σε rubber
12/03	Ξεκαλούπωμα των δοκιμών
14/03	Σκυροδέτηση 60lt μίγματος με 75% αντικατάσταση αδρανών σε rubber
19/03	Ξεκαλούπωμα των δοκιμών
21/03	Σκυροδέτηση 60lt μίγματος με 50% αντικατάσταση αδρανών σε rubber
26/03	Ξεκαλούπωμα των δοκιμών
28/03	Σκυροδέτηση 60lt μίγματος με 25% αντικατάσταση αδρανών σε rubber
02/04	Ξεκαλούπωμα των δοκιμών
05/06	Δοκιμές απερίσφυκτων δοκιμών (3άδα δοκιμών)
06/06	Δοκιμές δοκιμών 1 layer carbon (3άδα δοκιμών)
07/06	Κάποιες δοκιμές 2 layer carbon
24/06	Δοκιμές δοκιμών 2 layer carbon (3άδα δοκιμών)
26/11	Δοκιμές δοκιμών 1&2 layer glass (1 δοκίμιο)
05/12	Δοκιμές δοκιμών 1&2 layer glass (3άδα δοκιμών)
11/12	Δοκιμές δοκιμών 1&2 layer glass (5άδα δοκιμών)
12/12	Δοκιμές δοκιμών 1&2 layer carbon (4άδα δοκιμών)
16/12	Δοκιμές δοκιμών 1&2 layer carbon (5άδα δοκιμών)
19/12	Δοκιμές απερίσφυκτων δοκιμών (5άδα δοκιμών)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν από τα strain gauges και όχι μόνο τα μέγιστα και αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στην διπλωματική αυτή εργασία. Να σημειωθεί ότι οι κόκκινες τιμές στον πίνακα εξαιρέθηκαν καθώς δεν ήταν αντιπροσωπευτικές για διάφορους λόγους.

		Load (kN)	fc (Mpa)	Average fc	Stroke	ϵ_v	ϵ_h
CM	CM_UC_1	378.5619148	48.2	46.8	0.89113	761.08	-
	CM_UC_2	356.1780671	45.35		1.01686	1694.8	-
	CM_UC_3	296.4878067	37.75		1.04835	1302.37	-
	CM_1LC_1	558.8107933	71.15	70.4	4.24653	10148.39	5612.28
	CM_1LC_2	520.5619027	66.28		-	6273.61	5462.19
	CM_1LC_3	578.3672075	73.64		-	11328.72	12188.01
	CM_2LC_1	835.41	106.3677	111.5	6.01353	15147.46	16508
	CM_2LC_2	930.1	118.424		6.04477	22076.24	18240
	CM_2LC_3	860.73	109.5915		5.6809	17340.64	13572.6
	CM_1LG_1	554.96	70.6597	70.2	3.3479	5658.188	6913.61
	CM_1LG_2	484.2	61.65026		-	-	-
	CM_1LG_3	605.1	77.04372		-	-	-
	CM_1LG_4	561.96261	71.5513		3.24456	5900.08	-
	CM_2LG_1	677.32	86.23906	98.5	4.43105	10343.8	14982.7
	CM_2LG_2	725.4	92.3608		-	-	-
	CM_2LG_3	793.7	101.057		-	-	-
CM_2LG_4	897.7	114.2987	-		14489.32	-	
R25	R25_UC_1	319.2643534	40.65	38.9	0.93468	2102.073	-
	R25_UC_2	312.588469	39.8		0.7	1887.18	-
	R25_UC_3	285.8063917	36.39		0.95904	839.88	-
	R25_1LC_1	483.8052687	61.6	62.5	4.3693	15150.06	1792.34
	R25_1LC_2	479.9568177	61.11		4.22439	12314.3	2785.4
	R25_1LC_3	508.7809302	64.78		4.43228	8441.45	2265.75
	R25_2LC_1	706.33	89.93273	94.5	5.79088	26888.87	15686.1
	R25_2LC_2	752.51	95.81255		6.12069	15268.34	10056.7
	R25_2LC_3	767.87	97.76824		7.29685	24349.13	10018.1
	R25_1LG_1	509.17	64.82954	62.8	3.66096	19000.14	19539.1
	R25_1LG_2	482.3	61.40834		-	-	-
	R25_1LG_3	487.6	62.08316		-	-	-
	R25_2LG_1	825.6	105.1187	102.4	6.45774	18366.96	19845.1
	R25_2LG_2	810.1	103.1451		-	-	-

		Load (kN)	fc (Mpa)	Average fc	Stroke	ϵ_v	ϵ_h
	R25_2LG_3	776.8	98.90525		-	-	-
R50	R50_UC_1	229.2577239	29.19	30.5	0.70949	2101.771	-
	R50_UC_2	242.2167936	30.84		0.7464	810.22	-
	R50_UC_3	246.0652446	31.33		0.76516	1618.07	-
	R50_1LC_1	425.1360258	54.13	54.0	3.4885	10687.67	7858.86
	R50_1LC_2	421.6017341	53.68		3.7515	6760.37	2183.88
	R50_1LC_3	425.1360258	54.13		4.7086	12100.23	4881.47
	R50_2LC_1	59	7.512113	82.4	-	-	-
	R50_2LC_2	692.77	88.20622		5.8851	10725.4	14677.3
	R50_2LC_3	610.06	77.67525		6.55284	28000.27	15533.6
	R50_2LC_4	639.57475	81.43319		4.50424	6479.667	
	R50_1LG_1	495.7	63.11448	57.9	4.01095	15987.48	17287.9
	R50_1LG_2	412.4	52.5084		-	-	-
	R50_1LG_3	456.8	58.16158		-	-	-
	R50_2LG_1	647.7	82.46773	86.4	5.08304	21800.44	13150.56
	R50_2LG_2	697.5	88.80846		6.17357	-	-
	R50_2LG_3	667.9	85.03967		-	-	-
R50_2LG_4	697.89482	88.85873	6.43069		19748.3	-	
R50_2LG_5	680.37907	86.62855	5.84265		-	18067	
R75	R75_UC_1	209.8583893	26.72	27.5	0.69849	1031.63	-
	R75_UC_2	215.513256	27.44		0.77869	2277.271	-
	R75_UC_3	222.1891404	28.29		0.8	671.87	-
	R75_1LC_1	376.1271805	47.89	47.4	3.31504	16500.83	2472.77
	R75_1LC_2	374.6349239	47.7		3.25526	10732.82	6482.87
	R75_1LC_3	366.2311636	46.63		3.47054	8314.12	7677.4
	R75_2LC_1	608.59	77.48809	77.3	6.32737	30000.17	12177.5
	R75_2LC_2	575.33	73.25329		6.43192	-	-
	R75_2LC_3	588.36	74.91232		6.42393	-	-
	R75_2LC_4	656.00503	83.52515		5.88264	10542.18	-
	R75_1LG_1	402.4	51.23516	51.0	3.15906	17223.07	16634.4
	R75_1LG_2	409.9	52.19009		-	-	-
	R75_1LG_3	388.2	49.42716		-	-	-
R75_2LG_1	625	79.57747	79.9	5.78361	33000.68	17357	
R75_2LG_2	617.6	78.63527		-	-	-	
R75_2LG_3	641	81.61465		-	-	-	