



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΜΕ  
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ**

**ΙΩΑΝΝΑ ΣΚΥΡΙΑΝΟΥ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2020

© 2020 Ιωάννα Σκυριανού

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. Χρήστος Παπακωνσταντίνου  
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Λάμπρος Κούτας  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παναγιώτης Γουργιώτης  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου και μου παρείχαν ηθική υποστήριξη. 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 διπλωματικής μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα για τις χρήσιμες υποδείξεις και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον συμφοιτητή μου Αγαθόπουλο Χρήστο για την αγαστή μας συνεργασία στο εργαστήριο κατά την εκπόνηση των διπλωματικών μας και τον κ. Κουτσελίνη Αλέξανδρο, μέλος ΕΤΕΠ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος.

Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Ειδικότερα, θέλω να ευχαριστήσω τις αδερφές μου, που μου πρόσφεραν τις πολύτιμες συμβουλές τους. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την υποστήριξη και την υπομονή που έδειξαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου.

Ιωάννα Σκυριανού

# ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ

Ιωάννα Σκυριανού

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2020

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

## Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ περισφιγμένου με σύνθετα υλικά σε ανόργανη μήτρα. Για αυτό το σκοπό έγινε παρασκευή 5 μειγμάτων σκυροδέματος, 1 συμβατικού και 4 στα οποία έγινε αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ κατ' όγκο. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν διαστάσεων 100x200 mm. 3 δοκίμια από κάθε μείγμα περισφίχθηκαν με πλέγμα ινών βασάλτη, με 1 και 2 στρώσεις του πλέγματος, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε απερίσφιγκτα και περισφιγμένα δοκίμια. Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη κόκκων καουτσούκ στο σκυρόδεμα μειώνει την θλιπτική αντοχή και το μέτρο Ελαστικότητας, ενώ αυξάνει σημαντικά τις παραμορφώσεις. Παράλληλα, αυξάνεται η περιεκτικότητα σε αέρα και μειώνεται η πυκνότητα του σκυροδέματος. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ του μείγματος. Όταν το σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ περισφιχθεί, αυξάνονται τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και οι παραμορφώσεις. Η αποδοτικότητα της περισφίγξης είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ και του αριθμού των στρώσεων. Τέλος, η αστοχία των δοκιμίων γίνεται λιγότερο ψαθυρή όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε καουτσούκ και χαρακτηρίζεται από έντονη εγκάρσια διόγκωση.

**Λέξεις κλειδιά:** Σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ, κόκκοι καουτσούκ, ανακύκλωση ελαστικών, περισφίγξη, ΙΑΜ, ανόργανη μήτρα, πλέγμα βασάλτη, μονοαξονική θλίψη.

## **Abstract**

The main goal of this thesis is the experimental evaluation of the mechanical properties of rubberised concrete confined with textiles in inorganic matrix. As a result, 5 concrete mixes were produced, 1 of them was plain concrete and 4 had part of the natural aggregates replaced with rubber particles by volume. The specimens' dimensions were 100x200 mm. 3 specimens from each mix were confined with 1 and 2 layers of basalt textile, respectively. Then both confined and unconfined specimens were tested under uniaxial loading. From the results, it was concluded that the use of rubber particles decreases the compressive strength and the modulus of Elasticity of the concrete, whereas it increases its strain. Moreover, the air content of rubberised concrete increases while its density decreases. Those properties depend on the content of rubber particles in the concrete mix. When rubberised concrete is confined, both the compressive strength and strain increase. The efficiency of the confinement is influenced by the rubber content and the number of confinement layers. In conclusion, the failure mode of the specimens is less brittle when the rubber content increases and is characterised by significant lateral dilation.

**Keywords:** Rubberised concrete, rubber particles, waste tyre recycling, confinement, TRM, inorganic matrix, basalt textile, uniaxial compression.

## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος σχημάτων .....	ix
Κατάλογος πινάκων.....	xii
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Χρήση ανακυκλωμένων υλικών για την παραγωγή σκυροδέματος.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	3
<b>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....</b>	<b>4</b>
2.1 Χρήση κόκκων καουτσούκ για την παρασκευή σκυροδέματος.....	4
2.1.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος .....	5
2.1.2 Μηχανικές ιδιότητες .....	7
2.2 Περίσφιξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά.....	11
2.2.1 Περίσφιξη συμβατικού σκυροδέματος .....	16
2.2.2 Περίσφιξη σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ .....	19
<b>Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρόγραμμα .....</b>	<b>22</b>
3.1 Υλικά .....	22
3.1.1 Φυσικά αδρανή .....	22
3.1.2 Κόκκοι καουτσούκ.....	23
3.1.3 Τσιμέντο .....	24
3.1.4 Υπερρυστοποιητής .....	24
3.1.5 Πλέγμα ινών βασάλτη .....	24
3.1.6 Μήτρα ενίσχυσης .....	25
3.2 Σχεδιασμός μειγμάτων σκυροδέματος .....	26
3.3 Προετοιμασία δοκιμίων .....	27
3.3.1 Σκυροδετήσεις.....	27
3.3.2 Ενισχύσεις – περισφίξεις.....	30

3.3.3 Επιπέδωση επιφανειών δοκιμίων και εφαρμογή διάταξης αισθητήρων παραμόρφωσης.....	32
3.4 Πειραματική διάταξη.....	33
3.4.1 Ποτενσιόμετρα .....	33
3.4.2 Μηχανή μονοαξονικής θλίψης.....	34
3.4.3 Μονοαξονική θλίψη .....	34
<b>Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός.....</b>	<b>36</b>
4.1 Κάθιση .....	39
4.2 Περιεχόμενος αέρας.....	40
4.3 Πυκνότητα .....	41
4.4 Θλιπτική αντοχή .....	42
4.5 Διαγράμματα σ-ε και μέτρο Ελαστικότητας .....	45
4.6 Παραμορφώσεις – Διαγράμματα P-δ .....	48
4.7 Μορφές αστοχίας.....	54
4.7.1 Απερίσφιγκτα δοκίμια.....	54
4.7.2 Περισφιγμένα δοκίμια .....	55
<b>Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....</b>	<b>58</b>
<b>A. Παράρτημα.....</b>	<b>60</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>63</b>



## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1. Ποσοστά ανάκτησης, συλλογής και επαναχρησιμοποίησης μεταχειρισμένων ελαστικών (σε τόνους) την περίοδο 2004-2015 στην Ελλάδα (Πηγή: Ε.Ο.ΑΝ.).....	2
Σχήμα 2-1. Αδρανή από καουτσούκ σε (α) κομμάτια (chips), (β) τρίμματα (crumb), (c) κόκκους (granular), (d) ίνες (fibers) (Siddika et al., 2019). .....	5
Σχήμα 2-2. (α) Πυκνότητα και (β) κάθιση νωπού σκυροδέματος (Su et al., 2015). .....	6
Σχήμα 2-3. Μεταβολές της θλιπτική αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης και μεγέθη κόκκων καουτσούκ (Torcu, 1995).....	8
Σχήμα 2-4. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Α) κόκκοι καουτσούκ και (Β) τσιμεντοπολτός. Κόκκοι καουτσούκ (α) χωρίς και (β) με επιφανειακή επεξεργασία με NaOH (Segre & Joekes, 2000)....	9
Σχήμα 2-5. Διάγραμμα σ-ε για διάφορες περιεκτικότητες κόκκων καουτσούκ (Siddika et al., 2019). ..	10
Σχήμα 2-6. Υφάσματα από ίνες (α) γυαλιού, (β) άνθρακα, (γ) αραμιδίου (Δερουκάκη, 2020). .....	12
Σχήμα 2-7. Ινοπλέγματα δύο κατευθύνσεων από ίνες (α) άνθρακα, (b) γυαλιού, (c) βασάλτη, (d) πολυφαινυλενο-βενζο-δισθειαζόλη (PBO). (Koutas et al., 2019).....	12
Σχήμα 2-8. (α) ΙΟΠ από ίνες γυαλιού (Στρουμπούλης, 2020), (b) ΙΑΜ από ίνες άνθρακα (Bournas et al., 2007).....	13
Σχήμα 2-9. (α) Αξονική καταπόνηση υποστρώματος με μανδύα σύνθετων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης. (Τριανταφύλλου, 2004) .....	14
Σχήμα 2-10. Διάγραμμα σ-ε για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά (Τριανταφύλλου, 2013). .....	15
Σχήμα 2-11. Διάγραμμα σ-ε σκυροδέματος σε θερμοκρασία 20°C (α) απερίσφιγκτου 20C, (β) περισφιγμένου με 1 στρώση CFRP 20W, (γ) περισφιγμένο με 1 στρώση ΙΑΜ από ΡΒΟ 20Μ (Τραρκο, 2013).....	17
Σχήμα 2-12. Αστοχίες περισφιγμένου σκυροδέματος με (α) ΙΑΜ, (b) ΙΟΠ (Τραρκο, 2013).....	17
Σχήμα 2-13. Διαγράμματα σ-ε περισφιγμένου σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ: (α) επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ, (b) επιρροή των στρώσεων της ενίσχυσης. (Chan et al., 2019).....	20
Σχήμα 2-14. Μορφή αστοχίας περισφιγμένων δοκιμίων με δύο στρώσεις ΙΟΠ και ποσοστό περιεκτικότητας σε καουτσούκ 0%, 30% και 60% (Bompra & Elghazouli, 2020).....	20
Σχήμα 3-1. Μηχανή κοσκίνισματος του ΕΤΚΟΣ. ....	23

Σχήμα 3-2. Κλάσματα φυσικών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν. ....	23
Σχήμα 3-3. Κόκκοι καουτσούκ που χρησιμοποιήθηκαν μεγέθους (α) 2-4 mm και (β) 4-8 mm. ....	24
Σχήμα 3-4. Πλέγμα ινών βασάλτη που χρησιμοποιήθηκε. ....	25
Σχήμα 3-5. (α) Τσιμεντοειδής κονία ενίσχυσης, (β) πρισματικό δοκίμιο κονιάματος. ....	25
Σχήμα 3-6. Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος CM. ....	26
Σχήμα 3-7. Ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ κατά βάρος ως προς το CM. ....	27
Σχήμα 3-8. Ο αναδευτήρας του ΕΤΚΟΣ. ....	28
Σχήμα 3-9. Δοκιμή κάθισης στο ΕΤΚΟΣ. ....	28
Σχήμα 3-10. Η συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα του ΕΤΚΟΣ. ....	29
Σχήμα 3-11. (α) Πλαστικό καλούπι 100x200 mm, (β) νωπό σκυρόδεμα εντός των καλουπιών, (γ) συντήρηση των δοκιμίων στο ΕΤΚΟΣ. ....	30
Σχήμα 3-12. Παρασκευή κονιάματος για την περίσφιγξη. ....	31
Σχήμα 3-13. Εφαρμογή περίσφιγξη σε δοκίμιο σκυροδέματος. ....	31
Σχήμα 3-14. (α) Δοκίμιο αμέσως μετά την εφαρμογή ενίσχυσης, (β) Δοκίμιο μετά τη σκλήρυνση της ενίσχυσης. ....	32
Σχήμα 3-15. Δοκίμιο μετά την εφαρμογή ντιζών και καπελώματος. ....	33
Σχήμα 3-16. Ποτενσιόμετρο του ΕΤΚΟΣ. ....	33
Σχήμα 3-17. Μηχανή μονοαξονικής θλίψης του ΕΤΚΟΣ. ....	34
Σχήμα 3-18. Πειραματική διάταξη. ....	35
Σχήμα 4-1. Κάθιση των μειγμάτων σκυροδέματος. ....	39
Σχήμα 4-2. Περιεχόμενος αέρας των μειγμάτων σκυροδέματος. ....	40
Σχήμα 4-3. Δοκίμιο R75 με σημάδια υγρασίας και πόρους. ....	41
Σχήμα 4-4. Πυκνότητα μειγμάτων σκυροδέματος. ....	42
Σχήμα 4-5. Θλιπτικές αντοχές μειγμάτων χωρίς περίσφιγξη και με 1 και 2 στρώσεις περίσφιγξης. ....	43
Σχήμα 4-6. Ρυθμός μείωσης θλιπτικής αντοχής ως προς την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. ....	43
Σχήμα 4-7. Αύξηση θλιπτικής αντοχής κάθε μείγματος για περίσφιγξη με 1 και 2 στρώσεις. ....	44

Σχήμα 4-8. Μέτρα Ελαστικότητας μειγμάτων χωρίς περισφιγξη και με 1 και 2 στρώσεις περισφιγξης. .....	46
Σχήμα 4-9. Διάγραμμα σ-ε δοκιμίου R25 με 2 στρώσεις περισφιγξης. ....	47
Σχήμα 4-10. Διάγραμμα σ-ε από κάθε μείγμα χωρίς περισφιγξη. ....	48
Σχήμα 4-11. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα χωρίς περισφιγξη. ....	49
Σχήμα 4-12. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα με 1 στρώση περισφιγξης.....	50
Σχήμα 4-13. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα με 2 στρώση περισφιγξης.....	50
Σχήμα 4-14. Διαγράμματα P-δ μείγματος CM για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη. ....	52
Σχήμα 4-15. Διαγράμματα P-δ μείγματος R25 για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.....	52
Σχήμα 4-16. Διαγράμματα P-δ μείγματος R50 για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.....	53
Σχήμα 4-17. Διαγράμματα P-δ μείγματος R75 για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.....	53
Σχήμα 4-18. Διαγράμματα P-δ μείγματος R100 για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.....	54
Σχήμα 4-19. Μορφές αστοχίας απερισφιγκτων δοκιμίων (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100. .....	55
Σχήμα 4-20. Μορφές αστοχίας περισφιγμένων δοκιμίων με 1 στρώση (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100. ....	56
Σχήμα 4-21. Μορφές αστοχίας περισφιγμένων δοκιμίων με 2 στρώσεις (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100. ....	57

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3-1. Αναλογίες μειγμάτων σκυροδέματος σε kg για 1 m <sup>3</sup> .....	27
Πίνακας 4-1. Αποτελέσματα μετρήσεων απερίσφιγκτων δοκιμίων.....	37
Πίνακας 4-2. Αποτελέσματα μετρήσεων περισφιγμένων δοκιμίων.....	38
Πίνακας 4-3. Αποτελέσματα μετρήσεων μειγμάτων.....	39
Πίνακας Α-1. Αναλογίες των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν στο ΕΤΚΟΣ.....	60
Πίνακας Α-2. Ημερομηνία σκυροδέτησης, ενίσχυσης και θλίψης των δοκιμίων. ....	61

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

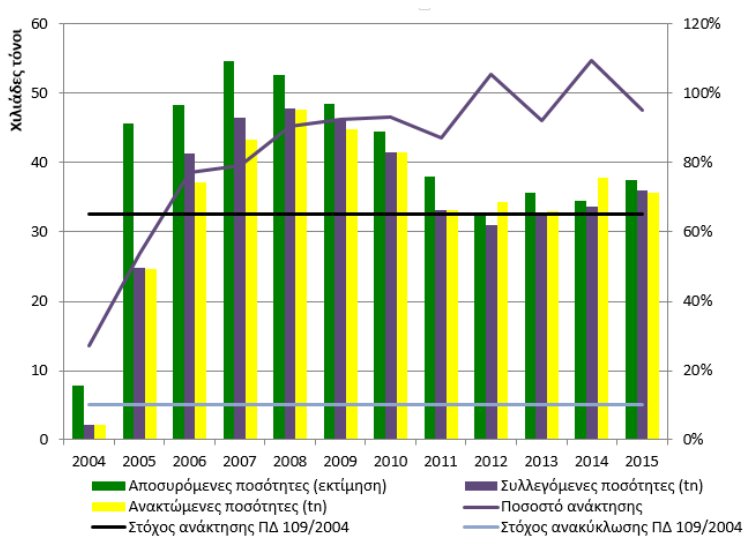
## 1.1 Χρήση ανακυκλωμένων υλικών για την παραγωγή σκυροδέματος

Η κλιμάκωση της περιβαλλοντικής κρίσης έχει οδηγήσει σε συνεχή αναζήτηση «πράσινων» λύσεων που θα ανακουφίσουν τις δυσμενείς επιδράσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη. Οι επιδράσεις αυτές αντανακλώνται σε διάφορους κλάδους, πολιτικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς, οδηγώντας έτσι στην εντατικοποίηση της προσπάθειας εύρεσης λύσεων. Μία από αυτές, σε μια προσπάθεια ένταξης της βιώσιμης ανάπτυξης και προστασίας του περιβάλλοντος, είναι η χρήση υλικών που προέρχονται από την ανακύκλωση. Ειδικότερα, τα τελευταία χρόνια η ανακύκλωση αποτελεί μέρος της καθημερινότητας του ανθρώπου με αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων, εξοικονόμηση ενέργειας και φυσικών πόρων, δίνοντας παράλληλα ώθηση στην κυκλική οικονομία. Η εντατικοποίηση αυτής της προσπάθειας έχει επηρεάσει και την βιομηχανία, όπου γίνεται προσπάθεια μείωσης των αποβλήτων και επαναχρησιμοποίηση ενέργειας και υλικών.

Ένας από τους κλάδους όπου άρχισε να εντάσσεται η ιδέα της ανακύκλωσης είναι και ο κατασκευαστικός. Μία από τις προσπάθειες αφορά την παρασκευή σκυροδέματος, καθώς το σκυρόδεμα αποτελεί το πιο χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό (Siddika et al., 2019). Για την παραγωγή του απαιτούνται πετρώματα και φυσικά αδρανή, τα οποία υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία, ώστε να παρασκευαστεί η πρώτη ύλη του σκυροδέματος, το τσιμέντο. Επίσης, για την παρασκευή σκυροδέματος απαιτούνται επιπλέον αδρανή με ειδική κοκκομετρική διαβάθμιση τα οποία πρέπει να αναμειχθούν με τσιμέντο και νερό (Τριανταφύλλου, 2013). Δηλαδή, η διαδικασία αυτή απαιτεί πληθώρα φυσικών πόρων και ενέργειας, για αυτό άρχισε να εισάγεται η ιδέα της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών που θα αντικαταστήσουν τα αδρανή στην παραγωγή σκυροδέματος. Τέτοια υλικά είναι αδρανή που προέρχονται από υλικά κατεδάφισης, αδρανή από ανακυκλωμένο γυαλί και αδρανή από κόκκους καουτσούκ από ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων. Ωστόσο, τροχοπέδη αποτελεί η εύρεση του κατάλληλου υλικού και περιεκτικότητας, ώστε το παραγόμενο σκυρόδεμα να έχει επαρκείς μηχανικές ιδιότητες.

Η έρευνα τα τελευταία χρόνια, σύμφωνα με τους Raffoul et al. (2017) επικεντρώνεται στην χρήση των κόκκων καουτσούκ από ανακυκλωμένα ελαστικά, καθώς η καύση, η απορριψη ή και ταφή των ελαστικών εγκυμονεί πολλούς περιβαλλοντικούς κινδύνους και καταστρέφει το φυσικό περιβάλλον. Η καύση τους εκλύει πληθώρα αέριων ρύπων επικίνδυνους για την δημόσια υγεία. Επίσης, η εναπόθεσή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι δυσλειτουργική, αφού το καουτσούκ είναι ένα πολύ εύφλεκτο υλικό και δεν είναι βιοδιασπώμενο, με αποτέλεσμα να ρυπαίνει το υπέδαφος και το υπόγειο νερό, να αποτελεί εστία πυρκαγιών ή και χώρο αναπαραγωγής εντόμων. Γι' αυτό και πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν θέσει σε εφαρμογή νομοθεσίες που απαγορεύουν την ταφή των ελαστικών δίνοντας την ευκαιρία για επανάχρησή τους σε άλλες εφαρμογές.

Ειδικότερα στην Ελλάδα, σύμφωνα με τον Ε.Ο.ΑΝ., η ανακύκλωση ελαστικών ξεκίνησε το 2004. Αποτέλεσμα είναι η ανάκτηση καουτσούκ σε μορφή κόκκων ή πούδρας για επαναχρησιμοποίηση αλλά και η χρήση του για παραγωγή ενέργειας, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αέριων ρύπων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, ανακτώνται μέταλλα, όπως ο σίδηρος και ο χάλυβας, και υφάσματα που περιέχονται στα ελαστικά με μορφή ινών. Συνεπώς, υπάρχει μείωση του ποσοστού ελαστικών που απορρίπτεται στους ΧΥΤΑ και αύξηση της επαναχρησιμοποίησης τους (Σχήμα 1-1) σε εφαρμογές, όπως σε τεχνητούς τάπητες γηπέδων, επιστρώσεις δρόμων, ως ηχομονωτικό υλικό κ.ά.



Σχήμα 1-1. Ποσοστά ανάκτησης, συλλογής και επαναχρησιμοποίησης μεταχειρισμένων ελαστικών (σε τόνους) την περίοδο 2004-2015 στην Ελλάδα (Πηγή: Ε.Ο.ΑΝ.)

Σύμφωνα με τους Siddika et al. (2019) χρήση των ελαστικών ως αδρανή στην παραγωγή σκυροδέματος αποτελεί αντικείμενο ερευνητικού ενδιαφέροντος και έχει ενταχθεί στη βιομηχανία παραγωγής του σε περιορισμένες εφαρμογές. Αυτό συμβαίνει γιατί επιφέρει αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, με κύριες την μείωση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, αύξηση των εγκάρσιων παραμορφώσεων και της πλαστιμότητας. Ιδιαίτερα η αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους ελαστικών αυξάνει την μείωση της αντοχής με αποτέλεσμα αυτός ο τύπος σκυροδέματος να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με μεγάλη απαίτηση αντοχής. Ωστόσο, θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση για εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς την απαίτηση μεγάλης αντοχής, όπως σε οδοστρώματα από πλάκες σκυροδέματος, συστήματα αναχαίτισης οχημάτων, πλίνθους από σκυρόδεμα κ.ά. (Segre & Joekes, 2000). Επιπρόσθετα, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας αποτελεί η ενίσχυσή του μέσω περισφιγξης με σύνθετα υλικά, η οποία μπορεί να προσδώσει αυξημένες αντοχές και πλαστιμότητα. Παράλληλα, εξετάζεται η εφαρμογή του σε μέλη που καταπονούνται από σεισμό, όπως τα υποστυλώματα και τα βάθρα γεφυρών, αφού οι ιδιότητες του ευνοούν την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας (Yousf, ElGawady, et al., 2016).

## **1.2 Αντικείμενο της εργασίας**

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς δοκιμίων σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ από ανακυκλωμένα ελαστικά (rubberised concrete ή (crumb) rubber concrete). Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει παρασκευή κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος διαστάσεων 100x200 mm, τα οποία υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Για αυτό το σκοπό παρασκευάστηκαν 5 μείγματα με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης με κόκκους καουτσούκ (0%, 25%, 50%, 75% και 100%) δύο κλασμάτων φυσικών αδρανών κατ' όγκο. Επιπλέον, μελετήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων λόγω περισφιγξης με συνθετικά υλικά και συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος. Η περισφιγξη επετεύχθη με ινοπλέγματα ινών βασάλτη εμποτισμένα σε ανόργανη τσιμεντοειδή μήτρα (Textile Reinforced Mortar – TRM) και μελετήθηκε η αποδοτικότητά της για μία και δύο στρώσεις.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Χρήση κόκκων καουτσούκ για την παρασκευή σκυροδέματος

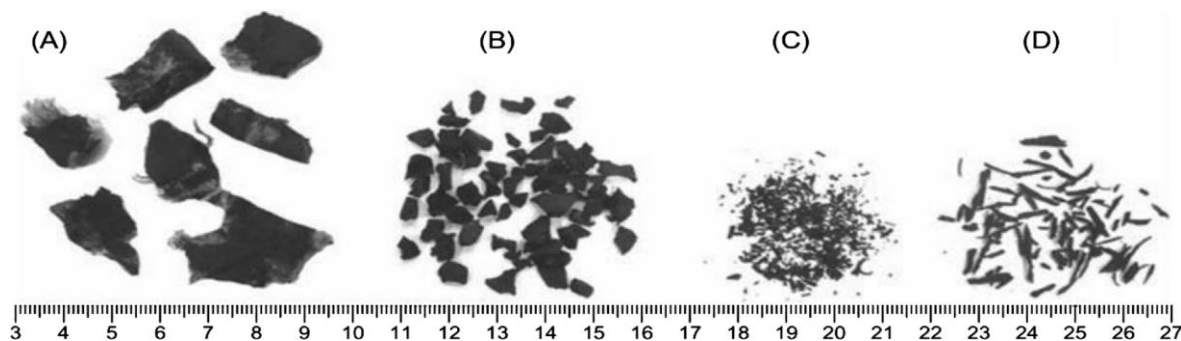
Η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή και χρήση των ελαστικών αυτοκινήτων έχει οδηγήσει στην προσπάθεια ανακύκλωσής τους, ώστε να αποφευχθούν οι δυσμενείς επιδράσεις της απόρριψής τους σε χωματερές. Ένας τρόπος ανακύκλωσης και επανάχρησής τους είναι ως αδρανή στην παραγωγή σκυροδέματος και κονιαμάτων. Η λύση αυτή έχει πολλαπλά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς έτσι μειώνονται εκτός των άλλων οι εκπομπές ρύπων κατά την παραγωγή σκυροδέματος.

Σχετικά με τα ελαστικά αυτοκινήτων, σύμφωνα με τους Siddika et al. (2019), αυτά αποτελούνται από διάφορες στρώσεις φυσικού και συνθετικού καουτσούκ, ενισχυτικά υφάσματα πολυμερών και ίνες από χάλυβα. Κατά την ανακύκλωσή τους, η οποία συνήθως γίνεται με τεμαχισμό και κοσκίνισμα των υλικών, διαχωρίζονται τα διάφορα υφάσματα και οι ίνες από τους κόκκους καουτσούκ και μπορούν επίσης να επαναχρησιμοποιηθούν. Μάλιστα, οι Parakonstantinou & Tobolski (2006) χρησιμοποίησαν ίνες χάλυβα που προήλθαν από ανακύκλωση ελαστικών στην παραγωγή σκυροδέματος αξιοποιώντας έτσι πλήρως τις δυνατότητες της ανακύκλωσης. Οι κόκκοι καουτσούκ μπορούν στη συνέχεια να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να διαμορφωθεί το μέγεθός τους. Ο συνήθης διαχωρισμός των μεγεθών φαίνεται στο Σχήμα 2-1, όπου παρατηρούνται (a) κομμάτια (chips), (b) τρίμματα (crumb), (c) κόκκοι (granular), (d) ίνες (fibers), ενώ μπορεί να τεμαχιστεί και σε μορφή πούδρας (powder) (συνήθως <0.5 mm).

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ είναι ένα θέμα που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα από τη δεκαετία του 1990 μέχρι και σήμερα (Eldin & Senouci, 1993; Torcu, 1995; Toutanji, 1996). Και αυτό γιατί η χρήση των κόκκων καουτσούκ επιφέρει πολλές αλλαγές στις ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω, με κυριότερη την μείωση της θλιπτικής αντοχής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διερεύνηση τα τελευταία χρόνια της εφαρμογής ενισχύσεων με σύνθετα υλικά, ώστε να αναιρεθούν οι δυσμενείς επιδράσεις. Για αυτό η χρήση του σε εφαρμογές είναι ακόμα περιορισμένη και ερευνάται διεξοδικά. Ένας ακόμη παράγοντας που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα, όπως διατυπώνεται από τις έρευνες των Youssf,



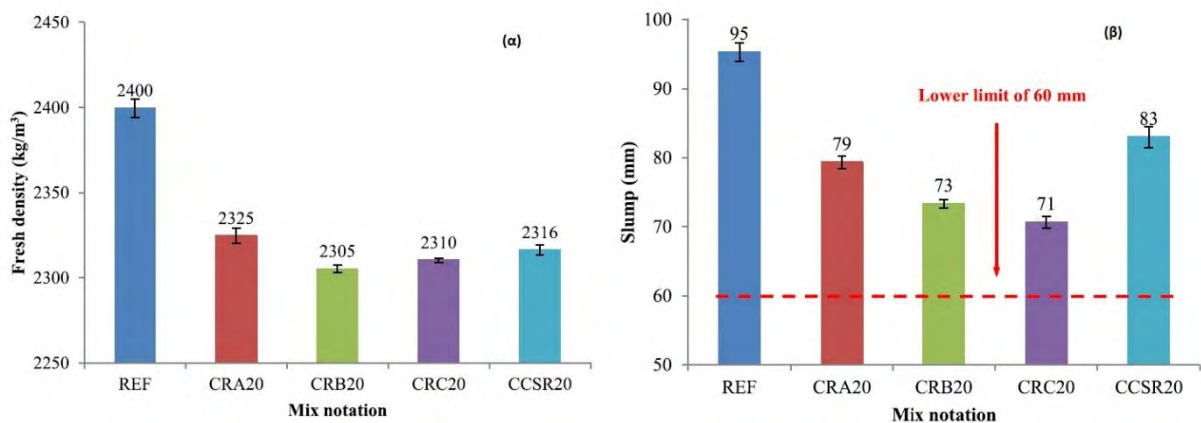
ElGawady, et al. (2016) και Youssf, Mills, et al. (2016) είναι το κόστος, καθώς το κόστος αγοράς των κόκκων καουτσούκ αλλά και των υλικών των ενισχύσεων αυξάνει το συνολικό κόστος παραγωγής σε σχέση με αυτό του συμβατικού σκυροδέματος.



Σχήμα 2-1. Αδρανή από καουτσούκ σε (a) κομμάτια (chips), (b) τρίμματα (crumb), (c) κόκκους (granular), (d) ίνες (fibers) (Siddika et al., 2019).

### 2.1.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ, οι οποίες διαφοροποιούνται από αυτές του συμβατικού σκυροδέματος. Όσον αφορά την πυκνότητα, έχει παρατηρηθεί μείωσή της με την προσθήκη των κόκκων καουτσούκ και εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων αλλά και την συνολική τους περιεκτικότητα στο μείγμα. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από την έρευνα των Su et al. (2015) η αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας κόκκων καουτσούκ μειώνει την πυκνότητα, γεγονός που αποδίδεται στην μικρότερη πυκνότητα των κόκκων καουτσούκ σε σχέση με τα φυσικά αδρανή, η οποία είναι περίπου το ένα τρίτο αυτής των φυσικών αδρανών. Ωστόσο, η ίδια έρευνα έδειξε ότι η πυκνότητα του σκυροδέματος διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων καουτσούκ που χρησιμοποιούνται. Όταν για την ίδια περιεκτικότητα καουτσούκ χρησιμοποιήθηκαν μόνο χονδρόκοκκοι (RA), η μείωση ήταν ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με την χρήση μόνο λεπτόκοκκων (RB και RC) ή καλώς διαβαθμισμένων κόκκων (CSR), ενώ αυτή του συμβατικού σκυροδέματος (REF) ήταν η αναμενόμενη (Σχήμα 2-2α).



Σχήμα 2-2. (α) Πυκνότητα και (β) κάθιση νωπού σκυροδέματος (Su et al., 2015).

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην εργασιμότητα, η οποία μετριέται με την κάθιση του νωπού σκυροδέματος (slump). Η αύξηση της περιεκτικότητας κόκκων καουτσούκ στο μείγμα μειώνει την κάθιση, ενώ η επίδραση των κόκκων μικρότερης διαμέτρου φαίνεται να είναι δυσμενέστερη, κάτι που συμπέραναν οι Su et al. (2015) και Youssf, Mills, et al. (2016) στις έρευνές τους. Αίτιο της μείωσης είναι η επιφάνεια των κόκκων καουτσούκ, η οποία είναι αδρότερη σε σχέση με αυτή των φυσικών αδρανών και οδηγεί σε αύξηση των τριβών μέσα στο μείγμα. Αντιθέτως, θετικό ρόλο φαίνεται να διαδραματίζει η καλύτερη διαβάθμιση αδρανών σε ένα μείγμα (δηλαδή αύξηση του μέτρου λεπτότητας), που συχνά επιτυγχάνεται όταν υπάρχουν ταυτόχρονα κόκκοι καουτσούκ και άμμος (Σχήμα 2-2β). Για να αντισταθμιστούν οι χαμηλές τιμές κάθισης προτείνεται η χρήση πρόσμεικτων και πρόσθετων, όπως οι (υπέρ-)ρευστοποιητές, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη, ή η επεξεργασία της επιφάνειας των κόκκων καουτσούκ (surface treatment), τεχνικές που αυξάνουν υπό προϋποθέσεις την κάθιση και την εργασιμότητα.

Μια ακόμη ιδιότητα είναι η περιεκτικότητα σε αέρα, η οποία μετριέται με ειδική δοκιμή στο νωπό σκυροδέμα. Ο αέρας που εγκλωβίζεται κατά την ανάμειξη του σκυροδέματος δημιουργεί κενά, τα οποία αυξάνονται με την χρήση λεπτόκοκκων αδρανών, αλλά μειώνονται με τη δόνηση. Η υψηλή περιεκτικότητα σε αέρα επηρεάζει αρνητικά τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, μειώνει την πυκνότητά του, αλλά αυξάνει την ανθεκτικότητα του σε παγετό (Τριανταφύλλου, 2013). Ωστόσο, η προσθήκη των κόκκων καουτσούκ στο μείγμα δείχνει να αυξάνει τα κενά σε σχέση με το συμβατικό σκυροδέμα. Η

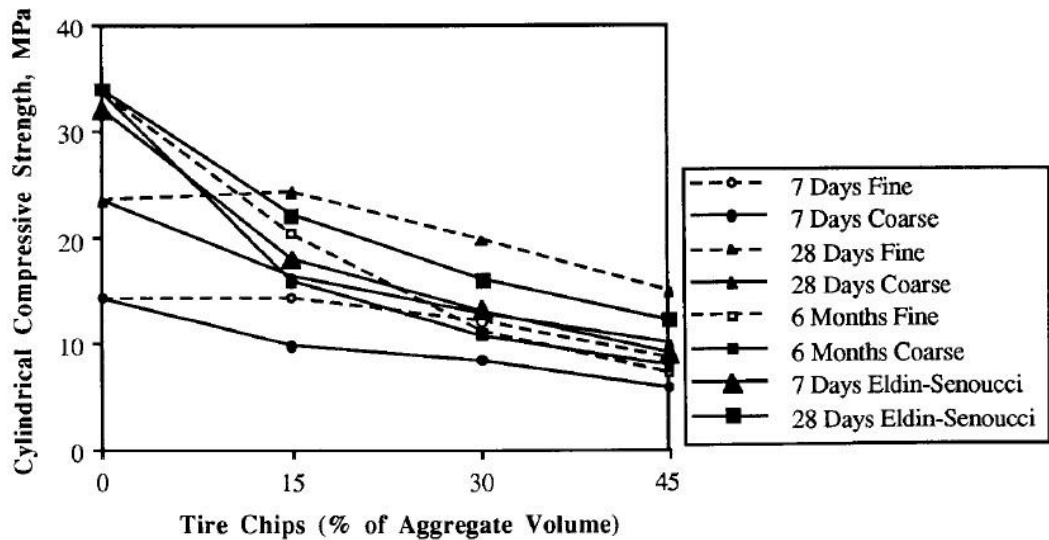
έρευνα των Raffoul et al. (2016) έδειξε ότι η αιτία της αύξησης εντοπίζεται στην υδρόφοβη φύση του καουτσούκ, καθώς δημιουργείται ένα στρώμα αέρα που εγκλωβίζεται γύρω από τους κόκκους δημιουργώντας κενά στην μεταβατική ζώνη. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ αυξάνει και τον περιεχόμενο αέρα του μείγματος, κάτι που διαπιστώθηκε και από τον Στρουμπούλη (2020), οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση της θλιπτικής αντοχής και της συνάφειας μεταξύ των κόκκων και του τσιμεντοπολτού.

### **2.1.2 Μηχανικές ιδιότητες**

#### *Θλιπτική αντοχή*

Η κύρια μηχανική ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η θλιπτική αντοχή και επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη των κόκκων καουτσούκ. Κατά γενική ομολογία, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η θλιπτική αντοχή μειώνεται λόγω του σχήματος, του μεγέθους, των ιδιοτήτων και του ποσοστού περιεκτικότητας των κόκκων καουτσούκ. Αρχικά, ένας παράγοντας αποτελεί η ελαστικότητα του καουτσούκ όταν αυτό υπόκειται σε θλίψη. Η ελαστικότητα αυτή κατά την θλίψη του σκυροδέματος οδηγεί σε συσσώρευση εφελκυστικών τάσεων στην μεταβατική ζώνη γύρω από τους κόκκους, αυξάνοντας την ήδη κακή συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό και επιταχύνοντας την αστοχία του (Siddika et al., 2019; Su et al., 2015).

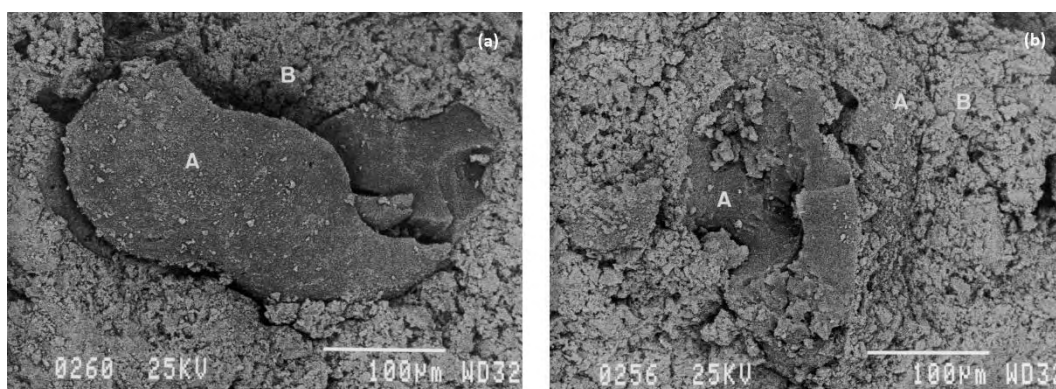
Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η περιεκτικότητα του μείγματος σε κόκκους καουτσούκ. Μέσα από πειραματικές δοκιμές (Bompra & Elghazouli, 2020; Raffoul et al., 2016, 2018; Su et al., 2015; Τορτσι, 1995; Στρουμπούλης, 2020) έχει παρατηρηθεί ότι για πολύ μικρά ποσοστά αντικατάστασης των φυσικών αδρανών υπάρχει σημαντική επίδραση στην θλιπτική αντοχή, η οποία όμως τείνει να σταθεροποιηθεί όταν το ποσοστό ξεπερνά το 40% του συνολικού όγκου των αδρανών. Γενικά, όμως ακολουθείται ο κανόνας ότι όσο μεγαλύτερο ποσοστό κόκκων καουτσούκ, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια αντοχής. Ωστόσο, εκτός από το ποσοστό αντικατάστασης παρατηρείται και επιρροή από το μέγεθος των κόκκων. Για το ίδιο ποσοστό αντικατάστασης, καουτσούκ με μεγαλύτερη διάμετρο κόκκου προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της αντοχής σε σχέση με κόκκους μικρότερης διαμέτρου, ενώ κόκκοι με διαβάθμιση του μεγέθους τους αποφέρουν ενδιάμεσα αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις (Σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3. Μεταβολές της θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης και μεγέθη κόκκων καουτσούκ (Τορζι, 1995).

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την θλιπτική αντοχή είναι η συνάφεια των κόκκων καουτσούκ με τον τσιμεντοπολτό, δηλαδή η μεταβατική ζώνη (Interfacial Transition Zone, ITZ). Όπως ήδη αναφέρθηκε, το καουτσούκ όντας υδρόφοβο ελκύει τα μόρια αέρα γύρω του, ενώ η σχετικά λεία επιφάνειά του δεν συνεισφέρει στην συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται ασυνέχειες και ρηγματώσεις στην μεταβατική ζώνη αποδυναμώνοντάς την και κατά συνέπεια να μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε εκτενώς από τους Raffoul et al. (2016), Segre & Joekes, (2000) και Su et al. (2015), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και παρατήρησαν τις ασυνέχειες στην μεταβατική ζώνη (Σχήμα 2-4a). Στην προσπάθεια να βελτιώσουν τη συνάφεια, χρησιμοποίησαν είτε την τεχνική της επιφανειακής επεξεργασίας των κόκκων καουτσούκ είτε πρόσθεσαν στο μείγμα ιπτάμενη τέφρα ή και πυριτική παιπάλη. Παρατηρήθηκε ότι το σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ με επεξεργασμένη επιφάνεια είχε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με αυτό που περιείχε ανεπεξεργαστους κόκκους (Σχήμα 2-4b). Επίσης, η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας (fly ash) και πυριτικής παιπάλης (silica fume) σε μικρές ποσότητες ενίσχυσε τη συνάφεια, ενώ αύξησε τη θλιπτική αντοχή και την εργασιμότητα του σκυροδέματος, λόγω της ενισχυτικής δράσης τους στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού.

Η επιφανειακή επεξεργασία των κόκκων είναι μια διαδικασία στην οποία οι κόκκοι καουτσούκ βυθίζονται σε κάποιο διάλυμα, συνήθως υδροξείδιο του νατρίου (NaOH), για κάποιο χρονικό διάστημα. Με αυτό τον τρόπο η επιφάνεια των κόκκων γίνεται αδρότερη και καθαρίζει από επιφανειακούς ρύπους. Έτσι, επιτυγχάνεται αυξημένη συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό (Siddika et al., 2019). Ωστόσο, η παρατεταμένη βύθιση δεν μεταβάλλει περαιτέρω την επιφάνεια, εισχωρεί στο εσωτερικό και μειώνει την ελαστικότητα του καουτσούκ, με αποτέλεσμα την αύξηση των εφελκυστικών τάσεων στην μεταβατική ζώνη. Οι τάσεις αυτές υποβαθμίζουν την αντοχή της μεταβατικής ζώνης και την οδηγούν σε πρόωρη αστοχία και κατά συνέπεια σε μειωμένη αντοχή του σκυροδέματος (Yousf, Mills, et al., 2016).

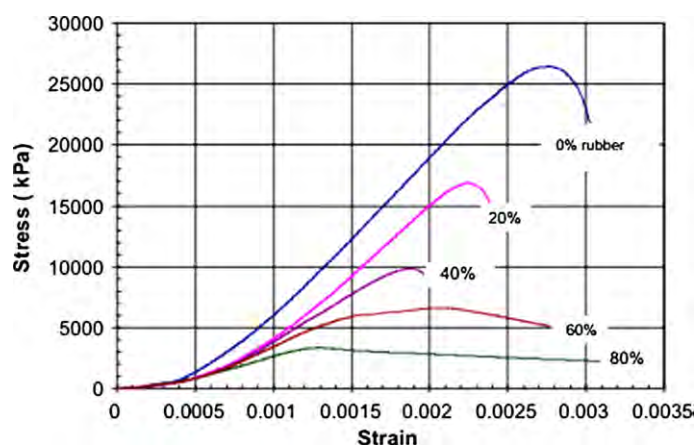


Σχήμα 2-4. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Α) κόκκοι καουτσούκ και (Β) τσιμεντοπολτός. Κόκκοι καουτσούκ (α) χωρίς και (b) με επιφανειακή επεξεργασία με NaOH (Segre & Joekes, 2000).

#### Διάγραμμα $\sigma$ - $\epsilon$ και μέτρο Ελαστικότητας

Διαφοροποιήσεις παρατηρούνται και στην παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος λόγω της προσθήκης κόκκων καουτσούκ, έχοντας άμεση σύνδεση με την θλιπτική αντοχή. Οι διαφοροποιήσεις απεικονίζονται στην μορφή του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων (stress – strain,  $\sigma$ - $\epsilon$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5, από το οποίο εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα (Bompra et al., 2017; Raffoul et al., 2017; Τορζυ, 1995; Toutanji, 1996). Η προσθήκη κόκκων καουτσούκ μειώνει το μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος, αμβλύνοντας έτσι τον ανοδικό κλάδο του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$ . Παράλληλα, αυξάνονται σημαντικά οι παραμορφώσεις και λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της θλιπτικής αντοχής η κορυφή της καμπύλης μετατοπίζεται δεξιότερα. Ενώ, παρουσιάζεται πιο πλάσιμη

συμπεριφορά, με σταδιακή απομείωση των τάσεων και αύξηση των παραμορφώσεων στον καθοδικό κλάδο. Αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα και η πιο ομαλή μορφή αστοχίας, εν αντιθέσει με την ψαθυρή του συμβατικού σκυροδέματος. Μάλιστα, η αστοχία του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ χαρακτηρίζεται από σταδιακές αλλά πρόωρες ρηγματώσεις που συνεχώς αυξάνονται. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα έδωσε η έρευνα των Parakonstantinou & Tobolski (2006), οι οποίοι με τη χρήση κόκκων που περιέχουν ίνες χάλυβα παρατήρησαν ότι ο χάλυβας αυξάνει τη συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό, μειώνοντας έτσι τις ρηγματώσεις στην μεταβατική ζώνη.



Σχήμα 2-5. Διάγραμμα σ-ε για διάφορες περιεκτικότητες κόκκων καουτσούκ (Siddika et al., 2019).

Οι ιδιότητες αυτές προκύπτουν από την μεγάλη ελαστικότητα του καουτσούκ, το οποίο έχει τη δυνατότητα να παραμορφώνεται και να διογκώνεται, προκαλώντας έτσι μεγάλη διόγκωση του σκυροδέματος και πλευρικές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, η αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας των κόκκων ενισχύει τις παραπάνω ιδιότητες, ενώ φαίνεται ότι οι κόκκοι μεγαλύτερης διαμέτρου επηρεάζουν περισσότερο λόγω μεγαλύτερης διαστολής. Συγκεκριμένα, η ιδιότητα αυτή δίνει την ευκαιρία για μελέτη της περίσφιξης του σκυροδέματος, αφού η περίσφιξη ενεργοποιείται από τις πλευρικές παραμορφώσεις. Ταυτόχρονα, η μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας το καθιστά αντικείμενο μελέτης για μέλη υπό σεισμική καταπόνηση. Τέτοιες έρευνες πραγματοποιήθηκαν από τους Elghazouli et al. (2018) και Youssf, ElGawady, et al. (2016), οι οποίοι υπέβαλαν μέλη από σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Παρατηρήθηκε ότι τα μέλη από συμβατικό σκυρόδεμα είχαν χειρότερη απόκριση όσον αφορά την απορρόφηση

ενέργειας και τη μέγιστη παραμόρφωση. Ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε περίσφιγξη, η διαφορά στους δύο τύπους σκυροδέματος έγινε εντονότερη, αφού το σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ ήταν πιο αποδοτικό.

#### *Εφελκυστική, καμπτική και αντοχή σε κρούση και κόπωση*

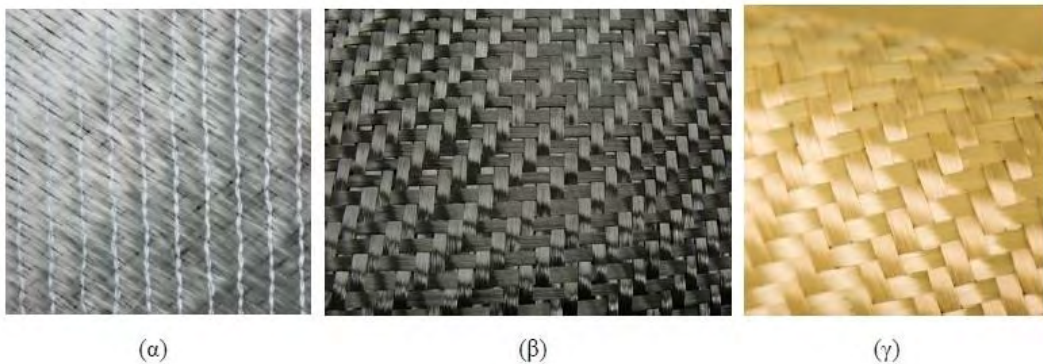
Η εφελκυστική και η καμπτική αντοχή του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ έχουν ανάλογη συμπεριφορά με την θλιπτική. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην σχέση μεταξύ αυτών των αντοχών μέσω της μεταβατικής ζώνης, αλλά και στις ιδιότητες των αδρανών που χρησιμοποιούνται (Τριανταφύλλου, 2013). Κατ' αναλογία η εφελκυστική και η καμπτική αντοχή μειώνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, ενώ η επίδραση των κόκκων μεγαλύτερης διαμέτρου είναι πιο δυσμενής. Αντίστοιχα, ευεργετική είναι υπό προϋποθέσεις η προσθήκη πρόσθετων, αλλά και η επιφανειακή επεξεργασία των κόκκων (Bompra et al., 2017; Su et al., 2015; Youssf, Mills, et al., 2016).

Επιπλέον, το σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ έχει καλύτερες αντοχές σε κρούση και κόπωση σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, την πλαστιμότητα και γενική συμπεριφορά μετά τον σχηματισμό ρηγματώσεων (Siddika et al., 2019).

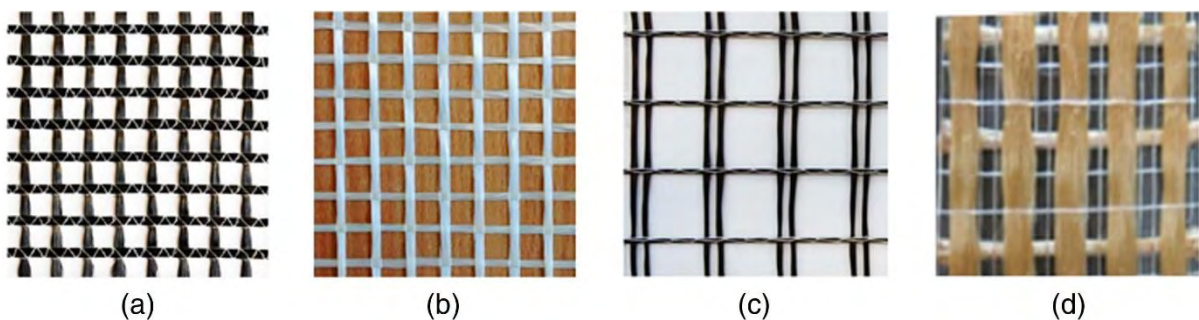
## **2.2 Περίσφιγξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά**

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ο αριθμός των κατασκευών που χρειάζονται κάποια μορφή ενίσχυσης, λόγω παλαιότητας και φθοράς του κτιρίου ή γιατί κατασκευάστηκε με παλαιότερες κανονιστικές διατάξεις και πλέον τα μέλη δεν επαρκούν. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές και υλικά που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις. Μια από τις κατηγορίες υλικών είναι τα σύνθετα (composite), τα οποία έχουν δυναμική παρουσία λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των συμβατικών δομικών υλικών. Ενδεικτικά αναφέρονται η μεγάλη διαθεσιμότητα, το χαμηλό βάρος, η ανθεκτικότητα σε διάβρωση και η μεγάλη (εφελκυστική) αντοχή. Βασικά συστατικά των σύνθετων υλικών είναι οι ίνες και οι μήτρες στις οποίες εμποτίζονται οι ίνες (Τριανταφύλλου, 2004).

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται έχουν πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλότερη από αυτή του δομικού χάλυβα και γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την ψαθυρή αστοχία. Συνήθεις τύποι ινών είναι αυτές από άνθρακα (carbon), γυαλιού (glass), αραμιδίου (ή κέβλαρ, aramid) και βασάλτη (basalt). Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή υφασμάτων (fabrics, Σχήμα 2-6), όπου οι ίνες είναι συνεχείς σε μία ή δύο διευθύνσεις, ή πλεγμάτων (textiles, Σχήμα 2-7), όπου οι ίνες με μορφή κλώνων σχηματίζουν βροχίδες (Δερουκάκη, 2020).



Σχήμα 2-6. Υφάσματα από ίνες (α) γυαλιού, (β) άνθρακα, (γ) αραμιδίου (Δερουκάκη, 2020).



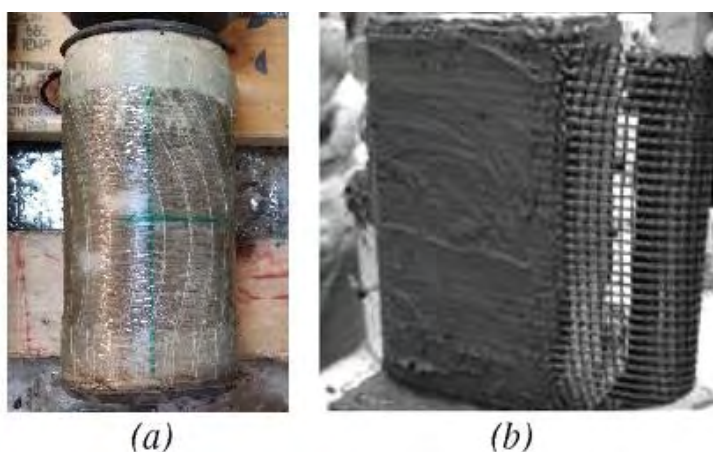
Σχήμα 2-7. Ινοπλέγματα δύο κατευθύνσεων από ίνες (a) άνθρακα, (b) γυαλιού, (c) βασάλτη, (d) πολυφαινυλενο-βενζο-δισθειαζόλη (PBO). (Koutas et al., 2019)

Η μήτρα αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος. Ο ρόλος της είναι να μεταφέρει τις δυνάμεις από το σκυρόδεμα στις ίνες. Είναι είτε οργανική με την μορφή ρητίνης (συνήθως εποξειδική), είτε ανόργανη με τη μορφή κονιάματος. Σκοπός είναι οι ίνες να εμποτιστούν στην μήτρα και να λειτουργήσουν ως ένα σύνθετο υλικό, το οποίο θα έχει μηχανική ιδιότητες από τον συνδυασμό τους. Οι ρητίνες είναι ένα πολυμερές συνήθως



δύο συστατικών με καλές μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές δράσεις (Τριανταφύλλου, 2004). Ωστόσο, το υψηλό κόστος, η κακή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας και υψηλών θερμοκρασιών και η κακή συνάφεια με το σκυρόδεμα οδήγησε στην χρήση ανόργανων μητρών (Koutas et al., 2019). Οι ανόργανες μήτρες είναι κονιάματα με βάση το τσιμέντο ή υδραυλικά ασβεστοκονιάματα. Σε αντίθεση με τις οργανικές, έχουν χαμηλότερη αντοχή αλλά με την προσθήκη πολυμερών μπορούν να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες, ενώ το κόστος τους είναι σημαντικά χαμηλότερο (Δερουκάκη, 2020).

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις είναι είτε Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ, Fibre Reinforced Polymers – FRP, Σχήμα 2-8a), είτε Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM, Textile Reinforced Matrix – TRM, Σχήμα 2-8b). Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από ένα ύφασμα συνεχών ινών εμποτισμένο σε οργανική ρητίνη. Αντίθετα, τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα αποτελούνται από πλέγματα ινών εμποτισμένα σε ανόργανη μήτρα. Η διαφοροποίηση αυτή προέκυψε από την κακή συνάφεια της ανόργανης μήτρας με τα υφάσματα συνεχών ινών, λόγω του κακού εμποτισμού των υφασμάτων από την ανόργανη μήτρα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτιμήθηκαν τα πλέγματα ινών, αφού λόγω των βροχίδων επιτυγχάνεται μηχανική εμπλοκή μεταξύ των δύο υλικών και συνεπώς καλύτερη συνάφεια.

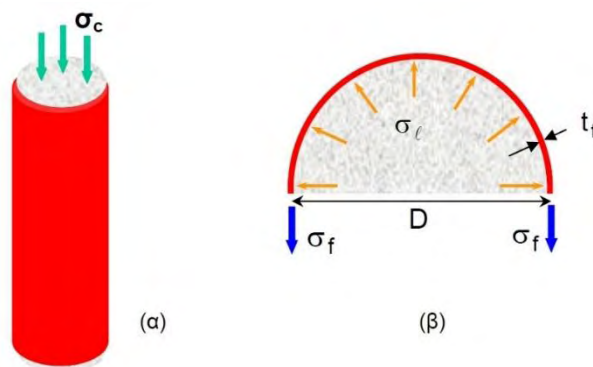


Σχήμα 2-8. (a) ΙΟΠ από ίνες γυαλιού (Στρομπούλης, 2020), (b) IAM από ίνες άνθρακα (Bournas et al., 2007).

Συνοπτικά, οι διαφορές μεταξύ ΙΟΠ και ΙΑΜ έγκειται κυρίως στις ιδιότητες της μήτρας. Τα ΙΑΜ έχουν καλύτερη συμβατότητα με το σκυρόδεμα το οποίο ενισχύουν, είναι πυράντοχα, μπορούν να εφαρμοστούν σε υγρές επιφάνειες και σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ έχουν χαμηλότερο κόστος και είναι πιο οικεία στην εφαρμογή για το τεχνικό προσωπικό. Επίσης, τα ΙΟΠ εμφανίζουν μεγάλες απώλειες αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει δυσκολία στο να εντοπιστούν αστοχίες στα μέλη που έχουν ενισχυθεί αλλά και να αφαιρεθούν μετά την ενίσχυση (Δερουκάκη, 2020).

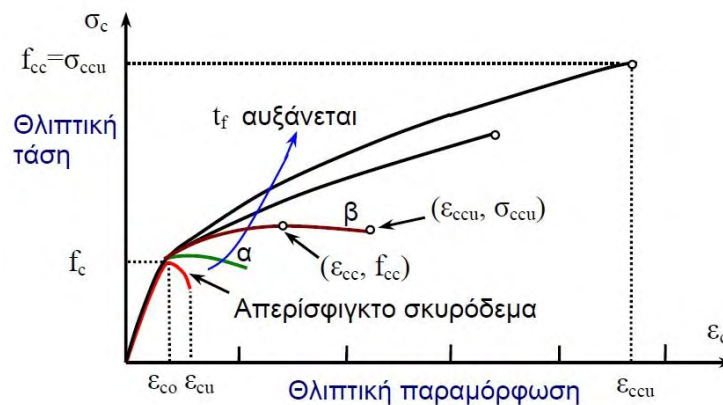
Στα πλαίσια αυτή της εργασίας θα αναλυθεί μια από τις μορφές ενισχύσεων, η περίσφιγξη. Η περίσφιγξη με τη χρήση σύνθετων υλικών πραγματοποιείται με εξωτερική επικόλληση ενός μανδύα ΙΟΠ ή ΙΑΜ στο σκυρόδεμα, ο οποίος ενεργοποιείται λόγω της εγκάρσιας διόγκωσης του σκυροδέματος κατά την επιβολή αξονικών φορτίων. Τότε, οι ίνες της ενίσχυσης που είναι παράλληλες στον εγκάρσιο άξονα δέχονται εφελκυστικές τάσεις, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα (Σχήμα 2-9). Σύμφωνα με τον Τριανταφύλλου (2004), με την περίσφιγξη επιτυγχάνεται:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.



Σχήμα 2-9. (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών. (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης. (Τριανταφύλλου, 2004)

Κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος διαφοροποιείται το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) σε σχέση με το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 2-10. Η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης σύμφωνα με τους Koutas et al. (2019) εξαρτάται από το πάχος της ενίσχυσης, και ειδικότερα από το ποσοστό  $\rho_f$  των ινών που περιέχονται σε μία στρώση. Επίσης, εξαρτάται από το σχήμα της διατομής, με τις κυλινδρικές να υπερέχουν των ορθογωνικών λόγω της ανομοιόμορφης συγκέντρωσης τάσεων στις γωνίες των δευτέρων. Ακόμη, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ποιότητα του κονιάματος της μήτρας, η διεύθυνση και οι μηχανικές ιδιότητες των ινών, η ύπαρξη αξονικού φορτίου στην περίπτωση σεισμικής φόρτισης, το μήκος υπερκάλυψης των στρώσεων και η ύπαρξη διαβρωτικών παραγόντων ή υψηλής θερμοκρασίας. Γενικά, για την περίσφιγξη έχουν διαμορφωθεί πληθώρα προσομοιωμάτων που διαφοροποιούνται ανάλογα με τις παραπάνω παραμέτρους.



Σχήμα 2-10. Διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  για σκυρόδεμα περισφιγμένο με σύνθετα υλικά (Τριανταφύλλου, 2013).

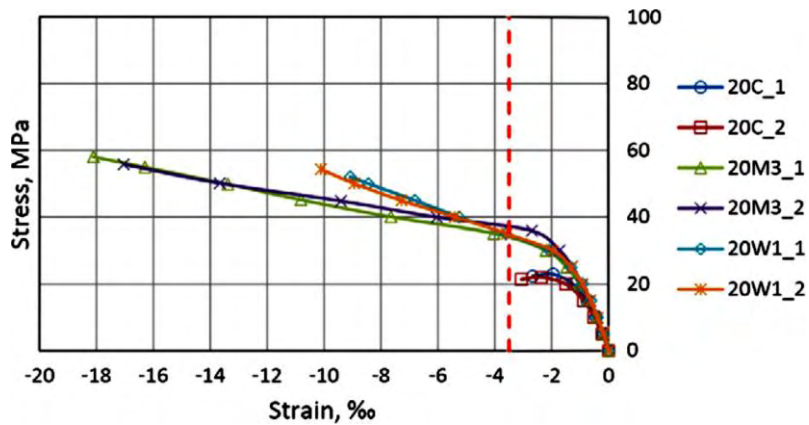
Ο συνηθέστερος τρόπος εφαρμογής των ενισχύσεων περίσφιγξης είναι με τη μέθοδο της υγρής εφαρμογής. Αρχικά, η επιφάνεια του σκυροδέματος προετοιμάζεται για βελτίωση της συνάφειας με την ενίσχυση και καμπυλώνονται οι γωνίες των διατομών, ώστε να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων. Στη συνέχεια, στην περίπτωση των ΙΟΠ εφαρμόζεται αρχικά στρώση ρητίνης στο σκυρόδεμα και άμεσα το ύφασμα ξηρό και κατόπιν εμποτίζεται. Όμως το ύφασμα μπορεί να εφαρμοστεί και προεμποτισμένο με μη σκληρυμένη ρητίνη απευθείας στο προετοιμασμένο σκυρόδεμα (Τριανταφύλλου, 2004). Στην περίπτωση, των ΙΑΜ η εφαρμογή γίνεται με όμοιο τρόπο, αρχικά με εφαρμογή ενός λεπτού στρώματος

κονιάματος στο οποίο επικολλάται το πλέγμα. Κατόπιν, πάνω από το πλέγμα, και ενώ η πρώτη στρώση είναι ακόμη νωπή, εφαρμόζεται μια ακόμη λεπτή στρώση κονιάματος (Bournas et al., 2007).

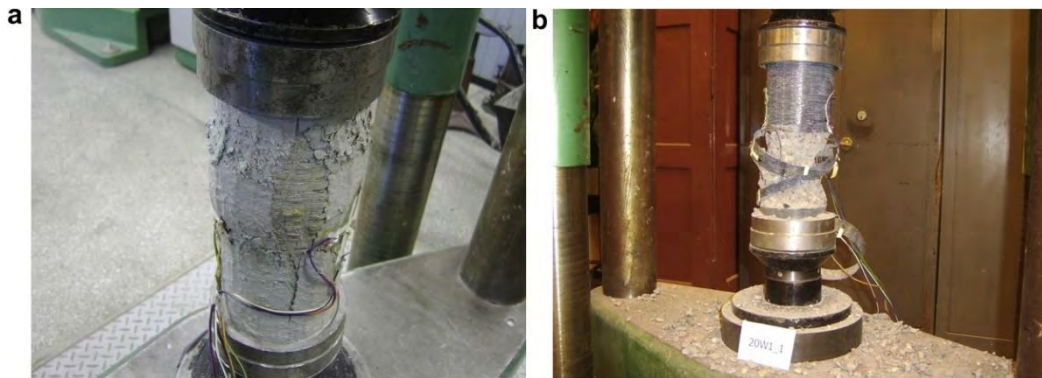
### 2.2.1 Περίσφιγξη συμβατικού σκυροδέματος

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές αναφορές στη βιβλιογραφία για περίσφιγξη συμβατικού σκυροδέματος είτε με ΙΟΠ είτε με ΙΑΜ. Ενδεικτικά, στα πλαίσια της παρούσης εργασίας χρησιμοποιούνται τα συμπεράσματα από τις έρευνες των Bournas et al. (2007), Colajanni et al. (2014), di Ludovico et al. (2010), García et al. (2010), Trapko (2013) και Triantafyllou et al. (2006). Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η περίσφιγξη αυξάνει τη θλιπτική αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος όσο αυξάνονται οι στρώσεις της ενίσχυσης. Αυτό παρατηρείται και σε ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σ-ε (Σχήμα 2-11), όπου η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη, λόγω της επιμήκυνσης στον κλάδο μετά την μέγιστη τιμή τάσης.

Ειδικότερα, οι di Ludovico et al. (2010) παρατήρησαν ότι άσχετα από το υλικό περίσφιγξης το διάγραμμα είναι αρχικά γραμμικό, ενώ στη συνέχεια διαφοροποιείται μέχρι την μέγιστη τάση, καθώς συνεχίζει σχεδόν γραμμικά στην περίπτωση των ΙΟΠ (διγραμμικό), ενώ στην περίπτωση των ΙΑΜ είχε και μη γραμμικό κλάδο. Η διαφοροποίηση στα διαγράμματα οφείλεται στο γεγονός ότι τα ΙΟΠ, και συγκεκριμένα οι ρητίνες, έχουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από τα κονιάματα των ΙΑΜ. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις η έρευνα έδειξε ότι τα ΙΑΜ εμφάνισαν ρωγμές πριν τη μέγιστη θλιπτική τάση, οδηγώντας σε μείωση της δυσκαμψία και άρα αλλαγή της κλίσης στο διάγραμμα σ-ε. Ένας ακόμη παράγοντας είναι ότι τα πλέγματα στα ΙΑΜ αστοχούν πιο αργά από τα υφάσματα, επειδή οι ίνες είναι σε μορφή νημάτων και δεν εμποτίζονται επαρκώς από τη μήτρα. Παράλληλα, η μορφή αστοχίας των ΙΑΜ είναι λιγότερο «εκρηκτική» και πιο σταδιακή σε σχέση με τα ΙΟΠ (Σχήμα 2-12), ενώ ο πυρήνας του σκυροδέματος εμφανίζει θραύση και στις δύο περιπτώσεις (Colajanni et al., 2014).



Σχήμα 2-11. Διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  σκυροδέματος σε θερμοκρασία 20°C (α) απερίσφιγκτου 20C, (β) περισφιγμένου με 1 στρώση CFRP 20W, (γ) περισφιγμένο με 1 στρώση IAM από PBO 20M (Τραγκο, 2013).



Σχήμα 2-12. Αστοχίες περισφιγμένου σκυροδέματος με (a) IAM, (b) ΙΟΠ (Τραγκο, 2013).

Ωστόσο, οι Bournas et al. (2007) και Colajanni et al. (2014) παρατήρησαν ότι παρά τις διαφορές στο διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$ , η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ήταν παρόμοια για τα ΙΟΠ και IAM. Μάλιστα, οι δεύτεροι παρατήρησαν ότι στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οι μέγιστες τιμές κάθε κύκλου φόρτισης εφάπτονται στο αντίστοιχο διάγραμμα μονοτονικής φόρτισης για κάθε τρόπο περισφιγξης. Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα των πρώτων, οι οποίοι παρατήρησαν ότι δεν υπάρχει μείωση της ικανότητας παραλαβής θλιπτικού φορτίου όταν υπάρχει περισφιγξη, σε αντίθεση με το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα. Σε συνέχεια αυτού, η περισφιγξη μείωσε τις πλευρικές παραμορφώσεις στη βάση οπλισμένων υποστυλωμάτων (κρίσιμες περιοχές εμφάνισης πλαστικής άρθρωσης) που δημιουργούνται

από τον λυγισμό των διαμήκων ράβδων, ενώ η μείωση αυτή ήταν μικρότερη όταν χρησιμοποιήθηκαν IAM.

Επιπρόσθετα, από τις έρευνες των García et al. (2010) και Triantafillou et al. (2006) προέκυψε ότι η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης οφείλεται στις ιδιότητες της μήτρας και ειδικότερα στην εφελκυστική της αντοχή. Συγκεκριμένα, οι πρώτοι εξέτασαν IAM με τσιμεντοειδές κονίαμα σε σύγκριση με ποζολανικό, με το πρώτο να δίνει καλύτερες αντοχές. Οι δεύτεροι σύγκριναν IAM με δύο διαφορετικές ποιότητες τσιμεντοειδών κονιαμάτων αλλά και με ρητίνη ως μήτρα. Όσον αφορά τα κονιάματα, η διαφορά στην εφελκυστική τους αντοχή οδήγησε σε διαφοροποιήσεις στο διάγραμμα σ-ε και ταυτόχρονα διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Το IAM με κονίαμα υψηλής αντοχής αστόχησε λόγω θραύσης, ενώ αυτό με χαμηλής αντοχής κονίαμα αστόχησε λόγω αποκόλλησης στο μήκος υπερκάλυψης. Κατά τη σύγκριση μεταξύ κονιάματος και ρητίνης παρατηρήθηκε ότι με τη χρήση ρητίνης το IAM συμπεριφέρθηκε σαν ΙΟΠ χαμηλής δυσκαμψίας και ήταν πιο αποτελεσματικό από αυτό με την ανόργανη μήτρα. Αυτό οφείλεται στις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης.

Εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το ποσοστό των ινών  $\rho_f$  που περισφίγγουν το σκυρόδεμα, το οποίο είναι άμεση συνάρτηση του πάχους της περίσφιγξης, δηλαδή του αριθμού των στρώσεων. Γενικά, παρατηρείται ότι με αύξηση των στρώσεων αυξάνεται και η αποδοτικότητα της περίσφιγξης. Όμως, στην περίπτωση των ΙΟΠ η αύξηση των στρώσεων αυξάνει και την δυσκαμψία της ενίσχυσης, η οποία είναι δυσανάλογη με αυτή του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα για μεγάλο αριθμό στρώσεων ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων να φθίνει (Trarko, 2013). Βέβαια, σημαντικές είναι και οι μηχανικές ιδιότητες των ινών. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα των di Ludovico et al. (2010) έδειξε ότι οι ίνες γυαλιού, οι οποίες έχουν μικρότερη δυσκαμψία από τις ίνες βασάλτη, έδωσαν μικρότερες τιμές αντοχής και παραμορφώσεων στα περισφινγμένα δοκίμια. Επίσης, ο προεμπτισμός του πλέγματος βασάλτη, πριν την εφαρμογή στην μήτρα, με πολυμερική ρητίνη αποδείχθηκε πιο αποδοτικός για το ίδιο ποσοστό  $\rho_f$ , σε σχέση με τη χρήση λατέξ για τον ίδιο σκοπό.

Παράλληλα, οι Colajanni et al. (2014) μελέτησαν την επιρροή του σχήματος της διατομής στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης. Η μελέτη περιελάμβανε περίσφιγξη με IAM τριών διατομών: κυκλική, τετραγωνική και ορθογωνική. Η αποδοτικότητα της περίσφιγξης ήταν παρόμοια για τις κυκλικές και τετραγωνικές διατομές, ενώ ήταν μικρότερη για τις

ορθογωνικές με τάσεις μείωσης με την αύξηση των στρώσεων. Οι διαφορές παρατηρήθηκαν στην συμπεριφορά των δοκιμών, μέσω της κλίσης των διαγραμμάτων σ-ε μετά την μέγιστη θλιπτική τάση, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των γωνιών στις διατομές. Επίσης, άμεση σχέση έχει η ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες, καθώς έτσι επηρεάζεται η μορφή αστοχίας της ενίσχυσης. Η επιρροή αυτή είναι μικρότερη όταν χρησιμοποιούνται IAM σε σχέση με τα ΙΟΠ.

### **2.2.2 Περίσφιγξη σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ**

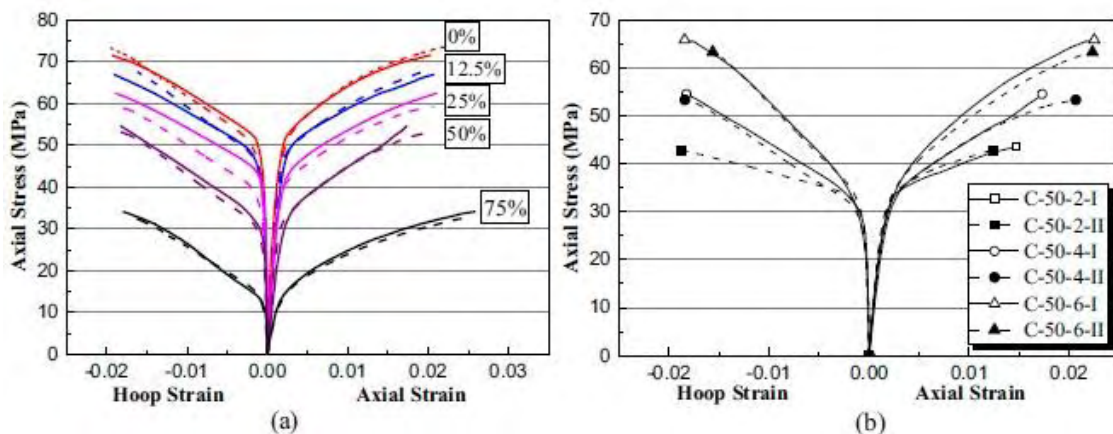
Αφού η αποδοτικότητα της περίσφιγξης με σύνθετα είχε αποδειχθεί ικανοποιητική για το συμβατικό σκυρόδεμα, η έρευνα επικεντρώθηκε στην εφαρμογή της σε σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ. Υπάρχουν αρκετές αναφορές για αυτή την προσπάθεια τα τελευταία 5 χρόνια περίπου, όμως μέχρι στιγμής για την περίσφιγξη έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο ινοπλισμένα πολυμερή. Οι περισσότερες έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση περίσφιγξης σε σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ αυξάνονται η θλιπτική αντοχή και η μέγιστη παραμόρφωση, ενώ η αύξηση αυτή εντείνεται με την αύξηση των στρώσεων της ενίσχυσης (Bompra & Elghazouli, 2020; Chan et al., 2019; Raffoul et al., 2017, 2018; Στρουμπούλης, 2020).

Σύμφωνα με τις ίδιες έρευνες δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στη συμπεριφορά του συμβατικού και του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ κατά την περίσφιγξη. Αυτό φαίνεται από το διάγραμμα σ-ε (Σχήμα 2-13), το οποίο παραμένει διγραμμικό. Η συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ στον πρώτο κλάδο του διαγράμματος είναι όμοια με αυτή του αντίστοιχου απερίσφιγκτου. Στη συνέχεια, αφού αρχίζει η θραύση και η δίογκωση του πυρήνα σκυροδέματος, η μορφή του διαγράμματος καθορίζεται από τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού, παρά από την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ (Bompra & Elghazouli, 2020). Παρόμοια είναι και η μορφή αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος σε δοκιμή θλίψης, παρά την ύπαρξη των κόκκων καουτσούκ. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι η αστοχία ήταν εκρηκτική με θραύση του ΙΟΠ στο μέσο του ύψους των δοκιμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-14. Όμως, για μεγαλύτερα ποσοστά περιεκτικότητας (75%), οι Chan et al. (2019) παρατήρησαν ότι αυτή

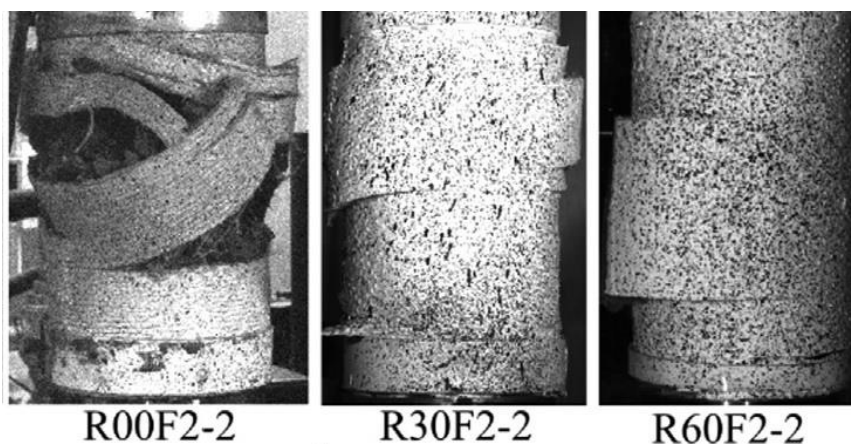


εμφανίστηκε στα άκρα των δοκιμών, κάτι που εν μέρει οφείλεται στην χαμηλή αντοχή του σκυροδέματος αυτού.

Οι κυριότερες διαφορές από την ύπαρξη καουτσούκ εμφανίζονται στην αποδοτικότητα της περισφιγξης. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε καουτσούκ αυξάνει την πλαστιμότητα και τη συνολική ογκομετρική παραμόρφωση του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τάσεις περισφιγξης και κατ' επέκταση η αποδοτικότητά της (Bompra & Elghazouli, 2020; Στρουμπούλης, 2020). Επίσης, σε σύγκριση με το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, η ύπαρξη περισφιγξης μειώνει τον ρυθμό μείωσης της θλιπτικής αντοχής που σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ (Chan et al., 2019).



Σχήμα 2-13. Διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  περισφιγμένου σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ: (α) επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ, (β) επιρροή των στρώσεων της ενίσχυσης. (Chan et al., 2019)



Σχήμα 2-14. Μορφή αστοχίας περισφιγμένων δοκιμών με δύο στρώσεις ΙΟΠ και ποσοστό περιεκτικότητας σε καουτσούκ 0%, 30% και 60% (Bompra & Elghazouli, 2020).



Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Σύμφωνα με τους Elghazouli et al. (2018) και Youssf, ElGawady, et al. (2016), οι οποίοι μελέτησαν περισφιγμένα υποστυλώματα σπλισμένου σκυροδέματος, η χρήση κόκκων καουτσούκ δεν άλλαξε σημαντικά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση καουτσούκ παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στην αντοχή και μικρή μείωση της ανηγμένης μετατόπιση κορυφής (drift) των δοκιμών που είχαν ίδιο πάχος περίσφιξης. Η αύξηση της αντοχής αλλά και της δυσκαμψίας ενισχύθηκε όταν στα υποστυλώματα επιβλήθηκε αξονική φόρτιση. Αυτό προέκυψε, διότι το αξονικό φορτίο προκάλεσε μεγαλύτερη διόγκωση του σκυροδέματος, η οποία ενισχύεται από την ύπαρξη του καουτσούκ, και συνεπώς αύξησε την αποδοτικότητα της περίσφιξης. Τα περισφιγμένα δοκίμια, που περιείχαν κόκκους καουτσούκ και δεν τους επιβλήθηκε αξονική φόρτιση, συμπεριφέρθηκαν όπως τα αντίστοιχα απερίσφιγκτα. Επίσης, συγκρίνοντας την υστερητική συμπεριφορά και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, η χρήση καουτσούκ σε περισφιγμένα δοκίμια ήταν παρόμοια, αλλά σημαντικά καλύτερη από τα αντίστοιχα απερίσφιγκτα.

## **Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρόγραμμα**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά το πειραματικό πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΤΚΟΣ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ειδικότερα, παρασκευάστηκαν 5 μείγματα σκυροδέματος με διαφορετική περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. Από κάθε μείγμα παρήχθησαν 30 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm. Στη συνέχεια, ενισχύθηκαν με ινοπλέγματα βασάλτη και τσιμεντοειδή μήτρα 6 δοκίμια από κάθε μείγμα, 3 με μία στρώση πλέγματος και 3 με δύο στρώσεις πλέγματος. Επίσης, 8 δοκίμια από κάθε μείγμα παρέμειναν απερίσφιγκτα. Συνολικά, προετοιμάστηκαν 70 δοκίμια, περισφιγμένα και απερίσφιγκτα, για τις δοκιμές θλίψης, από τα οποία στα 45 τοποθετήθηκαν αισθητήρες μέτρησης παραμορφώσεων.

### **3.1 Υλικά**

#### **3.1.1 Φυσικά αδρανή**

Για την παρασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν φυσικά θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή. Αυτά προμηθεύονται από το λατομείο σε τρεις ποιότητες ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων: άμμος (μέχρι 4 mm), γαρμπίλι (4-8 mm) και χαλίκι (8-32 mm). Για τις ανάγκες των μειγμάτων χρειάζονταν συγκεκριμένες διαβαθμίσεις, οπότε έγινε κοσκίνισμα των αδρανών με ειδική μηχανή κοσκίνισματος (Σχήμα 3-1). Η τυπική πυκνότητα των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν είναι  $2700 \text{ kg/m}^3$ .



Σχήμα 3-1. Μηχανή κοσκίνισματος του ΕΤΚΟΣ.

Μετά το κοσκίνισμα των αδρανών, προέκυψαν τα κλάσματα: 0-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm και 8-16 mm, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2. Κλάσματα φυσικών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν.

### 3.1.2 Κόκκοι καουτσούκ

Οι κόκκοι καουτσούκ που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται εργοστάσιο ανακύκλωσης ελαστικών αυτοκινήτων της Β. Ελλάδας, το οποίο παράγει διάφορες διαβαθμίσεις. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν κόκκοι από 2 έως 8 mm, ενώ όπως και τα φυσικά

αδρανή κοσκινίστηκαν ώστε να προκύψουν τα κλάσματα 2-4 mm και 4-8 mm (Σχήμα 3-3). Μετά από μετρήσεις στο εργαστήριο, η πυκνότητα των κόκκων καουτσούκ βρέθηκε περίπου  $900 \text{ kg/m}^3$ , δηλαδή το ένα τρίτο αυτού των φυσικών αδρανών.



(α)



(β)

Σχήμα 3-3. Κόκκοι καουτσούκ που χρησιμοποιήθηκαν μεγέθους (α) 2-4 mm και (β) 4-8 mm.

### 3.1.3 Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ποιότητας CEM II/A-M(W-L) 42.5R. Δηλαδή σύνθετο τσιμέντο τύπου Portland που προέρχεται από ανάμειξη κλίνκερ, ποζολανών, ασβεστούχας ιπτάμενης τέφρας, ασβεστόλιθου και γύψου. Είναι τσιμέντο υψηλής πρώιμης αντοχής (τύπου R) και χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής 42.5 MPa.

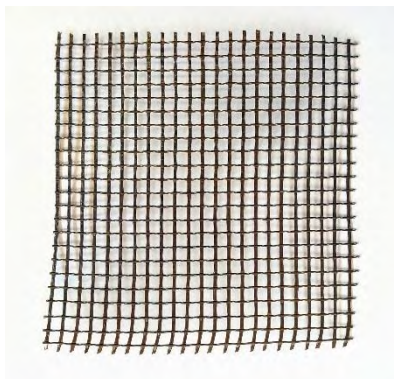
### 3.1.4 Υπερρυστοποιητής

Για την αύξηση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε υπερρυστοποιητής που αποτελείται από πολυμερικές ενώσεις πολυκαρβοξυλικού αιθέρα. Η σύστασή του προσδίδει στο σκυρόδεμα αυξημένη διάρκεια ρευστότητας και υψηλές πρώιμες αντοχές. Η πυκνότητά του είναι περίπου  $1.1 \text{ kg/L}$ .

### 3.1.5 Πλέγμα ιών βασάλτη

Για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πλέγμα ιών βασάλτη, τετραγωνικών βροχίδων μήκους 6 mm και ονομαστικού πάχους 0.039 mm (Σχήμα 3-4).

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το πλέγμα έχει εφελκυστική αντοχή 1542 MPa, μέτρο Ελαστικότητας 89 GPa, βάρος 250 g/m<sup>2</sup> και πυκνότητα ινών 2.75 g/cm<sup>3</sup>. Επίσης, το πλέγμα αποτελείται από ίνες με ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον, οι οποίες έχουν εξωτερική επίστρωση.



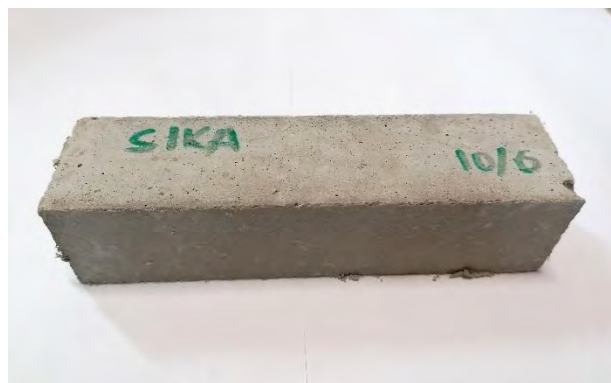
Σχήμα 3-4. Πλέγμα ινών βασάλτη που χρησιμοποιήθηκε.

### 3.1.6 Μήτρα ενίσχυσης

Για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα μία τσιμεντοειδής κονία που περιέχει λεπτόκοκκα αδρανή και ίνες (Σχήμα 3-5α), η οποία αναμείχθηκε με νερό με λόγο N/T = 0.23. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η αντοχή του παραγόμενου κονιάματος σε θλίψη είναι τάξεως M20. Ενώ σύμφωνα με μετρήσεις πρισματικών δοκιμών διαστάσεων 160x40x40 mm και N/T = 0.23 που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΤΚΟΣ (Σχήμα 3-5β), η αντοχή σε θλίψη βρέθηκε 22.6 MPa, ενώ η αντοχή σε κάμψη 1.79 MPa.



(α)



(β)

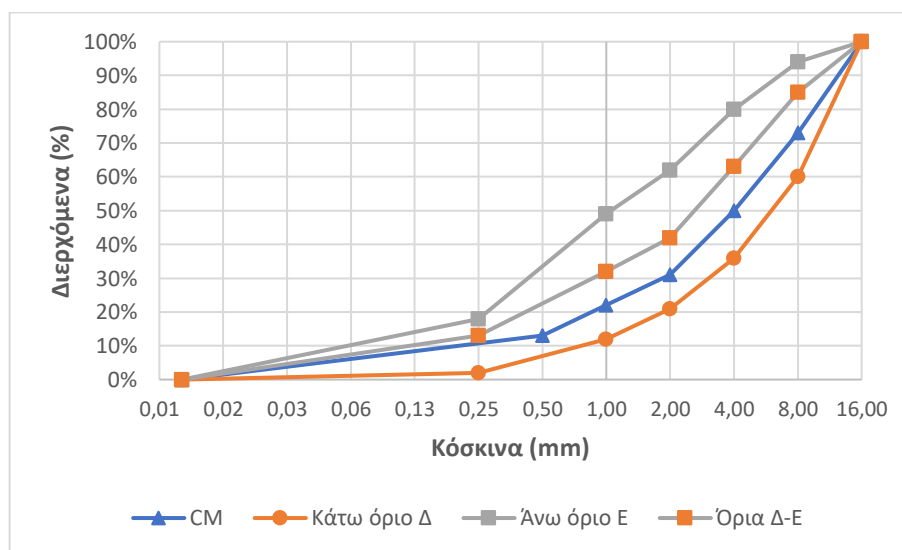
Σχήμα 3-5. (α) Τσιμεντοειδής κονία ενίσχυσης, (β) πρισματικό δοκίμιο κονιάματος.

### 3.2 Σχεδιασμός μειγμάτων σκυροδέματος

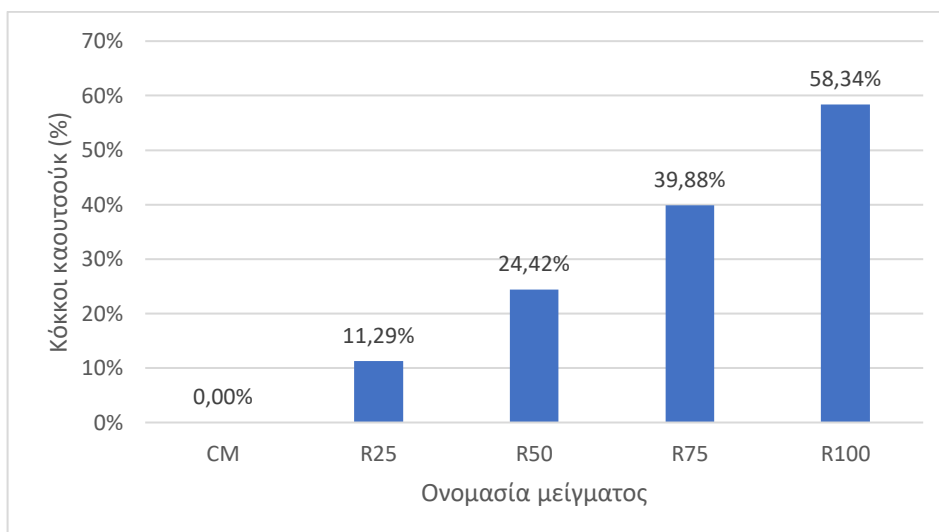
Για το σχεδιασμό του μείγματος συμβατικού σκυροδέματος (control mix – CM), το οποίο δεν περιέχει κόκκους καουτσούκ, λήφθηκαν υπόψη οι συστάσεις του ΚΤΣ-2016 σχετικά με την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών για μέγιστο κόκκο 16 mm, όπως αυτά διατυπώνονται στον Πίνακα ΠΒ1-4 του Παραρτήματος Β του ΚΤΣ-2016. Η διαβάθμιση που επιλέχθηκε με βάση τα διαθέσιμα κλάσματα αδρανών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6, βρίσκεται εντός της υποζώνης Δ.

Η αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ έγινε κατ' όγκο για τα κλάσματα 2-4 mm και 4-8 mm. Σχεδιάστηκαν 4 μείγματα με αντικατάσταση των δύο κλασμάτων σε ποσοστά 25%, 50%, 75% και 100%, τα οποία ονομάστηκαν R25, R50, R75 και R100 αντίστοιχα. Το γράμμα R αντιπροσωπεύει την λέξη rubber (καουτσούκ) και ο αριθμός το ποσοστό αντικατάστασης. Τα τελικά μείγματα, των οποίων τις αναλογίες παρουσιάζει αναλυτικά ο Πίνακας 3-1, έχουν  $N/T = 0.397$ , ενώ το ποσοστό του βάρους του καουτσούκ προς το σύνολο του βάρους των αδρανών σε σχέση με το μείγμα CM κυμαίνεται από 11% περίπου για το R25, έως 58% περίπου για το R100 (Σχήμα 3-7).

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε περίπτωση στο τελικό μείγμα σκυροδέματος προστέθηκε επιπλέον νερό ίσο με το 2% του βάρους του συνόλου των αδρανών, καθώς τα αδρανή δεν ήταν κορεσμένα και προβλέφθηκε ότι θα απορροφήσουν νερό.



Σχήμα 3-6. Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος CM.



Σχήμα 3-7. Ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών με κόκκους καουτσούκ κατά βάρος ως προς το CM.

Πίνακας 3-1. Αναλογίες μειγμάτων σκυροδέματος σε kg για 1 m<sup>3</sup>.

	CM	R25	R50	R75	R100
<b>Αδρανή 8-16mm</b>	507.96	507.96	507.96	507.96	507.96
<b>Αδρανή 4-8mm</b>	432.70	324.52	216.35	108.17	0.00
<b>Αδρανή 2-4mm</b>	357.52	268.14	178.76	89.38	0.00
<b>Αδρανή 1-2mm</b>	169.32	169.32	169.32	169.32	169.32
<b>Αδρανή 0.5-1mm</b>	169.32	169.32	169.32	169.32	169.32
<b>Αδρανή 0-0.5 mm</b>	244.58	244.58	244.58	244.58	244.58
<b>Καουτσούκ 4-8mm</b>	0.00	36.06	72.12	108.17	144.23
<b>Καουτσούκ 2-4mm</b>	0.00	29.79	59.59	89.38	119.17
<b>Νερό</b>	145.24	145.24	145.24	145.24	145.24
<b>Τσιμέντο</b>	365.83	365.83	365.83	365.83	365.83
<b>Υπερρευστοποιητής</b>	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99
<b>Λόγος N/T</b>	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397

### 3.3 Προετοιμασία δοκιμών

#### 3.3.1 Σκυροδετήσεις

Σε κάθε σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε ο αναδευτήρας του ΕΤΚΟΣ (Σχήμα 3-8). Όλα τα υλικά για το μείγμα είχαν ζυγιστεί με στόχο κάθε μείγμα να παράξει 57.2 L σκυροδέματος. Έτσι, αρχικά προστέθηκαν στον αναδευτήρα τα φυσικά αδρανή και αναδευτήκαν για 1-2



λεπτά. Στη συνέχεια, προστέθηκαν οι κόκκοι καουτσούκ (εκτός από το μείγμα CM) και συνεχίστηκε η ανάδευση για ακόμη 1-2 λεπτά. Έπειτα προστέθηκε το τσιμέντο και η μισή ποσότητα νερού, ενώ σταδιακά προστέθηκε και η υπόλοιπη ποσότητα νερού. Ο υπερρρευστοποιητής είχε προστεθεί και ομογενοποιηθεί εντός του νερού ανάμειξης. Η ανάδευση συνεχίστηκε μέχρι να ομογενοποιηθεί πλήρως το μείγμα για μερικά ακόμη λεπτά.



Σχήμα 3-8. Ο αναδευτήρας του ΕΤΚΟΣ.

Μόλις ολοκληρώθηκε η ανάδευση, έγινε δοκιμή κάθισης (slump), σύμφωνα με τις οδηγίες του ASTM C143 / C143M-20. Ειδικότερα, στον κώλουρο κώνο που είναι σχεδιασμένος για τη συγκεκριμένη δοκιμή τοποθετήθηκε νωπό σκυρόδεμα σε 3 στρώσεις και κάθε στρώση ραβδίστηκε 25 φορές. Αφού έγινε επιπέδωση της ανοιχτής επιφάνειας του κώνου, αυτός αφαιρέθηκε κατακόρυφα και τοποθετήθηκε ανάποδα δίπλα στο σκυρόδεμα, ώστε να μετρηθεί η κάθισή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-9.



Σχήμα 3-9. Δοκιμή κάθισης στο ΕΤΚΟΣ.



Κατόπιν, μετρήθηκε ο περιεχόμενος αέρας του νωπού σκυροδέματος με μέθοδο πίεσης, σύμφωνα με τον ASTM C231 / C231M-17a. Για την μέτρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα (Σχήμα 3-10). Αναλυτικότερα, για τη συγκεκριμένη δοκιμή τοποθετήθηκε στη συσκευή νωπό σκυρόδεμα σε 3 στρώσεις και κάθε στρώση ραβδίστηκε 25 φορές. Αφού έγινε επιπέδωση της ανοιχτής επιφάνειας της συσκευής, τοποθετήθηκε το καπάκι και μέσα από το ειδικά διαμορφωμένο άνοιγμα τοποθετήθηκε νερό εντός, ώστε να πληρωθεί ο κενός χώρος. Κατόπιν, εφαρμόστηκε πίεση εντός της συσκευής με τη χρήση εμβόλου και ασφαλίστηκε, ώστε να μην διαφύγει ο αέρας. Με απελευθέρωση της εσωτερικής πίεσης, έγινε η μέτρηση το περιεχόμενου αέρα κάθε μείγματος.



Σχήμα 3-10. Η συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα του ΕΤΚΟΣ.

Στη συνέχεια, το σκυρόδεμα τοποθετήθηκε σε πλαστικά καλούπια διαστάσεων 100x200 mm (Σχήμα 3-11α) σε 3 στρώσεις και κάθε στρώση ραβδίστηκε 25 φορές. Η ανοιχτή επιφάνεια επιπεδώθηκε με τη βοήθεια μυστριού. Τα δοκίμια αφέθηκαν στα καλούπια για 24 έως 48 ώρες (Σχήμα 3-11β). Κατόπιν, αφαιρέθηκαν τα καλούπια και τα δοκίμια αφέθηκαν να συντηρηθούν στον αέρα, σε συνθήκες περιβάλλοντος εντός του ΕΤΚΟΣ (Σχήμα 3-11γ).



(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 3-11. (α) Πλαστικό καλούπι 100x200 mm, (β) νωπό σκυρόδεμα εντός των καλουπιών, (γ) συντήρηση των δοκιμών στο ΕΤΚΟΣ.

### 3.3.2 Ενισχύσεις – περισφίξεις

Για την περισφίξη των δοκιμών με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα επιλέχθηκαν δύο περιπτώσεις ενίσχυσης. Η πρώτη περιελάμβανε 1 στρώση πλέγματος βασάλτη, ενώ η δεύτερη 2 στρώσεις πλέγματος βασάλτη. Το μήκος του πλέγματος για την μία στρώση ήταν 44 cm, όσο δηλαδή το μήκος της περιφέρειας του ενός δοκιμίου συν το μήκος υπερκάλυψης, το οποίο αντιστοιχεί στο ένα τρίτο του μήκους της περιφέρειας. Αντίστοιχα, για τις δύο στρώσεις το μήκος ήταν 76 cm, όσο δηλαδή δύο φορές το μήκος της περιφέρειας συν το μήκος υπερκάλυψης. Και στις δύο περιπτώσεις το πλάτος του πλέγματος ήταν περίπου 18.5 cm, ώστε να μην καλύπτει όλο το ύψος του δοκιμίου. Το ποσοστό των ινών  $r_f$  που περιείχε μία στρώση (χωρίς το μήκος υπερκάλυψης) πλέγματος ινών βασάλτη ήταν 0.1556%, ενώ για δύο στρώσεις ήταν 0.3112%. Επιπρόσθετα, στα άκρα εφαρμόστηκαν λωρίδες πλέγματος μήκους 44 cm (όσο 1 στρώση) και πλάτους 2 cm, ώστε να αποφευχθεί η πιθανή αστοχία στα άκρα του δοκιμίου.

Αφού προετοιμάστηκε και κόπηκε στο κατάλληλο μήκος και πλάτος το πλέγμα, έγινε η παρασκευή του κονιάματος με ανάμειξη της κονιάς με νερό με λόγο  $N/K = 0.23$ , με τη βοήθεια χειροκίνητου αναδευτήρα (Σχήμα 3-12). Πριν την εφαρμογή του κονιάματος, τα δοκίμια καθαρίστηκαν με βρεγμένο πανί. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε μια αρχική στρώση κονιάματος ομοιόμορφα στην περιφέρεια του δοκιμίου πάνω στην οποία τοποθετήθηκε το πλέγμα. Μετά περιστρέφοντας το δοκίμιο τοποθετήθηκε σφικτά το πλέγμα και άμεσα εφαρμόστηκε μια ακόμη στρώση κονιάματος (Σχήμα 3-13). Τέλος, τοποθετήθηκαν στα άκρα

του δοκιμίου οι επιπλέον λωρίδες πλέγματος, οι οποίες σταθεροποιήθηκαν με την βοήθεια σύρματος και καλύφθηκαν και αυτές με κονίαμα.



Σχήμα 3-12. Παρασκευή κονιάματος για την περίσφιγξη.



Σχήμα 3-13. Εφαρμογή περίσφιγξης σε δοκίμιο σκυροδέματος.

Τα δοκίμια αφέθηκαν να συντηρηθούν στον αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος εντός του ΕΤΚΟΣ (Σχήμα 3-14). Ωστόσο, τις δύο πρώτες ημέρες από την εφαρμογή της ενίσχυσης έγινε διαβροχή των δοκιμίων με βύθιση τους σε νερό για 1 λεπτό. Να σημειωθεί επίσης, ότι η ενίσχυση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε τουλάχιστον 14 ημέρες μετά την σκυροδέτηση των δοκιμίων.



(α)

(β)

Σχήμα 3-14. (α) Δοκίμιο αμέσως μετά την εφαρμογή ενίσχυσης, (β) Δοκίμιο μετά τη σκλήρυνση της ενίσχυσης.

### 3.3.3 Επιπέδωση επιφανειών δοκιμίων και εφαρμογή διάταξης αισθητήρων παραμόρφωσης

Πριν τις δοκιμές θλίψης τα δοκίμια έπρεπε να προετοιμαστούν, ώστε να μπορέσουν να τοποθετηθούν (βιδωθούν) οι αισθητήρες παραμόρφωσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την διάνοιξη οπών σε τέσσερα αντιδιαμετρικά και ανά δύο στην ίδια κατακόρυφο σημεία. Τα σημεία των οπών σημειώθηκαν στα δοκίμια με τη βοήθεια ειδικού γωνιώδους χάρακα, ώστε να εξασφαλιστεί η κατακορυφότητα των οπών. Οι οπές είχαν διάμετρο 3 mm και διανοίχθηκαν με τη βοήθεια τρυπανιού. Στις οπές κολλήθηκαν, με ειδική κόλλα που εφαρμόζεται σε αγκύρια, μεταλλικές ντίζες διαμέτρου 3 mm και μήκους 3-4 cm.

Μετά την εφαρμογή των ντιζών, στα δοκίμια έγινε επιπέδωση των επιφανειών (καπέλωμα, capping), ώστε οι δυνάμεις που θα εφαρμοστούν από τη μηχανή θλίψης να είναι κατακόρυφες. Η επιπέδωση πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με τον ASTM C617 / C617M-15, με τη χρήση γυψοκονιάματος. Το γυψοκονίαμα εφαρμόστηκε στο δοκίμιο, τα οποία είχαν τοποθετηθεί σε επίπεδη επιφάνεια, και απλώθηκε ομοιόμορφα σε κάθε άκρο, ώστε να έχει μικρό πάχος. Ο έλεγχος της επιπεδότητας έγινε με τη βοήθεια αλφαδιού. Στο Σχήμα 3-15 φαίνεται ένα τυπικό απερίσφιγκτο δοκίμιο στο οποίο έχουν τοποθετηθεί ντίζες και έχει γίνει επιπέδωση των επιφανειών.



(α)



(β)

Σχήμα 3-15. Δοκίμιο μετά την εφαρμογή ντιζών και καπελώματος.

### 3.4 Πειραματική διάταξη

#### 3.4.1 Ποτενσιόμετρα

Για την μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν γραμμικοί αισθητήρες παραμόρφωσης – ποτενσιόμετρα (Σχήμα 3-16). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν την δυνατότητα μέτρησης παραμορφώσεων μέχρι 25 mm και συνδέονται ηλεκτρονικά με Η/Υ, όπου γίνεται η καταγραφή των δεδομένων. Η καταγραφή γίνεται μέσω της συμπίεσης ενός εμβόλου. Η αλλαγή του μήκους προκαλεί αλλαγή της αντίστασης και συνεπώς του ηλεκτρικού σήματος το οποίο διαβάζεται από τον Η/Υ. Η συχνότητα καταγραφής των μετρήσεων επιλέχθηκε στα 2 Hz, δηλαδή 2 τιμές παραμόρφωσης ανά δευτερόλεπτο.

Για να τοποθετηθούν στα δοκίμια τα ποτενσιόμετρα τα άκρα τους, τα οποία έχουν σπές, εφαρμόστηκαν στις ντίζες κατακόρυφα και βιδώθηκαν με παξιμάδια. Σε κάθε δοκίμιο εφαρμόστηκαν δύο ποτενσιόμετρα, δεξιά και αριστερά.



Σχήμα 3-16. Ποτενσιόμετρο του ΕΤΚΟΣ.



### 3.4.2 Μηχανή μονοαξονικής θλίψης

Η μηχανή μονοαξονικής θλίψης που υπάρχει στο ΕΤΚΟΣ (Σχήμα 3-17) έχει τη δυνατότητα εφαρμογής φορτίου μέχρι 3000 kN. Αποτελείται από δύο πλάκες, επάνω και κάτω. Η επάνω πλάκα παραμένει ακίνητη αλλά έχει τη δυνατότητα στροφής. Η κάτω πλάκα έχει τη δυνατότητα μετακίνησης μέσω εμβόλου που κινείται λόγω υδραυλικής πίεσης. Για τη φόρτιση δοκιμίων ο έλεγχος του ρυθμού φόρτισης γίνεται μέσω ελέγχου της μετακίνησης της κάτω πλάκας ή μέσω της επιβολής συγκεκριμένου ρυθμού δύναμης.



Σχήμα 3-17. Μηχανή μονοαξονικής θλίψης του ΕΤΚΟΣ.

### 3.4.3 Μονοαξονική θλίψη

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης περιελάμβαναν δύο κατηγορίες δοκιμών. Δοκίμια στα οποία μετρήθηκε μόνο η μέγιστη τιμή τάσης και δοκίμια στα οποία έγινε αναλυτική καταγραφή τάσεων και παραμορφώσεων. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τον ASTM C39 / C39M-20. Ο ρυθμός φόρτισης έγινε μέσω ελέγχου του ρυθμού μετακίνησης της κάτω πλάκας και ήταν 15  $\mu\text{m/s}$  καθ' όλη τη διάρκεια της εκάστοτε δοκιμής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές όλες διήρκεσαν πάνω από 3 λεπτά μέχρι την αστοχία και ξεκίνησαν αφού το δοκίμιο είχε εφαρμόσει μεταξύ των πλακών. Επιπλέον, οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκαν ως επί το πλείστον 100 μέρες μετά την σκυροδέτηση. Στο Σχήμα

3-18 παρουσιάζεται η διάταξη δοκιμίου κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με συνδεδεμένους τους αισθητήρες παραμορφώσεων.



Σχήμα 3-18. Πειραματική διάταξη.

## Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΤΚΟΣ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ειδικότερα, παρουσιάζονται και αναλύονται στοιχεία σχετικά τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στα περισφιγμένα και απερίσφιγκτα δοκίμια και των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Τελικός στόχος είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μειγμάτων ως προς τις διαφορετικές περιεκτικότητες κόκκων καουτσούκ αλλά και ως προς τις διαφορετικές στρώσεις περίσφιγξης.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για τα απερίσφιγκτα δοκίμια αναφέρει ο Πίνακας 4-1, ενώ για τα περισφιγμένα δοκίμια ο Πίνακας 4-2. Για τα απερίσφιγκτα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η σήμανση  $A_j$ , όπου  $A$  η ονομασία του εκάστοτε μείγματος (CM, R25...) και  $j$  ο αύξων αριθμός του δοκιμίου. Για τα περισφιγμένα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η σήμανση  $A_{Ci-j}$ , όπου ο επιπλέον όρος  $C_i$  υποδηλώνει την περίσφιγξη και το  $i = 1$  ή  $2$  υποδεικνύει τον αριθμό των στρώσεων. Τέλος, ο Πίνακας 4-3 αναφέρει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για το κάθε μείγμα.



Πίνακας 4-1. Αποτελέσματα μετρήσεων απερίσφιγτων δοκιμίων.

Όνομα δοκιμίου	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E [GPa] *
CM_1	34.35	34.43
CM_6	36.22	
CM_9	36.16	
CM_10	35.52	
CM_11	31.19	
CM_15	28.39	
CM_19	34.06	
CM_22	22.90	30.23
R25_2	18.72	
R25_3	21.14	
R25_8	19.20	
R25_10	18.97	
R25_11	17.19	
R25_12	15.00	21.54
R25_21	20.37	
R25_27	20.25	24.04
R50_2	9.23	
R50_9	10.02	
R50_20	13.19	
R50_22	12.73	
R50_23	11.85	14.91
R50_25	11.37	15.97
R50_27	10.12	
R50_28	11.49	18.13
R75_2	8.75	13.44
R75_15	8.70	17.09
R75_20	9.36	
R75_21	9.75	11.16
R75_23	9.04	
R75_24	9.14	
R75_25	9.61	
R75_30	10.01	
R100_1	7.30	12.77
R100_6	7.12	
R100_14	7.49	12.29
R100_15	6.62	
R100_20	8.28	
R100_21	7.49	
R100_22	6.96	7.32
R100_25	7.89	

\*Τα δοκίμια που δεν έχουν μετρήσεις μέτρου Ελαστικότητας εξετάστηκαν μόνο ως προς την μέγιστη θλιπτική τάση.

Πίνακας 4-2. Αποτελέσματα μετρήσεων περισιγμένων δοκιμών.

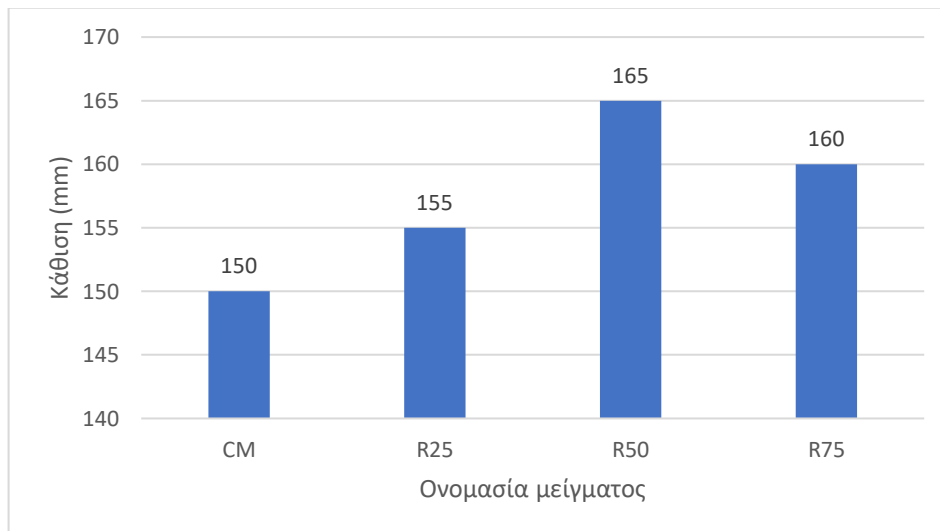
Όνομα δοκιμίου	Πυκνότητα σκυροδέματος [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E [GPa]
CM_C1-1	2533.75	36.89	-
CM_C1-2	2511.47	39.12	39.98
CM_C1-3	2505.10	41.03	39.87
CM_C2-1	2492.37	44.90	38.01
CM_C2-2	2517.83	40.37	37.49
CM_C2-3	2511.47	37.72	36.00
R25_C1-1	2368.23	23.46	31.57
R25_C1-2	2365.04	24.83	33.05
R25_C1-3	2371.41	26.09	31.47
R25_C2-1	2393.69	24.67	33.12
R25_C2-2	2419.16	24.01	33.16
R25_C2-3	2384.14	26.29	34.52
R50_C1-1	2132.68	15.41	14.32
R50_C1-2	2247.27	16.10	14.62
R50_C1-3	2228.17	14.02	13.85
R50_C2-1	2148.59	13.86	21.95
R50_C2-2	2244.08	14.24	25.59
R50_C2-3	2237.72	10.17	20.66
R75_C1-1	2132.68	12.29	14.80
R75_C1-2	2142.23	12.54	16.76
R75_C1-3	2142.23	12.41	19.59
R75_C2-1	2158.14	12.23	23.46
R75_C2-2	2104.03	11.82	20.52
R75_C2-3	2123.13	12.85	16.87
R100_C1-1	1970.34	9.29	16.47
R100_C1-2	1967.16	10.58	13.21
R100_C1-3	1960.79	10.18	18.93
R100_C2-1	-	12.10	-
R100_C2-2	-	10.90	16.96
R100_C2-4	1928.96	10.17	19.01

Πίνακας 4-3. Αποτελέσματα μετρήσεων μειγμάτων.

Μείγμα	Χωρίς περίσφιγξη		1 στρώση		2 στρώσεις		Πυκνότητα [kg/m <sup>3</sup> ]	Κάθιση [mm]	Περιεχόμενος αέρας [%]
	σ [MPa]	E [GPa]	σ [MPa]	E [GPa]	σ [MPa]	E [GPa]			
CM	33.70	32.33	39.01	39.92	41.00	37.17	2512.0	150	2.8%
R25	18.86	22.79	24.79	34.90	24.99	33.60	2383.6	155	2.2%
R50	11.25	16.34	15.18	13.48	14.05	22.73	2206.4	165	2.4%
R75	9.30	13.90	12.41	17.69	12.30	20.28	2133.7	160	3.9%
R100	7.39	10.80	10.01	16.20	11.06	17.98	1956.8	-	-

#### 4.1 Κάθιση

Σε κάθε σκυροδέτηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγινε μέτρηση της κάθισης του νωπού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-1. Στο μείγμα R100 προέκυψαν τεχνικά προβλήματα και δεν έγινε ορθή μέτρηση της κάθισης.



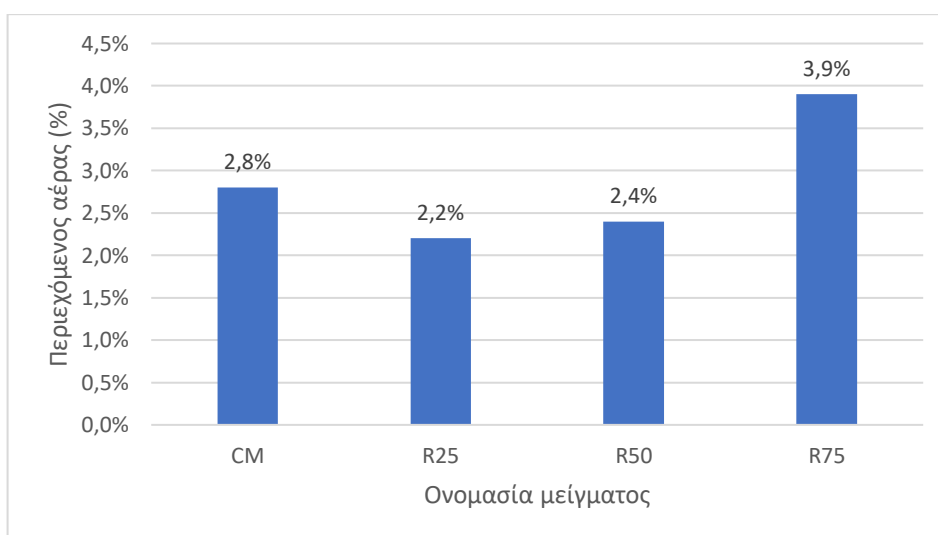
Σχήμα 4-1. Κάθιση των μειγμάτων σκυροδέματος.

Σε αντίθεση με τα αναμενόμενα από τη βιβλιογραφία αποτελέσματα, παρατηρείται αύξηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ. Γενικά, η αδρή επιφάνεια των κόκκων καουτσούκ τείνει να αυξήσει τις τριβές στο νωπό σκυρόδεμα μειώνοντας την εργασιμότητά του. Ενώ, η χρήση κόκκων καουτσούκ μικρής διαμέτρου, όπως στην περίπτωση της παρούσης εργασίας, είναι πιο δυσμενής, λόγω της

αύξησης της επιφάνειας των κόκκων, σε σχέση με τη χρήση κόκκων μεγαλύτερης διαμέτρου. Η διαφοροποίηση αυτή, στην περίπτωση των μειγμάτων της παρούσης εργασίας, πιθανώς οφείλεται στην καλή κοκκομετρική διαβάθμιση του συνόλου των αδρανών σε κάθε μείγμα αλλά και η εκτενής χρήση υπερρρευστοποιητή. Μάλιστα, η ποσότητα υπερρρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε ήταν της τάξης του 0.54% του βάρους του τσιμέντου, ποσότητα ελαφρώς μεγαλύτερη από τη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δόση που είναι 0.3-0.5%.

## 4.2 Περιεχόμενος αέρας

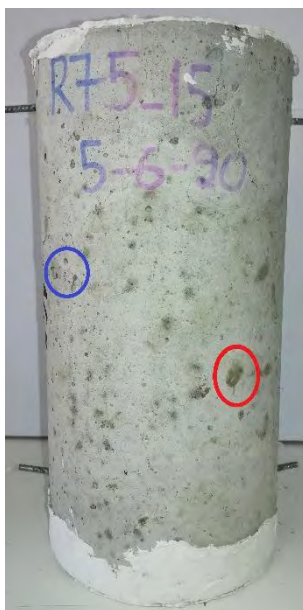
Αντίστοιχα, σε κάθε σκυροδέτηση, έγινε μέτρηση του περιεχόμενου αέρα του νωπού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-2. Στο μείγμα R100 προέκυψαν τεχνικά προβλήματα και δεν έγινε ορθή μέτρηση του περιεχόμενου αέρα.



Σχήμα 4-2. Περιεχόμενος αέρας των μειγμάτων σκυροδέματος.

Γενικά, δεν παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές του περιεχόμενου αέρα, με εξαίρεση την μικρή αύξηση στο μείγμα R75. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την βιβλιογραφία, καθώς αναμένεται μικρή αύξηση του περιεχόμενου αέρα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ. Αυτό συμβαίνει λόγω της υδρόφοβης φύσης του καουτσούκ, το οποίο συγκεντρώνει γύρω του ένα στρώμα αέρα, αποτρέποντας την καλή ενυδάτωση του τσιμεντοπολτού.

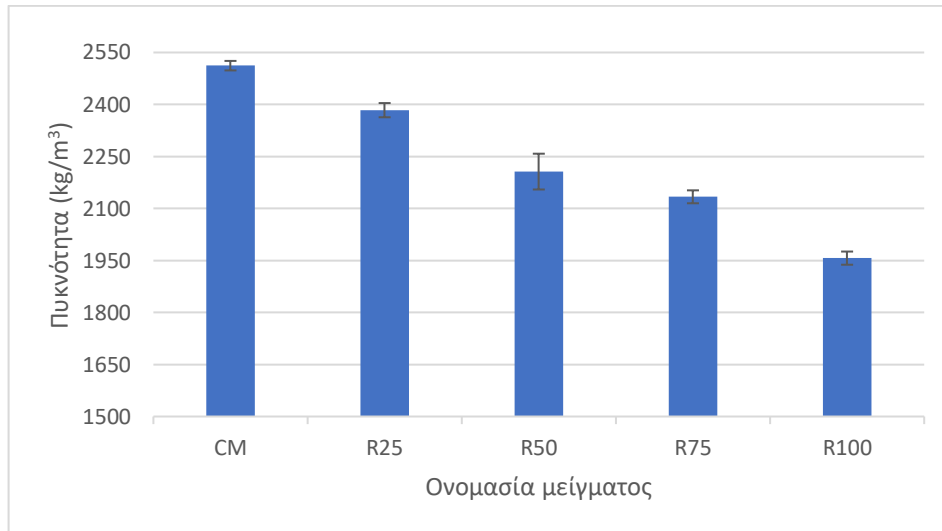
Αυτό μπορεί επίσης να διαπιστωθεί από την εικόνα των δοκιμών κατά της πρώτες ημέρες συντήρησης, καθώς εμφάνισαν σημάδια υγρασίας, που στη συνέχεια εξατμίστηκε, στις περιοχές που υπήρχαν κόκκοι καουτσούκ. Η υγρασία αυτή πιθανόν ήταν νερό που είχε εγκλωβιστεί γύρω από το στρώμα αέρα και δεν είχε συμμετάσχει στην αντίδραση του τσιμεντοπολτού. Παράλληλα, τα μείγματα, και ειδικά αυτά με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ, εμφάνιζαν εξωτερικά μικρούς πόρους και δεν υπήρχε λεία επιφάνεια, αποτέλεσμα της ελαφρώς υψηλότερης περιεκτικότητας σε αέρα και πιθανόν της μη επαρκούς δόνησης. Στο Σχήμα 4-3 είναι εμφανής η ύπαρξη μικροσκοπικών πόρων (σημειώνεται με μπλε χρώμα) και υγρασίας (σημειώνεται με κόκκινο χρώμα) σε ένα δοκίμιο από το μείγμα R75 ακόμη και ένα μήνα μετά την σκυροδέτηση. Η υγρασία εμφανίζεται ως σκουρόχρωμες κηλίδες στην επιφάνεια του σκυροδέματος.



Σχήμα 4-3. Δοκίμιο R75 με σημάδια υγρασίας και πόρους.

### 4.3 Πυκνότητα

Στα δοκίμια που είχαν επιλεγεί να ενισχυθούν, και αφού είχαν συντηρηθεί για τουλάχιστον 14 ημέρες στον αέρα, έγινε μέτρηση της μάζας τους πριν την ενίσχυσή τους. Διαιρώντας τη μάζα με τον όγκο του κάθε δοκιμίου, βρέθηκε η πυκνότητά του και στη συνέχεια του αντίστοιχου μείγματος κατά μέσο όρο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-4.

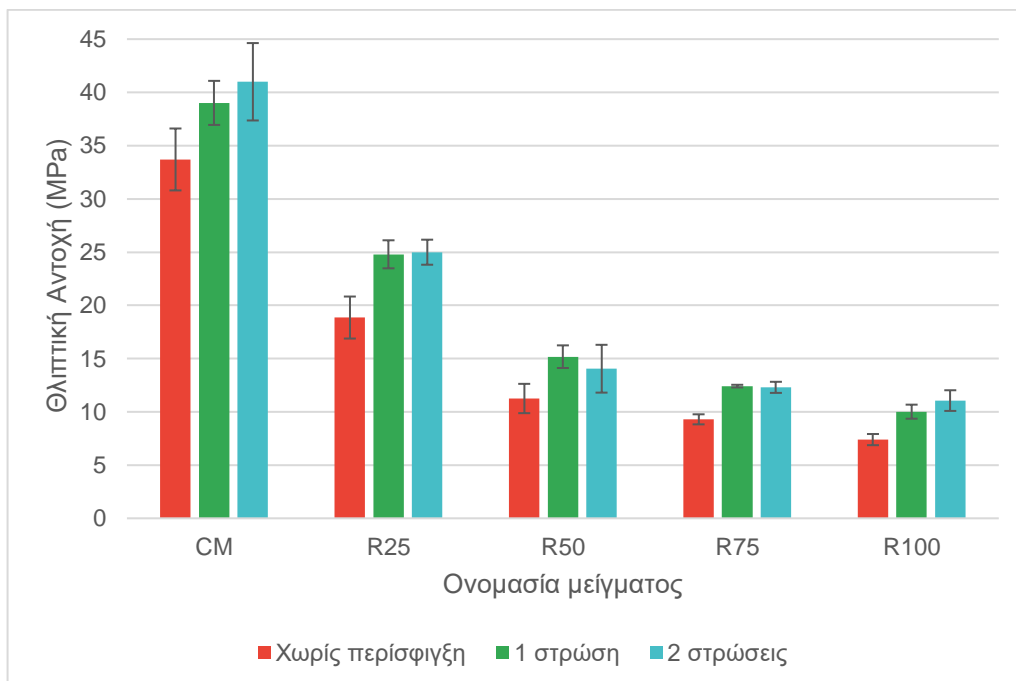


Σχήμα 4-4. Πυκνότητα μειγμάτων σκυροδέματος.

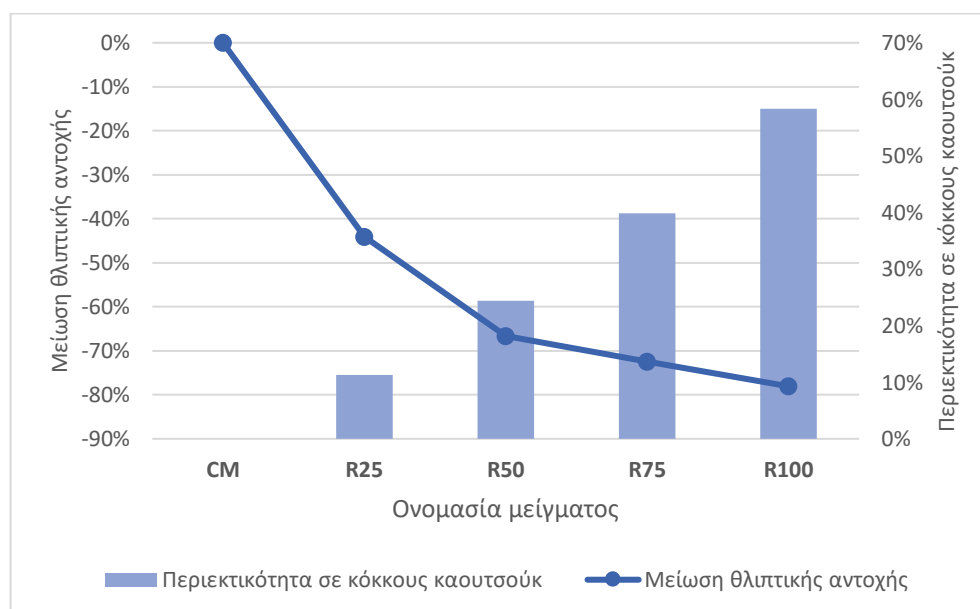
Όπως αναμενόταν η πυκνότητα του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ. Η μείωση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στη χαμηλότερη κατά ένα τρίτο πυκνότητα των κόκκων καουτσούκ έναντι των φυσικών αδρανών. Αποτέλεσμα είναι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, να μειώνεται η συνολική πυκνότητα του σκυροδέματος.

#### 4.4 Θλιπτική αντοχή

Όπως αναμενόταν η θλιπτική αντοχή των απερίσφιγκτων δοκιμίων μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. Η ίδια τάση επικρατεί και στα περισφιγμένα δοκίμια. Η μείωση της αντοχής είναι αναμενόμενη, καθώς οι κόκκοι καουτσούκ κατά την θλίψη οδηγούν σε συσσώρευση εφελκυστικών τάσεων στην μεταβατική ζώνη με αποτέλεσμα την εμφάνιση πρόωρων ρηγματώσεων, ενώ εμφανίζουν και κακή συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό. Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των μειγμάτων χωρίς περισφιγξη και με μία και δύο στρώσεις περισφιγξης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-6, η μείωση της θλιπτικής τάσης είναι σχεδόν γραμμική μέχρι το μείγμα R50. Όμως, στα μείγματα R75 και R100, όπου η περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ είναι >40%, ο ρυθμός μείωσης είναι μικρότερος, κάτι που έχει διαπιστωθεί και στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 4-5. Θλιπτικές αντοχές μειγμάτων χωρίς περίσφιγξη και με 1 και 2 στρώσεις περίσφιγξης.

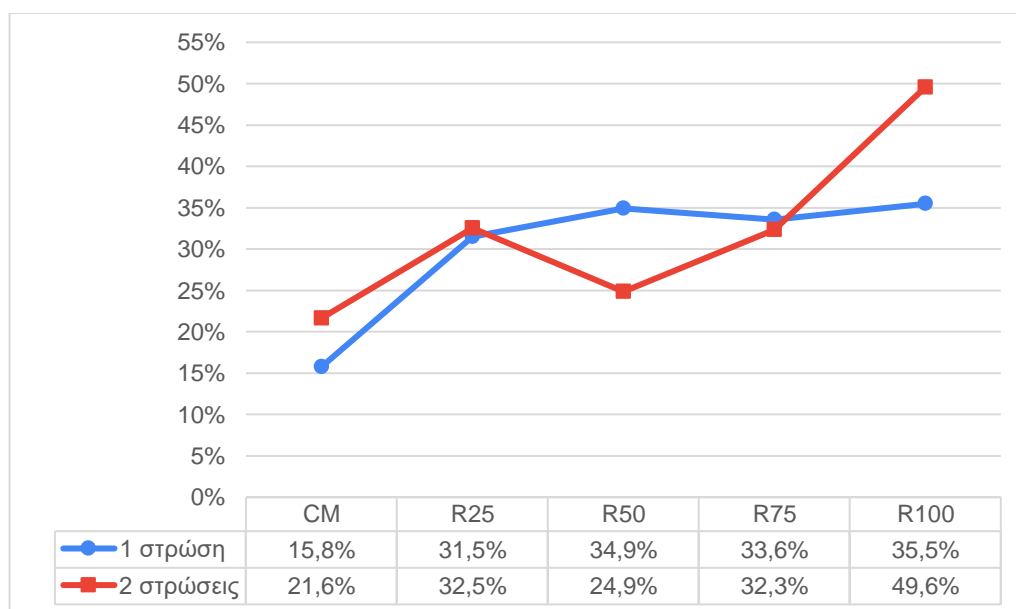


Σχήμα 4-6. Ρυθμός μείωσης θλιπτικής αντοχής ως προς την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ.

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή της περίσφιγξης αυξάνει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, με μεγαλύτερη αύξηση στα μείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-7. Η αύξηση αυτή οφείλεται στις αρχές

της περισφιγξης, η οποία ενεργοποιείται από την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος. Έτσι, με την προσθήκη περισσότερων κόκκων καουτσούκ, το σκυρόδεμα διογκώνεται περισσότερο. Αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη ενεργοποίηση του μανδύα περισφιγξης και η καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του.

Παρόλα αυτά, η χρήση δύο στρώσεων δεν αποφέρει μεγάλη αύξηση στην θλιπτική αντοχή σε σχέση με τη χρήση μίας στρώσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η περισφιγξη σε αυτά τα δοκίμια δεν ενεργοποιήθηκε, λόγω κακής εφαρμογής και πρόωρης αστοχίας του μανδύα στα άκρα του. Παρόλο που τα δοκίμια είχαν ενισχυθεί με επιπλέον λωρίδες πλέγματος στα άκρα για να αποφευχθεί η αστοχία στα σημεία αυτά, αποδείχθηκε ότι η ενίσχυση ήταν ανεπαρκής. Πιθανολογείται ότι αν είχε χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μήκος ενίσχυσης στα άκρα, τότε η αστοχίες θα συνέβαιναν στο μέσο των δοκιμών.



Σχήμα 4-7. Αύξηση θλιπτικής αντοχής κάθε μείγματος για περισφιγξη με 1 και 2 στρώσεις.

Ωστόσο, στο μείγμα R50 δεν παρατηρήθηκε η ίδια συνέπεια όπως στο υπόλοιπα μείγματα για την περισφιγξη με 2 στρώσεις. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στη μεγάλη διακύμανση της θλιπτικής αντοχής που παρουσίασαν τα δοκίμια του μείγματος. Η μειωμένη αντοχή μέρους των δοκιμών προέρχεται από την απόμειξη του μείγματος κατά την σκυροδέτηση, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ανομοιόμορφα δοκίμια. Μάλιστα, σε μερικά

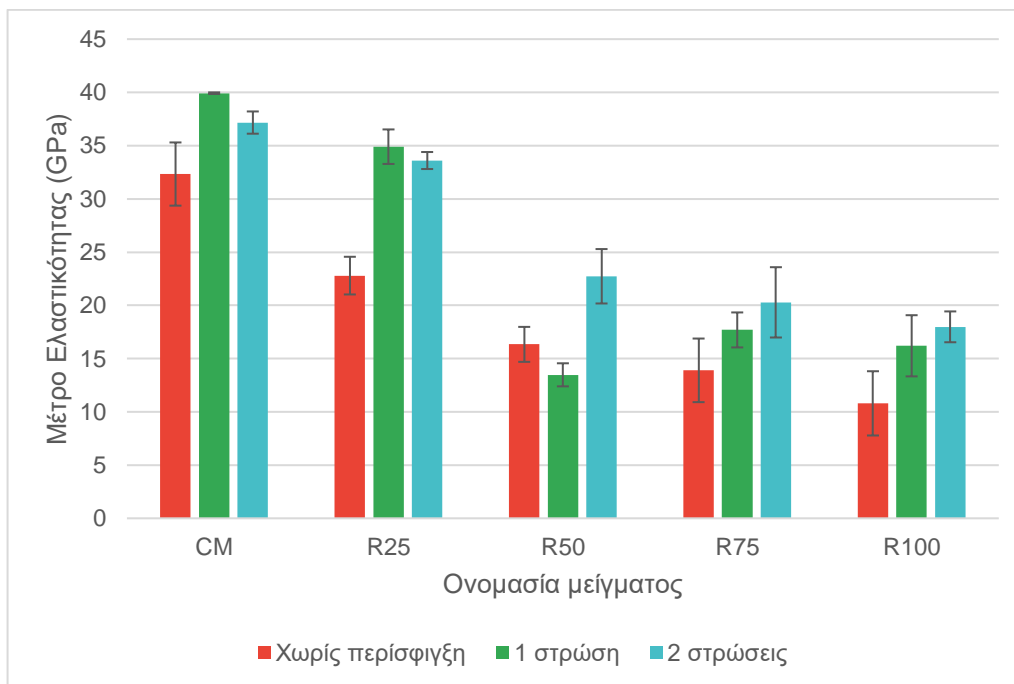


δοκίμια λόγω της απόμειξης το νερό παρέσυρε μέρος των κόκκων καουτσούκ, που ήταν ελαφρύτεροι από τα φυσικά αδρανή, στην επάνω επιφάνεια των κυλίνδρων, εντείνοντας την ανομοιομορφία. Παρόλα αυτά, το μείγμα αναμειχθηκε ξανά, οπότε τα υπόλοιπα δοκίμια δεν εμφάνισαν μειωμένη αντοχή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θλιπτική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος στα απερίσφιγκτα δοκίμια είναι της τάξης των 33.7 MPa. Αντίστοιχα, αυτή του μείγματος R100 είναι της τάξης των 7.4 MPa, μια τιμή ιδιαίτερα χαμηλή, η οποία το καθιστά ακατάλληλο για χρήση σε συνήθη έργα. Είναι, λοιπόν, αντιληπτό ότι για να παρασκευαστεί ένα μείγμα σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ με ικανοποιητική θλιπτική αντοχή χρειάζεται είτε μια μεγάλη ποσότητα τσιμέντου (ή και πρόσθετων) είτε ενίσχυση του μέλους μετέπειτα. Αυτό καθιστά το κόστος της κατασκευής αρκετά υψηλό, αφού τόσο το τσιμέντο, όσο και τα υλικά ενίσχυσης έχουν υψηλό κόστος. Ενώ, και οι κόκκοι καουτσούκ έχουν επίσης υψηλό κόστος.

#### **4.5 Διαγράμματα $\sigma$ - $\epsilon$ και μέτρο Ελαστικότητας**

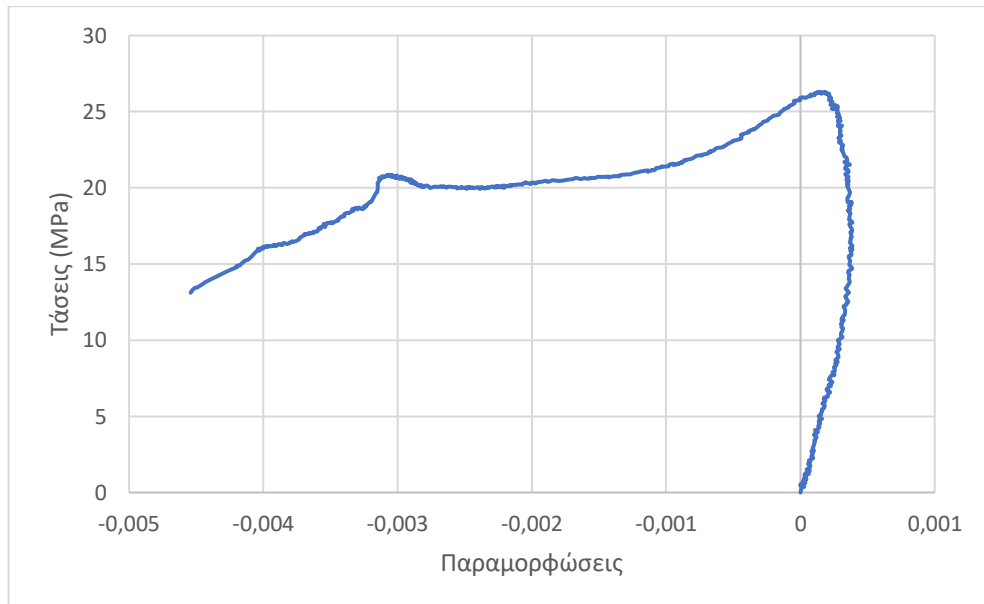
Ο υπολογισμός του μέτρου Ελαστικότητας υπολογίστηκε ως η κλίση της ευθείας που προέκυψε από εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στις τιμές της γραμμικά ελαστικής περιοχής κάθε δοκιμίου και σε εύρος τάσεων 1-3 MPa. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε μείγμα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-8. Γενικά, το μέτρο Ελαστικότητας φθίνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ. Αυτό συμβαίνει γιατί το καουτσούκ έχει πολύ μικρότερο μέτρο Ελαστικότητας από τα φυσικά αδρανή, μειώνοντας έτσι το συνολικό μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος.



Σχήμα 4-8. Μέτρα Ελαστικότητας μειγμάτων χωρίς περίσφιγξη και με 1 και 2 στρώσεις περίσφιγξης.

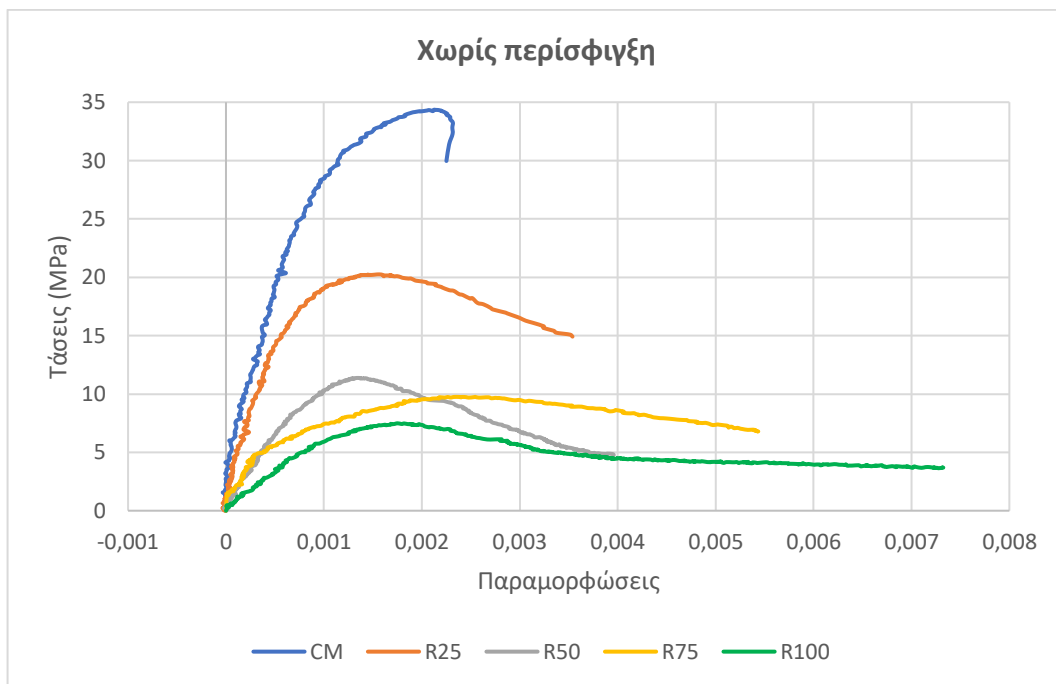
Ωστόσο, παρατηρείται μια αύξηση του μέτρου Ελαστικότητας με την προσθήκη περίσφιγξης. Αυτό δεν είναι αναμενόμενο, καθώς θα έπρεπε το μέτρο Ελαστικότητας να παραμένει ίδιο με αυτό των απερίσφιγκτων δοκιμίων. Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί για τη λανθασμένη αυτή καταγραφή είναι η επιρροή της ανεπαρκούς ενίσχυσης των άκρων των περισφιγμένων δοκιμίων. Και αυτό γιατί η έντονη διόγκωση που εμφάνισαν τα δοκίμια ήταν επικεντρωμένη στα άκρα και ιδιαίτερα στα σημεία εφαρμογής των ντιζών. Ως αποτέλεσμα, η καταγραφή των παραμορφώσεων από τα ποτενσιόμετρα ήταν λανθασμένη, καθώς η μετακίνηση λόγω διόγκωσης των άκρων τους έδωσε «εικονική» αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων. Οι λανθασμένες καταγραφές όμως, πιθανώς οφείλονται και στην ίδια τη διάταξη, καθώς η ρητίνη με την οποία κολλήθηκαν οι ντίζες έχει πολύ διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του σκυροδέματος. Ενώ και η διάνοιξη οπών για την εφαρμογή τους αποτέλεσε σημείο συγκέντρωσης τάσεων ενισχύοντας τις πιθανότητες για τοπική αστοχία σε εκείνο το σημείο. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει αντιστοίχιση των παραμορφώσεων γύρω από τις ντίζες με τις πραγματικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος, μειώνοντας έτσι την ακρίβεια της καταγραφής.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι το διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  ενός περισφιγμένου δοκιμίου του μείγματος R25, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-9. Είναι φανερό ότι όσο αυξάνει η διόγκωση του σκυροδέματος, η κλίση της ελαστικής περιοχής αλλάζει κατεύθυνση και η αλγεβρική τιμή των παραμορφώσεων γίνεται σταδιακά αρνητική.



Σχήμα 4-9. Διάγραμμα  $\sigma$ - $\epsilon$  δοκιμίου R25 με 2 στρώσεις περίσφιγξης.

Τα απερίσφιγκτα δοκίμια δεν παρουσίασαν τόσο έντονα προβλήματα στην καταγραφή των παραμορφώσεων, ωστόσο υπήρχε έντονος «θόρυβος» στην καταγραφή των δεδομένων. Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  για κάθε μείγμα χωρίς τη χρήση περίσφιγξης. Μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι το μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ. Δηλαδή μειώνεται η κλίση του διαγράμματος και το διάγραμμα μετατοπίζεται δεξιότερα. Παράλληλα, όπως παρουσιάζεται και στη βιβλιογραφία, με την αύξηση της περιεκτικότητας η κορυφή του διαγράμματος αμβλύνεται, αφού η μέγιστη τάση μειώνεται, ενώ αυξάνονται σημαντικά οι παραμορφώσεις. Συνεπώς, αυξάνεται και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, καθώς αυξάνεται το εμβαδό κάτω από την καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$ .

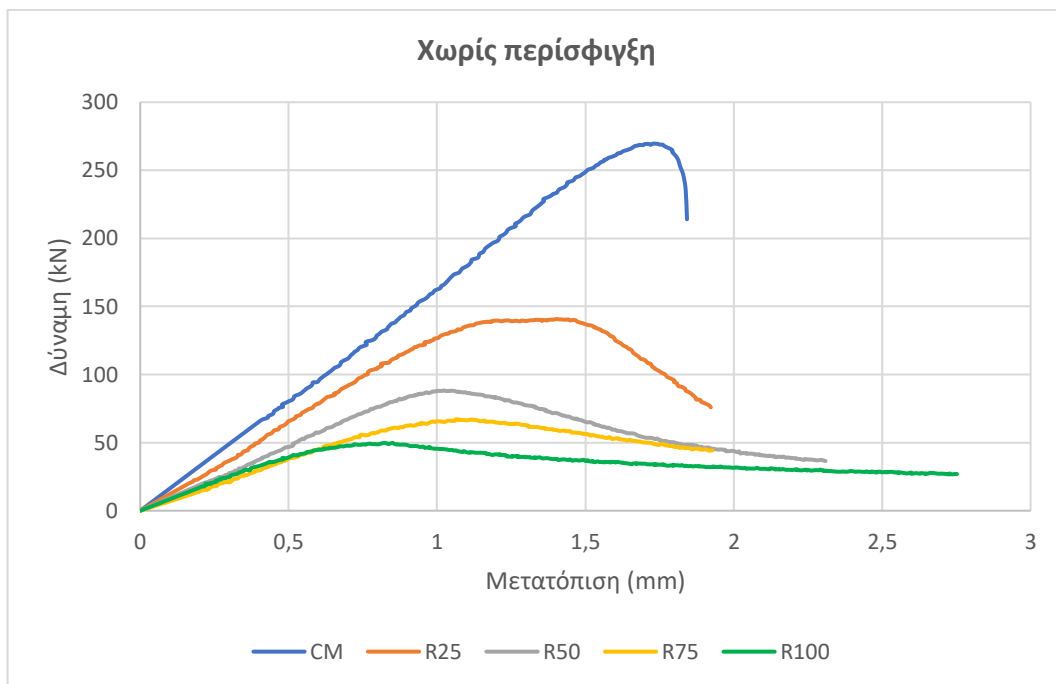


Σχήμα 4-10. Διάγραμμα σ-ε από κάθε μείγμα χωρίς περίσφιγξη.

#### 4.6 Παραμορφώσεις – Διαγράμματα P-δ

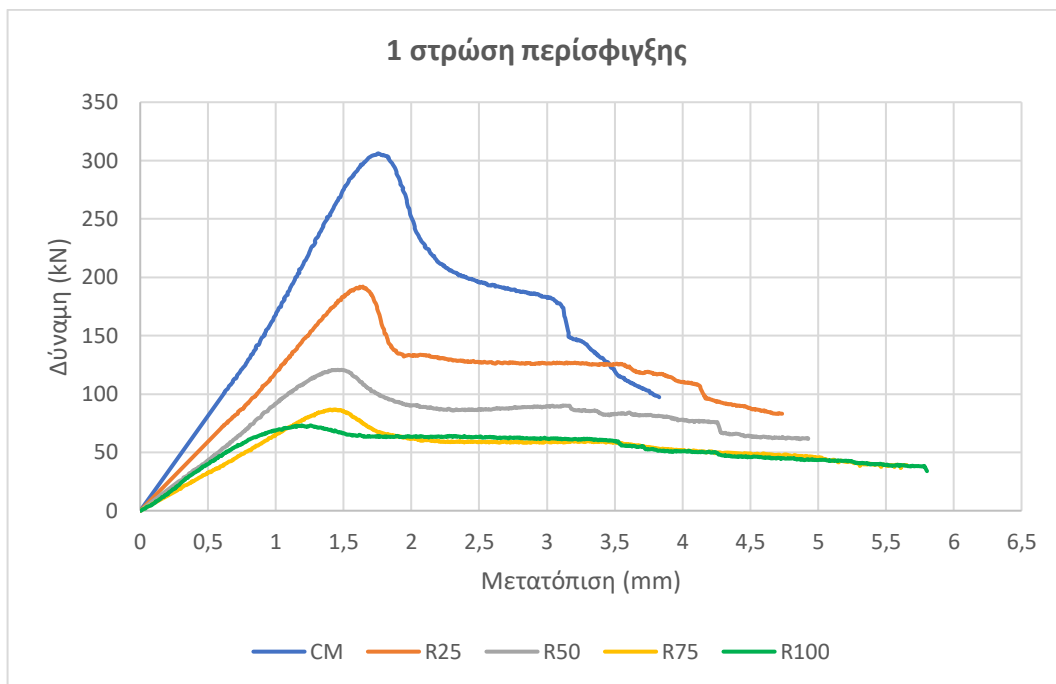
Οι παραμορφώσεις των δοκιμίων εξήχθησαν έμμεσα από τα διαγράμματα Δύναμης – Μετατόπισης (P-δ) από τα δεδομένα που έδωσε η μηχανή θλίψης, αφού αυτά από τα ποτενσιόμετρα κρίθηκαν αναξιόπιστα. Να σημειωθεί ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση της δύναμης με την τάση και της μετατόπισης με την παραμόρφωση.

Αρχικά, ως προς την επιρροή της περιεκτικότητας σε καουτσούκ, παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις αυξάνουν όσο αυξάνει η περιεκτικότητα. Ειδικότερα, στην περίπτωση χωρίς περίσφιγξη παρατηρείται, όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα σ-ε (Σχήμα 4-10), ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ οδηγεί σε μείωση της αντοχής και αύξηση της μετατόπισης. Η αύξηση των μετατοπίσεων είναι σταδιακή μετά την τιμή της μέγιστης δύναμης, με αποτέλεσμα ο δεύτερος κλάδος του διαγράμματος να μην έχει απότομη πτώση. Μάλιστα, το μείγμα R100 έδωσε συνολικά μεγαλύτερη μετατόπιση κατά 1 mm από αυτό του συμβατικού σκυροδέματος, έχοντας συνολικά μετατοπίσεις στον δεύτερο κλάδο περίπου 2 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-11.

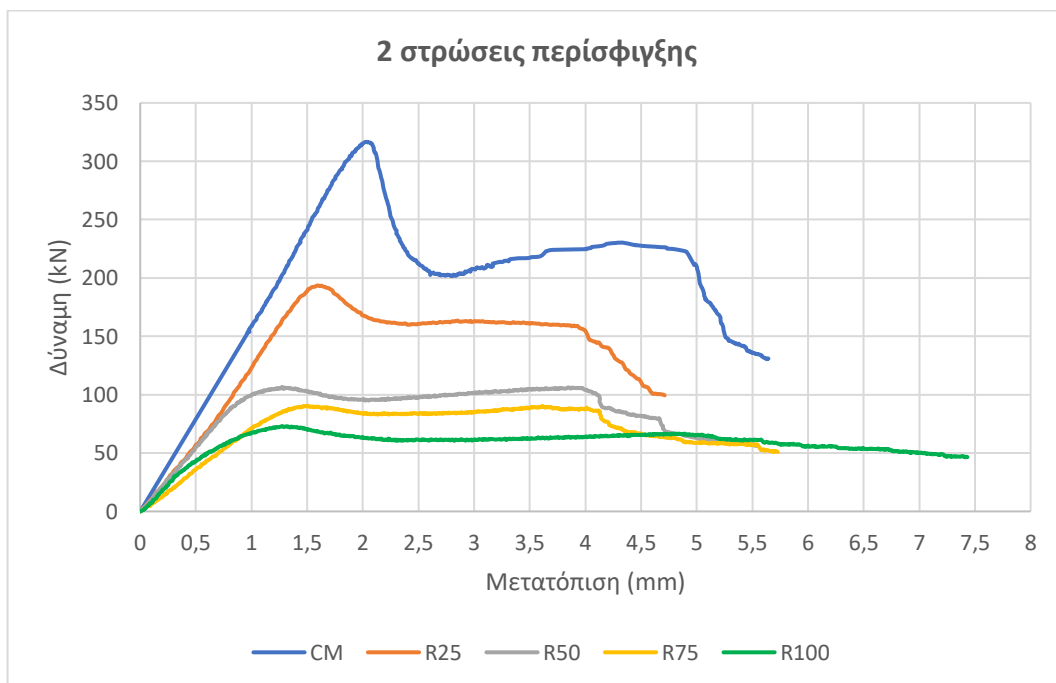


Σχήμα 4-11. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα χωρίς περίσφιγξη.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση που υπάρχει 1 στρώση (Σχήμα 4-12) και 2 στρώσεις (Σχήμα 4-13) περίσφιγξης. Ωστόσο, το διάγραμμα P-δ δεν είναι διγραμμικό, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της περίσφιγξης με ΙΟΠ. Αντίθετα, σημειώνεται μια κατακόρυφη πτώση στην δύναμη αμέσως μετά την κορυφή της καμπύλης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πτώση της αντοχής λόγω θραύσης του σκυροδέματος και στην καθυστερημένη ενεργοποίηση της περίσφιγξης. Η πτώση αυτή σταματά, όταν το σκυρόδεμα έχει διογκωθεί αρκετά ώστε να ενεργοποιηθεί η περίσφιγξη. Τότε παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων για σταθερή περίπου τιμή της επιβαλλόμενης δύναμης, μέχρι τη στιγμή που αρχίζει η θραύση του μανδύα της περίσφιγξης. Η θραύση του μανδύα συμβαίνει σταδιακά με αύξηση των ρηγματώσεων. Οπότε η πτώση στο διάγραμμα είναι σταδιακή, ενώ υπάρχουν έντονες κατακόρυφες πτώσεις, όταν πραγματοποιούνται θραύσεις των ινών του πλέγματος. Παρόλα, αυτά η ενεργοποίηση της περίσφιγξης πραγματοποιείται γρηγορότερα σε μείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ, γιατί σε αυτά τα μείγματα η διογκωση του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη. Συνεπώς, η αποδοτικότητα της περίσφιγξης αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.



Σχήμα 4-12. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα με 1 στρώση περίσφιγξης.

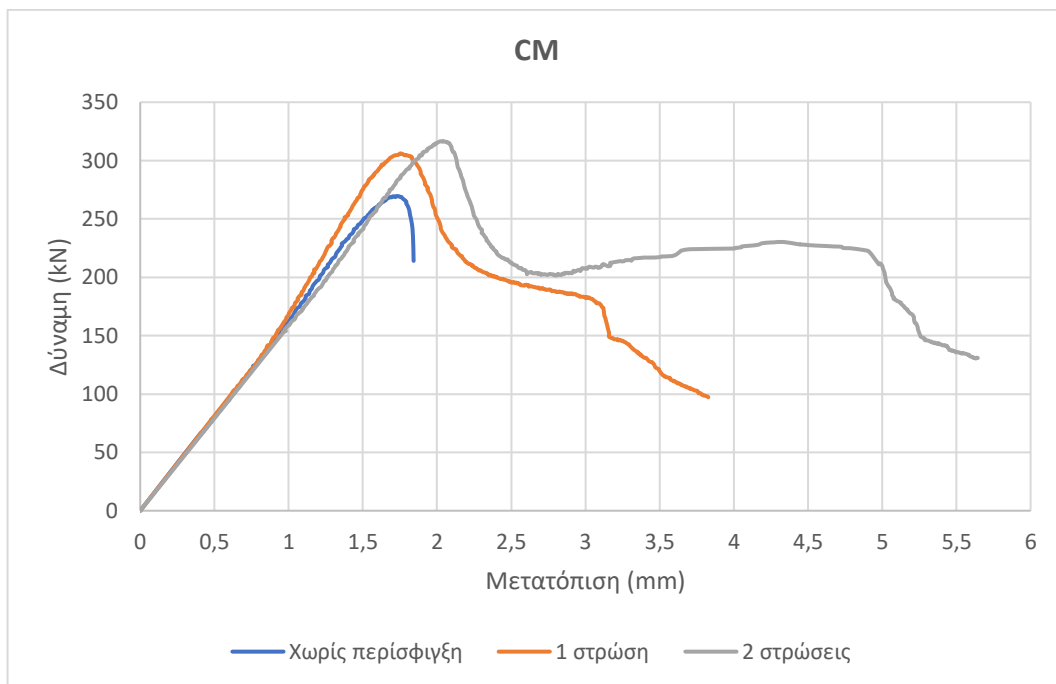


Σχήμα 4-13. Διάγραμμα P-δ από κάθε μείγμα με 2 στρώση περίσφιγξης.

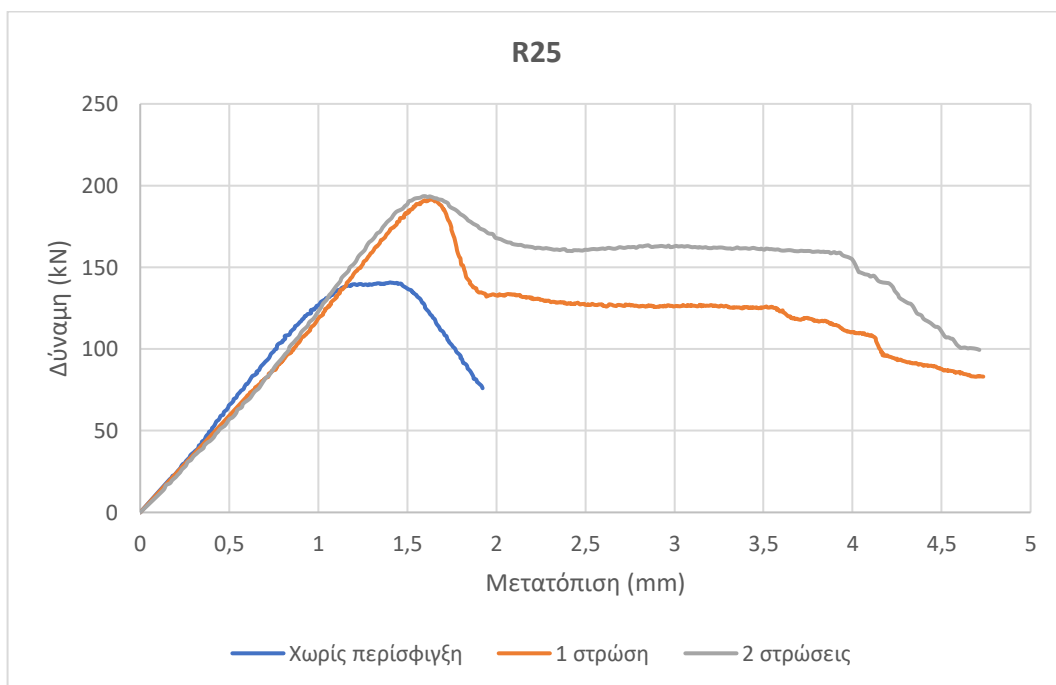
Με την αύξηση των στρώσεων της περίσφιγξης από 1 σε 2 παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων σε κάθε μείγμα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού των ινών του

πλέγματος, καθώς έτσι αυξάνει η δυστένεια του δοκιμίου. Παράλληλα, αυξάνεται, αλλά όχι σημαντικά, η μέγιστη δύναμη (δηλαδή η αντοχή) που μπορούν να παραλάβουν τα δοκίμια, όπως περιγράφηκε και στην Ενότητα 4.4. Επιπρόσθετα, η κλίση του διαγράμματος P-δ, η οποία εκφράζει την δυσκαμψία και συνδέεται άμεσα με το μέτρο Ελαστικότητας, παραμένει ίδια για κάθε δοκίμιο από το ίδιο μείγμα, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι ενίσχυσης. Αυτό είναι αναμενόμενο και αποδεικνύει την αδυναμία ορθής καταγραφής δεδομένων από τα ποτενσιόμετρα, όπως σημειώθηκε στην Ενότητα 4.5. Οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορούν να διαπιστωθούν στα Σχήματα 4-14 έως 4-18, όπου παρουσιάζονται τα διαγράμματα P-δ των απερίσφιγκτων και περισφιγμένων δοκιμίων ανά μείγμα.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων και κατ' επέκταση των παραμορφώσεων με την προσθήκη της περίσφιγξης αποτελεί σημαντική ιδιότητα. Και αυτό γιατί έτσι μπορεί να αξιοποιηθεί η μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του σκυροδέματος με κόκκους καουτσούκ, η οποία αυξάνει περαιτέρω με την περίσφιγξη. Κατά συνέπεια, το περισφιγμένο σκυρόδεμα με κόκκους καουτσούκ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές με μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας, πχ. σε αντισεισμικά στοιχεία, με την προϋπόθεση ότι η θλιπτική αντοχή θα έχει ικανοποιητική τιμή. Αυτό περιορίζει την ποσότητα καουτσούκ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τονίζοντας την ανάγκη για εύρεση ενός βέλτιστου μείγματος.

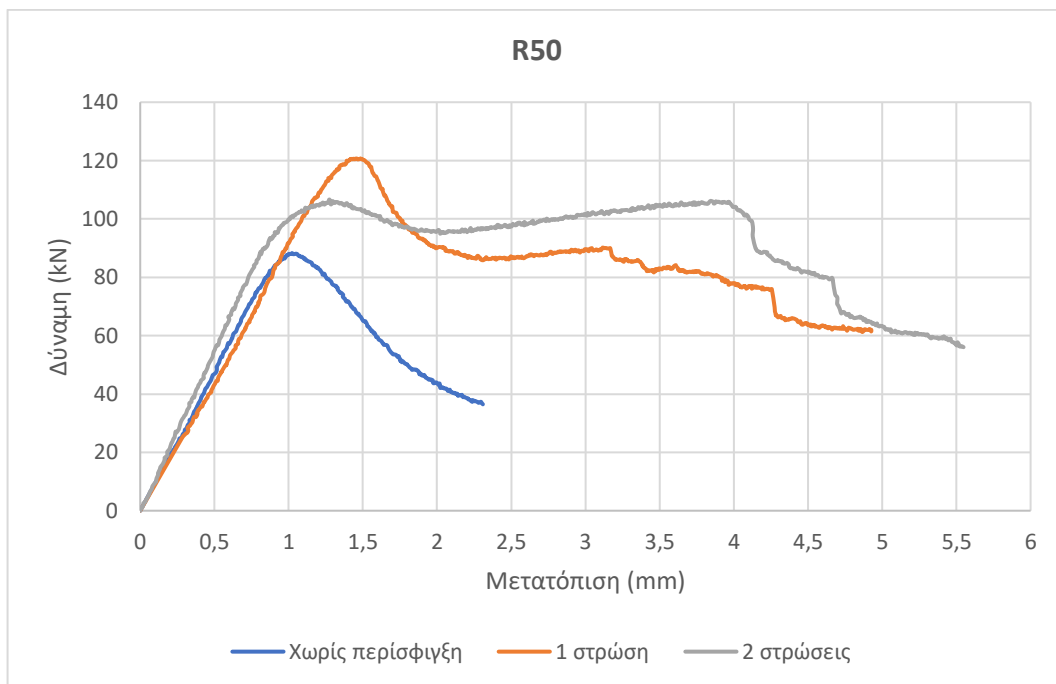


Σχήμα 4-14. Διαγράμματα P-δ μείγματος CM για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.

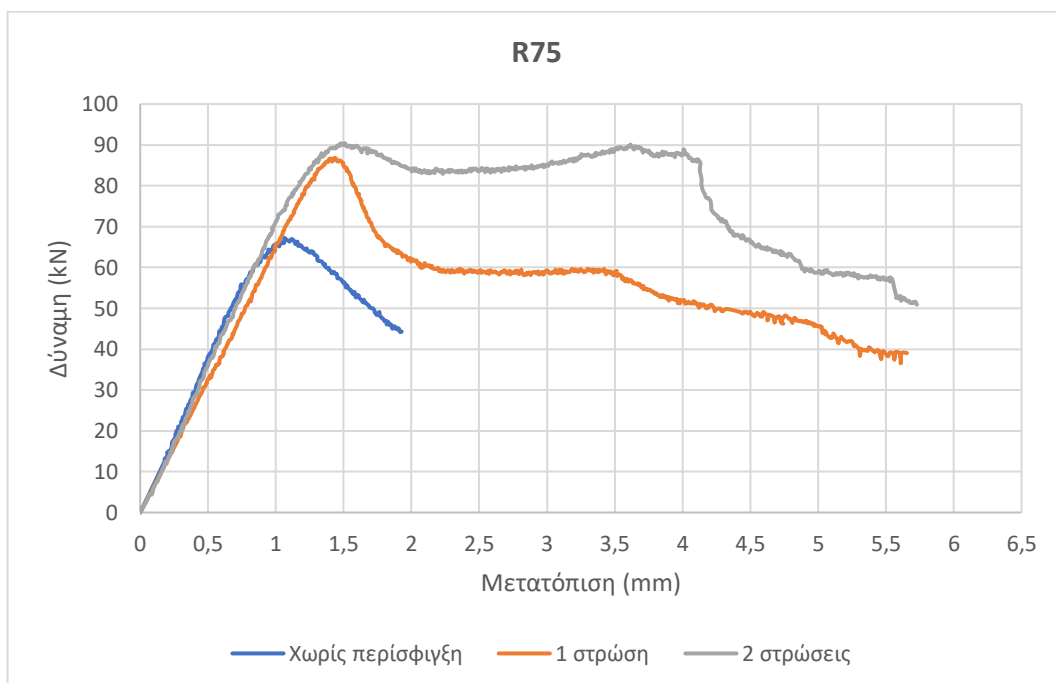


Σχήμα 4-15. Διαγράμματα P-δ μείγματος R25 για δοκίμια χωρίς και με περισφιγξη.

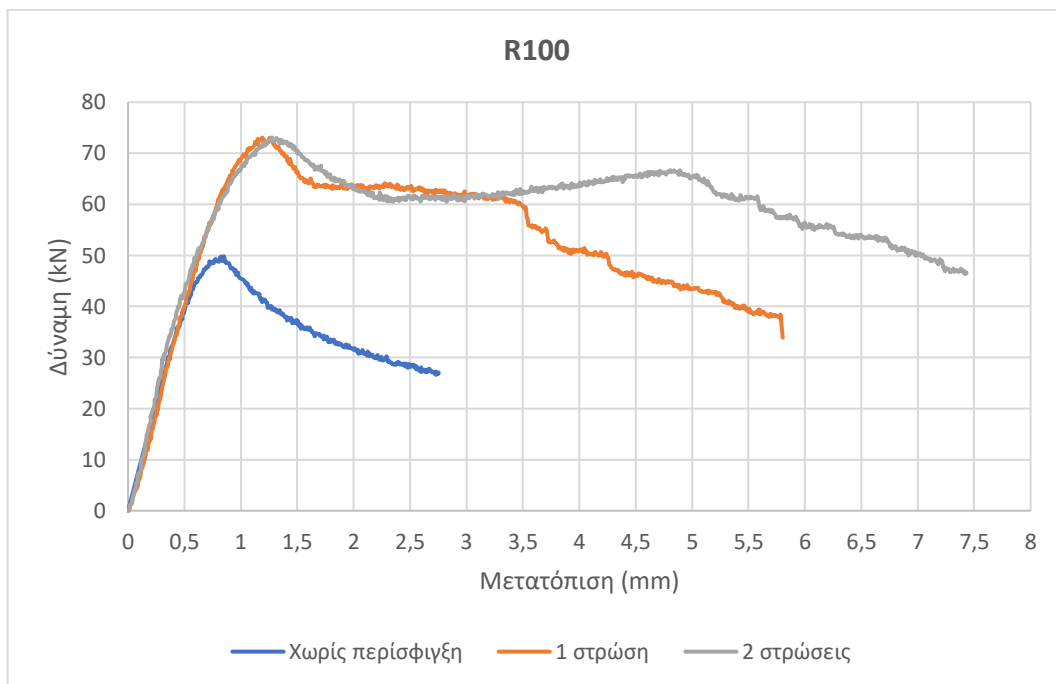




Σχήμα 4-16. Διαγράμματα P-δ μείγματος R50 για δοκίμια χωρίς και με περίσφιγξη.



Σχήμα 4-17. Διαγράμματα P-δ μείγματος R75 για δοκίμια χωρίς και με περίσφιγξη.

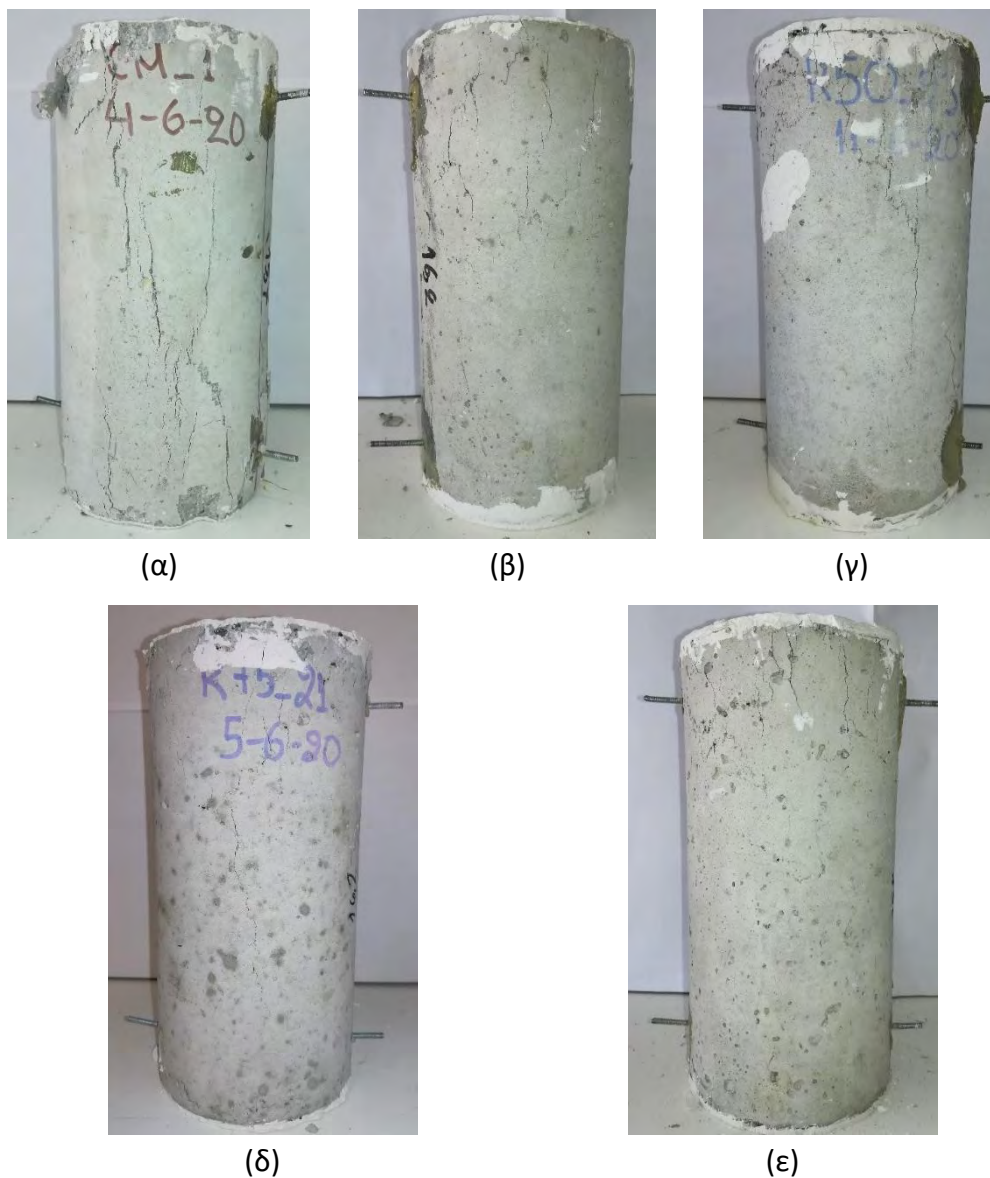


Σχήμα 4-18. Διαγράμματα P-δ μείγματος R100 για δοκίμια χωρίς και με περίσφιγξη.

## 4.7 Μορφές αστοχίας

### 4.7.1 Απερίσφιγκτα δοκίμια

Τα δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος (CM) αστόχησαν ψαθυρά με εμφάνιση έντονων κατακόρυφων ρηγματώσεων κατά μήκος των δοκιμίων. Ωστόσο, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ, η αστοχία έγινε λιγότερο ψαθυρή, οι ρηγματώσεις εμφανίζονταν σταδιακά και ήταν μικρότερες. Σε πολλές περιπτώσεις δε, τα δοκίμια αστόχησαν κοντά στα άκρα, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη μιας «αδύναμης ζώνης» συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή αυτή, λόγω της άμεσης επαφής με την πλάκα της μηχανής θλίψης. Όμως, η αδυναμία αυτή εντείνεται από την παρουσία των κόκκων καουτσούκ, αφού μειώνεται περαιτέρω η αντοχή του σκυροδέματος. Παράλληλα, τα δοκίμια με κόκκους καουτσούκ εμφάνισαν εγκάρσια διόγκωση, η οποία αυξανόταν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ. Στο Σχήμα 4-19 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας των απερίσφιγκτων δοκιμίων από κάθε μείγμα.

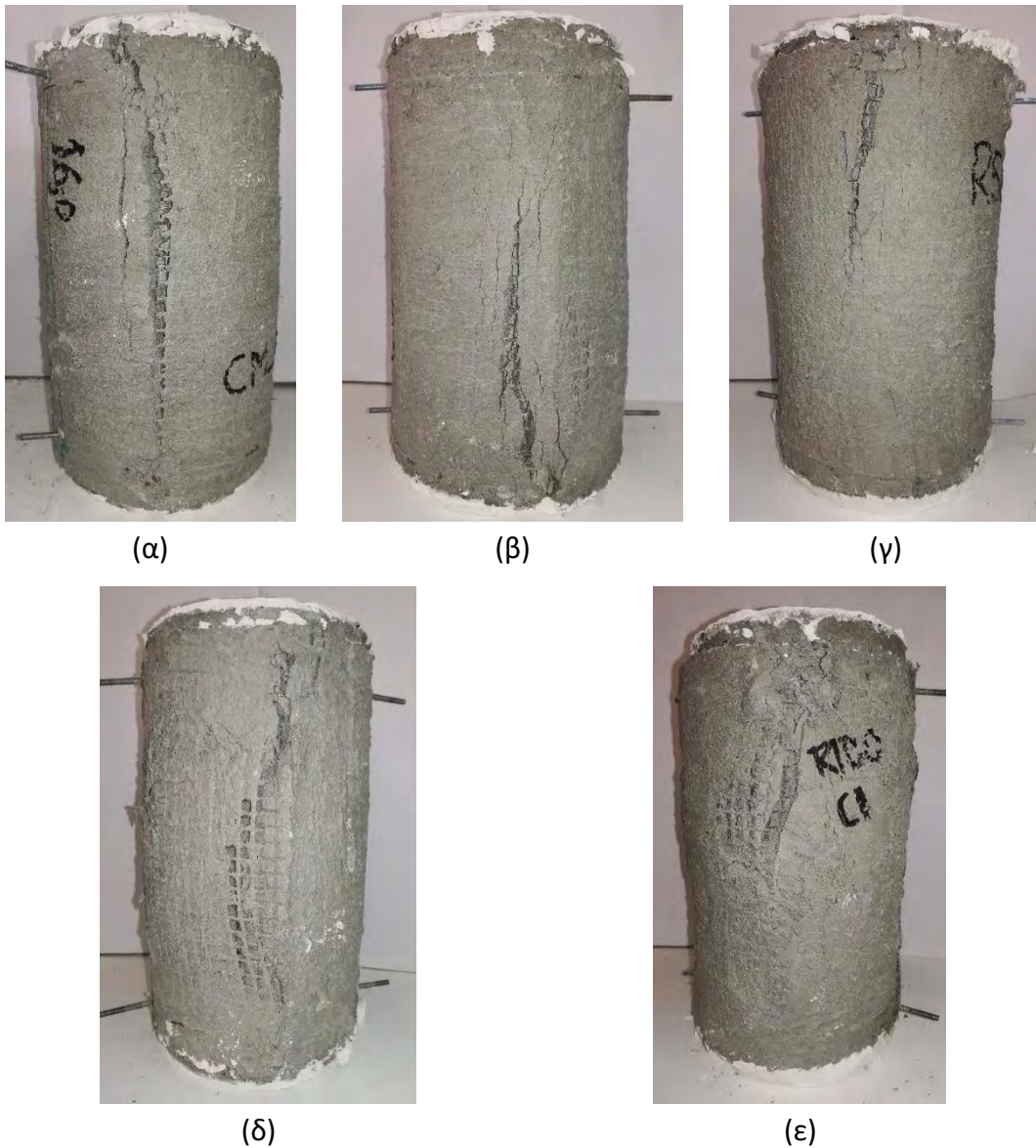


Σχήμα 4-19. Μορφές αστοχίας απερίσφιγκτων δοκιμίων (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100.

#### 4.7.2 Περισφιγμένα δοκίμια

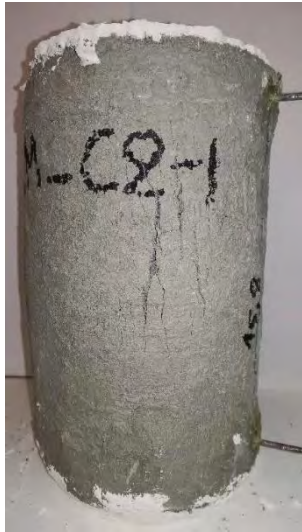
Τα περισσότερα περισφιγμένα δοκίμια παρουσίασαν αστοχία που ξεκινούσε από τα άκρα των δοκιμίων λόγω θραύσης των ινών του πλέγματος. Η αστοχία αυτή χαρακτηριζόταν από σταδιακή θραύση των ινών, που έγινε αντιληπτή κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών από τον ήχο που συνόδευε τις θραύσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αστοχία συνοδευόταν από αποκόλληση του μανδύα στο μήκος υπερκάλυψης, η οποία ξεκινούσε από τα άκρα και συνεχιζόταν σταδιακά κατά μήκος του δοκιμίου. Χαρακτηριστικό της αστοχίας

είναι η έντονη εγκάρσια διόγκωση που παρουσίασαν τα δοκίμια, η οποία εντεινόταν με την αύξηση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε κόκκους καουτσούκ. Λόγω της κακής ενίσχυσης η διόγκωση εντοπιζόταν κυρίως στα άκρα των δοκιμίων. Στο Σχήμα 4-20 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας των περισφιγμένων δοκιμίων με μία στρώση ενίσχυσης από κάθε μείγμα και στο Σχήμα 4-21 δοκιμίων με δύο στρώσεις ενίσχυσης.

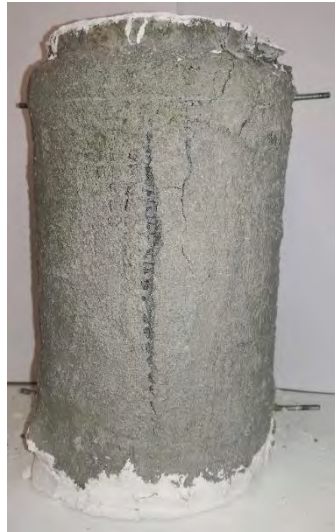


Σχήμα 4-20. Μορφές αστοχίας περισφιγμένων δοκιμίων με 1 στρώση (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100.





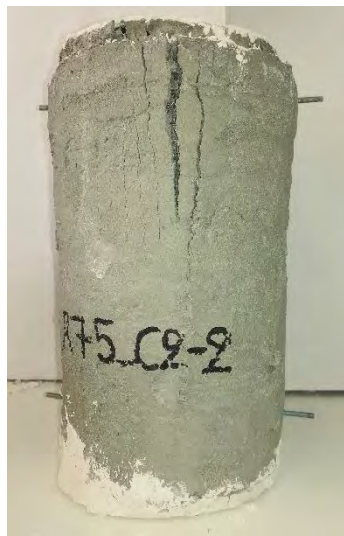
(α)



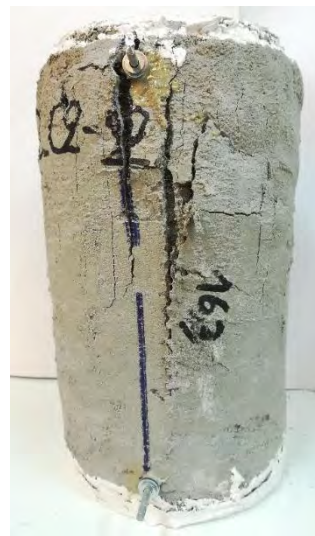
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 4-21. Μορφές αστοχίας περισφιγμένων δοκιμών με 2 στρώσεις (α) CM, (β) R25, (γ) R50, (δ) R75 και (ε) R100.

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την πειραματική διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων σκυροδέματος που περιέχει κόκκους καουτσούκ περισφιγμένου με σύνθετα υλικά σε ανόργανη μήτρα. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της ανάγκης για εύρεση βιώσιμων και φιλικότερων προς το περιβάλλον μεθόδων παρασκευής σκυροδέματος. Ένας από τους τρόπους για να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση κόκκων καουτσούκ ως αδρανή στην παραγωγή σκυροδέματος. Ωστόσο, για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε τεχνικά έργα, πρέπει πρώτα να γίνουν πλήρως κατανοητές οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του σκυροδέματος.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η χρήση κόκκων καουτσούκ μειώνει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σχεδόν γραμμικά μέχρι περιεκτικότητα 40%.
- Το μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.
- Η πυκνότητα του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.
- Η περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού σκυροδέματος παρουσιάζει μικρή αύξηση με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.
- Οι παραμορφώσεις αυξάνουν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.
- Οι παραμορφώσεις αυξάνουν με την περισφιγξη και όσο αυξάνει ο αριθμός των στρώσεων, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ.
- Τα διαγράμματα σ-ε και Ρ-δ αμβλύνονται και μετατοπίζονται δεξιότερα όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε κόκκους καουτσούκ, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της θλιπτικής αντοχής και αύξηση των παραμορφώσεων,.
- Τα δοκίμια παρουσιάζουν έντονη διόγκωση κατά την μονοαξονική θλίψη, η οποία αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.
- Η μορφή αστοχίας απερίσφιγκτων δοκιμίων γίνεται λιγότερο ψαθυρή και πιο σταδιακή με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κόκκους καουτσούκ.

- Η αστοχία περισφιγμένων δοκιμίων συμβαίνει λόγω σταδιακής αστοχίας της περισφιγξης, αφού έχει προηγηθεί θραύση του σκυροδέματος.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, προτείνεται η μελλοντική διερεύνηση των δυνατοτήτων εφαρμογής περισφιγξης με IAM σε σκυρόδεμα που περιέχει κόκκους καουτσούκ σε μέλη υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Έτσι, ώστε να αξιολογηθεί η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε αντισεισμικά στοιχεία, με βάση τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που διαπιστώθηκαν στην παρούσα εργασία, και να διερευνηθεί η πιθανότητα χρήσης σε πραγματικές κατασκευές. Παράλληλα, προτείνεται αλλαγή του τρόπου καταγραφής των παραμορφώσεων των περισφιγμένων δοκιμίων, καθώς η διάταξη που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική αποδείχθηκε αναξιόπιστη.

## A. Παράρτημα

Πίνακας Α-1. Αναλογίες των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν στο ΕΤΚΟΣ.

	<b>CM</b>	<b>R25</b>	<b>R50</b>	<b>R75</b>	<b>R100</b>
<b>Αδρανή 8-16mm [kg]</b>	29.055	29.055	29.055	29.055	29.055
<b>Αδρανή 4-8mm [kg]</b>	24.750	18.565	12.375	6.190	-
<b>Αδρανή 2-4mm [kg]</b>	20.450	15.335	10.225	5.110	-
<b>Αδρανή 1-2mm [kg]</b>	9.685	9.685	9.685	9.685	9.685
<b>Αδρανή 0.5-1mm [kg]</b>	9.685	9.685	9.685	9.685	9.685
<b>Αδρανή 0-0.5 mm [kg]</b>	13.990	13.990	13.990	13.990	13.990
<b>Καουτσούκ 4-8mm [kg]</b>	-	2.065	4.125	6.190	8.250
<b>Καουτσούκ 2-4mm [kg]</b>	-	1.705	3.410	5.115	6.815
<b>Νερό [kg]</b>	10.453	10.465	10.465	10.460	10.500
<b>Τσιμέντο [kg]</b>	20.925	20.925	20.925	20.925	20.925
<b>Υπερρευστοποιητής [g]</b>	113	113.1	113.7	113.1	111.3
<b>Όγκος μείγματος [L]</b>	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2



Πίνακας Α-2. Ημερομηνία σκυροδέτησης, ενίσχυσης και θλίψης των δοκιμών.

Όνομα δοκιμίου	Ημ/νια Σκυροδέτησης	Ημ/νια Ενίσχυσης	Ημ/νια Δοκιμής θλίψης	Ηλικία κατά την θλίψη σε ημέρες
CM_1	04/06/2020	-	24/07/2020	50
CM_6		-	22/09/2020	110
CM_9		-	22/09/2020	110
CM_10		-	22/09/2020	110
CM_11		-	22/09/2020	110
CM_15		-	22/09/2020	110
CM_19		-	23/07/2020	49
CM_22		-	23/07/2020	49
CM_C1-1		19/06/2020	22/09/2020	110
CM_C1-2		19/06/2020	23/09/2020	111
CM_C1-3		19/06/2020	23/09/2020	111
CM_C2-1		17/06/2020	23/09/2020	111
CM_C2-2		17/06/2020	21/09/2020	109
CM_C2-3		17/06/2020	21/09/2020	109
R25_2	10/06/2020	-	23/07/2020	43
R25_3		-	23/09/2020	105
R25_8		-	23/09/2020	105
R25_10		-	23/09/2020	105
R25_11		-	23/09/2020	105
R25_12		-	24/07/2020	44
R25_21		-	23/09/2020	105
R25_27		-	21/09/2020	103
R25_C1-1		22/06/2020	21/09/2020	103
R25_C1-2		22/06/2020	21/09/2020	103
R25_C1-3		22/06/2020	23/09/2020	105
R25_C2-1		18/06/2020	22/09/2020	104
R25_C2-2		18/06/2020	21/09/2020	103
R25_C2-3		18/06/2020	23/09/2020	105
R50_2	11/06/2020	-	23/09/2020	104
R50_9		-	23/09/2020	104
R50_20		-	23/09/2020	104
R50_22		-	24/07/2020	104
R50_23		-	21/09/2020	43
R50_25		-	23/09/2020	102
R50_27		-	23/07/2020	104
R50_28		-	23/09/2020	42

R50_C1-1		22/06/2020	22/09/2020	103	
R50_C1-2		22/06/2020	23/09/2020	104	
R50_C1-3		22/06/2020	23/07/2020	42	
R50_C2-1		18/06/2020	22/09/2020	103	
R50_C2-2		18/06/2020	21/09/2020	102	
R50_C2-3		18/06/2020	22/09/2020	103	
R75_2	05/06/2020	-	24/07/2020	49	
R75_15		-	24/07/2020	49	
R75_20		-	23/09/2020	110	
R75_21		-	23/07/2020	48	
R75_23		-	23/09/2020	110	
R75_24		-	23/09/2020	110	
R75_25		-	23/09/2020	110	
R75_30		-	23/09/2020	110	
R75_C1-1		19/06/2020	23/09/2020	110	
R75_C1-2		19/06/2020	23/09/2020	110	
R75_C1-3		19/06/2020	22/09/2020	109	
R75_C2-1		15/06/2020	21/09/2020	108	
R75_C2-2		15/06/2020	22/09/2020	109	
R75_C2-3		17/06/2020	23/09/2020	110	
R100_1		02/06/2020	-	23/07/2020	51
R100_6			-	22/09/2020	112
R100_14	-		23/09/2020	113	
R100_15	-		22/09/2020	112	
R100_20	-		22/09/2020	112	
R100_21	-		22/09/2020	112	
R100_22	-		21/09/2020	111	
R100_25	-		22/09/2020	112	
R100_C1-1	19/06/2020		23/09/2020	113	
R100_C1-2	19/06/2020		23/09/2020	113	
R100_C1-3	19/06/2020		22/09/2020	112	
R100_C2-1	12/06/2020		21/09/2020	111	
R100_C2-2	12/06/2020		21/09/2020	111	
R100_C2-4	15/06/2020		23/09/2020	113	

## Βιβλιογραφία

1. ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org) (2020). [https://doi.org/10.1520/C0039\\_C0039M-20](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20)
2. ASTM C143 / C143M-20, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org) (2020). [https://doi.org/10.1520/C0143\\_C0143M-20](https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20)
3. ASTM C231 / C231M-17a, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org) (2017). [https://doi.org/10.1520/C0231\\_C0231M-17A](https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A)
4. ASTM C617 / C617M-15, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org) (2015). [https://doi.org/10.1520/C0617\\_C0617M-15](https://doi.org/10.1520/C0617_C0617M-15)
5. Bompa, D. v., & Elghazouli, A. Y. (2020). Stress–strain response and practical design expressions for FRP-confined recycled tyre rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237, 117633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117633>
6. Bompa, D. v., Elghazouli, A. Y., Xu, B., Stafford, P. J., & Ruiz-Teran, A. M. (2017). Experimental assessment and constitutive modelling of rubberised concrete materials. *Construction and Building Materials*, 137, 246–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.086>
7. Bournas, D. A., Lontou, P. v., Papanicolaou, C. G., & Triantafyllou, T. C. (2007). Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 104(6), 740–748. <https://doi.org/10.14359/18956>
8. Chan, C. W., Yu, T., Zhang, S. S., & Xu, Q. F. (2019). Compressive behaviour of FRP-confined rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 416–426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.211>
9. Colajanni, P., Fossetti, M., & MacAluso, G. (2014). Effects of confinement level, cross-section shape and corner radius on the cyclic behavior of CFRCM confined concrete columns. *Construction and Building Materials*, 55, 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.035>

10. di Ludovico, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2010). Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 541–552. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000114)
11. Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478–496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478))
12. Elghazouli, A. Y., Bompa, D. v., Xu, B., Ruiz-Teran, A. M., & Stafford, P. J. (2018). Performance of rubberised reinforced concrete members under cyclic loading. *Engineering Structures*, 166(March), 526–545. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.090>
13. García, D., Alonso, P., San-José, J.-T., Garmendia, L., & Perlot, C. (2010). Confinement of medium strength concrete cylinders with basalt Textile Reinforced Mortar. *13th International Congress on Polymers in Concrete [ICPIC 2010]*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000114)
14. Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 1–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882)
15. Papakonstantinou, C. G., & Tobolski, M. J. (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1686–1691. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.015>
16. Raffoul, S., Garcia, R., Escolano-Margarit, D., Guadagnini, M., Hajirasouliha, I., & Pilakoutas, K. (2017). Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression. *Construction and Building Materials*, 147, 388–397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.175>
17. Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Medina, N. F. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 124, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054>

18. Raffoul, S., Garcia, R., Κούτας, Λ., Αθανασοπούλου, Σ., & Πηλακούτας, Κ. (2018). Χρήση Καουτσούκ Από Ανακυκλωμένα Ελαστικά Αυτοκινήτων Για Τη Δημιουργία Σκυροδέματος Υψηλής Παραμορφωσιμότητας. *Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*.
19. Segre, N., & Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30, 1421–1425.
20. Siddika, A., Mamun, M. A. al, Alyousef, R., Amran, Y. H. M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711–731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
21. Su, H., Yang, J., Ling, T. C., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
22. Topçu, I. B. (1995). The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304–310. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00014-3)
23. Toutanji, H. A. (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), 135–139. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00010-0)
24. Trapko, T. (2013). Fibre reinforced cementitious matrix confined concrete elements. *Materials and Design*, 44, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.024>
25. Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., & Laourdekis, T. (2006). Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI Structural Journal*, 103(1), 28–37. <https://doi.org/10.14359/15083>
26. Youssf, O., ElGawady, M. A., & Mills, J. E. (2016). Static cyclic behaviour of FRP-confined crumb rubber concrete columns. *Engineering Structures*, 113, 371–387. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.033>
27. Youssf, O., Mills, J. E., & Hassanli, R. (2016). Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040>

28. Δερουκάκη, Μ. (2020). *Ινοπλέγματα Σε Ανόργανη Μήτρα: Μηχανική Συμπεριφορά Σε Εφελκυσμό και Σε Συνάφεια με το Σκυρόδεμα. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
29. *Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (Ε.Ο.ΑΝ.).* (n.d.). Ημερομηνία Ανάκτησης: 23 Απριλίου 2020. [www.eoan.gr](http://www.eoan.gr)
30. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016, Τεύχος Β'1561/02.06.2016, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας.
31. Στρουμπούλης, Κ. (2020). Πειραματική Μελέτη Περίσφιγξης Με Σύνθετα Υλικά Σκυροδέματος που Περιέχει Κόκκους Καουτσούκ από Ανακυκλωμένα Ελαστικά Αυτοκινήτων. *Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
32. Τριανταφύλλου, Α. Χ. (2004). *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)* (2η). Αυτοέκδοση.
33. Τριανταφύλλου, Α. Χ. (2013). *Δομικά Υλικά* (13η). Αυτοέκδοση.