



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Προετοιμασία και χαρακτηρισμός ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου και ίνες χάλυβα

Διπλωματική Εργασία

Του

Κοσμά Γεώργιου



Επιβλέπων: Νικόλαος Ζαφειρόπουλος

Καθηγητής, Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Οκτώβριος 2024, ΙΩΑΝΝΙΝΑ

Υπεύθυνη Δήλωση

Δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1. Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
2. Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Ο Δηλών

Γεώργιος Κοσμάς

Η παρούσα Διπλωματική Μεταπτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνολογίας Πολυμερών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων ως τμήμα της αδημοσίευτης διδακτορικής διατριβής της Υποψήφιας Διδάκτορα Γλυκερίας Πορφυριάδου.

Επιβλέπων καθηγητής της εργασίας είναι ο καθηγητής Νικόλαος Ζαφειρόπουλος και μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής

Η επιτροπή συνήλθε σε συνεδρίαση στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, όπου παρακολούθησε την υποστήριξη της διατριβής με τίτλο: «Προετοιμασία και χαρακτηρισμός ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου και ίνες χάλυβα»

Η επιτροπή έκρινε ομόφωνα ότι η διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία είναι πρωτότυπη και αποτελεί ουσιαστική συμβολή στην πρόοδο της Επιστήμης.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ

Στη σύζυγό μου Πετρούλα και στον γιό μου Θάνο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Ζαφειρόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας και την υποστήριξή του καθολη την διάρκεια αυτής. Ευχαριστώ επίσης τους Καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Θα ήθελα επιπροσθέτως, να ευχαριστήσω όλους τους υποψηφίους διδάκτορες, μεταδιδάκτορες, μεταπτυχιακούς και προπτυχιακούς φοιτητές του Εργαστηρίου Πολυμερικών Υλικών, ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα Γλυκερία Πορφυριάδου για την στήριξη και την βοήθειά της στην διεξαγωγή των πειραμάτων.

Σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής και κατ' επέκταση του μεταπτυχιακού είχε η Φωτεινή Τσιόγκα ο Κιάπε Σταύρος και ο Δημήτρης Χρήστου με τους οποίους η συνεργασία ξεκίνησε από την αρχή του μεταπτυχιακού προγράμματος Δ.Π.Μ.Σ.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύζυγό μου τον γιο μου τους γονείς μου και την αδερφή μου για την υποστήριξή τους σε αυτό το εγχείρημα.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
Περίληψη.....	10
<i>Abstract</i>	11
Θεωρητικό Μέρος Ι	12
1. Ιστορική Αναδρομή	13
1.1. Υλικά για την Σύνθεση Σκυροδέματος	15
1.1.1. Τσιμέντο.....	16
1.1.2. Νερό.....	23
1.1.3. Αδρανή.....	24
1.1.3.1. Προέλευση αδρανών	25
1.1.3.2. Αντοχή των αδρανών	26
1.1.3.3. Γενικά για τα αδρανή υλικά.....	27
1.1.4. Πρόσθετα και Πρόσμικτα.....	27
1.1.4.1. Ρευστοποιητές	28
1.1.4.2. Υπερρευστοποιητές	29
1.1.4.3. Επιταχυντές.....	30
1.2. Λόγος νερού-τσιμέντου (N/T)	32
1.3. Εργασιμότητα.....	33
1.4. Διαδικασία έλεγχου κάθισης (slump test)	34
1.5. Σκλήρυνση.....	35
1. Ενισχυμένο σκυρόδεμα.....	36
1.1. Σκυρόδεμα οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες.....	39
1.2. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με πολυμερικές ίνες.....	42
1.2.1. Πολυμερικές ίνες.....	42
1.2.2. Πλεονεκτήματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος	43
1.2.3. Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος	44
2. Πολυμερή	44

2.1.	Πολυπροπυλένιο	46
2.1.1.	Εφαρμογές Πολυπροπυλενίου.....	47
2.2.	Πολυμερικές Ινες.....	48
3.	Τεχνικές Χαρακτηρισμού	49
4.1.	Καμπτική Αντοχή Δοκιμίων	49
4.2.	Θλίψη.....	51
4.3.	Θερμική Ανάλυση	52
4.3.1.	Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)	52
4.4.	Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (DMA).....	56
4.5.	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)	58
	Πειραματικό Μέρος II.....	59
6.	Πειραματικό Μέρος	60
6.1.	Οργανολογία	60
6.2.	Πειραματική διαδικασία	60
7.	Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση	67
7.1.	Οπτική παρατήρηση δειγμάτων	68
7.2.	Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (DMA).....	69
7.3.	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	71
7.4.	Διαφορική θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC).....	74
7.5.	Θλίψη.....	74
7.6.	Κάμψη τεσσάρων σημείων	76
	Συμπεράσματα.....	81
	Μελλοντικοί Στόχοι	82
	Βιβλιογραφία	83

Περίληψη

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο δομικό υλικό από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Στο πέρασμα των χρόνων, έχει μεταβληθεί αρκετά έτσι ώστε να βελτιωθεί η σύστασή του και οι μηχανικές του ιδιότητες με σκοπό να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιείτε. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αντοχής δοκιμίων σκυροδέματος που περιέχει πολυμερικές ίνες δύο διαφορετικών μηκών αλλά και ινες χάλυβα καθώς και συνδυασμός αυτών.

Παρασκευάστηκαν λοιπόν, πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $40 \times 10 \times 10$ cm χωρίς ίνες αλλά και με ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12 και 19 mm αντίστοιχα και με ινες χάλυβα. Τα δοκίμια αυτά έπειτα, επιβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων έως την αστοχία τους αλλά και θλίψη. Από την διαδικασία αυτή λήφθηκαν αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή των δοκιμίων και την δυσθραυστότητα τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ναι μεν οι ινες χάλυβα είχαν μεγαλύτερη θλιπτική και καμπτική αντοχή αλλά οι ινες πολυπροπυλενίου παρείχαν καλύτερη συγκράτηση των θραυσμάτων και έπειτα ο συνδυασμός αυτών των δυο κατηγοριών ινών μπορούν να αυξήσουν την αντοχή του σκυροδέματος αλλά και να πετύχουν συγκράτηση των θραυσμάτων.

Λέξεις κλειδιά: Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα, Ίνες Πολυπροπυλενίου (PP), Δοκιμή Κάμψης, Δυσθραυστότητα

Abstract

Concrete is the most widely used building material from ancient times to the present day. Over the years, it has been modified enough to improve its composition and mechanical properties in order to have the desired characteristics for the various applications used. The aim of this thesis is to study the strength of concrete specimens containing polymeric fibres of two different lengths and steel fibres and their combination.

Therefore, prismatic specimens of 40×10×10 cm without fibres and with polypropylene fibres of 12 and 19 mm lengths and steel fibres were prepared. These specimens were then subjected to a four-point bending test until failure and compression. From this procedure results were obtained on the strength of the specimens and their brittleness. The results showed that although the steel fibres had higher compressive and flexural strength but the polypropylene fibres provided better fracture retention and then the combination of these two categories of fibres can increase the strength of concrete but also achieve fracture retention.

Key words: Fibre reinforced concrete, Polypropylene (PP) fibres, Flexural strength, Flexural brittleness

Θεωρητικό Μέρος Ι

1. Ιστορική Αναδρομή

Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα ενώ είναι δύο διαφορετικά υλικά στην ουσία δεν διαχωρίζονται στην συνείδηση του μέσου καταναλωτή ο οποίος πρακτικά γνωρίζει το τελικό προϊόν που είναι το σκυρόδεμα. Η χρήση του σκυροδέματος έχει επικρατήσει διεθνώς λόγω των εξαιρετικά χρήσιμων ιδιοτήτων και του χαμηλού κόστους που προσφέρει. Αυτό οφείλεται στην ανθεκτικότητα του στο νερό, στην μοναδική του αντοχή σε διάφορες περιβαλλοντικές επιδράσεις και στην ευελιξία που παρέχει στην κατασκευή διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Συνεπώς, η εύκολη εργασιμότητα του, η αφθονία των υλικών του και η χαμηλή ενέργεια που απαιτείται για την παρασκευή του, συμβάλλουν τόσο στην χώρα μας όσο και σε διεθνές επίπεδο στην παγκόσμια διάδοσή του. Η παγκόσμια κατανάλωσή του ανέρχεται στα 5,5 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως. [1] Η ιστορία του σκυροδέματος ξεκινά αρκετές χιλιετίες πριν, καταγράφοντας την πορεία του ως ένα από τα πιο βασικά και ανθεκτικά δομικά υλικά. Από την αρχαία Αίγυπτο, όπου χρησιμοποιήθηκε μίγμα λάσπης και άχυρου για τη στερέωση των τούβλων, μέχρι την ανακάλυψη του τσιμέντου Portland από τον Joseph Aspdin το 1824, η εξέλιξη αυτού του υλικού ήταν εντυπωσιακή. Τον 19ο αιώνα, ο John Smeaton χρησιμοποίησε υδραυλικό ασβέστη για την ανοικοδόμηση του φάρου του Eddystone στην Αγγλία, ενώ ο Joseph Monier εισήγαγε την έννοια της ενίσχυσης με σύρμα το 1867, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο την ιδέα ενίσχυσης με ράβδους σιδήρου. Από τότε, το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μεγάλων έργων, όπως γέφυρες, δρόμοι, φράγματα και κτίρια. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και η καινοτομία συνέβαλαν στην ανάδειξη του σκυροδέματος ως ένα από τα κυριότερα υλικά στην κατασκευαστική βιομηχανία. Η χρήση του σκυροδέματος επεκτάθηκε στον κατασκευαστικό τομέα, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στον σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική. [2]

Από την επινόηση της πρώτης περιστροφικής κάμινου, το 1886, που επέτρεψε τη συνεχή παραγωγή τσιμέντου, μέχρι την κατασκευή του ψηλότερου κτιρίου από ενισχυμένο σκυρόδεμα το 1992 στο Σικάγο, η ανάπτυξη αυτού του υλικού συνέβαλε στην κατασκευή εντυπωσιακών και ανθεκτικών κατασκευών. Το σκυρόδεμα έχει γίνει θεμέλιος λίθος για την ανθεκτικότητα και τη διαχρονικότητα των μεγάλων έργων παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας την ανθεκτική παράδοση και τη σύγχρονη

καινοτομία στον κλάδο της κατασκευής. [2] εφαρμογές που περιλαμβάνουν τον παράγοντα της ανθρώπινης ζωής.

Το τσιμέντο ως δομικό υλικό χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους Αιγύπτιους και τους Ρωμαίους. Το αρχικό μίγμα αποτελούνταν από ασβέστη, άργιλο, άμμο και νερό. Κατά τον 1 αιώνα μ.Χ. περίπου, οι Ρωμαίοι πρόσθεσαν μια ποσότητα ηφαιστιογενούς υλικού, το οποίο επέτρεπε την πήξη του μίγματος με το νερό. Το 1817, πραγματοποιήθηκε η πρώτη σύγχρονη μελέτη για το τσιμέντο αποτελούμενο από ασβέστη και ηφαιστειογενή τέφρα από τον Γάλλο επιστήμονα Louis Vicat. Το τσιμέντο Portland έκανε την εμφάνισή του το 1824 και πήρε το όνομά του από ένα πέτρωμα που του έμοιαζε και υπήρχε στο Portland της νότιας Αγγλίας. Το 1846 λειτούργησε το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στην Γαλλία. Ενώ, το 1889 χτίζεται η πρώτη γέφυρα από σκυρόδεμα, το 1891 ο πρώτος δρόμος και το 1903 ο πρώτος ουρανοξύστης από σκυρόδεμα στις ΗΠΑ. Το 1971 δίνεται σε κυκλοφορία η μακρύτερη για την εποχή της τσιμεντένια γέφυρα στην Γιακίμα της Ουάσιγκτον (Εικόνα 1). Η γέφυρα επίσης, διαθέτει ένα από τα μεγαλύτερα ανοίγματα τσιμεντένιας ασπίδας. Το 1954 εκδίδεται ο πρώτος κανονισμός για το οπλισμένο σκυρόδεμα και το 1985 εκδίδεται ο κανονισμός τεχνολογίας σκυροδέματος (ΦΕΚ 266/Β/9.5.85). Τα χρόνια έπειτα από αυτό, ο κανονισμός αναθεωρείται, προσαρμόζεται, προστίθενται οι κατηγορίες κάθισης. Ωσπου, το 2016 εκδίδεται ο νέος ΚΤΣ 2016. Στις μέρες μας, παρασκευάζονται διάφορα σκυροδέματα από τους 5 διαφορετικούς τύπους τσιμέντου και έχουν ανακαλυφθεί πολλά πρόσθετα υλικά όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων και άλλα. Το 85% της παραγωγής τσιμέντου στην Ευρώπη καταλαμβάνεται από το τσιμέντο Portland. Ενώ, η ετήσια κατανάλωση σκυροδέματος παγκοσμίως ανέρχεται στους 11 δισεκατομμύρια τόνους. Στην Ελλάδα, η παραγωγή τσιμέντου ετησίως είναι περίπου 16 εκατομμύρια τόνοι. Η βιομηχανία τσιμέντου είναι ένας συνεχώς αναπτυσσόμενος κλάδος που διαρκώς αναζητά νέα υλικά ως πρώτες ύλες και νέα πεδία για να καινοτομήσει [24], [41].



Εικόνα 1. Fred G. Redmon Bridge, τσιμεντένια γέφυρα του 1971 στην Yakima County, Washington [41].

1.1. Υλικά για την Σύνθεση Σκυροδέματος

Το τσιμέντο ανάλογα με τα συστατικά που αναμιγνύεται παράγει διαφορετικά υλικά με ονομασίες όπως πάστα, κονίαμα και σκυρόδεμα. Ο όρος πάστα, αναφέρεται στο υλικό που αποτελείται μόνο από τσιμέντο και νερό. Ενώ, όταν το μίγμα αποτελείται μόνο από τσιμέντο, νερό και την άμμο ως λεπτόκοκκο αδρανές τότε ονομάζεται κονίαμα. Τέλος, το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που προέρχεται από την ανάμιξη κατάλληλων ποσοτήτων τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού με ή χωρίς την προσθήκη πρόσθετων, το οποίο δημιουργεί μια ενιαία συνδετική φάση και αναπτύσσει τις ιδιότητές του μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων, της ενυδάτωσης, δηλαδή της προσθήκης νερού. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του κάθε συστατικού έχουν καθοριστικό ρόλο στις επιθυμητές μηχανικές και μη-μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Μηχανικές ιδιότητες είναι η ακαμψία, η αντοχή, η ολκιμότητα, η σκληρότητα, η συμπεριφορά σε κόπωση, ερπυσμό, κάμψη και θλίψη. Ενώ μη-μηχανικές θεωρούνται μεταξύ άλλων η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά και η αντίσταση στη διάβρωση [18]. Το μεγάλο εύρος των διαστάσεων των συστατικών που απαρτίζουν το σκυρόδεμα, από μερικά μικρά του μέτρου έως και κάποια εκατοστά του μέτρου, έχουν διαφορετικό ρόλο στην σύνθεση του. Για παράδειγμα, τα υλικά μεγαλύτερων διαστάσεων παραμένουν σταθερά μέσα στην δομή και επηρεάζουν την αντοχή. Από την άλλη, τα υλικά με πολύ μικρές διαστάσεις συμμετέχουν στις χημικές αντιδράσεις [21]. Για την παρασκευή ενός ανθεκτικού και καλής ποιότητας σκυροδέματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν, το είδος

του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί και η ποσότητά του, η ποσότητα, το είδος και το μέγεθος των αδρανών αλλά και ο λόγος νερού-τσιμέντου (N/T). Η έννοια του τσιμέντου καλής ποιότητας αναφέρεται στο μίγμα το οποίο μπορεί να μορφοποιηθεί εύκολα και να παράξει μετά την σκλήρυνσή του δομές με χαμηλή περιεκτικότητα σε πόρους. Όλα αυτά επηρεάζονται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες στις οποίες θα εκτεθεί η δομή [32]. Παρακάτω, αναφέρονται όλα τα απαραίτητα συστατικά για την παρασκευή σκυροδέματος και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους.

1.1.1. Τσιμέντο

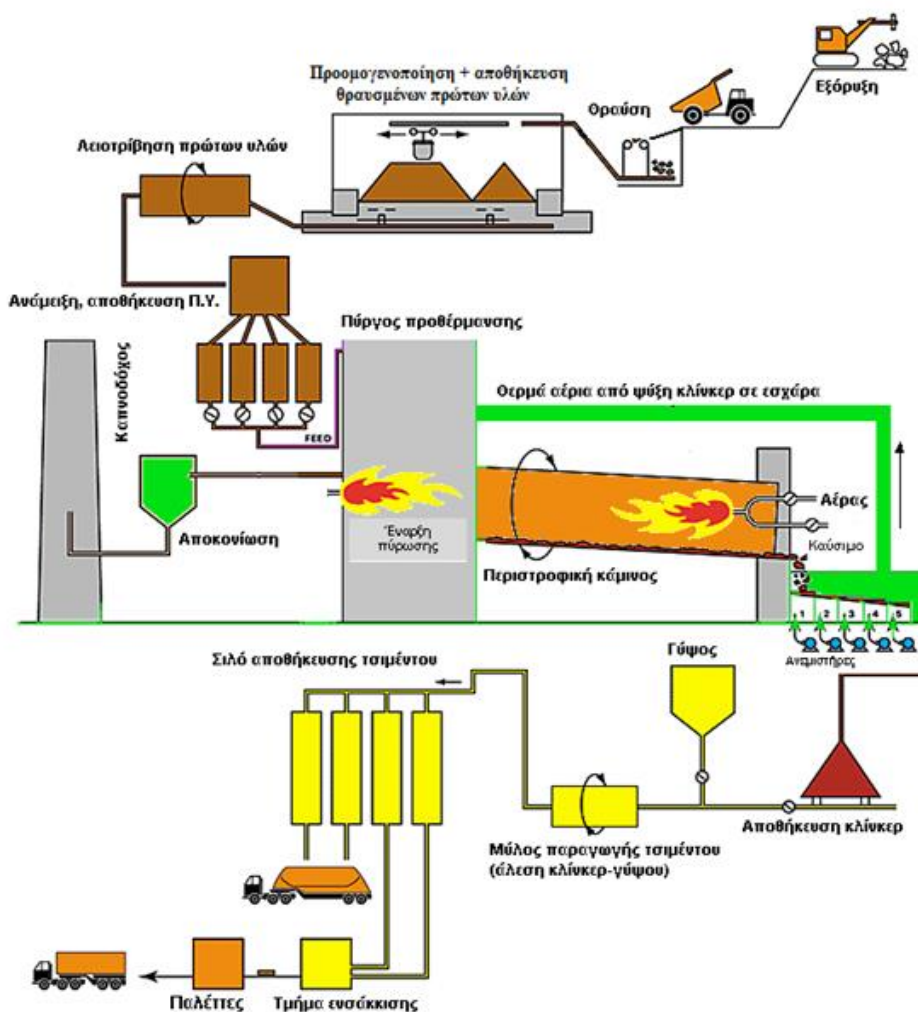
Για την παρασκευή του σκυροδέματος βασικό συστατικό για την ένωση όλων των συστατικών μεταξύ τους αποτελεί το τσιμέντο. Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, ως τσιμέντο ορίζεται ένα ψιλοαλεσμένο στεγνό μίγμα ανόργανων υλικών, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των χημικών αντιδράσεων της ενυδάτωσης πήζει και σκληραίνει έχοντας έπειτα την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές του και τη σταθερότητα του ακόμα και κάτω από το νερό. Το τσιμέντο αυτό, ονομάζεται CEM, και έχει την ικανότητα όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δημιουργηθεί σκυρόδεμα ή κονίαμα που διατηρεί την εργασιμότητα του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ παράλληλα διατηρεί σταθερό τον όγκο του.

Το τσιμέντο, έχει μέγεθος κόκκων 1-50 μm , και τα κύρια συστατικά της είναι δραστικές ενώσεις ασβεστόλιθου και κάποιες ποσότητες αργίλου. (εικόνα 2) Η άργιλος περιέχει οξείδια ασβεστίου (CaO), πυριτίου (SiO_2), αργίλου (Al_2O_3), σιδήρου (Fe_2O_3) και άλλων οξειδίων σε μικρότερες ποσότητες. Ακόμη, περιέχει πρόσμικτα όπως η γύψος, η ιπτάμενη τέφρα και άλλα [30]. Το τσιμέντο συνήθως συναντάται να έχει ένα γκρι χρώμα (Εικόνα 2), το οποίο οφείλεται στα οξείδια σιδήρου (Fe_2O_3) και μαγνησίου (MnO).



Εικόνα 2. Δείγμα τσιμέντου.

Η παραγωγή του τσιμέντου αποτελείται από πολλά και διάφορα στάδια (Εικόνα 3). Η διαδικασία ξεκινάει από την εξόρυξη και την θραύση των πετρωμάτων σε μικρά τεμάχια. Στην συνέχεια, τα πετρώματα αναμιγνύονται μεταξύ τους και αλέθονται ξανά έως ότου η διάμετρος του κάθε κόκκου να είναι της τάξης μερικών χιλιοστών. Μετά, ακολουθεί η κλιμακωτή θέρμανση σε κύλινδρο από τους 600°C έως τους 1500°C, η διαδικασία αυτή ονομάζεται πυροσυσσωμάτωση ή κλινκεροποίηση, αφού το προϊόν αυτή της διεργασίας είναι το κλίνκερ (K), το οποίο αποτελείται από C_3S και C_2S ενώ το υπόλοιπο κατά κύριο λόγο συνίσταται από τις αργλικές και σιδηραργλικές φάσεις. Το προϊόν αυτό μετά αλέθεται για τελευταία φορά ώστε να πάρει την μορφή μιας λεπτής σκόνης και προστίθενται οι υπόλοιπες πρώτες ύλες όπως είναι η σκωρία υψικαμίνων (S), η πυριτική παιπάλη (D), οι φυσικές και βιομηχανικές ποζολάνες (P και Q αντίστοιχα), ο ψημένος σχιστόλιθος (T) και ο ασβεστόλιθος (L ή LL) [34].



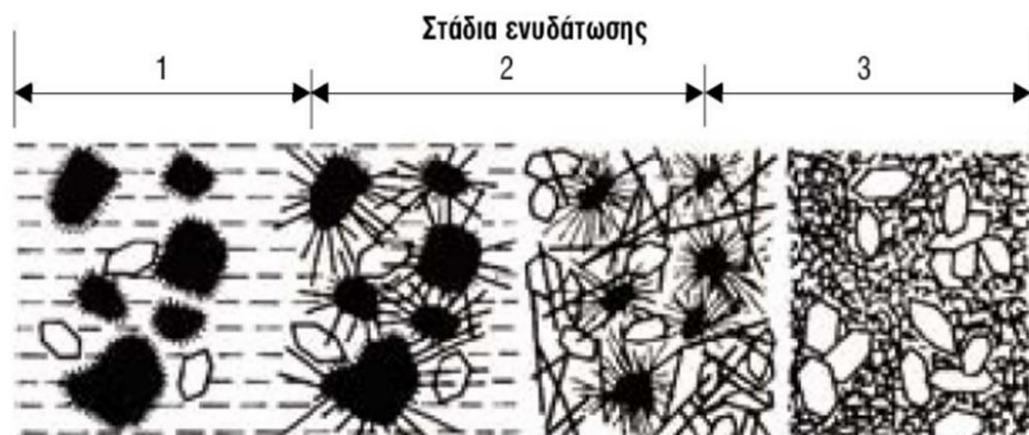
Εικόνα 2. Διάγραμμα γραμμής παραγωγής τσιμέντου [34].

Το κλίνκερ και όλα τα παραπάνω συστατικά αποτελούν κύρια συστατικά του τσιμέντου γιατί περιέχονται σε αυτό σε ποσοστό μεγαλύτερο από 5% κατά βάρος, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν και δευτερεύοντα με ποσοστό περιεκτικότητας 3-5% κατά βάρος. Ως δευτερεύοντα συστατικά κυρίως χρησιμοποιούνται συστατικά όπως, σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη ηφαιστειογενούς προέλευσης, βιομηχανική ποζολάνη, ιπτάμενες τέφρες, ψημένος σχιστόλιθος, ασβεστόλιθοι, πυριτική παιπάλη και γεμιστικά (fillers). Fillers, είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει κυρίως στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής κατανομής τους, βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου όπως είναι για παράδειγμα η εργασιμότητα. Παράλληλα, τα ίδια, δεν αυξάνουν την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου και δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ή του κονιάματος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, όταν ένα συστατικό χρησιμοποιείται σαν κύριο δεν γίνεται ταυτόχρονα να χρησιμοποιείται και

σαν δευτερεύον. Δηλαδή, αν σε ένα τσιμέντο το κύριο συστατικό είναι η ιπτάμενη τέφρα δεν μπορεί να περιέχει ως δευτερεύον συστατικό ιπτάμενη τέφρα, αλλά μπορεί να περιέχει οποιοδήποτε άλλο συστατικό ή και περισσότερα του ενός, αρκεί το ποσοστό τους να μην υπερβαίνει το 5%. Το τσιμέντο ονομάζεται υδραυλικό όταν σταθεροποιείται σε υγρό περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υδραυλικό τσιμέντο είναι το τσιμέντο Portland, το οποίο δεν διαθέτει ειδικές ιδιότητες και παράγεται από φτηνές πρώτες ύλες, όπως είναι ο ασβεστόλιθος, τα αργιλικά οξείδια, το οξείδιο του πυριτίου και τα οξείδια του σιδήρου. Το τσιμέντο Portland στις μέρες μας, καλύπτει το 85% της βιομηχανικής παραγωγής τσιμέντου στην Ε.Ε. [24]. Χαρακτηριστικό του τσιμέντου είναι η ψαθυρότητα του, αφού παρά την αντοχή του όταν η τιμή της κρίσιμης αντοχής του ξεπεραστεί, τότε σπάει ακαριαία χωρίς να εμφανίσει σχεδόν καθόλου παραμόρφωση [4].

Το τσιμέντο από μόνο του δεν είναι συγκολλητική ουσία μεταξύ των αδρανών, για να γίνει απαιτείται η προσθήκη νερού, δηλαδή η ενυδάτωσή του. Ο υδραυλικός χαρακτήρας των τσιμέντων CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων, αλλά παράλληλα και σε άλλες χημικές ενώσεις, όπως αυτές του αργιλίου που συμμετέχουν στην ανάπτυξη των αντοχών. Τα υδραυλικά τσιμέντα πήζουν και σκληραίνουν τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό, αλλά και γενικά σε οποιοδήποτε υδάτινο περιβάλλον. Μετά την σκλήρυνσή του, το τσιμέντο έχει την ικανότητα να μην διαλύεται στο νερό [31]. Η ενυδάτωση είναι μια αλληλουχία αντιδράσεων μεταξύ των οξειδίων και των άλλων συστατικών του τσιμέντου με το νερό, που τα προϊόντα τους είναι ένυδρες κρυσταλλικές ενώσεις. Αρχικά, δημιουργείτε ένα παχύρευστο μίγμα το οποίο στερεοποιείται σταδιακά. Αυτό συμβαίνει, καθώς η ενυδάτωση παράγει προϊόντα που έχουν χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης. Η πήξη, είναι μια κατάσταση κατά την οποία η τσιμεντόπαστα χάνει τις πλαστικές και συγκολλητικές ιδιότητές του λόγω των φυσικών και χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται κατά την ενυδάτωση. Ο χρόνος πήξης του σκυροδέματος εξαρτάται από την σύσταση του τσιμέντου, τον λόγο N/T, την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος και τα πρόσμικτα. Η σκλήρυνση, χαρακτηρίζεται από την απώλεια συνοχής της εύκολα μορφοποιήσιμης τσιμεντόπαστας, και συνδέεται άμεσα με την απώλεια κάθισης του σκυροδέματος. Έτσι, η σκλήρυνση ακολουθεί το στάδιο της πήξης και μεταβάλλει το νωπό σκυρόδεμα δημιουργώντας τελικά, μια ενιαία δομή. Το νερό στην τσιμεντόπαστα είναι υπεύθυνο για την εύκολη μορφοποίησή της. Όσο σχηματίζονται οι ενώσεις της ενυδάτωσης και λόγω της εξάτμισης, η ποσότητα του

νερού μειώνεται και τελικά η τσιμεντόπαστα αρχίζει να σκληραίνει, δηλαδή να πήζει, και τελικά γίνεται δύσκαμπτη. Η διαδικασία της ενυδάτωσης διακρίνεται από τρεις φάσεις (Εικόνα 4). Η πρώτη φάση, αφορά τις πρώτες 4-6 ώρες από την παραγωγή του σκυροδέματος όπου παράγεται ο ετρινγκίτης, μια μη υδατοδιαλυτή στρώση, η οποία αναστέλλει την διαδικασία μετατροπής των άλλων συστατικών. Ο ετρινγκίτης, δημιουργείται με την βοήθεια της γύψου, συνθέτοντας το αργλικό τριασβεστίο (Ca_3Al). Αρχίζουν λοιπόν, να δημιουργούνται βελόνες που συνδέουν τα διαχωρισμένα σωματίδια τσιμέντου και οδηγούν στην ακαμψία του σκυροδέματος. Στην συνέχεια, ακολουθεί η δεύτερη φάση, που αναφέρεται στην μία μέρα μετά το πέρας της πρώτης φάσης. Κατά το στάδιο αυτό, υπάρχει έντονη ενυδάτωση των προϊόντων του κλίνκερ, ειδικά του πυριτικού τριασβεστίου (Ca_3Si), και παρατηρείται η ανάπτυξη μακριών περιπλεγμένων βελονοειδών κρυστάλλων. Έτσι, ενισχύεται ακόμη περισσότερο η δομή του μίγματος. Στο τελικό στάδιο, την τρίτη φάση της ενυδάτωσης, που εκτυλίσσεται μετά το τέλος της δεύτερης φάσης, αρχίζει το γέμισμα των κενών με τα υπόλοιπα προϊόντα της ενυδάτωσης και παρατηρείται ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής. Η διαδικασία αυτή είναι μία εξώθερμη αντίδραση αφού τα προϊόντα που παράγονται είναι σταθερά, δηλαδή έχουν χαμηλή ενέργεια, και άρα απελευθερώνουν ενέργεια με την μορφή θερμότητας για να φτάσουν σε αυτή την κατάσταση. Η θερμότητα που εκλύεται εξαρτάται από τα ποσοστά του κάθε συστατικού που περιέχονται στο τσιμέντο [31]. Όσο παράγονται τα προϊόντα της ενυδάτωσης της τσιμεντόπαστας, το πορώδες αρχίζει να μειώνεται και να αυξάνεται η αντοχή και κατ' επέκταση η δυσκαμψία [13]. Η αύξηση της συγκέντρωσης του τσιμέντου μέχρι μια κρίσιμη τιμή αυξάνει και την αντοχή και έπειτα από αυτή την μειώνει.



Εικόνα 3. Απεικόνιση σταδίων ενυδάτωσης και εξέλιξης της δομής της τσιμεντόπαστας [25].

Το τσιμέντο χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με την σύνθεσή του, τον βαθμό άλεσης και τα πρόσθετα υλικά που περιέχει. Έτσι, υπάρχουν πέντε τύποι τσιμέντου και επιλέγονται ανάλογα την εφαρμογή. Ο συμβολισμός ξεκινάει με τον όρο CEM και την λατινική αρίθμηση από το I έως το V. Οι πέντε τύποι ξεκινούν από το CEM I, το οποίο αφορά το τσιμέντο γενικής χρήσης, όπως είναι το τσιμέντο τύπου Portland, αυτός ο τύπος είναι ο πιο κοινός. Το CEM II, είναι η κατηγορία των σύνθετων τσιμεντών Portland, σε αυτό το τσιμέντο παρατηρείται λιγότερη απελευθέρωση θερμότητας κατά την ενυδάτωση. Ο τύπος αυτός, είναι κατάλληλος για κατασκευές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος και πλεονέκτημά του αποτελεί η αντίστασή του στα χλωριόντα. Ο τύπος CEM III, αφορά το σκωριοτσιμέντο, στο οποίο οι αντοχές αυξάνονται ταχύτερα συγκριτικά με τον τύπο CEM I (ανάπτυξη αντοχών σε 7 μέρες, όχι 28 μέρες). Έτσι, τα καλούπια μπορούν να αφαιρεθούν νωρίτερα. Οι μικρότεροι αυτοί χρόνοι οφείλονται στους λεπτότερα αλεσμένους κόκκους, οι οποίοι προσφέρουν ταχύτερη ενυδάτωση. Συνήθως, επιλέγεται για εφαρμογές σε περιβάλλοντα με χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το ποζολανικό τσιμέντο αναφέρεται με τον συμβολισμό CEM IV, ενώ το σύνθετο έχει τον τύπο CEM V. Το τσιμέντο CEM IV περιέχει ποσοστό ποζολάνης περίπου 20-40%. Από τους πέντε αυτούς τύπους, ως τσιμέντα Portland χαρακτηρίζονται οι δύο πρώτοι τύποι, όπου το κλίνκερ (K) αποτελεί το κύριο συστατικό και βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 65%. Στις άλλες τρεις κατηγορίες δεν είναι απαραίτητο το κλίνκερ να είναι κύριο συστατικό [29], [30].

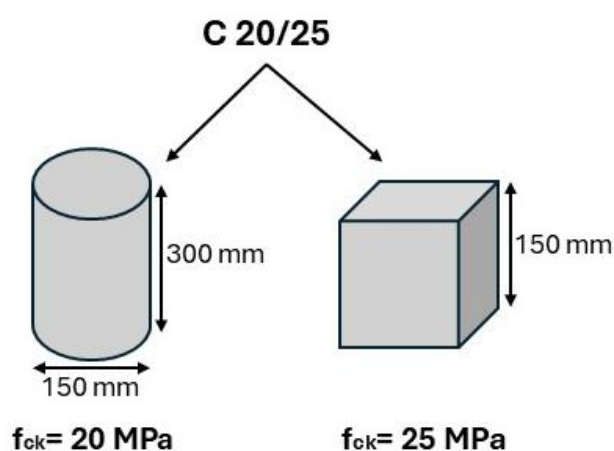
Η κατηγοριοποίηση του τσιμέντου ακολουθά έναν συγκεκριμένο συμβολισμό ο οποίος δίνει πολλές πληροφορίες για το είδος του. Ο συμβολισμός έχει την μορφή CEM I/A-M 42.5N, κάθε κομμάτι αυτού του συμβολισμού έχει και κάποια σημασία (Εικόνα 5). Έτσι, το CEM I δίνει πληροφορίες για τον κύριο τύπο του τσιμέντου, στην περίπτωση αυτή είναι το I, που είναι γενική χρήσης, οι υπόλοιπες κατηγορίες είναι οι II, III, IV και V, τα οποία έχουν εξηγηθεί παραπάνω. Το A αναφέρεται στο ποσοστό σε κλίνκερ που υπάρχει μέσα στο τσιμέντο και δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 80%. Υπάρχουν άλλες δύο κατηγορίες συμβολισμού για τα ποσοστά σε κλίνκερ, η B που αναφέρεται σε ποσοστό 65-79% και η C που αφορά ακόμη μικρότερα ποσοστά κλίνκερ. Το M είναι ο τύπος του δεύτερου κύριου συστατικού, τα οποία έχουν αναφερθεί παραπάνω. Το 42.5 είναι η κατηγορία αντοχής σε θλίψη μετρημένη σε MPa στις 28 ημέρες από την παραγωγή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας. Οι άλλες τιμές που μπορεί να βρεθεί είναι 32.5 και 52.5 MPa. Τέλος, το N (normal) είναι το επίπεδο

της πρώιμης αντοχής, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κανονικού τύπου. Αλλιώς θα μπορούσε να είναι R (rapid), δηλαδή ταχείας πήξης [24].



Εικόνα 4. Εξήγηση συμβολισμού των διάφορων κατηγοριών τσιμέντου.

Άλλος ένας τρόπος για την κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος βασίζεται στην θλιπτική αντοχή (f_{ck}). Οι δύο αριθμοί του συμβολισμού της κάθε κατηγορίας εκφράζουν την θλιπτική αντοχή (σε MPa) για κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια αντίστοιχα (Εικόνα 6). Τα κυλινδρικά δοκίμια έχουν διάμετρο 150 και ύψος 300 mm. Τα κυβικά δοκίμια θα πρέπει να έχουν μήκος ακμής 150 mm. Οι δοκιμές αυτές γίνονται μετά από 28 μέρες από την ημέρα παρασκευής των δοκιμίων. Κάποιες φορές, οι κατηγορίες του σκυροδέματος αναφέρονται μόνο με την χαρακτηριστική αντοχή των κυλινδρικών δοκιμίων (πχ. C20).



Εικόνα 5. Παράδειγμα χαρακτηριστικής αντοχής κυλινδρικού και κυβικού δοκιμίου για σκυρόδεμα C20/25.

Πίνακας 1. Κατηγορίες σκυροδέματος και οι αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές των κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων.

Κατηγορία Σκυροδέματος	$f_{ck,κυλ}$ (MPa)	$f_{ck,κυβ}$ (MPa)		Κατηγορία Σκυροδέματος	$f_{ck,κυλ}$ (MPa)	$f_{ck,κυβ}$ (MPa)
C12/15	12	15		C45/55	45	55
C16/20	16	20		C50/60	50	60
C20/25	20	25		C55/67	55	67
C25/30	25	30		C60/75	60	75
C30/37	30	37		C70/85	70	85
C35/45	35	45		C80/95	80	95
C40/50	40	50		C90/105	90	105

1.1.2. Νερό

Το νερό έχει σημαντικό ρόλο στην σύνθεση του σκυροδέματος τόσο στο στάδιο της σύνθεσης αλλά και μετά, κατά το στάδιο της ενυδάτωσης του δοκιμίου. Η προσθήκη του στην ανάμιξη προκαλεί μια εξώθερμη αντίδραση που παράγει σταθερά προϊόντα χαμηλότερης ενέργειας. Η αντίδραση του νερού με το τσιμέντο οδηγεί σε δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων και καταλήγει στην πήξη και τη σκλήρυνση της τσιμεντόπαστας. Το νερό θα πρέπει να είναι πόσιμο, απαλλαγμένο από βλαβερές ουσίες και να μην περιέχει σκουπίδια, σκόνες, καθώς επίσης και τα οργανικά/ χημικά/ μεταλλικά υλικά, τα οποία θα επηρέαζαν την αντοχή και τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες. Για τον λόγο αυτό, το νερό που επιλέγεται για το σκυρόδεμα πρέπει να είναι από δίκτυα ύδρευσης. Τα δίκτυα αυτά, είναι απαλλαγμένα από τις ουσίες που μπορεί να επηρεάζουν τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την ενυδάτωση και έτσι, δεν απαιτείται επιπλέον έλεγχος. Το θαλασσινό νερό επίσης δεν επιτρέπεται για την παραγωγή σκυροδέματος γιατί τα άλατα που περιέχει μειώνουν την αντοχή του. Η αντοχή του υλικού επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα νερού στην μίξη, δηλαδή, τον λόγο N/T, αφού περισσότερο νερό δημιουργεί περισσότερους πόρους και άρα κενά. Τα κενά θεωρούνται ατέλειες του υλικού, αφού πολλές φορές η ρωγμή ξεκινάει από αυτά τα σημεία και μέσω αυτών διαδίδεται με ταχύτερο ρυθμό. Κατά το στάδιο της ενυδάτωσης ο βαθμός απορρόφησης του νερού από το δοκίμιο τις πρώτες 28 μέρες είναι αυξανόμενος, ενώ μετά από αυτές η απορρόφηση του συνεχίζεται αλλά με έναν μικρότερο ρυθμό [12]. Αντίστοιχα, η αντοχή του υλικού παρουσιάζει μεγάλη αύξηση

μέσα στις 28 μέρες της ενυδάτωσης, μετά το πέρας αυτών η αντοχή αυξάνει με πολύ μικρό, σχεδόν αμελητέο ρυθμό.

1.1.3. Αδρανή

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα, φυσικά ή βιομηχανικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα είτε με άλλο συγκολλητικό υλικό ή αυτούσια. Τα αδρανή υλικά είναι οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενες φυσικές πρώτες ύλες στον πλανήτη μας. Ανάλογα με την προέλευση τους χωρίζονται σε φυσικά, συλλεκτικά, τεχνητά ή ανακυκλωμένα. Τα συνηθέστερα αδρανή υλικά είναι η άμμος (άμμος σπαστός), η αμμοκονία (άμμος θαλάσσης), ο περλίτης (βιομηχανικό ορυκτό το οποίο χρησιμοποιείται και σε διάφορες οικοδομικές χρήσεις), το χαλίκι, η ελαφρόπετρα κτλ.

Αδρανή ονομάστηκαν γιατί όταν αναμειχθούν με τσιμέντο ή άλλο υλικό δεν συμμετέχουν ενεργά στην τήξη του κονιάματος (γεγονός που δεν ισχύει πλήρως σήμερα καθώς γνωρίζουμε ότι τουλάχιστον η εξωτερική επιφάνεια τους συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις). Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες, για τον καθορισμό του μεγέθους χρησιμοποιούνται μεγάλα κόσκινα. Για την παρασκευή μπετόν τα αδρανή υλικά περνούν από ελέγχους της χημικής τους σύστασης πριν χρησιμοποιηθούν.

Τα αδρανή υλικά, είτε προέρχονται από την εξόρυξη κατάλληλων πετρωμάτων ή/και από την απόληψη φυσικών αποθέσεων θραυσμάτων τους και τα οποία, μετά από θραύση και λειοτρίβηση, χρησιμοποιούνται: (α) αυτούσια σε μορφή σκύρων ή μεγαλύτερων τεμαχίων στην οδοποιία και σε λοιπά τεχνικά έργα, ή (β) μετά από ανάμιξή τους με συγκολλητικές κονίες, όπως τσιμεντοκονία, ασβεστοκονία, ασφαλτο κ.α., δημιουργώντας υλικά όπως το σκυρόδεμα ή το ασφαλτόμιγμα ή το κονίαμα ή άλλο μίγμα (Latifi, 2022).



Εικόνα 7. Παράδειγμα αδρανών από τα αριστερά προς τα δεξιά αμμος, χαλίκι και γαρμπίλι

1.1.3.1. Προέλευση αδρανών

Γενικά τα αδρανή προέρχονται απευθείας από τη φύση ή με συλλογή από ρέματα (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση πετρωμάτων (θραυστά). Για τα κοινά σκυροδέματα, τα περισσότερα αδρανή προέρχονται από ασβεστολιθικά ή πυριτικά πετρώματα.



Εικόνα 8 Λατομείο

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι

κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά υπερτερούν τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν έχουν σχήμα επιμήκεις και πλακοειδές. Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 3. κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου.

Κατηγορία αδρανών	Μέγεθος κόκκων
α) Άμμος	μέχρι 2,5 mm
β) Λεπτόκοκκα σκύρα	ριζάκι 2,5-7 mm γαρμπίλι 7-14 mm σκύρα 14-30 mm
γ) Χονδρόκοκκα σκύρα	30-70M

1.1.3.2. Αντοχή των αδρανών

Για την ικανοποιητική αντοχή του σκυροδέματος, το υλικό των αδρανών πρέπει να έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα στο χρόνο, μικρή επιφανειακή φθορά σε κρούση, χημική αδράνεια σε σχέση με το τσιμέντο και το νερό (και με τις ουσίες που περιέχονται σε αυτό) και σταθερότητα όγκου (π.χ. να μην διογκώνεται λόγω απορρόφησης νερού) . Ο Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος θεωρεί σαν ικανοποιητική τιμή της αντοχής σε θλίψη του πετρώματος τα 65 MPa, επειδή όμως για τις συνήθεις συνθήκες στην Ελλάδα οι κατηγορίες σκυροδέματος και κατ' επέκταση η αντοχή επηρεάζεται από την αντοχή του πετρώματος των αδρανών, ο κανονισμός επιτρέπει και την χρήση αδρανών με αντοχή πετρώματος μεταξύ 45 MPa και 65 MPa, εφόσον με τα αδρανή αυτά είναι δυνατή η επίτευξη της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος που έχει προδιαγραφεί. Εφόσον πληρούν την προϋπόθεση αυτή, αδρανή από μητρικό πέτρωμα με αντοχή μικρότερη και από 45 MPa μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο για την παρασκευή σκυροδέματος που η επιφάνεια του πρόκειται να επιχριστεί, καθότι με τέτοια αδρανή η αντοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος σε φθορά από τη χρήση και σε κρούση είναι αμφίβολη.

1.1.3.3. Γενικά για τα αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα, ανθεκτικά από σκληρά πετρώματα (γρανίτες και ασβεστόλιθοι), καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πηλός, χημικά δραστικές ουσίες, άνθρακες). Ακόμα πρέπει να είναι σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας), απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm. Τέλος πρέπει να είναι καλά διαβαθμισμένα, η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου, των σκύρων και του μίγματος αυτών πρέπει να βρίσκεται μέσα στις περιοχές που περιλαμβάνονται στα διαγράμματα που προβλέπουν οι κανονισμοί. Κάθε υλικό που παρουσιάζει κοκκομετρική σύνθεση, τέτοια ώστε η κοκκομετρική του καμπύλη να βρίσκεται εκτός από τις επιτρεπόμενες υπό των προδιαγραφών καμπύλες, ή η κοκκομετρική του καμπύλη να είναι ασυνεχής, πρέπει να απορρίπτεται ή να βελτιώνεται προτού χρησιμοποιηθεί (MENCZEL, 2009). Επίσης ισχύει ότι τα αδρανή μέχρι 7 mm – χωρίς τσιμέντο- πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος τα αδρανή υλικά μπορούν να προσκομίζονται στο εργοτάξιο αναμεμιγμένα ή διαβαθμισμένα.

1.1.4. Πρόσθετα και Πρόσμικτα

Τα πρόσθετα σκυροδέματος, είναι υλικά που προστίθενται στο νωπό μίγμα, σε μικρές ποσότητες, για να προσδώσουν σε αυτό ορισμένες ιδιότητες ή για να βελτιώσουν κάποιες που ήδη υπάρχουν. Τα πρόσθετα και τα πρόσμικτα, βρίσκονται σε υγρή ή στερεή μορφή (σκόνης) και έχουν την ικανότητα να τροποποιούν τις ιδιότητες του σκυροδέματος τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη φάση και προστίθενται πριν ή κατά την διάρκεια της μίξης. Τα πρόσθετα με μορφή σκόνης πολλές φορές αντικαθιστούν μια ποσότητα του τσιμέντου ή της άμμου που προστίθεται για την παρασκευή του σκυροδέματος. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνων. Τα υλικά αυτά δεν ανήκουν στα κύρια αλλά ούτε στα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου. Ο σκοπός της ύπαρξής τους σε αυτό είναι είτε για να βελτιώσουν την παραγωγική διαδικασία είτε τις ιδιότητές του. Η ποσότητα των πρόσθετων είναι περίπου 0.5-1% κατά βάρος του τσιμέντου [29]. Το 1937 χρησιμοποιείται για πρώτη φορά η ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα, αν και η ευρεία της χρήση ξεκίνησε το 1970 ως υποκατάστατο μέρους του τσιμέντου που χρησιμοποιούνταν λόγω της αύξησης του κόστους του. Η ιπτάμενη τέφρα λοιπόν, πέραν της χρήσης της για την μείωση της ποσότητας του τσιμέντου στο μίγμα

χρησιμοποιείται για να μειώσει την θερμότητα κατά την ενυδάτωση και να αυξήσει την εργασιμότητα και την ανθεκτικότητα. Για τον ίδιο οικονομικό λόγο το 1970 άρχισε και η ευρεία χρήση της σκυρίας υψικαμίνων, ένα παραπροϊόν της παρασκευής σιδήρου. Αυτή, πέρα από την μείωση της απαιτούμενης ποσότητας τσιμέντου, προσφέρει αντίσταση στα χλωριόντα και αυξάνει τον χρόνο πήξης.

Τα χημικά πρόσμικτα, προστίθενται τόσο στο σκυροδέμα όσο και στο κονίαμα σε μικρές ποσότητες, περίπου 0.2-1.2% κατά βάρος τσιμέντου. Αυτά, στοχεύουν στην βελτίωση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος κυρίως για οικονομία, εξοικονόμηση ενέργειας και αντιμετώπιση κάποιων ειδικών απαιτήσεων που μπορεί να υπάρχουν. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες πρόσμικτων, κάποιες από αυτές είναι, αερακτικά, επιβραδυντές, επιταχυντές, ρευστοποιητές, υπερρευστοποιητές, καθώς επίσης και διαλύματα ενάντια στην αντίδραση αλκαλίων-αδρανών, στη συστολή και στην διάβρωση. Όλα αυτά στοχεύουν στην αύξηση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος, τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού, τη μείωση της εξίδρωσης και της απόμιξης, την αύξηση της ανθεκτικότητας με μείωση των εγκλωβισμένων φυσαλίδων και τη γρηγορότερη ή την πιο αργή πήξη και σκλήρυνση που οδηγεί σε αύξηση της αντοχής. Άλλες ιδιότητες επίσης είναι η καλύτερη διασκόρπιση των κόκκων τσιμέντου, η μείωση της συστολής κατά την σκλήρυνση και η δημιουργία ελαφρών συστάσεων που μπορεί να πραγματοποιηθεί με εγκλωβισμό ποσότητας αέρα μέσα στη δομή [13].

1.1.4.1. Ρευστοποιητές

Οι ρευστοποιητές τσιμέντου, επίσης γνωστοί και ως υγρά πρόσθετα τσιμέντου, είναι χημικές ουσίες που προστίθενται στο τσιμέντο κατά την παρασκευή του σκυροδέματος ή του σκυροδέματος. Ο σκοπός τους είναι να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητες του σκυροδέματος ή του τσιμέντου, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή στη θλίψη, η αντοχή στην καταπόνηση, η ανθεκτικότητα στη ρωγμογένεση, και άλλες. Οι βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας των ρευστοποιητών περιλαμβάνουν τη μείωση της τάσης επιφανειακής τάσης του νερού, τη διάσπαση των ισχυρών συνδέσμων μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου και της χρήσης πολυμερών ή ανόργανων χημικών πρόσθετων.

Οι ρευστοποιητές λειτουργούν συνήθως ως πεπτικές ουσίες, μειώνοντας τις δυνάμεις που δρουν μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου και επιτρέποντας την ελεύθερη ροή του υλικού. Αυτό βοηθά στη μείωση της αντίστασης και της τριβής μεταξύ των

σωματιδίων, προωθώντας την ομοιογενή διασπορά του νερού και του τσιμέντου στο μίγμα. Τα πολυμερή πρόσθετα ρευστοποίησης, όπως οι σούπερ πλαστικοποιητές, εισέρχονται στο μίγμα τσιμέντου και αλληλεπιδρούν με τα νερά και το τσιμέντο, μειώνοντας την ιξώδη της πάστας και αυξάνοντας την εργασιμότητα. Αυτό βοηθά στην αύξηση της ρευστότητας του μίγματος χωρίς την προσθήκη περισσότερου νερού.

Επιπλέον, ορισμένοι ρευστοποιητές λειτουργούν ως αερίων παραγωγών, που αναπτύσσουν μικροσκοπικές φυσαλίδες αέρα στο μίγμα, μειώνοντας την πυκνότητα της πάστας τσιμέντου και αυξάνοντας την εργασιμότητα του (I. Perepechko, 1980). Οι ρευστοποιητές συνήθως περιλαμβάνουν οργανικά ή ανόργανα πρόσθετα που μπορούν να βελτιώσουν τη ρευστότητα του μίγματος σκυροδέματος ή τσιμέντου χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά την αντοχή ή άλλες ιδιότητες του. Ορισμένα παραδείγματα ρευστοποιητών περιλαμβάνουν συνήθως συνθετικά αιθέρια οξέα, αλκοόλες ή αμινοσουλφονικά οξέα. Οι χημικοί τύποι των ρευστοποιητών, επίσης γνωστοί ως υπερρευστοποιητές, ποικίλλουν ανάλογα με τη σύνθεση και τις απαιτήσεις του σκυροδέματος ή του τσιμέντου. (Holschemacher, 2010).

1.1.4.2. Υπερρευστοποιητές

Ο υπερρευστοποιητής είναι ένας τύπος ρευστοποιητή που χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκυροδέματος και σκυροδέματος για να βελτιώσει τη ρευστότητα του μίγματος χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του τελικού προϊόντος. Ο υπερρευστοποιητής επιτρέπει στο μίγμα να έχει υψηλότερη ρευστότητα, κάτι που είναι σημαντικό για εφαρμογές όπου απαιτείται εξαιρετική κατανομή και πλήρης επικάλυψη των αδρανών υλικών από την τσιμεντοκονία (I. Perepechko, 1980). Οι υπερρευστοποιητές συνήθως περιλαμβάνουν σύνθετα χημικά πρόσθετα που μπορούν να επιτρέψουν στο μίγμα να διατηρεί την απαραίτητη εργασιμότητα και ρευστότητα χωρίς την προσθήκη υπερβολικής ποσότητας νερού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μίγματα σκυροδέματος που έχουν υψηλή αντοχή, καλή εργασιμότητα και ικανοποιητική αντοχή στη θλίψη, χωρίς την ανάγκη για υπερβολική ποσότητα νερού.

Οι υπερρευστοποιητές είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές όπως η κατασκευή υψηλής αντοχής σκυροδέματος, η επεξεργασία αυτονομικών σκυροδέματος και η εκτυπωτική τεχνολογία 3D, όπου απαιτείται εξαιρετική κατανομή του υλικού και στεγανότητα των στρωμάτων. Οι υπερρευστοποιητές επίσης μπορούν να βελτιώσουν την αισθητική εμφάνιση του τελικού προϊόντος και να μειώσουν τον κίνδυνο

εμφάνισης κενών στο μίγμα (J. D. Ferry, 1980). Οι υπερρευστοποιητές είναι χημικά πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμέντο ή το σκυρόδεμα για να βελτιώσουν τη ρευστότητα και την εργασιμότητα του μίγματος, χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού υλικού. Οι υπερρευστοποιητές λειτουργούν κυρίως μέσω δύο κύριων μηχανισμών:

1. Απόδραση νερού: Ορισμένοι υπερρευστοποιητές δρουν εισέρχονται στη δομή του τσιμέντου και διευκολύνουν την απελευθέρωση του νερού που είναι δεμένο με το τσιμέντο. Αυτό επιταχύνει την ρευστοποίηση του μίγματος, καθιστώντας το πιο ρευστό χωρίς την προσθήκη επιπλέον νερού. Οι υπερρευστοποιητές που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο συνήθως περιέχουν οργανικά ή ανόργανα χημικά πρόσθετα.

2. Μείωση της τάσης επιφανειακής ενέργειας: Κάποιοι υπερρευστοποιητές μειώνουν την τάση επιφανειακής ενέργειας του νερού, βοηθώντας τα σωματίδια του τσιμέντου να διαχέονται πιο εύκολα στο νερό και να μειώνουν την τριβή μεταξύ τους. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη ρευστότητα του μίγματος και πιο ομοιογενή κατανομή του νερού στο σκυρόδεμα. (J. Menczel, 2009).

1.1.4.3. Επιταχυντές

Οι επιταχυντές τσιμέντου είναι χημικά πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμέντο ή στο σκυρόδεμα με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας πήξης και σκλήρυνσης του. Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται γρήγορη ανάπτυξη αντοχών ή όταν οι συνθήκες κατασκευής είναι αδιάφορες για τη φυσική πήξη του τσιμέντου. Οι επιταχυντές τσιμέντου μπορεί να είναι οργανικοί ή ανόργανοι και συνήθως δρουν είτε αυξάνοντας την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό του τσιμέντου είτε επιτρέποντας την πρόωρη απελευθέρωση του νερού που δέσμευσε το τσιμέντο, καθιστώντας τη διαδικασία πήξης πιο γρήγορη.

Οι επιταχυντές τσιμέντου είναι χρήσιμοι σε πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως στην κατασκευή δρόμων και γεφυρών, όπου η ταχεία απόκτηση αντοχών είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα του έργου. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που πρέπει να είναι λειτουργικές γρήγορα, όπως σε εφαρμογές βιομηχανικών δαπέδων ή σε εργασίες επισκευής και συντήρησης. Οι επιταχυντές τσιμέντου είναι χημικά πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμέντο ή το σκυρόδεμα με σκοπό να επιταχύνουν τη διαδικασία πήξης και σκλήρυνσης του υλικού. Αυτά τα πρόσθετα δρουν με διάφορους μηχανισμούς, περιλαμβανομένης της αύξησης

του ρυθμού των χημικών αντιδράσεων και της επιτάχυνσης της υδρατζίνης, που είναι η χημική αντίδραση που οδηγεί στην σκλήρυνση του τσιμέντου. Οι επιταχυντές μπορούν να είναι οργανικοί ή ανόργανοι και συνήθως περιλαμβάνουν συστατικά όπως αλάτια μετάλλων, αλκαλίνες οξέα ή αλάτια αμινομεθακρυλικού οξέος. Οι επιταχυντές τσιμέντου είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν χρειάζεται να επιτευχθεί γρήγορη εφαρμογή ή σκλήρυνση του τσιμέντου, όπως σε εφαρμογές δρόμων ή γεφυρών, καθώς και σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία ή θερμοκρασίες που επηρεάζουν την πήξη του τσιμέντου. Οι χημικοί τύποι των επιταχυντών τσιμέντου μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορα συστατικά, εκ των οποίων κάθε ένα έχει διαφορετική χημική σύνθεση και μηχανισμό δράσης. Ορισμένοι από τους κύριους χημικούς τύπους επιταχυντών τσιμέντου περιλαμβάνουν:

1. Χλωριούχα άλατα: Περιέχουν χλώριο και συνήθως χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της ανάπτυξης αντοχών του τσιμέντου. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το χλωριούχο ασβέστιο ή το χλωριούχο ασβέστιο αλκαλικό οξύ.
2. Θεϊκά άλατα: Αντιδρούν με το τσιμέντο για να δημιουργήσουν θεϊκά προϊόντα που επιταχύνουν την αρχική πήξη του τσιμέντου. Συνήθη παραδείγματα περιλαμβάνουν το θεϊκό ασβέστιο και το θεϊκό αλουμίνιο.
3. Οργανικοί επιταχυντές: Περιλαμβάνουν οργανικά οξέα ή παράγωγα, τα οποία δρουν επιταχύνοντας την ανάπτυξη αντοχών του τσιμέντου μέσω χημικών αντιδράσεων. Παραδείγματα είναι το οξύ ταρταρικό ή οργανικά αλκανολαμίνες.
4. Αλκαλικές όξιμες επιταχυντικές: Περιλαμβάνουν αλκαλικά ή όξινα άλατα που επιταχύνουν την πήξη του τσιμέντου μέσω αλληλεπιδράσεων με τα υλικά του τσιμέντου. Παραδείγματα είναι το ανθρακικό νάτριο ή το αλκαλικό θειούχο αλουμίνιο (Kovler, 2011).

1.1.4.4. Επιβραδυντές

Οι επιβραδυντές τσιμέντου είναι χημικά πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμέντο ή το σκυρόδεμα για να επιβραδύνουν τη διαδικασία πήξης και σκλήρυνσης του υλικού. Αυτά τα πρόσθετα είναι χρήσιμα σε πολλές περιπτώσεις, όπως όταν ο χρόνος εφαρμογής είναι περιορισμένος ή όταν απαιτείται μεγαλύτερος έλεγχος της σκλήρυνσης. Οι επιβραδυντές μπορούν να είναι οργανικοί ή ανόργανοι και συνήθως

δρουν μειώνοντας την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό του τσιμέντου ή μειώνοντας την ποσότητα του ελεύθερου ασβεστίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθυστερεί η πήξη και η σκλήρυνση του τσιμέντου ή του σκυροδέματος. Οι επιβραδυντές τσιμέντου είναι σημαντικοί στην κατασκευή όταν απαιτείται μεγαλύτερος έλεγχος του χρόνου σκλήρυνσης ή όταν χρειάζεται να αντιμετωπιστούν θερμικά ή περιβαλλοντικά ζητήματα που επηρεάζουν τη διαδικασία πήξης του τσιμέντου (Kovler, 2011). Οι επιβραδυντές τσιμέντου, επιστημονικά γνωστοί ως "retarders" στον τομέα των υλικών και της κατασκευής, είναι χημικά πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμέντο ή σκυρόδεμα για να επιβραδύνουν την πήξη και τη σκλήρυνση του υλικού. Αυτά τα πρόσθετα είναι σημαντικά όταν χρειάζεται μεγαλύτερος έλεγχος του χρόνου πήξης ή όταν απαιτείται μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία εφαρμογής του τσιμέντου ή του σκυροδέματος. (Kumar, 2003).

1.2. Λόγος νερού-τσιμέντου (N/T)

Ο λόγος νερού-τσιμέντου (N/T), αποτελεί μία από τις παλαιότερες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία σκυροδέματος. Το νερό συνιστά ένα βασικό συστατικό του σκυροδέματος και είναι απαραίτητο για να πραγματοποιηθεί το στάδιο της ενυδάτωσης και να παραχθεί ένα εργάσιμο μίγμα. Όλες οι ιδιότητες του σκυροδέματος τόσο στην νωπή όσο και στη σκληρυμένη κατάσταση επηρεάζονται από τον λόγο νερού-τσιμέντου (N/T). Ο λόγος αυτός, αφορά την ποσότητα του νερού (N) και την ποσότητα του τσιμέντου (T) που προστίθενται στο μίγμα. Ο λόγος αυτός επηρεάζει τόσο την καλή ενυδάτωση του σκυροδέματος όσο και την εργασιμότητα αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες της σκληρυμένης κατάστασής του. Η αύξηση και η μείωση της κάθε ποσότητας μπορεί να οδηγήσει και σε θετικά αλλά και σε αρνητικά αποτελέσματα. Από θετικής σκοπιάς, όταν υπάρχει μικρή ποσότητα νερού και άρα περισσότερο τσιμέντο παρουσιάζονται μεγαλύτερες αντοχές στο σκυρόδεμα, ενώ για μεγαλύτερη ποσότητα νερού παρουσιάζεται υψηλή εργασιμότητα. Από την άλλη, όταν ξεπεραστούν κάποια όρια στις ποσότητες παρουσιάζονται αρνητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για μεγάλο λόγο, δηλαδή περισσότερο νερό, το νωπό σκυρόδεμα θα περιέχει περισσότερα σωματίδια νερού τα οποία δεν αντιδρούν με την ποσότητα τσιμέντου και όταν η δομή σκληρύνει και εξατμιστεί το περίσσιο νερό θα υπάρχουν πολλοί πόροι οι οποίοι μειώνουν την ανθεκτικότητα καθώς οι πιθανές ρωγμές μπορούν να διαδοθούν ευκολότερα. Επίσης, όταν υπάρχει περίσσεια νερού μπορεί να παρουσιαστεί εξίδρωση και απόμιξη του μίγματος. Η εξίδρωση, είναι το φαινόμενο

όπου τα στερεά υλικά κινούνται προς τα κάτω της δομής, ενώ το νερό κινείται προς τα πάνω. Έτσι, το νερό αποβάλλεται πριν την πήξη του σκυροδέματος. Η απόμιξη είναι παρόμοιο φαινόμενο με την εξίδρωση, στην περίπτωση αυτή τα αδρανή διαχωρίζονται μεταξύ τους ανάλογα το μέγεθός τους [30]. Στην αντίστοιχη περίπτωση που υπάρχει περισσότερο τσιμέντο και ο λόγος είναι μικρός, το τσιμέντο δεν ενυδατώνεται επαρκώς και αυτό οδηγεί στην μη ιδανική ανάπτυξη των αντοχών. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται μία άριστη αναλογία μεταξύ των δύο συστατικών. Ο λόγος N/T συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.35-0.70, και η άριστη αναλογία για επίτευξη των επιθυμητών αντοχών οδηγεί σε λόγους μεταξύ 0.4 για σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και 0.50 για σκυρόδεμα χαμηλότερης αντοχής. Έχει ακόμη παρατηρηθεί, πως απόκλιση από την άριστη αναλογία κατά 10% οδηγεί σε μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15%. Ενώ, για το ίδιο ποσοστό απόκλισης προς τα κάτω από την άριστη αναλογία, καταλήγει σε μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30%. Άρα, είναι προτιμότερο να υπάρχει αύξηση του ποσοστού, δηλαδή περισσότερο νερό, για να μην εμφανίζεται μεγάλη πτώση της αντοχής του σκυροδέματος. Η απαιτούμενη αντοχή του σκυροδέματος, το είδος του και οι συνθήκες του περιβάλλοντος μεταβάλλουν την κατάλληλη αναλογία N/T. Στον λόγο αυτό λαμβάνεται υπόψιν όχι μόνο το νερό που προσθέτουμε κατά την μίξη και είναι απαραίτητο για την αντίδραση με το σκυρόδεμα αλλά και η υγρασία που μπορεί να περιέχουν τα αδρανή ή που αυτά θα απορροφήσουν όταν βρεθούν σε περιβάλλον με υγρασία [13].

1.3. Εργασιμότητα

Ως εργασιμότητα (workability) ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπτυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με άλλον ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπτύκνωση. Η εργασιμότητα είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως οι παρακάτω:

- Η ρευστότητα, που σημαίνει η ευκολία ροής ενός υλικού (η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης)
- Η πλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του

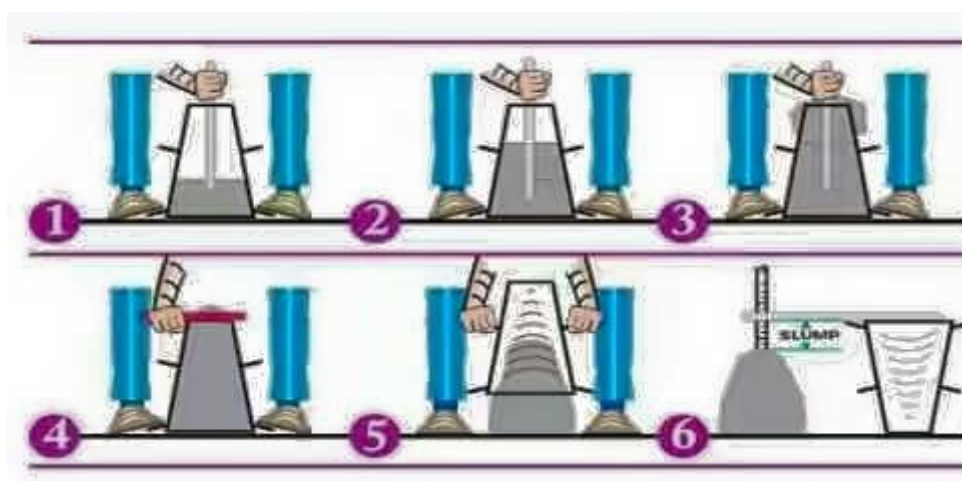
- Η συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως συντελεί στην πλαστικότητα

- Η συμπτυνωσιμότητα, που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπτυνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπίκνωσης.

Η εργασιμότητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί μέθοδοι με τις οποίες μετριέται μία ή περισσότερες από τις παραπάνω ιδιότητες. Η κυριότερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η κάθιση/εξάπλωση. [25].

1.4. Διαδικασία έλεγχου κάθισης (slump test)

Ο κώνος κάθισης (κώνος Abrams) διαβρέχεται εσωτερικά και αφού τοποθετηθεί σε λεία και επίπεδη επιφάνεια, γεμίζεται έως το $\frac{1}{3}$ του ύψους του με σκυροδέμα που λαμβάνεται με σέσουλα από διάφορες τυχαίες θέσεις εντός του αναμικτήρα. Ακολουθεί συμπίκνωση του σκυροδέματος με 25 χτυπήματα με πρότυπη ράβδο διαμέτρου Φ16. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις άλλες 2 στρώσεις, ενώ προσοχή πρέπει να επιδεικνύεται κατά τη συμπίκνωση των 2 στρώσεων καθώς η πρότυπη ράβδος δεν πρέπει να εισέρχεται εντός της προηγούμενης στρώσης. Αφού ολοκληρωθεί η συμπίκνωση της 3ης στρώσης, μορφώνεται και επιπεδώνεται η επιφάνεια της κορυφής του κώνου και ο κώνος αφαιρείται αργά και σταθερά εντός χρόνου 5 s μέγιστο. Ο κώνος αναστρέφεται και τοποθετείται δίπλα από το νωπό σωρό σκυροδέματος. Στην επιφάνεια της κορυφής του κώνου κάθισης τοποθετείται η πρότυπη ράβδος Φ16 και μετράται η ελεύθερη απόσταση ανάμεσα σε αυτή και το υψηλότερο σημείο του νωπού σκυροδέματος με ακρίβεια cm. Προσδιορίζεται από τον Κ.Τ.Σ. - 2016 η κατηγορία κάθισης του σκυροδέματος.



Εικόνα 9 Δοκιμή κάθισης βήματα

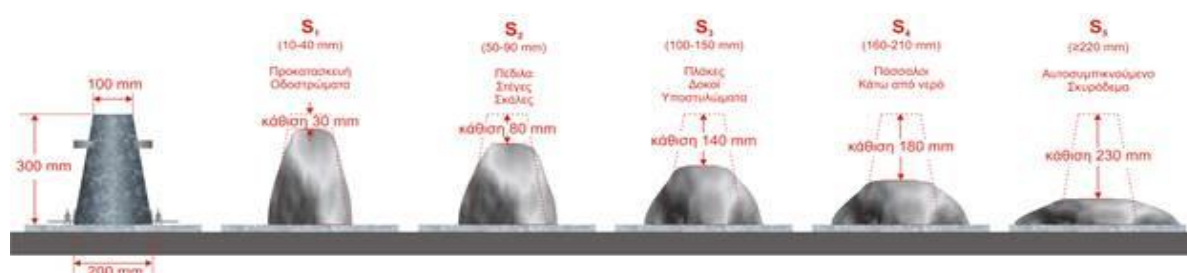
1.4.1. Κατηγορίες κάθισης (workability classes)

Οι κατηγορίες κάθισης ορίζονται στον πίνακα 12.1.1.16 του ΚΤΣ-97 και ύστερα από την αναθεώρησή του της Υ.Α. Δ14/50504/12-4-2002 (ΦΕΚ 537/1-5-2002), είναι οι εξής :

Πίνακας 2 : Κατηγορίες καθίσεως (ΚΤΣ-97)

Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S ₁	10 – 40
S ₂	50 – 90
S ₃	100 – 150
S ₄	160 – 210
S ₅	> 220

Η μετρούμενη κάθιση πρέπει να στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 10mm



Εικόνα 10 Κατηγορίες κάθισης

Όσο περισσότερο νερό έχει το σκυρόδεμα, πέραν ενός ορίου, τόσο η αντοχή του ελαττώνεται και το πορώδες αυξάνεται. Εκτός από το κριτήριο της αντοχής, υπάρχει και το κριτήριο της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Αυτό καθορίζει την ποσότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του. Η κάθιση είναι το κριτήριο της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Ανάλογα με τη χρήση του σκυροδέματος, συνιστάται να υπάρχει μία συγκεκριμένη κάθιση (Domone, 1998).

1.5. Σκλήρυνση

Το σκυρόδεμα πρέπει να διατηρείται υγρό κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη αντοχή και ανθεκτικότητα. Κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης εμφανίζεται ενυδάτωση, επιτρέποντας το σχηματισμό ένυδρου πυριτικού

ασβεστίου (C-S-H). Πάνω από το 90% της τελικής ισχύος ενός μείγματος επιτυγχάνεται συνήθως μέσα σε τέσσερις εβδομάδες, με το υπόλοιπο 10% να επιτυγχάνεται σε χρόνια ή ακόμα και δεκαετίες. Η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου στο σκυρόδεμα σε ανθρακικό ασβέστιο από την απορρόφηση του CO₂ για αρκετές δεκαετίες ενισχύει περαιτέρω το σκυρόδεμα και το καθιστά πιο ανθεκτικό σε ζημιές. Αυτή η αντίδραση ενανθράκωσης, ωστόσο, μειώνει το pH του διαλύματος πόρων τσιμέντου και μπορεί να διαβρώσει τις ράβδους ενίσχυσης.

Η ενυδάτωση και η σκλήρυνση του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων ημερών είναι κρίσιμη. Ασυνήθιστα γρήγορη ξήρανση και συρρίκνωση λόγω παραγόντων όπως η εξάτμιση από τον άνεμο κατά την τοποθέτηση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες τάσεις εφελκυσμού σε μια εποχή που δεν έχει ακόμη αποκτήσει επαρκή αντοχή, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη συρρίκνωση ρωγμών. Η πρώιμη αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να αυξηθεί εάν διατηρηθεί υγρή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης (GaniM. S. J., 1997). Το σκυρόδεμα υψηλής πρώιμης αντοχής έχει σχεδιαστεί για να ενυδατώνεται ταχύτερα, συχνά με αυξημένη χρήση τσιμέντου που αυξάνει τη συρρίκνωση και τη ρωγμή. Η αντοχή των συγκεκριμένων αλλαγών (αυξάνεται) για έως και τρία χρόνια. Εξαρτάται από τη διάσταση της διατομής των στοιχείων και τις συνθήκες εκμετάλλευσης της δομής. Η προσθήκη κοντών πολυμερών ινών μπορεί να βελτιώσει (μειώσει) τις καταπονήσεις που προκαλούνται από τη συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση και να αυξήσει την πρώιμη και τελική αντοχή συμπίεσης.

Η σωστή σκλήρυνση του σκυροδέματος οδηγεί σε αυξημένη αντοχή και χαμηλότερη διαπερατότητα και αποφεύγει τη ρωγμή όπου η επιφάνεια στεγνώνει πρόωρα. Πρέπει επίσης να ληφθεί μέριμνα για της υπερθέρμανσης λόγω της εξώθερμης πήξης του τσιμέντου. Η ακατάλληλη σκλήρυνση μπορεί να προκαλέσει μειωμένη αντοχή και ρωγμές (Gelardi, 2016).

1. Ενισχυμένο σκυρόδεμα

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ΙΟΠ) αντιπροσωπεύει ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον σύνθετο υλικό στον κόσμο της έρευνας και των εφαρμογών, με θετικά χαρακτηριστικά που έχουν επιβεβαιωθεί από πολλές μελέτες. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, γνωστό και

ως Fiber Reinforced Concrete, είναι ουσιαστικά ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από τσιμέντο Portland, αδρανή υλικά και ειδικές ίνες, οι οποίες είναι διακριτές και ασυνεχείς.[13]

Η χρήση ινών σε εύθραυστα υλικά έχει μακρά ιστορία που χρονολογείται τουλάχιστον 3500 χρόνια πριν, όταν τα ψημένα στον ήλιο τούβλα ενισχυμένα με άχυρο χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του λόφου ύψους 57 μέτρων του 'Aqar Quf' κοντά στη Βαγδάτη. Σε πιο πρόσφατες εποχές, οι ίνες αμιάντου χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση προϊόντων τσιμέντου εδώ και περίπου 100 χρόνια, οι ίνες κυτταρίνης εδώ και τουλάχιστον 50 χρόνια, και οι ίνες χάλυβα, πολυπροπυλενίου και γυαλιού έχουν χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό τα τελευταία 30 χρόνια. Οι κύριοι στόχοι της σύγχρονης μηχανικής στην προσπάθεια τροποποίησης των ιδιοτήτων του σκυροδέματος με την προσθήκη ινών είναι οι εξής:

- (α) Η βελτίωση της ρεολογίας ή των χαρακτηριστικών πλαστικής ρηγμάτωσης του υλικού στη νωπή κατάσταση ή έως και περίπου 6 ώρες μετά τη χύτευση.
- (β) Για τη βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό ή κάμψη.
- (γ) Για τη βελτίωση της αντοχής σε κρούση και της ολκιμότητας.
- (δ) Για τον έλεγχο της ρηγμάτωσης και του τρόπου αστοχίας μέσω της ολκιμότητας μετά τη ρηγμάτωση.
- (ε) Για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας.[14]

Επιπρόσθετα ο Krenzel (1974) επισήμανε ότι :

"Εάν, όπως στην περίπτωση του ινοπλισμένου κονιάματος, αποδειχθεί μια μέρα δυνατό να επιτευχθεί φαινόμενη επιμήκυνση σε ρήξη για το συνηθισμένο σκυρόδεμα που είναι δέκα ή περισσότερες φορές μεγαλύτερη από την τιμή που επιτυγχάνεται κανονικά, θα διαπιστωθεί ότι, για παράδειγμα, πολλές από τις κατασκευές για τις οποίες χρησιμοποιείται σήμερα το προεντεταμένο σκυρόδεμα μπορούν να παραχθούν πιο απλά και οικονομικά με συνηθισμένο, οπλισμένο σκυρόδεμα με ένα ορισμένο ποσοστό ινών που προστίθεται ως δευτερεύων οπλισμός για την κατανομή των ρωγμών. Επιπλέον, οι κίνδυνοι διάβρωσης του κύριου οπλισμού θα μειωθούν τόσο πολύ ώστε να είναι δυνατή η χρήση σημαντικά λιγότερου σκυροδέματος κάλυψης από ό,τι είναι σύνηθες σήμερα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση δεξαμενές νερού από οπλισμένο σκυρόδεμα, κατασκευές στον πυθμένα της θάλασσας και παρόμοια, αυτό θα έχει μεγάλη οικονομική σημασία.[15]

Εν κατακλείδι, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η χρήση των ινών για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Πολλές έρευνες διεξαγωγήθηκαν από την χρονική περίοδο του 1960 μέχρι και σήμερα, καθώς η χρήση της ίνας μπορεί να προσδώσει υψηλότερες δομικές δυνάμεις σε δομές από σκυρόδεμα αλλά και για άλλα ποικίλα έργα στην καθημερινότητά μας. (Marikunte, 1997).

2. Ευελιξία: Το οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να προσαρμοστεί σε πολλά διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, καθιστώντας το κατάλληλο για πολλαπλές εφαρμογές στην κατασκευή.

3. Ανθεκτικότητα σε σεισμούς: Λόγω της ισχυρής αντοχής σε τάσεις που παρέχει ο χάλυβας, το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικό σε σεισμικές δονήσεις και μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια των κατασκευών σε σεισμικές περιοχές.

4. Μείωση του κόστους: Αν και ο χάλυβας είναι σχετικά ακριβός, η χρήση του σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος της κατασκευής λόγω της αντοχής και της ανθεκτικότητάς του, καθώς και της μεγάλης διάρκειας ζωής των κατασκευών που κατασκευάζονται με αυτό (Marikunte, 1997).



Εικόνα 11 Οπλισμένο σκυρόδεμα

Συνολικά, το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα αποτελεσματικό υλικό που βοηθά στην κατασκευή ασφαλών, ανθεκτικών και οικονομικών κατασκευών. Το ενισχυμένο σκυρόδεμα αναφέρεται σε σκυρόδεμα που έχει ενισχυθεί με πρόσθετα υλικά ή τεχνολογίες που του παρέχουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Οι μετατροπές αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν την

προσθήκη ενισχυτικών υλικών όπως ινώδη υλικά ή οπλισμένες ινώδεις υφάσματα, καθώς και τη χρήση ειδικών προσθέτων ή διαδικασιών μίξης. Τα ενισχυμένα σκυροδέματα συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλότερη αντοχή ή αντοχή σε διάβρωση. Ορισμένα παραδείγματα ενισχυμένων σκυροδεμάτων περιλαμβάνουν:

1. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα: Προσθήκη ινώδων υλικών, όπως χαλαζία ή πολυπροπυλενίου, τα οποία βελτιώνουν την αντοχή σε τάση και την ανθεκτικότητα σε ρήξη του σκυροδέματος.
2. Ενισχυμένο Σκυρόδεμα με Ινώδεις Υφάσματα: Εφαρμογή ινώδων υφασμάτων, όπως γυαλιού ή άνθρακα, στο εσωτερικό του σκυροδέματος για αύξηση της αντοχής σε τάση και στρέψη.
3. Σκυρόδεμα με Πρόσθετα Ενίσχυσης: Πρόσθετα, όπως μικρο-σφαιρίδια ή πρόσθετα αδρανούς συμπίεσης, που βελτιώνουν την πυκνότητα και την αντοχή σε συμπίεση του σκυροδέματος (Mashrei, 2018).
4. Σκυρόδεμα με Πρόσθετα Χημικής Ενίσχυσης: Χρήση προσθέτων όπως συντηρητές, επιταχυντές ή υπερρευστοποιητές για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Οι παραπάνω μέθοδοι ενισχύσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνες τους ή σε συνδυασμό μεταξύ τους, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις περιπτώσεις.

1.1. Σκυρόδεμα οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες

Η παλαιότερη και ταυτόχρονα η πιο βασική μορφή ίνας που χρησιμοποιείται είναι από χάλυβα. Σε μια πιο απλοϊκή εκδοχή, αυτή η ίνα αποτελείται από ένα ευθύγραμμο τμήμα ενός λείου σύρματος. Γενικά οι χαλύβδινες ίνες επικράτησαν λόγω του λογικού κόστους κατασκευής τους και λόγω της εμπειρίας που προϋπήρχε στο συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος με χάλυβα. Έτσι και οι πρώτες έρευνες στις δεκαετίες του 1950 και 1960 επικεντρώθηκαν στη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα (Bentur and Mindness, 1990). Οι ίνες αυτές αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος και έχουν αντίσταση στα αλκαλικά

πρόσμικτα του σκυροδέματος. Συνεπώς, η αύξηση της δυσθραυστότητας ελαχιστοποιεί την ρηγμάτωση λόγω αλλαγών θερμοκρασίας και την αντίσταση λόγω ακραίας φόρτωσης, όπως η κρούση, η τριβή και η κόπωση. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 400 έως 1.500 MPa ενώ ανθρακούχοι χάλυβες, ειδικά σκληρυμένοι, μπορούν να φθάσουν μέχρι τα 4 GPa. Επίσης, έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa και ειδικό βάρος 8 g/cm^3 , όσο δηλαδή όλοι οι κοινοί χάλυβες (Maidl, 1995).[17]

Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν γέφυρες, κτίρια, επεκτάσεις, και άλλες μεγάλες κατασκευές όπου η αντοχή και η ευελιξία είναι κρίσιμες. Επιπλέον, η χρήση χαλύβδινων ίνων και ράβδων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο σχισματισμού και την ανάγκη για συχνή συντήρηση. Η χρήση χαλύβδινων ίνων και ράβδων σε ενισχυμένο σκυρόδεμα μπορεί να προσδώσει σε αυτό πολλές ειδικές ιδιότητες και να το καθιστήσει κατάλληλο για ειδικές εφαρμογές. Ας δούμε μερικά παραδείγματα:

1. Αντοχή σε σεισμό: Το σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες και ράβδους μπορεί να παρέχει υψηλή αντοχή σε σεισμικές δονήσεις και να αντιστέκεται σε καταστροφικές επιπτώσεις.
2. Προστασία από διαμόρφωση: Η ενίσχυση με χαλύβδινες ίνες μπορεί να προσφέρει προστασία από τη διαμόρφωση και την ανάπτυξη ρωγμών στο σκυρόδεμα, ειδικά σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο εδαφικής διαστρωφής.
3. Πυρασφάλεια: Η προσθήκη χαλύβδινων ράβδων μπορεί να αυξήσει την αντοχή του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες και να το καθιστήσει ανθεκτικότερο σε πυρκαγιές.
4. Εφαρμογές σε ειδικά περιβάλλοντα: Το ενισχυμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και ράβδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ειδικά περιβάλλοντα όπως χημικές εγκαταστάσεις, εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων ή εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, όπου απαιτείται ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά μέσα ή άλλες εξωτερικές επιθέσεις (MatikasT. , 2021).

Αυτά είναι μερικά παραδείγματα ειδικών εφαρμογών όπου το οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και ράβδους μπορεί να προσφέρει μεγάλα οφέλη. Η επιλογή αυτής της τεχνολογίας πρέπει να γίνει με βάση τις ανάγκες και τις απαιτήσεις

κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής. Από άποψη τάσεων, η χρήση χαλύβδινων ίνων και ράβδων στο σκυρόδεμα μπορεί να έχει τα εξής επιπρόσθετα οφέλη:

1. Αύξηση της αντοχής σε τράβηγμα: Οι χαλύβδινες ίνες και ράβδοι προσφέρουν πρόσθετη αντίσταση σε τράβηγμα και ενισχύουν την αντοχή του σκυροδέματος σε αυτήν την κατεύθυνση. (Memon, 2018).
2. Ενίσχυση της αντοχής σε συμπίεση: Οι χαλύβδινες ίνες μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος σε συμπίεση.
3. Βελτίωση της αντοχής σε διάτμηση: Η παρουσία των ίνων και των ράβδων μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της διάτμησης του σκυροδέματος και να βελτιώσει τη συνολική αντοχή του σε αυτήν την κατεύθυνση.
4. Ενίσχυση της συνολικής δομικής αντοχής: Οι χαλύβδινες ίνες και ράβδοι μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική αντοχή του σκυροδέματος σε διάφορες κατευθύνσεις τάσης, κάνοντας το πιο ανθεκτικό σε φορτίσεις και δυνάμεις που δρουν πάνω του.

Αυτά τα οφέλη καθιστούν το ενισχυμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και ράβδους μια εξαιρετική επιλογή για κατασκευαστικές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και αντίσταση σε διάφορες μορφές τάσης. Όταν μιλάμε για τάσεις διάτμησης σε οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και ράβδους, αναφερόμαστε στις δυνάμεις που επιδρούν στο υλικό κάθετα στον άξονα μήκους του. Η διάτμηση μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καταστροφικές επιπτώσεις σε κατασκευές, ειδικά όταν δεν λαμβάνεται κατάλληλη υπόψη στον σχεδιασμό.

Η προσθήκη χαλύβδινων ίνων και ράβδων στο σκυρόδεμα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντοχή του σε διάτμηση. Οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να ενισχύσουν τον πυρήνα του σκυροδέματος και να αντισταθμίσουν τις δυνάμεις που προκαλούν τη διάτμηση. Επιπλέον, οι χαλύβδινες ράβδοι μπορούν να λειτουργήσουν ως ενισχυτικά στοιχεία που αποτρέπουν την εξάπλωση των ρωγμών. Κατά συνέπεια, η προσθήκη χαλύβδινων ίνων και ράβδων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο καταστροφικών αποτυπωμάτων λόγω διάτμησης σε κατασκευές, καθώς και να αυξήσει την ασφάλεια και την αξιοπιστία τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κατασκευές όπου η διάτμηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα κινδύνου, όπως σε κολώνες, δοκούς, και επιφάνειες δομών που υποστηρίζουν βαριά φορτία (Mindness, 2003).

1.2. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με πολυμερικές ίνες

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με πολυμερικές ίνες είναι μια εξελιγμένη μορφή οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιεί πολυμερικά υλικά για την ενίσχυσή του. Αυτές οι πολυμερικές ίνες συνήθως κατασκευάζονται από υλικά όπως πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, ή άλλα πολυμερή υλικά. Οι πολυμερικές ίνες προστίθενται στο σκυρόδεμα για να αυξήσουν την αντοχή του σε τάση και διάτμηση. Αυτές οι ίνες μπορούν να βελτιώσουν την ομοιογένεια του υλικού και να μειώσουν τον κίνδυνο σχισίματος και καταστροφής λόγω διάτμησης. Επιπλέον, οι πολυμερικές ίνες μπορούν να παρέχουν αντίσταση σε κρούση και καταπόνηση.

1.2.1. Πολυμερικές ίνες

Οι πολυμερικές ίνες συχνά προτιμώνται για την ενίσχυση του σκυροδέματος σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε κρούση, όπως γέφυρες, οδοστρώματα και αεροδρόμια. Επιπλέον, η χρήση πολυμερικών ινών μπορεί να μειώσει το βάρος του οπλισμένου σκυροδέματος, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές όπου η μείωση του βάρους είναι σημαντική, όπως σε κατασκευές σε υπόγεια ή υποθαλάσσια περιβάλλοντα (Ahmad, 2020).

Η χρήση πολυμερικών ινών στον τομέα του οπλισμένου σκυροδέματος έχει εμφανιστεί σχετικά πρόσφατα στην ιστορία της κατασκευής, κυρίως ως αποτέλεσμα της εξέλιξης στην τεχνολογία των υλικών και των μηχανικών. Η πρώτη εμφάνιση των πολυμερικών ινών στον τομέα του σκυροδέματος συνδέεται με την ανάγκη για βελτιωμένα υλικά κατασκευής που να προσφέρουν υψηλή αντοχή και αντίσταση σε κρούση. Η εμπειρία από άλλους τομείς, όπως η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι πολυμερικές ίνες χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση υλικών, οδήγησε στην έρευνα και ανάπτυξη νέων εφαρμογών στην κατασκευή (Avgeropoulos, 2019).

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία αυτή έχει εξελιχθεί σημαντικά, με την ανάπτυξη προηγμένων πολυμερικών ινών που προσφέρουν υψηλή αντοχή και αντίσταση σε κρούση. Οι εφαρμογές τους στον τομέα του οπλισμένου σκυροδέματος έχουν αποδειχθεί ευρέως αποδεκτές σε διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως γέφυρες, κτίρια, οδοστρώματα, και άλλες υποδομές.

Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτό τον τομέα συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των κατασκευών, καθώς και στη μείωση του κόστους συντήρησης και αντικατάστασης σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χρονικό διάστημα. Η συνεχής υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής από τη βιομηχανία της κατασκευής αναμένεται να συνεχίσει να διαμορφώνει το μέλλον του οπλισμένου σκυροδέματος.

1.2.2. Πλεονεκτήματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

1. Αυξημένη αντοχή σε τάση και διάτμηση: Οι ίνες παρέχουν ενισχυμένη αντοχή σε τάση και διάτμηση στο σκυρόδεμα, βελτιώνοντας την αντοχή του υλικού σε φορτία και δυνάμεις που προκαλούν κρούση.
 2. Μείωση της σκληρότητας και του βάρους: Τα ινοπλισμένα σκυροδέματα μπορεί να έχουν μειωμένη σκληρότητα σε σύγκριση με συμβατικά σκυροδέματα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της σπατάλης ενέργειας κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Επιπλέον, μειωμένο βάρος σημαίνει μειωμένο φορτίο στην κατασκευή και την μεταφορά του υλικού (BenturA., 2007).
 3. Βελτιωμένη αντίσταση σε κρούση: Οι ίνες προσφέρουν αυξημένη αντίσταση σε κρούση και καταπόνηση, καθιστώντας το ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατάλληλο για περιοχές με υψηλή κίνηση ή βαριά φορτία.
 4. Βελτιωμένη αντίσταση σε χημικά και καταπονήσεις: Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να έχει αυξημένη αντοχή σε χημικά και άλλες καταπονήσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε περιβάλλοντα με εκτεθειμένες σειρές.
 5. Μειωμένος κίνδυνος ρωγμών: Ο ινοπλισμός μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο εμφάνισης ρωγμών και σπασίματος στο σκυρόδεμα, βελτιώνοντας έτσι την αντοχή και τη διάρκεια ζωής του υλικού.
 6. Απλούστευση της κατασκευής: Η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να επιτρέψει την απλούστευση των διαδικασιών κατασκευής, καθώς μειώνει την ανάγκη για εφαρμογή ενός μεγάλου αριθμού συμβατικών ενισχυτικών υλικών.
- Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μια ελκυστική επιλογή σε πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές (Naser, 2019).

1.2.3. Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει ευρεία γκάμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς της κατασκευής λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Ορισμένες από τις κύριες εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος περιλαμβάνουν:

1. Κτιριακές κατασκευές: Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε κτιριακές κατασκευές για την κατασκευή κολώνων, δοκών, δαπέδων και θεμελίων. Η αυξημένη αντοχή και η μειωμένη ευαισθησία στον κίνδυνο ρήγματος το καθιστούν κατάλληλο για κτιριακές εφαρμογές.
2. Υποδομές: Σε υποδομές όπως γέφυρες, τοιχία στήριξης, πεζογέφυρες και αεροδρόμια, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει αντίσταση σε κρούσεις και καταπονήσεις που προκαλούνται από την κίνηση και τα βαριά φορτία.
3. Υποθαλάσσιες κατασκευές: Λόγω της αντίστασής του σε υγρό περιβάλλον και τη δυνατότητα αντίστασης σε αλατούχα νερά, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε υποθαλάσσιες κατασκευές όπως λιμάνια, προβλήτες, και άλλες υδρολογικές εφαρμογές (Bhogayata, 2018).
4. Οδοποιία: Στον τομέα της οδοποιίας, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε δρόμους, γέφυρες και άλλες υποδομές λόγω της αντίστασής του σε κρούσεις και της μεγάλης αντοχής του σε φορτία.
5. Περιβαλλοντικές εφαρμογές: Λόγω της ανθεκτικότητάς του σε χημικά και τις κακές καιρικές συνθήκες, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, εργοστάσια χημικών και άλλες περιβαλλοντικές εφαρμογές. Αυτές είναι μερικές από τις κύριες εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με τη χρήση του να επεκτείνεται σε πολλούς άλλους τομείς της κατασκευής λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων (BenturA., 2007).

2. Πολυμερή

Πολυμερή είναι σύνολο μακρομοριακών αλυσίδων (μακρομόρια) που παρασκευάζονται από την επανάληψη μικρών δομικών μονάδων συνδεδεμένες μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς και ο αριθμός των δομικών μονάδων είναι μεγαλύτερος από 10. Μονομερή ή μονομερικά στοιχεία είναι οι αρχικές ενώσεις από τις οποίες προέρχονται οι δομικές μονάδες που σχηματίζουν τα μακρομόρια στα πολυμερή και διαφέρουν είτε στον τρόπο σύνδεσης των ατόμων είτε στον αριθμό των

ατόμων.[20] Η ταξινόμηση των πολυμερών με βάση την προέλευσή τους γίνεται σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

- Φυσικά Πολυμερή (φυσικό καουτσούκ, βαμβάκι, μετάξι, μαλλί, κυτταρίνη κ.λ.π)
- Συνθετικά Πολυμερή (συντίθεται στο εργαστήριο: πολυπροπυλένιο (PP), πολυαιθυλένιο (PE), πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC).

Ανάλογα με τη χημική τους δομή τα συνθετικά πολυμερή διακρίνονται σε:

- Ομοπολυμερή (ίδιες δομικές μονάδες)
- Συμπολυμερή (δύο δομικές μονάδες διαφορετικής χημικής σύστασης)
- Τριπολυμερή (τρεις δομικές μονάδες διαφορετικής χημικής σύστασης), κλπ

Τα ομοπολυμερή ανάλογα με την αρχιτεκτονική δομή των αλυσίδων διακρίνονται σε:

- Γραμμικά
- Διακλαδισμένα
- Κυκλικά

Τα συμπολυμερή που προέρχονται από δύο μονομερή χωρίζονται σε:

- Τυχαία ή στατιστικά συμπολυμερή όπου οι δομικές μονάδες συντάσσονται με τυχαίο τρόπο μεταξύ τους
- Εναλλασσόμενα συμπολυμερή όπου οι δομικές μονάδες εναλλάσσονται απόλυτα μεταξύ τους
- Κατά συστάδες (block) συμπολυμερή όπου αποτελούνται από δύο ή περισσότερες συστάδες δομικών μονάδων διαφορετικής χημικής σύστασης.
- Εμβολιασμένα ενοφθαλμισμένα συμπολυμερή όπου οι διακλαδώσεις τις κύριας αλυσίδας αποτελούνται από διαφορετικής χημικής σύστασης δομικές μονάδες σε σχέση με τις δομικές μονάδες της αλυσίδας.

Με βάση το πεδίο εφαρμογών τους τα πολυμερή χωρίζονται ως:

- Πλαστικά
- Ελαστομερή
- Συνθετικές ίνες
- Κόλλες και επιχρίσματα

Ανάλογα με την συμπεριφορά τους στη θέρμανση διακρίνονται ως εξής:

- Θερμοπλαστικά
- Θερμοσκληρυνόμενα
- Ελαστομερή

Τα θερμοπλαστικά όπως (Πολυπροπυλένιο, Πολυβινυλοχλωρίδιο κλπ) είναι τα πολυμερή τα οποία μαλακώνουν και επομένως δύναται να μορφοποιηθούν εάν θερμανθούν πάνω από μία ορισμένη θερμοκρασία, την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g), κατά την θέρμανση μεταβάλλεται επίσης η θέση των μακρομορίων και όχι η χημική τους δομή. Αντίθετα τα θερμοσκληρυνόμενα είναι τα πολυμερή τα οποία αλλάζουν όχι αντιστρεπτά τις αρχικές τους ιδιότητες με θέρμανση πάνω από μία ορισμένη θερμοκρασία, παρουσία συνήθως ορισμένων χημικών ενώσεων (βουλκανισμός), αναπτύσσοντας σταυροδεσμούς. Τα ελαστομερή υλικά κατατάσσονται στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων η διαφορά τους από αυτά είναι ότι περιέχουν αραιή πυκνότητα σταυροδεσμών και ότι υπό τη επιβολή τάσης δέχονται μεγάλη επιμήκυνση ενώ κατά την αφαίρεση τάσης επανέρχονται γρήγορα στην αρχική τους κατάσταση. Με βάση την στερεοϊσομερεία τους διακρίνονται σε:

- Ισοτακτικά (Κατανομή του υποκαταστάτη στην ίδια πλευρά της κύριας αλυσίδας)
- Συνδυοτακτικά (Εναλλασόμενη κατανομή υποκαταστάτη στην κύρια αλυσίδα)
- Ατακτικά (Τυχαία κατανομή υποκαταστάτη)

2.1. Πολυπροπυλένιο

Το πολυπροπυλένιο είναι ένα πολυμερές υλικό που παράγεται από τον πολυμερισμό του μονομερούς προπυλενίου. Έχει γενικό τύπο $(C_3H_6)_n$, όπου "n" αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων μονομερών που συνδέονται για να δημιουργήσουν το πολυμερές. Το πολυπροπυλένιο είναι ένα πολυμερές υλικό που αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες προπυλενίου. Στη δομή του, κάθε μονάδα προπυλενίου αποτελείται από τρία άτομα άνθρακα και έξι άτομα υδρογόνου.



Εικόνα 12 Ινες πολυπροπυλενίου

Η δομή του πολυπροπυλενίου είναι γραμμική, καθώς οι μονάδες προπυλενίου συνδέονται μεταξύ τους σε μια γραμμική αλυσίδα κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού. Αυτή η γραμμική δομή προσδίδει στο πολυπροπυλένιο ιδιότητες όπως η υψηλή ανθεκτικότητα και η ευελιξία. Οι ιδιότητες του πολυπροπυλενίου περιλαμβάνουν την ανθεκτικότητα στις χημικές ουσίες, την αντοχή στη θερμότητα και την ηλεκτρική μόνωση. Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς όπως η συσκευασία τροφίμων, η ιατρική τεχνολογία, η δόμηση η αυτοκινητοβιομηχανία και η ηλεκτρονική, λόγω της εξαιρετικής του ανθεκτικότητας και αντοχής. Επιπλέον, έχει χαμηλό κόστος παραγωγής και είναι ελαφρύ, κάνοντάς το ιδανικό για πολλές εφαρμογές.

2.1.1. Εφαρμογές Πολυπροπυλενίου

Το πολυπροπυλένιο έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του. Ορισμένες από τις κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

1. Συσκευασία Τροφίμων: Το πολυπροπυλένιο χρησιμοποιείται ευρέως στη συσκευασία τροφίμων λόγω της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση και τη διαπερατότητα αερίων, καθώς και της ικανότητάς του να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες.

2. Ιατρικές Εφαρμογές: Χρησιμοποιείται σε ιατρικές συσκευές και εξοπλισμό, όπως σε προσθετικές προστατευτικές συσκευές, σε καλούπια για διάφορες θεραπείες, και σε συσκευασίες φαρμάκων.

3. Αυτοκινητοβιομηχανία: Χρησιμοποιείται σε εξαρτήματα αυτοκινήτων, όπως προφυλακτήρες, εσωτερικά εξαρτήματα και ανταλλακτικά, λόγω της ελαφρότητας, της ανθεκτικότητας και της αντοχής στις καιρικές συνθήκες (Κ. Παναγιώτου, 2000).

4. Συσκευασία Προϊόντων: Χρησιμοποιείται σε διάφορα προϊόντα συσκευασίας, όπως μπουκάλια, κουτιά, σακούλες κλπ.

5. Εφαρμογές Εξωτερικού Χώρου: Χρησιμοποιείται σε έπιπλα εξωτερικού χώρου, όπως καρέκλες, τραπέζια και καλαθούνες λόγω της ανθεκτικότητας του στις καιρικές συνθήκες.

6. Εφαρμογές Επεξεργασίας Τροφίμων: Χρησιμοποιείται σε μαχαιροπίρουνα, πιάτα, σκεύη μαγειρικής κλπ. λόγω της ανθεκτικότητάς του στη θερμότητα και την χημική αντοχή.

7. Στην δόμηση: ο πολυπροπυλένιο μπορεί να προστεθεί σε μικρές ποσότητες κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, συνήθως σε μορφή πρόσθετων που αναμειγνύονται με τα υλικά που απαιτούνται για την παρασκευή του. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο στο νερό αραίωσης ή στο σκυρόδεμα κατά την εφαρμογή. Οι προσθέσεις πολυπροπυλενίου μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της αντοχής στη συμπίεση και στην τάση, στην μείωση της υδραυλικής συσσώρευσης και στην βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος.

2.2. Πολυμερικές Ίνες

Οι πολυμερικές ίνες είναι ίνες που αποτελούνται από πολυμερή υλικά, τα οποία είναι μακροσκοπικά αλυσιδωτά μόρια που επαναλαμβάνονται. Οι πολυμερικές ίνες μπορούν να είναι φυσικές ή συνθετικές και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές λόγω των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων. Ορισμένα παραδείγματα πολυμερικών ινών περιλαμβάνουν:

1. Νάιλον (Πολυαμίδια): Το νάιλον είναι μια συνθετική πολυμερής ίνα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως ρούχα, κορδόνια, σκοινιά, καλώδια, κλπ. Είναι ελαφρύ, ανθεκτικό στην τριβή και στις χημικές ουσίες.

2. Πολυεστέρες (π.χ. Πολυεστέρας PET): Οι πολυεστερικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως ρούχα, επίπλωση, χαλιά, συσκευασία, καθώς και σε τομείς όπως η ιατρική και η αυτοκινητοβιομηχανία.

3. Πολυπροπυλένιο: Το πολυπροπυλένιο είναι μια ακόμα συνθετική πολυμερής ίνα που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως συσκευασία, ρούχα, υλικά επίπλωσης και ιατρικά είδη.

4. Πολυπροπυλενοξική ίνα (PP): Το PP είναι μια άλλη συνθετική πολυμερής ίνα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως χαλιά, υφάσματα επίπλωσης, σακούλες και πολλά άλλα.

5. Ακρυλικές ίνες: Οι ακρυλικές ίνες χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές όπως είδη ρουχισμού, κουβέρτες, χαλιά και επίπλωση.

6. Ίνες Πολυαιθυλενίου: Οι ίνες πολυαιθυλενίου παρουσιάζουν επίσης εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση από οξέα και οι αλκάλια, και είναι ανθεκτικές στις καιρικές συνθήκες, καθιστώντας τις κατάλληλες για εξωτερική χρήση. Αυτές οι πτυχές τους τις καθιστούν πολύ επιθυμητές σε μια ποικιλία εφαρμογών (Pawar, 2020).

3. Τεχνικές Χαρακτηρισμού

4.1. Καμπτική Αντοχή Δοκιμίων

Καμπτική σημειακή πίεση εξασκείται σε πρισματικά δοκίμια μέσω μετάδοσης φορτίου από κυλίνδρους στο άνω και κάτω μέρος του δοκιμίου και ακολουθεί το πρότυπο EN 12390-5. Οι διαστάσεις των πρισματικών δειγμάτων δίνονται παρακάτω:

$$\text{Πλάτος} = \text{Ύψος} = d$$

$$\text{Μήκος} \geq 3.5 d$$

Η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στον τομέα του σκυροδέματος για να μελετηθεί η μηχανική αντοχή των υλικών σε κάμψη. Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα πρίσμα σκυροδέματος υποβάλλεται σε κάμψη με τέσσερις σημεία εφαρμογής φορτίου, δύο σε κάθε πλευρά του πρίσματος. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση μιας συσκευής που ονομάζεται "τεστ αντοχής κάμψης τεσσάρων-σημείων".

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονται η διάσταση του πρίσματος και η κάμψη που υφίσταται κάθε σημείο εφαρμογής φορτίου. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η αντοχή του υλικού σε κάμψη, καθώς και άλλες μηχανικές ιδιότητες όπως η ελαστικότητα και η αντοχή στην καταπόνηση.

Η δοκιμή κάμψης 4 σημείων είναι σημαντική για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση κατασκευαστικών υλικών και δομικών στοιχείων, όπως δοκοί και πλάκες σε κτίρια και γέφυρες. Τα αποτελέσματα της δοκιμής χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της αντοχής των κατασκευών (Paipetis).

Από μαθηματικής άποψης, η δοκιμή κάμψης τεσσάρων-σημείων συνήθως αναλύεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία της μηχανικής κάμψης. Αυτή η θεωρία βασίζεται στις εξισώσεις του μηχανικού ισορροπημένου και στη θεωρία της ελαστικότητας.

Η μαθηματική προσέγγιση της δοκιμής κάμψης τεσσάρων-σημείων συνήθως περιλαμβάνει τον υπολογισμό του προφίλ των εστιών κάμψης, των μετακινήσεων, των καμπτικών στιγμιότυπων, και των μηχανικών μεγεθών όπως η στρέψη και η καμπυλότητα. Αυτά τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη δοκιμή και να αξιολογήσουν τη μηχανική του αντοχή.

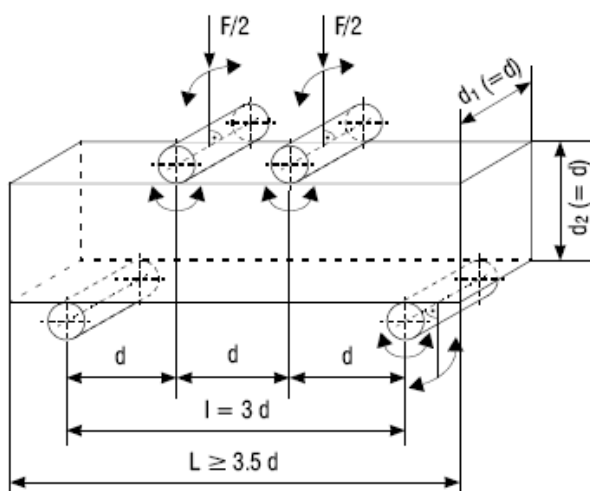
Επιπλέον, η μαθηματική ανάλυση συχνά περιλαμβάνει τη χρήση διάφορων μοντέλων ρήξης για να προσεγγίσει την αντοχή του υλικού σε κάμψη και να προβλέψει

το σημείο ρήξης. Αυτές οι μαθηματικές προσεγγίσεις είναι σημαντικές για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση κατασκευαστικών υλικών και δομικών στοιχείων από μαθηματική άποψη.

Υπάρχουν διάφοροι μαθηματικοί τύποι και εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στη μαθηματική ανάλυση της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων. Αυτοί περιλαμβάνουν:

1. **Μηχανική Κάμψης (Beam Theory):** Η μηχανική κάμψης περιλαμβάνει διάφορες εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του πρίσματος σκυροδέματος κατά την εφαρμογή φορτίου κάμψης.
2. **Μετακινήσεις και Καμπτικά Στιγμιότυπα:** Οι μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τις μετακινήσεις και τα καμπτικά στιγμιότυπα του πρίσματος κατά τη δοκιμή.
3. **Εξισώσεις Ρήξης:** Μαθηματικά μοντέλα που προσεγγίζουν την αντοχή του υλικού σε κάμψη και προβλέπουν το σημείο ρήξης.
4. **Εξισώσεις Μηχανικού Ισορροπημένου:** Εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το μηχανικό ισορροπημένο του πρίσματος σκυροδέματος κατά τη δοκιμή.
5. **Μοντέλα Ρήξης:** Μαθηματικές εκφράσεις που προσεγγίζουν την αντοχή του υλικού σε κάμψη και τη συμπεριφορά του κατά την πρόκληση της ρήξης.

Αυτοί οι μαθηματικοί τύποι και εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος σε κάμψη κατά τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων.



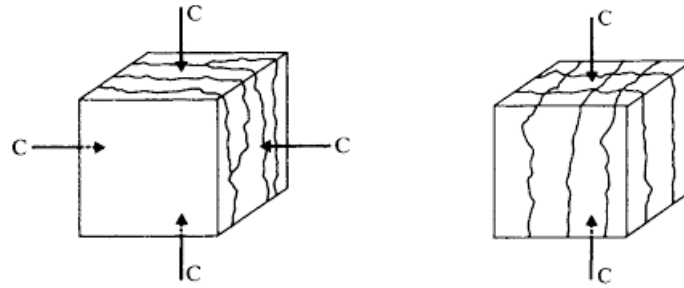
Εικόνα 13 Κάμψη τεσσάρων σημείων.

4.2. Θλίψη

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο κοινή ίσως δοκιμή για το σκυρόδεμα, κυρίως λόγω του ότι είναι απλή στη διεξαγωγή της. Επίσης η αντοχή σε θλίψη είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος απαραίτητο για κάθε υπολογισμό. Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους (Raheem, 2013). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι μορφές θραύσης κυβικού δοκιμίου υπό μονοαξονική και διαξονική θλίψη.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας κολονάκια. Αντίθετα στην περίπτωση της διαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο φορτίσεις και το δοκίμιο αστοχεί με τον σχηματισμό πλακοειδών στοιχείων. Στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης έχουμε αστοχία λόγω σύνθλιψης και το σκυρόδεμα δεν συμπεριφέρεται πλέον ψαθυρά. Στις πραγματικές δοκιμές όμως οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της μηχανής στην οποία γίνεται η δοκιμή. Το σκυρόδεμα κατά τη θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις χαλύβδινες πλάκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται, λόγω τριβής, η οριζόντια παραμόρφωση και να αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα της τριαξονικής θλίψης είναι να αυξάνεται φαινομενικά η αντοχή του δοκιμίου (Plank, 2015). παραγωγής και για την εκτίμηση του χρόνου ζωής τους σε διάφορα περιβάλλοντα (S. Havriliak Jr, 1997).

Η θερμοδυναμική μελετά δύο τύπους μεταφοράς ενέργειας: την θερμότητα και το έργο. Η θερμότητα μπορεί να οριστεί ως η ενέργεια που μεταφέρεται εξ αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο συστημάτων. Η θερμότητα μεταφέρεται αυθόρμητα από το θερμό προς το ψυχρό σύστημα.



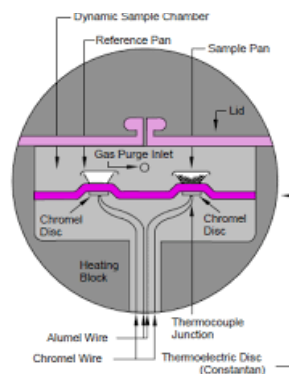
Εικόνα 14 Διαξονική θλίψη (αριστερά) και μονοαξονική θλίψη (δεξιά).

4.3. Θερμική Ανάλυση

Η θερμική ανάλυση περιλαμβάνει μία οικογένεια πειραματικών τεχνικών (τεχνικών μετρήσεων) με ένα κοινό χαρακτηριστικό, μετρούν την απόκριση ενός υλικού όταν αυτό θερμαίνεται ή ψύχεται (και σε κάποιες περιπτώσεις σε ισόθερμες συνθήκες). Στόχος είναι η εύρεση μιας σχέσης ανάμεσα στην θερμοκρασία και σε συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού. Στην περίπτωση των πολυμερών η θερμική ανάλυση δεν χρησιμοποιείται μόνο για την μέτρηση κάποιων φυσικών ιδιοτήτων τους, αλλά και για την διευκρίνιση της θερμικής και μηχανικής τους ιστορίας, για τον χαρακτηρισμό και σχεδιασμό διαδικασιών βιομηχανικής

4.3.1. Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)

Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης μετρά τις θερμοκρασίες και τις ροές θερμότητας που σχετίζονται με μεταβάσεις σε υλικά ως συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα (συνήθως αδρανή). Οι μετρήσεις αυτές προσφέρουν ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες για φυσικές και χημικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα και που εκφράζονται με ενδόθερμες ή εξώθερμες διεργασίες ή μεταβολές στην θερμοχωρητικότητα.



Εικόνα 15 Σχηματική απεικόνιση κελιού DSC

Με την παραπάνω τεχνική μπορεί να χαρακτηριστεί (ή προσδιορισθεί):

- Η υαλώδης μετάπτωση
- Τα σημεία τήξεως και βρασμού
- Ο χρόνος κρυστάλλωσης και η θερμοκρασία κρυστάλλωσης
- Το ποσοστό κρυσταλλικότητας
- Η θερμότητα τήξης και αντίδρασης
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα
- Η οξειδωτική/θερμική σταθερότητα
- Ο ρυθμός και ο βαθμός σκλήρυνσης
- Η κινητική των αντιδράσεων
- Η καθαρότητα

Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης ανήκει στις τεχνικές θερμικής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται κυρίως για την μελέτη των μεταβάσεων φάσης σε διάφορους τύπους υλικών, κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα πολυμερή, ενεργά διηλεκτρικά, κλπ.

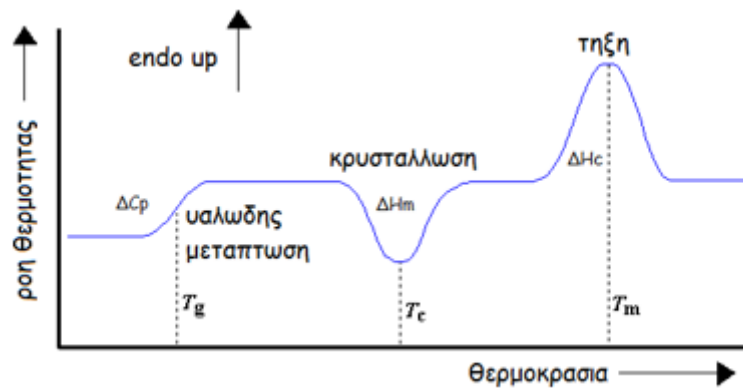
Οι μεταπτώσεις φάσης εξηγούν θερμομηχανικές ιδιότητες των πολυμερών και οι μεταπτώσεις που παρατηρούνται με την διαφορική θερμιδομετρία είναι οι εξής :

- Τήξη κρυστάλλων
- Κρυσταλλικές μεταπτώσεις 1ης τάξης
- Υαλώδεις μεταπτώσεις

Η τήξη και η κρυστάλλωση αποτελούν θερμοδυναμικές αλλαγές φάσης 1ης τάξης. Φάση ονομάζεται ένα τμήμα της ύλης, ομοιογενές σε όλη την έκτασή του τόσο από άποψη χημικής σύστασης όσο και φυσικής κατάστασης. Όσον αφορά την υαλώδη μετάβαση, σε στενή περιοχή θερμοκρασιών γύρω από μια χαρακτηριστική τιμή T_g , μερικές ιδιότητες των υλικών όπως ιξώδες, θερμοχωρητικότητα, συντελεστής θερμικής διαστολής υφίστανται απότομη αλλαγή, ενώ άλλες ιδιότητες όπως όγκος, ενθαλπία, εντροπία αλλάζουν βαθμιαία. Η υαλώδης μετάβαση είναι κινητική αλλαγή φάσης με ορισμένα χαρακτηριστικά θερμοδυναμικής αλλαγής φάσης 2ας τάξης (S. Havriliak Jr, 1997). Το σύστημα στην υαλώδη φάση δεν βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ως εκ τούτου, η ενθαλπία μειώνεται με τον χρόνο όταν το δοκίμιο παραμένει σε θερμοκρασία μικρότερη της T_g . Το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως χαλάρωση ενθαλπίας, ενώ οι αλλαγές που επιτελούνται στην δομή και στις ιδιότητες χαρακτηρίζονται από τους όρους δομική χαλάρωση και φυσική γήρανση.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην μέτρηση της διαφοράς στην ροή θερμότητας προς ένα δείγμα αναφοράς και προς το υπό χαρακτηρισμό δείγμα, συναρτήσει της θερμοκρασίας όταν το όλο σύστημα υπόκειται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θέρμανσης ή/και ψύξης. Ένα θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης αποτελείται από ένα σύστημα δύο κυψελίδων το οποίο υπόκειται στο θερμοκρασιακό εύρος που του επιβάλλουμε. Οι δύο κυψελίδες θερμαίνονται ή ψύχονται ομοιόμορφα με σταθερό ελεγχόμενο ρυθμό. Ο ρυθμός ψύξης ή θέρμανσης ελέγχεται μέσω υπολογιστή και λαμβάνονται θερμογράμματα ψύξης και θέρμανσης. Στην πρώτη κυψελίδα περιέχεται το υλικό αναφοράς-καψίδιο αναφοράς, ενώ στην άλλη το υλικό-δείγμα. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας η διαφορά της θερμοκρασίας των δύο καψιδίων παραμένει μηδέν ενώ η θερμοκρασία τους αυξομειώνεται ακολουθώντας τον εκάστοτε ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης. Μετράται η διαφορά στη ροή θερμότητας που προσφέρεται (ή απάγεται) στο υπό μελέτη δείγμα για την αύξηση (ή μείωση) της θερμοκρασίας του έναντι αυτής που προσφέρεται (ή απάγεται) σε δείγμα αναφοράς, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όταν το υπό μελέτη δείγμα υπόκειται σε μετατροπή φάσης, περισσότερη (ή λιγότερη) θερμότητα προσφέρεται σε αυτό ώστε η θερμοκρασία του να διατηρηθεί ίση με αυτήν του δείγματος αναφοράς. Παρατηρώντας τις διαφορές ροής θερμότητας ανάμεσα στο δείγμα και την κυψελίδα αναφοράς μπορούμε να καταγράψουμε τα ποσά ενέργειας που απορροφώνται ή απελευθερώνονται κατά την μετατροπή των διάφορων φάσεων. Στην συνέχεια καταγράφεται η ροή θερμότητας συναρτήσει του χρόνου (ή της θερμοκρασίας), για εξώθερμα ή ενδόθερμα φυσικοχημικά φαινόμενα (Salvador, 2016).

Ένα πρότυπο γράφημα που παρουσιάζει τις μεταβάσεις που παρατηρούνται σε ένα διάγραμμα ροής θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας που καταγράφεται με την τεχνική DSC είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 16 Θερμοδιαγραμμα με την τεχνική του DSC

Στην εικόνα παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές διαφορετικές περιοχές όπου φαίνονται αυξομειώσεις στην ροή θερμότητας, κορυφές και βήματα. Αυτά αντιστοιχούν σε μεταπτώσεις φάσεων του εξεταζόμενου υλικού, που μπορεί να είναι οι προαναφερθείσες. Η υαλώδης μετάβαση παρατηρείται ως αύξηση της ροής θερμότητας υπό τη μορφή βήματος. Από την ανάλυσή του προκύπτουν οι τιμές για την θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) και τη συνεισφορά της στη θερμοχωρητικότητα ΔC_p . Η τήξη και η κρυστάλλωση παρατηρούνται ως ενδόθερμη και ως εξώθερμη κορυφή, αντίστοιχα. Από τις κορυφές τήξης και κρυστάλλωσης μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες τήξης και κρυστάλλωσης T_m και T_c αντίστοιχα, καθώς και η ενθαλπία για κάθε μία ΔH_m και ΔH_c , αντίστοιχα. Το ΔC_p αντιστοιχεί στην μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας που επέρχεται κατά την υαλώδη μετάβαση. Προκύπτει από το παρατηρούμενο βήμα στην περιοχή της υαλώδους μετάπτωσης. Με ολοκλήρωση της διαφοράς παρεχόμενης ισχύος, στο γράφημα ροής θερμότητας-χρόνου, λαμβάνεται η ενθαλπία κρυστάλλωσης ΔH_m και η ενθαλπία τήξης ΔH_m , ανάλογα σε ποια περιοχή επιλέγουμε την ολοκλήρωση. Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος που υπολογίζεται με την διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης είναι ο βαθμός κρυσταλλικότητας μέσω της σχέσης :

$$\chi_c = \frac{\Delta H_{\text{c}}}{\Delta H_{\text{c}}^0}$$

Όπου ΔH_{c}^0 η ενθαλπία του 100% κρυσταλλικού υλικού.

Όταν μιλάμε για τήξη κρυστάλλων ή κρυστάλλωση, εννοούμε μια περιοχή τήξης, αντίστοιχα κρυστάλλωσης παρά μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας κατά την οποία λαμβάνουν χώρα οι συγκεκριμένες θερμοδυναμικές μεταπτώσεις. Οι θερμοκρασίες T_m και T_c αντιπροσωπεύουν την εκάστοτε περιοχή ως «μέση» τιμή. Η θερμοκρασία

υαλώδους μετάβασης T_g είναι η αντιπροσωπευτική θερμοκρασία της περιοχής υαλώδους μετάβασης. Στην εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης και της διαφοράς της ειδικής θερμοχωρητικότητας μέσω της μεθόδου μέσου ύψους από ένα θερμόδιαγραμμα που λαμβάνεται με την τεχνική της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης για ένα πολυμερές. Με κατάλληλη κανονικοποίηση του άξονα ροής ισχύος, μέσω του γνωστού ρυθμού θέρμανσης, αυτός μετατρέπεται σε άξονα της θερμοχωρητικότητας. Η μεταβολή (βήμα υαλώδους μετάβασης) στην καμπύλη του θερμοδιαγράμματος δίνει την αντίστοιχη ΔC_p . Κατά σύμβαση, η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης T_g υπολογίζεται ως η τιμή της θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στο ήμισυ του βήματος ΔC_p , ενώ η ΔC_p υπολογίζεται ως το βήμα στο θερμόδιαγραμμα κατά την διαδικασία αυτήν (ShahH. Q., 2021).

4.4. Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (DMA)

Η δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA) είναι μια μη καταστρεπτική μηχανική μέθοδος που χαρακτηρίζει τις γραμμικές ιξωδοελαστικές ιδιότητες του υλικού μέσω της εφαρμογής μιας ταλαντούμενης τάσης ή παραμόρφωσης, η οποία επιλέγεται ώστε να βρίσκεται μέσα στην περιοχή γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς (LinearViscoelasticRegion, LVR). Έτσι, η αύξηση της τάσης οδηγεί σε ανάλογη αύξηση στην παραμόρφωση και έτσι η σχέση μεταξύ της τάσης – παραμόρφωσης μπορεί και να παραμένει σταθερή, παρά τη διακύμανση της τάσης με το χρόνο (R. P. Chartoff, 2009). Τα πολυμερικά υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την παρασκευή βιοϋλικών και φαρμάκων είναι ιξωδοελαστικά. Ως εκ τούτου, μετά την εφαρμογή σταθερής τάσης, τα ιξωδοελαστικά συστήματα παρουσιάζουν μια χρονικά εξαρτώμενη, παραμόρφωση, χαρακτηριστική τόσο των ελαστικών υλικών όσο και των ιξώδων. Ειδικότερα, τα ιξωδοελαστικά συστήματα θα συνεχίσουν να παραμορφώνονται σε συνάρτηση με τον χρόνο (συμπεριφορά ερπυσμού) και μετά την εφαρμογή της σταθερής τάσης. Μετά την αφαίρεση της εφαρμοζόμενης τάσης, μερική από την ενέργεια θα χαθεί λόγω της τυρβώδους ροής της ενέργειας, ωστόσο μέρος αυτής αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται για να επανέλθει μέρος από την παραμόρφωση που προκαλεί η τάση. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά γενικά μπορεί να εξηγηθεί με την βοήθεια δύο ιδανικών υλικών: του ελαστικού στερεού και του ιξώδους υγρού. Ο νόμος του Hooke αναφέρει ότι ο λόγος της τάσης (σ) προς την παραμόρφωση

(γ) για ιδανικό ελαστικό υλικό είναι σταθερός, μέχρι ένα ειδικό ελαστικό όριο. Η σταθερά αναλογίας ορίζεται ως μέτρο ελαστικότητας (Young modulus) (E).



Εικόνα 17 Συσκευή Δυναμικής μηχανικής Ανάλυσης

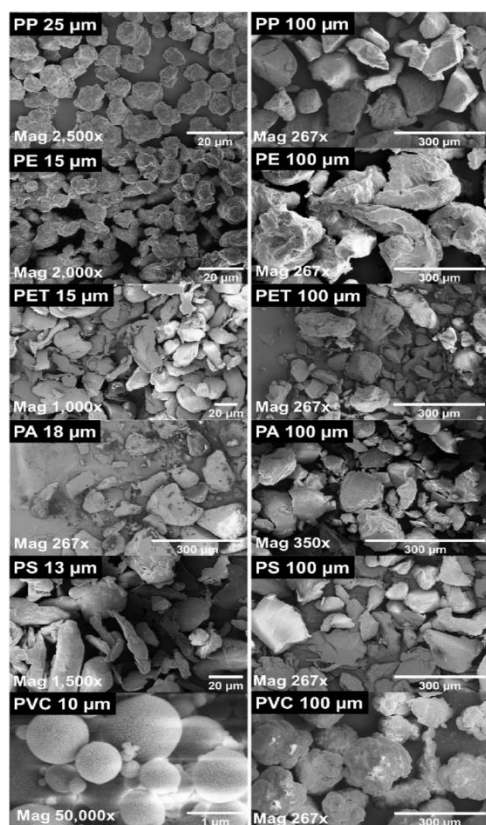
Η συμπεριφορά των ελαστικών στερεών μπορεί να αναπαρασταθεί με τη βοήθεια ελατηρίου. Το φορτίο που εφαρμόζεται στο ελατήριο αντιπροσωπεύει την τάση και η επιμήκυνση την παραμόρφωση. Το φορτίο που ασκείται στο ελατήριο είναι ευθέως ανάλογο της παραμόρφωσης η οποία για ελαστικά υλικά είναι στιγμιαία και ανεξάρτητη του χρόνου. Με την αφαίρεση του φορτίου, η αποθηκευμένη ενέργεια ελαστικότητας χρησιμοποιείται για να επιστρέψει το ελατήριο στην αρχική του θέση η απόκριση αυτή είναι επίσης στιγμιαία. Αντίθετα, η απόκριση του ιξώδους υγρού είναι η ακριβώς αντίθετη από την συμπεριφορά του ελαστικού στερεού. Κατά συνέπεια τα υγρά θεωρούνται ότι ρέουν κατά την επίδραση τάσης και πως η ενέργεια που εφαρμόζεται στο σύστημα, χάνεται. Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται ιξώδης ροή και η αντίσταση στην παραμόρφωση είναι γνωστή ως ιξώδες, Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα το ποσοστό της παραμόρφωσης είναι ευθέως ανάλογο της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης (σ). Η απόκριση ενός ιδανικού υγρού στην εφαρμοζόμενη τάση εξαρτάται από τον χρόνο (R. P. Chartoff, 2009). Εξαρτάται δηλαδή από τον ρυθμό παραμόρφωσης και όχι από την ίδια την παραμόρφωση (ShahS. a., 1994).

Το ακριβώς αντίθετο φαινόμενο παρατηρείται από την εφαρμογή τάσης ή παραμόρφωσης σε ιδανικό (Νευτώνειο) υγρό. Η σχέση μεταξύ τάσης παραμόρφωσης θα είναι και πάλι γραμμική αλλά θα παρατηρείται διαφορά . Ο λόγος του ορίου παραμόρφωσης προς το όριο ελαστικότητας είναι η εφαπτομένη της διαφοράς φάσης δ μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης και αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο της ικανότητας απόσβεσης του υλικού. Ονομάζεται δε συντελεστής απόσβεσης. Άμορφα πολυμερή παρουσιάζουν μια βασική χαλάρωση της δομής του υλικού η οποία είναι

γνωστή ως θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) σε χαρακτηριστική για κάθε υλικό θερμοκρασία. Ορίζεται συνήθως ως η θερμοκρασία που παρατηρείται το μέγιστο της απόσβεσης ($\tan\delta$) ή του ορίου παραμόρφωσης. Η μετάβαση αυτή είναι αποτέλεσμα της κίνησης της κύριας ανθρακικής αλυσίδας του πολυμερούς. Στο σημείο αυτό το πολυμερές παύει να συμπεριφέρεται ως υαλώδες και αρχίζει να συμπεριφέρεται ως ελαστικό (R. P. Chartoff, 2009).

4.5. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Στην ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanningelectronmicroscopy- SEM), η απόδοση των διασκορπισμένων ηλεκτρονίων καταγράφονται ως συνάρτηση της θέσης της πρωτεύουσας δέσμης ηλεκτρονίων. Τα αποκλειστικά όργανα SEM μπορούν να έχουν αναλύσεις έως 5 nm, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, το SEM είναι καλό μόνο για την απεικόνιση των σωματιδίων και των επιφανειών μεγέθους κάποιων μικρομέτρων. Μπορεί να προστεθεί στο SEM πρόσθετη στοιχειακή ανάλυση μέσω ανάλυσης της διασποράς ενέργειας των ακτίνων X (Energy dispersive X-raySpectroscopy – EDX or EDS) που εκπέμπεται από το δείγμα και έτσι πραγματοποιείται στοιχειακή ποιοτική και ποσοτική ανάλυση του δείγματος.



Εικόνα 18 Εικόνες από ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης

Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εικόνες από πολυπροπυλένιο (PP), πολυαιθυλένιο (PE), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), πολυαμίδιο (PA), πολυστυρένιο (PS) και χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) με τα μεγέθη που παρέχονται από τον προμηθευτή στο επάνω αριστερή γωνία κάθε εικόνας. Η μεγέθυνση των εικόνων κυμαινόταν από 297x έως 50.000x.

Πειραματικό Μέρος II

6. Πειραματικό Μέρος

6.1. Οργανολογία

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρειάστηκαν τα εξής:

1. Φτυάρι
2. Σπάτουλα-μυστρί
3. Πινέλα
4. Σφουγγάρι
5. Σκεύη μεταφοράς αδρανών
6. Πιπέτα
7. Φιάλη νερού
8. Φούρνος ξήρανσης
9. Ζυγός ακριβείας
10. Μήτρες σκυροδετησης (πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40*10*10cm, και κυβικές 15*15*15 cm)
11. Αναμικτήρας (μπετονιέρα τύπου pan)
12. Μεταλλική βέργα συμπακνώσεως
13. Κώνος
14. Δοχείο αεροπεριεκτικότητας
15. Τράπεζα δόνησης
16. Λουτρό ωρίμανσης (μπανιέρα)

6.2. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία διακρίνεται σε τέσσερα στάδια τα οποία είναι τα εξής:

- Ζύγιση ποσοτήτων
- Μίξη και χύτευση σε καλούπια
- Ξεκαλούπωμα και ωρίμανση στη μπανιέρα
- Δοκιμές κάμψης και θλίψης

Την πρώτη μέρα γίνεται η ζύγιση όλων των ποσοτήτων των αδρανών και του τσιμέντου που προορίζονται για μίξη. Τοποθετήθηκε το σκεύος μεταφοράς αδρανών στον ζυγό ακριβείας, παίρνοντας το απόβάρό του και έτσι ζυγίστηκε σκύρα, γαρμπίλι και άμμος σε μεγαλύτερες ποσότητες από ότι απαιτεί η μίξη. Έπειτα τα σκεύη με τα

αδρανή εισέρχονται στον φούρνο προκειμένου να ξηραθούν στους 120°C για 24 ή και περισσότερες ώρες. Ο λόγος που επιλέξαμε να ζυγίσουμε περισσότερες ποσότητες από ότι χρειαζόμαστε είναι τα αδρανή συγκρατούν υγρασία οπότε επιπλέον βάρος το οποίο μετά την ξήρανση φεύγει και μένει το κανονικό βάρος των αδρανών.



Εικόνα 19 Φούρνος αδρανών

Την δεύτερη μέρα βγάζουμε τα αδρανή από τον φούρνο τα αφήνουμε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι να κρυώσουν και έπειτα ζυγίζονται οι απαραίτητες ποσότητες για την μίξη. Επιπλέον με μία πιπέτα ζυγίζεται σε ένα δοχείο η ποσότητα του ρευστοποιητή. Επίσης ζυγίζεται και η ποσότητα του νερού και αποτίθεται σε μία πλαστική φιάλη.



Εικόνα 20 Αδρανή για ζύγισμα

Πιο συγκεκριμένα οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για μίξη συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 4

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά και ποιότητες για την παρασκευή σκυροδέματος.

Υλικά	Εμπορική Ονομασία	Ποσότητα
Χαλίκι		16.7 kg
Γαρμπίλι		8.1 kg
Άμμος		21.8 kg
Νερό		4.6 kg
Τσιμέντο	CEM II κατηγορίας C30/37	9.9 kg
Ρευστοποιητής	Viscocrete Ultra 600	45g
Ίνες Πολυπροπυλενίου	Fiber PP	54g
Ίνες Χαλυβα	Fiber Steel	500g

Εφόσον ζυγίστηκαν όλες οι απαραίτητες ποσότητες το επόμενο βήμα είναι να καθαρίσουμε τις μήτρες από τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να έχουν και στη συνέχεια με ένα πινέλο τις λαδώνουμε ώστε το σκυρόδεμα που πρόκειται να χυτευθεί να

μπορέσει όταν σκληρύνει την επόμενη μέρα να ξεκαλουπωθεί εύκολα δίχως να σπάσει. Τα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν είναι πρισματικά και κυβικά.



Εικόνα 21 Καλούπια

Στη συνέχεια με ένα σφουγγάρι διαβρέχουμε τα τοιχώματα του αναμικτήρα με νερό ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στη μίξη, και έπειτα ετοιμάζουμε τα αδρανή και το τσιμέντο ώστε να προχωρήσουμε στο στάδιο της μίξης.

Η διαδικασία της μίξης έχει ως εξής αρχικά προσθέτουμε στον αναμικτήρα τα αδρανή με την ακόλουθη σειρά: Χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος και αναμιγνύουμε με τον αναμικτήρα για λίγα δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια προσθέτουμε το 1/3 της ποσότητας του νερού που έχουμε χωρίσει και αναδεύουμε πάλι για λίγα δευτερόλεπτα. Μετά παίρνοντας το μυστρί και την σπάτουλα ξύνουμε τα τοιχώματα του αναμικτήρα καθώς και τα πτερύγιά του για να βοηθηθεί η ανάμιξη των αδρανών. Επόμενο βήμα είναι να προσθέσουμε το τσιμέντο και το υπόλοιπο 1/3 του νερού και αναδεύουμε για λίγα δευτερόλεπτα πάλι με τον αναμικτήρα Ξύνουμε τα τοιχώματα και τα πτερύγια του αναμικτήρα ξανά. Μετά πραγματοποιούμε τις δοκιμές κώνου και της αεροδιαπερατότητας στο νωπό σκυρόδεμα. Η δοκιμή κάθισης έχει ως εξής: Ο κώνος

κάθισης τοποθετείται σε επίπεδη άκαμπτη επίπεδη, οριζόντια και μη απορροφητική επιφάνεια (Singh, 2015).



Εικόνα 22 Αναμικτήρας

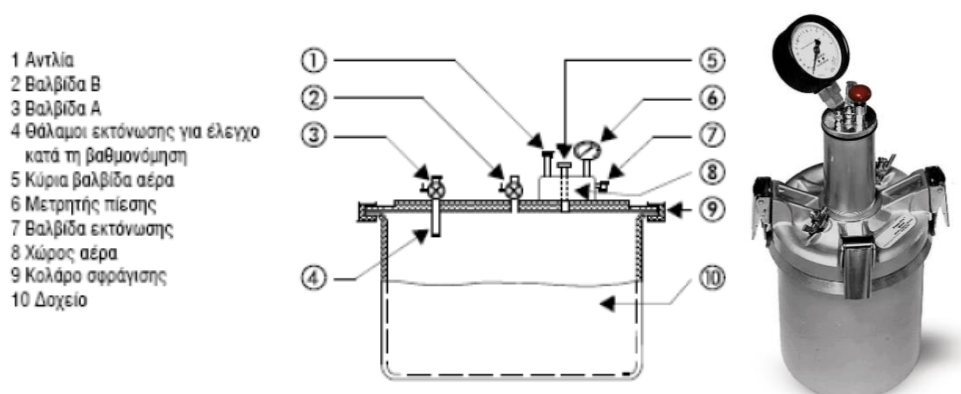
Στη συνέχεια ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους με σκυρόδεμα. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 28 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως που κατανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα κτυπήματα ξεκινούν από την περίμετρο της μήτρας φτάνοντας ως το κέντρο. Κατά τη συμπύκνωση της κατώτερης πρώτης στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση και στην αμέσως από κάτω της. Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης.

Ύστερα από τη συμπύκνωση της τρίτης στρώσης, αφαιρείται το σκυρόδεμα που πλεονάζει και επιπεδώνεται η άνω επιφάνειά του με το μυστρί. Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά από τις πλευρικές χειρολαβές. Η ανασύρση πρέπει να γίνεται ομαλά με σταθερή ταχύτητα και η κίνηση να είναι ανοδική κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα και να ολοκληρώνεται μέσα σε λίγο χρόνο. Ολόκληρη η διαδικασία της δοκιμής από την

έναρξη του γεμίσματος μέχρι την αφαίρεση του κώνου πρέπει να ολοκληρώνεται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα ώστε να αποφευχθεί η πήξη του σκυροδέματος (Soufeiani, 2016).

Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος από το ελευθερούμενο μεταλλικό περίβλημα που κάθισε μετριέται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο έλεγχος αεροπεριεκτικότητας :



Εικόνα 23 Μέρη συσκευής περιεκτικότητας αέρα αριστερά συσκευή περιεκτικότητας αέρα δεξιά

Το δοχείο γεμίζεται με σκυρόδεμα μέχρι τη μέση και χτυπάται 28 φορές με την μεταλλική ράβδο, στη συνέχεια γεμίζεται και το άλλο μισό και χτυπάται άλλες 28 φορές με την μεταλλική ράβδο. Στη συνέχεια κλείνει το δοχείο με το καπάκι και ανοίγονται οι βαλβίδες A και B και παράλληλα διαβεβαιωνόμαστε ότι είναι κλειστές οι κύρια βαλβίδα του αέρα και η βαλβίδα εκτόνωσης. Μετά γεμίζουμε με νερό την βαλβίδα A έως ότου εξέλθει από την βαλβίδα B και σταματάμε να γεμίζουμε. Έπειτα πιέζουμε την αντλία μέχρι η ένδειξη να μηδενιστεί και να σταθεροποιηθεί. Μετά κλείνουμε τις βαλβίδες A και B και ανοίγουμε την κύρια βαλβίδα του αέρα και χτυπάμε με ένα σφυρί το αυτόκλειστο δοχείο ώστε να φύγει ο αέρας, και παρατηρούμε το % ποσοστό αέρα που αναγράφεται στην ένδειξη του μετρητή πίεσης. Μετά από τους ελέγχους κάθισης και αεροπεριεκτικότητας επόμενο βήμα είναι η χύτευση του σκυροδέματος στα καλούπια και η λειτουργία της τράπεζας δόνησης ώστε να βεβαιωθούμε ότι έχουν γεμίσει μέχρι επάνω τα καλούπια με σκυρόδεμα.

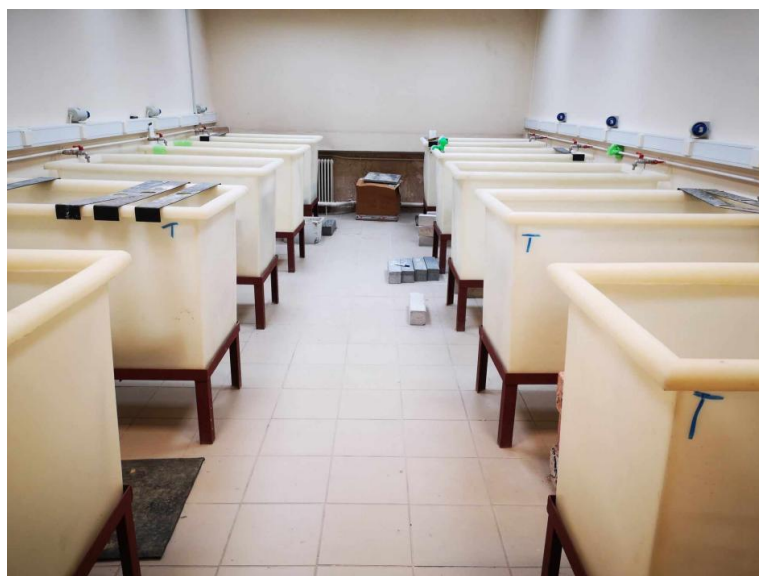
Μετά την χύτευση του σκυροδέματος στα καλούπια, αφήνεται να σκληρύνει το μέγιστο 36 ώρες και την επόμενη μέρα, εφόσον σκληρύνει ξεκαλουπώνουμε το

σκυρόδεμα από τα καλούπια με την βοήθεια μιας πένσας την οποία χρησιμοποιούμε για να ανοίξουμε τις μήτρες (T. Hatakeyama, Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science, John Wiley & Sons, 1995).



Εικόνα 24 καλούπια μετά την χύτευση

Στη συνέχεια μεταφέρουμε τα σκυροδέματα κυβικά και πρισματικά σε μπανιέρα με νερό τα οποία μένουν εκεί για 28 ημέρες ώστε να αποκτήσουν την μέγιστη αντοχή τους. Μετά το πέρας των 28 ημερών βγάζουμε τα δοκίμια από την μπανιέρα και είναι έτοιμα να υποβληθούν στους καταστροφικούς ελέγχους της κάμψης και της θλίψης.



Εικόνα 25 Δωμάτιο με μπανιέρες ωρίμανσης δοκιμών



Εικόνα 26 Μπανιερά για ωρίμανσης δοκιμών

7. Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση

Ως πειραματικά αποτελέσματα λαμβάνουμε τα διαγράμματα από την κάμψη τεσσάρων σημείων των πρισματικών δοκιμών, τα μέγιστα θλιπτικά φορτία των κυβικών δοκιμών καθώς και τις μετρήσεις εργασιμότητας του ελέγχου κάθισης και της δοκιμής περιεκτικότητας του αέρα. Για καταχρηστικούς κυρίως λόγους ο Πίνακας αναφέρει τις ονομασίες των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5 Δοκίμια προς μέτρηση αντοχών τους και ονομασίες τους

Όνομα Δείγματος	Δοκίμιο
Control C	Σκυρόδεμα πρισματικό χωρίς ίνες
CP12	Σκυρόδεμα πρισματικό με ίνες 12mm
CP19	Σκυρόδεμα πρισματικό με ίνες 19mm
CC12	Σκυρόδεμα κυβικό με ίνες 12mm
CC19	Σκυρόδεμα κυβικό με ίνες 19mm

CP12 ST	Σκυρόδεμα πρισματικό με ίνες 12mm και ινες χάλυβα
CP19 ST	Σκυρόδεμα πρισματικό με ίνες 19mm και ινες χάλυβα
CC12 ST	Σκυρόδεμα κυβικό με ίνες 12mm και ινες χάλυβα
CC19 ST	Σκυρόδεμα κυβικό με ίνες 19mm και ινες χάλυβα

7.1. Οπτική παρατήρηση δειγμάτων

Παρατηρείται ότι τα παρακάτω δοκίμια μετα την θραύση έχουν συμμετρία ως προς την ρηγμάτωση τους που υποδηλώνει ότι οι ινες παρέχουν συγκράτηση θραυσμάτων. Όπως παρατηρούμε οπτικά υπάρχει αύξηση του πορώδους εντός των δειγμάτων, αυτό θα φανεί καλύτερα με την χρήση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Ακόμη, μπορούμε να διακρίνουμε την τυχαία και ομοιόμορφη κατανομή των ινών μέσω της οποίας θα επιτευχθεί αύξηση της συγκράτησης ρωγμών σε περίπτωση θραύσης αλλά και της αντοχής των δειγμάτων σε υποβολή φορτίου.



Εικόνα 27 Δοκίμια μετα την θραύση



Εικόνα 28 Δοκίμια μετά την θραύση



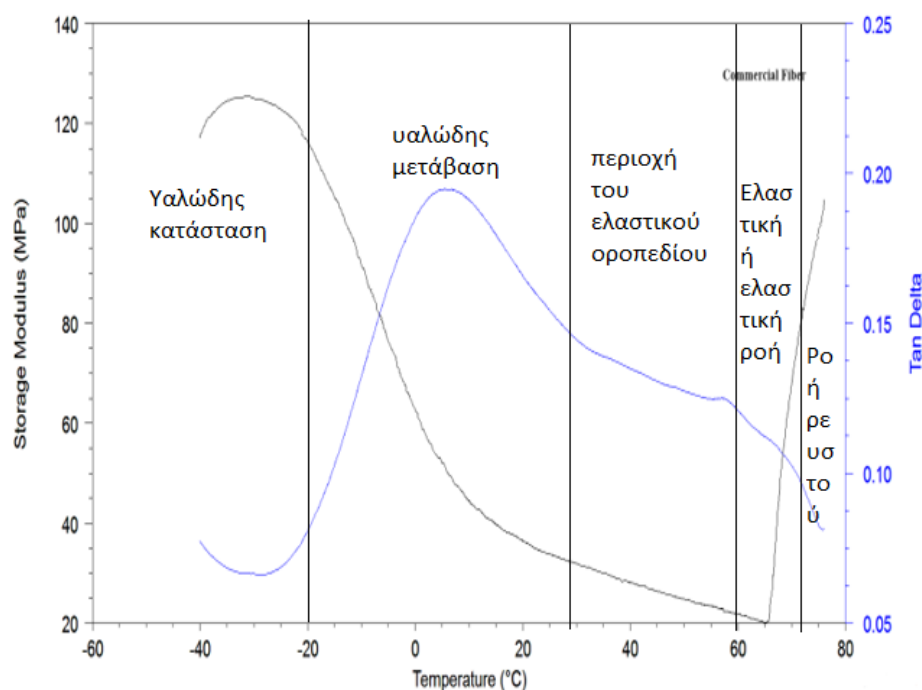
Εικόνα 29 Δοκίμια μετά την θραύση

7.2. Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (DMA)

Αρχικά το συγκεκριμένο διάγραμμα μας παρέχει πληροφορίες για το ποσό της ελαστικής συμπεριφοράς, δηλαδή ανάλογα με το πόσο ενέργεια έχει αποθηκευτεί κατά την δυναμική μηχανική καταπόνηση η κάθε μεμβράνη βρίσκουμε εάν έχει μεγάλη ελαστική περιοχή ή όχι. Η ενέργεια – δύναμη που θα αποθηκευτεί (storage modulus) δηλώνει και πόσο μπορεί να αντέξει ή να επιμηκυνθεί η κάθε μεμβράνη. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το ποσό στον άξονα ψ τόσο καλύτερη ελαστική απόκριση θα έχει (T. Hatakeyama, ThermalAnalysis, JohnWiley&Sons, dma, 1994). Για το πειραματικό μέρος και την προετοιμασία των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε clamp για

μεμβράνη και χρησιμοποιήθηκε χαρτί με συγκεκριμένες διαστάσεις στην οπή ώστε να σταθεροποιηθεί η ινα.

"



Εικόνα 30 Διάγραμμα Δυναμικής Μηχανικής Ανάλυσης (DMA), μέτρου αποθήκευσης και εφαπτομένης $\tan \delta$ συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις εμπορικές ινες πολυπροπυλενίου

Η αριστερή περιοχή στο παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχεί στην υαλώδη κατάσταση και κυμαίνεται από -40°C έως -20°C , έπειτα ακολουθεί η υαλώδης μετάβαση από -20°C έως τους 28°C . Ακολούθως παρατηρείται μια πτώση του μέτρου αποθήκευσης ενέργειας στο παραπάνω διάγραμμα και αυτό οφείλεται διότι το υλικό στην προκυμμένη περίπτωση η πολυμερική ινα ξεκινάει να εμπίπτει στην περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς μετά τους 30°C (T. Hatakeyama, Thermal Analysis, John Wiley & Sons, dma, 1994). Η υαλώδης μετάβαση χρησιμεύει ως ένα σημαντικό σημείο αναφοράς ή αντίστοιχη κατάσταση για την ιξωδοελαστική απόκριση. Επειδή η υαλώδης μετάβαση αντιστοιχεί στη φυσική μεταβολή από υαλώδη σε ελαστική συμπεριφορά, αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία ως η «μετάβαση από γυαλί σε καουτσούκ».

Η συγκεκριμένη φυσική κατάσταση που παρουσιάζει το πολυμερές κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής DMA εξαρτάται από το λόγο της χρονικής κλίμακας της μέτρησης προς την ταχύτητα της μοριακής κίνησης. Γενικά, η τιμή μέτρησης μειώνεται είτε με μείωση της συχνότητας είτε με αύξηση της θερμοκρασίας. Υπάρχει μια ισχυρή

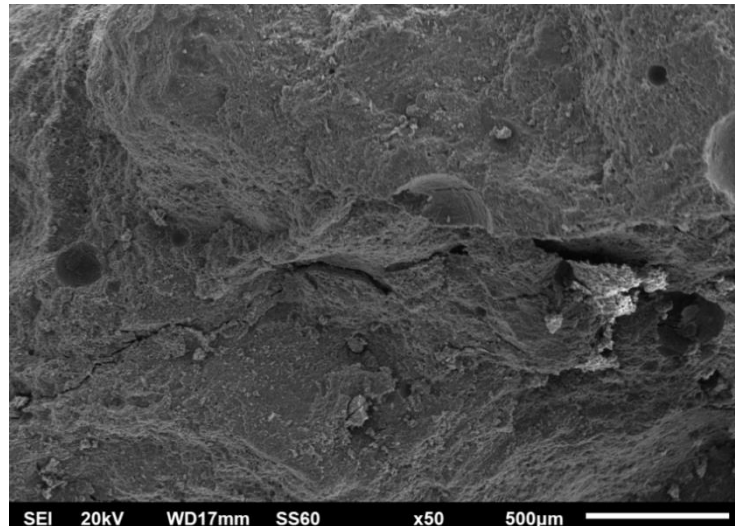
σχέση μεταξύ χρόνου και θερμοκρασίας. Οι τιμές του μέτρου που αναφέρθηκαν παραπάνω για κάθε ένα από τα είναι πλήρως χαρακτηριστικές για κάθε φυσική κατάσταση (Talaat, 2021).

Προσδιορισμός της υαλώδους μετάβασης και του τρόπου με τον οποίο διάφορες τροποποιήσεις του συστήματος επηρεάζουν την T_g είναι μια σημαντική εφαρμογή της DMA. Η υαλώδης μετάβαση γενικά αναγνωρίζεται εύκολα από δυναμικά μηχανικά δεδομένα λόγω της απότομης μείωσης του μέτρου αποθήκευσης E' (ή του μέτρου αποθήκευσης διάτμησης G') και της αντίστοιχης διασποράς απωλειών στο E'' (διατμητική απώλεια G'') ή $\tan \delta$ που εμφανίζεται στην T_g , όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα. Είναι προφανές ότι υπάρχει περιθώριο στον τρόπο με τον οποίο επιλέγεται η τιμή της T_g από ένα σύνολο δεδομένων DMA. Τις περισσότερες φορές το κριτήριο επιλογής της T_g από δεδομένα DMA είναι είτε η κορυφή του μέτρου απώλειας E'' είτε η κορυφή του $\tan \delta$. (W. Haase, Relaxation Phenomena, Springer,, 2003).

Ενώ η κορυφή $\tan \delta$ αναφέρεται συχνά ως T_g γενικά το μέγιστο μέτρο απώλειας είναι η καταλληλότερη τιμή. Είναι ένα λογικό κριτήριο από πρακτική ή μηχανική άποψη, επειδή η ανώτερη θερμοκρασία χρήσης πολλών άμορφων πολυμερών είναι το σημείο «αποσκλήρυνσης». Το σημείο έναρξης δηλαδή σχετίζεται με την έναρξη των τμηματικών μοριακών κινήσεων και της χαλάρωσης της δομής του πολυμερούς που συνδέεται με την T_g το μέσο σημείο μετάβασης ή το σημείο διόγκωσης (κορυφή $\tan \delta$). Στην περιοχή αυτή παρατηρείται σημαντική μοριακή χαλάρωση που περιλαμβάνει αυξημένες συνεργατικές τμηματικές κινήσεις των πολυμερικών αλυσίδων

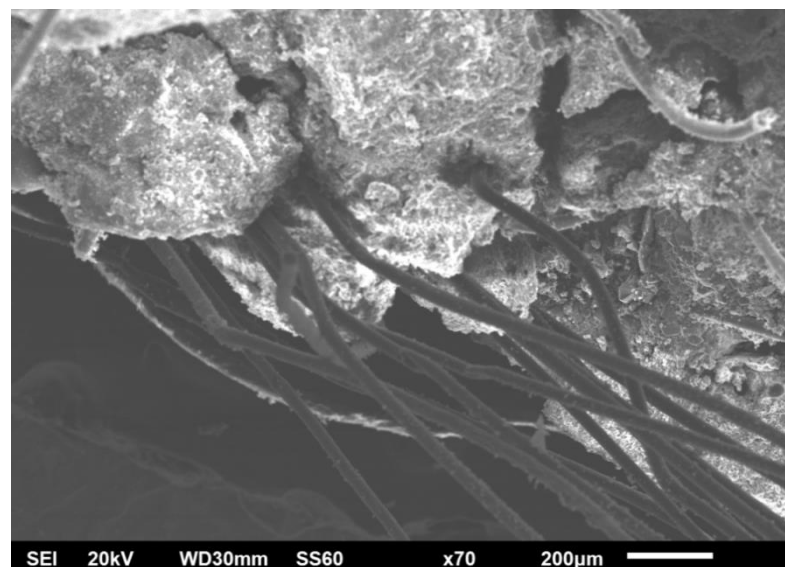
7.3. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Παρακάτω θα παρατηρήσουμε τις εικόνες που ελήφθησαν με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και έτσι θα πιστοποιηθεί η μικροδομή των δειγμάτων σκυροδέματος αλλά και η παρουσία ινών εντός αυτού.



Εικόνα 31 Εικόνα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης για δείγμα δοκιμίου από άοπλο δοκίμιο

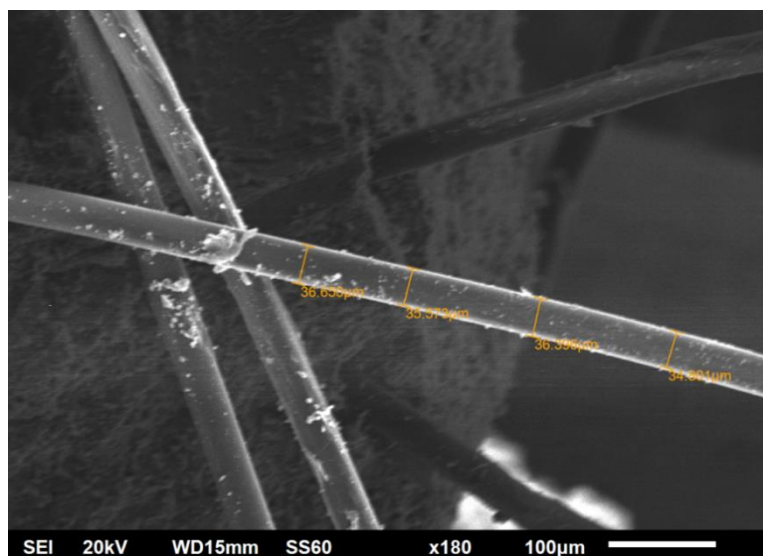
Στην εικόνα 29 παρατηρούμε το άοπλο δοκίμιο δίνοντας έμφαση στο πορώδες του σκυροδέματος και στα θραύσματα που έχουν δημιουργηθεί γιατί δεν υπάρχει κάποιο μέσο συγκράτησης. Επίσης παρατηρούνται ρηγματώσεις που δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα της καταπόνησης που δέχονται τα δείγματα από τις τάσεις που δημιουργούνται .



Εικόνα 32 Εικόνα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης για δείγμα δοκιμίου με ινες πολυπροπυλενίου

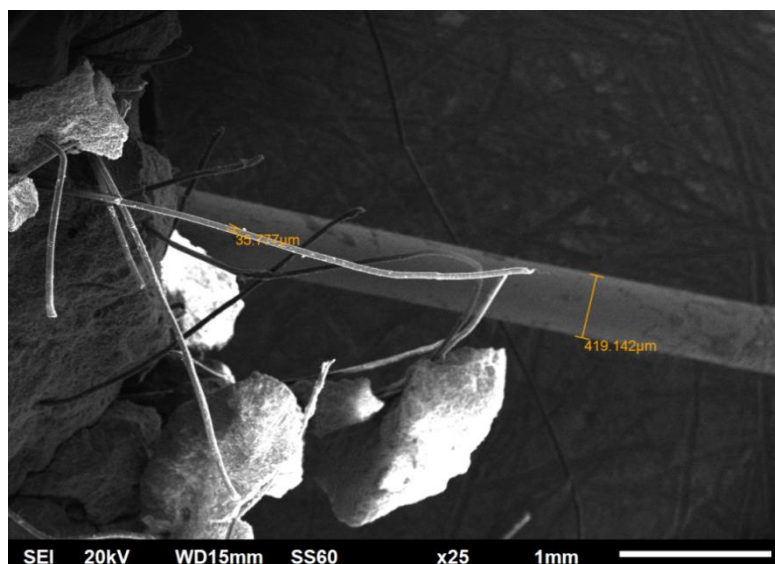
Στην Εικόνα 30 βλέπουμε ινες πολυπροπυλενίου που βρίσκονται μόνο εντός των θραυσμάτων που σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των ινών και της μήτρας σκυροδέματος, είναι εφικτό να βελτιστοποιηθούν τα σχέδια μίγματος για βελτιωμένη απόδοση υπό διαφορετικές συνθήκες καταπόνησης. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία

επιβεβαιώνει ότι υπάρχει συγκράτηση τμημάτων πολλαπλής κλίμακας λόγω ινών πολυπροπυλενίου διαφορετικού μήκους και διαμέτρου



Εικόνα 33 Εικόνα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης για δείγμα δοκιμίου με ίνες πολυπροπυλενίου

Παρατηρείται ότι οι ίνες εντός του σκυροδέματος βρίσκονται σε τυχαία διασπορά πράγμα που πιστοποιεί την συγκράτηση θραυσμάτων σε πολλαπλές κλίμακες ώστε το υλικό που παρασκευάστηκε να μπορεί να θεωρηθεί σύνθετο.



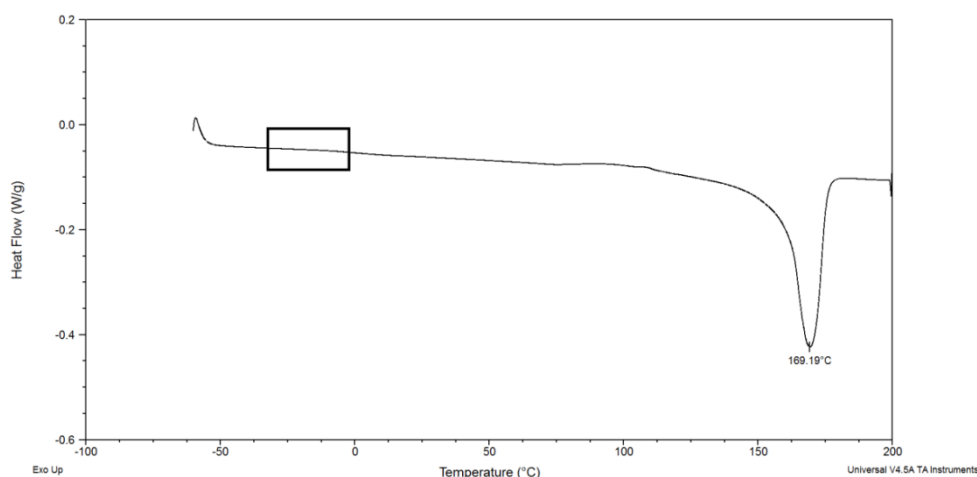
Εικόνα 34 Εικόνα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης για δείγμα δοκιμίου με ίνες χάλυβα και ίνες πολυπροπυλενίου

Στην Εικόνα 32 βλέπουμε το μέγεθος της ίνας που είναι 35.777μm σε σύγκριση με το μέγεθος της ίνας χάλυβα που είναι 419.142 μm και βλέπουμε ότι λογο μεγέθους συγκρατούν οι ίνες πολυπροπυλενίου θραύσματα σε σύγκριση με τις ίνες χάλυβα.

7.4. Διαφορική θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)

Στην Εικ. 33 απεικονίζεται η θερμική σάρωση για το δοκίμιο που μελετήθηκε. Παρατηρείται μια έντονη εξώθερμη κορυφή στους 169,9°C που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία κρυστάλλωσης T_c του πολυμερούς. Επιπλέον, στους 110°C περίπου, φαίνεται μια δεύτερη, πολύ μικρότερης έντασης, εξώθερμη κορυφή. Τg έχουμε περίπου στους -22°C.

Βάση βιβλιογραφίας συμπίπτουν οι τιμές με το καθαρό πολυπροπυλένιο αρα δεν αναμένονται προσμίξεις στις πολυμερικές ινες πολυπροπυλενίου οπότε θεωρείται ότι θα έχει τις ιδιότητες του καθαρού πολυπροπυλενίου.



Εικόνα 35 Διάγραμμα διαφορικής θερμιδομετρίας Σάρωσης

7.5. Θλίψη

Η δοκιμή της μονοαξονικής εφελκυστικής τάσης απαιτεί συχνά μικρή ενέργεια για την δημιουργία και την ανάπτυξη ρωγμών στο σκυρόδεμα. Η γρήγορη εξέλιξη και η συνένωση των ρωγμών στο σκυρόδεμα τόσο των προ υπαρχόντων της διεπιφανειακής ζώνης όσο και των νέων ρωγμών που σχηματίζονται στο σκυρόδεμα ευθύνονται για την ψαθυρή θραύση. Στη θλίψη ο τρόπος θραύσης λιγότερο ψαθυρός εξαιτίας της πολύ περισσότερης ενέργειας που απαιτείται για να σχηματιστούν και να επεκταθούν οι ρωγμές στο σκυρόδεμα. Κατά τη διαδικασία της μονοαξονικής θλίψης του μέσης ή χαμηλής αντοχής σκυροδέματος δεν δημιουργούνται ρωγμές μέχρι ένα ποσοστό φορτίου που φτάνει στο 50% της τάσης αστοχίας. Όμως σε υψηλότερες τάσεις

αρχίζουν να εμφανίζονται ρωγμές στο σκυρόδεμα. Ο αριθμός και το μέγεθος των ρωγμών αυξάνει με την αύξηση του επιπέδου της επιβαλλόμενης τάσης.

Οι δοκιμές θλίψης επιβεβαίωσαν ότι τα δείγματα σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου δεν έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με τα δείγματα σκυροδέματος ελέγχου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Τα ευρήματα από τις δοκιμές θλίψης υποδεικνύουν τη δυνατότητα χρήσης ενός συνδυασμού ινών πολυπροπυλενίου και χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα, καθώς οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε θλίψη, γεγονός που υποδεικνύει ότι όχι μόνο παρέχεται ενίσχυση αλλά και βελτιώνεται η συνολική απόδοση του σκυροδέματος. Επίσης, μπορεί να συναχθεί από τα παραπάνω ότι η συνέργεια μεταξύ ινών πολυπροπυλενίου και χαλύβδινων ινών στη μήτρα του σκυροδέματος είναι υπεύθυνη για την αυξημένη απόδοση. Συνεπώς, μπορεί να συμπεραθεί ότι, ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου από μόνες τους δεν συμβάλλουν σημαντικά στην αντοχή σε θλίψη, ο ρόλος τους σε ένα υβριδικό σύστημα ινών μπορεί να αφορά περισσότερο τη βελτίωση άλλων μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η ολκιμότητα και η αντοχή σε ρηγμάτωση.

Πίνακας 6. Τιμές αντοχής των δειγμάτων σε θλίψη.

Δείγμα	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Μέγιστη Δύναμη (MPa)
Control	783.5	35.6
Fiber PP	822.3	40.2
Fiber ST	951.2	46.7
Fiber PP-ST	1056.6	46.9

Παρατηρήθηκε ότι σε κυβικά δείγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος η θλιπτική αντοχή αυξάνεται με μείωση του μήκους των ινών, αυτό παρατηρείται στον Πίνακα 6 όπου το δείγμα CC12 εμφάνισε μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με το δείγμα CC19.

Οι ίνες πολυπροπυλενίου επειδή έχουν σταθερές χημικές ιδιότητες δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις ενυδάτωσης των δοκιμών (Zhang, 2023). Όμως ο μηχανισμός ενίσχυσης με ίνες είναι φυσική επίδραση της αγκύρωσης των ινών στη μήτρα του σκυροδέματος επομένως όταν προστίθενται οι ίνες πολυπροπυλενίου το σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου όσο σκληραίνει αναπτύσσει ισχυρές δυνάμεις τριβής μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώνεται η αντοχή των δοκιμών με ίνες.

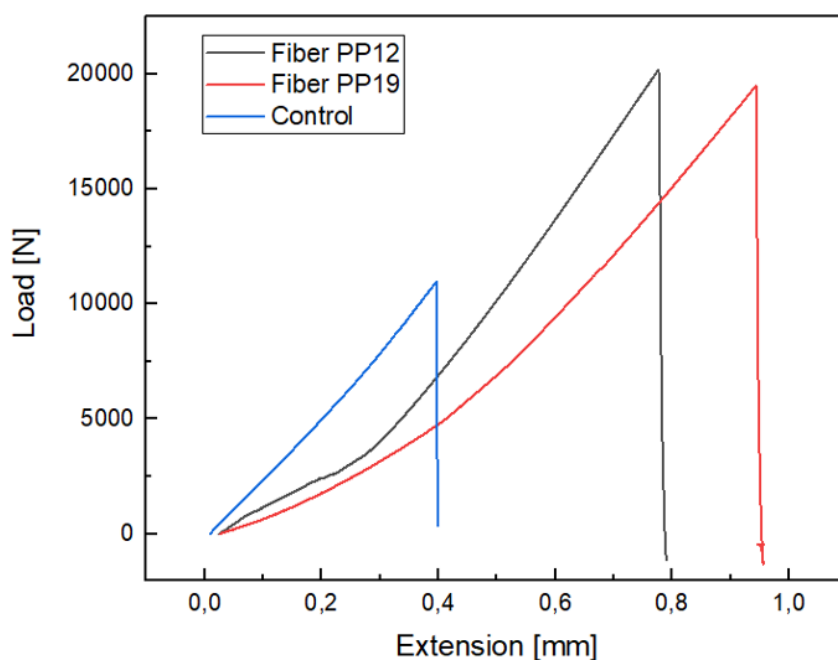
Κατά τη διάρκεια της αστοχίας εξαιτίας της φόρτισης οι ίνες πολυπροπυλενίου μπορούν και βελτιώνουν την εφελκυστική και διατμητική αντοχή του άκρου της ρωγμής ώστε να ανακουφίσουν το σκυρόδεμα από την τελική συγκέντρωση τάσεων. Ταυτόχρονα όμως μέρος της δύναμης αγκύρωσης δεν επαρκεί να αντισταθεί στην τελική συγκέντρωση τάσεων και οι ίνες έτσι ολισθαίνουν με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μικρορωγμές. Καθώς συνεχιζόταν η φόρτιση ο αριθμός των μικρορωγμών επεκτάθηκε σταδιακά και το δοκίμιο αστόχησε αργά.

Όταν τα δοκίμια χωρίς ίνες πολυπροπυλενίου υπέστησαν βλάβη υπό φόρτιση οι ρωγμές επεκτάθηκαν σταδιακά κατά μήκος της κύριας ρωγμής και επήλθε η τελική αστοχία. Με την προσθήκη όμως ινών πολυπροπυλενίου ίνα και μήτρα συνδέονται χάρη μεταξύ τους χάρη στο φαινόμενο της αγκύρωσης. Στη θλιπτική μονοαξονική δοκιμή το φαινόμενο της αγκύρωσης συνδέει πολύ καλά μεταξύ τους τα διάφορα μέρη της μήτρας του σκυροδέματος μεταφέροντας με αυτό τον τρόπο τη δύναμη που ασκείται μεταξύ της ίνας πολυπροπυλενίου και έτσι ανακουφίζεται το σκυρόδεμα από συγκέντρωση τάσεων στο άκρο αυξάνοντας την μέγιστη αντοχή του. Επιπρόσθετα εξαιτίας της τυχαίας κατανομής των ινών πολυπροπυλενίου σχηματίζεται μία πολύπλοκη δομή δικτύου και οι επιδράσεις της αγκύρωσης και γεφύρωσης μεγάλου αριθμού ινών πολυπροπυλενίου θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν ένα μεγάλο μέρος της δύναμης φόρτισης. Μία άλλη πιθανή εξήγηση της μείωσης της θλιπτικής αντοχής είναι ότι τα υψηλά ποσοστά ινών μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου και αυτό με τη σειρά του το καθιστά ευάλωτο στο σχηματισμό ρωγμών. (deViso, 2008).

7.6. Κάμψη τεσσάρων σημείων

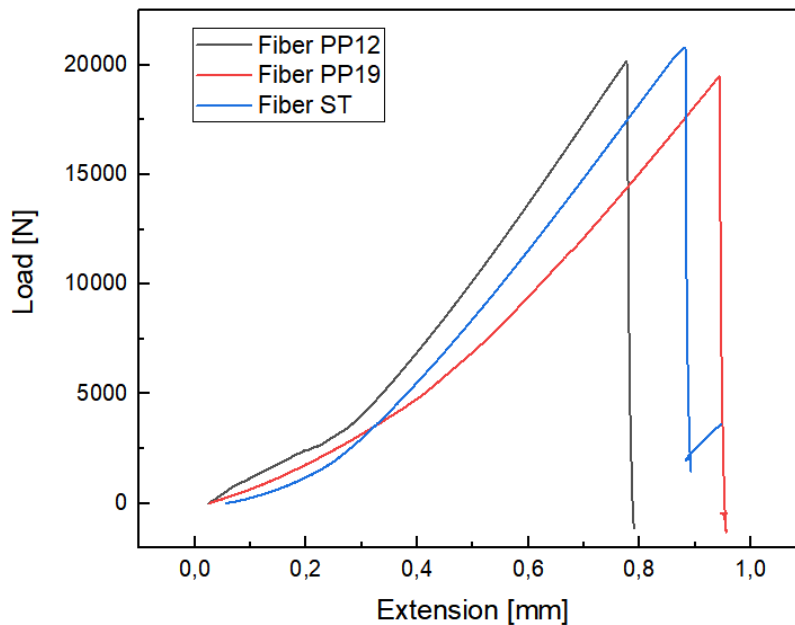
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπαρασταθούν γραφικά τα διαγράμματα από τα πειραματικά αποτελέσματα της κάμψης τεσσάρων σημείων. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε στο διάγραμμα 34 την σύγκριση δειγμάτων σκυροδέματος με την εισαγωγή διαφορετικών μηκών ινών ιδίου τύπου. Με κόκκινο χρώμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα δείγματα που περιείχαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 19mm παρουσιάσουν μικρότερη αντοχή σε τάση σε σχέση με τα δείγματα σκυροδέματος που περιείχαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 12mm όπως φαίνεται στο διάγραμμα με το μαύρο χρώμα. Βέβαια δεν θα μπορούσαμε να μην τονίσουμε ότι η επιμήκυνση των ινών πολυπροπυλενίου 19mm υπερτερούν σε σχέση με τα δείγματα σκυροδέματος που

εισαγάγαμε ινες πολυπροπυλενίου 12mm και αυτό είναι λογικο επακόλουθο του μήκους των ινων και της αύξησης της ελαστικότητας αυτών. Η διαφορά μεταξύ των ινων από άποψη αντοχής μπορεί να θεωρηθεί αμεληταία και αυτός είναι ο λογος που στα μετέπειτα περάματα θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι ινες πολυπροπυλενίου μήκους 19mm διότι παρατηρούμε μια μικρή αύξηση στην αντοχή σε κάμψη. Τέλος στο διάγραμμα παρατηρήσουμε και το δείγμα αοπλου σκυροδέματος που όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η διαφορά σε σχέση με το ινοπλισμένο είναι αρκετά μεγάλη, σχεδόν διπλάσια αντοχή και επιμήκυνση των δειγμάτων.



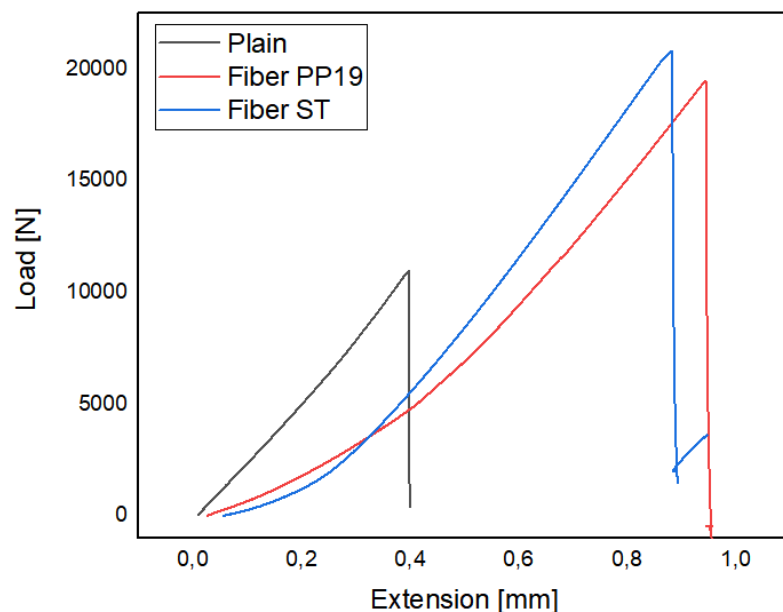
Εικόνα 36 Διάγραμμα κάμψης 4 σημείων fiberpp12 fiberpp19 control

Στο διάγραμμα 37 παρατηρείται η σύγκριση των δειγμάτων σκυροδέματος που περιέχουν ινες χάλυβα, και των ινοπλισμένων δοκιμίων με ινες πολυπροπυλενίου 12mm και 19mm. Όπως παρατηρούμε τα ινοπλισμένα δοκίμια με πολυμερικές ινες προσομοιάζουν αρκετά καλά το ινοπλισμένο δείγμα σκυροδέματος με ινες χάλυβα, η αντοχή μεταξύ των δειγμάτων είναι αμεληταία και η επιμήκυνση επίσης. Αυτό μας φθάνει στο συμπέρασμα ότι οι πολυμερικές ινες μπορούν να αντικαταστήσουν τις ινες χάλυβα και να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα της χρήσης χάλυβα.



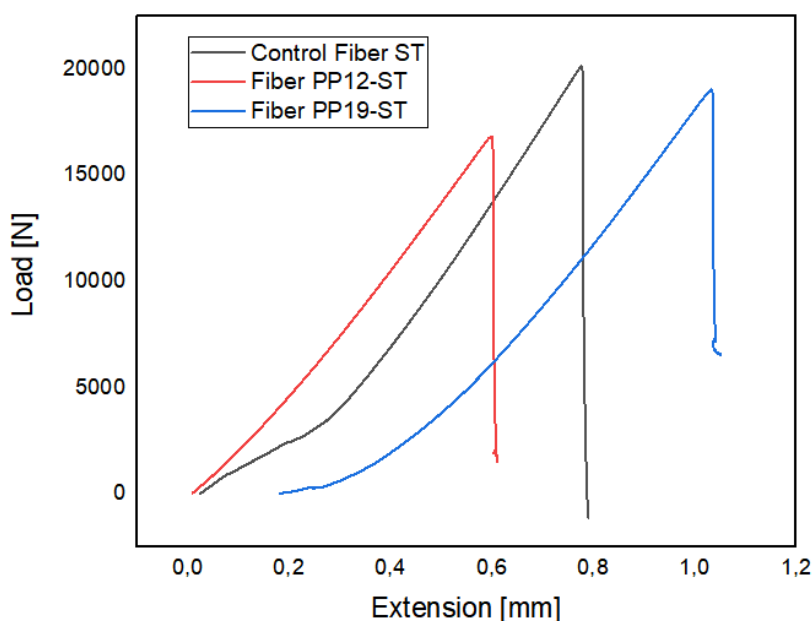
Εικόνα 37 Κάμψη 4 σημείων fiberpp12 fiberpp19 fiberst

Σε δεύτερο στάδιο έγινε προσπάθεια σύγκρισης των ινοπλισμένων δοκιμίων με ινες πολυπροπυλενίου, των δοκιμίων με ινες χάλυβα και του άοπλου δοκιμίου, σε αυτό το στάδιο παρατηρούμε ότι τα ινοπλισμένα δείγματα υπερτερούν πολύ σε σχέση με ένα άοπλο δοκίμιο σκυροδέματος. Βέβαια περα από την αύξηση της αντοχής πρέπει να αντισταθμιστούν και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα όπως η συγκράτηση θραυσμάτων. Οι ινες χάλυβα ενώ μπορούν να συγκρατήσουν μεγάλα θραύσματα δεν έχουν την ίδια ικανότητα σε μικρότερα θραύσματα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της κατασκευής. Πέρα από αυτό το βασικό μειονέκτημα οι ινες χάλυβα διατρέχουν κίνδυνο σε κατασκευές κοντά σε υδάτινο περιβάλλον λόγω της οξείδωσης του χάλυβα και μετέπειτα της υποβάθμισης της κατασκευής λόγω εσωτερικής φθοράς του υλικού. Τέλος οι πολυμερικές ινες πολυπροπυλενίου μπορούν να αυξήσουν την βιωσιμότητα του περιβάλλοντος λόγω του ότι μπορεί να προέρχονται από ανακυκλωμένα πολυμερή και έτσι να έχουν μειωμένο κόστος σε σχέση με τις ινες χάλυβα.



Εικόνα 38 Διάγραμμα 4 σημείων plainfiberpp19 fiberst

Εφόσον οι χαλύβδινες ινες μπορούν να συγκρατήσουν μεγάλα θραύσματα και οι ινες πολυπροπυλενίου αρκετά μικρότερα μεγέθη θραυσμάτων έγινε προσπάθεια πιθανού συνδυασμού αυτών των ινων ώστε να διαπιστωθεί η μεταξύ τους πρόσφυση και η συνεργατική συγκράτηση θραυσμάτων αλλά και η διατήρηση της αντοχής και της επιμήκυνσης. Στο διάγραμμα 39 παρατηρούμε ότι σε σχέση με το δείγμα σκυροδέματος με ινες χάλυβα (μαύρο χρώμα) οι πιθανοί συνδυασμοί των ινων χάλυβα και των ινων πολυπροπυλενίου υποβάθμισαν την αντοχή των δοκιμίων.



Εικόνα39 Κάμψη 4 σημείων control fiber st fiber pp12-st fiber pp19-st

Οι ρωγμές σχηματίζονται αρχικά στη διεπιφανειακή ζώνη όταν εφαρμόζεται φορτίο εφελκυσμού στο σκυρόδεμα. Με τη σταδιακή αύξηση του εφελκυστικού φορτίου οι μικρορωγμές διαδίδονται. Αυτές οι μικρορωγμές ενώ διαδίδονται συνδέονται για να σχηματίσουν μεγαλύτερες ρωγμές τελικά επέρχεται η θραύση του σκυροδέματος. Οι μικρορωγμές μπορούν να αποφευχθούν με ίνες μικρού μήκους π.χ. 12mm αυτό βοηθά στην αποτελεσματικότερη γεφύρωση των μικρορωγμών. Οι κοντές ίνες επιτρέπουν μία τεράστια αύξηση εφελκυστικής αντοχής όπου ο σχηματισμός των μικρορωγμών αποφεύγεται με την γεφύρωση τους. Ωστόσο με την αύξηση του φορτίου αυτές οι μικρορωγμές εξελίσσονται σε μεγαλύτερες ρωγμές, σε αυτή την περίπτωση πιο αποτελεσματικές στη γεφύρωση των μικρορωγμών αυξάνοντας την ολκιμότητα του σκυροδέματος και τις αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη. Ο μηχανισμός αγκύρωσης των ινών πολυπροπυλενίου επιτρέπει την αύξηση των αντοχών εφελκυσμού και κάμψης. Όσο αυξάνεται το μήκος των ινών (μέχρις ένα σημείο) τόσο περισσότερη αντοχή αποκτά το σκυρόδεμα, διότι οι μακρές ίνες μεταφέρουν με καλύτερο τρόπο τάσεις από ότι οι κοντές ίνες. Οι κοντές γενικά ίνες πχ 12mm όταν χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποσότητα τείνουν να γεφυρώνουν ρωγμές, ενώ οι μακριές ίνες γεφυρώνουν ρωγμές δίχως να χρησιμοποιούνται σε υψηλές ποσότητες.

Συμπεράσματα

Καταλήγοντας τα συμπεράσματα μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας, καταλαβαίνει κάποιος ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου βοηθούν το άοπλο σκυρόδεμα να αυξήσει την μέγιστη θλιπτική και καμπτική αντοχή του, προσδίδοντάς το δυσθραυστότητα ώστε αυτό να απορροφά μεγαλύτερη ενέργεια πριν από την θραύση του, έχοντας μία περισσότερη όλκιμη αστοχία από ότι ψαθυρή που είχε αρχικά. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει επίσης ο τύπος των ινών, το μήκος τους, το σχήμα τους, το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί οι ίνες. Επιλέγον οι δοκιμές νωπού σκυροδέματος όπως η κάθιση και ο έλεγχος περιεκτικότητας του αέρα που πραγματοποιήθηκαν, μας δίνουν και καταλαβαίνουμε τι είδους σκυρόδεμα έχουμε πετύχει ανάλογα με την κάθιση και το % ποσοστό του αέρα και κατανοούμε ποιες εφαρμογές δύναται να έχει το σκυρόδεμα π.χ. (κολώνες, γέφυρες, τοιχία στήριξης κ.λπ.).

Οι ποσότητες των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών καθώς και η ποσότητα τσιμέντου, νερού με την προσθήκη κάποιου χημικού ή ορυκτού πρόσθετου δύναται να είναι πάρα πολύ προσεκτικές διότι με διαφορετικές αναλογίες όλων αυτών πετυχαίνουμε διαφορετικές μίξεις οπότε και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και εφαρμογές όταν το προς μίξη σκυρόδεμα σκληρύνει. Πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην μίξη του σκυροδέματος διαδραματίζει και ο λόγος Νερού/Τσιμέντου (N/T) όπου μεγαλύτερος λόγος N/T σημαίνει μεγαλύτερη ποσότητα νερού στο νωπό σκυρόδεμα πριν σκληρύνει άρα μεγαλύτερη εργασιμότητα και όχι τόσο καλές τελικές μηχανικές ιδιότητες όταν σκληρύνει. Επίσης στην βελτίωση της εργαστηριακής αντοχής του σκυροδέματος που παρασκευάστηκε έπαιξε η ωρίμανση σε λουτρά ύδατος για 28 ημέρες ώστε το σκυρόδεμα αυτό το χρονικό διάστημα να ‘κλείσει’ τους πόρους και το πορώδες του αυξάνοντας την μέγιστη αντοχή του.

Μελλοντικοί Στόχοι

Ένας βιώσιμος μελλοντικός στόχος είναι η περαιτέρω έρευνα όσον αφορά την βέλτιστη ελάχιστη ποσότητα ινών που θα μπορούσε να παρουσιάσει αξιόλογα αποτελέσματα. Εάν επιτευχθεί αυτός ο στόχος θα είναι εφικτή η μείωση του κόστους και η αξιοποίηση αυτής της έρευνας στον βιομηχανικό τομέα. Σε συνέχεια της παρούσας έρευνας γίνεται προσπάθεια αυτοϊασης του ινοπλισμένου σκυροδέματος με στόχο την επούλωση μικρών ρηγματώσεων σε κατασκευές στις οποίες δεν μπορεί να γίνει επισκευή (όπως π.χ. σε υπόγειες σήραγγες). Η εξέταση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, σε μελλοντικές δοκιμές, πιθανότατα θα αποκαλύψει τη συμπεριφορά ως προς την ανθεκτικότητα στη ρηγμάτωση αυτών των σύνθετων υλικών, υπό διαφορετικές συνθήκες. Περαιτέρω διερεύνηση των μηχανισμών σύνδεσης μεταξύ αυτών των ινών και της μήτρας θα μπορούσε να εξηγήσει την ανομοιογένεια στην αύξηση της αντοχής. Επιπλέον, μελλοντική έρευνα θα εστιαστεί στους διαφορετικούς προσανατολισμούς των ινών πέραν του τυχαίου, για να εξεταστεί εάν μια πιο δομημένη ευθυγράμμιση προσφέρει περαιτέρω βελτιώσεις. Θα ήταν επίσης σημαντικό να εκτιμηθεί πώς αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν άλλες ιδιότητες, όπως η ανθεκτικότητα στη ρηγμάτωση και η απόδοση υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η καινοτόμος χρήση του αυτοεπιδιορθούμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος θα μπορούσε να παρατείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής των κρίσιμων υποδομών, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια και μειώνοντας το μακροπρόθεσμο κόστος συντήρησης. Επιπλέον, η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των μετρήσεων βιωσιμότητας που σχετίζονται με αυτή την τεχνολογία θα μπορούσε να παράσχει περαιτέρω κίνητρα για την υιοθέτησή της σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης αισθητήρων σε αυτά τα υλικά για την παρακολούθηση της υγείας τους και την πρόβλεψη των αστοχιών πριν από την εμφάνισή τους είναι ένας άλλος πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας.

Βιβλιογραφία

1. Mehta, P.K. and P. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials. (NoTitle), 2006.
2. Τριανταφύλλου, Κ. and Δ. Υλικά, 5η Έκδοση. 2002, Πάτρα.
3. Hirschi, T., et al., Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Κρυονέρι Αττικής: Sika HELLAS ABEE, 2007.
4. Neville, A., Properties of Concrete, pearson education, Asia pte Ltd. Edinburgh, England, 2011.
5. Gasdia-Cochrane, M. The Cement Manufacturing Process. 2023; Available from: <https://www.thermofisher.com/blog/mining/the-cement-manufacturing-process/>.
6. ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.; Available from: <https://www.elebor.gr/product.asp?id=216>.
7. Popovics, S., Concrete materials: Properties, specifications, and testing. 1992: William Andrew.
8. Μαρσέλλος, Ν. and Κ. Τεχνολογίας, Σκυροδέματος-Από τον ΚΤΣ 13 στον ΚΤΣ 2016. 2013, Εκδόσεις Δεδεμάδη.
9. Θ.Ματίκας, Ν.-Μ.Μ., Σημειώσεις εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών 2024.
10. Αναγνωστοπούλου, Σ.Η., Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης. 2012.
11. Mohe, N.S., Y.W. Shewalul, and E.C. Agon, Experimental investigation on mechanical properties of concrete using different sources of water for mixing and curing concrete.
12. Case Studies in Construction Materials, 2022. 16: p. e00959.
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Ε.Τ., ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ 3.
13. Σουλιώτη, Δ., Μελέτη της επίδρασης των ινών στη μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. 2014.
14. Hannant, D., Fibre-reinforced concrete. Advanced concrete technology, 2003. 3: p. 6.53
15. Löfgren, I., Fibre-reinforced concrete for industrial construction. Department of civil and environment engineering. Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden, 2005.

16. Ragavendra, S., I.P. Reddy, and A. Dongre, Fibre reinforced concrete-A case study. Proceedings of the Architectural Engineering Aspect for Sustainable Building Envelopes, Hyderabad, India, 2017: p. 10-11.
17. Babaie, R., M. Abolfazli, and A. Fahimifar, Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2019.28(1): p. 119-134.
18. Ρουσάκης, Γ.Π., Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. 2010.
19. Sharma, S.K. and S. Mehta, Experimental study on effect of glass fibre on concrete using recycled aggregate. Materials Today: Proceedings, 2023.
20. Shah, S.P. and B.V. Rangan. Fiber reinforced concrete properties. in Journal Proceedings. 1971.
21. Latifi, M.R., Ö. Biricik, and A. Mardani Aghabaglou, Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties. Journal of Adhesion Science and Technology, 2022. 36(4): p. 345-369.
22. Madhavi, T.C., L.S. Raju, and D. Mathur, Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. International journal of emerging technology and advanced engineering, 2014. 4(4): p. 114-118.
23. Nandagiri, L., et al., Sustainability trends and challenges in civil engineering: Select Proceedings of CTCS 2020. 2022: Springer.
24. Jaffe, M. and J.D. Menczel, Thermal analysis of textiles and fibers. 2020: Woodhead Publishing.
26. Wong, C.M., Use of short fibres in structural concrete to enhance mechanical properties. 2004.
25. Beaudoin, J.J., Handbook of fiber-reinforced concrete. Principles, properties, developments and applications. 1990.28. Committee, A., 544, 544.1 R-96: Report on fiber reinforced concrete (Reapproved 2009). American Concrete Institute. Available online: <http://indiafiber.com/Files/ACI%20report.pdf> (accessed on 8 September 2022), 2009.
26. Ζαχαροπούλου, Γ., Παραγωγή ασβέστου υψηλής δραστικότητας κατάλληλης για αποκαταστάσεις μνημείων και ιστορικών κτιρίων. 2004, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα
27. Shah, S.P., et al., Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, 1993. 90(1): p. 94-101.

28. Van Chanh, N. Steel fiber reinforced concrete. in Faculty of Civil Engineering Ho chi minh City university of Technology. Seminar Material. 2004.
29. Balaguru, P.N. and S.P. Shah, Fiber-reinforced cement composites. 1992.
30. Kakooei, S., et al., The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. Construction and Building Materials, 2012. 27(1): p. 73-77.
31. Gere, J.M. and S. Timoshenko, Mechanics of Materials. ed. Boston, MA: PWS, 1997.
32. Naaman, A.E., Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. Journal of advanced concrete technology, 2003. 1(3): p. 241-252.
33. Banthia, N. and R. Gupta, Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and concrete Research, 2006. 36(7): p.1263-1267.544, A.C. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. 1982. American Concrete Institute.
34. Alk.Apostolopoulos, T.Matikas, C. Apostolopoulos, G. Diamantogiannis, "Pit Corrosion Examination of Bare and Embedded Steel Bar", 10th International Scientific and Technical Conference, ADVANCED METAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES (AMMT'2013), June 25–29, 2013, Saint Petresburg, Russia, pp. 489-495
35. Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206:2013 – "Concrete – Specification, performance, production and conformity"
36. Chuah S., Pan Z., Sanjayan J.G., Chien M. W., Duan W.H., “Nano Reinforced Cement and Concrete Composites and New Perspective from Graphene Oxide.” Construction and Building Materials, vol. 73, Dec. 2014, pp. 113–124, 2023.
37. Aiswarya S., Elson J., “Fiber Addition and its Effect on Concrete Strength.” International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), vol. 1, Sept. 2014,
38. Dr. Madhavi T. Ch., Raju L. S., Mathur D., “Polypropylene Fiber Reinforced Concrete-A Review.” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 9001, 2008, 2023.

39. Zollo R.F., “Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 Years of Development.” *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, no. 2, Jan. 1997, pp. 107–122,
40. Kurtz S., Balaguru P., “Postcrack Creep of Polymeric Fiber-Reinforced Concrete in Flexure.” *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 2, Feb. 2000, pp. 183–190,
41. Latifi M. R., Biricik Ö., Aghabaglou A. M., “Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 36, no. 4, 12 May 2021, pp. 345–369, Accessed 12 Oct. 2023.
42. Exarchos D.A., Dalla P.T., Tragazikis I.K., Matikas T.E., “The Effect of CNTs Reinforcement, on Thermal and Electrical Properties, of Cement Based Materials.”
43. Hawreen A., Bogas J.A., Kurda R., “Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes.” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 10, 19 Aug. 2019, pp. 8361–8376,.
44. Siad H., Lachemi M., Sahmaran M., Mesbah H.A., Hossain K.A., “Advanced Engineered Cementitious Composites with Combined Self-Sensing and Self-Healing Functionalities.” *Construction and Building Materials*, vol. 176, July 2018, pp. 313–322, Accessed 3 May 2023
45. Tragazikis I.K., Dalla P.T., Exarchos D.A., Dassios K., Matikas T.E., “Nondestructive evaluation of the mechanical behavior of cement based nanocomposites under bending.”
46. Kordatos E. Z., Strantza M., Soulioti D. V., Matikas T. E., Aggelis D. G., “Combined NDT methods for characterization of subsurface cracks in concrete.”
47. Dalal S.P., Dalal P., “Experimental Investigation on Strength and Durability of Graphene Nanoengineered Concrete.” *Construction and Building Materials*, vol. 276, Mar. 2021, p. 122236–122248, Accessed 16 May 2023.
48. Mehta P.K., Monteiro P.J.M., “ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: μικροδομή, ιδιότητες και υλικά”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2006
49. Yangyang Y., Yanmin Q., Shaowei H., “Four-Point Bending Tests for the Fracture Properties of Concrete.” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 211, Apr. 2019, pp. 371–381,

50. Labib W. A., “Fiber Reinforced Cement Composites.” Cement Based Materials, 10 Oct. 2018, pp. 31–48, Accessed 18 Nov. 2023.
51. Zhang Y., Zhang S., Deng M., “Four-point Bending Tests of ECC: Mechanical Response and Toughness Evaluation”, Case Studies in Construction Materials, vol. 17, 2023
52. Ματίκας Θ., “Εργαστηριακό Φυλλάδιο Εργαστηρίου Υλικών VI: Πειραματική Μηχανική Συμπεριφορά & Ποιοτικός Έλεγχος”, 2021, σελ.75-84