



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ
ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών με ροή τα Αναπτυξιακά Έργα

Εκπόνηση: Γιατρά Παντοχάρη

Επιβλέπουσα: Παπατζανή Στυλιανή

Αθήνα 2024

Ακαδημαϊκό Έτος 2023-2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING AND
GEOINFORMATICS ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

*TRIAL MIXTURES FOR IMPACT RESISTANT
CONCRETE*

Undergraduate degree programme of Development Projects

Studentname and surname: Pantochara Giatra

Supervisorname and surname: Styliani Papatzani

Registration Number: 18391078

Athens, March 2024

Academic Year 2023-2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΓΙΑ ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/a	ΟΝΟΜΑΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
	Σ. ΠΑΠΑΤΖΑΝΗ	Επιβλέπουσα – Διδάσκουσα καθηγήτρια	
	Γ. ΧΛΟΥΠΗΣ	Αναπλ. Καθηγητής	
	Ν. ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ	Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Γιατρά Παντοχαρά του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 18391078 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

ΓΙΑΤΡΑ ΠΑΝΤΟΧΑΡΑ



Όνοματεπώνυμο/Ιδιότητα

ΠΑΠΑΤΖΑΝΗ ΣΤΥΛΙΑΝΗ

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική μελέτη εκτείνεται σε πολλά επίπεδα, καλύπτοντας τόσο κομμάτια σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε πρακτικό, με τις πειραματικές εφαρμογές να διενεργούν ένα είδος διερευνητικής μεθόδου για την παραγωγή δοκιμαστικών μιγμάτων σκυροδέματος.

Στο θεωρητικό λοιπόν μέρος, γίνεται λεπτομερής αναφορά στα βασικά μέρη της τεχνολογίας του σκυροδέματος, όπως η σύσταση των βασικών υλικών που το συνθέτουν, των ιδιοτήτων του, την επιρροή του σε βασικές κατασκευές και τεχνικά έργα, στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η σύνθεση του, από την συλλογή των υλικών έως την τελική μορφή που χρειάζεται να έχει.

Ακολούθως, αφού γίνει η θεωρητική διερεύνηση και αποκτηθεί μια συνολική γνώση στο θέμα μελέτης, οδηγούμαστε στο πρακτικό μέρος κατά το οποίο γίνεται η εφαρμογή τους. Το κύριο αντικείμενο των πειραμάτων αποτελεί η δημιουργία συνθέσεων με κάποια πρόσθετα, που θα μπορέσουν να επιφέρουν ως αποτέλεσμα σκυρόδεμα με αντοχές και υψηλή ανθεκτικότητα κατά τη μονοαξονική θλιπτική φόρτιση.

Συνεπώς, στα ακόλουθα κεφάλαια γίνεται παρουσίαση των σταδίων που ακολουθήθηκαν, προκειμένου να οδηγηθούμε σε ένα προτεινόμενο μίγμα το οποίο να πληροί τις αρχικές απαιτήσεις. Επιπλέον, περιγράφεται και αναλύεται η διαδικασία της σκυροδέτησης, κάποιων βασικών δοκιμών, καθώς και των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών.

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα, δοκίμια, αδρανή, νανοσωματίδια, εξάπλωση

ABSTRACT

The present thesis extends across various levels, encompassing both theoretical and practical aspects, with experimental applications conducting a form of exploratory method for the production of trial mixtures for sustainable, self-compacting concrete.

In the theoretical part, detailed references are made to the fundamental components of concrete technology, such as the composition of raw materials, their properties, the influence of various concrete types on essential constructions and technical works, and the process of the mix design from the collection of materials to the final form of concrete.

Subsequently, following the theoretical investigation and the acquisition of comprehensive knowledge on the study subject, we transition to the practical section where implementation takes place. The primary focus of the experiments is the creation of compositions with specific supplementary cementitious materials and additives in order to reduce the carbon footprint of the final product, while maintain the requested strength and early age properties.

Therefore, the following chapters present a comprehensive overview of all the stages required to complete the process of mix design and concrete mixing and the results derived from it.

Keywords: concrete, durability, experiments, aggregates, nanoparticles, dispersion

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	9
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγικά στοιχεία.....	10
Εισαγωγή.....	10
Δομή διπλωματικής μελέτης	11
Κεφάλαιο 2 ^ο : Τεχνολογία σκυροδέματος και βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
Σκυρόδεμα σύσταση	12
Χαρακτηριστικά αδρανών υλικών	13
Διαχωρισμός αδρανών υλικών	14
Τσιμέντο.....	15
Ο ρόλος του νερού στο σκυρόδεμα.....	16
Πρόσμικτα υλικά.....	17
Πλεονεκτήματα – ιδιότητες σκυροδέματος	18
Βιβλιογραφική ανασκόπηση	19
Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος	30
Σημασία οπλισμού σκυροδέματος	32
Σημασία ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	34
Ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ).....	38
Κεφάλαιο 3 ^ο : Ενεργειακό αποτύπωμα – Μελέτη σύνθεσης - Συστατικά.....	39
Η έννοια του ενεργειακού αποτυπώματος	39
Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.....	40
Κεφάλαιο 4 ^ο : Περιγραφή διαδικασίας και ανάλυση αποτελεσμάτων	46
Συνολική διαδικασία σκυροδέτησης.....	47
Συνολικές παρατηρήσεις επί των δοκιμίων	57
Κεφάλαιο 5 ^ο : Επίλογος – Μελλοντική Έρευνα	62
Μελλοντική έρευνα.....	63
Βιβλιογραφία	64

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1- Φάσεις και υλικά για την παρασκευή τσιμέντου {Καραβόκυρος Λουκάς, 2020}.....	16
Εικόνα 2- Τα είδη των ινών με α) χαλύβδινες ίνες, β) ίνες πολυπροπυλενίου, γ) ίνες Kevlar.....	21
Εικόνα 3 - Διάτρηση βλήματος στις πλάκες άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος.	22
Εικόνα 4 - Διάταξη βολής στον στόχο με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	23
Εικόνα 5- Οι πλάκες του οπλισμένου σκυροδέματος μετά την πρόσκρουση: α) V100-SD400 β) V150-SD400 γ) V200-SD400 δ) V150-SD600-S.	26
Εικόνα 6- Μεγέθη κρατήρων από σκυρόδεμα και από γεωπολυμερές στις δυο διακυμάνσεις ταχυτήτων.....	28
Εικόνα 7 - Διάγραμμα για τέσσερα πάχη των βαθών διείδυσης στις δύο ταχύτητες α) 170 m/s και β) 330 m/s.	30
Εικόνα 8 - Τα βασικά είδη ινών σύμφωνα με το Διεθνές γραφείο τυποποίησης τεχνητών ινών (ΠΗΓΗ: BISFA 2009)	34
Εικόνα 9 - Δείγμα υλικών και εξοπλισμού σκυροδέτησης.....	47
Εικόνα 10 – Μη επιτυχές μίγμα σκυροδέματος.....	50
Εικόνα 11 - Επιτυχές μίγμα σκυροδέματος	51
Εικόνα 12 - Εφαρμογή δοκιμής εξάπλωσης.	52
Εικόνα 13 - Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες προτυποποιημένης βιομηχανικής σύνθεσης.	52
Εικόνα 14 - Δείγμα αδρανών υλικών.....	50
Εικόνα 15 - Ανάμιξη και δοκιμή εξάπλωσης για την 2 ^η σύνθεση.	54
Εικόνα 16 - Εξάπλωση μίγματος και τοποθέτηση στις μήτρες για την 1 ^η σύνθεση....	54
Εικόνα 17 - Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες για την 2 ^η σύνθεση.	55
Εικόνα 18-Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες για την 3 ^η σύνθεση.	56
Εικόνα 19 - Μίγματα από 3η και 4η σύνθεση αντίστοιχα και θερμομέτρηση.	57
Εικόνα 20 - Δοκίμια βιομηχανικής, 1ης και 2ης σύνθεσης αντίστοιχα.....	58
Εικόνα 21 - Δοκίμια 3ης και 4ης σύνθεσης αντίστοιχα.....	58

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της πτυχιακής μου διατριβής κ. Στυλιανή Παπατζανή για την συνεργασία και την καθοδήγηση που μου προσέφερε, καθώς και την αξιοσημείωτη επικοινωνία που είχαμε σε όλη την διάρκεια της μελέτης μου. Επιπλέον, τα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής εξέτασης κ. Γεώργιο Χλούπη (Αναπληρωτή Καθηγητή Πα.Δ.Α.) και κ. Νικόλαο Πνευματικό (Καθηγητή Πα.Δ.Α.) για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις.

Τον κο Σπύρο Χαλκιαδάκη (Head of Business Development) και τον κο Γεώργιο Τούλιο (Υπεύθυνο Ποιότητας) της εταιρείας ΑΡΜΟΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ Α.Ε.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ κο Ευστράτιο Μπαδογιάννη για το δανεισμό εξοπλισμού και τη χορηγία ασβεστόλιθου (filler).

Τον κο. Δημήτριο Σιαμπάνο (Customer Technical Support Manager) από τα τσιμέντα Τιτάν για τη χορηγία του τσιμέντου CEM I 42,5R.

Την κα Βιβή Δηλαβέρη Marmoline (Director of Marmoline & Chryso BUs Nordia SA) και τον κο Δημήτριο Κότση (Technical Support-Sales Manager Concrete Admixtures) των εταιρειών Marmoline και Nordia για τη χορηγία των υπερρευστοποιητών.

Τέλος, ευχαριστώ την αγαπημένη μου οικογένεια και κυρίως τους γονείς μου, οι οποίοι με στηρίζανε καθ' όλη την διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγικά στοιχεία

Εισαγωγή

Ως αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής μελέτης, αποτελεί η αναλυτική παρουσίαση της αντοχής δοκιμαστικών μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) έναντι ειδικών εφαρμογών. Η βασική δομή της μελέτης εκτείνεται σε τέσσερα κεφάλαια, τα οποία διαμορφώνονται με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση και έρευνα επί του θέματος, αλλά και την δική μας πειραματική διαδικασία πάνω σε αυτό. Ουσιαστικά, γίνεται μια ανάλυση της δομής και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, προκειμένου ο αναγνώστης να μπορεί να αντιληφθεί βασικές παραμέτρους που το συνιστούν.

Στο θεωρητικό μέρος, παρουσιάζονται τα βασικά υλικά σύστασης του σκυροδέματος, οι ιδιότητές του, τα κύρια πλεονεκτήματα χρήσης του, τα βήματα παραγωγής του, η αναγκαιότητα ύπαρξης οπλισμού ανάλογα με τον χαρακτήρα του τεχνικού έργου και η ανάλογη ερευνητική δραστηριότητα, που απασχόλησε γύρω από τον τομέα της αντοχής μιγμάτων σε μονοαξονική θλίψη.

Στο πειραματικό μέρος, χρησιμοποιούμε μια προτυποποιημένη βιομηχανική σύνθεση, της οποίας το ενεργειακό αποτύπωμα σχεδιάσαμε να μειώσουμε, με την πρωτότυπη δική μας σύνθεση. Βασικός στόχος για να επιτευχθεί αυτό, ήταν να παραχθούν μίγματα στα οποία η ποσότητα του τσιμέντου θα είναι χαμηλότερη, αλλά θα διατηρούνται οι αντοχές. Συγκεκριμένα, στις συνθέσεις μας η τροποποίηση του βιομηχανικού προτύπου ήταν διπλή, καθώς στην μία περίπτωση οι διαφοροποιήσεις αφορούν την αντικατάσταση ποσοστού τσιμέντου με ασβεστόλιθο (filler) καθώς και στην αλλαγή κοκκομετρίας των αδρανών. Οι αναλογίες των ποσοτήτων σε σύγκριση με το πρότυπο που χρησιμοποιούσε 100% τσιμέντο ήταν κατά 30% και 20% χαμηλότερο αντίστοιχα. Παράλληλα, τα παραγόμενα δοκίμια, είναι χωρισμένα σε δύο κατηγορίες μιγμάτων, με την πρώτη να αφορά μίγματα στα οποία προστέθηκαν ειδικού τύπου αδρανή υλικά, ύστερα από την κατάλληλη κοκκομετρική ανάλυση και με την δεύτερη να γίνεται χρήση νανοτεχνολογίας και συγκεκριμένα νανοσωματιδίων κατά τη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος, ώστε να παρατηρηθεί αν η επίδραση τους στο σκυρόδεμα έχει θετικό ή αρνητικό αντίκτυπο.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως το σκυρόδεμα που συνθέτουμε είναι αυτοσυμπυκνούμενο, ένα είδος εξειδικευμένου σκυροδέματος το οποίο δεν απαιτεί

μηχανική συμπίκνωση, παρουσιάζει έντονη ρευστότητα με ομοιόμορφη ροή και χαρακτηρίζεται από επαρκείς μηχανικές ιδιότητες και αντοχές.

Στην συνέχεια, περιγράφονται οι διαδικασίες ανάμιξης, σκυροδέτησης, ξεκαλουπώματος και συντήρησης, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς (Κ.Τ.Σ. 2016) που χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήριοι οδηγοί στο εργαστήριο κατά την διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων μας.

Τέλος, γίνεται σχολιασμός της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα συμπεράσματα που εξήλθαν από αυτή την μελέτη, καθώς και καταγράφονται ιδέες και παρατηρήσεις για μελλοντική έρευνα.

Δομή διπλωματικής μελέτης

Η δομή της παρούσας μελέτης, οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια συνολικά, τα οποία χωρίζονται ως εξής:

- Στο υπάρχον Κεφάλαιο 1^ο, γίνεται η παρουσίαση ενός εισαγωγικού κειμένου για την ουσία της μελέτης και πως αυτή επεκτείνεται.
- Το Κεφάλαιο 2^ο, αναφέρεται σε γενικά στοιχεία που αφορούν το σκυρόδεμα, από τα βασικά συστατικά που το συνιστούν μέχρι και το διαδικαστικό κομμάτι παραγωγής του. Επιπρόσθετα, περιέχει σχολιασμό από άλλες βιβλιογραφικές αναφορές, στις οποίες παρατίθενται η ερευνητική δραστηριότητα που έχει λάβει χώρα, όσον αφορά συνθέσεις σκυροδέματος ανθεκτικές σε κρούσεις.
- Το Κεφάλαιο 3^ο, είναι βασισμένο στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πειραματικό στάδιο, συμπεριλαμβανομένων και των αναλυτικών συνθέσεων που διεξάχθηκαν. Επιπλέον, γίνεται και μία γενική αναφορά σχετικά με την έννοια του ενεργειακού αποτυπώματος στον πλανήτη και πως επηρεάζεται από την παραγωγή σκυροδέματος.
- Το Κεφάλαιο 4^ο, αξιοποιείται για την ανάλυση της διαδικασίας των συνθέσεων που έλαβαν μέρος στο πειραματικό στάδιο, καθώς και τις παρατηρήσεις που καταγράφηκαν γύρω αυτές.
- Το Κεφάλαιο 5^ο, είναι αφιερωμένο στα γενικά συμπεράσματα που οδήγησε το σύνολο της έρευνας, καθώς και προτάσεις που ενδείκνυται να έχουν αξιολογηθεί σημασία σε μελλοντικές έρευνες.

Κεφάλαιο 2^ο : Τεχνολογία σκυροδέματος και βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σκυρόδεμα σύσταση

Ως σκυρόδεμα νοείται ένα μίγμα υλικών, το οποίο μέσω τεχνικών διαδικασιών φτάνει στο σημείο της σκλήρυνσης. Σκοπός είναι, η χρήση του ως δομικό υλικό σε διάφορες μορφές δόμησης. Διαδραματίζει βασικό ρόλο σε μελέτες μηχανικών για την παραγωγή και την δημιουργία δημόσιων κατασκευαστικών – τεχνικών έργων υποδομής, σε οδικά δίκτυα, σε γέφυρες, σε υδραυλικά έργα (φράγματα, οχετοί), σε λιμάνια, σε αεροδρόμια, αλλά και ιδιωτικά κατασκευαστικά έργα.

Το μίγμα των υλικών που ενσωματώνονται για την υλοποίηση του είναι:

- Αδρανή υλικά
- Τσιμέντο
- Νερό
- Πρόσθετα / Πρόσμικτα

Για την επίτευξη του σωστού αποτελέσματος, ανάλογα με το είδος του έργου και τις προδιαγραφές, η μελέτη σύνθεσης που περιλαμβάνει τα ανωτέρω γίνεται με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές/πρότυπα και κανόνες/κανονισμούς. Στην Ελλάδα ακολουθούμε τους εξής κανονισμούς:

ΕΛΟΤ EN 206 → Σκυρόδεμα - Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση.

ΕΛΟΤ EN 197-1 → Τσιμέντο - Μέρος 1 : Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα.

ΕΛΟΤ EN 1008 → Νερό ανάμειξης σκυροδέματος - Προδιαγραφή για δειγματοληψία, έλεγχο και αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού , συμπεριλαμβανομένου του νερού που ανακτάται από διεργασίες στη βιομηχανία σκυροδέματος, για τη χρήση του ως νερό ανάμειξης σκυροδέματος.

ΕΛΟΤ EN 12620 → Αδρανή για σκυρόδεμα.

ΕΛΟΤ EN 934.01 → Πρόσθετα σκυροδέματος κονιαμάτων και ενεμάτων - Μέρος 1 : Κοινές απαιτήσεις.

ΕΛΟΤ EN 934-2 → Πρόσθετα σκυροδέματος κονιαμάτων και ενεμάτων - Μέρος 2 : Πρόσθετα σκυροδέματος - Ορισμοί, απαιτήσεις, συμμόρφωση, σήμανση και επισήμανση.

Χαρακτηριστικά αδρανών υλικών

Ως αδρανή υλικά, αναφέρονται εκείνα τα οποία παρουσιάζουν μορφή πετρώματος με διάφορες διαβαθμίσεις. Ο τρόπος με τον οποίο κατατάσσονται, αφορά είτε το μέγεθος (διάμετρος) και το σχήμα είτε την πηγή προέλευσης τους. Ονομάζονται έτσι, διότι η παλαιά θεώρηση ήταν ότι είναι χημικά αδρανή, δηλαδή, ότι δεν αντιδρούν με τα άλλα στοιχεία σχηματίζοντας νέες ενώσεις. Η σύγχρονη έρευνα έχει δείξει, ότι αυτό δεν ισχύει πάντα (αλκαλοπυριτική αντίδραση). Η συλλογή τους, γίνεται είτε κατευθείαν από την φύση (π.χ. ποτάμια) με μικρή επεξεργασία που κυρίως περιλαμβάνει την εκκαθάριση τους από τα γεώδη υλικά, είτε μέσω βιομηχανικών 7 διαδικασιών αποκόλλησης και θρυμμάτισης πετρωμάτων – ορυκτών (λατομείο/ νταμάρι), είτε από ανακύκλωση υλικών τα οποία προϋπήρχαν σε κάποια κατασκευή ή έργο. Το ποσοστό του συνολικού βάρους του σκυροδέματος, που καταλαμβάνουν τα αδρανή συνηθίζεται να είναι περίπου στο 75%. Αυτό συμβαίνει, καθώς αποτελεί ένα από τα πιο οικονομικά υλικά σε σύγκριση με άλλα στοιχεία και προσδίδουν σταθερότητα στην σύσταση του συνολικού μίγματος. Για την διασφάλιση της υψηλότερης απόδοσης σε ανθεκτικότητα στο σκυρόδεμα, χρειάζεται η σωστή διαχείριση και επεξεργασία των αδρανών, σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές (EN 12620:2002+A1:2008 (ΕΛΟΤ EN 12620+A1: 2008)) για την χρήση και λειτουργία τους.

Διαχωρισμός αδρανών υλικών

Ο διαχωρισμός των αδρανών κατατάσσεται σε διάφορες κατηγορίες, με βάση κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος, το βάρος που καταλαμβάνουν, την γεωμετρία – μορφή που έχουν και την προέλευση τους.

A) Σύμφωνα με την προέλευση, όπως προαναφέρθηκε, έχουμε:

- Φυσικά αδρανή → προέρχονται από την πρωτογενή διαλογή πετρωμάτων.
- Τεχνητά – Βιομηχανικά → προέρχονται από δευτερογενής επεξεργασία υλικών, για να καταλήξει σε αδρανή.
- Ανακυκλωμένα → προέρχονται από δομικά υλικά τα οποία υπήρχαν σε άλλα κατασκευαστικά έργα.

B) Σύμφωνα με την πηγή λήψης τους:

- Φυσικά ή συλλεκτικά αδρανή
- Αδρανή λατομείων

Γ) Σύμφωνα με την πυκνότητα τους:

- Αδρανή κανονικού ειδικού βάρους ($2 - 3 \text{ Mg/m}^3$)
- Ελαφροβαρή αδρανή (έως 2 Mg/m^3)
- Βαριά αδρανή (3 Mg/m^3)

Δ) Σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων:

- Χονδρόκοκκα (μέγεθος κόκκου από 2 - 4 mm)
- Λεπτόκοκκα (μέγεθος κόκκου μέγιστο 4 mm)
- Παιπάλη / Fillers (μέγεθος κόκκου μέγιστο 2 mm)

Τα πιο συνηθισμένα αδρανή που χρησιμοποιούνται στις αναμίξεις για την παραγωγή σκυροδέματος είναι η άμμος (μέγεθος κόκκου έως 4 mm), το γαρμπίλι (μέγεθος κόκκου από 4 – 16 mm) και τα σκύρα (μέγεθος κόκκου μεγαλύτερα από 16 mm). Επιπλέον, η μορφή που έχουν ποικίλει, ανάλογα με το σχήμα και την γεωμετρία σε στρογγυλά, γωνιώδη, επιμήκη κ.α..

Η χρήση των αδρανών υλικών γίνεται με βάση ισχύοντες κανονισμούς και προδιαγραφές, προκειμένου να επιλέγονται οι σωστοί τύποι για το κάθε τεχνικό έργο. Πιο συγκεκριμένα, τα Πρότυπα είναι ΕΛΟΤ – 408 (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης), ΚΤΣ – 16 (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος) και ΕΛΟΤ EN 12620 (αφορά Ευρωπαϊκή Προδιαγραφή). Με την εφαρμογή αυτών των προτύπων ελέγχονται οι ιδιότητες των αδρανών όπως, οι αντοχές τους σε θλίψη (Πίνακας 1), το

ειδικό βάρος, το πορώδες του κάθε πετρώματος, την υδατοαπορροφητικότητα, την αντοχή σε εξωγενή περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά (παγετός, υγρασία, φθορά, θερμοκρασία), το μέγεθος των κόκκων που είναι απαραίτητος, καθώς και ποσοστά χημικών ουσιών τα οποία δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις προδιαγραφές, για την αποφυγή συμπτωμάτων διάβρωσης, αντοχής, απότομης πήξης ή το αντίθετο και εναλλαγές στον συνολικό όγκο που χρειάζεται.

Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί ένα από τα πρωταρχικά συστατικά του σκυροδέματος. Για την παρασκευή του τσιμέντου αυτού όμως, χρησιμοποιούνται κάποιες πρώτες ύλες όπως είναι η υδραυλική κονία η οποία παράγεται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου και τυχόν άλλων πρόσθετων ουσιών. Κλίνκερ ονομάζεται το προϊόν της όπτησης, μέχρι αρχής της τήξης, μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων σε καθορισμένη αναλογία. Στην συνέχεια, το κλίνκερ θρυμματίζεται έως ότου φτάσει να έχει μορφή σκόνης και συνήθως μαζί με την προαιρετική παρουσία γύψου/ασβέστη, καταλήγει στο τσιμέντο (Πίνακας 2). Παρόλα αυτά, το τσιμέντο αποτελεί ουσιαστικά τον συνδετικό κρίκο για το σκυρόδεμα, εφόσον αναμειχθεί σε νερό, με βάση τις σωστές αναλογίες νερού/τσιμέντο. Έτσι σε συνδυασμό με κάποιες χημικές αντιδράσεις καταλήγει από ένα ρευστό υλικό σε ένα στερεό, αφού περάσει από κάποια στάδια σκλήρυνσης, σε διάρκεια κάποιων ημερών (2-28 ημέρες) (Εικόνα 1) {Καραβόκυρος Λουκάς, 2020}.

Πίνακας 1 - Κατηγορίες σκυροδέματος ανάλογα με τις αντοχές κυλίνδρου και κύβου {Βάσει ΚΤΣ – 2016}.

Κατηγορία σκυροδέματος	F_{ck} , κυλίνδρου. (MPa)	F_{ck} , κύβου. (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60



Εικόνα 1- Φάσεις και υλικά για την παρασκευή τσιμέντου{Καραβόκυρος Λουκάς, 2020}.

Πίνακας 2 - Τύποι Τσιμέντων.

ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Ο ρόλος του νερού στο σκυρόδεμα

Το νερό επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την τελική συμπεριφορά που θα παρουσιάσει το σκυρόδεμα, τόσο σε όρους αντοχής όσο και ανθεκτικότητας. Αυτό συμβαίνει διότι είναι χαρακτηριστικός ο ρόλος του σε δύο φάσεις της παρασκευής του, κατά την ανάμειξη με τα υπόλοιπα υλικά, αλλά και κατά την διάρκεια της συντήρησης του, έως ότου φτάσει στο επιθυμητό στάδιο σκλήρυνσης. Επίσης, για την ποσότητα νερού και την ποιότητα του, υπάρχουν πάλι ειδικά πρότυπα τα οποία πρέπει να ακολουθούνται για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος και αυτά είναι το Πρότυπο ΕΛΟΤ – 345, Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1008 και ο ΚΤΣ – 16 (Άρθρο 4.4). Τα παραπάνω πρότυπα,

καθορίζουν την επιλογή του νερού, το οποίο χρειάζεται να είναι απαλλαγμένο από άλατα, οξέα και διάφορες οργανικά προϊόντα που λειτουργούν επιβαρυντικά. Γι' αυτό κυρίως χρησιμοποιείται πόσιμο νερό, ενώ δεν επιτρέπεται καθόλου το θαλασσινό.

Στην συνέχεια, σημαντική επίδραση έχει ο λόγος νερού/τσιμέντο, διότι από αυτόν εξαρτάται η αντοχή και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος και άρα η ποσότητα του νερού, τόσο λιγότερη είναι η αντοχή του και το αντίστροφο. Αυτό συμβαίνει, αφού με περίσσεια νερού το μίγμα αποκτά μεγάλη ρευστότητα, ενώ αντίθετα με μικρότερη ποσότητα νερού από αυτή που ενδείκνυται υπάρχει κίνδυνος να μην μπορέσουν να αναμειχθούν επαρκώς τα υλικά και έτσι να μειωθεί η αντοχή του. Τα πλαίσια στα οποία διακυμαίνεται ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι από 0.3 – 0.7, με πιο συνηθισμένο την τιμή 0.5 για συμβατικά τεχνικά έργα από σκυρόδεμα. Επομένως, εφόσον η ποσότητα κυμαίνεται σε αναλογίες κατάλληλες με τις προδιαγραφές για κάθε έργο, τότε αποφεύγονται σφάλματα αντοχής, ρηγμάτωσης, εργασιμότητας και διαπερατότητας στο συνολικό όγκο του σκυροδέματος.

Πρόσμικτα υλικά

Η λειτουργία των πρόσμικτων υλικών και η προσθήκη τους κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος, γίνεται με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων του σε άλλες ανάλογα με την ιδιαιτερότητα του κάθε έργου. Οι αναλογίες στις οποίες χρησιμοποιούνται, περιγράφονται στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 934 – 2, σύμφωνα με τον οποίο ως πρόσμικτο σκυροδέματος ορίζεται το «υλικό που προστίθεται κατά τη διαδικασία ανάμιξης του σκυροδέματος σε ποσότητα όχι μεγαλύτερη από 5% κβ τσιμέντου, για να διαμορφώσει τις ιδιότητες του μίγματος σε νωπή ή και σε σκληρυμένη κατάσταση». Γενικά, τα συγκεκριμένα προϊόντα, έχουν τις μικρότερες ποσότητες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα που εμπεριέχονται στην παραγωγή του σκυροδέματος. Επειδή λειτουργούν δραστικά στην παραγωγή, χρησιμεύουν σε διάφορες καταστάσεις, όπως να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν την φάση της πήξης, να ενισχύσουν την ρευστότητα του μίγματος, να αποτρέπουν την διάβρωση του οπλισμού. Υπάρχουν δύο κατηγορίες, κατά τις οποίες διαφοροποιούνται τα πρόσμικτα υλικά. Σε χημικά πρόσμικτα σκυροδέματος, όπου επιδρούν απευθείας στο μίγμα προκειμένου να του αλλάξουν τις ιδιότητες που έχει

(πχ. κατάσταση πήξης) και σε φυσικά πρόσμικτα σκυροδέματος, όπου επιδρούν στην ρευστότητα του, στην αντοχή του και εναλλακτικά με το τσιμέντο, μειώνοντας την ποσότητα του εφόσον κρίνεται σκόπιμο.

Πλεονεκτήματα – ιδιότητες σκυροδέματος

Εξαιτίας της ρευστότητας του, κατά το αρχικό στάδιο παρασκευής, το καθιστά ένα υλικό που μεταφέρεται με ευκολία και παίρνει οποιαδήποτε μορφή και σχήμα, μέσω καλουπιών (ξύλιτος αν τα καλούπια είναι ξύλινα, μεταλλότυπος αν είναι μεταλλικά κ.ο.κ.). Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα να παρασκευάζεται ακόμη και δίπλα στο έργο που γίνεται, χωρίς να επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο χρόνο και κόστος. Είναι ένα οικονομικό προϊόν, το οποίο δεν είναι εύφλεκτο επομένως παρέχει αυξημένη προστασία έναντι πυρκαγιών ή υψηλών θερμοκρασιών και έχει σημαντική αντοχή στην θλίψη, σε αντίθεση με τον εφελκυσμό. Αξίζει να σημειωθεί, πως για την ενίσχυση του υλικού ως προς τις εφελκυστικές τάσεις, χρησιμοποιούνται οπλισμένα σκυροδέματα, επομένως ο χάλυβας οπλισμού ή οι ίνες αναλαμβάνουν τις εφελκυστικές τάσεις. Ακόμα έχει σημαντικό ρόλο σε πλήθος θεμάτων προστασίας, όπως είναι η οδική ασφάλεια, η αντιμετώπιση των έντονων καιρικών φαινομένων, αλλά και η αντιβαλλιστική προστασία έναντι διαφόρων ειδών κρούσεων.

Στο κομμάτι της οδικής ασφάλειας, γίνεται χρήση ειδικών κατασκευών από σκυρόδεμα, κυρίως σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας, με διαχωριστικές νησίδες που συμβάλλουν στην αποφυγή ατυχημάτων ανάμεσα στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας και ενίσχυση του οδοστρώματος με σκυρόδεμα, για την μείωση της ολισθηρότητάς του και την αύξηση της αντοχής του στα μεγάλα φορτία που εισέρχονται από αυτό.

Για την αντιμετώπιση των ακραίων καιρικών φαινομένων, φτιάχνονται ειδικά τοιχεία που εμποδίζουν για παράδειγμα τις κατακρημνίσεις από λοφώδη ή με απότομες κλίσεις εδάφη καθώς και κυματοθραύστες.

Η αντιβαλλιστική προστασία είναι απαραίτητη σε δομές που πρέπει να προστατευτούν έναντι πιθανών εκρήξεων, όπως σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται με κατασκευή τοίχων αντιστήριξης αλλά και χρήση ειδικών σκυροδεμάτων για την κατασκευή των ίδιων των δομών, ώστε να αποτρέπονται τέτοιου είδους πλήγματα. Για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας, μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ερευνητική δραστηριότητα που παρουσιάζεται από άλλους μελετητές στην παρακάτω

ενότητα, σχετικά με την τεχνολογία σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για αυτές τις πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές, διότι αυτό που εξετάζουν είναι η παραγωγή δοκιμαστικών μιγμάτων σκυροδέματος τα οποία να έχουν υψηλές αντοχές κατά την υποβολή τους σε κρούση. Έτσι φαίνεται χρονολογικά η εξέλιξη των δοκιμών τους με διαφορετικές συνθέσεις και κυρίως ιδιαίτερα υλικά, προσπαθώντας να δημιουργήσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα για την περίπτωση αυτή. Γεγονός που συνδυάζεται ως εξελικτικό βήμα και κατά την δική μας πειραματική διεργασία, αφού στόχος μας είναι η δημιουργία δοκιμών με υψηλές αντοχές.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η έρευνα για την αντίσταση σε κρούσεις δομικών υλικών έχει παρουσιάσει εξέλιξη μέσα από διάφορες προσεγγίσεις και υλικά, όπως αποδεικνύεται από τις ακόλουθες αναφορές:

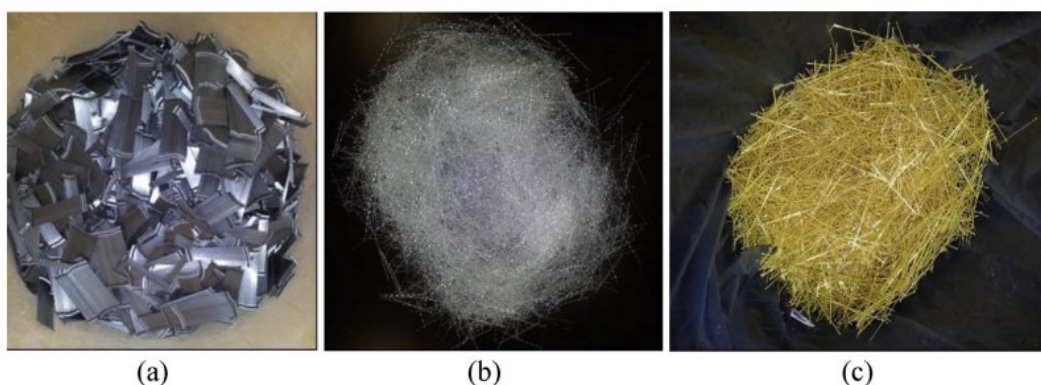
Αρχικά η μελέτη των **S.G. Millard, T.C.K. Molyneaux, S.J. Barnett, X. Gao, et al. (2010)**, επικεντρώθηκε σε μια πειραματική διαδικασία κατά την οποία δημιούργησαν πάνελ από σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής και εφάρμοσαν μέσω εκρηκτικού μηχανισμού μια έκρηξη, προκειμένου να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των πάνελ. Ουσιαστικά, πρόκειται για δύο ξεχωριστές παρασκευές που έκαναν το Πανεπιστήμιο του Λίβερπουλ και το RMIT. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάστηκαν ήταν η αντοχή σε θλίψη, κάμψη και διάτμηση. Σημειώνεται, πως το μίγμα του σκυροδέματος ήταν ενισχυμένο με χαλύβδινες και υβριδικές ίνες και για τις δύο περιπτώσεις, με τη μόνη διαφορά στις αναλογίες μεταξύ τους. Αυτό που παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια της επίδρασης του ωστικού κύματος από την έκρηξη ήταν η ικανοποιητική αντίσταση της πλάκας στις ρωγμές από τον εφελκυσμό. Γεγονός που οφείλεται στην παρουσία των ινών σε σχέση με ένα συμβατό σκυρόδεμα. Ωστόσο και στα δύο πειράματα των πανεπιστημίων, δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα παρότι υπήρχαν διαφορετικές αναλογίες στην σύσταση.

Πίνακας 1: Σύσταση σκυροδέματος από τα δύο πανεπιστήμια.

Τσιμέντο	Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ: 657 kg/m ³ . RMIT: 955 kg/m ³ .
Νερό	Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ: Λόγος w/c = 0,17 RMIT: Λόγος w/c = 0,153
Αδρανή	Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ: 1050 kg/m ³ . RMIT: 1100 kg/m ³ .
Πρόσθετα	Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ: Πυριτική παιπάλη → 119 kg/m ³ και μέγεθος 100-500 nm. Σκωρία υψικαμίνου → 418 kg/m ³ και μέγεθος < 20 nm. RMIT: Πυριτική παιπάλη (Microsilica 600) → 143 kg/m ³ .
Ίνες	Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ: Χαλύβδινες ίνες: Γεωμετρία: Κοντές Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 2% και 6% Υβριδικές ίνες: Μήκος: 13 mm και 25 mm. Γεωμετρία: Κοντές και μακρύτερες. Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 3% και 3% αντίστοιχα. RMIT: Χαλύβδινες ίνες: Γεωμετρία: Κοντές Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1,5%

Στην συνέχεια η έρευνα των **Almusallam T. H. et al. (2015)**, εξέτασε τη χρήση συνδυασμού ινών προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη αντοχή κατά την κρούση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποίησαν για τις ανάγκες αυτού του πειράματος 27 δείγματα τέτοιων πλακών, τα οποία καλουπόθηκαν με διάφορες ίνες, όπως χάλυβα με αγκίστρια, πολυπροπυλένιο και ίνες Kevlar. Η δοκιμή έγινε με κρούση χαλύβδινων βλημάτων σε ημισφαιρική μορφή. Η κρούση πραγματοποιήθηκε με βλήμα, το οποίο χτύπησε το κέντρο της πλάκας του σκυροδέματος, είχε διάμετρο 40 χιλιοστά, μάζα 800 γραμμάρια και σφαιρική μύτη. Οι πλάκες του σκυροδέματος είχαν διαστάσεις 600×600×90 χιλιοστά. Η λειτουργία των ινών έχει στόχο την αντίσταση στην διείσδυση των βλημάτων, την μείωση στα μεγέθη των κρατήρων, τον έλεγχο των ρωγμών, την μείωση των κατεστραμμένων περιοχών και την βελτίωση της ολκιμότητας των στόχων οπλισμένου σκυροδέματος. Για αυτό το λόγο έχει σημαντικό ρόλο και η γεωμετρία των ινών που χρησιμοποιήθηκε. Σύμφωνα με την ανασκόπηση που έκαναν οι συγκεκριμένοι και για άλλους ερευνητές που περιλαμβάνουν στα πειράματα τους χρήση ινών, κατέληξαν σε ένα κοινό

συμπέρασμα πως με την προσθήκη ινών μειώνεται η οπτική φθορά του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, οι **ίνες Kevlar(KF)** παρουσιάζουν μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές, χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας, ενώ επιδρούν στις ρωγμές και την σκληρότητα που παρουσιάζει το σκυρόδεμα, όπως και με το πολυπροπυλένιο. Παρατήρησαν πως το μέγεθος και το σχήμα των ινών καθορίζουν την αντοχή σε κρούση των δειγμάτων της πλάκας.

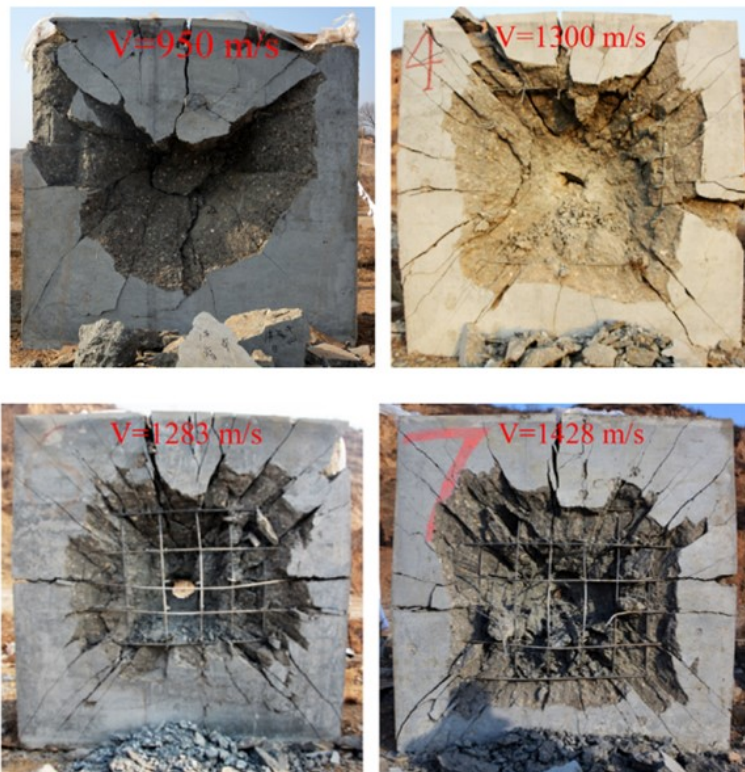


Εικόνα 2- Τα είδη των ινών με α) χαλύβδινες ίνες, β) ίνες πολυπροπυλενίου, γ) ίνες Kevlar. {Almusallam T. H. et al. ,2015}

Πίνακας 2: Σύσταση ινοπλισμένου σκυροδέματος για την προαναφερθείσα μελέτη.

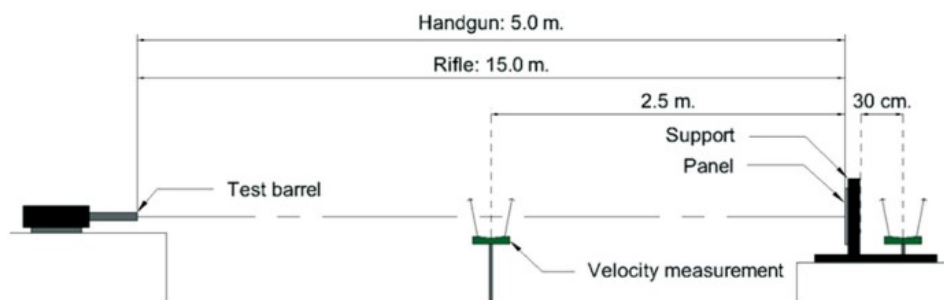
Τσιμέντο	Portland (Type I) με βάρος 520 kg/m^3 .
Νερό	Λόγος w/c = 0,4 με βάρος 145 kg/m^3 .
Αδρανή	Χονδρόκοκα σε μεγέθη 10 mm και 5 mm, με αντίστοιχη πυκνότητα 850 kg/m^3 και 315 kg/m^3 .
Πρόσθετα	Λεπτόκοκκη άμμος με ειδικό βάρος 586 kg/m^3 .
Ίνες	<p>Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 60 x 0,75 mm Γεωμετρία: Αγκιστρωμένα άκρα Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 0,7 – 1,4%</p> <p>Πολυπροπυλενίου ίνες: Μήκος: 50 x 0,6 x 1 mm Γεωμετρία: Πτυχωτές Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 0,2%</p> <p>Ίνες Kevlar: Μήκος: 45 x 0,5 mm Γεωμετρία: Απλή Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 0,3%</p>

Έπειτα οι **Xiangzhao Xu, Tianbao Ma, Jianguo Ning, et al. (2019)**, διεξήγαγαν ένα πείραμα πρόσκρουσης βλήματος σε τέσσερις πλάκες άοπλου σκυροδέματος και άλλες τέσσερις οπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ράβδους κι όχι παρουσία ινών, όπως στις παραπάνω έρευνες. Οι πλάκες αυτές είχαν τετραγωνικές διαστάσεις 2×2 m με πάχος 1 m και πυκνότητα 2440 kg/m^3 για το άοπλο και 2520 kg/m^3 για το οπλισμένο. Ο οπλισμός έγινε με χρήση χαλύβδινων ράβδων σε τέσσερις στρώσεις, όπου η καθεμία είχε δέκα ράβδους σε απόσταση 20 cm μεταξύ τους. Η ταχύτητα εκτόξευσης των βλημάτων κυμάνθηκε από τα 950 m/s έως τα 1481 m/s. Τα στάδια που χαρακτηρίζουν τις πλάκες ύστερα από το πέρας της κρούσης είναι το μέγεθος του κρατήρα που δημιουργείται στην εμπρόσθια επιφάνεια από το βλήμα, η διάνοιξη στο εσωτερικό πάχος του σκυροδέματος και η διατμητική απόφραξη που συμβαίνει την στιγμή την οποία το βλήμα διαπερνά εντελώς την πλάκα του σκυροδέματος. Ύστερα από την ολοκλήρωση των κρούσεων, αυτό που παρατηρήθηκε ήταν η καλύτερη συγκράτηση των υλικών στο οπλισμένο με ράβδους σκυροδέμα με μερικά θραύσματα αποκόλλησης, ενώ στο άοπλο υπήρξαν σημαντικές αποκολλήσεις κομματιών από την επιφάνεια.



Εικόνα 3 - Διάτρηση βλήματος στις πλάκες άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος.
{Xiangzhao Xu et al. ,2019}

Ακολούθως οι **Jamnana S. et al. (2020)**, δεδομένου ότι το σκυρόδεμα σαν υλικό παρουσιάζει σημαντική ευθραυστότητα όταν βρίσκεται υπό κρούση, προσπάθησαν να διερευνήσουν την παρουσία χαλύβδινων ινών αγκιστρωμένου άκρου μέσα σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη του πειράματος αφορούσε πάνελ οπλισμένου σκυροδέματος με τετραγωνικές διαστάσεις 400×400 mm και πάχος 10-100 mm, στα οποία ενσωματώθηκαν χαλύβδινες ίνες και τα οποία δέχτηκαν κρούση από βλήμα διαφορετικών ενεργειών και μεγεθών. Για την κρούση έγινε χρήση ενός αεροβόλου όπλου με βλήματα τριών διαμέτρων. Ειδικότερα, το βλήμα διαμέτρου 9 mm είχε ταχύτητα εκτόξευσης 342 m/s και ενέργεια 468 J, το βλήμα διαμέτρου 7,62 mm είχε ταχύτητα 499 m/s και ενέργεια 1972 J και τέλος το βλήμα διαμέτρου 11 mm είχε ταχύτητα 842 m/s και ενέργεια 3259 J. Οι αποστάσεις του όπλου κατά την βολή ήταν στα 5m για τα βλήματα των 9 και 11 mm, ενώ στα 15 m για το βλήμα των 7,62 mm. Η ανάλυση της αστοχίας των πάνελ χωρίστηκε σε κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στην διάτρηση της εμπρόσθιας όψης (κρατήρας) και στην πίσω αποκόλληση, η δεύτερη κατηγορία στην εμπρόσθια απολέπιση και πίσω αποκόλληση, η τρίτη κατηγορία στην εμπρόσθια αποκόλληση και την πίσω ρηγμάτωση και η τέταρτη κατηγορία αναφέρεται στην εμπρόσθια απολέπιση χωρίς καμία αστοχία στην οπίσθια όψη της πλάκας. Ως αποτέλεσμα, διαπιστώθηκε πως το πάχος των πλακών ρυθμίζουν την αστοχία που θα επικρατήσει, καθώς και οι ίνες που εμπεριέχονται σε αυτό, διότι ο συνδυασμός τους παρέχει την καλύτερη αντοχή στην κρούση.



Εικόνα 4 - Διάταξη βολής στον στόχο με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. {Jamnana S. et al., 2020}

Πίνακας 3: Σύσταση ινοπλισμένου σκυροδέματος στις ανάγκες της παραπάνω μελέτης.

Τσιμέντο	Portland (Type I).
Νερό	Λόγος w/c = 0,3.
Αδρανή	Λεπτόκοκκα αδρανή.
Ίνες	Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 35 x 0,55 mm Γεωμετρία: Αγκιστρωμένα άκρα Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1 – 3%

Στο έργο των **P.P. Lia, H.J.H. Brouwersa, Qingliang Yu, et al. (2020)**, διερεύνησαν την επίδραση σε σκυρόδεμα με υπερυψηλή αντοχή και ενισχυμένο με ίνες, ενώ ταυτόχρονα έδωσαν έμφαση στον τύπο των αδρανών υλικών και των πρόσθετων, το οποίο υποβλήθηκε σε κρούση με βλήμα. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οι ποσότητες των αδρανών υλικών και των ινών, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη αντοχή έναντι κρούσης. Το βάθος διείδυσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που εξετάζεται, καθώς αποτελεί ποσό αντιστρόφως ανάλογο είναι από την θλιπτική αντοχή που παρουσιάζει το σκυρόδεμα. Οι ίνες χάλυβα που λαμβάνουν χώρα, ενισχύουν την αντοχή σε κρούση, ενώ παράλληλα προσφέρουν ελαστικότητα και απορρόφηση ενέργειας κατά την τριβή. Κατά την διάταξη του πειράματος, πραγματοποιήθηκε βολή σε στόχο σκυροδέματος από απόσταση 30 m και με ταχύτητα βλήματος που κυμαινόταν από 843 - 926 m/s. Το βάθος διείδυσης μεγάλωνε με την αύξηση της ταχύτητας του βλήματος. Επιπλέον, ανάλογα με το ποσοστό των ινών που υπήρχε στο μίγμα, εμφανιζόταν διαφορετική συμπεριφορά ως αποτέλεσμα στο σκυρόδεμα, δηλαδή όσο περισσότερες ίνες είχε, τόσο λιγότερη ήταν η ζημία του υλικού. Αποτέλεσμα της ζημιάς, αποτελεί το μέγεθος του κρατήρα, το βάθος διείδυσης, οι ρωγμές και η αποκόλληση του υλικού από την εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια.

Πίνακας 4: Σύσταση σκυροδέματος υπερυψλών αντοχών με ίνες.

Τσιμέντο	Portland
Αδρανή	Χονδρόκοκκα βασάλτη, με πάχος 100 mm.
Πρόσθετα	Σκόνη ασβεστόλιθου Κανονική άμμος Πυριτική παιπάλη
Ίνες	Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 13 x 0,21 mm και 30 x 0,38 mm Γεωμετρία: Ευθείες και Αγκιστρωμένα άκρα Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1 – 5%

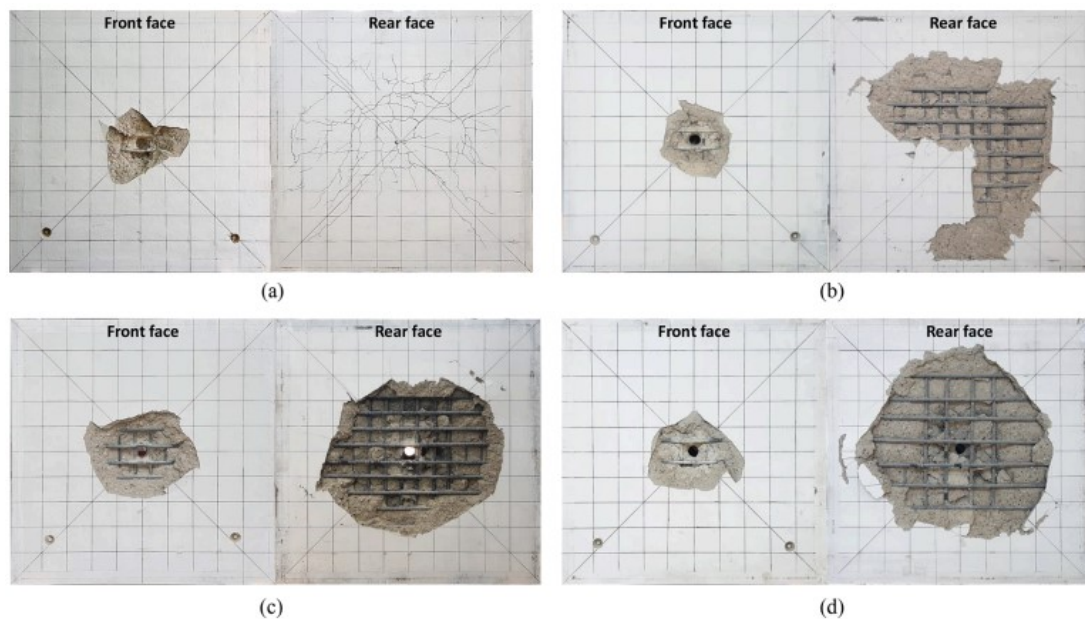
Στη συνέχεια των ερευνών οι **Jan Bujnak, Peter Michalek, Frantisek Bahleda, Stefania Grzeszczyk, Aneta Matuszek-Chmurowska and Arkadiusz Mordak, et al. (2020)**, εφάρμοσαν μια καινοτόμα περίπτωση σκυροδέματος, το λεγόμενο αντιδραστικό σκυρόδεμα σε σκόνη (Reactive Powder Concrete) με βασικό συστατικό του, το τσιμέντο υπέρ-υψηλών αντοχών. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης, δημιουργήθηκαν μίγματα από ίνες βασάλτη και χάλυβα, με σκοπό την σύγκριση τους. Ειδικότερα, παρασκευάστηκαν τρεις κατηγορίες μίξεων σκυροδέματος, μία μίξη με σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό με ίνες, μία με ενίσχυση σε ίνες χάλυβα και άλλη μια με ίνες βασάλτη. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν, ήταν η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε κάμψη και το πορώδες, για τις τρεις περιπτώσεις. Γενικά, αυτό που παρατηρήθηκε ήταν περισσότερη αντοχή στα δοκίμια με ίνες χάλυβα από ότι σε αυτά με βασάλτη, χωρίς ωστόσο σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις τιμές τους και αντίστοιχα μεγαλύτερη πυκνότητα και υψηλό πορώδες στο σκυρόδεμα RPC με τις χαλύβδινες ίνες.

Πίνακας 5: Συστατικά αντιδραστικού σκυροδέματος RPC σε σκόνη.

Τσιμέντο	Portland (Type I).
Νερό	Λόγος w/c = 0,24.
Πρόσθετα	Πυριτική παιπάλη, σε μέγεθος από 0–0.4 mm. Σκόνη χαλαζία, σε μέγεθος από 0–0.2 μm.
Ίνες	Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 12 x 0,2 mm Ίνες Βασάλτη: Μήκος: 12 x 18 μm

Συνεχίζοντας, οι **LEE S. et al. (2021)**, πραγματοποίησαν πειραματικές και αριθμητικές διαδικασίες, προκειμένου να γίνει παρατήρηση στην αντοχή σε κρούση με βλήμα και στην επιρροή του οπλισμού με χάλυβα στον στόχο σκυροδέματος. Ο οπλισμός των ράβδων χάλυβα εφαρμόζεται σε κατασκευές πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς χρειάζονται να έχουν επαρκή αντοχή σε κρούση από διάφορα φαινόμενα και να διατηρείται η ασφάλεια. Στις δοκιμές των δυο τύπων οπλισμένου χάλυβα (SD400 & SD600-S) γίνεται κρούση για την μελέτη της διείσδυσης, της αποκόλλησης, της διάτρησης και της επίδρασης του χάλυβα. Στο πάνελ του χάλυβα SD600-S οι ράβδοι έχουν ίδια διάμετρο με το SD400, αλλά έχουν περισσότερη απόσταση μεταξύ τους. Τα πάνελ του οπλισμένου σκυροδέματος, στα

οποία πραγματοποιείται η βολή με σκληρό βλήμα ειδικά σχεδιασμένο σε κυλινδρική μορφή για να αντιπροσωπεύει τις υψηλές δυνάμεις, έχουν διαστάσεις 2,1×2,1m. Ύστερα, από την κρούση φανερώνεται πως η αραιότερη διανομή των ράβδων, οδήγησε σε μείωση της αντοχής του σκυροδέματος, καθώς στο πρώτο πάνελ παρατηρήθηκε μόνο αποκόλληση, ενώ στο δεύτερο και διάτρηση. Κατά την διάρκεια των αριθμητικών αναλύσεων, τα αποτελέσματα για τις βλάβες στο σχήμα και το μέγεθος των πάνελ του οπλισμένου σκυροδέματος ήταν κοντά με εκείνα της πειραματικής φάσης των κρούσεων.



Εικόνα 5- Οι πλάκες του οπλισμένου σκυροδέματος μετά την πρόσκρουση: a) V100-SD400 b) V150-SD400 c) V200-SD400 d) V150-SD600-S. {LEE S. et al., 2021}

Οι **Dapper P.R., et al. (2021)**, σε σχέση με της προηγούμενες έρευνες μείωσαν την ποσότητα τσιμέντου και μελέτησαν την αντίδραση που είχαν λεπτές πλάκες κατασκευασμένες από σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής, έναντι βαλλιστικών κρούσεων. Τα πάχη των λεπτών πλακών που χρησιμοποιούνται είναι 30, 50 και 70 mm και οι διαστάσεις τους 500×500 mm. Σκοπός του πειράματος τους είναι με βάση υβριδικές ίνες, δηλαδή ίνες χάλυβα και ίνες πολυπροπυλενίου, αλλά και λίγη περιεκτικότητα τσιμέντου, να επιτευχθεί ένα σημαντικό ποσοστό αντοχής στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάστηκαν ήταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, εφελκυσμό, κάμψη και ανθεκτικότητα. Επιπλέον, λόγοι για τους οποίους έγινε χρήση υβριδικών ινών και λιγότερου τσιμέντου, πέραν από την ανθεκτικότητα, είναι η οικονομικότερη

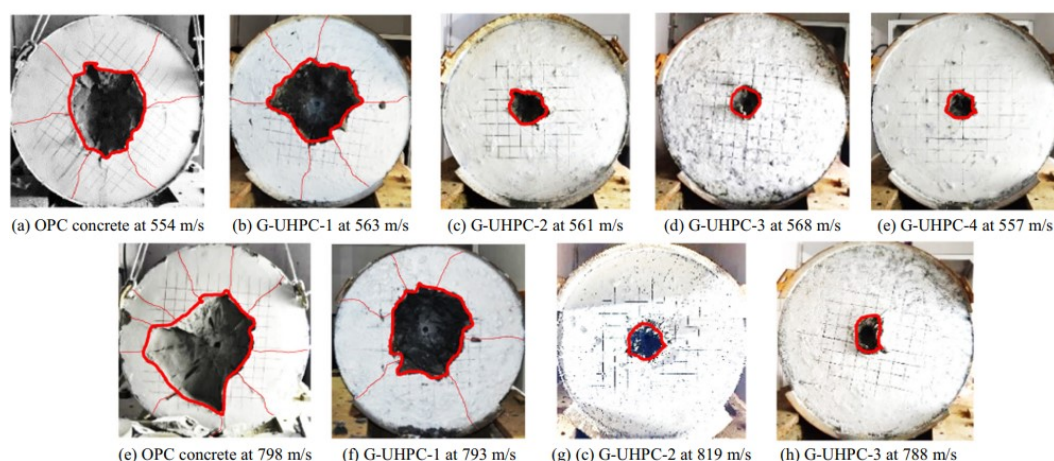
διαδικασία παραγωγής εξαιτίας του κόστους των υλικών και η μείωση των ρύπων που εκπέμπονται με το συνηθισμένο σκυρόδεμα. Η βολή στις λεπτές πλάκες που δημιουργήθηκαν, πραγματοποιήθηκε με όπλα που μπορούσαν να εκτοξεύσουν βλήματα διαφορετικών διαμετρημάτων. Η απόσταση των βολών έγινε στα 5 – 15 m. Η κάθε πλάκα υποβλήθηκε σε 5 βολές και τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν στο πέρας της κρούσης αφορούσαν το βάθος διάτρησης που δέχτηκε η κάθε πλάκα και η διάμετρος κατά την είσοδο και έξοδο της σφαίρας. Αυτό που παρατηρήθηκε ανάμεσα στα τρία πάχη των πλακών ήταν πως η πλάκα με το μικρότερο πάχος είχε λιγότερες ίνες σε σχέση με αυτή με το μεγαλύτερο. Ως αποτέλεσμα, τα δοκίμια με μεγαλύτερο πάχος λειτουργούσαν καλύτερα ενάντια των ρωγμών και απορροφούσαν περισσότερη ενέργεια κατά την κρούση από τα βλήματα.

Πίνακας 6: Σύσταση σκυροδέματος εξαιρετικά υψηλής απόδοσης με χρήση υβριδικών ινών.

Τσιμέντο	Brazilian (Type CP-II) με βάρος 252 kg/m ³ .
Νερό	Λόγος w/c = 0,25.
Πρόσθετα	Ιπτάμενη τέφρα: 108 kg/m ³ Πυριτική παιπάλη: 214 kg/m ³ Σκόνη χαλαζία: 292 kg/m ³ Μέτρια άμμος: 583 kg/m ³ Λεπτή άμμος: 496 kg/m ³
Ίνες	Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 21 μm x 13 mm Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1,2 – 2,4% Πολυπροπυλενίου ίνες: Μήκος: 12 μm x 6 mm Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 0,3 – 0,6%

Στο άρθρο των **Liu J. et al. (2021)**, μελετήθηκε σκυρόδεμα που έχει ως βάση γεωπολυμερή με προσθήκη ινών (G-UHPC), με αντοχή σε θλίψη από 100-150 MPa. Στο πειραματικό στάδιο επεξεργάστηκαν την αντίσταση που παρουσιάζει αυτός ο τύπος σκυροδέματος έναντι αντίστασης σε πρόσκρουση, σε σύγκριση με το κοινό σκυρόδεμα Portland Cement (OPC). Οι ταχύτητες κρούσης του βλήματος κυμαίνονταν περίπου από 550 έως 800 m/s. Σκοπός αυτής της σύγκρισης ήταν να εξεταστούν οι διαφορές ανάμεσα στους δύο τύπους σκυροδέματος, καθώς η παραγωγή τσιμέντου Portland αντιμετωπίζει οικονομικές δυσκολίες λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής και προκαλεί προβλήματα στην ατμόσφαιρα του περιβάλλοντος, αφού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Ως εκ τούτου, εξετάζεται η δυνατότητα να λειτουργήσει εναλλακτικά το γεωπολυμερές, προσφέροντας πιθανή αντικατάσταση με υλικό που είναι περιβαλλοντικά φιλικό και οικονομικά βιώσιμο. Αυτό το συνδετικό υλικό για το σκυρόδεμα έχει σημαντικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και σημαντική αντοχή σε θλίψη. Για τις ανάγκες του πειράματος η σύνδεση του γεωπολυμερούς συνδετικού έγινε, με σκωρία υψικαμίνου (GGBFS), ιπτάμενη τέφρα (FA) και πυριτική παιπάλη (SF). Κατά την πρόσκρουση στόχων από σκυρόδεμα (G-UHPC) που είναι ινοπλισμένο, παρατηρείται μείωση των ρωγμών και του μεγέθους του κρατήρα στην επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στις τριβές που προκαλούν οι ίνες κατά την εισβολή του βλήματος. Έτσι, οι ίνες προσφέρουν καλύτερη αντοχή στην θλίψη, στην ελαστικότητα, στην σκληρότητα και στην διατμητική αντοχή.



Εικόνα 6- Μεγέθη κρατήρων από σκυρόδεμα και από γεωπολυμερές στις δυο διακυμάνσεις ταχυτήτων. {Liu J. et al., 2021}

Πίνακας 7: Σύσταση σκυροδέματος εξαιρετικά υψηλής απόδοσης με βάση γεωπολυμερή.

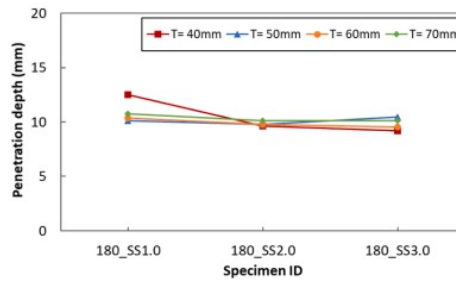
Γεωπολυμερή	Σκωρία υψικαμίνου (2900 kg/m^3) Ιπτάμενη τέφρα (2400 kg/m^3) Πυριτική παιπάλη (2330 kg/m^3)
Νερό	Λόγος $w/c = 0,3$.
Αδρανή	Λεπτόκοκκα αδρανή. Εξαιρετικά λεπτή άμμος: Μέγεθος $3\mu\text{m}$ (0,1 κ.β. συνδετικού υλικού). Λεπτή άμμος: Μέγεθος $150-200\mu\text{m}$ (0,38 κ.β. συνδετικού υλικού). Μέτρια λεπτή άμμος: Μέγεθος $200-400\mu\text{m}$ (0,2 κ.β. συνδετικού υλικού). Χονδροειδής άμμος: Μέγεθος $400-800\mu\text{m}$ (0,15 κ.β. συνδετικού υλικού).
Ίνες	<i>Μακριές ίνες χάλυβα:</i>

	<p>Μήκος: 15 x 0,12 mm Γεωμετρία: Μακριές Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1 – 2,5%</p> <p>Κοντές ίνες χάλυβα: Μήκος: 10 x 0,12 mm Γεωμετρία: Κοντές Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 2%</p> <p>Ίνες Βασάλτη: Μήκος: 15 x 0,02 mm Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1%</p>
--	---

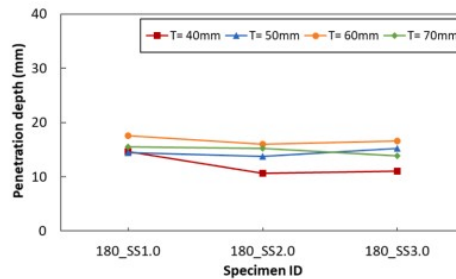
Ως εξέλιξη στην έρευνα των **Lee MJ, et al. (2022)**, εξετάστηκε η απόδοση που παρουσιάζουν οι τσιμεντόπλακες υπερυψηλής αντοχής στην κρούση, με την χρήση ινών. Ουσιαστικά, εφάρμοσαν πειραματικά και αριθμητικά μοντέλα, προκειμένου στην πρώτη περίπτωση να αναλυθεί η διείσδυση και η αποκόλληση, ενώ στην δεύτερη με την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης διερευνήθηκε η καταπόνηση των πλακών. Το σύνολο της διάταξης του πειράματος είχε το σύστημα εκτόξευσης βλήματος, το οποίο έπιασε ταχύτητες από 170 έως 330 περίπου m/s και οι πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 20x20 εκατοστά και τέσσερα διαφορετικά πάχη (40, 50, 60, 70 mm). Ωστόσο, το μίγμα των πλακών αποτελούνταν από το συνδετικό υλικό τσιμέντο Πόρτλαντ, νερό, ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη. Ως αποτέλεσμα των δοκιμών, διαπιστώθηκε πως το βάθος διείσδυσης του βλήματος επηρεάζεται από την θλιπτική αντοχή, καθώς όσο μεγαλώνει το κλάσμα όγκου των χαλύβδινων ινών, τόσο λιγότερη είναι η παρατηρούμενη διείσδυση του βλήματος και το αντίστροφο. Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έδειξε το αριθμητικό μοντέλο, η θλιπτική ικανότητα επιδρά στο μέγεθος των κρατήρων και της απολέπισης των τοιχωμάτων.

Πίνακας 8: Σύσταση υψηλής απόδοσης σκυροδέματος ενισχυμένο με ίνες.

Τσιμέντο	Portland (Type I).
Νερό	Λόγος w/c = 0,2.
Ίνες	<p>Χαλύβδινες ίνες: Μήκος: 19,5 x 0,2 mm Γεωμετρία: Ευθεία άκρα Περιεκτικότητα κατ' όγκο: 1 – 3%</p>



(a)



(b)

Εικόνα 7 - Διάγραμμα για τέσσερα πάχη των βαθών διείσδυσης στις δύο ταχύτητες α) 170 m/s και β) 330 m/s.

Με βάση την ερευνητική δραστηριότητα που προαναφέρθηκε, γίνεται φανερό πως αυτές εξελίσσονται στην μελέτη υλικών με μεμονωμένες ιδιότητες και στην εξέταση προηγμένων συνθέσεων, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για αντίσταση σε κρούσεις. Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, έγινε προσπάθεια για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, να παρασκευαστούν συνθέσεις οι οποίες θα είχαν μείωση του συνδετικού υλικού, δηλαδή το τσιμέντο, χωρίς ωστόσο να μειωθούν οι αντοχές. Η διαφοροποίηση συγκριτικά με τις προγενέστερες έρευνες, είναι στο γεγονός ότι πέραν από την μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος, τα υλικά των συνθέσεων είναι ασβεστολιθικά αδρανή, πολύ λεπτόκκοκα (πυριτικά) αδρανή και νανοσωματίδια, ενώ παράλληλα το σκυρόδεμα είναι αυτοσυμπυκνούμενο. Έτσι με βάση αυτές τις διαφορές γίνεται η πειραματική διαδικασία. Στις μετέπειτα παραγράφους αναλύονται στοιχεία που αφορούν στην τεχνολογία σκυροδέματος, όπως η παραγωγή του, η σημασία του οπλισμού και της ανθεκτικότητας του.

Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος

Κατά την διαδικασία παραγωγής, ή αλλιώς την φάση μίξης, γίνεται ο συνδυασμός των κονιαμάτων και των άλλων υλικών για την τελική παραγωγή του προϊόντος. Για

την διαδικασία παραγωγής συνήθως χρησιμοποιούνται εργαστήρια σκυροδέματος και ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Σύνθεση υλικών: Στην διάρκεια της πρώτης φάσης περιλαμβάνεται η συλλογή και η προετοιμασία των απαραίτητων υλικών για την παραγωγή. Σε αυτά εντάσσονται το νερό, το τσιμέντο, τα αδρανή υλικά, τα πρόσθετα, η άμμος, το χαλίκι και ενδεχομένως κι άλλα υλικά, ανάλογα με τον τύπο του σκυροδέματος και το αποτέλεσμα που παράγεται.
2. Ανάμιξη: Οι πρώτες ύλες μεταβιβάζονται σε έναν αναδευτήρα (μίξερ), όπου ομογενοποιούνται και αναμειγνύονται με τέτοιο τρόπο προκειμένου να παραχθεί μια ομοιόμορφη μάζα. Η σειρά και η ακριβείς ποσότητες των υλικών που ενσωματώνονται, καθορίζεται από τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του κάθε έργου κατασκευής. Η διαδικασία της ομοιογένειας επιτυγχάνεται με την περιστροφικότητα του μπλέντερ και συνήθως έχει μια χρονική διάρκεια ώστε να διασφαλιστεί αυτή η ομοιομορφία των προϊόντων που συνθέτουν το σκυρόδεμα. Για την ανάμιξη του ΑΣΣ η σειρά των υλικών ξεκινά από τα στερεά υλικά και συγκεκριμένα από τα πιο χονδρόκοκκα αδρανή προς τα πιο λεπτά και καταλήγει στα υγρά, που είναι το νερό και τα πρόσμικτα. Επιπλέον, αυτός ο τύπος σκυροδέματος απαιτεί περισσότερο χρόνο ανάμιξης σε αντίθεση με το συμβατό σκυρόδεμα.
3. Διακομιδή: Η διαδικασία στην οποία το σκυρόδεμα μεταφέρεται και εφαρμόζεται στην κατασκευή. Για την μεταφορά γίνεται χρήση αντλιών σκυροδέματος, περιεκτικών μεταφορέων ή ακόμη με την χειρονακτική εφαρμογή.
4. Διάστρωση – Συμπύκνωση: Με την διάστρωση το υλικό τοποθετείται σε ειδικά καλούπια, μήτρες ή πλέγματα, ενώ στην συνέχεια γίνεται η συμπύκνωση του με στόχο την εξάλειψη του αέρα που υπάρχει εντός του σκυροδέματος. Ο λόγος που χρειάζεται αυτό το βήμα είναι για την επίτευξη της μέγιστης πυκνότητας και αντοχής του. Για την συμπύκνωση χρησιμοποιούνται ειδικά εργαλεία όπως δονητές, επιτρέποντας έτσι στο υλικό να καταλαμβάνει κάθε σημείο του χώρου στο οποίο βρίσκεται, αφαιρώντας με αυτό τον τρόπο τον εναπομείναντα αέρα και φτάνοντας στην τελική μορφή. Ωστόσο στο ΑΣΣ δεν χρειάζεται να γίνει κάποιου είδους δόνησης, αφού οι

προδιαγραφές του είναι τέτοιες ώστε να μην συγκρατείται αέρας στο μίγμα του.

5. Συντήρηση: Η συντήρηση είναι ένας σημαντικός παράγοντας ώστε να διατηρηθεί η αντοχή και η λειτουργικότητα του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου και να αποφευχθούν οι φθορές και η διάβρωση του. Οι πρακτικές που περιλαμβάνει είναι η εφαρμογή ειδικών προστατευτικών μεμβρανών από ειδικά υλικά για το αρχικό προληπτικό στάδιο, όπου ουσιαστικά εμποδίζεται η επιρροή της υγρασίας, των χημικών ουσιών και την έκθεση γενικότερα στις εξωγενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ στην συνέχεια υπάρχουν πρακτικές που συμβάλλουν στην επισκευή και την ανανέωση του σκυροδέματος στις οποιοσδήποτε ζημιές έχει υποστεί. Για το ΑΣΣ η συντήρηση του είναι ευκολότερη συγκριτικά με το συμβατό σκυρόδεμα, εξαιτίας της απουσίας νερού εξίδρωσης.

Τα παραπάνω βήματα συντάσσουν την ροή που εφαρμόζεται για την παραγωγή του σκυροδέματος. Γενικά τα συστατικά σύνθεσης και παραγωγής του ΑΣΣ είναι αντίστοιχα με το συμβατό σκυρόδεμα, με την διαφορά πως χρειάζονται υψηλές ποσότητες προσμίκτων, ρευστοποιητών και υπερευστοποιητών, καθώς και περισσότερα λεπτόκοκκα αδρανή για την σύσταση του. Επιπλέον, βασικό πλεονέκτημα του ΑΣΣ, το οποίο και το καθιστά από τα πιο αειφορικά σε σχέση με άλλους τύπους σκυροδεμάτων, αποτελεί το ότι δεν καταναλώνει ενέργεια για διάστρωση και συμπύκνωση. Το κάθε ένα βήμα έχει την δική του σημασία και συμβολή στο τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τις τεχνολογίες, τις απαιτήσεις και τις πρακτικές που εφαρμόζονται τόσο για κάθε έργο, όσο και από χώρα σε χώρα.

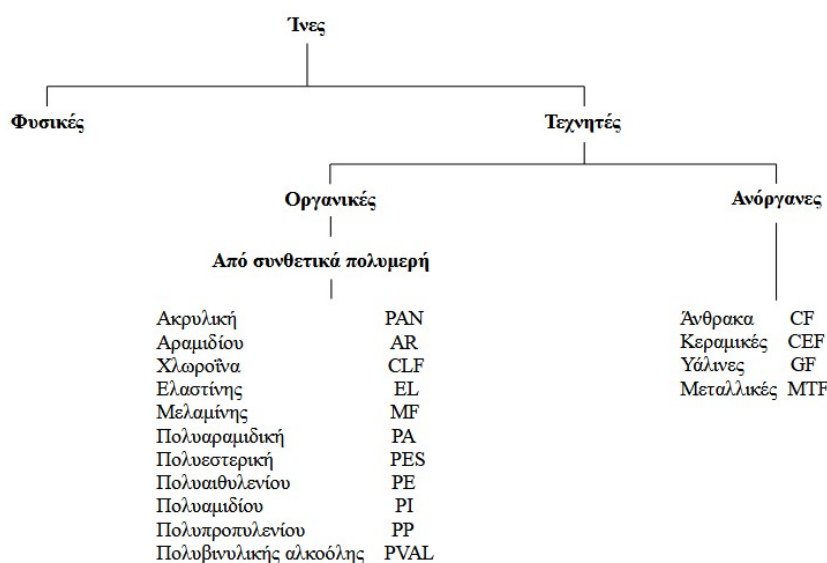
Σημασία οπλισμού σκυροδέματος

Ο οπλισμός στο σκυρόδεμα περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός συνόλου από χαλύβδινες ράβδους ή πλέγματος από χάλυβα (ή και άλλα υλικά), το οποίο εντάσσεται στο εσωτερικό του, προκειμένου να του προσθέσει αντοχή στις εφελκυστικές δυνάμεις που επιδέχεται. Με την εφαρμογή αυτή, αυτό που συμβαίνει είναι ο οπλισμός να δέχεται τελικά το μεγαλύτερο μέρος των κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων, ενώ το σκυρόδεμα τις δυνάμεις των τάσεων και τις πιέσεις. Επί

της ουσίας, οι ράβδοι και τα πλέγματα βοηθούν στην πρόληψη των ρωγμών και της ανεπιθύμητης παραμόρφωσης του σκυροδέματος. Είναι γνωστό πως ο χάλυβας ως υλικό έχει υψηλή εφελκυστική αντοχή, ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζει υψηλή θλιπτική αντοχή. Μερικά πλεονεκτήματα που έχει ως προς την αντοχή του είναι στην διάτμηση, στην κρούση, στην κάμψη και στις υψηλές θερμοκρασίες. Συνδυαστικά, καθίσταται αποτελεσματικό σε κατασκευές κτιρίων, σε γέφυρες και για αντισεισμικούς σκοπούς. Το κρίσιμο στοιχείο του οπλισμού αποτελεί η ανθεκτικότητα του για ασφαλή και μακροχρόνια έργα, κατανέμοντας όλες τις υποδεχόμενες δυνάμεις, καταπονήσεις και πιέσεις ομοιόμορφα.

Σημασία ινοπλισμένου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC --- Fiber Reinforced Concrete) χρησιμοποιείται ως ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την αποφυγή της αστοχίας σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ασκούνται φορτία ή τίθενται σε δοκιμές θλίψης, κάμψης ή εφελκυσμού. Επί της ουσίας, στο αρχικό μίγμα του σκυροδέματος γίνεται προσθήκη ινών, σε διάφορα είδη, ανάλογα με το αποτέλεσμα το οποίο χρειάζεται να επιτευχθεί και δίχως συγκεκριμένη διάταξη, θεωρώντας και προσπαθώντας, όμως, για ομοιόμορφη κατανομή στη μάζα του τελικού προϊόντος. Τα είδη των ινών διαχωρίζονται με βάση το υλικό τους, το σχήμα και το μέγεθος τους. Οι δημοφιλέστερες ίνες είναι εκείνες του χάλυβα, του γυαλιού και του πολυπροπυλενίου. Γενικά, οι διαστάσεις τους κυμαίνονται σε λίγα εκατοστά κατά μήκος και σε χιλιοστά κατά πάχος, ενώ το ποσοστό που καταλαμβάνουν στο συνολικό μίγμα φτάνει το 1 – 3 %, όπως επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε. Αυτό που επιτυγχάνεται με την χρήση ινών, είναι η αύξηση της αντοχής σε εφελκυστικές δυνάμεις και συνεπώς η μείωση των ρηγματώσεων, η διατήρηση της κατασκευής στην οποία χρησιμοποιήθηκαν με στόχο την περισσότερη διάρκεια ζωής της, η ελάττωση της θραυστότητας των υλικών, ειδικά ύστερα από πίεση φορτίων. Επιπρόσθετα, οι ίνες συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της αντοχής του σκυροδέματος έναντι κρούσεων, όπως θα δούμε και στην συνέχεια της μελέτης κατά το πειραματικό στάδιο.



Εικόνα 8 - Τα βασικά είδη ινών σύμφωνα με το Διεθνές γραφείο τυποποίησης τεχνητών ινών {BISFA 2009}

Πίνακας 9: Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους. {Παπακώστα & Τσιάρα, 2015}

Τύπος Ινών	Εφαρμογές
Υάλου	Επίχριση τοίχων πλήρωσης, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χαλύβδινες	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις σηράγγων, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλενίου	Πάσσαλοι θεμελίωσης, πρεοντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, μπαλώματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Άνθρακα	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Φυτικές ίνες	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

Γενικά, για συγκεκριμένα τεχνικά έργα, η τεχνολογία του ινοπλισμένου σκυροδέματος θεωρείται καταλληλότερη από αυτήν του συμβατικού οπλισμένου σκυροδέματος. Μερικά έργα στα οποία γίνεται χρήση είναι τα παρακάτω:

- Επένδυση σηράγγων
- Ενίσχυση πρανών
- Μεταλλεία
- Στοές διεύρυνσης, αποστράγγισης και αποχέτευσης
- Υδραυλικά έργα, οχετοί
- Κατασκευή οικημάτων
- Έργα οδοποιίας
- Κατασκευή προϊόντων ανθεκτικά σε εκρήξεις
- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λιμένες, φράγματα, κανάλια
- Έργα που χρήζουν θερμομονωτική επένδυση

Ακόμα η χρήση του γίνεται και για σκοπούς επισκευής ήδη υπάρχοντων κατασκευών από σκυρόδεμα όπως:

- Υποστήριξη σηράγγων (λόγω ζημιών που παρατηρούνται από σεισμούς ή πυρκαγιές)
- Γέφυρες
- Κτίρια
- Τοίχους αντιστήριξης
- Δεξαμενές
- Έργα άρδευσης
- Προβλήτες, διαφράγματα, φάροι

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος στα έργα, καταγράφονται παρακάτω:

- Με τις ίνες, το σκυρόδεμα αποκτά πλάσιμη συμπεριφορά, σε σχέση με την ψαθυρή που το χαρακτηρίζει ως άοπλο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτή η ιδιότητα, είναι εξαιτίας της απορρόφησης της ενέργειας που πραγματοποιείται από τις ίνες πριν το στάδιο της αστοχίας κατά την φόρτιση του δοκιμίου. Ουσιαστικά, παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές τάσεις κάνοντας έτσι πιο ισχυρή την πλαστιμότητα του συνολικού υλικού.
- Με τις ίνες, αδρανοποιούνται ως ένα βαθμό οι ρηγματώσεις και οι συστολές που συμβαίνουν από τις υψηλές θερμοκρασίες ή την ξηρασία.
- Με τις ίνες, αποφεύγονται οι τάσεις διόγκωσης του σκυροδέματος.
- Με τις ίνες, γίνεται πιο σταθερή η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε καταστάσεις ταλάντωσης ή στρέψης, όπως στην περίπτωση των σεισμών.
- Ο τυχαίος προσανατολισμός τους δημιουργεί ένα ομοιογενές αποτέλεσμα, ενισχύοντας τη μάζα του σκυροδέματος προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα διαθέτει υψηλές αντοχές σε κάμψη, κρούσεις, διάτμηση και παράλληλα σημαντική ανθεκτικότητα στην θραύση.
- Με τις ίνες, γίνεται διόρθωση υπαρχόντων κατασκευών που κρίνονται σε επισκευή, καθώς η διαδικασία παραγωγής και εναπόθεσης χαρακτηρίζεται καλύτερη συγκριτικά με την διαδικασία για το απλό οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιούνται ίνες σε επισκευαστικά κονιάματα αλλά και σε εφαρμογές

εκτεταμένων επισκευών μελών από Ο.Σ. όπως για παράδειγμα σε μίγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

- Σημαντικό χαρακτηριστικό των ινών από χάλυβα, είναι η μειωμένη παρατήρηση διάβρωσης, γεγονός που συμβαίνει λόγω του μικρού μεγέθους που έχουν, με αποτέλεσμα η χημική αντίδραση των οξέων να μην είναι σημαντική.
- Με τις ίνες, αποφεύγεται το φαινόμενο της αποκόλλησης (ξεφλούδισμα) στα τοιχώματα της κάθε κατασκευής. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως, η επίδραση των σεισμών, της υγρασίας κ.α.

Ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ)

Η ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό στον τομέα της κατασκευής και της υλοποίησης δομικών έργων. Ενόψει των διαφορετικών προκλήσεων που εμπεριέχονται στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού και κατασκευής, η ανάπτυξη υλικών που να προσφέρουν τόσο υψηλή απόδοση όσο και ευελιξία αποτελεί πρωταρχικό και στρατηγικό στόχο.

Η ανθεκτικότητα του ΑΣΣ δεν εξαρτάται μόνο από τη σύσταση του μίγματος, αλλά και από μια πολύπλοκη σειρά παραγόντων που επηρεάζουν τη μηχανική του συμπεριφορά. Σε αυτούς συγκαταλέγονται η ποιότητα των υλικών που απαρτίζουν το μίγμα, η ομοιογένεια της κατανομής των υλικών, η επεξεργασία και η τοποθέτηση του σκυροδέματος, καθώς και οι μέθοδοι ελέγχου ποιότητας που χρησιμοποιούνται.

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι η σύνθεση του μίγματος, που πρέπει να επιλεγεί με προσοχή για να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ ανθεκτικότητας και ευκολίας εφαρμογής. Η χρήση υψηλής ποιότητας και εντελώς ελεγχόμενων υλικών, όπως το κονίαμα, οι τέφρες και οι πρόσθετες ουσίες, συμβάλλει στην αύξηση της ανθεκτικότητας του ΑΣΣ.

Επιπλέον, η σωστή επεξεργασία και τοποθέτηση του ΑΣΣ είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της ομοιογενούς κατανομής των υλικών σε όλο τον όγκο του σκυροδέματος, καθώς και για την αποφυγή πιθανών αεροπόρων που μπορούν να επηρεάσουν την τελική ανθεκτικότητά του. Τέλος, οι κατάλληλες μέθοδοι ελέγχου ποιότητας πρέπει να εφαρμόζονται προσεκτικά κατά τη διαδικασία παραγωγής και εφαρμογής του ΑΣΣ, προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωσή του με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 3^ο : Ενεργειακό αποτύπωμα – Μελέτη σύνθεσης - Συστατικά

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελέτης σκοπός ήταν η σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με κατάλληλη επιλογή υλικών, τα οποία θα απέδιδαν σε χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα. Έτσι πραγματοποιήθηκε η παρασκευή κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 100*100*100 mm, τα οποία τα δανειστήκαμε από το Εργαστήριο του Οπλισμένου Σκυροδέματος στο ΕΜΠ και η όλη διαδικασία σύνθεσης διαδραματίστηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Κύριος στόχος των συνθέσεων σκυροδέματος που παρήχθησαν, ήταν η δημιουργία δοκιμαστικών μιγμάτων, τέτοιων ώστε με μειωμένη ποσότητα τσιμέντου σε σχέση με το βιομηχανικό πρότυπο, να διατηρηθούν οι αντοχές υπό μονοαξονικά θλιπτικά φορτία. Πιο συγκεκριμένα, ο συνολικός αριθμός δοκιμίων που παρασκευάστηκαν ήταν 30, αλλά με τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις. Ουσιαστικά, στη πρώτη σύνθεση η τροποποίηση βασιζόταν μεταξύ της αναλογίας τσιμέντο – ασβεστόλιθος και η δεύτερη σύνθεση στην αλλαγή της κοκκομετρίας των υλικών. Μετά από την κάθε μια σύνθεση πραγματοποιήθηκε αντίστοιχα η ίδια, με την μόνη διαφορά την προσθήκη νανοσωματιδίων SiO₂. Ο λόγος ενσωμάτωσης των νανοσωματιδίων έγινε προκειμένου να καταγραφούν παρατηρήσεις στην συμπεριφορά του σκυροδέματος και αν συμβάλλουν τελικά στην προσπάθεια για μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος με ταυτόχρονη στόχευση την αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Η αναλυτικότερη καταγραφή των υλικών και των αποτελεσμάτων γίνεται στις παρακάτω παραγράφους του κεφαλαίου.

Η έννοια του ενεργειακού αποτυπώματος

Κατά την διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος, που αποτελεί μια ενεργοβόρα διαδικασία, η κατανάλωση ενέργειας και η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), αγγίζουν υψηλές τιμές. Το ενεργειακό αποτύπωμα αυτής της διαδικασίας μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους. Καταρχάς, η ενέργεια που απαιτείται για την έψηση των πρώτων υλών, όπως τα χονδρόκοκα και λεπτόκοκα αδρανή υλικά (π.χ. άμμος, γαρμπίλι, πούδρες), σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να χρησιμοποιηθούν στη παραγωγή του σκυροδέματος.

Επιπλέον, η χρήση ηλεκτρικού ρεύματος είναι αναγκαία για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής, όπως η ροή υλικών, η ανάμιξη και η μεταφορά τους. Τέλος, οι εκπομπές CO₂ προκύπτουν από τη θέρμανση των υλικών και τη χημική αντίδραση κατά τη διάρκεια της παραγωγής, κυρίως από την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Συνεπώς η επίτευξη για μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος στην παραγωγή σκυροδέματος είναι ουσιώδους σημασίας, καθώς οι ανάγκες για κατασκευαστικά έργα ολοένα και αυξάνονται, ενώ παράλληλα χρειάζεται να βρεθούν καινοτόμες λύσεις που θα προστατεύσουν το περιβάλλον και την ατμόσφαιρα. Για την περίπτωση του σκυροδέματος, η υιοθέτηση πρακτικών που συνεισφέρουν θετικά στην μείωση των εκπομπών και στη κατανάλωση ενέργειας, θα μπορούσαν να είναι διαφοροποιήσεις στα υλικά σύνθεσης, στις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται, στην ενσωμάτωση ανακύκλωσης των υλικών, αλλά και στην βελτίωση των εγκαταστάσεων/βιομηχανιών παραγωγής. Στο πειραματικό αυτό μέρος, όπως έχει προαναφερθεί η προσπάθεια για την μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος, γίνεται με διάφορες παραμέτρους, όπως η χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, η μείωση της ποσότητας του τσιμέντου και η ενσωμάτωση νανοτεχνολογικών υλικών στο σκυρόδεμα.

Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος

Ως αρχικό πρότυπο σύγκρισης χρησιμοποιήσαμε την βιομηχανική προτυποποιημένη σύνθεση της ALFA TEST – ΑΡΜΟΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ, κατά την οποία η ακολουθούμενες προδιαγραφές καλύπτονται από EN 206-1+NA / Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016, καθώς και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που προκύπτουν ως αποτέλεσμα αυτών.

Πίνακας 10: Σύσταση και αποτελέσματα δοκιμών ΑΣΣ από εταιρία ΑΡΜΟΣ

Τύπος Υλικών	Προέλευση	Συμμετοχή υλικών (kg/m ³ σκυροδέματος)
Άμμος 0/4	ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΛΑΤΟΜΕΙΑ	1167
Γαρμπίλι 2/11	A.E.	580
Τσιμέντο CEM I 42,5R	TITAN ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	420
Νερό	ΑΡΜΟΣ ΛΑΡΙΣΑ / ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ1	190

CHRYSO FLUID PREMIA 184	NORDIA A.E.	4,93 (1,17% κ.β. τσιμέντου)
CHRYSO QUAD 20	NORDIA A.E.	3,5 (0,83% κ.β. τσιμέντου)
Λόγος N/T (Ολικός)		0,45
Λόγος N/T (Ενεργός)		0,42
{ Οι ποσότητες αδρανών αφορούν ξηρά υλικά }		

Δοκιμή	Ακολουθούμενο Πρότυπο	Αποτελέσματα	
Αεροπεριεκτικότητα (%)	EN 12350-7	4,0	
Φαινόμενο Βάρος tn/m ³	EN 12350-6	2,365	
Εξάπλωση (cm)	EN 12350-5	0 min	30 min
		dm	73 66
		dr	73 62
		T500 (sec)	1,97 2,52

Συνεχίζοντας παρακάτω, παρουσιάζονται οι ανάλογοι πίνακες για τις συνθέσεις των δικών μας μιγμάτων.

→ 1^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler).

Πίνακας 11: Σύσταση ΑΣΣ με 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler).

Τύπος Υλικών	Προέλευση	Συμμετοχή υλικών (kg/m ³ σκυροδέματος)
Άμμος 0/4		1167
Γαρπίλι 2/11		580
Ασβεστόλιθος		126
Τσιμέντο CEM I 42,5R	TITAN ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	294
Νερό	Δίκτυο ΔΕΥΑ	176,4
CHRYSO OPTIMA – G9610	NORDIA A.E.	110
CHRYSO OPTIMA – G91	NORDIA A.E.	180
Λόγος N/T		0,42
{ Οι ποσότητες αδρανών αφορούν ξηρά υλικά }		

→ 2^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη νανοσωματιδίων SiO₂.

Πίνακας 12: Σύσταση ΑΣΣ με 70% τσιμέντο, 30% ασβεστόλιθο (filler) και νανοσωματίδια SiO₂.

Τύπος Υλικών	Προέλευση	Συμμετοχή υλικών (kg/m ³ σκυροδέματος)
Άμμος 0/4		1167
Γαρμπίλι 2/11		580
Ασβεστόλιθος		126
Τσιμέντο CEM I 42,5R	TITAN ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	294
Νερό	Δίκτυο ΔΕΥΑ	176,4
CHRYSO OPTIMA – G9610	NORDIA A.E.	180
CHRYSO OPTIMA – G91	NORDIA A.E.	185
Ποσότητα νερού σε αιώρημα		9,8
Ποσότητα αιωρήματος		14
Πυριτικά νανοσωματίδια		4,2
Λόγος N/T		0,416
{ Οι ποσότητες αδρανών αφορούν ξηρά υλικά }		

→ 3^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler).

Πίνακας 13: Σύσταση ΑΣΣ με 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler).

Τύπος Υλικών	Προέλευση	Συμμετοχή υλικών (kg/m ³ σκυροδέματος)
Άμμος 0/4		1167
Γαρμπίλι 2/11		580
Ασβεστόλιθος		84
Τσιμέντο CEM I 42,5R	TITAN ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	336
Νερό	Δίκτυο ΔΕΥΑ	176,4
CHRYSO OPTIMA – G9610	NORDIA A.E.	245
CHRYSO OPTIMA – G91	NORDIA A.E.	70
Λόγος N/T		0,42
{ Οι ποσότητες αδρανών αφορούν ξηρά υλικά }		

→ 4^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη πυριτικών νανοσωματιδίων SiO₂.

Πίνακας 14: Σύσταση ΑΣΣ με 80% τσιμέντο, 20% ασβεστόλιθο (filler) και νανοσωματίδια SiO₂.

Τύπος Υλικών	Προέλευση	Συμμετοχή υλικών (kg/m ³ σκυροδέματος)
Άμμος 0/4		1167
Γαρμπίλι 2/11		580
Ασβεστόλιθος		84
Τσιμέντο CEM I 42,5R	TITAN ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	336
Νερό	Δίκτυο ΔΕΥΑ	176,4
CHRYSO OPTIMA – G9610	NORDIA A.E.	330
CHRYSO OPTIMA – G91	NORDIA A.E.	70
Ποσότητα νερού σε αιώρημα		9,8
Ποσότητα αιωρήματος		14
Πυριτικά νανοσωματίδια		4,2
Λόγος N/T		0,416
{ Οι ποσότητες αδρανών αφορούν ξηρά υλικά }		

Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ-Self consolidating concrete)

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποτελεί έναν καινοτόμο τύπο σκυροδέματος με ιδιαίτερες ιδιότητες που το καθιστούν ενδιαφέρον από ενεργειακής άποψης. Η κύρια του ιδέα είναι να μειώσει την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, εφαρμογή και συντήρηση του σκυροδέματος, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών προσθέτων και υλικών.

Οι ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος συνδυάζουν τις παραδοσιακές ιδιότητες του σκυροδέματος με τα πρόσθετα οφέλη της αυτοσυμπύκνωσης. Η κύρια ιδιότητά του είναι η αυτόματη αποκατάσταση της μορφής του και η ομοιογενής κατανομή των υλικών μέσα σε έναν δομικό φορέα, χωρίς την ανάγκη για εξωτερική εφαρμογή δονήσεων. Αυτό οφείλεται στην ειδική σύνθεση του, η οποία επιτρέπει την αυτόματη ροή και εξομάλυνση του υλικού κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του.

Επιπλέον, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα εμφανίζει υψηλή αντοχή στη θλίψη, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτικό σε μηχανικές δυνάμεις και επιβαρύνσεις. Αυτό μπορεί να μειώσει την ανάγκη για ενισχυτικά υλικά ή μέθοδοι ενίσχυσης, με

αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την παρασκευή του και την αυξημένη αποτελεσματικότητά του.

Συνολικά, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας, μειώνοντας ταυτόχρονα το ενεργειακό αποτύπωμα στην παραγωγή, εφαρμογή και συντήρησή του.

Ασβεστόλιθος (filler)

Μια ανάλυση των ιδιοτήτων του ασβεστόλιθου στην παραγωγή σκυροδέματος παρουσιάζεται παρακάτω:

Αντοχή: Η χημική δομή του ασβεστόλιθου συμβάλλει στην αντοχή του σκυροδέματος κυρίως λόγω της χημικής του δομής. Κατά την ανάμειξη του με νερό, ο ασβεστόλιθος δημιουργεί ισχυρούς συνδέσμους οι οποίοι βοηθούν στις αντοχές και την συμπίεση που μπορεί να δεχτεί το τελικό προϊόν του σκυροδέματος.

Εργασιμότητα: Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του ασβεστόλιθου είναι πώς βοηθάει στη βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Προσθέτοντας ασβεστόλιθο στο μείγμα, καταφέρνουμε να κάνουμε το σκυρόδεμα πιο εύκαμπτο και πιο ελαφρύ, γεγονός που καθιστά πιο απλή τη διαδικασία εφαρμογής του. Επιπλέον, αυτή η προσθήκη επιτρέπει τη δημιουργία διαφόρων σχημάτων και δομών χωρίς να υποχωρεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Σταθερότητα: Ο ασβεστόλιθος παρέχει σταθερότητα στο σκυρόδεμα, τόσο χημική όσο και φυσική και είναι ένα σταθερό υλικό ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες.

Ενεργειακή απαίτηση: Το ενεργειακό αποτύπωμα που καταλαμβάνει ο ασβεστόλιθος περιλαμβάνει τα στάδια εξόρυξης, επεξεργασίας, μεταφοράς και εφαρμογής του στην διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος. Παρόλο που οι ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται στα πρώτα στάδια είναι υψηλές, αντισταθμίζονται κατά την χρήση του στην παραγωγή σκυροδέματος, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του στην αντοχή και την απόδοση του σκυροδέματος.

Υπερρευστοποιητές

Οι υπερρευστοποιητές διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στα ΑΣΣ. Σύμφωνα με το Δελτίο Τεχνικών στοιχείων (technicaldatasheetTDS) των δύο υπερρευστοποιητών:

- “Το CHRYSO® Optima G9610 είναι υπερρευστοποιητής - μειωτής νερού υψηλής δραστηριότητας, κατάλληλος για την παραγωγή μειγμάτων σκυροδέματος με απαιτήσεις παρατεταμένης διατήρησης εργασιμότητας. Είναι ιδιαίτερος κατάλληλος για χρήση σε μείγματα με αδρανή που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στα χαρακτηριστικά τους (φυσικά, γεωμετρικά & μηχανικά). Επιπλέον, επαυξάνει την ανάλυση πρώιμων αντοχών, μόλις το μείγμα περάσει στη φάση ακαμψίας (stiffness).”
- “Το CHRYSO® Optima G91 είναι υπερρευστοποιητής με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα. Λόγω των χημικών του χαρακτηριστικών, επιτρέπει ταυτόχρονα την ισχυρή μείωση του νερού και τη βέλτιστη διατήρηση της εργασιμότητας ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες σκυροδέματος, χωρίς καμιά επίδραση στην ανάπτυξη των πρόωρων μηχανικών αντοχών. Η αποτελεσματικότητα της δύναμης διασποράς των μορίων του CHRYSO® OptimaG91 έχει βελτιστοποιηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να εγγυάται τον απαραίτητο χρόνο μεταφοράς και σκυροδέτησης ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Σωματίδια νανοπυριτίας (nanosilica)

Η νανοπυριτία είναι μια μορφή νανοσωματιδίου, που παρουσιάζει ενδιαφέρουσες δυνατότητες εφαρμογής στην βελτίωση ειδικών υλικών, αλλά και του σκυροδέματος, εξαιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων που προσφέρει σε αυτή την μικρή κλίμακα. Όταν προστίθεται νανοπυριτία στο σκυρόδεμα, ενισχύεται η αντοχή του υλικού στη θλίψη και στην τάση για εκτεταμένη καταστροφή. Αυτό σημαίνει ότι το σκυρόδεμα μπορεί να αντέχει καλύτερα σε μηχανικά φορτία και πιέσεις, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό και αξιόπιστο. Επιπλέον, η νανοπυριτία μπορεί να βελτιώσει την πυκνότητα και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στη διάβρωση, διατηρώντας την δομική του ακεραιότητα με το πέρασμα του χρόνου.

Η λειτουργία της νανοπυριτίας στο σκυροδέμα συνδέεται με την μοριακή και μηχανική του δομή. Τα νανοσωματίδια μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα υπόλοιπα υλικά του σκυροδέματος, δημιουργώντας πιο ανθεκτικούς δεσμούς μεταξύ τους και βελτιώνοντας την συνολική δομική ακεραιότητα του υλικού. Αυτό οδηγεί σε μια ομοιογενή κατανομή των υλικών στο εσωτερικό του σκυροδέματος και βελτιώνει την ανθεκτικότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του. Όσον αφορά το ενεργειακό αποτύπωμα, η νανοπυριτία καταλαμβάνει χαμηλές τιμές, αφού συνήθως ελάχιστη ποσότητα υλικού βρίσκεται σε υδατικά αιωρήματα και εξασφαλίζει ενίσχυση και αντοχή στο σκυροδέμα, ενώ ταυτόχρονα μειώνει την ανάγκη για χρήση επιπλέον υλικών που ενδεχομένως να απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια για την παραγωγή τους. Έτσι εξοικονομούνται ενεργειακές δαπάνες στην παραγωγή και συντήρηση του σκυροδέματος και κατ' επέκταση στα κατασκευαστικά έργα.

Καταλήγοντας, η χρήση των συγκεκριμένων προϊόντων στις συνθέσεις για την παρούσα διπλωματική εργασία, αντικατοπτρίζουν ένα μέσο επίτευξης του κύριου στόχου της. Όπως είναι φανερό, η προσθήκη αυτών των υλικών για την παραγωγή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος συνδυάζει την μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος μαζί με την διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Κεφάλαιο 4^ο: Περιγραφή διαδικασίας και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην πορεία του συγκεκριμένου κεφαλαίου, θα διατυπωθούν αναλυτικά οι φάσεις που ακολουθήθηκαν για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης σκυροδέτησης με δοκιμαστικά μίγματα. Ουσιαστικά, θα γίνει η περιγραφή της διαδικασίας ανάμιξης, σκυροδέτησης και ξεκαλουπώματος, όπως ορίζουν οι σχετικοί κανονισμοί BS EN 12390-1_12_Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds και BS EN 12390-2_09_Making and Curing Specimens. Με βάση τα σχετικά πρότυπα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήριοι οδηγοί, θα γίνει η παρουσίαση των βημάτων, έως ότου ολοκληρωθεί συνολικά το πειραματικό μέρος μας.

Συνολική διαδικασία σκυροδέτησης

Ξεκινώντας, παραθέτουμε μια ενδεικτική σειρά των βημάτων που έλαβαν μέρος:

- 1) Συγκέντρωση του εξοπλισμού και των υλικών που είναι απαραίτητα.
- 2) Ζύγιση των υλικών για κάθε μία σύνθεση, με βάση τους παραπάνω πίνακες.
- 3) Διαδικασία ανάμιξης των υλικών μας.
- 4) Έναρξη διαδικασίας σκυροδέτησης.
- 5) Δοκιμή νοπού σκυροδέματος σε εξάπλωση.
- 6) Πλήρωση των καλουπιών – μητρών με μίγμα.
- 7) Ξεκαλούπωμα μητρών (ωρίμανση στις 24 ώρες)
- 8) Εργαστηριακές δοκιμές θλίψης, σε νοπό σκυρόδεμα, σκληρυμένο μέχρι 24 ώρες.
- 9) Συγκέντρωση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών μας, είχαμε την ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό. Από το εργαστήριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δανειστήκαμε μήτρες διαστάσεων 10*10*10cm. Ο εξοπλισμός περιλάμβανε ζυγαριές ακριβείας, σπάτουλες, βιδωτούς κοχλίες, μεταλλικό κόλουρο κώνο συνοδευόμενο από τη βάση τοποθέτησης, δοσομετρητές (σε ml) για τους ρευστοποιητές, καθώς γάντια και μάσκες υψηλής προστασίας.



Εικόνα 9 - Δείγμα υλικών και εξοπλισμού σκυροδέτησης

Κατόπιν της ακριβούς ζύγισης των υλικών για την αρχική σύνθεση, ξεκινούμε τη διαδικασία τοποθέτησής τους στον κάδο ανάμιξης. Ένα προηγούμενο βήμα περιλαμβάνει την προσθήκη των στερεών υλικών, μια διαδικασία που ξεκινά από την τοποθέτηση τους με προσεκτικό τρόπο. Ακολούθως, προχωρούμε στην εισαγωγή των υγρών συστατικών, με ιδιαίτερη προσοχή στους ρευστοποιητές - υπερρευστοποιητές, οι οποίοι ενσωματώνονται στο μείγμα μόνον όταν έχει επιτευχθεί ομοιογενοποίηση, με στόχο την επίτευξη κατάλληλης εργασιμότητας. Η διαδικασία αυτή, που περιλαμβάνει την σειρά της τοποθέτησης για όλες τις συνθέσεις, αποτελεί μια ουσιαστική φάση στη διαμόρφωση του επιθυμητού μείγματος. Συνοπτικά, οι ποσότητες καταχωρούνται με την εξής σειρά, για όλες τις συνθέσεις:

- 1) Χονδρόκοκκα αδρανή
- 2) Γαρμπίλι
- 3) Τσιμέντο
- 4) Ασβεστόλιθος (filler)
- 5) Νερό
- 6) Υδατικό αιώρημα νανοσωματιδίων
- 7) Ρευστοποιητές - Υπερρευστοποιητές

Έλεγχος νωπού σκυροδέματος

A) Δοκιμή εξάπλωσης (Slump flow test)

Καθόσον πραγματοποιηθεί η ομοιογένεια του μίγματος, εφαρμόζουμε την δοκιμή εξάπλωσης, καθώς πρόκειται για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ). Δηλαδή, σκυροδέματος που έχει την δυνατότητα ροής μόνο με την βοήθεια της βαρύτητας και χωρίς να χρήζει συμπύκνωσης με δονητές ή άλλα συστήματα. Η διαδικασία εξάπλωσης αποτελεί καθιερωμένη πρακτική για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων της οριζόντιας ροής σκυροδέματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, παρακολουθούμε τον αβίαστο τρόπο με τον οποίο το σκυρόδεμα εξαπλώνεται μέσα από τον κώνο κάθισης, ο οποίος στη συνέχεια αφαιρείται. Η μέθοδος εξάπλωσης βασίζεται στη μέτρηση της μέσης διαμέτρου (SF) της σκυροδέματος, όπως αυτή διαμορφώνεται μετά την απομάκρυνση του κώνου. Αυτή η διάμετρος σχετίζεται με τον απαιτούμενο χρόνο (TF) για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη κατάσταση. Συμπληρωματικά, πραγματοποιούμε τη δοκιμή, μετρώντας

τον χρόνο που απαιτείται για την εξάπλωση του σκυροδέματος σε διάμετρο 50 εκατοστών.

Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού:

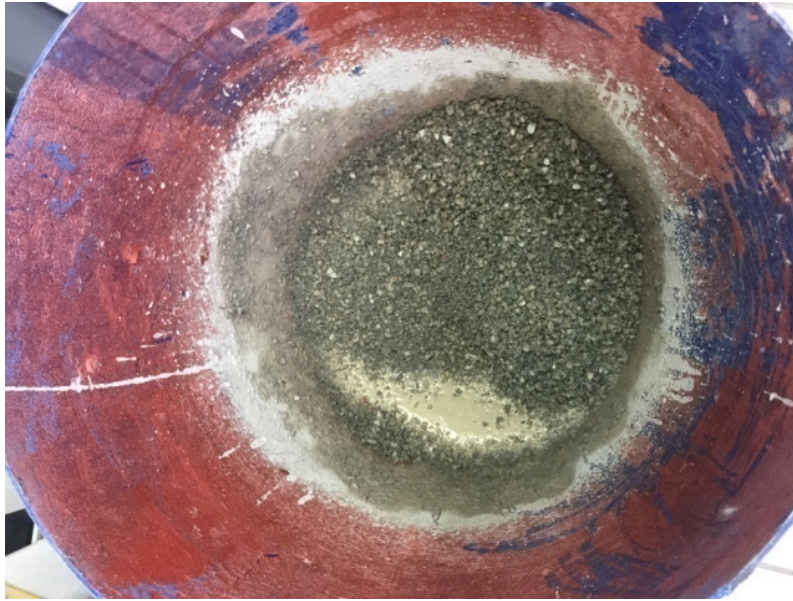
Κώνος Καθίσεως: Αυτή η συσκευή παρουσιάζεται ως ένας εκλεπτυσμένος μεταλλικός κώνος, με πάχος υλικού τουλάχιστον 1.5 mm. Η κατασκευή του διασφαλίζει ότι το υλικό δεν επηρεάζεται από το σκυρόδεμα. Οι δύο ανοικτές βάσεις του κώνου είναι παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον κεντρικό άξονά του. Στο άνω μέρος της μήτρας, υπάρχουν δύο λαβές που τοποθετούνται στα 2/3 του ύψους, ενώ κοντά στη βάση υπάρχουν δύο αντιδιαμετρικά περύγια για ακινητοποίηση. Οι ακριβείς διαστάσεις του κώνου είναι: διάμετρος κάτω βάσεως 200 ± 2 mm, διάμετρος άνω βάσεως 100 ± 2 mm, ύψος 300 ± 2 mm.

Πλάκα Βάσης: Πρόκειται για ένα άκαμπτο, επίπεδο και οριζόντιο μεταλλικό φύλλο διαστάσεων τουλάχιστον 900 x 900 mm, κατασκευασμένο από μη απορροφητικό υλικό πάχους 1 mm. Δύο κυκλικοί σχηματισμοί με διαμέτρους 200 mm και 500 mm έχουν χαραχθεί για την ακριβή τοποθέτηση του κώνου βάσης και για την αντίστοιχη μέτρηση του χρόνου.

Παρακάτω παρουσιάζεται υλικό από τις δικές μας δοκιμές για κάθε μια σύνθεση που εφαρμόσαμε:

→ Μικρή παραλλαγή μείγματος της προτυποποιημένης βιομηχανικής σύνθεσης

Κατά την πρώτη εφαρμογή της διαδικασίας, διαπιστώσαμε ότι το μίγμα μας δεν κατέληξε σε ομοιογενή κατάσταση (Εικόνα 10). Σε αυτή την πρώτη δοκιμή θεωρούμε ότι και ο κάδος ανάμιξης ενδεχομένως να ήταν η αιτία, αποφασίσαμε να επαναλάβουμε τη διαδικασία από την αρχή, χρησιμοποιώντας διαφορετικό κάδο. Αυτή η προσέγγιση απέδωσε και το επιθυμητό αποτέλεσμα, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή ομοιογένεια στο μίγμα μας. Συμπερασματικά, τα μίγματα σκυροδέματος αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα, ακόμα και ως προς το δοχείο ανάμιξης. Τέτοιοι περιορισμοί οφείλονται και στο ότι τα εργαστηριακά δοκιμαστικά μίγματα ήταν μικρού όγκου.



Εικόνα 10 – Μη επιτυχές μείγμα σκυροδέματος

Εφόσον, λοιπόν η πρώτη δοκιμή δεν ήταν επιτυχής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία και καταλήξαμε στο μείγμα που φαίνεται στην Εικόνα 12. Όπως γίνεται αντιληπτό, πλέον στην δεύτερη προσπάθεια η μορφή του μείγματος είναι αρκετά συμπαγής, με συνοχή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και καλύτερη ομογενοποίηση, συγκριτικά με την προγενέστερη προσπάθεια, όπου το μείγμα δεν είχε καθόλου συνεκτικότητα.

Στη συνέχεια έγινε διόρθωση στα αδρανή κυρίως υλικά της σύστασης με χρήση ασβεστολιθικά αδρανή για το κλάσμα των λεπτόκοκκων (γαρμπίλι 2/11), και χρήση πυριτικών αδρανών για το κλάσμα της άμμου (0/4) (Εικόνα 11).



Εικόνα 11 - Δείγμα αδρανών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την 1^η μη επιτυχή προσπάθεια.

Παρόλο που χυτεύτηκαν δοκίμια (εικόνα 12 και 14), το μίγμα έχρηζε βελτιστοποίησης, αφού η εξάπλωσή του αν και ομοιογενής, ήταν περιορισμένη (εικόνα 13).

Πρώτον, στη σύνθεσή του χρησιμοποιήθηκε μεν ασβεστολιθικό γαρμπίλι 2/11 όπως στην προτεινόμενη βιομηχανική σύνθεση, όμως αντί για χαλαζιακή άμμο 0/4, χρησιμοποιήσαμε πυριτική άμμο 0/4, όπως φαίνεται στην εικόνα 11(τα αδρανή με το πιο σκούρο χρώμα). Υπάρχει σοβαρό ενδεχόμενο η συγκεκριμένη άμμος να αντέδρασε χημικά, αυξάνοντας το ιξώδες του μίγματος γεγονός που αποτυπώθηκε και στη δοκιμή εξάπλωσης. Για την επιβεβαίωση αυτής της υπόθεσης απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, τα αποτελέσματα της οποίας θα οδηγήσουν και σε ακριβέστερη δοσολογία υπερρευστοποιητών.



Εικόνα 12 - Επιτυχές μίγμα σκυροδέματος



Εικόνα 13 - Εφαρμογή δοκιμής εξάπλωσης.

Μετά την πλήρη εκτέλεση της δοκιμής εξάπλωσης, μεταφέραμε επιμελώς το σκυρόδεμα πίσω στον κάδο και το αναδεύσαμε μια φορά ακόμα. Στη συνέχεια, με την χρήση εργαλείων, όπως σπάτουλες και σέσουλες, προχωρήσαμε στην προσεκτική και αρμονική τοποθέτηση του σκυροδέματος μέσα στις μεταλλικές μήτρες. Προηγουμένως, είχαμε διασφαλίσει την ενδελεχή εκκαθάριση των μητρών από πιθανά υπολείμματα προηγούμενων σκυροδετήσεων και είχαμε επιπλέον ψεκάσει λεπτομερώς με λεπτόρρευστο υγρό για να αποφύγουμε τυχόν συγκολλήσεις στα τοιχώματά τους.



Εικόνα 14 - Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες προτυποποιημένης βιομηχανικής σύνθεσης με μικρή διαφοροποίηση ως προς το είδος άμμου που χρησιμοποιήθηκε.

Αξίζει να προσθέσουμε πως μετά τη δημιουργία αυτών των δειγμάτων και επειδή παρατηρήθηκε η διαφοροποίηση στη ρεολογική συμπεριφορά του μίγματος με την προσθήκη των πυριτικών αδρανών, κατόπιν μελέτης, διαφοροποιήθηκαν τα επόμενα μίγματα. Τα μίγματα που περιγράφονται στη συνέχεια (1η, 2η, 3η και 4η σύνθεση), αποτέλεσαν και την κύρια μελέτη.

Τρία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των μιγμάτων αυτών:

- η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με ασβεστόλιθο (filler) προκειμένου να μειωθεί το ενεργειακό αποτύπωμα του ΑΣΣ.
- η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού 2/11 (Βλέπε Πίνακα 10: Σύσταση Αρμού) με λεπτόκκοκα πυριτικά αδρανή 0/4.
- η αντικατάσταση χαλαζιακής άμμου 0/4 (Βλέπε Πίνακα 10: Σύσταση Αρμού) με παιπάλη από πυριτικά αδρανή 0/2.

→ 1^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler).

Στην επόμενη ανάμιξη, επαναλάβαμε τα προηγούμενα βήματα για τη δημιουργία της πρώτης σύνθεσης, ενισχύοντας την ερευνητική προσέγγιση μας με την προσθήκη πολύ λεπτόκκοκης παιπάλης (πούδρας) στη θέση της άμμου 0/4 και την προσθήκη λεπτόκκοκων αδρανών 0/4, στη θέση του γαρμπιλιού 2/11. Επιπλέον, με την μείωση της ποσότητας του τσιμέντου σε 70% και ασβεστόλιθο (filler) σε 30%, προσπαθήσαμε να επιτευχθεί ο αρχικός στόχος στο ενεργειακό αντίκτυπο της σύνθεσης. Σκοπός ήταν να εμβαθύνουμε στην κατανόηση των μεταβολών στη συμπεριφορά του σκυροδέματος κατά τις διάφορες φάσεις του πειράματος.

Η προσθήκη αυτή είχε ως αποτέλεσμα να παρατηρήσουμε αλλαγές στην υφή του μίγματος, τη διάμετρο εξάπλωσης και την ανάπτυξη της αντοχής κατά τη θλίψη του, κατά τη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετραώρου από την χύτευση. Συνοδευόμενα από αναλυτικές εικόνες, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα, επιδεικνύοντας εμφανείς τροποποιήσεις στις ιδιότητες του υλικού μας (Εικόνα 15 & Εικόνα 16).



Εικόνα 15 - Ανάμιξη και δοκιμή εξάπλωσης για την 2^η σύνθεση.



Εικόνα 16 - Εξάπλωση μίγματος και τοποθέτηση στις μήτρες για την 1^η σύνθεση.

→ 2^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη πυριτικών νανοσωματιδίων.

Κατά την τελική φάση της δεύτερης σύνθεσής μας, υιοθετήσαμε μια προοδευτική προσέγγιση με την ενσωμάτωση νανοσωματιδίων, καθιστώντας το σκυρόδεμα μας

πρωτοποριακό. Ουσιαστικά, η συνταγή της σύνθεσης ήταν η ίδια με την πρώτη, με την μόνη τροποποίηση την προσθήκη αιωρήματος νανοσωματιδίων και ειδικότερα νανοπυριτίου. Συγκεκριμένα, προσθέσαμε σε υγρή μορφή νανοσωματίδια στο μίγμα μας, προκειμένου να εξετάσουμε την εξέλιξη της σύνθεσης σε αυτήν την προηγμένη κατάσταση.

Ο στόχος αυτής της προσθήκης ήταν να παρακολουθήσουμε τυχόν βελτιώσεις στην αντοχή, την ανθεκτικότητα και την συνολική απόδοση του σκυροδέματος κατά τη χρήση. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν λεπτομερείς εικόνες και σχολιασμούς, αποκαλύπτοντας την αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης της νανοτεχνολογίας στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του υλικού μας (Εικόνα 17).



Εικόνα 17 - Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες για την 2^η σύνθεση.

→ 3^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler).

Η διαδικασία της τρίτης σύνθεσης υποστήριξε μια περαιτέρω εξέλιξη του μίγματος με την προσαρμογή των αναλογιών μεταξύ του τσιμέντου και του ασβεστόλιθου. Αυτή τη φορά, επιλέχθηκε να αυξηθεί η ποσότητα του τσιμέντου κατά 10%, ενώ

ταυτόχρονα μειώθηκε η ποσότητα του ασβεστόλιθου (filler) επίσης κατά 10%. Σκοπός και σε αυτήν την περίπτωση ήταν η περαιτέρω ανάλυση και κατανόηση των μεταβολών στη συμπεριφορά του σκυροδέματος κατά τις διάφορες φάσεις του πειράματος.

Η προσθήκη αυτή είχε ως αποτέλεσμα την παρατήρηση αλλαγών στην υφή του μίγματος, τη διάμετρο εξάπλωσης και την ανάπτυξη της αντοχής κατά τη θλίψη του κατά τη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετραώρου χρόνου (Εικόνα 18). Αυτή η προσαρμογή παρέχει περαιτέρω ενδείξεις για την επίδραση των διαφορετικών αναλογιών στην εξέλιξη των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος.



Εικόνα 18-Τοποθέτηση μίγματος στις μήτρες για την 3^η σύνθεση.

→ 4^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη πυριτικών νανοσωματιδίων.

Κατά την φάση της τέταρτης και τελευταίας σύνθεσης, εκτελέστηκε μια διαδικασία που επικεντρώθηκε στην εφαρμογή των προϊόντων που είχαν χρησιμοποιηθεί κατά την προηγούμενη σύνθεση, με μια επιπλέον ξανά προσθήκη και σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή του νανοπυριτίου. Στο πλαίσιο αυτής της ανάμειξης, πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής ανάλυση για να εξεταστεί η επίδραση των νανοσωματιδίων στις νέες αναλογίες του μίγματος, κατά την οποία λάμβαναν υπόψη τόσο η ποσότητα του τσιμέντου όσο και του ασβεστόλιθου (filler).

Συγχρόνως, οι παρατηρήσεις κατευθύνθηκαν προς την εκτίμηση της συνολικής ποιότητας του μίγματος, την αξιολόγηση της εργασιμότητάς του καθώς και των μηχανικών ιδιοτήτων που επηρεάζονταν από την παρουσία των νανοσωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο, η έρευνα επιδίωξε να δώσει συνολική εικόνα της επίδρασης της

προσθήκης νανοσωματιδίων στις διάφορες πτυχές του τελικού μίγματος, συμβάλλοντας στην επιστημονική κατανόηση της διαδικασίας.



Εικόνα 19 - Μίγματα από 3η και 4η σύνθεση αντίστοιχα και θερμομέτρηση.

Συνολικές παρατηρήσεις επί των δοκιμών

Στο τελευταίο στάδιο, μετά τη πάροδο του εικοσιτετραώρου, προχωρήσαμε στο ξεκαλούπωμα όλων των δοκιμών που είχαν παραχθεί από τις τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις. Αφού αφαιρέθηκαν τα δοκίμια από τα καλούπια, προχωρήσαμε στην καταγραφή της ημερομηνίας σύνθεσής τους και αναθέσαμε μια χαρακτηριστική ονομασία για τον ευκολότερο διαχωρισμό τους.

Στη συνέχεια, εκτελέσαμε προσεκτικό καθαρισμό όλων των καλουπιών, χρησιμοποιώντας ειδικά εργαλεία για την αφαίρεση οποιωνδήποτε υπολειμμάτων και τα επανασυναρμολόγησαμε εκ νέου. Η προσέγγιση αυτή διασφάλισε ότι τα δοκίμια ήταν σε άριστη κατάσταση για περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση. Ένα δείγμα από τα τελικά δοκίμια παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 20 – Δοκίμια ελαφρά τροποποιημένης βιομηχανικής, 1ης και 2ης σύνθεσης αντίστοιχα.



Εικόνα 21 - Δοκίμια 3ης και 4ης σύνθεσης αντίστοιχα.

Προτυποποιημένη βιομηχανική σύνθεση:

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σύνθεσης, με τη χρήση ασβεστόλιθου και γαρμπιλίου, παρατηρήσαμε και καταγράψαμε αρκετά σημαντικά στοιχεία που αφορούν το συνολικό χαρακτήρα του μίγματος. Αυτά περιλάμβαναν τη γενική εμφάνιση του μίγματος μετά την τοποθέτησή του στις μήτρες, τη διάμετρο εξάπλωσης, καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης που διενεργήσαμε στη μηχανή.

Αναφορικά με τη μορφολογία του μίγματος, παρατηρήσαμε ότι είχε μια αρκετά συμπαγή μορφή. Κατά τη δοκιμή εξάπλωσης, το σκυρόδεμα κάλυψε περιορισμένη επιφάνεια στην πλάκα. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, παρατηρήθηκε η διαφοροποίηση στη ρεολογική συμπεριφορά του μίγματος με την προσθήκη των πυριτικών αδρανών,

καθώς το ιξώδες αυξήθηκε σε τέτοιο βαθμό που καθιστούσε αναγκαία την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας ρευστοποιητή, από την αναφερόμενη στη βιομηχανική σύνθεση.

Η εμφάνιση του γαρμπιλιού στην σύνθεση σκυροδέματος οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτον, η ύπαρξη κόκκων με διαφορετικό μέγεθος και βάρος κατά την ανάμιξη των υλικών μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση γαρμπιλιών. Δεύτερον, η ανεπαρκής ανάμιξη των υλικών μπορεί να προκαλέσει τη διατήρηση ακέραιων τμημάτων υλικού στην επιφάνεια του μείγματος. Τέλος, η ανισομορφία στο μέγεθος και στην πυκνότητα των υλικών μπορεί να επιδεινώσει το πρόβλημα της εμφάνισης γαρμπιλιών στο σκυρόδεμα. Οι παραπάνω παράγοντες συντελούν στη μη ομοιόμορφη κατανομή των υλικών.

Σημειώθηκε επίσης μια ανομοιομορφία κατά την εφαρμογή στις μήτρες, όπου σε ορισμένες μήτρες το μίγμα φαινόταν πιο στεγνό αποκαλύπτοντας τα αδρανή, ενώ σε άλλες τα αδρανή υλικά είχαν κατακαθίσει προς τον πυθμένα και φαινόταν να καλύπτονται από την υγρή φάση του μίγματος. Επιπλέον, κατά το ξεκαλούπωμα, παρατηρήθηκε ανομοιογένεια.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης, που ήταν χαμηλά καταδεικνύουν και παρέχουν σημαντική ενδεικτική πληροφορία για την αντοχή και τη συμπεριφορά του μίγματος κατά την έκθεσή του σε μηχανικές δυνάμεις.

1^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler).

Συνεχίζοντας στην επόμενη σύνθεση, καταγράψαμε αντίστοιχα τα στοιχεία που αφορούν τον συνολικό χαρακτήρα του μίγματος. Αυτά περιλάμβαναν τη γενική εμφάνιση του μίγματος μετά την τοποθέτησή του στις μήτρες, τη διάμετρο εξάπλωσης, καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης που διενεργήσαμε στη πρέσα.

Αναφορικά με τη μορφολογία του μίγματος, παρατηρήσαμε ότι είχε μια αρκετά ομοιόμορφη ανάμιξη των υλικών. Σημειώνεται πως για την επίτευξη της επιθυμητής ρευστότητας χρειάστηκε σημαντική ποσότητα υπερρευστοποιητή, γεγονός που βοήθησε στο καλύτερο δέσιμο των υλικών, αλλά και στην επιθυμητή εργασιμότητα. Κατά την δοκιμή εξάπλωσης η διάμετρος της πλάκας κάλυψε ολόκληρη την επιφάνεια της διαμέτρου της πλάκας, δηλώνοντας την σημαντική εργασιμότητα και

ρευστότητα του μίγματος. Σημαντικό είναι ότι κατά την οπτική εξέταση φαινόταν η ομοιογένεια του μείγματος και η ένωση όλων των υλικών αναμεταξύ τους, χωρίς να δημιουργούνται διαχωρισμοί των αδρανών υλικών και χωρίς κενά στα δοκίμια. Ακόμη, κατά την τοποθέτηση του στις μήτρες, όπως φαίνεται και από τις εικόνες στο προηγούμενο κεφάλαιο, πλέον είναι εμφανής η διαφορά από την αρχική, ελαφρώς παραλλαγμένη βιομηχανική σύνθεση αφού όλο το μίγμα φαίνεται απολύτως ομογενές. Οπότε, ήταν αναμενόμενο και στην διάρκεια του ξεκαλουπώματος να προκύψουν δοκίμια τα οποία είχαν την κατάλληλη μορφολογία, χωρίς κενά και διαχωρισμό των αδρανών υλικών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης έδειξαν σημαντικές αντοχές, γεγονός που δηλώνει ότι οι μηχανικές αντοχές αυτής της σύνθεσης ήταν σημαντικά υψηλότερη από την προηγούμενη. Αρά το σκυρόδεμα παρουσιάζει καλύτερη δομή και ακολούθως ανθεκτικότητα σε θλίψη.

2^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 70% τσιμέντο και 30% ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη πυριτικών νανοσωματιδίων.

Καταλήγοντας στην δεύτερη μας σύνθεση, στην οποία εφαρμόσαμε νανοσωματίδια στο μίγμα μας, ακολουθήσαμε την ίδια πορεία παρατηρήσεων. Όπως την εμφάνιση του μίγματος, την διάμετρο εξάπλωσης και τις μηχανικές αντοχές σε δοκιμή θλίψης. Σχετικά με την ομοιογένεια του μίγματος, ήταν αντιληπτό πως και σε αυτή την σύνθεση επιτύχαμε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα, εφόσον όλα τα υλικά μας είχαν ενσωματωθεί μεταξύ τους στο μέγιστο βαθμό και η απόδοση τους ήταν εξαιρετική ακόμη και με την υφή που φαινόταν. Σημαντική σημείωση είναι πως και σε αυτή την περίπτωση χρειάστηκαν μεγάλες ποσότητες υπερρευστοποιητή και συγκριτικά με την πρώτη σύνθεση ήταν υψηλότερες οι τιμές, αυτό θεωρητικά οφείλεται στην προσθήκη των πυριτικών νανοσωματιδίων. Το επιθυμητό αποτέλεσμα επιτεύχθηκε, καθώς στην δοκιμή εξάπλωσης είχαμε τη μέγιστη κάλυψη της πλάκας, γεγονός που δηλώνει ότι η ρευστότητα για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ήταν ακριβώς αυτή που χρειαζόταν, χωρίς διαχωρισμό στα όρια του δίσκου του σκυροδέματος. Όπως έγινε και στις προηγούμενες συνθέσεις έτσι και τώρα επανατοποθετήσαμε το υλικό μας στις μήτρες. Με την πάροδο του εικοσιτετραώρου έγινε το ξεκαλούπωμα, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την ποιότητα των δοκιμίων. Μπροστά στα δείγματα της πρώτης σύνθεσης, παρατηρήσαμε πως υπήρχαν μικρές αποκλίσεις, όμως παρόλα αυτά τα δοκίμια με τα νανοσωματίδια είχαν ακόμη πιο λεία

υφή. Κατά την επιβολή τους στην μηχανή θλίψης, τα αποτελέσματα έδειξαν εξίσου σημαντικές αντοχές φανερόνοντας έτσι την σημαντική επιρροή των νανοσωματιδίων στην σκυροδέτηση, αφού επιτεύχθηκε ένα σκυρόδεμα με αντοχή και ανθεκτικότητα μεγαλύτερη από τις άλλες συνθέσεις.

3^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20% ασβεστόλιθο (filler).

Στην συνέχεια, στην τρίτη σύνθεση όπου πραγματοποιήθηκε η αλλαγή των ποσοστών ανάμεσα στην ποσότητα του τσιμέντου και των ασβεστολιθικών αδρανών, παρατηρήθηκε η ίδια συνεχής πρόοδος. Η ενσωμάτωση των υλικών εξελίχθηκε ομαλά και η μορφή του μίγματος κατά την ανάμιξη ήταν αρκετά συμπαγής και ομοιόμορφη μεταξύ των υλικών. Ωστόσο, παρατηρήθηκε η ανάγκη για αυξημένη ποσότητα υπερρυστοποιητή (μειωτή νερού), περίπου διπλάσια σε σχέση με προηγούμενες αναμίξεις, προκειμένου να επιτευχθεί η εργασιμότητα και η απαραίτητη ρευστότητα στο μίγμα. Και σε αυτή την σύνθεση η δοκιμή εξάπλωσης ήταν επιτυχής, αφού καλύφθηκε όλη η διάμετρος της πλάκας από το μείγμα ομοιόμορφα. Ύστερα από το πέρας του εικοσιτετραώρου, έγινε το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων από τις μήτρες και γίνεται αντιληπτή η συμπαγής μορφή που έχουν αποκτήσει τα δοκίμια, όπως φαίνεται στην εικόνα 21. Με την υποβολή τους στην μηχανή θλίψης, οι πιέσεις που τους ασκήθηκαν ήταν υψηλότερες συγκριτικά με τα προηγούμενα δοκίμια. Αυτό αναδεικνύει τις υψηλές αντοχές που απέκτησαν μετά από μόνο ένα εικοσιτετράωρο.

4^η σύνθεση: Δοκίμια με αναλογίες ποσοτήτων 80% τσιμέντο και 20 ασβεστόλιθο (filler), αλλά με προσθήκη πυριτικών νανοσωματιδίων.

Στην τελευταία πλέον σύνθεση, στην οποία έγινε αντίστοιχα η προσθήκη νανοσωματιδίων πυριτίου, παρατηρήθηκε συνεχής πρόοδος και εξέλιξη. Η διαδικασία ανάμιξης ήταν ανάλογη με την προγενέστερη σύνθεση, δηλαδή συμπαγές και ομοιόμορφο μίγμα. Αξίζει να σημειωθεί πως και σε αυτή την ανάμιξη η τιμή του υπερρυστοποιητή G9610 χρειάστηκε σε τριπλάσια ποσότητα συγκριτικά με την πρώτη σύνθεση, ενώ αντίθετα ο υπερρυστοποιητής G91 μειώθηκε σχεδόν στα μισά. Αντίστοιχα κατά την δοκιμή εξάπλωσης το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, με πλήρη κάλυψη της πλάκας εξάπλωσης από το μίγμα. Με την λήξη του εικοσιτετραώρου

έγινε το ξεκαλούπωμα από τις μήτρες και φαίνεται από την εικόνα 21, ότι ο σχηματισμός τους είναι ομοιόμορφος και συμπαγής, όπως μαρτυρούσε και το μίγμα μας στην αρχή. Κατόπιν, σειρά είχε να δοκιμαστούν και αυτά σε θλιπτικές πιέσεις, όπως και έγινε, δίνοντας ως αποτέλεσμα ανθεκτικά δοκίμια, εφόσον ο χρόνος θλίψης και για αυτή την σύνθεση ήταν αρκετός.

Κεφάλαιο 5^ο : Επίλογος – Μελλοντική Έρευνα

Καταληκτικά, ο συνδυασμός της χρήσης αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με κατάλληλα υλικά και αναλογίες, καθώς και με την χρήση της νανοτεχνολογίας, συμβάλει θετικά στους στόχους για αντοχή σκυροδέματος και μείωσης του ενεργειακού αποτυπώματος.

- Αυτή η περίπτωση σκυροδέματος διαστρώνεται χωρίς μηχανική υποστήριξη και ρέει σε ποικίλους σχηματισμούς καλουπιών, δημιουργώντας έτσι ταχύτερη σκυροδέτηση.
- Με τις κατάλληλες προσθήκες υλικών επιτυγχάνεται αυξημένη αντοχή σε θλίψη, αυξημένη ανθεκτικότητα.
- Η προσθήκη ασβεστόλιθου ως αντικατάσταση σε μία ποσότητα τσιμέντου, είχε θετικά αποτελέσματα, αφού εν τέλει τα δοκίμια απέκτησαν τις επιθυμητές αντοχές.
- Η αντικατάσταση του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού 2/11 με λεπτόκκοκα πυριτικά αδρανή, είχε επίσης θετικά αποτελέσματα, τόσο κατά την ανάμιξη όσο και στις αντοχές.
- Η αντικατάσταση της χαλαζιακής άμμου 0/4 με παιπάλη από πυριτικά αδρανή 0/2, είχε εξίσου θετικές επιδράσεις για το σύνολο της σύνθεσης και των δοκιμίων.
- Με την ενσωμάτωση στις συνθέσεις των πυριτικών νανοσωματιδίων, τα αποτελέσματα ήταν ακόμη καλύτερα, αλλά χρειαζόντουσαν υψηλές ποσότητες υπερρευστοποιητών ώστε το μείγμα να αποκτήσει διαχειρίσιμη μορφή.
- Τα πυριτικά νανοσωματίδια συμβάλλουν στην μείωση της διαπερατότητας και του πορώδους των μειγμάτων.

- Το ΑΣΣ αντιδρά και επεξεργάζεται καλύτερα σε υλικά με μορφή σκόνης – πούδρας. Συγκεκριμένα, επηρεάζεται το ιξώδες του μείγματος, οπότε με την εφαρμογή του ασβεστόλιθου μειώνονται η ρεολογικές αντιστάσεις.

Μελλοντική έρευνα

Η ενσωμάτωση της νανοτεχνολογίας και υλικών αυτής στην επιστήμη της τεχνολογίας σκυροδέματος είναι ολοένα εξελισσόμενη. Το περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυτών των προϊόντων είναι χαμηλό, επομένως έχουν θετική συμβολή τόσο κατά την εξοικονόμηση παραγωγής ενέργειας, όσο και μείωση της κατάχρησης των φυσικών πόρων που απαιτούνται. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, κατά το σχολιασμό του πειραματικού μέρους διπλωματικής εργασίας, περαιτέρω εξέλιξη της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα εξής:

- Επανάληψη των μιγμάτων σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες και σε πρότυπο αναμκτήρα, ειδικό για σκυροδέματα, αφού διαπιστώθηκε ότι τα μίγματα σκυροδέματος αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα, και ως προς το δοχείο ανάμιξης, αλλά και λόγω του ότι τα εργαστηριακά δοκιμαστικά μίγματα ήταν μικρού όγκου
- Διερεύνηση της πιθανότητας χημικής αντίδρασης της πυριτικής άμμου 0/4 με τα υπόλοιπα συστατικά του μίγματος

Επιπλέον, στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής μελέτης, γίνεται μια εκτενής αναφορά στην σημασία του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Κρίσιμο θα ήταν, να δημιουργηθούν συνθέσεις στις οποίες θα συμπεριλαμβάνονται κάποια είδη ινών και να διερευνηθεί με αυτό τον τρόπο πώς επηρεάζονται οι ιδιότητες (αντοχές και άλλα) που θα μπορέσουν να αποκτήσουν τα τελικά δοκίμια.

Βιβλιογραφία

1. Almusallam, T.H., Abadel, A.A., Al-Salloum, Y.A., Siddiqui, N.A., Abbas, H., 2015. Effectiveness of hybrid-fibers in improving the impact resistance of RC slabs. *Int J Impact Eng* 81, 61–73.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.03.010>
2. Jamnam, S., Maho, B., Techaphatthanakon, A., Sonoda, Y., Yoo, D.Y., Sukontasukkul, P., 2020a. Steel fiber reinforced concrete panels subjected to impact projectiles with different caliber sizes and muzzle energies. *Case Studies in Construction Materials* 13.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00360>
3. Jamnam, S., Maho, B., Techaphatthanakon, A., Sonoda, Y., Yoo, D.Y., Sukontasukkul, P., 2020b. Steel fiber reinforced concrete panels subjected to impact projectiles with different caliber sizes and muzzle energies. *Case Studies in Construction Materials* 13.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00360>
4. Lee, M.J., Park, G.K., Kim, S.W., Kwak, H.G., 2022. Damage characteristics of high-performance fiber-reinforced cement composites panels subjected to projectile impact. *Int J Mech Sci* 214.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106919>
5. LEE, S., KIM, C., YU, Y., CHO, J.Y., 2021. Effect of Reinforcing Steel on the Impact Resistance of Reinforced Concrete Panel Subjected to Hard-Projectile Impact. *Int J Impact Eng* 148.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103762>
6. Liu, J., Wu, C., Li, J., Liu, Z., Xu, S., Liu, K., Su, Y., Fang, J., Chen, G., 2021. Projectile impact resistance of fibre-reinforced geopolymer-based ultra-high performance concrete (G-UHPC). *Constr Build Mater* 290.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123189>
7. Βεντούρη Φωτεινή, Δ.Α., 2022. Διερεύνηση της τεχνολογίας των δομικών υλικών του σκυροδέματος σύμφωνα με τον ΚΤΣ 2016.
8. Γκαμαράζης Παναγιώτης, 2018. ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ.
9. Γκούντας Δ. Ιωάννης, 2012. Σκυρόδεμα και Δομικές Κατασκευές.

10. Καραβόκυρος Λουκάς, 2020. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.
11. Κορδή Ρεγγίνα, 2012. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.
12. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΑΠΟ 100 ΧΡΟΝΙΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ Sika®-1 ΣΤΟ Sika® ViscoCrete®, 2019.
13. Στανγκίδη Δήμητρα, 2022. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ Ο ΒΑΣΙΚΟΣ ΤΟΥΣ ΡΟΛΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.
14. Στρατουρά Χ. Μαρία, 2016. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.
15. Constro Facilitator, 2020. Fiber-reinforced concrete - Advantages, types and applications [WWW Document]. URL <https://constrofacilitator.com/fiber-reinforced-concrete-advantages-types-and-applications/> (accessed 6.5.23).
16. Zeris, C., Marsellos, N., Vogiatzis, C., 2018. Technical Recommendation No.6 Durable Concrete [in Greek].
17. Αγιουτάντης Ζ., Εξαδάκτυλος Γ., Προβιδάκης Κ., 2010. «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ», Χανιά.
18. Δέμης Σωτήρης, 2016. Ανθεκτικότητα Σκυροδέματος, Πάτρα.
19. Παπακώστα, Α.Σ., Τσιάρα, Α.Α., 2015. «Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα - σκυροδέματος σε περιβάλλον θευκών».
20. Lia, P. P., Brouwers, H. J. H., & Yu, Q. (2020). Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103434>
21. Xu, X., Ma, T., & Ning, J. (2019). Failure analytical model of reinforced concrete slab under impact loading. *Construction and Building Materials*, 223, 679–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.008>
22. Dapper, P. R., Ehrendring, H. Z., Pacheco, F., Christ, R., Menegussi, G. C., de Oliveira, M. F., & Tutikian, B. F. (2021). Ballistic impact resistance of uhpc plates made with hybrid fibers and low binder content. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313410>
23. Bujnak, J., Michalek, P., Bahleda, F., Grzeszczyk, S., Matuszek-Chmurowska, A., & Mordak, A. (2020). Mechanical testing of composite steel

- and reactive powder concrete structural element. *Materials*, 13(18).
<https://doi.org/10.3390/ma13183954>
24. Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Barnett, S. J., & Gao, X. (2010). Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37(4), 405–413.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.09.004>
25. Δημοσθένης Η. Παύλου, 2008. ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, Αθήνα.
26. Οικονομίδης Ιωάννης, 2010. Διερεύνηση εφαρμογών νανοτεχνολογίας με έμφαση στην επιστήμη του Μηχανικού, Βόλος.
27. Τσαμπαλή Ευαγγελία, 2017. Επίδραση νανοσωματιδίων πυριτίας και αλουμίνας στο τσιμέντο, Θεσσαλονίκη.
28. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ 2016).
29. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 1997 (ΚΤΣ 1997).
30. ΕΛΟΤ EN 12620 Φυσικές Ιδιότητες Αδρανών.
31. ΕΛΟΤ 408 Θραυστά αδρανή για συνήθη σκυροδέματα.
32. ΕΛΟΤ EN 934-2 Πρόσθετα σκυροδέματος.