

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΑΜΙΑΝΤΟΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΩΣ
ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Αργυρώ Κουκουτσάκη
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Εξεταστική Επιτροπή:
Ευάγγελος Γιδαράκος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Κορνίτσας, Καθηγητής
Ιωάννης Τσομπανάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, Μάρτιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δύο από τους σημαντικότερους τομείς μελέτης στη σύγχρονη κοινωνία αποτελούν ο τομέας των κατασκευών και η προστασία του περιβάλλοντος. Δύο αλληλένδετοι κλάδοι όπου ο ένας εξυπηρετεί τις ανάγκες του άλλου με πάρα πολλά και διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετάται η σχέση ανάμεσα στη διαχείριση αποβλήτων αμιαντοτσιμέντου και στην χρησιμοποίησή τους από τον κατασκευαστικό τομέα.

Συγκεκριμένα, το αμιαντοτσιμέντο που αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και αποτελεί μία από τις συνηθέστερες εφαρμογές αμιαντούχων υλικών, υπέστη επεξεργασία για την αποτοξικοποίηση και χρησιμοποίησή του ως ενισχυτικό υλικό στην παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μορφές επεξεργασμένου αμιαντοτσιμέντου η παρασκευή των οποίων διέφερε τόσο στον τρόπο επεξεργασίας όσο και στην χρονική διάρκεια που απαιτήθηκε. Παρήχθησαν αρκετές σειρές δοκιμίων με διαφορετικές αναλογίες από τα εξεταζόμενα υλικά για να μελετηθεί ο τρόπος που καθένα από αυτά επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμίων αυτών συγκρίθηκαν με ένα δοκίμιο αναφοράς πρότυπων συνθηκών χωρίς προσθήκη επεξεργασμένου αμιαντοτσιμέντου και με ένα δοκίμιο στο οποίο είχε προστεθεί έτοιμο εμπορικό ενισχυτικό υλικό παρόμοιων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών με τα εξεταζόμενα. Η κοκκομετρική ανάλυση, η δοκιμή Chapelle, η μέθοδος UPV, η φασματοσκοπία ακτίνων X φθορισμού (XRF) όπως και η τεχνική περίθλασης ακτίνων X (XRD) των επιμέρους υλικών είναι κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

Από τις ανωτέρω περιγραφόμενες μεθόδους προέκυψαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη χρήση των εξεταζόμενων υλικών ως πρόσθετα ενισχυτικά σκυροδέματος. Τα επεξεργασμένα αυτά υλικά αμιαντοτσιμέντου προσέδωσαν στα δοκίμια μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες ή και ακόμα καλύτερες από αυτές του ήδη χρησιμοποιούμενου εμπορικού υλικού.

ABSTRACT

Two of the most important areas of study in modern society are the construction sector and the protection of the environment. Two interrelated sectors where one serves the needs of the other with many different application fields. In this thesis, the relationship between the management of asbestos cement waste and its use by the construction sector is studied.

In particular, asbestos cement, which constitutes a danger to human health and is one of the most common applications of asbestos-containing materials, has been processed for detoxification and its use as a reinforcing material in the preparation of concrete specimens. Four different forms of treated asbestos cement were used, the preparation of which differed in both the treatment method and the time required. Several series of samples were produced with different ratios from the test materials to study how each of them affects the mechanical properties of the concrete. The results of these specimens were compared with a reference standard test specimen without addition of treated asbestos cement and with a specimen to which a ready-made commercial reinforcing material of similar properties and characteristics was added to the test. Spectroscopic analysis, Chapelle test, UPV method, Fluorescence X-ray spectroscopy (XRF) as well as X-ray diffractometry (XRD) of individual materials are some of the methods that have been done.

From the methods described above, very satisfactory results have been obtained with regard to the use of the test materials as additional reinforcing concrete. These treated asbestos cement materials have provided mechanical properties similar or even better than those of commercial materials already in use

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, τόσο για την συμπαράσταση και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, όσο και για την υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για το χρόνο που αφιέρωσαν στη μελέτη και αξιολόγηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Αικατερίνη Βαλουμά, υποψήφια Διδάκτωρ, για την έμπρακτη υποστήριξή της, τις πολύτιμες συμβουλές, γνώσεις αλλά και καθοδήγηση που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Τέλος, ειλικρινείς ευχαριστίες στον κ. Μιχαήλ Γαλετάκη, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για τη χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου: «Ελέγχου Ποιότητας-Υγιεινής και Ασφάλειας στη Μεταλλευτική», του τμήματος Ορυκτών Πόρων. Επίσης, πολύτιμη ήταν και η συμβολή της κας Αθανασίας Σουλτάνα, Διπλωματούχου Μηχανικού Ορυκτών Πόρων και υποψήφιας Διδάκτορος, τόσο με την τεχνική υποστήριξη της όσο και με την πρακτική συμβολή της για τη λήψη των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ιδιαίτερα ωφέλιμη ήταν η συμβολή της Δρ. Όλγας Παντελάκη του «Εργαστηρίου Εμπλουτισμού» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Σας ευχαριστώ που με βοηθήσατε να κλείσω τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών με την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Η βοήθειά σας ήταν πολύτιμη για την εκπλήρωση του στόχου αυτού.

Χανιά, Μάρτιος 2018

Κουκουτσάκη Αργυρώ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	1
Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή - Αντικείμενο της Διατριβής	2
1.2 Δομή Εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	5
Αμιάντος	5
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία αμιάντου	6
2.2 Μορφές αμιάντου	7
2.2.1 Λευκός αμιάντος.....	7
2.2.2 Καφέ αμιάντος.....	7
2.2.3 Κυανός αμιάντος	8
2.3 Χρήση αμιάντου	8
2.3.1 Αμιαντοτσιμέντο.....	9
2.3.2 Ψεκάσμενος αμιάντος.....	9
2.3.3 Μόνωση με χρήση αμιάντου	10
2.3.4 Υφασμένος αμιάντος	10
2.4 Επικινδυνότητα στην ανθρώπινη υγεία.....	10
2.4.1 Αμιάντωση.....	11
2.4.2 Καρκίνος του πνεύμονα.....	11
2.4.3 Καρκίνος του λάρυγγα.....	11
2.4.4 Μεσοθηλίωμα	12
2.5 Μέθοδοι Επεξεργασίας αποβλήτων που περιέχουν αμιάντο	12
2.5.1 Στερεοποίηση και σταθεροποίηση	12
2.5.2 Υαλοποίηση	13
2.5.3 Θερμικές επεξεργασίες	13
2.5.4 Μηχανική Επεξεργασία	14
2.5.5 Χημική Επεξεργασία	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	15
Βασικές Αρχές Σκυροδέματος	15
3.1 Κονία	16
3.2 Κονίαμα.....	17

3.3 Σκυρόδεμα.....	18
3.3.1 Στάδια παραγωγής σκυροδέματος.....	19
3.3.2 Σύσταση σκυροδέματος.....	20
3.3.2.1 Τσιμέντο	20
3.3.2.2 Αδρανή υλικά	21
3.3.2.3 Πρόσμικτα σκυροδέματος	21
3.3.2.4 Νερό.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	26
Ανάλυση Μεθόδων Πειραματικής Διαδικασίας.....	26
4.1 Εισαγωγή – Περιγραφή ενισχυτικών υλικών	27
4.2 Μέθοδος χαρακτηρισμού των ενισχυτικών υλικών – Δοκιμή Chapelle	34
4.3 Κοκκομετρία ενισχυτικών υλικών	37
4.4 Μέθοδος Ultrasonic Pulse Velocity	37
4.5 Περιγραφόμενα Υλικά Πειραματικής Διαδικασίας	38
4.5.1 Τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ CEMII/A-LL 42,5N	39
4.5.1.1 Κλίνκερ για τσιμέντο Πόρτλαντ (K), (clinker).....	40
4.5.1.2 Ασβεστόλιθος (L,LL), (limestone)	40
4.5.1.3 Δευτερεύοντα υλικά	41
4.5.2 Microsilica - Πυριτική παιπάλη (SilicaFume).....	41
4.5.3 Πρότυπη Άμμος.....	44
4.6 Στάδια Πειραματικής Διαδικασίας.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	49
Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας	49
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Chapelle	50
5.3 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης	51
5.4 Μετρήσεις μεθόδου Ultrasonic Pulse Velocity	54
5.4.1 Πρότυπο Δοκίμιο	54
5.4.2 Δοκίμιο με ενισχυτικό Silica Fume και 2.5, 5, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	55
5.4.3 Δοκίμιο με ενισχυτικό TMX και 10% αντικατάσταση τσιμέντου	57
5.4.4 Δοκίμιο με ενισχυτικό MW και 10% αντικατάσταση τσιμέντου	58
5.4.5 Δοκίμιο με ενισχυτικό STF και 5, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	59

5.4.6 Δοκίμιο με ενισχυτικό GEL και 2.5, 5, 10, 20 και 30% αντικατάσταση τσιμέντου	60
5.4.7 Συγκεντρωτικές παρατηρήσεις μετρήσεων μεθόδου Ultrasonic Pulse Velocity	63
5.5 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής	65
5.6 Αποτελέσματα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	69
5.7 Συσχετίσεις αποτελεσμάτων και μεθόδων χαρακτηρισμού	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	79
Συμπεράσματα	79
6.1 Συμπεράσματα.....	80
6.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	87

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο

Εικόνα 2.1: Ίνες Χρυσοτίλη.....	7
Εικόνα 2.2: Ίνες αμοσίτη	8
Εικόνα 2.3: Κροκιδόλιθος.....	8
Εικόνα 2.4: Μορφές αμιαντοτσιμέντου σε στέγες (αριστερά) και σωληνώσεις	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^Ο

Εικόνα 4.1: Ορυκτολογική ανάλυση ανεπεξέργαστου δείγματος αμιαντοτσιμέντου	30
Εικόνα 4.2: Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος GEL.....	31
Εικόνα 4.3: Ποσοτική κατανομή ορυκτών δείγματος GEL.....	31
Εικόνα 4.4: Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος MW	32
Εικόνα 4.5: Ποσοτική κατανομή ορυκτών δείγματος MW	33
Εικόνα 4.6: Ανάμιξη στη φάση των δεκαέξι ωρών των διαλυμάτων με το ενισχυτικό υλικό	34
Εικόνα 4.7: Διάλυμα micrtosilica/silicafume μετά την προσθήκη διαλύματος.....	35
Εικόνα 4.8: Διάλυμα με ενισχυτικό υλικό πριν την προσθήκη 0,1M HCl και διάλυμα με φαινοφθαλεΐνη πριν την προσθήκη 0,1M HCl.....	36
Εικόνα 4.9: Μηχανή ανάλυσης λέιζερ κοκκομετρικής διαβάθμισης	37
Εικόνα 4.10: Κλίνκερ για τσιμέντο πόρτλαντ.....	40
Εικόνα 4.11: Ασβεστόλιθος.....	40
Εικόνα 4.12: Σκόνη microsilica	41
Εικόνα 4.13: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με τον χρόνο σε σκυρόδεμα που περιέχει microsilica σε σχέση με πρότυπο που δεν περιέχει	42
Εικόνα 4.14: Σχηματική απεικόνιση διαπερατότητας σε σκυρόδεμα που δεν περιέχει microsilica και ενός σκυροδέματος που περιέχει microsilica και μικρότερο λόγο νερού/τσιμέντο	43
Εικόνα 4.15: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με λόγο νερού/τσιμέντο σε σκυρόδεμα που περιέχει microsilica σε σχέση με πρότυπο που δεν περιέχει	43
Εικόνα 4.16: Πρότυπη άμμος.....	44
Εικόνα 4.17: Μίξερ ανάδευσης.....	46
Εικόνα 4.18: Μίξερ δοκιμίων	46
Εικόνα 4.19: Τελική τοποθέτηση υλικού στις μήτρες	46
Εικόνα 4.20: Ξεκαλούπωμα δοκιμίων	47

Εικόνα 4.21: Δοκίμια στο θάλαμο ωρίμανσης.....	47
Εικόνα 4.22: Μετρητής χρόνου διάδοσης υπερηχητικών παλμών (αριστερά), μέτρηση διάδοσης πρότυπου δοκιμίου (δεξιά)	48
Εικόνα 4.23: Συσκευή θραύσης δοκιμίων 40x40x160mm	48

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Πίνακας 3.1: Τύποι τσιμέντων σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1	22
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμικτα	28
--	----

Πίνακας 4.2: Ποσοστιαία στοιχειακή χημική ανάλυση XRF	29
---	----

Πίνακας 4.3: Αναλογίες ενισχυτικών υλικών σε δοκίμια σκυροδέματος	33
---	----

Πίνακας 4.4: Ποιότητα σκυροδέματος σε συνάρτηση με την ταχύτητα υπερηχητικών παλμών	38
---	----

Πίνακας 4.5: Αναλογίες υλικών για την πειραματική διαδικασία	45
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μεθόδου Chapelle	50
--	----

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα UPV στο πρότυπο δοκίμιο	54
---	----

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 2.5% -	
--	--

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 5% αντικατάσταση τσιμέντου	56
--	----

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	56
---	----

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό TMX, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	57
--	----

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό MW, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	58
---	----

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό STF, 5% αντικατάσταση τσιμέντου	59
---	----

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό STF, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	60
--	----

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 2.5% αντικατάσταση τσιμέντου	61
--	----

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 5% αντικατάσταση τσιμέντου	61
--	----

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 10% αντικατάσταση τσιμέντου	62
---	----

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 20% αντικατάσταση τσιμέντου	62
---	----

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 30% αντικατάσταση τσιμέντου	63
---	----

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη στις 28 ημέρες.....	67
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη στις 90 ημέρες.....	68
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη στις 28 ημέρες.....	72
Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη στις 90 ημέρες.....	73
Πίνακας 5.19: Τιμές δείκτη SAI για συνθέσεις αντικατάστασης 10% των μελετώμενων υλικών	75
Πίνακας 5.20: Αναλογίες δοκιμίων, αντοχή σε θλίψη και ταχύτητες UPV την 28 ^η μέρα ωρίμανσης	77

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Διάγραμμα 2.1: Κατηγοριοποίηση αμιάντου	6
---	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Διάγραμμα 3.1: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής με λόγο στερεών προς κενό	17
--	----

Διάγραμμα 3.2: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής με λόγο νερού/τσιμέντο	25
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Διάγραμμα 5.1: Ποσότητα CaO που καταναλώθηκε από 1 g κάθε ποζολανικού υλικού.....	51
---	----

Διάγραμμα 5.2: Κοκκομετρική ανάλυση μελετώμενων ενισχυτικών υλικών.....	52
---	----

Διάγραμμα 5.3: Καμπύλες αθροιστικά διερχόμενων μεγεθών.....	53
---	----

Διάγραμμα 5.4: Συγκεντρωτικό γράφημα διακύμανσης ταχύτητας UPV	64
--	----

Διάγραμμα 5.5: Συγκεντρωτικές τιμές αντοχής σε κάμψη.....	69
---	----

Διάγραμμα 5.6: Απεικόνιση θλιπτικής αντοχής 28 ημερών σε MPa	70
--	----

Διάγραμμα 5.7: Απεικόνιση θλιπτικής αντοχής 90 ημερών σε MPa	71
--	----

Διάγραμμα 5.8: Συσχέτιση μεταξύ μεθόδου Chapelle και δείκτη SAI για την ποζολανικότητα των εξεταζόμενων υλικών	75
--	----

Διάγραμμα 5.9: Συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε θλίψη και ταχύτητα διάδοσης υπερήχων UPV.....	76
--	----

Διάγραμμα 5.10: Συσχέτιση μεταξύ αναλογίας w/c και αντοχής σε θλίψη την 28 ^η ημέρα ωρίμανσης.....	78
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή - Αντικείμενο της Διατριβής

Στον τομέα της Περιβαλλοντικής Μηχανικής έναν πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Η ανακύκλωση αποτελεί μία δράση με κυρίαρχο στόχο την προστασία του περιβάλλοντος, της ανθρώπινης υγείας αλλά και τη διατήρηση των φυσικών πόρων. Προκειμένου να καταστεί βιώσιμη απαιτείται ενημέρωση, πρόληψη και σωστή διαχείριση των αποβλήτων. Η διαχείριση των αποβλήτων διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία αυτών. Κάθε κατηγορία αποβλήτων εντάσσεται στην εναλλακτική διαχείριση και ακολουθείται από ένα θεσμοθετημένο νομικό πλαίσιο.

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την χρήση επεξεργασμένου αμιαντοσιμέντου ως πρόσμικτο ενισχυτικό προϊόν στο σκυρόδεμα. Το αμιαντοσιμέντο αποτελεί μία από τις πιο συχνά εμφανιζόμενες μορφές αμιαντούχων υλικών και εντοπίζεται ακόμη και σήμερα σε στέγες και άλλες εγκαταστάσεις. Η ανάγκη απομάκρυνσής του είναι επιτακτική καθώς αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Η μέθοδος αποτοξικοποίησης του αμιαντοσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε επιτεύχθηκε με την διαδικασία της πυριτοποίησης, μίας μεθόδου που επιτυγχάνει την μετατροπή των αποβλήτων αμιάντου σε μη επικίνδυνη μορφή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, με χαμηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος.

Το επεξεργασμένο αμιαντοσιμέντο χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος λειτουργώντας ως ενισχυτικό, σε διάφορες μορφές του. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μορφές επεξεργασμένου αμιαντοσιμέντου η παρασκευή των οποίων διέφερε τόσο στον τρόπο επεξεργασίας όσο και στην χρονική διάρκεια. Παρήχθησαν αρκετές σειρές δοκιμίων με διαφορετικές αναλογίες του επεξεργασμένου αμιαντοσιμέντου (βλ. Κεφάλαιο 4) προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη αναλογία των προτεινόμενων δομικών υλικών σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των δοκιμίων αυτών συγκρίθηκαν με ένα δοκίμιο αναφοράς πρότυπων συνθηκών χωρίς προσθήκη επεξεργασμένου αμιαντοσιμέντου και με ένα δοκίμιο στο οποίο είχε προστεθεί έτοιμο εμπορικό ενισχυτικό υλικό παρόμοιων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών με τα εξεταζόμενα. Πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραματικών διαδικασιών στα δοκίμια, πριν την τελική καταπόνησή τους σε θλίψη και κάμψη. Η κοκκομετρική ανάλυση, η δοκιμή Chapelle, η μέθοδος UPV, η φασματομετρία ακτίνων X φθορισμού (XRF) όπως και η τεχνική περίθλασης ακτίνων X (XRD) των επιμέρους υλικών είναι κάποιες από τις

μεθόδους χαρακτηρισμού που πραγματοποιήθηκαν. Αναλυτική επεξήγηση όλων των ανωτέρω διαδικασιών ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Δομή Εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται μία εισαγωγική παρουσίαση του θέματος και του τρόπου που εκπονήθηκε η διατριβή. Δεν παρέχεται περαιτέρω ανάλυση και ερμηνεία όρων και εννοιών καθώς όλα αυτά εξετάζονται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον αμίαντο. Παρουσιάζονται οι συχνότερα απαντώμενες κατηγορίες αμιάντου και τα χαρακτηριστικά αυτών, οι χρήσεις και οι εφαρμογές που συναντώνται, η επικινδυνότητα ως προς την ανθρώπινη υγεία και οι μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων που περιέχουν αμίαντο. Η κατανόηση βασικών αρχών αναφορικά με τον αμίαντο είναι προαπαιτούμενη ώστε να γίνει αντιληπτή η επίδρασή του στο σκυρόδεμα ως ενισχυτικό.

Εκτός βέβαια από τον αμίαντο, πολύ σημαντική είναι και η κατανόηση του σκυροδέματος ως δομικού υλικού. Το σκυρόδεμα και το επεξεργασμένο αμιαντοτσιμέντο αποτελούν τα δύο θεμελιώδη υλικά για την εκπόνηση της εργασίας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την μελέτη αυτών. Στο τρίτο κεφάλαιο, λοιπόν, γίνεται αναφορά στα στάδια παρασκευής του σκυροδέματος, στα χαρακτηριστικά και τη σύστασή του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο καταγράφονται όλες οι διαδικασίες που εκπονήθηκαν παράλληλα με την παρασκευή των δοκιμών. Ο επεξεργασμένος αμίαντος υποβλήθηκε σε μια σειρά δοκιμών για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά που έχει αποκτήσει μετά την επεξεργασία και να μελετηθεί η συμπεριφορά που παρουσιάζει ως ενισχυτικό. Αυτές οι προσεγγίσεις εν συνεχεία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μετά την θραύση των δοκιμών και τη συμπεριφορά τους σε κάμψη και θλίψη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα όλων των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται και τα γενικά συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν μέσα από τις προηγούμενες ενότητες και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων. Προσδιορίζεται η καλύτερη αναλογία ενισχυτικού, νερού και τσιμέντου για την παρασκευή των δοκιμών με τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα χαρακτηριστικά του πρότυπου δοκιμίου και άλλες συνθήσεις που υπάρχουν διαθέσιμες στην αγορά.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

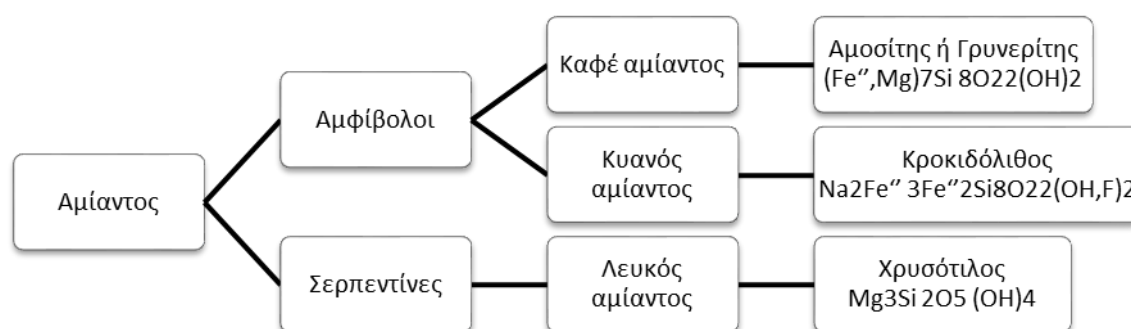
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αμίαντος

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία αμιάντου

Ο αμιάντος αποτελεί ορυκτό που έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών στην πάροδο των χρόνων. Σε παγκόσμιο επίπεδο συναντάται ως Asbestos ή Amiante, έχοντας δύο ονομασίες που μαρτυρούν την ελληνική προέλευσή του. Του αποδόθηκαν οι ονομασίες άσβεστος, καθώς δεν καιγόταν κατά τη χρήση του στα λυχνάρια, και αμιάντος, από το χαρακτηριστικό του ότι δεν «υφίστατο μίανσιν» (Αναστασιάδου, 2004).

Ο όρος αμιάντος περιλαμβάνει μία ομάδα διαφορετικών πυριτικών ορυκτών ινώδους μορφής. Πρόκειται για ένυδρα πυριτικά άλατα μαγνησίου με ασβέστιο, σίδηρο, νάτριο και ελεύθερο πυρίτιο. Υποδιαιρείται σε δύο μεγάλες ομάδες (βλ. Διάγραμμα 2.1), αυτή των σερπεντινών και αυτή των αμφιβόλων (Frank A., Joshi, 2014). Ο διαχωρισμός αυτός οφείλεται στις διαφορές της κρυσταλλικής του δομής και της χημικής του σύστασης. Οι σερπεντίνες έχουν φυλλώδη δομή σε αντίθεση με την αλυσιδωτή δομή των αμφιβόλων. Στις σερπεντίνες ανήκει μόνο μία μορφή αμιάντου, αυτή του χρυσότιλη, σε αντίθεση με τους αμφίβολου που περιλαμβάνουν πέντε μορφές αμιάντου, τον αμοσίτη, τον κροκιδόλιθο, τον ανθοφυλλίτη, τον ακτινόλιθο και τον τρεμόλιθο. Οι αμφίβолоι είναι άκαμπτοι με ίνες που μοιάζουν με βελόνες, και λιγότερο διαλυτοί από άλλα είδη. Αυτό τους καθιστά και πιο επικίνδυνους για την ανθρώπινη υγεία.



Διάγραμμα 2.1: Κατηγοριοποίηση αμιάντου

2.2 Μορφές αμιάντου

Οι κυρίαρχες μορφές που συναντάται ο αμιάντος, για εμπορικούς σκοπούς, είναι γνωστές με το χαρακτηριστικό χρώμα τους. Ένα χαρακτηριστικό που μόνο με εργαστηριακή ανάλυση μπορεί να ταυτοποιηθεί (STEB, 2007). Διακρίνονται κυρίως για την περιεκτικότητά τους σε πυρίτιο, δισθενή και τρισθενή σίδηρο, μαγνήσιο και νάτριο. Οι κυρίαρχες αυτές μορφές που συναντώνται είναι ο λευκός, ο καφέ και ο κυανός αμιάντος (NICNAS, 1999), η σύσταση των οποίων, τα ορυκτολογικά τους ονόματα αλλά και τα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται ακολούθως:

2.2.1 Λευκός αμιάντος

Στην μορφή αυτή ανήκει ο χρυσοτίλης (βλ. Εικόνα 2.1), η ινώδης ποικιλία σερπεντίνη που χρησιμοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών αμιάντου και αποτελεί περισσότερο από το 90% του συνολικού αποθέματος αμιάντου παγκοσμίως (Gibbs, 1979). Οι ίνες του είναι λεπτές, μεταξωτές, ελαστικές, κυματοειδείς, άσπρες προς γκριζοπράσινες και έχουν περισσότερο ελικοειδές σχήμα. Ο χρυσοτίλης έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό αλλά μικρή αντοχή σε χημική προσβολή (οξέα) σε σχέση με τους άλλους τύπους αμιάντου (Κουμαντάκης, 2007), ιδιότητα που τον καθιστά καλό ενισχυτικό για τσιμέντο (Πρατσόλη, 2006).



Εικόνα 2.1: Ίνες Χρυσοτίλη (<http://www.geo.auth.gr>)

2.2.2 Καφέ αμιάντος

Η δεύτερη πιο διαδεδομένη μορφή αμιάντου είναι ο αμοσίτης ή γρυνερίτης (βλ. Εικόνα 2.2), με ίνες ευθυτενείς, εύθραυστες και στην φυσική τους κατάσταση με χρώμα καφέ προς ελαφρύ γκριζο. Συναντάται σε επιχρίσματα ψεκάσμου, προϊόντα μόνωσης, και σε κονιάματα τσιμέντου, όπου απαιτείται μεγαλύτερη δομική αντοχή.



Εικόνα 2.2: Ίνες αμοσίτη (<http://www.greenasbestosmine.gr>)

2.2.3 Κυανός αμιάντος

Οι ίνες του κροκιδόλιθου (βλ. Εικόνα 2.3), έχουν χρώμα μπλε και είναι ευθυτενείς και ελαστικές. Αποτελεί την τρίτη κύρια μορφή που συναντάται ο αμιάντος κυρίως σε εφαρμογές όπου αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 2.3: Κροκιδόλιθος (<http://www.greenasbestosmine.gr>)

Ο ανθοφυλλίτης, ο ακτινόλιθος και ο τρεμόλιθος αποτελούν τις πιο σπάνιες και λιγότερο χρησιμοποιούμενες μορφές που συναντάται ο αμιάντος και ανήκουν στην κατηγορία των αμφιβόλων. Δεν διαθέτουν εμπορική αξία και βρίσκονται ως ίχνη σε άλλα ορυκτά.

2.3 Χρήση αμιάντου

Κατά τις περασμένες δεκαετίες η χρήση του αμιάντου ήταν εκτεταμένη σε χιλιάδες προϊόντα και εφαρμογές, λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων που παρουσιάζει ως υλικό. Η αντοχή στη θερμότητα και στα χημικά, η ευκαμψία, η στερεότητα και το χαμηλό κόστος παραγωγής του, τον κατέστησαν ως ένα από τα πλέον

χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά. Η αυξημένη χρήση του πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει οφείλεται στο γεγονός ότι υπήρχε εγχώρια παραγωγή αμιάντου από την εταιρεία «Μεταλλεία Αμιάντου Βορείου Ελλάδος, (ΜΑΒΕ)». Τα ΜΑΒΕ αποτέλεσαν από το 1982 μέχρι το 2000 την μεγαλύτερη μονάδα εξόρυξης και επεξεργασίας αμιάντου στην Ευρώπη, με έδρα το Ζιδάνι Κοζάνης. Στο διάστημα λειτουργίας των ΜΑΒΕ, εξορύχτηκαν περίπου 70.000.000 τόνοι μεταλλεύματος (σερπεντινίτης) με χρήση εκρηκτικών υλών. Κάποιες από τις χρήσεις του αμιάντου ήταν ως επιβραδυντικό καύσης, συγκολλητικό υλικό, σε αρκετά βιομηχανικά προϊόντα, (όπως μονωτικά περιβλήματα), και σε προϊόντα οικιακής χρήσης (όπως καλύμματα σιδερώστρων και ηλεκτρικά προϊόντα). Οι κυριότερες μορφές του αμιάντου στη βιομηχανία είναι το αμιαντοτσιμέντο, ο ψεκασμένος αμιάντος, η χρήση του ως μονωτικό υλικό και ο υφασμένος αμιάντος.

2.3.1 Αμιαντοτσιμέντο

Αποτελεί μείγμα τσιμέντου, αμιάντου και νερού, όπου στον Ελλαδικό χώρο είναι η συνηθέστερη και πιο αναγνωρίσιμη μορφή αμιάντου. Το αμιαντοτσιμέντο (βλ. Εικόνα 2.4) χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή κυματοειδών φύλων ΕΛΛΕΝΙΤ, η εφαρμογή των οποίων συναντάται κυρίως στην κατασκευή στεγών και προσόψεων σε κτίρια. Επίσης, σωλήνες μεταφοράς νερού και σωλήνες που χρησιμοποιούνται ως καπναγωγοί είναι κατασκευασμένες από αμιάντο.



Εικόνα 2.4: Μορφές αμιαντοτσιμέντου σε στέγες (αριστερά) και σωληνώσεις (δεξιά)(<http://www.kompanyon-stroy.zp.ua>, <https://ua.all.biz>)

2.3.2 Ψεκασμένος αμιάντος

Χρησιμοποιείται κυρίως για θερμομόνωση, ηχομόνωση, πυροπροστασία και διακόσμηση, μέσα από μία στρώση πάχους 10 - 150 mm, η οποία εφαρμόζεται με σπρέι.

2.3.3 Μόνωση με χρήση αμιάντου

Ο αμιάντος χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε θερμικές μονώσεις σωληνώσεων, λεβήτων, δεξαμενών και εναλλακτών θερμότητας. Η απλούστερη μορφή μόνωσης ήταν τα προκατασκευασμένα τμήματα όπως ιμάντες ή υφάσματα περιτύλιξης βαμμένα ή σφραγισμένα από σκληρό αμιαντούχο πλαστικό για προστασία από χτυπήματα.

Ο αμιάντος υπάρχει επίσης με την μορφή μονωτικών αμιαντόπλακων που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για πυροπροστασία, ηχομόνωση και θερμομόνωση σε περιοχές γύρω από καμπίνες ανελκυστήρων και κλιμακοστάσιων σε κτίρια πολλών ορόφων.

2.3.4 Υφασμένος αμιάντος

Χρησιμοποιήθηκε ως επένδυση σε ενώσεις σωλήνων, ως υλικό πυραντοχής σε λέβητες και για στεγανοποιήσεις σωληνώσεων. Άλλα προϊόντα που χαρακτηρίζονται από την παρουσία αμιάντου είναι τα στρώματα, κουβέρτες πυροπροστασίας, γάντια και προστατευτικές κουρτίνες.

2.4 Επικινδυνότητα στην ανθρώπινη υγεία

Η ευρεία χρήση του αμιάντου στο παρελθόν οφείλεται στις φυσικές και χημικές ιδιότητες που τον χαρακτηρίζουν, όμως σήμερα θεωρείται ένα από τα πιο επικίνδυνα δομικά υλικά του οποίου η παραγωγή και χρήση έχει απαγορευθεί σε αρκετές χώρες καθώς σε κάποιες μορφές του είναι τοξικός και η εισπνοή των ινών του μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παθήσεις. Είναι υλικό με μακρόστενους ινώδεις κρυστάλλους, ποικίλων διαμέτρων και μηκών χαρακτηριζόμενο ως επιβλαβές για τον ανθρώπινο οργανισμό από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), όταν οι διαστάσεις των ινών του ανέρχονται σε μήκος $L > 5 \mu\text{m}$, διάμετρο $d < 3 \mu\text{m}$, και λόγο ‘μήκους: διαμέτρου’ $\geq '3:1'$ (Αναστασιάδου, 2004). Είναι εύκαμπτο, έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, σε χημική και θερμική προσβολή, μεγάλη ειδική επιφάνεια και μπορεί να διαχωριστεί με μηχανικά μέσα σε ίνες ποικίλου μήκους και διατομής. Ο αμιάντος δεν έχει ανιχνεύσιμη οσμή ή γεύση (Αξιώτης, 2009).

Ο αμιάντος αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία όταν υπόκειται σε επεξεργασία ή φθορά, καθώς οι ίνες που τον αποτελούν διασκορπίζονται και εισέρχονται μέσω της αναπνοής στο ανθρώπινο σώμα. Η αμιάντωση, το

μεσοθηλίωμα, ο καρκίνος του πνεύμονα και ο καρκίνος του λάρυγγα είναι οι συνηθέστερες μορφές καρκινογένεσης που έχουν προκληθεί από αμύαντο.

2.4.1 Αμύαντωση

Η αμύαντωση είναι μία αναπνευστική πάθηση που προκαλείται από την ιδιότητα των ινών του αμύαντου να επιφέρουν ίνωση του πνεύμονα. Η νόσος αυτή ονομάστηκε αμύαντωση από τον Cooke το 1927 (Weiss W., 1999). Μακροχρόνια έκθεση σε ίνες αμύαντου προκαλεί ουλές στους ιστούς των πνευμόνων οδηγώντας σε αναπνευστική ανεπάρκεια. Η διάγνωση της ασθένειας αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί δεκαετίες μετά την έκθεση στον αμύαντο, με τα συμπτώματα της δύσπνοιας, του βήχα, της πνευμονικής υπέρτασης και υποξαιμίας (Cookson et al., 1985).

2.4.2 Καρκίνος του πνεύμονα

Ο αμύαντος είναι μία από τις κυριότερες αιτίες που προκαλείται καρκίνος του πνεύμονα. Απλή έκθεση στον αμύαντο έχει λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα, ενώ ο συνδυασμός καπνίσματος με έκθεση στον αμύαντο αυξάνει δραματικά τον κίνδυνο για την εμφάνιση αυτού (IPCS, 1996). Όσον αφορά τους καπνιστές όταν συνδυαστεί με την έκθεση σε αμύαντο τότε η πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα είναι πολύ περισσότερο αυξημένη. Τα συμπτώματα της ασθένειας είναι αναπνευστική ανεπάρκεια, βήχας, θωρακικός πόνος, βραχνάδα, αίμα στα πτύελα και απώλεια σωματικού βάρους.

2.4.3 Καρκίνος του λάρυγγα

Μία αιτία ανάπτυξης καρκίνου του λάρυγγα είναι ο αμύαντος. Συμπτώματα της ασθένειας αυτής αποτελούν η επίμονη βραχνάδα της φωνής που εγκαθίσταται προοδευτικά, η δυσκολία στην κατάποση, που μπορεί να εμφανιστεί και ο επίμονος πόνος στο λαιμό ή πόνος που εκδηλώνεται κατά την κατάποση. Μπορεί να εμφανιστεί και πόνος στο αυτί ως σύμπτωμα που σηματοδοτεί την εμφάνιση καρκίνου του λάρυγγα, η εμφάνιση μάζας στο λαιμό, επίμονος βήχας, πονόλαιμος που δεν υποχωρεί και τέλος η απώλεια σωματικού βάρους.

Η αντιμετώπιση των κακοηθών όγκων του λάρυγγα περιλαμβάνει όσο επεμβατικές όσο και μη επεμβατικές θεραπείες όπως την χειρουργική θεραπεία, την ακτινοθεραπεία και την χημειοθεραπεία (www.lung.gr)

2.4.4 Μεσοθηλίωμα

Το μεσοθηλίωμα είναι μία μορφή καρκίνου, που εμφανίζεται στους ιστούς που καλύπτουν τους πνεύμονες ή την κοιλιά και δεν σχετίζεται με το κάπνισμα (Dodson et al., 2003). Η επένδυση γύρω από τους πνεύμονες ονομάζεται υπεζωκότας και στην κοιλιακή χώρα περιτοναίο. Οι άνδρες έχουν πέντε φορές περισσότερες πιθανότητες από τις γυναίκες να αναπτύξουν μεσοθηλίωμα με πιο συχνή ηλικία εμφάνισης μεταξύ 40 και 70 ετών. Το μεσοθηλίωμα συνηθέστερα παρατηρείται στον υπεζωκότα. Υπάρχουν δύο στρώματα υπεζωκότος, το ένα επενδύει τους πνεύμονες και το άλλο επενδύει το θωρακικό τοίχωμα. Αυτά τα δύο στρώματα έχουν κάποιο υγρό ανάμεσα τους έτσι ώστε να μπορούν να γλιστρούν εύκολα το ένα πάνω στο άλλο κατά την αναπνοή. Με παρόμοιο τρόπο, η επένδυση της κοιλιάς έχει επίσης δύο στρώματα, ένα που επενδύει το έντερο και τα κοιλιακά όργανα και ένα άλλο που επενδύει το κοιλιακό τοίχωμα.

Το μεσοθηλίωμα που προσβάλλει το περιτόναιο είναι λιγότερο συχνό από το μεσοθηλίωμα που προσβάλλει τον υπεζωκότα.

Συμπτώματα της ασθένειας αυτής είναι η δυσκολία της αναπνοής, ο θωρακικός πόνος, ο βήχας, η βραχνή φωνή, απώλεια βάρους, αυξημένη εφίδρωση και μείωση της όρεξης. Όταν το μεσοθηλίωμα αναπτυχθεί στο υπεζωκότα προκαλεί πάχυνση του υπεζωκότος και άσκηση πίεσης πάνω στον πνεύμονα.

2.5 Μέθοδοι Επεξεργασίας αποβλήτων που περιέχουν αμιάντο

Η εκτεταμένη χρήση του αμιάντου και οι επιβλαβείς επιπτώσεις του τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον, δημιούργησαν έντονα την ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων αυτού. Τα απόβλητα που περιέχουν αμιάντο διατίθενται συνήθως σε χώρους υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων (XYTEA), μία πρακτική που δεν αντιμετωπίζει στην ουσία το πρόβλημα του αμιάντου, καθώς δεν παρεμποδίζεται η απελευθέρωση των επικίνδυνων ινών του. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα αναπτύχθηκαν μέθοδοι επεξεργασίας με στόχο την αποτοξικοποίηση των αποβλήτων αυτού και πιθανή επαναχρησιμοποίηση των τελικών προϊόντων σε άλλες εφαρμογές.

2.5.1 Στερεοποίηση και σταθεροποίηση

Αυτή η μέθοδος διαχείρισης και επεξεργασίας συντελεί στη μείωση της απελευθέρωσης επικίνδυνων ινών ή συστατικών, της εκτιθέμενης επιφάνειας, του

πορώδους και της διαπερατότητας των αποβλήτων. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ως μία καλή λύση προεπεξεργασίας των αποβλήτων αμιάντου πριν την υγειονομική ταφή. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε *in situ* όσο και *ex situ* εφαρμογές απομακρύνοντας την άμεση απειλή από τις αδέσμευτες ίνες του αμιάντου. Παρόλα τα πλεονεκτήματα που δείχνει να διαθέτει, είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί πως το ποσό απελευθερωμένων ινών από υλικό που έχει υποστεί φθορά είναι τουλάχιστον τρεις φορές υψηλότερο από το ανάλογο μη επεξεργασμένων υλικών οροφής σε καλές συνθήκες (Spasiano & Pirozzi, 2017) και δεν προσφέρει ένα αξιοποιήσιμο τελικό προϊόν.

2.5.2 Υαλοποίηση

Η μέθοδος αυτή με τη βοήθεια θερμικής επεξεργασίας στηρίζεται στη μετατροπή των αποβλήτων σε ένα ομοιογενές πυριτικό γυαλί. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην μέθοδο αυτή καταστρέφουν τελείως τη δομή των ινών αμιάντου μετατρέποντας έτσι το τελικό προϊόν σε ένα απαλλαγμένο από αμιάντο υλικό. Η μείωση του όγκου των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής λόγω της επαναχρησιμοποίησης μέρους του τελικού προϊόντος αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μία πολύ μεγάλη μονάδα επεξεργασίας στη Γαλλία, διαχειρίζοντας τόνους του προϊόντος (Bernardo et al., 2009, OVAM, 2016). Το κύριο μειονέκτημα της είναι τα ποσά ενέργειας που καταναλώνει για την επεξεργασία των αποβλήτων, που συνεπάγονται αυξημένα οικονομικά έξοδα. Το μειονέκτημα αυτό ισοσταθμίζεται από την εξοικονόμηση του κόστους για την ταφή των αποβλήτων και από το γεγονός ότι το τελικό προϊόν έχει κάποια αξία πώλησης (Tu et al., 2010).

2.5.3 Θερμικές επεξεργασίες

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι ίνες αμιάντου σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες είναι ασταθείς. Η θερμική επεξεργασία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό ή συνδυάζεται με κάποια από τις άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Ο χρυσοτίλης συγκεκριμένα στους 500 – 600 °C ξεκινάει να χάνει τις υδροξυλομάδες του και μετατρέπεται σε φορσφερίτη, ο οποίος επανακρυσταλοποιείται στους 820 °C. Πάνω από 100 - 250 °C το προσροφόμενο νερό εξατμίζεται και ο χρυσοτίλης χάνει περίπου το 1-2% του βάρους του. Σε περίπου 400 °C επέρχεται και άλλη απώλεια νερού λόγω της περίσσειας αφυδάτωσης του βρουσίτη. Σε θερμοκρασίες πάνω από 600 °C οι ίνες

χρυσοτίλη σε αφυδροξυλίωση χάνουν σχεδόν 13% του βάρους του. Επιπλέον, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην κρυστάλλωση του φορσφερίτη στους 820 °C. Με παρόμοιο τρόπο συμπεριφέρονται και άλλοι τύποι αποβλήτων αμιάντου. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, και η ανάγκη καθαρισμού των παραγόμενων αερίων για αποφυγή ύπαρξης ινών αμιάντου. Παρόλα αυτά, παραμένει περισσότερο οικονομική μέθοδος από την υαλοποίηση (Gualtieri et al., 2008, Zaremba et al., 2010, Kusiorowski et al., 2013, Viani et al., 2013).

2.5.4 Μηχανική επεξεργασία

Οι μέθοδοι μηχανικής επεξεργασίας στηρίζονται στις φυσικοχημικές μετατροπές των ουσιών σε συσσωματώματα λόγω της μηχανικής ενέργειας. Παρουσιάζουν μεγάλο ρυθμό αντίδρασης και χρησιμοποιούν χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις θερμικές επεξεργασίες. Τα απόβλητα αμιάντου σε δοκιμές άλεσης που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας ένα στρογγυλό μύλο, εργαστηριακής κλίμακας που λειτουργούσε στις 250 στροφές/λεπτό, μετατράπηκαν σε αβλαβή τελικά προϊόντα μέσα από επεξεργασία δώδεκα λεπτών (Plescia et al., 2003). Συγκεκριμένα, ο χρυσοτίλης μετατράπηκε σε άμορφη φάση σε τέσσερα λεπτά, ενώ οι αμφίβολοι σε 8-12 λεπτά. Το τελικό προϊόν της διαδικασίας είναι σε μορφή σκόνης απαλλαγμένης από τον επικίνδυνο αμιάντο και έτοιμης να διατεθεί σε επόμενες εφαρμογές, όπως σε ανάμιξη με κονίες για την παρασκευή κονιαμάτων με αυξημένες μηχανικές ιδιότητες. Το κόστος της διεργασίας αυτής είναι υψηλότερο από την θερμική επεξεργασία, όμως ένας συνδυασμός και των δύο μεθόδων ίσως οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση (Balaz & Dutkov, 2009).

2.5.5 Χημική επεξεργασία

Η χημική επεξεργασία στηρίζεται στην διάλυση μέσω του νερού των μεταλλικών στοιχείων της κρυσταλλικής δομής του αμιάντου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι εναιώρημα 500 ppm χρυσοτίλη και κροκιδόλιθου σε νερό με pH ίσο με 7, είχε ως αποτέλεσμα την έκπλυση ιόντων μαγνησίου (Choi and Smith, 1972).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Βασικές Αρχές Σκυροδέματος

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται και επεξηγούνται όλες οι έννοιες που απαιτείται να είναι γνωστές για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας και της συλλογιστικής πορείας που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής όσον αφορά τη σύνθεση, τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα αποτελεί κυρίαρχο υλικό προς κατανόηση καθώς είναι το τελικώς μελετώμενο προϊόν. Για την κατανόησή του, χρειάζεται αρχικά η αποσαφήνιση των εννοιών της κονιάς και του κονιάματος.

3.1 Κονία

Η παραγωγή κονιάματος απαιτεί την ανάμιξη συνδετικής κονιάς με αδρανές υλικό και νερό (Φραγκούλιας, Χατζηγεωργίου, 2016). Ως *κονίες* μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στερεά συνδετικά υλικά σε λεπτό διαμερισμό, η ανάμιξη των οποίων με ρευστά μέσα αναπτύσσει πλαστικές ιδιότητες είτε συνδετικά υλικά σε υγρή μορφή (πολτός) τα οποία σε ανάμιξη με νερό μετατρέπονται σε πλαστικό πολτό με συγκολλητικές ιδιότητες. Η προσθήκη αδρανών δομικών υλικών στο ανωτέρω περιγραφόμενο μείγμα σχηματίζει μία πλαστική μάζα η οποία με την πάροδο ορισμένου χρόνου (ο χρόνος διαφοροποιείται για κάθε κονία), σχηματίζει το κονίαμα που παρουσιάζει εντελώς διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορά από εκείνη της κονιάς. Μετά την ανάμιξή του με το νερό ο πολτός πήζει, σκληραίνει και αποκτά αντοχή. Οι κονίες υποδιαιρούνται σε οργανικές και ανόργανες. Οι οργανικές υποδιαιρούνται σε φυσικές και συνθετικές, ενώ οι ανόργανες υποδιαιρούνται σε αερικές και υδραυλικές. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι υδραυλικές κονίες. Οι κονίες αυτές πήζουν, σκληραίνουν και αποκτούν αντοχή όχι μόνο στον αέρα αλλά και στο νερό. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η υδραυλική άσβεστος, οι ποζολάνες, το φυσικό τσιμέντο, τα ποζολανικά τσιμέντα κ.ά.

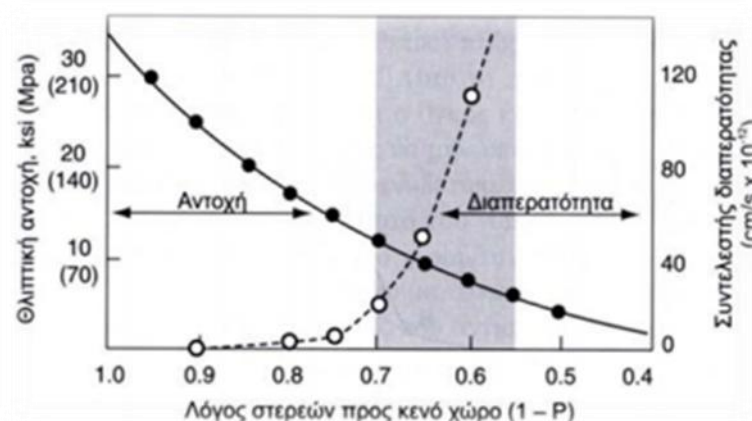
Η διαδικασία παραγωγής κονιάς αποτελείται από την διαδικασία όπτησης και άλεσης. Κατά την όπτηση απομακρύνεται φυσικά και χημικά ενωμένο νερό, αποσπώνται τα όξινα συστατικά, όπως το CO₂, σχηματίζονται νέες ενώσεις που έχουν την τάση να ενώνονται με το νερό, και όλα αυτά υπό θερμοκρασία που διαφέρει ανάλογα με το είδος της κονιάς. Στο στάδιο της άλεσης αυξάνεται η ειδική επιφάνεια της κονιάς και είναι το στάδιο όπου μπορούν να αναμιχθούν κονίες για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.

Η σύσταση της κονιάς, η λεπτότητα άλεσης, οι αναλογίες με τις οποίες προστίθενται, επηρεάζουν τη μορφή των κρυστάλλων και τον τρόπο που αυτοί θα συνεργαστούν και το ποσοστό των κενών μεταξύ της δομής, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την αντοχή, την ανθεκτικότητα, και τη σταθερότητα έναντι διαβρωτικών παραγόντων των κονιαμάτων.

3.2 Κονίαμα

Αποτελεί ένα σύνθετο, ετερογενές, πορώδες υλικό όπου με την πάροδο του χρόνου αρχίζει να στερεοποιείται μέχρι να μετατραπεί σε στερεό προϊόν. Η στερεοποίηση επηρεάζεται από την κονία και όχι από τα αδρανή υλικά. Η αντοχή τους τα κατατάσσει σε χαμηλής, μέτριας ή υψηλής αντοχής ενώ βάσει της ποσότητας κονιάς χαρακτηρίζονται ως ισχνά, κανονικά ή παχιά.

Η διαδικασία παραγωγής του κονιάματος επηρεάζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου, τη χρήση της απαραίτητης ποσότητας κονιών για πλήρωση των κενών και την ποσότητα του νερού. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα συντελέσουν για τις καλύτερες ιδιότητες του κονιάματος (βλ. Διάγραμμα 3.1).



Διάγραμμα 3.1: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής με λόγο στερεών προς κενό (Mehta & Monteiro, 2006, Μετάφραση Παπαγιάννη, 2010)

Παρατηρείται πως όσο μειώνεται ο λόγος στερεών προς κενό χώρο μειώνεται και η θλιπτική αντοχή. Αυτό συμβαίνει καθώς αυξάνονται τα κενά στο υλικό, τα οποία όμως δεν προσδίδουν αντοχή στο υλικό, προκαλώντας ταυτόχρονα αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας.

Εκτός από τα αδρανή και την κοκκομετρική διαβάθμιση αυτών σημαντικό ρόλο παίζει και το νερό που θα προστεθεί στο μείγμα. Το νερό βρίσκεται ελεύθερο στο μείγμα ή εγκλωβισμένο στο κρυσταλλικό πλέγμα των συστατικών, και με την πάροδο του χρόνου εξατμίζεται και περιορίζεται, δημιουργώντας χώρο στα κολλοειδή συστατικά και στους κρυστάλλους να αυξηθούν. Ο λόγος νερού προς κονία επηρεάζει σημαντικά την θλιπτική αντοχή του υλικού, το πορώδες και την εργασιμότητα. Αυτό συμβαίνει καθώς κατά την εξάτμιση του νερού δημιουργούνται πόροι με αέρα που δεν προσδίδουν αντοχή στο υλικό.

Υπάρχει πληθώρα κονιαμάτων και εφαρμογών που μπορούν αντίστοιχα να εφαρμοστούν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η χρήση τους ως συνδετικό υλικό, ως επιχρίσματα, μονωτικά υλικά και ως πρώτες ύλες για την κατασκευή τεχνητών λίθων (Mehta & Monteiro, 2006).

3.3 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο υλικό που προσφέρει τεράστιες δυνατότητες στη σύγχρονη κοινωνία. Χρησιμοποιείται ευρέως στις κατασκευές λόγω πληθώρας πλεονεκτημάτων που το χαρακτηρίζουν. Η ευκολία εύρεσης πρώτων υλών για την παραγωγή του, ο τρόπος παρασκευής και μορφοποίησης του, το χαμηλό κόστος που παρουσιάζει η παρασκευή του και οι αυξημένες μηχανικές ιδιότητές του είναι κάποιοι από τους βασικούς παράγοντες που το έχουν καθιερώσει ως τον απόλυτο κυρίαρχο, για δεκαετίες, στον κατασκευαστικό τομέα.

Ο ορισμός του σκυροδέματος είναι στενά συνδεδεμένος με τον ορισμό του τσιμέντου, το οποίο αποτελεί ένα από τα κύρια συστατικά του. Αυτή η στενή σχέση μεταξύ τους οδήγησε στην παρασκευή πολλών ειδών τσιμέντου και σκυροδεμάτων κατά το πέρασμα των χρόνων. Το σκυρόδεμα αποτελεί προϊόν ανάμιξης και συνεπώς θεωρείται κονίαμα, αποκτώντας τις ιδιότητές του από τα συστατικά που το αποτελούν (Παπαγιάννη, 2010). Συγκεκριμένα, αποτελεί προϊόν ανάμιξης τσιμέντου με άμμο, χαλίκια (σκύρα) και νερό, με ή χωρίς την προσθήκη πρόσμικτων υλικών. Συναντώνται πάρα πολλά είδη σκυροδέματος όπως το συμβατικό σκυρόδεμα (πυκνότητα 2000 - 2600 kg/m³), σκυρόδεμα μεγάλου ειδικού βάρους (πυκνότητα > 2600 kg/m³), ελαφροσκυρόδεμα (πυκνότητα μεταξύ 800 - 2000 kg/m³), εκτοξευόμενο

και σιδηροπαγές ή οπλισμένο σκυρόδεμα (αυτό που συνδυάζεται με χαλύβδινες ράβδους οπλισμού). Το είδος του σκυροδέματος που επιλέγεται για κάθε τύπο κατασκευής πληροί μία σειρά κανονισμών και προτύπων. Η Ελλάδα ακολουθεί το ΕΛΟΤ EN 206:2013, που προήλθε από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο Σκυροδέματος EN 206:2013.

Το σκυρόδεμα χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με την θλιπτική αντοχή του. Το πρώτο νούμερο δείχνει την αντοχή του πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου (διαμέτρου 15 και ύψους 30 cm) και το δεύτερο την αντοχή του πρότυπου κυβικού δοκιμίου (ακμής 15 cm), με μονάδες μέτρησης τα MPa. Οι συνηθέστερες κατηγορίες που χρησιμοποιούνται είναι οι C20/25, C25/30, C30/37.

3.3.1 Στάδια παραγωγής σκυροδέματος

Η πορεία παραγωγής σκυροδέματος ακολουθεί τα ακόλουθα στάδια:

- **Συλλογή και επεξεργασία πρώτων υλών:** Οι αναλογίες των υλικών και ο λόγος νερού προς τσιμέντο καθορίζονται από τη μελέτη συνθέσεως.
- **Ανάμιξη πρώτων υλών:** Τα επιμέρους υλικά εισέρχονται στον αναμκτήρα με τις αναλογίες που προβλέπονται στην μελέτη σύνθεσης.
- **Μεταφορά σκυροδέματος:** Πραγματοποιείται με προσοχή για την διατήρηση της ομοιογένειας και εργασιμότητας του μείγματος και προστατευμένο από τις καιρικές συνθήκες.
- **Διάστρωση σκυροδέματος:** Η εκφόρτωση γίνεται όσο πλησιέστερα στην τελική θέση διάστρωσης χρησιμοποιώντας, όταν κρίνεται αναγκαίο, για ενδιάμεση μεταφορά, αντλίες, κεκλιμένα επίπεδα ή άλλα μέσα που δεν προκαλούν απόμιξη του μείγματος.
- **Συμπύκνωση σκυροδέματος με δονητή:** Εφαρμόζεται μόλις το σκυρόδεμα έχει διαστρωθεί και εξυπηρετεί την καλύτερη εφαρμογή αυτού.
- **Συντήρηση σκυροδέματος:** Ένα απαραίτητο και πολύ καθοριστικό στάδιο. Διαρκεί για χρονικό διάστημα που εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και τις ειδικές απαιτήσεις του έργου. Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας για την βέλτιστη ενυδάτωσή του. Οι πρώτες επτά ημέρες είναι αρκετά κρίσιμες για το σκυρόδεμα και η ενυδάτωση διαρκεί έως τις 28 μέρες από την

σκυροδέτηση. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος αναπτύσσονται μέσω της ενυδάτωσης του τσιμέντου.

3.3.2 Σύσταση σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως ήδη αναφέρθηκε στην ανωτέρω υποενότητα, αποτελείται από ανάμιξη συνδετικής κονίας που είναι το τσιμέντο, αδρανή υλικά και νερό. Προκειμένου να ενισχυθούν περαιτέρω οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κάποια επιπλέον πρόσμικτα υλικά (Παπαγιάννη, Οικονόμου, Στεφανίδου 2014).

3.3.2.1 Τσιμέντο

Ανακαλύφθηκε από τον Άγγλο J. Aspdin το 1824, που του έδωσε την ονομασία "τσιμέντο Πόρτλαντ", γιατί το υλικό αυτό είχε το χρώμα των εδαφών της περιοχής Πόρτλαντ της Αγγλίας και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα συστατικά της ποιότητας του παραγόμενου σκυροδέματος. Η ταξινόμηση όλων των διαθέσιμων ειδών τσιμέντου ήταν μία πολύπλοκη διαδικασία, η οποία όμως κατέληξε στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1 “*«Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα»*», η ελληνική έκδοση του οποίου είναι το ΕΛΟΤ EN 197-1. Τα τσιμέντα που συμμορφώνονται στην Ευρωπαϊκή Οδηγία ονομάζονται CEM. Τα τσιμέντα αυτά αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, παρουσιάζοντας όμως μία ομοιογένεια στη σύνθεσή τους και ακολουθώντας μία τυποποιημένη διαδικασία παραγωγής και χειρισμού του υλικού. Αυτές οι διεργασίες περιγράφονται στο ΕΛΟΤ EN 197-2 “*«Τσιμέντο-Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης»*». Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEMII/A-LL, η σύσταση του οποίου θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου ως υλικού είναι:

- Κλίνκερ για τσιμέντο Πόρτλαντ (K), (clinker)
- Κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου (S), (granulated blastfurnaceslag)
- Ποζολανικά υλικά (P, Q)
 - Φυσική ποζολάνη (P), (natural pozzolana)

- Φυσική ψημένη ποζολάνη (Q), (natural calcined pozzolana)
- Ιπτάμενες τέφρες (V,W)
 - Πυριτική ιπτάμενη τέφρα (V), (siliceous flyash)
 - Ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα (W), (calcareous flyash)
- Ψημένος σχιστόλιθος (T), (burnt shale)
- Ασβεστόλιθος (L, LL), (limestone)
- Πυριτική παιπάλη (D), (silica flour)

Οι τύποι των τσιμεντών (βλ. Πίνακα 3.1)) CEMI, II, III, IV διαχωρίζονται ως ακολούθως:

- Στον **Τύπο I** (Τσιμέντο Portland): Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την άλεση του κλίνκερ με προσθήκη γύψου 2-3% και filler < 3% κ.β.
- **Τύπος II** (Τσιμέντο Portland με ποζολάνες): Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που περιέχουν ποζολάνες. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20% κ.β.
- **Τύπος III** (Ποζολανικά τσιμέντα Portland): Περιέχουν ποζολάνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από εκείνα του τύπου II. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20 - 40%. Παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμότητα ενυδάτωσης, και ενδείκνυνται σε ογκώδη έργα (πχ. υπερχειλιστές ΔΕΗ, φράγματα κλπ)
- **Τύπος IV** (SR) (Τσιμέντο Portland ανθεκτικό στα θειικά άλατα): Δεν περιέχουν ποζολάνες αλλά το αργιλικό τριασβέστιο (C_3A) πρέπει να είναι μικρότερο του 3.5% και η περιεκτικότητα σε τριοξείδιο του θείου (SO_3) να μην υπερβαίνει το 2.5%. Χρησιμοποιείται στην παρασκευή σκυροδέματος για κατασκευές που βρίσκονται σε πολύ διαβρωτικό περιβάλλον (πχ. μονάδες βιολογικού καθαρισμού, σωλήνες αποχέτευσης).

Κόμμοι τύποι	Ονομασία των 27 προϊόντων (τύποι κοινών τσιμεντών)		Σύνθεση (επί της % κατά μέζα) ⁽¹⁾										Δευτερεύοντα συστατικά	
			Κόμμο συστατικά											
			Κλίγκερ Κ	Σκυρίο υψηλού S	Πορτοκιά παισιόλη D ⁽²⁾	Ποζολόνη		Ισιμενός τάρρος		Ψημίτος σχετολύθος T	Ασβεστολύθος			
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Τσιμέντο Πόρτλαντ με Σκυρίο Υψηλού	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πυριτική παισιόλη	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολόνη	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ιστιμενός τάρρος	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ψημίτος σχετολύθο	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ασβεστολύθο	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ-σύνθετο ⁽³⁾	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
CEM III	Σκυροτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ποζολογικό τσιμέντο ⁽⁴⁾	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο ⁽⁵⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5	

α) Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των κοινών και δευτερευόντων συστατικών
β) Το ποσοστό της πυριτικής παισιόλης περιορίζεται στο 10%
γ) Στα τσιμέντα Πόρτλαντ-σύνθετα CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποζολογικά τσιμέντα CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμέντα CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά πλην του κλίγκερ πρέπει να δηλώνονται στην ονομασία του τσιμέντου (για παράδειγμα βλ. κεφάλαιο 8).

Πίνακας 3.1: Τύποι τσιμεντών σύμφωνα με το πρότυπο EN197-1

3.3.2.2 Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά αποτελούν το 70-85% του συνολικού βάρους του σκυροδέματος (Λουπασάκης 2013). Δεν προσδίδουν χημικές ιδιότητες στο σκυρόδεμα, αλλά με τη γεωμετρική τους ταξινόμηση αποτελούν το σκελετό του σκυροδέματος. Τα κενά που δημιουργούνται ανάμεσά τους πρέπει να γεμίσουν με τη συνδετική κονία προκειμένου το σκυρόδεμα να αποκτήσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Είναι αξιοσημείωτο πως η ποιότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται περισσότερο από την πυκνότητα των αδρανών και όχι τόσο από την ποιότητα και την αντοχή των κόκκων αυτών.

Η κατηγοριοποίηση των αδρανών υλικών μπορεί να γίνει με βάση:

- **Την προέλευσή τους:** Η προέλευση των αδρανών μπορεί να είναι είτε από το φυσικό περιβάλλον είτε να αποτελούν προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας. Επιπρόσθετα υπάρχουν και τα ανακυκλώσιμα αδρανή υλικά μέσα από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές.
- **Τη πηγή λήψης:** Φυσικά ή συλλεκτά και αδρανή λατομείων
- **Το ειδικό βάρος τους:** Κατηγοριοποιούνται σε συμβατικά αδρανή (από 2 έως 3 Mg/m³), ελαφροβαρή (ειδικό βάρος < 2 Mg/m³), βαρέα αδρανή (ειδικό βάρος > 3 Mg/m³)
- **Το μέγεθος των κόκκων:** Λεπτόκοκκα (μέγεθος κόκκου < 4 mm, άμμος), χονδρόκοκκα (μέγιστο μέγεθος κόκκου μεγαλύτερο από 4 mm, και ελάχιστο μεγαλύτερο από 2 mm), filler (διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2 mm, και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0.063 mm)
- **Τη χρήση τους:** Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την χρήση του τελικού προϊόντος με βάση την αντοχή σε διάτμηση, σε φθορά, σε τριβή, ανθεκτικότητα, φαινόμενη πυκνότητα και υδατοαπορροφητικότητα

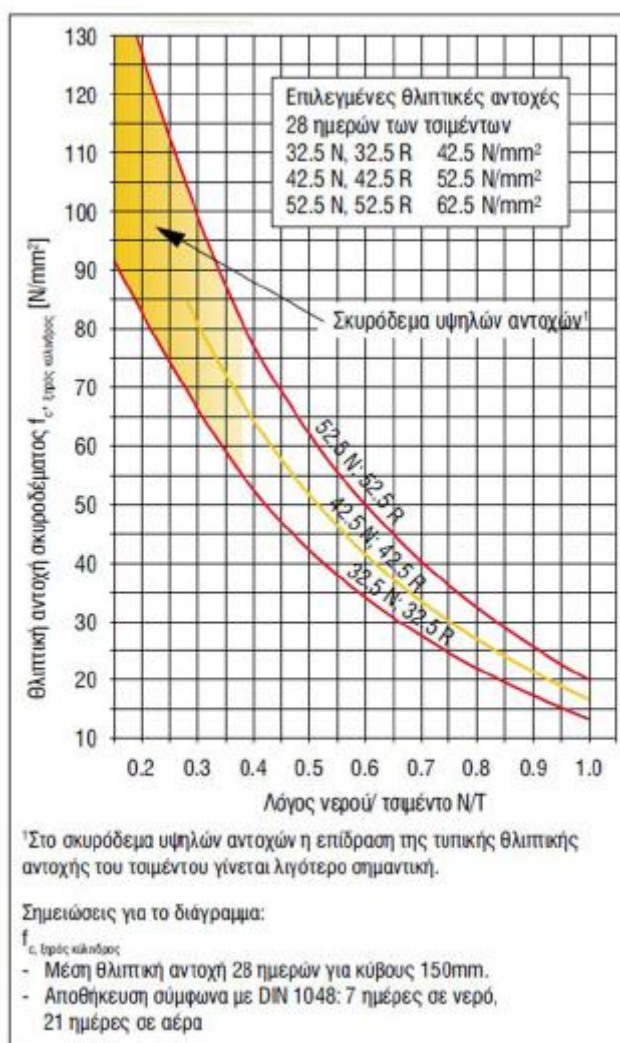
3.3.2.3 Πρόσμικτα σκυροδέματος

Ενισχύουν τις ιδιότητες του φρέσκου ή/και σκληρυμένου σκυροδέματος με χημικό ή φυσικό τρόπο και καθορίζονται με βάση το Πρότυπο EN 934-2. Ως πρόσμικτα μπορεί να χρησιμοποιηθούν πληθώρα ουσιών για την επίτευξη ποικίλων εφαρμογών. Τα πρόσμικτα μπορούν να λειτουργήσουν ως:

- **Μειωτής νερού:** Μία ουσία που δρα ως μειωτής νερού μπορεί να επιφέρει μείωση του περιεχόμενου νερού στο μείγμα χωρίς να επηρεάζει τη συνεκτικότητά του, να αυξήσει το εργάσιμό του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή να επιτύχει και τα δύο αποτελέσματα.
- **Υπερρευστοποιητής:** Λειτουργεί όπως ο μειωτής νερού και επιτρέπει τη μείωση του περιεχόμενου νερού στο μείγμα σκυροδέματος, χωρίς να επιδρά στη συνεκτικότητα ή αυξάνει σημαντικά το εργάσιμό του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού.
- **Ρυθμιστής ιξώδους:** Μειώνει το νερό απόμειξης που προκύπτει λόγω εξίδρωσης στο νωπό σκυρόδεμα.
- **Αερακτικό:** Εισάγει συγκεκριμένη ποσότητα αέρα στο μίγμα με τη μορφή μικρών και ομοιόμορφα κατανεμημένων φυσαλίδων αέρα κατά τη φάση ανάμειξης και οι οποίες παραμένουν στη σκληρυμένη μάζα σκυροδέματος.
- **Επιταχυντής πήξης:** Μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την αρχική πήξη, αυξάνοντας τις πρώιμες αντοχές.
- **Επιταχυντής σκλήρυνσης:** Επιταχύνει τις πρώιμες αντοχές με ή χωρίς επίδραση στο χρόνο πήξης.
- **Επιβραδυντής:** Επιβραδύνει το χρόνο για την αρχική πήξη και επιμηκώνει την εργασιμότητα.
- **Στεγανωτικό μάζας:** Μειώνει την απορρόφηση νερού από τους τριχοειδείς πόρους του σκληρυμένου σκυροδέματος.
- **Επιβραδυντής / μειωτής νερού:** Έχει τις συνδυαστικές ιδιότητες ενός μειωτή νερού (κύρια ιδιότητα) και ενός επιβραδυντή (επιπλέον ιδιότητα).
- **Επιβραδυντής / υπερρευστοποιητής:** Έχει τις συνδυαστικές ιδιότητες ενός υπερρευστοποιητή (κύρια ιδιότητα) και ενός επιβραδυντή (επιπλέον ιδιότητα).
- **Επιταχυντής πήξης / μειωτής νερού:** Έχει τις συνδυαστικές ιδιότητες ενός μειωτή νερού (κύρια ιδιότητα) και ενός επιταχυντή πήξης (επιπλέον ιδιότητα).

3.3.2.4 Νερό

Το τελευταίο συστατικό που θα αναλυθεί για το μείγμα του σκυροδέματος είναι το νερό. Όπως και όλα τα υπόλοιπα συστατικά ακολουθεί πρότυπες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1008:2002. Εκτός από την καταλληλότητα του νερού πολύ σημαντικός για το σκυρόδεμα είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο (βλ. Διάγραμμα 3.2). Όσο πιο αυξημένος ο λόγος αυτός τόσο μείωση παρατηρείται στην αντοχή του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 3.2: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με λόγο νερού/τσιμέντο (Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Sika)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Ανάλυση Μεθόδων Πειραματικής Διαδικασίας

4.1 Εισαγωγή – Περιγραφή ενισχυτικών υλικών

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας και τα επιλεγμένα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του επεξεργασμένου αμιαντοτσιμέντου ως πρόσμικτο σε δοκίμια σκυροδέματος.

Προετοιμάστηκαν δύο σειρές δοκιμών σκυροδέματος στις οποίες διαφοροποιούνταν κάθε φορά οι αναλογίες τσιμέντου σε σχέση με το εξεταζόμενο υλικό, για την μελέτη επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος από το εκάστοτε ενισχυτικό. Η πρώτη σειρά καταπονήθηκε στις 28 ημέρες για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη και κάμψη του σκυροδέματος και η δεύτερη σειρά στις 120 ημέρες από την ημερομηνία παραγωγής.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμικτο τσιμέντου παράχθηκαν στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων στα πλαίσια έρευνας διδακτορικής διατριβής (Valouma et al., 2016). Πρόκειται για υλικά που προέκυψαν έπειτα από διεργασίες αποτοξικοποίησης αποβλήτων αμιάντου. Συγκεκριμένα, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από απόβλητο στέγης αμιαντοτσιμέντου (AC). Τα απόβλητα αυτά συλλέχθηκαν στα πλαίσια καταγραφής ρύπανσης για το «Πρόγραμμα Διεξαγωγής Μετρήσεων και Αναλύσεων στο χώρο της κατεδάφισης του Παλιού Νοσοκομείου Χανίων».

Η επεξεργασία των αποβλήτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διένυδρου οξαλικού οξέος [(C₂H₂O₄) 2H₂O] και του πυριτικού υλικού Tetraethylorthosilicate-TEOS [(SiC₈H₂₀O₄)], παρουσία απιονισμένου νερού για τη διευκόλυνση της υδρόλυσης του TEOS μέσω της αντίδρασης:



Αρχικά παρασκευάστηκε υδατικό διάλυμα οξαλικού οξέος στο οποίο προστέθηκαν 20 g λειοτριβημένου AC. Έπειτα από 7 ημέρες υπό ανάδευση σε θερμοκρασία δωματίου, στο διάλυμα προστέθηκε μείγμα αντιδραστηρίων TEOS και ισοπροπανόλης (ISP) σε αναλογία TEOS:ISP 1:1. Το τελικό διάλυμα αναδεύτηκε μέχρι να μετατραπεί σε ομογενή γέλη, έπειτα από 58 ημέρες (**GEL**). Παράλληλα δεύτερο διάλυμα ίδιας σύνθεσης παρέμεινε υπό ανάδευση για 30 ημέρες (**STF**). Η επεξεργασία του διακόπηκε όταν παρατηρήθηκε μακροσκοπική αύξηση του ιξώδους.

Μελετήθηκε επίσης επεξεργασμένο AC υπό ακτινοβολία μικροκυμάτων (**MW**) παρουσία των ίδιων αντιδραστηρίων. Ζυγίστηκαν 0.1g AC και προστέθηκαν

σε διάλυμα οξαλικού οξέος με TEOS. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε φούρνο επεξεργασίας μικροκυμάτων (MARS 6), για 20 λεπτά σε θερμοκρασία 150 °C. Το τελικό προϊόν έχει μορφή μη ομογενοποιημένης γέλης/αμιαντοτσιμέντου.

Τέλος, μελετήθηκε ως ενισχυτικό το δείγμα **TMX**. Το εν λόγω δείγμα προέρχεται από πείραμα στο οποίο τα αντιδραστήρια εφαρμόστηκαν με πινέλο σε τεμάχια αμιαντοτσιμέντου, με σκοπό την πιθανή μελέτη της χρήσης των αντιδραστηρίων για *in situ* επεξεργασία (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμικτα

Δείγμα	Τρόπος επεξεργασίας	Αντιδραστήρια	Διάρκεια
Gel	Υδατικό διάλυμα	Οξαλικό οξύ (C ₂ H ₂ O ₄) 2H ₂ O Tetraethylorthosilicate (SiC ₈ H ₂₀ O ₄) Απιονισμένο νερό H ₂ O	58 ημέρες
STF	Υδατικό διάλυμα		30 ημέρες
MW	Ακτινοβολία μικροκυμάτων		20 λεπτά
TMX	Εναπόθεση με πινέλο		30 ημέρες
Silica Fume	Έτοιμη διάθεση προϊόντος από αγορά		

Όλα τα δείγματα που παράχθηκαν ξηράνθηκαν για 24 h σε 105 °C και στη συνέχεια λειοτριβήθηκαν στον πλανητικό μύλο του «Εργαστηρίου Εμπλουτισμού» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Ο μύλος αυτός είναι μία μηχανή λειοτρίβησης τύπου FRITSCH PULVERISETTE 5.

Επιπλέον, παρασκευάστηκε μια σειρά δοκιμών στην οποία ως ενισχυτικό τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε εμπορικό **Microsilica** (πυριτική παιπάλη – Silica Fume-SHANGHAI TOPKEN SILICA FUME CO. LTD.), προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των προτεινόμενων υλικών και υπάρχοντος εμπορικού υλικού παρόμοιας σύνθεσης.

Για τον χαρακτηρισμό τόσο των μεταποιημένων υλικών όσο και της πυριτικής παιπάλης (microsilica), χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές που διακρίνονται σε χημικές και

ορυκτολογικές. Χημικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε με φασματομετρία ακτίνων X φθορισμού (XRF) (με φασματόμετρο S2 Ranger της Bruker AXS) ενώ ως ορυκτολογική ανάλυση αναφέρεται η τεχνική περίθλασης ακτίνων X (XRD). Τέλος, προσδιορίστηκε η κατανομή μεγέθους κόκκων του υλικού με κοκκομετρικό αναλυτή σκέδασης ακτίνων laser, με τη χρήση του οργάνου ανάλυσης Mastersizer S της εταιρείας Malvern. Το σύνολο των αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήρια της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

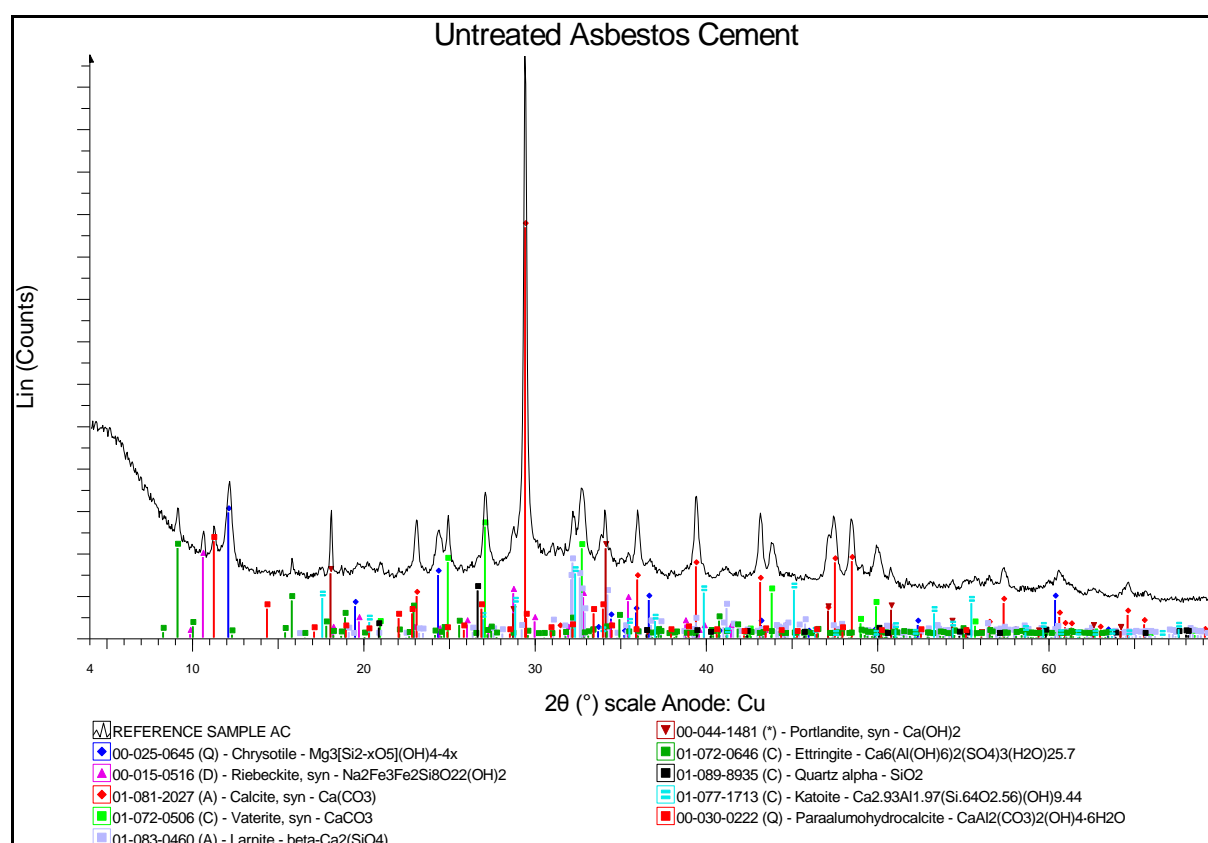
Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χημικής ανάλυσης των υλικών με τη μέθοδο της ατομικής απορρόφησης. Είναι εμφανές πως τα μελετώμενα υλικά αποτελούνται ως επί το πλείστον από SiO₂ και CaO. Το ανεπεξέργαστο δείγμα αμιαντοτσιμέντου περιέχει κατά 15.3% πυρίτιο και 43.8% ασβέστη. Μετά την εκάστοτε επεξεργασία τα ποσοστά πυριτίου αυξάνονται σε όλα τα δείγματα, και αυτά του ασβέστη μειώνονται. Η αύξηση των ποσοστών του πυριτίου οφείλεται στην απελευθέρωση της πυριτικής μήτρας του αμιάντου λόγω της διαλυτοποίησης των ινών. Το πυρίτιο που απελευθερώνεται προσανξάνεται στο πυρίτιο που προστέθηκε με το αντιδραστήριο TEOS.

Πίνακας 4.2: Ποσοστιαία στοιχειακή χημική ανάλυση XRF

	Ανεπεξέργαστο AC	MW	GEL	STF	PC_LL_REF	Silica Fume
SiO ₂	15.3	32.9	73.4	47.8	18.7	86.8
CaO	43.9	0.1	2.3	10.3	67.7	-
MgO	2.5	5.9	0.2	1.1	0.5	-
Na ₂ O	-	1.2	0.3	0.5	2.1	1.2
K ₂ O	0.3	-	-	-	-	-
TiO ₂	0.2	-	-	-	-	-
MnO	0.1	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	3.9	0.8	0.2	0.7	0.2	-
Al ₂ O ₃	1.4	0.1	1.0	2.7	1.8	-
SO ₃	1.5	-	-	-	-	-
LOI	29.5	58.9	22.6	36.9	7.3	3.1
Σύνολο	98.6	99.9	100	100	98.3	91.1

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν την ορυκτολογική σύσταση των επιμέρους δειγμάτων. Κάθε διάγραμμα συνοδεύεται από την ποσοτική κατανομή των ορυκτών στα δείγματα.

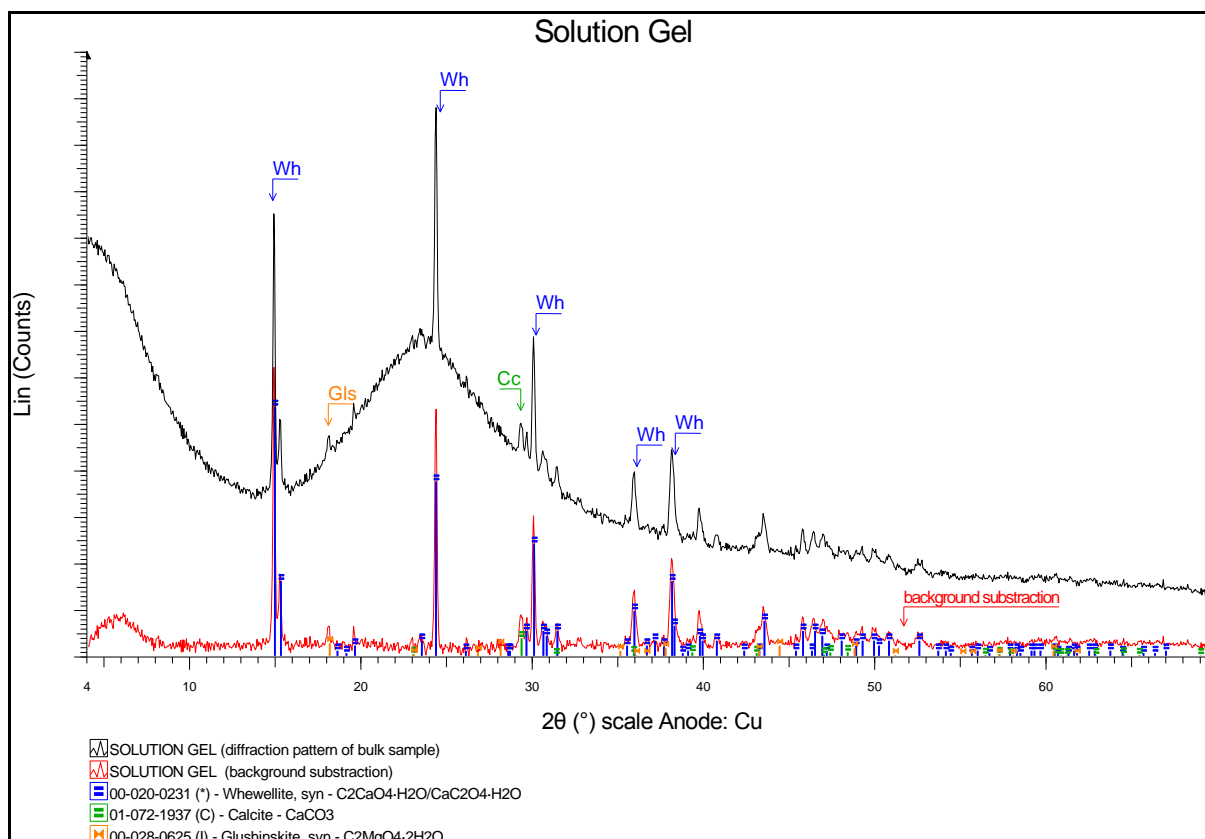
Στο ανεπεξέργαστο δείγμα αμιαντοτσιμέντου (βλ. Εικόνα 4.1) διακρίνονται όλες οι κορυφές των επιμέρους ορυκτών. Ο ασβεστίτης κυριαρχεί όπως είναι αναμενόμενο, ενώ παράλληλα σε αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις εντοπίζονται, ως φάσεις του τσιμέντου, πορτλανδίτης (Portlandite), βατερίτης (Vaterite), ετρινγκίτης (Ettringite), λαρνίτης (Larnite), κατοίτης (Katoite), χαλαζίας (Quartz) και μικρά ποσοστά υδροασβεστίτη (Paraalumohydrocalcite). Παράλληλα, η παρουσία αμιάντου αντιπροσωπεύεται από τα ορυκτά χρυσοτίλη και κροκιδόλιθου, με κυρίαρχη την παρουσία του χρυσοτίλη. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι χημικοί τύποι των ορυκτών ώστε να γίνεται αντιληπτή η σύστασή τους. Επιπλέον, η περιεκτικότητα του εκάστοτε ορυκτού αντιπροσωπεύεται από το δείκτη αντίστοιχου χρώματος όπως ορίζεται στο υπόμνημα της Εικόνας 4.1.



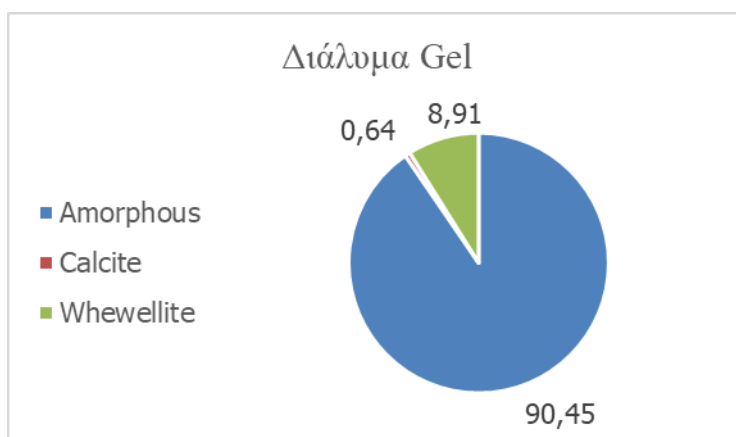
Εικόνα 4.1: Ορυκτολογική ανάλυση ανεπεξέργαστου δείγματος αμιαντοτσιμέντου

Η ορυκτολογική ανάλυση του επεξεργασμένου διαλύματος Gel (βλ. Εικόνα 4.2), εμφανίζει κυρίως τη χαρακτηριστική καμπύλη άμορφου πυριτίου, με μικρά ποσοστά του ορυκτού Whewellite (Wh - ένυδρο οξαλικό ασβέστιο) αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ του ασβεστίτη που περιέχει το AC και του οξαλικού οξέος που

χρησιμοποιήθηκε ως αντιδραστήριο της επεξεργασίας. Η ποσοτική ανάλυση (βλ. Εικόνα 4.3) αποδεικνύει την ισχυρή παρουσία άμορφου πυριτίου σε ποσοστό 90.45% ακολουθούμενο από οξαλικό ασβέστιο με 8.91%. Ο αμίαντος έχει διαλυτοποιηθεί πλήρως και το αρχικό υλικό με το πέρας της διαδικασίας έχει μετατραπεί σε αξιοποιήσιμη μη επικίνδυνη φάση άμορφου πυριτίου.

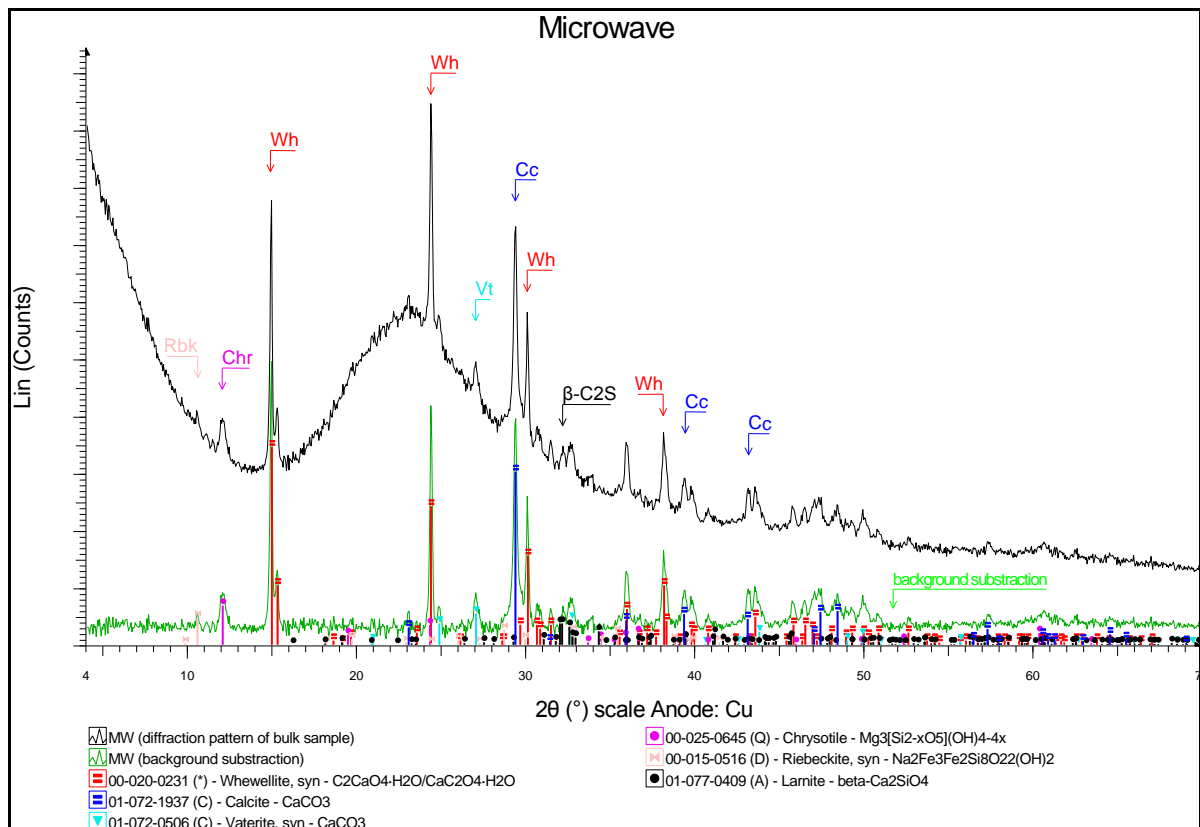


Εικόνα 4.2: Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος GEL

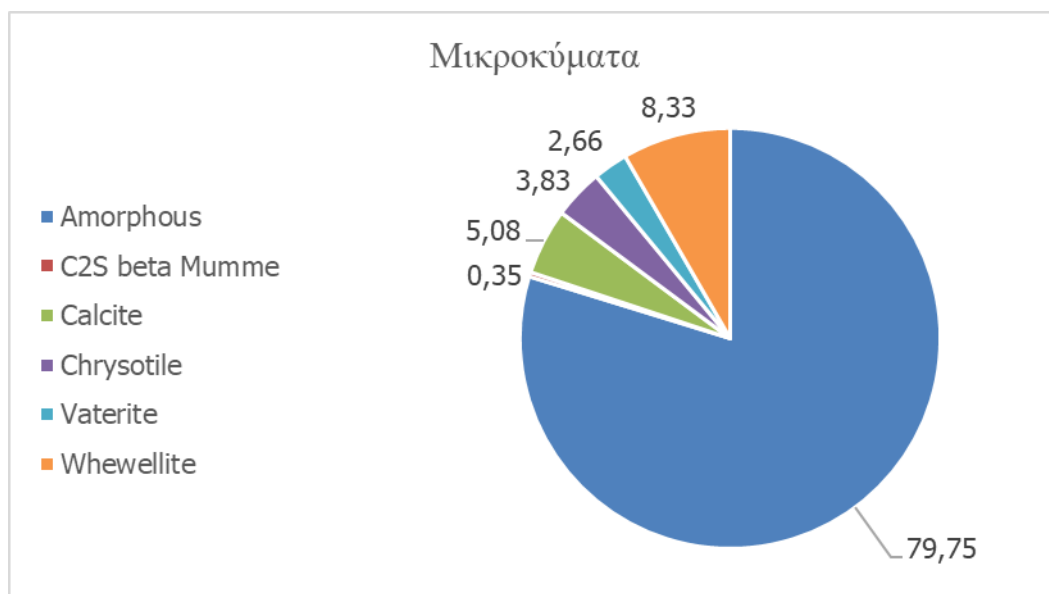


Εικόνα 4.3: Ποσοτική κατανομή ορυκτών δείγματος Gel

Η επίδραση της ακτινοβολίας μικροκυμάτων στην ορυκτολογική σύσταση του AC παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4. Η χαρακτηριστική καμπύλη του άμορφου πυριτίου είναι εμφανής και επικρατούσα στο υλικό που προέκυψε μετά την επεξεργασία με ακτινοβολία μικροκυμάτων. Επιπλέον, εντοπίζονται οι φάσεις του τσιμέντου ασβεστίτης (calcite), βατερίτης (vaterite), και λαρνίτη (larnite) σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Ιδιαίτερα έντονη είναι η παρουσία του ορυκτού Whewellite (ένυδρο οξαλικό ασβέστιο) και σε αυτή τη μορφή επεξεργασίας, ως αντίδραση μεταξύ του ασβεστίτη και του οξαλικού οξέος. Η επεξεργασία με μικροκύματα σύμφωνα με την ποσοτική ανάλυση (Εικόνα 4.5) επιτυγχάνει την ανάκτηση άμορφου πυριτίου σε ποσοστό 79.95%, ενώ το τελικό υλικό περιέχει εκτός από οξαλικό ασβέστιο (8.33%) μικρότερα ποσοστά ασβεστίτη (5.08%) και βατερίτη (2.66%). Πρέπει να σημειωθεί πως με την συγκεκριμένη επεξεργασία μειώθηκε σημαντικά η παρουσία αμιάντου αλλά δεν εξαλείφθηκε, καθώς συναντάται σε ποσοστό 3.83%.



Εικόνα 4.4: Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος MW



Εικόνα 4.5: Ποσοτική κατανομή ορυκτών δείγματος MW

Τα ανωτέρω περιγραφόμενα πρόσθετα υλικά αναμίχθηκαν με πρότυπη άμμο, τσιμέντο τύπου CEMII/A-LL 42.5 N και νερό για την κατασκευή των δοκιμίων, σε διάφορες αναλογίες. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια από κάθε ανάμιξη με τις ακόλουθες αναλογίες από τα υπό μελέτη πρόσθετα υλικά (Πίνακας 4.3), όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας της υποψήφιας διδάκτορος Βαλουμά Αικατερίνης που λαμβάνει χώρα στο Εργαστήριο Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων (βλ. Πίνακα 4.1):

Πίνακας 4.3: Αναλογίες ενισχυτικών υλικών σε δοκίμια σκυροδέματος

Πρόσμικτο	Ποσοστό αντικατάστασης (%)
MW	10
Gel	2.5/5/10/20/30
TMX	10
STF	5/10
Silica Fume	2.5/5/10

Στόχο αποτέλεσε η εύρεση της καλύτερης δυνατής αναλογίας που θα αυξήσει τις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος.

4.2 Μέθοδος χαρακτηρισμού των ενισχυτικών υλικών – Δοκιμή Chapelle

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από άμορφο πυρίτιο. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των επεξεργασμένων υλικών ως προς το ποζολανικό τους δυναμικό εφαρμόστηκε η δοκιμή Chapelle.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποζολανικότητας που παρουσιάζουν τα υλικά. Ακολουθεί το πρότυπο NFP 18-513, βάσει του οποίου εκτιμάται το ποσοστό της υδρασβέστου που καταναλώνεται από κάθε ποζολάνη σε κορεσμένο διάλυμα υδρασβέστου. Η αναλογία υδρασβέστου ποζολάνης είναι 2:1. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως ενισχυτικό υλικό.

Για την εκτέλεση του πειράματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν 2 g CaO, 1 g του εκάστοτε ενισχυτικού υλικού και 250 ml απιονισμένου νερού. Τα τρία αυτά συστατικά αναμίχθηκαν και παρέμειναν υπό ανάδευση σε θερμοκρασία 90 °C για 16 h (βλ. Εικόνα 4.6). Δημιουργήθηκε επίσης ένα πρότυπο μείγμα (χωρίς πρόσθετο) με CaO και απιονισμένο νερό το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα αναφοράς (blank) για το χαρακτηρισμό των υλικών.



Εικόνα 4.6: Ανάμιξη στη φάση των 16 h των διαλυμάτων με το ενισχυτικό υλικό (τρία αριστερά δοχεία) και του πρότυπου διαλύματος (δεξί διάλυμα)

Μετά την πάροδο των δεκαέξι ωρών το μείγμα σταμάτησε να αναδεύεται υπό θέρμανση για να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια προστέθηκε διάλυμα 60 g κρυσταλλικής ζάχαρης και 250 ml απιονισμένου νερού, προκειμένου να

διαλυθεί το ελεύθερο $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Το νέο αυτό διάλυμα αναμείχθηκε για ακόμα 15 min (βλ. Εικόνα 4.7).



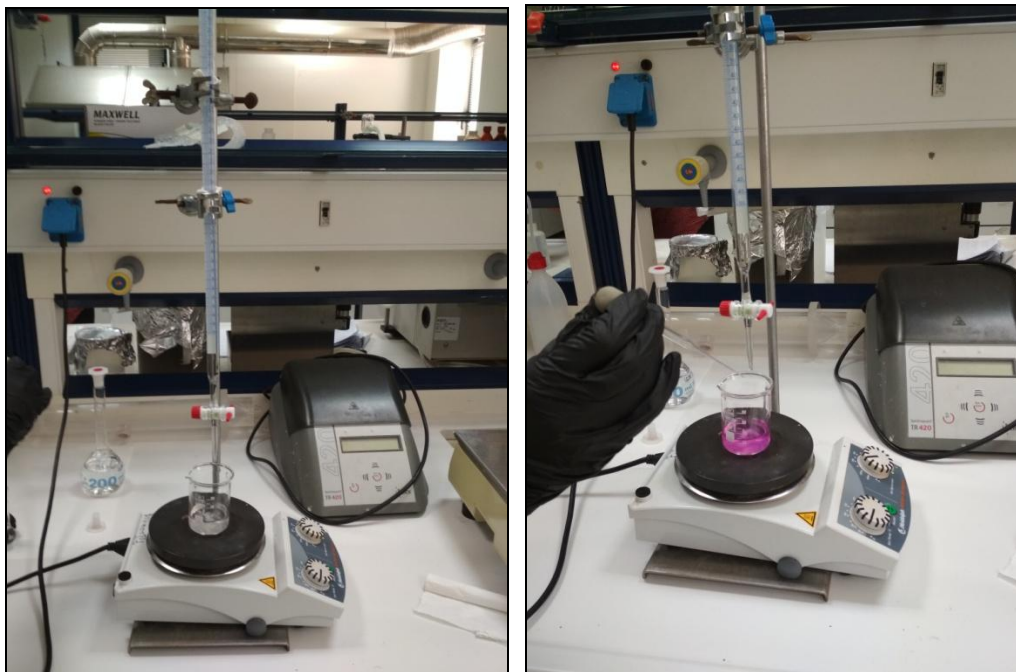
Εικόνα 4.7: Διάλυμα micrtosilica/silicafume μετά την προσθήκη διαλύματος ζάχαρης κατά την ανάμιξη 15 min

Στο διάλυμα που λήφθηκε μετά από διήθηση πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της κατανάλωσης CaO . Χρησιμοποιήθηκαν 25 ml του κάθε διαλύματος. Σε αυτά προστέθηκε διάλυμα φαινοφθαλεΐνης συγκέντρωσης 0.5 g κ.β. Η φαινοφθαλεΐνη προσδίδει ένα χρωματισμό και δρά ως δείκτης στο διάλυμα. Η τιτλοδότηση πραγματοποιήθηκε με πρότυπο διάλυμα υδροχλωρίου (HCl), συγκέντρωσης 0,1M. Η κατανάλωση ασβεστίου δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{mg CaO} = 2 \times ((v_2 - v_1)/v_2) \times 74/56 \times 1000 \quad (4.2)$$

όπου: v_1 = όγκος του 0.1M HCl που χρειάστηκε για να αποχρωματιστούν 25 ml του μείγματος CaO του πρότυπου μείγματος

v_2 =όγκος του 0.1M HCl που χρειάστηκε για να αποχρωματιστούν 25 ml του εκάστοτε υπό μελέτη διαλύματος

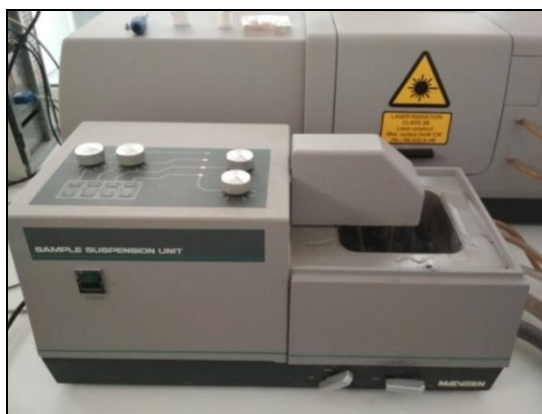


Εικόνα 4.8: Διάλυμα με ενισχυτικό υλικό πριν την προσθήκη 0.1M HCl (αριστερά) και διάλυμα με φαινοφθαλεΐνη πριν την προσθήκη 0.1M HCl (δεξιά)

4.3 Κοκκομετρία ενισχυτικών υλικών

Η κοκκομετρική ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτικά πραγματοποιήθηκε στο «Εργαστήριο Εμπλουτισμού» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Οι αναλύσεις έγιναν με κοκκομετρικό αναλυτή σκέδασης ακτίνων laser, με τη χρήση του οργάνου ανάλυσης Mastersizer S της εταιρείας Malvern. Στον αναλυτή αναμιγνύονταν νερό και ποσότητα του πρόσθετου υλικού όπου και αναδεύονταν μέχρι τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού.



Εικόνα 4.9: Μηχανή ανάλυσης λέιζερ κοκκομετρικής διαβάθμισης

Με τη μέθοδο αυτή μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας με όγκο ίσο με αυτό του σωματιδίου και το εύρος μεγεθών που μετράται περιέχει πολύ λεπτά σωματίδια (από 1000 - 0.1 μm) τα οποία δεν υπολογίζονται εύκολα με τις άλλες - μεθόδους. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη διάχυση και διάθλαση των ακτίνων από αιωρούμενα σωματίδια. Καθώς η ακτίνα laser διέρχεται από το μελετούμενο δείγμα ανακλάται σχηματίζοντας ένα μεγάλο εύρος γωνιών σε σχέση με τον ανιχνευτή ο οποίος βρίσκεται απέναντι. Το εύρος των γωνιών ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος και την πυκνότητα των σωματιδίων που εξετάζονται.

4.4 Μέθοδος Ultrasonic Pulse Velocity

Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικών παλμών αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Στα υπό μελέτη δοκίμια η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε όλες τις κρίσιμες ημερομηνίες για το σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, λήφθηκαν ενδιάμεσες μετρήσεις την 3^η, 7^η, 14^η, 21^η και 28^η ημέρα. Τα δοκίμια τις πρώτες ημέρες αρχίζουν

να αναπτύσσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες με το ρυθμό αύξησης της αντοχής τους για τις πρώτες 28 ημέρες είναι υψηλότερος σε σχέση με την μετέπειτα περίοδο. Πρακτικά στις 28 ημέρες το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει σχεδόν ολόκληρη την τελική αντοχή του (ΦΕΚ 1561/02-06-2016).

Στα υλικά με την πάροδο του χρόνου είναι επιθυμητό να αυξάνεται και η ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών, καθώς υποδεικνύει την ωρίμανση του σκυροδέματος και την ανάπτυξη των μηχανικών του ιδιοτήτων. Σύμφωνα με το πρότυπο IS (BS, 1881, 1983) η διακύμανση της ταχύτητας παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα του σκυροδέματος βάσει του Πίνακα 4.2 (Lawson et al., 2011).

Πίνακας 4.4: Ποιότητα σκυροδέματος συναρτήσει της ταχύτητα υπερηχητικών παλμών (Lawson et al., 2011)

a/a	Ταχύτητα υπερηχητικών παλμών UPV (m/s)	Ποιότητα σκυροδέματος
1	Πάνω από 4500	Εξαιρετική
2	3500-4500	Καλή
3	3000-3500	Μεσαία
4	Κάτω από 3500	Αμφισβητήσιμη

4.5 Περιγραφόμενα Υλικά Πειραματικής Διαδικασίας

Τα αποτελέσματα όλων των ανωτέρων διεργασιών αναλύονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 5. Για την κατανόηση των επιλεχθέντων υλικών πρέπει να σημειωθεί πως από τις ανωτέρω διαδικασίες τα ενισχυτικά υλικά τείνουν να συμπεριφερθούν ως ποζολανικά υλικά, γεγονός που έχει άμεση επίδραση στον τύπο τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί.

Ποζολανικά υλικά μπορεί να είναι φυσικές ή τεχνητές κονίες, με τις φυσικές να είναι κυρίως ηφαιστειογενούς προέλευσης. Αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από δραστικό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3). Στο υλικό αυτό ακόμα περιέχεται οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3) και άλλα οξείδια. Σύμφωνα με το Αμερικάνικο Πρότυπο ASTM 618, για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ποζολάνη θα πρέπει το σύνολο των SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 να είναι μεγαλύτερο του 70% κ.β. Οι ποζολάνες χρησιμοποιούνται ως προσμίξεις για τη βελτίωση των ιδιοτήτων και των

αντοχών συνδετικών κονιών, του τσιμέντου ή του σκυροδέματος. Μειώνουν τη θερμότητα ενυδάτωσης, αυξάνουν την αντοχή του σκυροδέματος σε διάβρωση και επιβραδύνουν την ανάπτυξη των αντοχών.

Τα ποζολανικά υλικά δεν σκληρύνονται από μόνα τους όταν αναμειχθούν με νερό, αλλά, όταν λεπτοαλεστούν και παρουσία νερού, αντιδρούν σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος με διαλυμένο υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 για να σχηματίσουν ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχή. Η επιβράδυνση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και μείωσης του ρυθμού ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών επιτυγχάνεται καθώς κατά την ενυδάτωση του κλίνκερ, η υδράσβεστος που απελευθερώνεται αντιδρά με τα δραστικά συστατικά της ποζολάνης δημιουργώντας δεσμούς C-S-H σε μία βραδεία αντίδραση. Η αντίδραση αυτή περιορίζει το πορώδες και κατ' επέκταση μειώνει την περατότητα και την απώλεια νερού μέσω εξίδρωσης (bleeding), αυξάνει την αντοχή στην τριβή και σε θλίψη. Οι ποζολάνες δεσμεύουν το ελεύθερο Ca(OH)_2 , το οποίο διαφορετικά θα μπορούσε να αντιδράσει με τα θειικά και να προκαλέσει ανεπιθύμητη διόγκωση. Η δέσμευση της υδρασβέστου συντελεί στην αύξηση της ανθεκτικότητας σε όξινο περιβάλλον.

4.5.1 Τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ CEMIII/A-LL 42.5N

Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου τσιμέντου προήλθε έπειτα από τον χαρακτηρισμό των ενισχυτικών υλικών με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου Chapelle. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η συμπεριφορά των υπό εξέταση πρόσθετων υλικών παρουσιάζει ποζολανική δραστικότητα. Αυτό σημαίνει την ικανότητα χημικής αντίδρασης αυτών με διαλυμένο υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 , για τον σχηματισμό ενυδατωμένων ασβεστοπυριτικών και ασβεστοαργλικών ενώσεων (δεσμών C-S-H και C-AI-H) που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη υψηλότερης αντοχής. Προκειμένου, λοιπόν, να ενισχυθεί η δράση των εξεταζόμενων υλικών και να προκύψουν αποτελέσματα σε μικρότερο χρονικό διάστημα για την παραγωγή των δοκιμίων σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο με περίσσεια ασβέστη. Το επιλεγμένο τσιμέντο ανήκει στην κατηγορία 45 και χαρακτηρίζεται με αντοχή σε θλίψη 28 ημερών από 35-55 Mpa. Στο λευκό αυτό τσιμέντο, συναντάται κλίνκερ, ασβεστόλιθος και κάποια δευτερεύοντα συστατικά που περιγράφονται στη συνέχεια.

4.5.1.1 Κλίνκερ για τσιμέντο Πόρτλαντ (Κ), (clinker)



Εικόνα 4.10: Κλίνκερ για τσιμέντο πόρτλαντ (Δομικά υλικά, Τσιμέντο και Σκυρόδεμα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

Το κλίνκερ για τσιμέντο πόρτλαντ είναι αποτέλεσμα ανάμιξης ενός διαρκώς ελεγχόμενου και προκαθορισμένου μείγματος πρώτων υλών (ξηρό αλεσμένο υλικό, πολτός ή αραιή λάσπη) ομοιογενούς σύστασης. Το μείγμα αυτό περιέχει χημικά στοιχεία, που συνήθως εκφράζονται ως οξείδια CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 και μικρές ποσότητες άλλων υλικών. Το κλίνκερ για τσιμέντο πόρτλαντ είναι ένα υδραυλικό υλικό, το οποίο απαρτίζεται κατά τα δύο-τρίτα τουλάχιστον από ασβεστοπυριτικές ενώσεις ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ και $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ενώ το

υπόλοιπο από φάσεις κλίνκερ που περιέχουν αργίλιο, σίδηρο, και άλλες ενώσεις. Η αναλογία κατά μάζα $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 2.0 και η περιεκτικότητα MgO δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%. Το κλίνκερ αλέθεται μαζί με γύψο και άλλα υλικά σε καθορισμένες αναλογίες για την παραγωγή διαφόρων τύπων και κατηγοριών τσιμέντου τύπου Πόρτλαντ. Το κλίνκερ, ο τελικός βαθμός άλεσης του τσιμέντου και η παρουσία πρόσθετων προσδίδουν και επηρεάζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά των τύπων αυτών.

4.5.1.2 Ασβεστόλιθος (L,LL), (limestone)

Ο ασβεστόλιθος προέρχεται μέσα από την πήξη και σκλήρυνση ασβεστοκονιαμάτων. Ο ασβεστόλιθος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τέτοιων



Εικόνα 4.11: Ασβεστόλιθος (<http://www.geo.auth.gr>)

τύπων τσιμέντου πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) τουλάχιστον 75% κατά μάζα, και περιεκτικότητα αργίλου έως $1.2 \text{ g}/100 \text{ g}$ (EN933-9). Η περιεκτικότητα σε ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) (ΕΛΟΤ EN 13639:2002) κατατάσσει το τσιμέντο σε:

LL: $\text{TOC} < 0.2\%$ κατά μάζα

L: $\text{TOC} < 0.5\%$ κατά μάζα

4.5.1.3 Δευτερεύοντα υλικά

Τα δευτερεύοντα συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα, ανόργανα φυσικά ορυκτά υλικά, που προκύπτουν κατά τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ. Απαιτούν σωστή προετοιμασία, δηλαδή επιλογή, ομογενοποίηση, ξήρανση και άλεση ανάλογα με την μορφή κατά την παραγωγή ή την παράδοσή τους. Δεν πρέπει να αυξάνουν αισθητά την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου ή να προκαλούν την καταστροφή του σκυροδέματος ή του κονιάματος με οποιοδήποτε τρόπο ή να μειώνουν την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

4.5.2 Microsilica - Πυριτική παιπάλη (Silica Fume)

Προκειμένου να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος προστίθενται κάποια πρόσθετα υποπροϊόντα στο υλικό. Τα υποπροϊόντα αυτά αντικαθιστούν ένα



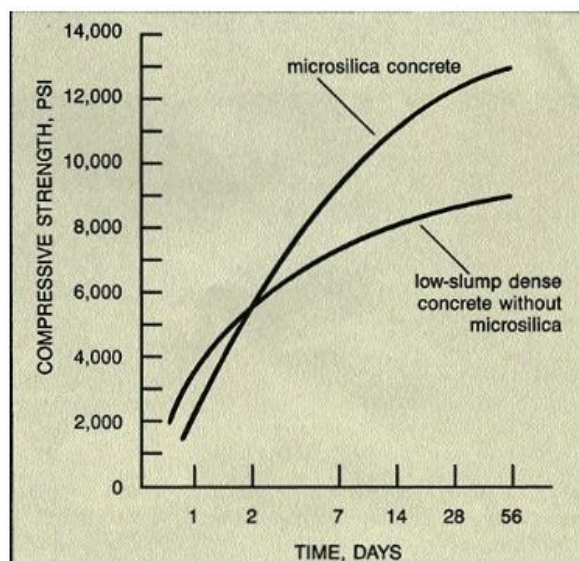
Εικόνα 4.12: Σκόνη microsilica
(US Department of Transportation, Silica Fume User's Manual, 2005)

μέρος του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου μέσα στο μίγμα. Το microsilica είναι ένα τέτοιο υποπροϊόν με ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ευρεία εφαρμογή. Ως microsilica είναι γνωστό ένα υποπροϊόν της παραγωγής κράματος πυριτίου και

κράματος σιδηροπυριτίου. Αποτελεί άμορφο υλικό (χωρίς κρυσταλλική δομή) που έχει τη μορφή μίας πολύ

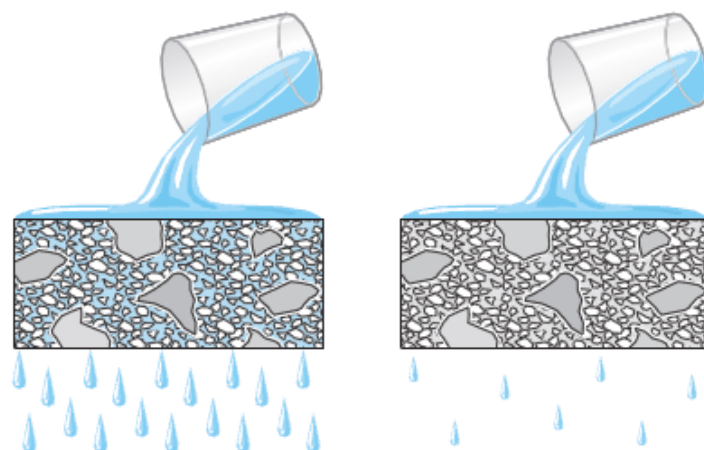
λεπτής σκόνης. Τα σφαιρικά σωματίδια που το αποτελούν έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 μm και μέση διάμετρο 0.15 μm (βλ.Εικόνα 4.12), δηλαδή διάμετρο 100 φορές μικρότερη από το μέσο σωματίδιο του τσιμέντου (Kosmatka et al., 2003). Η λεπτότητά του αυτή και η υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου το καθιστούν ως ένα πολύ αποτελεσματικό ποζολανικό υλικό (Luther, M. D. 1990). Οι πρότυπες προδιαγραφές για το microsilica, αναφορικά με την παραγωγή σκυροδέματος είναι σύμφωνα με τα Πρότυπα ASTM C1240, EN 13263. Η πυκνότητα του microsilica εξαρτάται από το βαθμό συμπύκνωσης μέσα στο σιλό και κυμαίνεται από 130 έως 600 kg/m^3 . Η ειδική επιφάνειά του μετράται με τη μέθοδο BET ή τη μέθοδο προσρόφησης αζώτου και κυμαίνεται από 15.000-30.000 m^2/kg και τέλος το ειδικό βάρος του κυμαίνεται από 2.2 μέχρι 2.3.

Η προσθήκη του microsilica στο σκυρόδεμα βελτιώνει τις ιδιότητές του, όπως τη θλιπτική του αντοχή (βλ.Εικόνα 4.13) και την αντίσταση στην τριβή, λόγω της λεπτότητας που παρουσιάζει και των ποζολανικών αντιδράσεων μεταξύ του microsilica και του ελεύθερου υδροξειδίου του ασβεστίου. Μειώνεται η διαπερατότητα του σκυροδέματος στα ιόντα χλωρίου με αποτέλεσμα την καλύτερη αντίσταση σε διάβρωση.

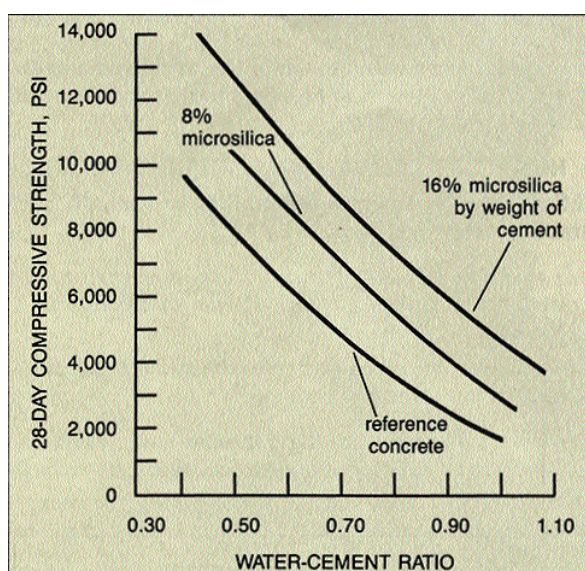


Εικόνα 4.13: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με τον χρόνο σε σκυρόδεμα που περιέχει microsilica σε σχέση με πρότυπο που δεν περιέχει (www.concreteconstruction.net)

Μία αρκετά χρήσιμη ιδιότητα σε κατασκευές που λαμβάνουν χώρα σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριούχα, όπως παράκτιες περιοχές ή εθνικά δίκτυα στα οποία χρησιμοποιούνται άλατα για την προστασία του οδοστρώματος από βροχές και πάγους. Σκυρόδεμα που περιέχει microsilica έχει λιγότερες απώλειες νερού, καθώς το νερό είναι απαραίτητο για τις ανάγκες της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς του (βλ. Εικόνα 4.14, 4.15).



Εικόνα 4.14: Σχηματική απεικόνιση διαπερατότητας σε σκυρόδεμα που δεν περιέχει microsilica (αριστερά) και ενός σκυροδέματος που περιέχει microsilica και μικρότερο λόγο νερού/τσιμέντο (US Department of Transportation, 2005)



Εικόνα 4.15: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με λόγο νερού/τσιμέντο σε σκυρόδεμα που περιέχει microsilica σε σχέση με πρότυπο που δεν περιέχει (www.concreteconstruction.net)

Το microsilica που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας προέρχεται από την εταιρεία SHANGHAI TOPKEN SILICA FUME CO. LTD, και τόσο η κατασκευή όσο και οι δοκιμές του έχουν πραγματοποιηθεί στην Κίνα. Είναι ο τύπος 920-D της Topken, με πυκνότητα 654 kg/m^3 .

4.5.3 Πρότυπη άμμος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες όλα τα συστατικά του μίγματος συμβάλλουν στην ανάπτυξη των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων στα



δοκίμια. Η χρήση πρότυπης άμμου, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN196-1 εξασφαλίζει την επιθυμητή κοκκομετρία στο στάδιο της ανάμιξης. Στη φύση δεν υπάρχει κάποιο είδος άμμου που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της πρότυπης άμμου καθώς υφίστανται καθημερινούς ελέγχους και κόσκινα για την επίτευξη της επιθυμητής σύστασης. Αποτελείται από χαλαζία και το μέγεθος των κόκκων της κυμαίνεται μεταξύ 0.08 και 2.00 mm. Οι κόκκοι της άμμου πρέπει να είναι γωνιακοί και μόνο ένα μικρό ποσοστό

Εικόνα4.16: Πρότυπη άμμος

επιτρέπεται να είναι σφαιρικής μορφής. Η κοκκομετρική διαβάθμιση παρουσιάζει την εξής μορφή:

- 0.09 – 0.5 mm σε ποσοστό 33.33%
- 0.5 – 1 mm σε ποσοστό 33.33%
- 1 - 2 mm σε ποσοστό 33.33%

Το χρώμα της άμμου είναι ανοιχτό γκρι, είναι απαλλαγμένη από κάθε ίχνος λάσπης και η μέγιστη περιεκτικότητά της σε υγρασία ανέρχεται σε 0.2%. Η άμμος προμηθεύεται σε συσκευασίες 1350.00 g (± 5 g) και η συγκεκριμένη για την πειραματική διαδικασία ήταν από την εταιρεία Hellenplan.

4.6 Στάδια Πειραματικής Διαδικασίας

Η παραγωγή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο «Επικίνδυνων και Τοξικών Αποβλήτων» της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

Στάδιο 1^ο

Το πρώτο στάδιο για την παραγωγή των δοκιμίων, αφορά την εύρεση των κατάλληλων αναλογιών που θα χρησιμοποιηθούν στα δοκίμια. Παρασκευάστηκε ένα πρότυπο δοκίμιο με αναλογίες άμμου προς τσιμέντο 2.75 (s/c) και νερού προς τσιμέντο (w/c) 0.484. Για την κατασκευή κάθε δοκιμίου έλαβε χώρα αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με ενισχυτικό υλικό. Οι αναλογίες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.5: Αναλογίες υλικών για την πειραματική διαδικασία

*Η προσθήκη νερού διαφοροποιείται σε κάθε αναλογία και για κάθε εξεταζόμενο πρόσμικτο έως ότου αποκτήσει την επιθυμητή ρευστότητα το μείγμα

Τύποι Δοκιμίων και αντικατάσταση (%)	Τσιμέντο (g)	Ενισχυτικό Υλικό (g)	Πρότυπη Άμμος (g)	Νερό * (ml)
Πρότυπο	333.33	0.00	916.67	161.33
Αντικατάσταση 2.5	316.67	16.66	916.67	-
Αντικατάσταση 5	325.00	8.33	916.67	-
Αντικατάσταση 10	300.00	33.33	916.67	-
Αντικατάσταση 20	266.67	66.67	916.67	-
Αντικατάσταση 30	233.33	100.00	916.67	-

Στάδιο 2^ο

Η ανάμιξη των υλικών και η παρασκευή των δοκιμίων είναι το επόμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας. Για την καλύτερη ανάμιξη χρησιμοποιήθηκε το μίξερ κονιαμάτων C-050 της εταιρείας Alfa (βλ. Εικόνα 4.17). Το μίξερ αυτό έχει μέγιστη χωρητικότητα 5 L και διαθέτει δύο ταχύτητες ανάμιξης, στα 140 και στα 285 rpm αντίστοιχα. Στην αρχή αναμείχθηκαν σε χαμηλή ταχύτητα το νερό μαζί με το τσιμέντο για 30 sec, ενώ η προσθήκη της άμμου πραγματοποιήθηκε μέσα στα επόμενα 30 sec. Ακολούθησε μίξη σε γρήγορη ταχύτητα για ακόμα 30 sec. Επόμενο στάδιο αποτελεί η παύση της ανάδευσης του υλικού για 90 sec, με τη διαδικασία να ολοκληρώνεται με ανάδευση του μείγματος για ακόμα 60 sec σε γρήγορη ταχύτητα. Η ανωτέρω διαδικασία ακολουθεί το πρότυπο EN196-1. Το παραγόμενο προϊόν τοποθετήθηκε σε μήτρες διαστάσεων 16x4x4cm (βλ. Εικόνα 4.18). Στη συνέχεια το

μείγμα δονήθηκε προκειμένου η περίσσεια νερού και ο εγκλωβισμένος αέρας να οδηγηθούν στην επιφάνεια.



Εικόνα 4.17: Μίξερ ανάδευσης



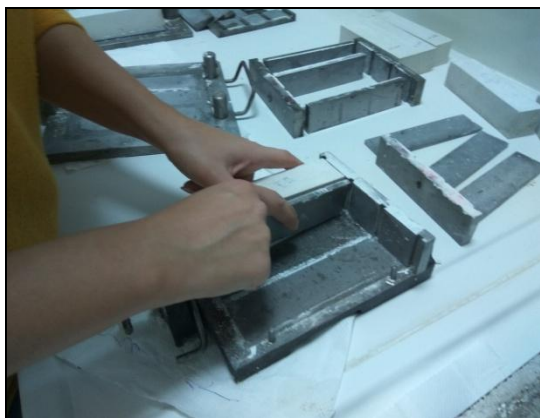
Εικόνα 4.18: Μήτρες δοκιμίων



Εικόνα 4.19: Τελική τοποθέτηση υλικού στις μήτρες

Στάδιο 3^ο

Τα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες για 24 h πριν αφαιρεθούν (ξεκαλούπωμα) (βλ. Εικόνα 4.20), και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ωρίμανσης προκειμένου να ενυδατωθούν σε κατάλληλες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας (βλ. Εικόνα 4.21). Ο θάλαμος ωρίμανσης ήταν ο E139, της εταιρείας MATEST. Τα δοκίμια παρέμειναν εκεί σε θερμοκρασία 26 - 30 °C, και συνθήκες υγρασίας 90%.

**Εικόνα 4.20:** Ξεκαλούπωμα δοκιμίων**Εικόνα 4.21:** Δοκίμια στον θάλαμο ωρίμανσης

Στάδιο 4^ο

Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνονται όλες οι ενδιάμεσες μετρήσεις των δοκιμίων με τη μέθοδο UPV (Ultrasonic Pulse Velocity). Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικών παλμών αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Όταν σε ένα στερεό σώμα που τείνει στο άπειρο ασκείται μία μηχανική δύναμη που ποικίλει με το χρόνο, η ενέργεια παρέχεται από την πηγή υπό μορφή τριών ελαστικών κυμάτων. Τα πιο γρήγορα από αυτά τα κύματα είναι τα διαμήκη (P-waves), η ταχύτητα των οποίων είναι συνάρτηση του δυναμικού συντελεστή του Young (E), του λόγου του Poisson (ν) και της πυκνότητας (ρ) (Lawson et al., 2011). Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_p = \sqrt{((E(1-\nu))/(\rho(1+\nu)(1-2\nu)))} \text{ (m/s)} \quad (4.3)$$

Η μέτρηση της ταχύτητας που διανύουν οι υπερηχητικοί παλμοί να ταξιδέψουν στο σκυρόδεμα δίνονται από την εξίσωση 4.3, όπου είναι ανάλογη του μήκους του στερεού σώματος (L) και αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου που απαιτείται να το διανύσει (T).

$$V = L/T \text{ (m/s)} \quad (4.4)$$

Η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικών παλμών έγινε αρκετές φορές μέχρι την τελική ωρίμανση των δοκιμίων και θραύση αυτών. Το σκυρόδεμα αποκτά το μισό σχεδόν της αντοχής του τις πρώτες τρεις ημέρες και το 90% μετά από 28 ημέρες, για αυτό θεωρούνται και οι πιο κρίσιμες για την απόκτηση των ιδιοτήτων του. Οι μετρήσεις του χρόνου για την ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων

πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας-Υγιεινής και Ασφάλειας στη Μεταλλευτική» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 4.22: Μετρητής χρόνου διάδοσης υπερηχητικών παλμών (αριστερά), μέτρηση χρόνου διάδοσης πρότυπου δοκιμίου (δεξιά)

Στάδιο 5^ο

Το τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει τη θραύση των δοκιμίων για τον υπολογισμό της θλιπτικής τους αντοχής και της αντοχής σε κάμψη. Η θραύση πραγματοποιήθηκε με τη συσκευή της εταιρείας MATEST (βλ. Εικόνα 4.23), στο Εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας-Υγιεινής και Ασφάλειας στη Μεταλλευτική» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 4.23: Συσκευή θραύσης δοκιμίων 40x40x160 mm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και αναλύεται η επίδραση του εκάστοτε επεξεργασμένου υλικού στα δοκίμια σκυροδέματος. Τα δοκίμια στα οποία προστέθηκε επεξεργασμένος αμιάντος συγκρίνονται μεταξύ τους για την εύρεση της καλύτερης επιλογής ενισχυτικού και της καλύτερης αναλογίας αυτού. Έχουν επίσης κατασκευαστεί και μελετηθούν δοκίμια χωρίς ενισχυτικό όπως επίσης και με ενισχυτικό που αποτελεί ήδη εμπορικό προϊόν και χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό τομέα.

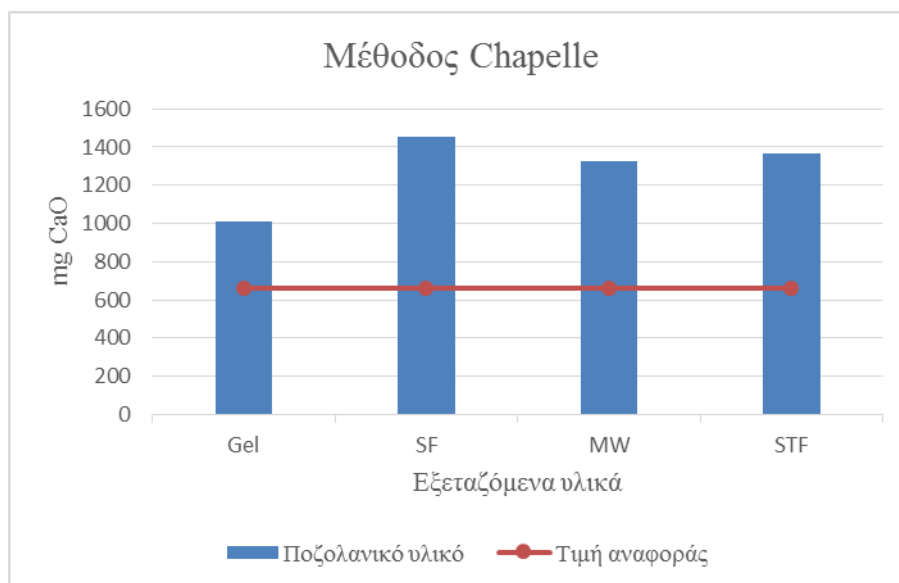
5.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Chapelle

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκαν τα εξεταζόμενα υλικά παρέχει πληροφορίες για το ποζολανικό τους δυναμικό, συναρτήσει της κατανάλωσης υδρασβέστου σύμφωνα με την Ενότητα 4.2 του Κεφαλαίου 4. Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.1 διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου προσδίδουν στα υλικά ποζολανικές ιδιότητες, σύμφωνα με το NFP 18-513 (AFNOR, 2010) καθώς η ποσότητα CaO που καταναλώνεται είναι υψηλότερη των 660 mg/l, τιμή που αποτελεί το χαμηλότερο όριο κατανάλωσης CaO που παρουσιάζει ένα υλικό για να χαρακτηριστεί ως ποζολανικό (Pontes, Santos Silva, Faria, 2013).

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μεθόδου Chapelle

Υλικά	v1 (ml)	v2 (ml)	CaO (mg/l)
Πρότυπο	23.60	23.60	00.00
Gel	23.60	14.59	1008.99
SF	23.60	10.60	1455.81
MW	23.60	11.78	1323.67
STF	23.60	11.40	1366.22

Συνεπώς, όλα τα υπό μελέτη υλικά τείνουν να συμπεριφερθούν ως ποζολάνες και να βελτιώσουν τις ιδιότητες των δοκιμίων. Χαρακτηριστικά, οι τιμές που προκύπτουν είναι αρκετά υψηλότερες από το κατώτερο όριο. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύει τις ποζολανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών, αλλά δεν είναι εφικτό να ληφθούν συμπεράσματα σχετικά με το πόσο θα επιδράσει το εκάστοτε υλικό στο σκυρόδεμα. Η επίδραση αυτή επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως τη λεπτότητα της κοκκομετρίας του υλικού ή την αντιδραστικότητα με το χρησιμοποιούμενο συνδετικό υλικό (πχ. τσιμέντο, ασβέστης κλπ).

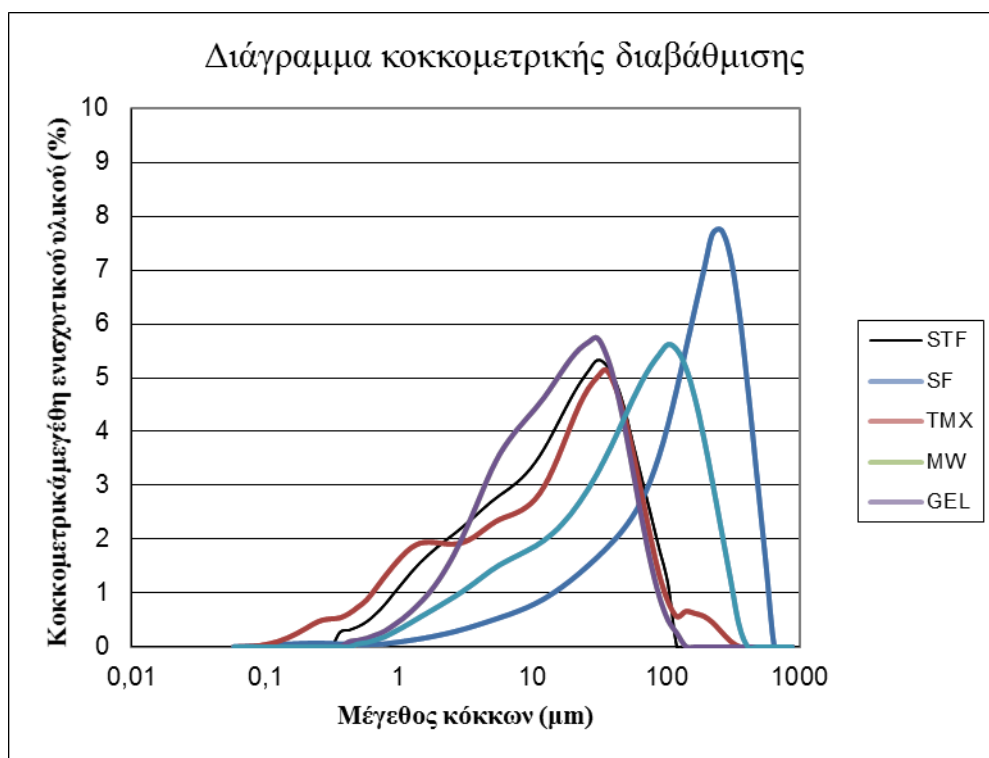


Διάγραμμα 5.1: Ποσότητα CaO που καταναλώθηκε από 1 g κάθε ποζολανικού υλικού

5.3 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης

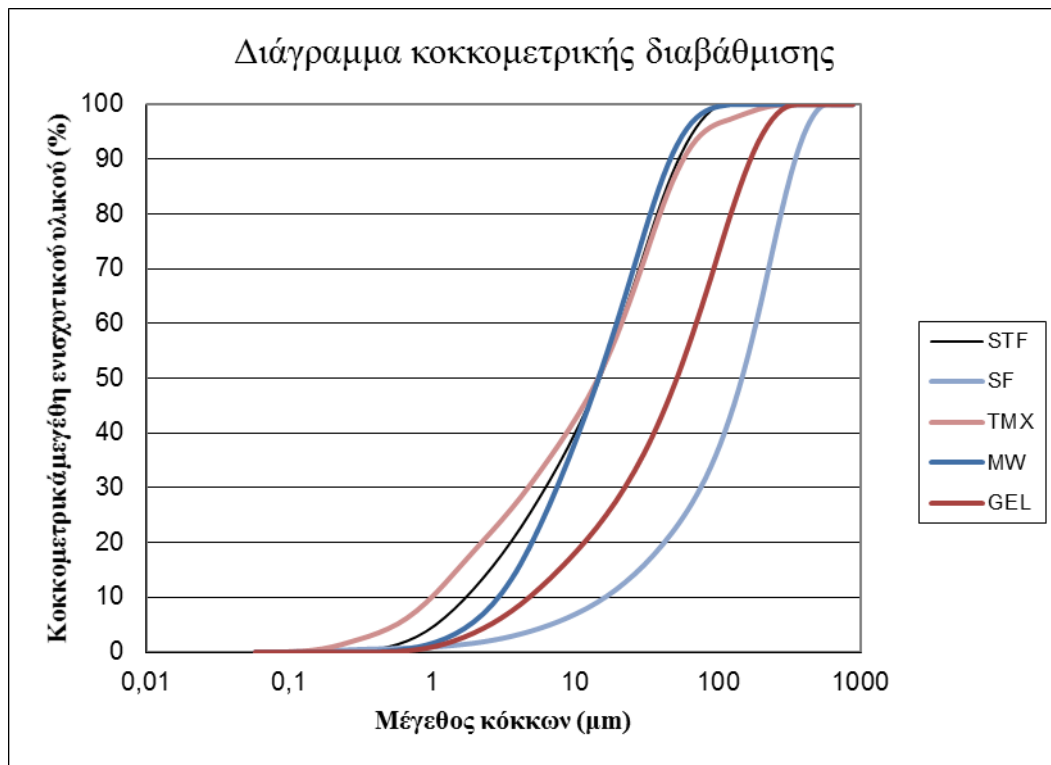
Οι αναλύσεις έγιναν με κοκκομετρικό αναλυτή σκέδασης ακτινών laser, στον οποίο αναμιγνύονταν νερό με ενισχυτικό υλικό και παρέμεναν υπό ανάδευση μέχρι τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισής του. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για επεξεργασμένο αμιαντοτσιμέντο με ακτινοβολία μικροκυμάτων (MW), του ενισχυτικού υλικού Gel, του υλικού STF, του TMX, και του εμπορικού προϊόντος silica fume (βλ. Διάγραμμα 5.2) με το οποίο στη συνέχεια συγκρίνονται τα διαγράμματα για τα υπό μελέτη ενισχυτικά υλικά.

Με βάση το ακόλουθο Διάγραμμα 5.2 παρατηρείται πως η καμπύλη που χαρακτηρίζει το silica fume παρουσιάζει στενότητα. Αυτό σημαίνει πως δεν υφίσταται μεγάλη διακύμανση στο μέγεθος των κόκκων και πως υπάρχει ομοιομορφία στην κατανομή αυτών. Η μέγιστη κορυφή του silica fume είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα εξεταζόμενα υλικά ανεξαρτήτως από την ομοιομορφία στην κατανομή του. Τα υπό μελέτη υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη λεπτότητα, όμως η διακύμανση στην κατανομή του μεγέθους των κόκκων τους είναι πολύ μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 5.2: Κοκκομετρική ανάλυση μελετώμενων ενισχυτικών υλικών

Στο Διάγραμμα 5.3 παρουσιάζεται το αθροιστικά διερχόμενο ποσοστό των υλικών. Επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι το silica fume είναι το πιο χονδρόκοκκο από τα χρησιμοποιηθέντα υλικά καθώς για αθροιστικό διερχόμενο ποσοστό 80%, το μέγεθος των κόκκων που διέρχεται είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων υλικών. Συνεπώς, η κοκκομετρία των υπό εξέταση ενισχυτικών υλικών είναι αποδεκτή και σε πολύ καλά επίπεδα λεπτότητας. Αναλυτικές μετρήσεις της κοκκομετρικής ανάλυσης παρατίθενται στο Παράρτημα Ι.



Διάγραμμα 5.3: Καμπύλες αθροιστικά διερχόμενων μεγεθών

5.4 Μετρήσεις μεθόδου Ultrasonic Pulse Velocity

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις για την ταχύτητα μετάδοσης υπερηχητικών παλμών που κατεγράφησαν.

5.4.1 Πρότυπο Δοκίμιο

Το πρότυπο δοκίμιο αποτελεί το σημείο αναφοράς και το κύριο μέτρο σύγκρισης των υπόλοιπων δοκιμίων. Τα δοκίμια αυτά παρουσίασαν πολύ καλή ποιότητα στο σκυρόδεμα από τις πρώτες κιόλας μέρες, με βάση την κλίμακα ποιότητας του Πίνακα 4.4 (Lawson et al., 2011). Με βάση τις τιμές του Πίνακα 5.2 κατατάσσεται στην κατηγορία ως καλής ποιότητας από την τρίτη ημέρα των μετρήσεων του και εξαιρετικής ποιότητας μετά τη διάρκεια των 28 ημερών. Τα συγκεκριμένα δοκίμια αποτελούν την πρότυπη αναλογία και τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα UPV στο πρότυπο δοκίμιο

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Πρότυπο δοκίμιο 3 ημερών							
1	39	38.5	38.7	39	38.80	3.88E-05	4,123.711
2	38.5	38.6	38.8	38.6	38.63	3.86E-05	4,142.395
3	38.2	38.5	38.6	38.3	38.40	3.84E-05	4,166.667
Πρότυπο δοκίμιο 7 ημερών							
1	38.1	37.9	37.9	38	37.98	3.80E-05	4,213.298
2	38.2	37.8	37.9	37.8	37.93	3.79E-05	4,218.853
3	37.7	37.3	37.3	37.4	37.43	3.74E-05	4,275.217
Πρότυπο δοκίμιο 14 ημερών							
1	37.2	36.9	36.7	36.7	36.88	3.69E-05	4,338.983
2	37.1	36.7	36.8	36.9	36.88	3.69E-05	4,338.983
3	36.5	36.2	36.4	36.6	36.43	3.64E-05	4,392.588
Πρότυπο δοκίμιο 21 ημερών							
1	37.4	36.3	36	36.2	36.48	3.65E-05	4,386.566
2	36.4	35.9	35.9	36.2	36.10	3.61E-05	4,432.133
3	36.4	36.6	35.8	35.2	36.00	3.60E-05	4,444.444
Πρότυπο δοκίμιο 28 ημερών							
1	37.5	36.4	36.6	36.2	36.68	3.67E-05	4,362.645
2	35.8	35.8	35.6	35.7	35.73	3.57E-05	4,478.656
3	36	35.7	35.6	35.9	35.80	3.58E-05	4,469.274

5.4.2 Δοκίμιο με ενισχυτικό Silica Fume και 2.5, 5, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Το silica fume ή microsilica είναι εμπορικό προϊόν που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο για την ενίσχυση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Σύμφωνα με τους Πίνακες 5.3 - 5.5 η ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών για τα δοκίμια με αναλογίες 2.5, 5 και 10% αντικατάστασης τσιμέντου, είναι καλής ποιότητας, χωρίς να βελτιώνεται περαιτέρω με την πάροδο του χρόνου. Η κυρίως μελετώμενη αναλογία είναι η 2.5% αντικατάσταση τσιμέντου καθώς κατέγραψε καλύτερα αποτελέσματα στην ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών και συνεπώς στην ποιότητα του σκυροδέματος. Τα συγκεκριμένα δοκίμια αποτελούν το μέτρο σύγκρισης των υπό μελέτη δοκιμών καθώς το silica fume είναι ένα ήδη χρησιμοποιούμενο εμπορικό προϊόν.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 2.5% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (2.5% SF)							
1	37.7	37.7	37.6	37.8	37.70	3.77E-05	4,244.032
2	38.9	38.2	38.6	38.6	38.58	3.86E-05	4,147.764
Δοκίμιο 7 ημερών (2.5% SF)							
1	38	37.3	37.4	38.6	37.83	3.78E-05	4,230.007
2	39.7	39.3	37.9	38.6	38.88	3.89E-05	4,115.756
Δοκίμιο 14 ημερών (2.5% SF)							
1	37.3	36.8	37.2	37.4	37.18	3.72E-05	4,303.968
2	39.7	38	37.5	37.8	38.25	3.83E-05	4,183.007
Δοκίμιο 21 ημερών (2.5% SF)							
1	36.7	37.2	36.7	36.5	36.78	3.68E-05	4,350.782
2	38.8	37.5	37.2	37.6	37.78	3.78E-05	4,235.606
Δοκίμιο 28 ημερών (2.5% SF)							
1	36.5	36.4	37.3	37.3	36.88	3.69E-05	4,338.983
2	37.2	36.9	37.6	37.7	37.35	3.74E-05	4,283.802

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 5% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (5% SF)							
1	40.4	42	41.3	41.7	41.35	4.14E-05	3,869.407
2	41.7	42	42.2	41.8	41.93	4.19E-05	3,816.339
Δοκίμιο 7 ημερών (5% SF)							
1	40.2	39.3	39.5	41.3	40.08	4.01E-05	3,992.514
2	41.3	41.1	40.5	40.4	40.83	4.08E-05	3,919.167
Δοκίμιο 14 ημερών (5% SF)							
1	38.8	38.5	39.1	39.1	38.88	3.89E-05	4,115.756
2	40.2	39.7	39.4	40	39.83	3.98E-05	4,017.577
Δοκίμιο 21 ημερών (5% SF)							
1	39.7	39.7	38.9	38.5	39.20	3.92E-05	4,081.633
2	39.6	39.6	39.3	39.3	39.45	3.95E-05	4,055.767
Δοκίμιο 28 ημερών (5% SF)							
1	38.5	38.7	38.1	38.1	38.35	3.84E-05	4,172.099
2	39.3	39.4	39.3	39.3	39.33	3.93E-05	4,068.659

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό SF, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (10% SF)							
1	42.4	42.1	43	42.9	42.60	4.26E-05	3,755.869
Δοκίμιο 7 ημερών (10% SF)							
1	43.5	43.1	42.6	42.7	42.98	4.30E-05	3,723.095
Δοκίμιο 14 ημερών (10% SF)							
1	42.6	41.6	41.4	41.9	41.88	4.19E-05	3,820.896
Δοκίμιο 21 ημερών (10% SF)							
1	41.8	40.8	40.8	41	41.10	4.11E-05	3,892.944
Δοκίμιο 28 ημερών (10% SF)							
1	41.1	40.6	40.4	41.4	40.88	4.09E-05	3,914.373

5.4.3 Δοκίμιο με ενισχυτικό TMX και 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Το TMX, όπως ήδη έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, προέρχεται από πείραμα στο οποίο τα αντιδραστήρια εφαρμόστηκαν με πινέλο σε τεμάχια αμιαντοτσιμέντου, με σκοπό την πιθανή μελέτη της χρήσης των αντιδραστηρίων για in situ επεξεργασία.

Οι μετρήσεις σε αυτό το δοκίμιο παρουσίασαν μεγάλη διακύμανση συναρτήσει του χρόνου (βλ. Πίνακα 5.6). Στις 3 ημέρες η ποιότητα είναι οριακά καλή και με την πάροδο του χρόνου βελτιώνεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι φυσιολογική καθώς όσο ωριμάζει το δοκίμιο τόσο αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Το τελικό αποτέλεσμα μετά το πέρας των 28 ημερών, είναι το επιθυμητό, με το δοκίμιο να αποκτά καλή ποιότητα σκυροδέματος σχεδόν ίσης με αυτή του silica fume στην αντικατάσταση 2.5%. Για αναλογία 10% του TMX καταγράφηκε υψηλότερη ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών ($v = 4204.993 \text{ m/s}$) έναντι του 10% αντικατάστασης του silica fume. Συνεπώς το συγκεκριμένο ενισχυτικό υλικό με την αναλογία αυτή είναι αρκετά ικανοποιητικό και αναμένεται να έχει τα επιθυμητά επίπεδα θλιπτικής αντοχής.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό TMX, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (10% TMX)							
1	44.7	42	49.2	43.4	44.83	4.48E-05	3,569.437
2	44.4	43.6	44.8	46.8	44.90	4.49E-05	3,563.474
Δοκίμιο 7 ημερών (10% TMX)							
1	40.9	41	41.2	41.3	41.10	4.11E-05	3,892.944
2	40.3	40.4	40.2	40.9	40.45	4.05E-05	3,955.501
Δοκίμιο 14 ημερών (10% TMX)							
1	39.8	39.3	39.3	39	39.35	3.94E-05	4,066.074
2	39	38.3	38.5	38.6	38.60	3.86E-05	4,145.078
Δοκίμιο 21 ημερών (10% TMX)							
1	38.2	37.4	37.3	37.8	37.68	3.77E-05	4,246.848
2	38.4	37.5	37.9	38.2	38.00	3.80E-05	4,210.526
Δοκίμιο 28 ημερών (10% TMX)							
1	38.3	38.2	38	37.7	38.05	3.81E-05	4,204.993
2	38	38.3	37.7	38.2	38.05	3.81E-05	4,204.993

5.4.4 Δοκίμιο με ενισχυτικό MW και 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Τα δοκίμια που περιέχουν το επεξεργασμένο αμιαντοτσιμέντο υπό ακτινοβολία μικροκυμάτων υποδεικνύουν καλή ποιότητα του σκυροδέματος τις πρώτες ημέρες της ωρίμανσής τους. Η ταχύτητα UPV βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας είναι ικανοποιητικός και προσδίδει ένα πολύ καλό επίπεδο ποιότητας (βλ. Πίνακα 5.7). Η ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 10% MW ήταν μεγαλύτερη από αυτή του silica fume στο ίδιο ποσοστό. Συνεπώς, και αυτό το πρόσμικτο ενισχυτικό υλικό αναμένεται να επιφέρει αύξηση των αντοχών των δοκιμίων.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό MW, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (10% MW)							
1	40.7	40.4	41.4	41	40.88	4.09E-05	3,914.373
2	41.3	40.7	40.7	40.3	40.75	4.08E-05	3,926.380
Δοκίμιο 7 ημερών (10% MW)							
1	41.7	40.7	40.4	40.7	40.88	4.09E-05	3,914.373
2	39.6	38.9	39.9	39.3	39.43	3.94E-05	4,058.339
Δοκίμιο 14 ημερών (10% MW)							
1	38.8	38.2	38.4	39	38.60	3.86E-05	4,145.078
2	37.4	37.7	38.4	37.8	37.83	3.78E-05	4,230.007
Δοκίμιο 21 ημερών (10% MW)							
1	38.4	37.9	37.4	37.6	37.83	3.78E-05	4,230.007
2	38	36.8	36.7	37.4	37.23	3.72E-05	4,298.187
Δοκίμιο 28 ημερών (10% MW)							
1	38	37.8	37.3	37.7	37.70	3.77E-05	4,244.032
2	37.1	36.9	37.2	37.4	37.15	3.72E-05	4,306.864

5.4.5 Δοκίμιο με ενισχυτικό STF και 5, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Το STF αποτέλεσε ένα ενισχυτικό υλικό το οποίο δεν αύξησε τόσο την ποιότητα του σκυροδέματος για τις δύο μελετώμενες αναλογίες. Το σκυρόδεμα κατατάσσεται σε καλής ποιότητας χωρίς να αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό η ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών. Μεταξύ των δύο μελετώμενων αναλογιών βέλτιστη ταχύτητα διάδοσης καταγράφεται για ποσοστό αντικατάστασης 5%. Η ποιότητα του 5% αντικατάστασης σύμφωνα με τη ταχύτητα διάδοσης (βλ. Πίνακα 5.8) είναι όμοια με αυτήν του εμπορικού silica fume (βλ. Πίνακα 5.4) για ίδιο ποσοστό αντικατάστασης.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό STF, 5% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (5% STF)							
1	41.3	41.2	41.1	41.3	41.23	4.12E-05	3,881.140
2	41.8	41.5	41.6	41	41.48	4.15E-05	3,857.746
Δοκίμιο 7 ημερών (5% STF)							
1	42	42.5	42.4	41.1	42.00	4.20E-05	3,809.524
2	41.7	40.9	40.8	41.5	41.23	4.12E-05	3,881.140
Δοκίμιο 14 ημερών (5% STF)							
1	41	40.6	40	40.2	40.45	4.05E-05	3,955.501
2	40.4	40	40.2	40.7	40.33	4.03E-05	3,967.762
Δοκίμιο 21 ημερών (5% STF)							
1	39.7	39.7	38.9	38.5	39.20	3.92E-05	4,081.633
2	39.6	39.6	39.3	39.3	39.45	3.95E-05	4,055.767
Δοκίμιο 28 ημερών (5% STF)							
1	39.5	39.2	39.1	38.9	39.18	3.92E-05	4,084.237
2	40	39.8	39.8	40	39.90	3.99E-05	4,010.025

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό STF, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (10% STF)							
1	51.8	51.6	52	51.8	51.80	5.18E-05	3,088.803
2	51.2	52.4	51	54.8	52.35	5.24E-05	3,056.351
Δοκίμιο 7 ημερών (10% STF)							
1	46.5	46.5	46.2	46.1	46.33	4.63E-05	3,453.859
2	46.3	45.9	46.2	46	46.10	4.61E-05	3,470.716
Δοκίμιο 14 ημερών (10% STF)							
1	44.2	44.1	44.1	44.1	44.13	4.41E-05	3,626.062
2	43.7	43.6	43.6	43.6	43.63	4.36E-05	3,667.622
Δοκίμιο 21 ημερών (10% STF)							
1	42.7	42.5	42.6	42.9	42.68	4.27E-05	3,749.268
2	42.9	42.9	43.3	43.9	43.25	4.33E-05	3,699.422
Δοκίμιο 28 ημερών (10% STF)							
1	43	43.5	42.9	42.7	43.03	4.30E-05	3,718.768
2	42.8	42.6	42.6	42.7	42.68	4.27E-05	3,749.268

5.4.6 Δοκίμιο με ενισχυτικό GEL και 2.5, 5, 10, 20 και 30% αντικατάσταση τσιμέντου

Το GEL είναι το ενισχυτικό υλικό που μελετήθηκε στις περισσότερες αναλογίες. Ως πρόσμικτο υλικό ενίσχυσης δεν αύξησε στον αναμενόμενο βαθμό την ποιότητα του σκυροδέματος. Παρέχει τελικά δοκίμια καλής ποιότητας, για αναλογίες 2.5, 5, 10 και 20% (βλ. Πίνακες 5.10 - 5.13). Τα δοκίμια με ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 30% (βλ. Πίνακα 5.14) κατηγοριοποιούνται ως μεσαίας ποιότητας. Οι αναλογίες των 20 και 30% κατέγραψαν τη χαμηλότερη ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών αποδεικνύοντας πως σε αυτά τα υψηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου το υπό εξέταση ενισχυτικό υλικό δεν μπορεί να συνεισφέρει στην επιπλέον αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Η καλύτερη απόδοση παρουσιάζεται για αναλογία 2.5% αντικατάστασης καθώς η αύξηση της ταχύτητας UPV λαμβάνει την υψηλότερη τιμή της και πολύ κοντά την τιμή του εμπορικού silica fume.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 2.5% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (2.5% GEL)							
1	39.4	39.2	40.9	39.9	39.85	3.99E-05	4,015.056
2	40	39.9	39.8	39.9	39.90	3.99E-05	4,010.025
Δοκίμιο 7 ημερών (2.5% GEL)							
1	40.9	39.7	39.4	39.7	39.93	3.99E-05	4,007.514
2	41.7	40.7	40.5	39.8	40.68	4.07E-05	3,933.620
Δοκίμιο 14 ημερών (2.5% GEL)							
1	39.2	38.3	38.7	39.5	38.93	3.89E-05	4,110.469
2	40	39.2	38.5	39.9	39.40	3.94E-05	4,060.914
Δοκίμιο 21 ημερών (2.5% GEL)							
1	38.8	38.3	38	38.3	38.35	3.84E-05	4,172.099
2	39.6	38.3	38.2	39.1	38.80	3.88E-05	4,123.711
Δοκίμιο 28 ημερών (2.5% GEL)							
1	37.3	37.5	37.2	37.6	37.40	3.74E-05	4,278.075
2	38.3	37.7	37.6	38	37.90	3.79E-05	4,221.636

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 5% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 5 ημερών (5% GEL)							
1	40.8	40.9	41.1	41.2	41.00	4.10E-05	3,902.439
2	40.6	39.7	39.4	40.3	40.00	4.00E-05	4,000.000
Δοκίμιο 7 ημερών (5% GEL)							
1	41.5	41.4	40.8	40.5	41.05	4.11E-05	3,897.686
2	40.2	41.3	39.9	39.3	40.18	4.02E-05	3,982.576
Δοκίμιο 14 ημερών (5% GEL)							
1	40.8	40.6	39.5	40	40.23	4.02E-05	3,977.626
2	41	40	40	40.1	40.28	4.03E-05	3,972.688
Δοκίμιο 28 ημερών (5% GEL)							
1	40	39.9	39.6	39.9	39.85	3.99E-05	4,015.056
2	39.7	39.2	39.1	39.2	39.30	3.93E-05	4,071.247
Δοκίμιο 28 ημερών (5 % GEL)							
1	38.9	39.1	38.7	38.9	38.90	3.89E-05	4,113.111
2	38.9	39	38.3	38.9	38.78	3.88E-05	4,126.370

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 10% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (10% GEL)							
1	57.7	58.9	57.4	56.7	57.68	5.77E-05	2,774.166
2	44.1	45.8	45.7	45.8	45.35	4.54E-05	3,528.115
Δοκίμιο 7 ημερών (10% GEL)							
1	50.2	50.5	50.5	50.7	50.48	5.05E-05	3,169.886
2	41.6	41.4	41.5	41.6	41.53	4.15E-05	3,853.101
Δοκίμιο 14 ημερών (10% GEL)							
1	46.6	46.3	46.4	46.3	46.40	4.64E-05	3,448.276
2	42	42.8	41.8	42.5	42.28	4.23E-05	3,784.743
Δοκίμιο 21 ημερών (10% GEL)							
1	44.8	45.3	44.9	45	45.00	4.50E-05	3,555.556
2	41.6	40.4	40	41.3	40.83	4.08E-05	3,919.167
Δοκίμιο 28 ημερών (10% GEL)							
1	38.7	39.3	38.9	38.9	38.95	3.90E-05	4,107.831
2	38.9	39	38.8	38.2	38.73	3.87E-05	4,131.698

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 20% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (20% GEL)							
1	48.6	47	46.4	45.9	46.98	4.70E-05	3,406.067
2	57.5	56.4	57.3	56.8	57.00	5.70E-05	2,807.018
Δοκίμιο 7 ημερών (20% GEL)							
1	42.6	41.6	42.1	42.3	42.15	4.22E-05	3,795.967
2	49.7	50	50	50	49.93	4.99E-05	3,204.807
Δοκίμιο 14 ημερών (20% GEL)							
1	39.3	40.5	41.4	40.6	40.45	4.05E-05	3,955.501
2	47.1	46.9	46.4	46.4	46.70	4.67E-05	3,426.124
Δοκίμιο 21 ημερών (20% GEL)							
1	40.3	39.2	39	38.9	39.35	3.94E-05	4,066.074
2	44.6	44.3	46	44.8	44.93	4.49E-05	3,561.491
Δοκίμιο 28 ημερών (20% GEL)							
1	43.7	43.5	43.5	43.8	43.63	4.36E-05	3,667.622
2	45.6	45.9	44.4	44.2	45.03	4.50E-05	3,553.581

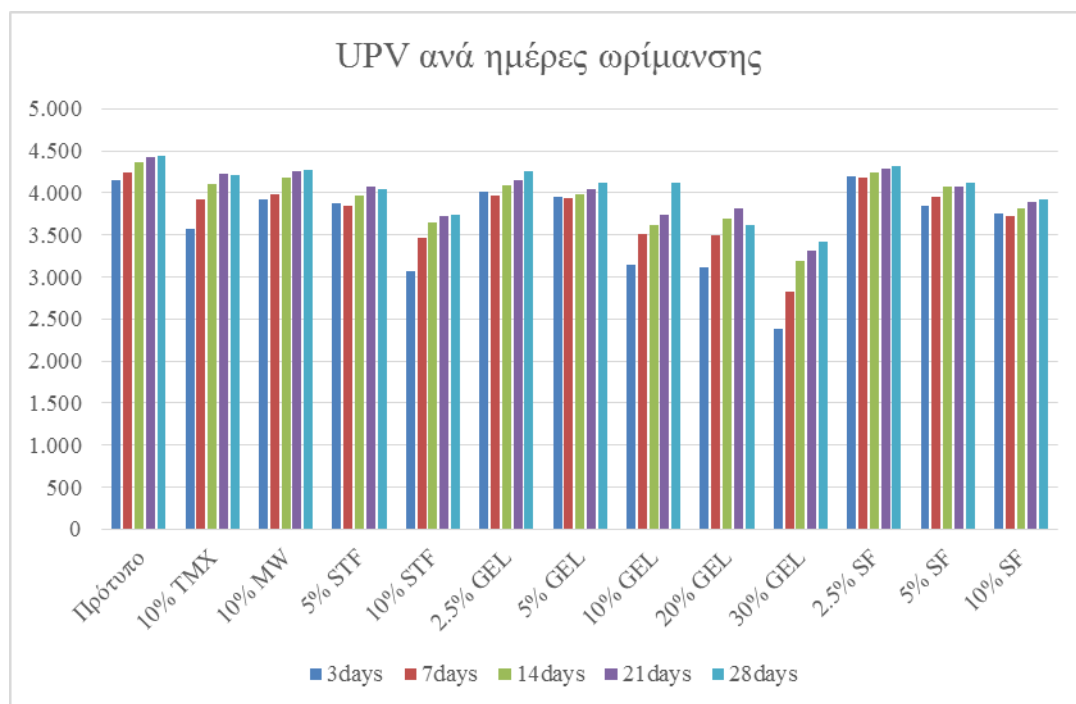
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα UPV στο δοκίμιο με ενισχυτικό GEL, 30% αντικατάσταση τσιμέντου

Δοκίμια	Μετρήσεις χρόνου ανά πλευρά (μsec)				Μέσος όρος χρόνου t (μsec)	Μέσος όρος χρόνου t (sec)	Ταχύτητα διάδοσης v=l/t (m/s)
Δοκίμιο 3 ημερών (30% GEL)							
1	65.2	66.3	66.3	65.9	65.93	6.59E-05	2,427.000
2	68.6	68.8	68.8	68.6	68.70	6.87E-05	2,328.967
Δοκίμιο 7 ημερών (30% GEL)							
1	56.5	56.2	57.3	55.5	56.38	5.64E-05	2,838.137
2	57.6	57.6	56.8	56.4	57.10	5.71E-05	2,802.102
Δοκίμιο 14 ημερών (30% GEL)							
1	49.7	49.3	49.6	49.5	49.53	4.95E-05	3,230.692
2	51.1	51.3	50.5	50.3	50.80	5.08E-05	3,149.606
Δοκίμιο 21 ημερών (30% GEL)							
1	47.3	47.1	47.6	47.7	47.43	4.74E-05	3,373.748
2	49.4	50.6	49.4	48.4	49.45	4.95E-05	3,235.592
Δοκίμιο 28 ημερών (30% GEL)							
1	47.6	47.5	47	47.3	47.35	4.74E-05	3,379.092
2	46.4	46.4	46.3	46.6	46.43	4.64E-05	3,446.419

5.4.7 Συγκεντρωτικές παρατηρήσεις της μεθόδου Ultrasonic Pulse Velocity

Παρατηρώντας την διακύμανση της ταχύτητας UPV συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης, προκύπτει το συμπέρασμα πως σε χαμηλές συγκεντρώσεις των πρόσμικτων υλικών, η ποιότητα του σκυροδέματος είναι καλή από τα πρώτα κιόλας στάδια ωρίμανσης. Για συγκεντρώσεις μέχρι και 10% αντικατάστασης τσιμέντου με τα υπό μελέτη υλικά, η ποιότητα χαρακτηρίζεται ως καλή, σε τιμές κοντινές με αυτές του προτύπου. Τις πρώτες ημέρες εμφανίζουν χαμηλές τιμές ταχύτητας UPV, ενώ από τη 14^η ημέρα και έπειτα βελτιώνεται αισθητά η ποιότητα του σκυροδέματος.

Τέλος, παρατηρείται πως τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με αντικατάσταση τσιμέντου σε ποσοστά μεγαλύτερα του 10% δεν υπερέβησαν τα αποδεκτά ποιοτικά όρια, ώστε τα αποτελέσματά τους να θεωρούνται αξιόπιστα (βλ. Διάγραμμα 5.4). Αναμένεται λοιπόν, στις συνθήσεις αυτές να ληφθούν και χαμηλές τιμές αντοχών σε θλίψη και κάμψη.



Διάγραμμα 5.4: Συγκεντρωτικό γράφημα διακύμανσης ταχύτητας UPV

5.5 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής

Με τη πάροδο των 28 ημερών καταπονήθηκε σε κάμψη και θλίψη η πρώτη σειρά δοκιμίων. Η δεύτερη σειρά καταπονήθηκε στις 90 ημέρες, καθώς τα υπό μελέτη πρόσμικτα ενισχυτικά υλικά χαρακτηρίζονται από ποζολανική δραστικότητα. Αυτό συνεπάγεται πως η αντίδραση της υδράσβεστου με τα δραστικά συστατικά της ποζολάνης είναι βραδεία, επιβραδύνοντας την ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις μετά την πάροδο των 90 ημερών δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αρχικά και για τις δύο σειρές δοκιμίων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της κάμψης (βλ. Διάγραμμα 5.5) και στη συνέχεια τα δύο τμήματα που προέκυπταν από κάθε δοκίμιο υπόκειντο στη διαδικασία μονοαξονικής θλίψης. Πριν την θραύση των δοκιμίων μετρήθηκαν οι διαστάσεις αυτών για τον υπολογισμό της επιφάνειάς τους.

Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_f = (1.5 \times F_f \times I) / (b \times d^2) \quad (5.1)$$

Όπου:

R_f : η αντοχή σε κάμψη, σε MPa

F_f : το φορτίο που εφαρμόζεται στο μέσο του πρίσματος κατά τη θραύση

b : το ύψος της διατομής του δοκιμίου, σε mm

d : το πλάτος της διατομής του δοκιμίου, σε mm

I : η ροπή αδράνειας

Οι ενδιάμεσες μετρήσεις της ταχύτητας υπερηχητικών παλμών (UPV) κατηγοριοποιούν, όπως ήδη έχει αναφερθεί στον Πίνακα 4.4, την ποιότητα του σκυροδέματος σε κάθε δοκίμιο. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης μέσω των ταχυτήτων UPV θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα των καταπονήσεων σε κάμψη και θλίψη.

Παρατηρείται πως δοκίμια με πολύ καλές τιμές UPV δεν επέφεραν το ίδιο καλές τιμές στην καμπτική αντοχή. Συγκεκριμένα, μελετώντας αρχικά τις 28 ημέρες (βλ. Πίνακα 5.15), παρατηρείται πως για το πρότυπο δοκίμιο που καταγράφηκε η καλύτερη ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικών παλμών η καμπτική αντοχή που

παρουσίασε ήταν αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τα δοκίμια του 2.5% GEL και 10% TMX, χαμηλότερης UPV. Τα δοκίμια αυτά παρουσίασαν υψηλές τιμές καμπτικής αντοχής τις πρώτες 28 ημέρες. Η ταχύτητα UPV που καταγράφηκε για τα δοκίμια του 2.5 και 10% TMX ήταν σε ικανοποιητικό επίπεδο χωρίς όμως να είναι αισθητά καλύτερη από τα υπόλοιπα δοκίμια. Ως πρώτο συμπέρασμα λοιπόν διαπιστώνεται η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν δύο από τα υπό μελέτη υλικά, το GEL και το TMX σε χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου. Το έτοιμο εμπορικό προϊόν, silica fume, για τις πρώτες 28 ημέρες δεν παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για ποσοστό 10% αντικατάστασης καταγράφηκε η χειρότερη αντοχή έναντι όλων των δοκιμίων.

Στη μέτρηση της καμπτικής αντοχής των 90 ημερών (βλ. Πίνακα 5.16) την υψηλότερη τιμή εμφάνισε το 5% SF, με τιμή 7.54 MPa. Το εμπορικό αυτό προϊόν κατά τις πρώτες 28 ημέρες δεν προσέδωσε το βέλτιστο αποτέλεσμα όμως στις 90 ημέρες η καμπτική αντοχή του βελτιώθηκε αισθητά. Είναι σημαντικό πως η τιμή που αποκτά το δοκίμιο SF με αντικατάσταση 5% στις 90 ημέρες, έχει ήδη καταγραφεί από το υπό εξέταση πρόσμικτο υλικό GEL σε αναλογία 2.5% τις πρώτες 28 ημέρες. Η αυξημένη πρόωμη αντοχή για το GEL με αναλογία 2.5% όμως, δεν συνεχίζει να αυξάνει με τον ίδιο βαθμό μέχρι τις 90 ημέρες.

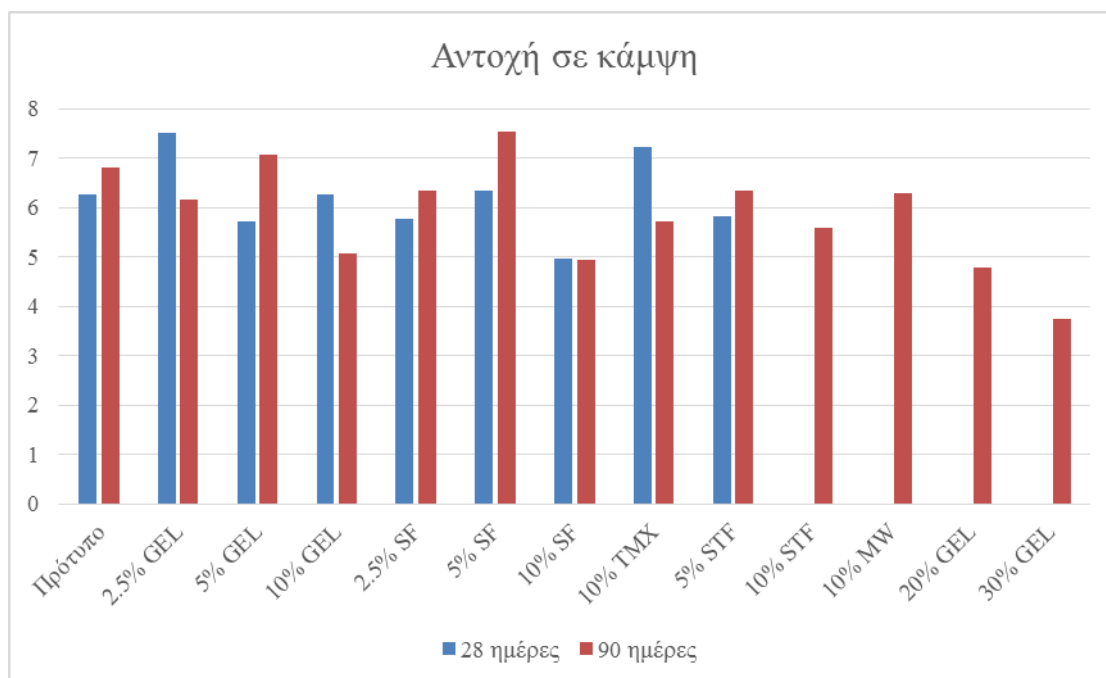
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη στις 28 ημέρες

α/α	Περιγραφή δοκιμίων	Ύψος (mm) b	Πλάτος (mm) d	d ²	b*d ²	Μέγιστο καμπτικό φορτίο F (N)	l (σταθερά)	Καμπτική αντοχή (Mpa)	Μέση καμπτική αντοχή (Mpa)	Τυπική απόκλιση
Δοκίμια 28 ημερών										
1	Πρότυπο 1a	40.10	40.00	1600.00	64160.00	2400	100	5.61	6.27	0.65
2	Πρότυπο 2a	40.00	39.30	1544.49	61779.60	2850	100	6.92		
3	5%STF 1a	40.40	40.30	1624.09	65613.24	2290	100	5.24	5.82	0.59
4	5% STF 2a	40.20	39.70	1576.09	63358.82	2708	100	6.41		
5	2.5% GEL 1a	40.20	40.60	1648.36	66264.07	3240	100	7.33	7.51	0.18
6	2.5% GEL 2a	40.00	40.70	1656.49	66259.60	3396	100	7.69		
7	5% GEL 1a	40.00	40.60	1648.36	65934.40	2803	100	6.38	5.72	0.66
8	5 % GEL 2a	40.20	40.30	1624.09	65288.42	2205	100	5.07		
9	10% GEL 1a	39.90	40.00	1600.00	63840.00	2666	100	6.26	6.26	2.57
10	10% GEL 2a	40.00	40.00	1600.00	64000.00	477	100	1.12		
11	10%TMX 1a	40.10	39.60	1568.16	62883.22	3076	100	7.34	7.23	0.11
12	10%TMX 2a	40.10	39.80	1584.04	63520.00	3013	100	7.12		
13	2.5% SF 1a	40.00	40.00	1600.00	64000.00	1150	100	2.70	5.77	1.54
14	2.5% SF 2a	40.20	40.00	1600.00	64320.00	2476	100	5.77		
15	5% SF 1a	40.30	39.90	1592.01	64158.00	2677	100	6.26	6.33	0.07
16	5% SF 2a	40.00	39.80	1584.04	63361.60	2704	100	6.40		
17	10% SF 1a	40.30	40.20	1616.04	65126.41	2384	100	5.49	4.97	0.52
18	10% SF 2a	40.20	39.70	1576.09	63358.82	1883	100	4.46		

*Οι μετρήσεις αυτές δεν ελήφθησαν υπόψη λόγω σφάλματος

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη στις 90 ημέρες

a/a	Περιγραφή δοκιμίων	Ύψος (mm) b	Πλάτος (mm) d	d ²	b*d ²	Μέγιστο καμπτικό φορτίο F (N)	l (σταθερά)	Καμπτική αντοχή (Mpa)	Μέση καμπτική αντοχή (Mpa)	Τυπική απόκλιση
Δοκίμια 90 ημερών										
1	Πρότυπο 1a	40.00	40.00	1600.00	64000.00	2201	100	5.16	6.81	1.22
2	Πρότυπο 2a	40.30	40.00	1600.00	64480.00	3465	100	8.06		
3	Πρότυπο 3a	40.00	39.60	1568.16	62726.40	3010	100	7.20		
4	MW 10% 1a	40.00	40.30	1624.09	64963.60	2551	100	5.89	6.29	0.40
5	MW 10% 2a	40.00	40.50	1640.25	65610.00	2927	100	6.69		
6	TMX 10% 1a	40.00	40.70	1656.49	66259.60	2407	100	5.45	5.72	0.27
7	TMX 10% 2a	40.00	39.60	1568.16	62726.40	2502	100	5.98		
8	2.5% GEL 1a	40.10	40.00	1600.00	64160.00	2672	100	6.25	6.15	0.10
9	2.5% GEL 2a	40.10	40.00	1600.00	64160.00	2589	100	6.05		
10	5% GEL 2a	40.00	39.00	1521.00	60840.00	2799	100	6.90	7.06	0.16
11	5% GEL 1a	40.00	40.50	1640.25	65610.00	3155	100	7.21		
12	10% GEL 1a	40.30	40.50	1640.25	66102.08	1523	100	3.46	5.07	1.61
13	10% GEL 2a	40.20	39.90	1592.01	63998.80	2849	100	6.68		
14	20% GEL 1a	40.10	39.50	1560.25	62566.03	1931	100	4.63	4.78	0.15
15	20% GEL 2a	40.00	40.70	1656.49	66259.60	2181	100	4.94		
16	30% GEL 1a	40.10	40.30	1624.09	65126.01	1602	100	3.69	3.75	0.06
17	30% GEL 2a	40.00	40.00	1600.00	64000.00	1628	100	3.82		
18	5% STF 2a	40.00	40.00	1600.00	64000.00	3308	100	7.75	6.34	1.41
19	5% STF 1a	40.20	40.00	1600.00	64320.00	2116	100	4.93		
20	10% STF 1a	39.90	40.40	1632.16	65123.18	2854	100	6.57	5.58	0.99
21	10% STF 2a	39.80	40.40	1632.16	64959.97	1987	100	4.59		
22	2.5% SF 1a	40.20	39.90	1592.01	63998.80	2818	100	6.60	6.33	0.27
23	2.5% SF 2a	40.10	40.20	1616.04	64803.20	2617	100	6.06		
24	5% SF 1a	39.80	40.20	1616.04	64318.39	3620	100	8.44	7.54	0.90
25	5% SF 2a	40.10	39.80	1584.04	63520.00	2812	100	6.64		
26	10% SF	40.20	40.00	1600.00	64320.00	2116	100	4.93	4.93	0.00



Διάγραμμα 5.5: Συγκεντρωτικές τιμές αντοχής σε κάμψη

5.6 Αποτελέσματα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας για την εύρεση της καμπτικής αντοχής τα δύο τμήματα που προέκυψαν σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (βλ. Διάγραμμα 5.6 – 5.7). Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_c = F_c / R \quad (5.2)$$

Όπου:

R_c : η αντοχή σε θλίψη, σε MPa

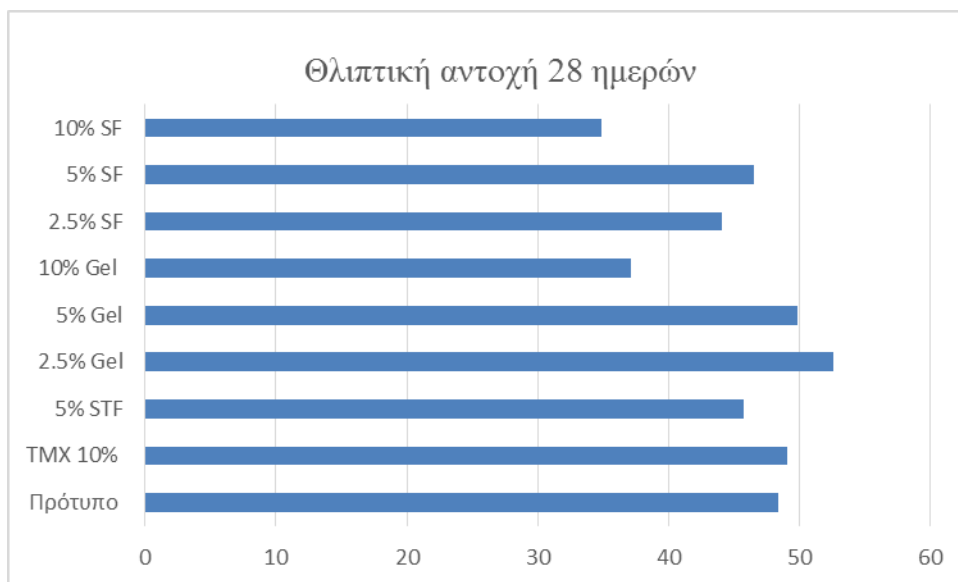
F_c : το μέγιστο φορτίο τη στιγμή της θραύσης, σε N

R : η επιφάνεια του δοκιμίου, σε mm²

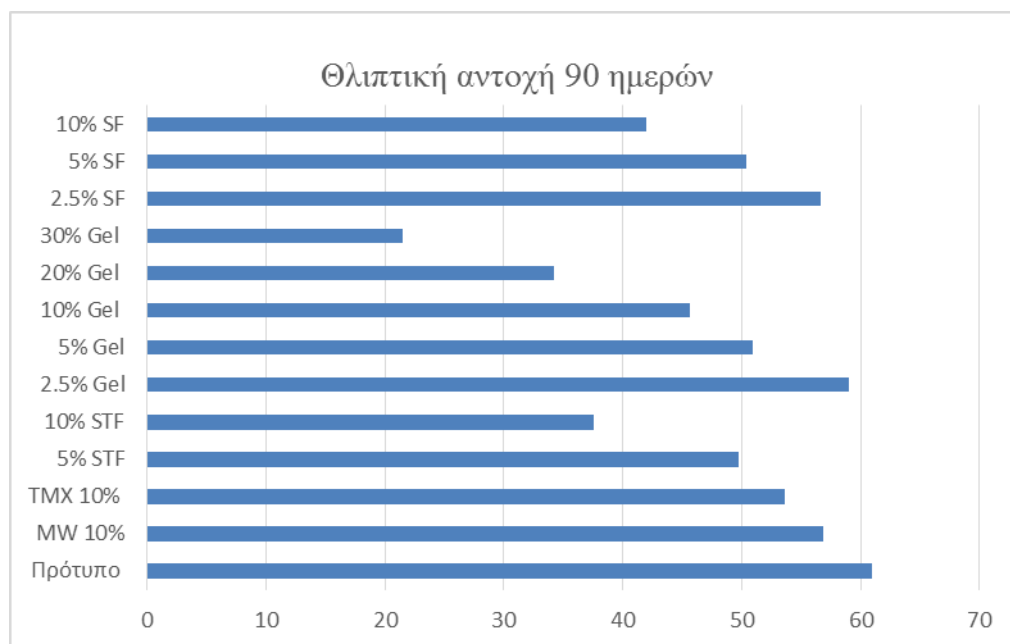
Για τις πρώτες 28 ημέρες παρατηρείται πως το πρότυπο δοκίμιο κατέγραψε τιμή θλιπτικής αντοχής 48.36 MPa (βλ. Πίνακα 5.17, Διάγραμμα 5.6). Μία τιμή που σχεδόν όλα τα ενισχυτικά υλικά προσέγγισαν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Παρατηρείται ακόμα πως το GEL με 5% και το TMX με 10% αντικατάσταση τσιμέντου εμφάνισαν καλύτερη αντοχή, από αυτή του προτύπου τις πρώτες 28

ημέρες. Την χαμηλότερη θλιπτική αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο με ενισχυτικό υλικό το GEL σε αντικατάσταση τσιμέντου 10% έναντι των υπόλοιπων δοκιμίων, με μεγάλη τυπική απόκλιση. Όσον αφορά την θλιπτική αντοχή που παρουσίασε το εμπορικό προϊόν SF, καταγράφηκαν σχετικά χαμηλές τιμές στα ποσοστά 2.5% και 10% αντικατάστασης και καλύτερα αποτελέσματα για ποσοστό αντικατάστασης 5%.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις 90 ημέρες διαπιστώθηκε μία διαφοροποίηση στην εξέλιξη της αντοχής των δοκιμίων (βλ. Πίνακα 5.19). Τα δοκίμια με την υψηλότερη θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες δεν συνέχισαν την ανοδική τους πορεία. Το GEL παρέμεινε ως ένα από τα καλύτερα ενισχυτικά που δοκιμάστηκαν, για αντικατάσταση τσιμέντου 2.5%. Οι αναλογίες του GEL που χρησιμοποιήθηκαν με ποσοστό αντικατάστασης πάνω από 10% δεν βελτίωσαν τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση αφορά την συμπεριφορά του εμπορικού προϊόντος SF. Οι μετρήσεις των 90 ημερών είναι ικανοποιητικές μόνο για ποσοστό αντικατάστασης 2.5%, με τιμή θλιπτικής αντοχής που έχει ήδη επιτευχθεί με τα υπό μελέτη ενισχυτικά υλικά. Το MW με 10%, το TMX με 10% και το GEL με 2.5% αντικατάσταση σημείωσαν εξίσου καλή τιμή θλιπτικής αντοχής όμοιας με αυτή του SF.



Διάγραμμα 5.6: Απεικόνιση θλιπτικής αντοχής 28 ημερών σε MPa



Διάγραμμα 5.7: Απεικόνιση θλιπτικής αντοχής 90 ημερών σε MPa

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη στις 28 ημέρες

a/a	Περιγραφή δοκιμίων	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Επιφάνεια (mm ²)	Μέγιστο φορτίο F (N)	Θλιπτική αντοχή (Mpa)	Μέση θλιπτική αντοχή (Mpa)	Τυπική απόκλιση
1	Πρότυπο 1a	40.10	40.00	1604.00	71836	44.79	48.36	2.42
	Πρότυπο 1b	40.10	40.00	1604.00	81604	50.88		
2	Πρότυπο 2a	40.00	39.30	1572.00	79014	50.26		
	Πρότυπο 2b	40.00	39.30	1572.00	74667	47.50		
3	5% STF a	40.40	40.30	1628.12	81262	49.91	45.70	2.85
	5% STF b	40.40	40.30	1628.12	69599	42.75		
4	5% STF 2a	40.20	39.70	1595.94	69322	43.44		
	5% STF 2b	40.20	39.70	1595.94	74528	46.70		
5	2.5% GEL 1a	40.20	40.60	1632.12	84889	52.01	52.62	1.15
	2.5% GEL 1b	40.20	40.60	1632.12	89034	54.55		
6	2.5% GEL 2a	40.00	40.70	1628.00	83942	51.56		
	2.5% GEL 2b	40.00	40.70	1628.00	85218	52.35		
7	5% GEL 1a	40.00	40.60	1624.00	81165	49.98	49.89	4.42
	5% GEL 1b	40.00	40.60	1624.00	74645	45.96		
8	5% GEL 2a	40.20	40.30	1620.06	75427	46.56		
	5% GEL 2b	40.20	40.30	1620.06	92446	57.06		
9	10% GEL1a	39.90	40.00	1596.00	67477	42.28	37.16	4.70
	10% GEL 1b	39.90	40.00	1596.00	65418	40.99		
10	10% GEL2a	40.00	40.00	1600.00	49245	30.78		
	10% GEL2b	40.00	40.00	1600.00	55334	34.58		
11	10% TMX 1a	40.10	39.60	1587.96	75652	47.64	49.05	2.40
	10% TMX 1b	40.10	39.60	1587.96	73226	46.11		
12	10% TMX 2a	40.10	39.80	1595.98	83701	52.44		
	10% TMX 2b	40.10	39.80	1595.98	79797	50.00		
13	2.5% SF 1a	40.00	40.00	1600.00	71547	44.72	44.03	1.84
	2.5% SF 1b	40.00	40.00	1600.00	66974	41.86		
14	2.5% SF 2a	40.20	40.00	1608.00	68933	42.87		
	2,5% SF 2b	40.20	40.00	1608.00	75061	46.68		
15	5% SF 1a	40.30	39.90	1607.97	72317	44.97	46.56	2.22
	5% SF 1b	40.30	39.90	1607.97	70434	43.80		
16	5% SF 2a	40.00	39.80	1592.00	77118	48.44		
	5% SF 2b	40.00	39.80	1592.00	78066	49.04		
17	10% SF 1a	40.30	40.20	1620.06	58164	35.90	34.88	2.04
	10% SF 1b	40.30	40.20	1620.06	59479	36.71		
18	10% SF 2a	40.20	39.70	1595.94	51114	32.03		
	10% SF 2b*	40.20	39.70	1595.94	40906	25.63		

*Οι μετρήσεις αυτές δεν ελήφθησαν υπόψη λόγω σφάλματος

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη στις 90 ημέρες

a/a	Περιγραφή δοκιμίων	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Επιφάνεια (mm ²)	Μέγιστο φορτίο F (N)	Θλιπτική αντοχή (Mpa)	Μέση θλιπτική αντοχή (Mpa)	Τυπική απόκλιση
1	Πρότυπο 1a	40.00	40.00	1600.00	97714	61.07	61.00	1.38
	Πρότυπο 1b	40.00	40.00	1600.00	94340	58.96		
2	Πρότυπο 2a	40.30	40.00	1612.00	98093	60.85		
	Πρότυπο 2b	40.30	40.00	1612.00	97525	60.50		
3	Πρότυπο 3a	40.00	39.60	1584.00	100816	63.65		
	Πρότυπο 3b	40.00	39.60	1584.00	96529	60.94		
4	MW 10% 1a	40.00	40.30	1612.00	93749	58.16	56.82	1.64
	MW 10% 1b	40.00	40.30	1612.00	94660	58.72		
5	MW 10% 2a	40.00	40.50	1620.00	89125	55.02		
	MW 10% 2b	40.00	40.50	1620.00	89693	55.37		
6	TMX 10% 1a	40.00	40.70	1628.00	81973	50.35	52.00	2.03
	TMX 10% 1b	40.00	40.70	1628.00	82668	50.78		
7	TMX 10% 2a	40.00	39.60	1584.00	86901	54.86		
	TMX 10% 2b*	40.00	39.60	1584.00	92423	58.35		
8	2.5% GEL 1a	40.10	40.00	1604.00	91372	56.97	58.96	1.61
	2.5% GEL 1b	40.10	40.00	1604.00	92711	57.80		
9	2.5% GEL 2b	40.10	40.00	1604.00	97260	60.64		
	2.5% GEL 2a	40.10	40.00	1604.00	96957	60.45		
10	5% GEL 2b	40.00	39.00	1560.00	79621	51.04	50.89	1.65
	5% GEL 2a	40.00	39.00	1560.00	78572	50.37		
11	5% GEL 1a	40.00	40.50	1620.00	79039	48.79		
	5% GEL 1b	40.00	40.50	1620.00	86469	53.38		
12	10% GEL 1a	40.30	40.50	1632.15	71536	43.83	45.69	1.51
	10% GEL 1b	40.30	40.50	1632.15	74581	45.69		
13	10% GEL 2a	40.20	39.90	1603.98	76248	47.54		
	10% GEL 2b*	40.20	39.90	1603.98	59039	36.81		
14	20% GEL 1a	40.10	39.50	1583.95	44730	28.24	34.22	2.65
	20% GEL 1b	40.10	39.50	1583.95	36340	22.94		
15	20% GEL 2a*	40.00	40.70	1628.00	58066	35.67		
	20% GEL 2b*	40.00	40.70	1628.00	53353	32.77		
16	30% GEL 1a	40.10	40.30	1616.03	36025	22.29	21.53	0.50
	30% GEL 1b	40.10	40.30	1616.03	35006	21.66		
17	30% GEL 2a	40.00	40.00	1600.00	33824	21.14		
	30% GEL 2b	40.00	40.00	1600.00	33648	21.03		
18	5% STF 2b	40.00	40.00	1600.00	88466	55.29	49.71	3.82
	5% STF 2a	40.20	40.00	1608.00	71584	44.52		

19	5% STF 1a	40.20	40.00	1608.00	80227	49.89	37.53	2.12
	5% STF 1b	40.00	40.00	1600.00	78610	49.13		
20	10% STF 1a	39.90	40.40	1611.96	57267	35.53		
	10% STF 1b	39.90	40.40	1611.96	57281	35.54		
21	10% STF 2a	39.80	40.40	1607.92	61981	38.55	56.63	3.80
	10% STF 2b	39.80	40.40	1607.92	65153	40.52		
22	2.5% SF 1a	40.20	39.90	1603.98	81402	50.75		
	2.5% SF 1b	40.20	39.90	1603.98	98423	61.36		
23	2.5% SF 2b	40.10	40.20	1612.02	91751	56.92	50.41	1.93
	2.5% SF 2a	40.10	40.20	1612.02	92661	57.48		
24	5% SF 1a	39.80	40.20	1599.96	85546	53.47		
	5% SF 1a	39.80	40.20	1599.96	80631	50.40		
25	5% SF 2b	40.10	39.80	1595.98	79128	49.58	41.96	0.13
	5% SF 2a	40.10	39.80	1595.98	76942	48.21		
26	10% SF 1a	40.20	40.00	1608.00	67680	42.09		
	10% SF 1b	40.20	40.00	1608.00	67275	41.84		

*Οι μετρήσεις αυτές δεν ελήφθησαν υπόψη λόγω σφάλματος

Συνοψίζοντας όλα τα ανωτέρω, διαπιστώνεται πως η χρήση των εξεταζόμενων υλικών ως πρόσμικτα με ενισχυτική δράση του σκυροδέματος είναι επιτυχής. Τα επεξεργασμένα υλικά αμιαντοτσιμέντου προσέδωσαν στα δοκίμια μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες ή και ακόμα καλύτερες από το ήδη χρησιμοποιούμενο εμπορικό υλικό. Η αντοχή τόσο σε θλίψη όσο και σε κάμψη κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα και στις 28 αλλά και στις 90 ημέρες. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η αυξημένη αντοχή τις πρώτες 28 ημέρες για χρήσεις που απαιτείται πρόωρη ωρίμανση και ανάπτυξη μεγάλου μέρους των μηχανικών ιδιοτήτων.

5.7 Συσχετίσεις αποτελεσμάτων και μεθόδων χαρακτηρισμού

Στην παρούσα ενότητα στόχος είναι η σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων που λήφθηκαν ως προς την ποζολανική δραστηριότητα των εξεταζόμενων υλικών. Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά υπολογίζεται ένας δείκτης δραστηριότητας αντοχής (Strength Activity Index - SAI). Σύμφωνα με τους Pontes et al (2013) η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μπορεί να εκφραστεί μέσω του δείκτη SAI, μέσω της εξίσωσης:

$$-SAI = A/B \times 100 \quad (5.3)$$

Όπου: A: η αντοχή σε θλίψη των μελετώμενων δοκιμίων (MPa),

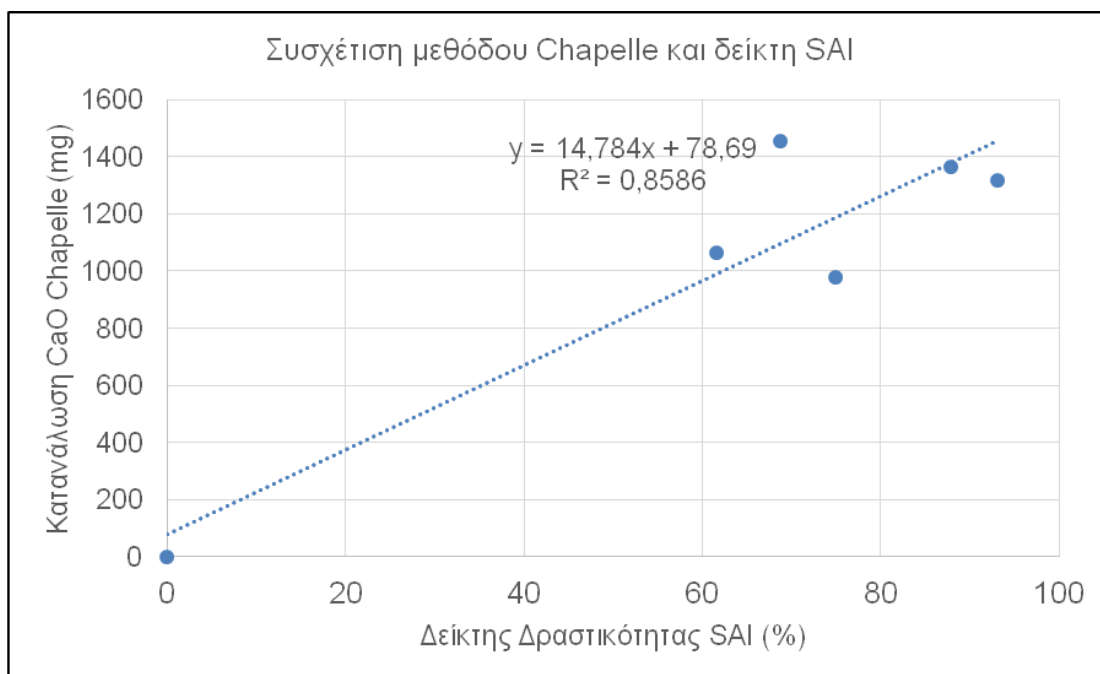
B: η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου αναφοράς (MPa).

Μελέτη Επαναχρησιμοποίησης Επεξεργασμένου Αμιαντοτσιμέντου ως Ενισχυτικό Δομικών Υλικών

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τις τιμές του Πίνακα 5.18 και την εξίσωση 5.3 προκύπτουν στον Πίνακα 5.19 οι ακόλουθες τιμές SAI.

Πίνακας 5.19: Τιμές δείκτη SAI για συνθέσεις αντικατάστασης 10% των μελετώμενων υλικών

α/α	Υλικό	Δείκτης SAI
1	STF	61.52
2	Gel	74.90
3	TMX	87.85
4	MW	93.14
5	SF	68.78



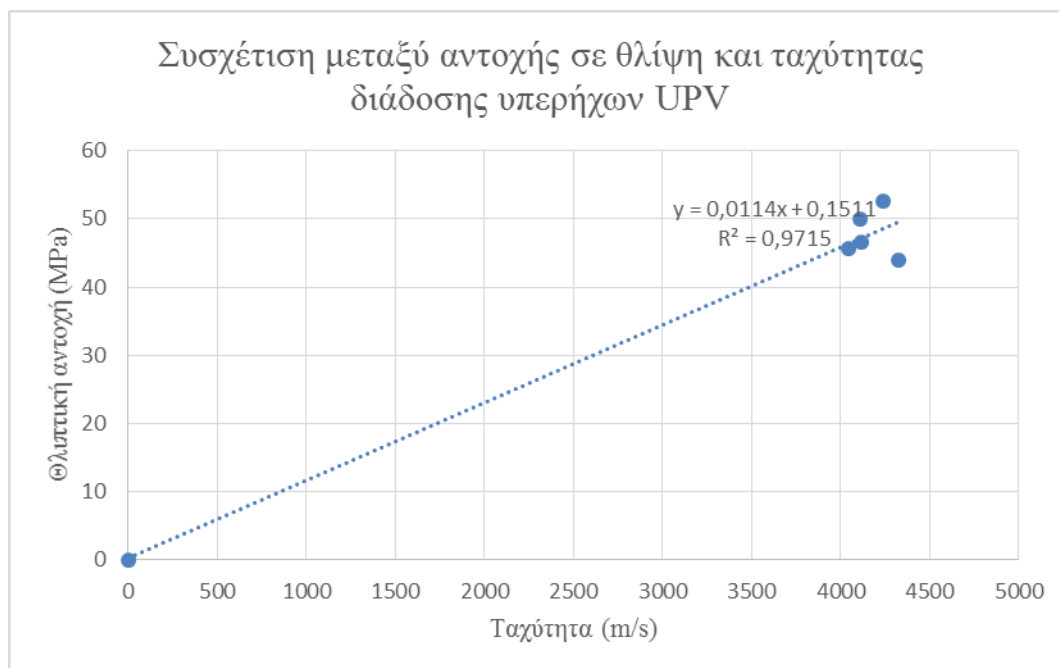
Διάγραμμα 5.8 : Συσχέτιση μεταξύ μεθόδου Chapelle και δείκτη SAI για την ποζολανική δραστικότητα των εξεταζόμενων υλικών

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.8 αποδεικνύεται πολύ ευνοϊκή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής Chapelle και του δείκτη SAI.

Ο δείκτης συσχέτισης R^2 λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Οι χαρακτηριστικές τιμές του R^2 ερμηνεύονται ως εξής:

- $R^2 = 1$: υπάρχει τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των X και Y,
- $R^2 = 0$: δεν υπάρχει καμία (γραμμική) συσχέτιση μεταξύ των X και Y.

Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δυο μελετώμενων μεθόδων εκφράζεται μέσω του συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.8586$. Πρόκειται για μια τιμή, η οποία υποδεικνύει υψηλή συσχέτιση μεταξύ της χημικής σύστασης των υλικών και της ανάλογης επίδρασης αυτών στην αντοχή του σκυροδέματος. Ο συντελεστής συσχέτισης παρότι είναι αρκετά υψηλός υποδηλώνει πως υπάρχουν επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος πέραν της χημικής σύστασης των υλικών, προκειμένου να αυξηθεί ακόμα περισσότερο.



Διάγραμμα 5.9: Συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε θλίψη και ταχύτητα διάδοσης υπερήχων UPV

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.9 διαπιστώνεται υψηλή συσχέτιση ($R^2 = 0.97$) μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων και της αντοχής σε θλίψη. Η ποιότητα του σκυροδέματος, που κρίνεται ως καλή για ταχύτητες UPV > 3500 m/s, συμπορεύεται με τις αντοχές των εκάστοτε δοκιμίων σε θλίψη. Για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης συσχέτισης λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα για τα οποία οι τιμές UPV ήταν μεγαλύτερες των 4000 m/s και αντιστοιχούν στις συνθέσεις με αντικατάσταση 2.5 και 5% προστιθέμενων υλικών, αντίστοιχα.

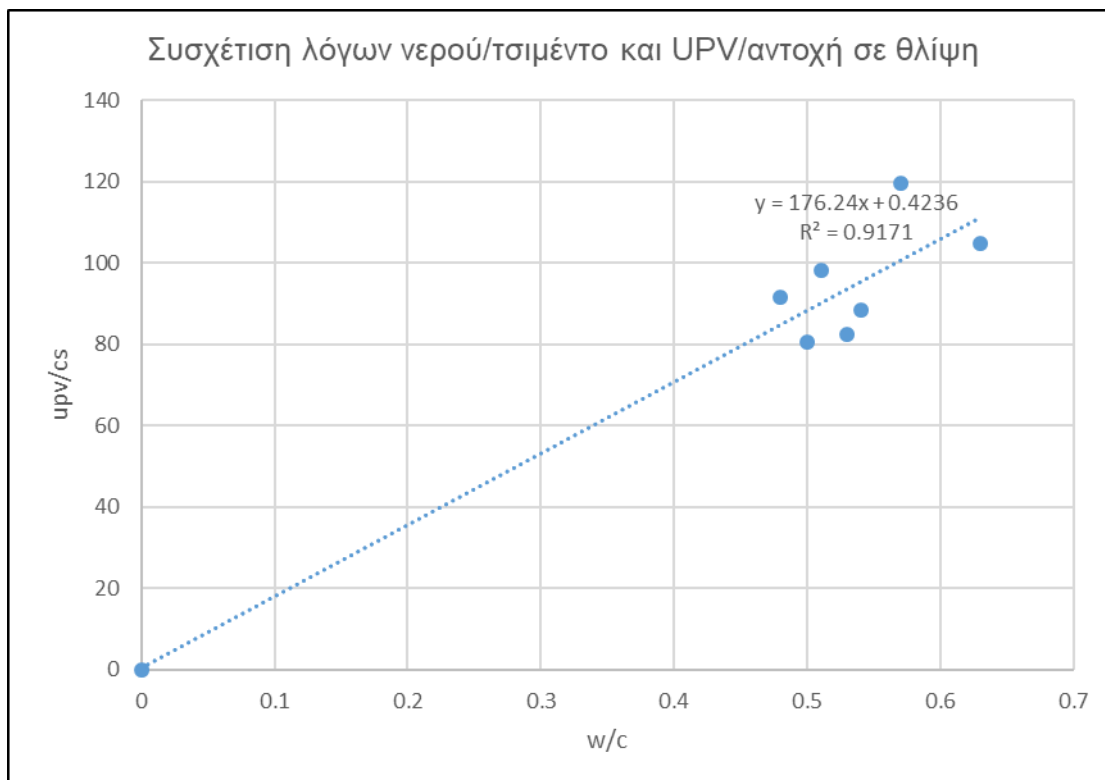
Τέλος, παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων UPV της θλιπτικής αντοχής και της αναλογίας νερού/τσιμέντο όπως, εξάλλου προέκυψαν από την παρασκευή των συνδετικών κονιαμάτων. Στον Πίνακα 5.21 εμφανίζονται οι επιμέρους αναλογίες και ταχύτητες του συνόλου των συνθέσεων που μελετήθηκαν.

Πίνακας 5.20: Αναλογίες δοκιμίων, αντοχή σε θλίψη και ταχύτητες UPV την 28η ημέρα ωρίμανσης

Αναλογία νερού/τσιμέντο (w/c)	UPV/ Αντοχή σε θλίψη (28 ημέρες)	Μέσος όρος τιμών UPV (28 ημέρες)
0	0	0
0.48	91.74	4436.858
0.5	80.58	4240.494
0.51	98.21	4324.548
0.53	82.33	4107.831
0.54	88.49	4044.155
0.57	119.72	3899.268
0.63	104.94	3899.659

Συνοψίζοντας, και λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των αποτελεσμάτων που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό, συμπεραίνεται πως η ποιότητα του σκυροδέματος τις πρώτες ημέρες ωρίμανσης, για συνθέσεις με υψηλές αναλογίες νερού/τσιμέντο είναι αρκετά χαμηλή. Στην πάροδο του χρόνου και μέχρι την 28^η ημέρα, παρουσιάζεται αισθητή βελτίωση. Παρόλα αυτά οι πρώιμες αντοχές (έως 7 ημέρες ωρίμανσης) αναμένεται να είναι ιδιαίτερα χαμηλές, καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Lawson et al., 2011) ισοδυναμούν με περίπου 30% των αντίστοιχων αντοχών στις 28 ημέρες.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.10 διαπιστώνεται επίσης υψηλή συσχέτιση μεταξύ της αναλογίας νερού/τσιμέντο και του τελικού αποτελέσματος της ποιότητας του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, όπου η συσχέτιση των αποτελεσμάτων ανέρχεται σε $R^2 = 0.917$, είναι συγκρίσιμα με αυτά των Lawson et al. (2011), όπου $R^2=0.9128$.



Διάγραμμα 5.10: Συσχέτιση μεταξύ αναλογίας νερού/τσιμέντο και αντοχής σε θλίψη/UPV την 28η ημέρα ωρίμανσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που λήφθηκαν από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι μέθοδοι στις οποίες υποβλήθηκαν τα υπό εξέταση υλικά ήταν η κοκκομετρική ανάλυση, η δοκιμή Chapelle, η Φασματομετρία ακτινών X φθορισμού (XRF) όπως και η τεχνική περίθλασης ακτινών X (XRD) των επιμέρους υλικών. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν χαρακτηρίστηκαν ως προς την ποιότητά τους με τη μη καταστρεπτική μέθοδο Ultrasonic Pulse Velocity και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε μηχανική καταπόνηση για τον προσδιορισμό αντοχής σε θλίψη και κάμψη.

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη συνεργιστική δράση μεταξύ των εξεταζόμενων υλικών και της συνδετικής κονίας, τα υλικά υπέστησαν λειοτρίβιση. Η κοκκομετρική ανάλυση είναι σημαντική καθώς η λεπτότητα του υλικού επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες που προσδίδει το υλικό στο σκυροδέμα. Όσο λεπτότερο είναι το υλικό, τόσο πιο αποδοτική θα είναι η χρήση του ως ενισχυτικό σκυροδέματος, καθώς θα καλύψει τους ελεύθερους πόρους αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα του υλικού. Εμποδίζεται λοιπόν μακροπρόθεσμα η μεταφορά στοιχείων στην μικροδομή του σκυροδέματος εσωτερικά, και καθίσταται πιο ανθεκτικό στην πάροδο του χρόνου και στην υποβάθμιση λόγω καιρικών συνθηκών.

Το πρόσμικτο που δρα ως το καλύτερο ενισχυτικό, με βάση τη θλιπτική αντοχή που προσδίδει είναι το Gel και συγκεκριμένα με 2.5% αντικατάσταση του τσιμέντου, παρουσιάζοντας μηχανικές ιδιότητες καλύτερες από αυτές της ίδιας αντικατάστασης τσιμέντου με το εμπορικό υλικό SF. Η απόκλιση αυτή πιθανό να οφείλεται στην μεγαλύτερη λεπτότητα που χαρακτήριζε το Gel έναντι του SF, γεγονός που ευνοεί να πραγματοποιηθούν οι ποζολανικές αντιδράσεις. Επιπλέον το Gel, εκτός από υψηλό ποσοστό άμορφου πυριτίου, περιέχει και μικρή ποσότητα CaO, η προσθήκη του οποίου επίσης διευκολύνει την ποζολανική αντίδραση και τη δημιουργία ισχυρών δεσμών C-S-H. Το 2.5% GEL έχει την υψηλότερη τιμή σε κάμψη για τις πρώτες 28 μέρες, χωρίς όμως να διατηρεί αυτό το προβάδισμα και στις 90 ημέρες.

Όσον αφορά την ταχύτητα μέτρησης υπερηχητικών παλμών παρατηρείται διακύμανση της ταχύτητας UPV στην πάροδο των ημερών ωρίμανσης. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα πως σε χαμηλές συγκεντρώσεις των πρόσμικτων υλικών, η ποιότητα του σκυροδέματος είναι καλύτερη από τα πρώτα κιόλας στάδια ωρίμανσης,

όπως αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα των καταπονήσεων. Η αναλογία νερού/τσιμέντο κυμαίνεται κοντά στη βέλτιστη, κατά τη βιβλιογραφία, για χαμηλές συγκεντρώσεις πρόσμικτων υλικών. Η περίσσεια νερού που παρέχεται στο σκυρόδεμα στις υψηλές συγκεντρώσεις αντικατάστασης, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ρευστότητα, καθιστά δύσκολες τις αντιδράσεις βελτίωσης της ποιότητας του σκυροδέματος. Το νερό, βασικός παράγοντας της ενυδάτωσης του τσιμέντου, καθυστερεί την αντίδραση, αυξάνει το πορώδες και ως αποτέλεσμα υποβαθμίζει την ποιότητα του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, για συγκεντρώσεις μέχρι και 10% αντικατάστασης υλικών, η ποιότητα χαρακτηρίζεται ως καλή, σε τιμές κοντινές του προτύπου. Τα δοκίμια, η σύνθεση των οποίων περιείχε αντικατάσταση τσιμέντου μεγαλύτερη του 10%, τις πρώτες ημέρες εμφανίζουν πολύ χαμηλές τιμές ταχύτητας UPV και ύστερα από τη 14^η βελτιώνεται αισθητά η ποιότητα του σκυροδέματος.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει μέσα από τη συσχέτιση της μεθόδου Chapelle και του δείκτη δραστηριότητας αντοχής είναι η ανάπτυξη ποζολανικών ιδιοτήτων των πρόσμικτων υλικών και η δραστηριότητα αυτών. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2 = 0.9612$, τιμή που υποδεικνύει εξαιρετικά υψηλή συσχέτιση μεταξύ της χημικής σύστασης των υλικών και την επίδραση αυτών στην αντοχή του σκυροδέματος. Η μέθοδος Chapelle υποδεικνύει πως όλα τα υπό μελέτη υλικά τείνουν να συμπεριφερθούν ως ποζολάνες και να βελτιώσουν τις ιδιότητες των δοκιμίων, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από τις ληφθείσες αντοχές.

Επίσης, παρατηρείται υψηλή συσχέτιση μεταξύ του λόγου νερού/τσιμέντο και της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη/UPV, $R^2 = 0.917$. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμβαδίζουν με τη βιβλιογραφία (Lawson et al., 2011), καθώς όσο χαμηλότερος είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου στο μίγμα τόσο υψηλότερες είναι και οι αντοχές των δοκιμίων σε θλίψη. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως σε μεγάλα ποσοστά αντικατάστασης υλικού, το μείγμα απαιτούσε αρκετό νερό ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή ρευστότητα.

6.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στα πλαίσια της αξιοποίησης των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, προτείνεται να διεξαχθεί επιπλέον πειραματική σειρά δοκιμίων με χρήση τσιμέντου Portland CEM I. Παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων

της επίδρασης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, ως ενισχυτικά τσιμέντου, σε διαφορετικούς τύπους τσιμέντου.

Επιπλέον, καθώς τα βέλτιστα αποτελέσματα λήφθηκαν σε χαμηλές συγκεντρώσεις αντικατάστασης, προτείνεται διεξαγωγή πειραμάτων χαμηλών ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από το προτεινόμενο ενισχυτικό υλικό, σε αναλογίες μικρότερες του 5%.

Τέλος, προκειμένου να εξεταστεί περαιτέρω η επίδραση του λόγου νερού/τσιμέντο στο τελικό προϊόν σκυροδέματος, προτείνεται η χρήση υπερπλαστικοποιητών. Με τη χρήση αυτών θα επιτυγχάνεται η ρευστότητα του σκυροδέματος χωρίς να μεταβάλλεται η αναλογία νερού/τσιμέντο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασιάδου Κ. (2004). Μεταπτυχιακή Διατριβή, 'Εκτίμηση της τοξικότητας της ευρύτερης περιοχής των ΜΑΒΕ Κοζάνης', Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Αξιώτης Δ. (2009). Διπλωματική εργασία 'Υδροθερμική επεξεργασία Αμιάντου', Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Βαλουμά Α. (2014). 'Αποτοξικοποίηση Χρυσοτιλικού Αμιάντου και Αμιαντοτσιμέντου μέσω Διεργασιών Πυριτοποίησης σε Όξινες και Βασικές Συνθήκες', Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (2014). Έκθεση για την ανακύκλωση στην Ελλάδα.
- ΕΛΟΤ EN 934.02:Πρόσθετα σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ EN 196-1 Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου - Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών.
- ΕΛΟΤ EN 197-2 'Τσιμέντο-Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης'.
- ΕΛΟΤ EN 206-1 (2013) 'Σκυρόδεμα- Μέρος 1: Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση'.
- EN 197-1 'Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα'.
- Κουμαντάκης Ε. (2007). Μεταπτυχιακή διατριβή, 'Προσδιορισμός αμιάντου στις αποθέσεις των Μεταλλείων Αμιάντου Βορείου Ελλάδος (ΜΑΒΕ) – Εκτίμηση της ρύπανσης', Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κουσαΐτη Α. (2012) 'Υδροθερμική Επεξεργασία Αμιαντούχων Αποβλήτων Με Σκοπό Τη Χρήση αυτών στην Προσρόφηση Πετρελαϊκών Ρύπων', Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Λουπασάκης Κ. (2013). 'Τεχνική Γεωλογία II', *Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Τεχνική Γεωλογία II»*.
- Μοροπούλου Α., Λαμπρόπουλος Κ. (2012). 'Δομικά Υλικά', *Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Δομικά Υλικά» 9ου εξαμ. Χ-Μ*.
- Παπαγιάννη Ι., Οικονόμου Ν., Στεφανίδου Μ. (2014). 'Δομικά Υλικά Ι', *Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Δομικά Υλικά, Ενότητα 3. Κονίες-Κονιάματα» Έκδοση: 1.0*.
- Πρατσόλη Σ. (2006). Μεταπτυχιακή Διατριβή, 'Εκτίμηση επικινδυνότητας αμιάντου στην περιοχή του πρώην εργοστασίου ΕΛΛΕΝΙΤ Α.Ε. της Ν. Λαμνιάκου Ευβοίας και στην ευρύτερη περιοχή', Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΤΕΕ (2006). 'Μεταλλεία Αμιάντου Βορείου Ελλάδος (ΜΑΒΕ): Ιστορικό, Υφιστάμενη Κατάσταση και κίνδυνοι από την ακύρωση των έργων'.
- Τριανταφύλου Α. (2013), 'Δομικά Υλικά', *10η έκδοση, σελ. 475*.
- ΦΕΚ 1561 Β'/02-06-2016, 'Έγκριση του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016)'.
- Φραγκούλιας, Χατζηγεωργίου Α. (2016), Πτυχιακή εργασία 'Σύνθεση σκυροδέματος και κονιαμάτων', ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI Committee 226 (1987). Silica fume in concrete: Preliminary report, *ACI Materials Journal March–April*: 158–66.
- Anfor, N. (2010). P 18-513–Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons- Définitions, spécifications, critères de conformité. *Mars*, 2.
- Agarwal, S. K. (2006). Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1735-1739.
- Frank Arthur L., Joshi T.K. (2014). The Global Spread of Asbestos, *Icahn School of Medicine at Mount Sinai. Annals of Global Health* 2014;80:257-262.
- Baláž, P., & Dutková, E. (2009). Fine milling in applied mechanochemistry. *Minerals Engineering*, 22(7-8), 681-694.
- Bernardo, E., Esposito, L., Rambaldi, E., & Tucci, A. (2011). Sintered glass ceramic articles from plasma vitrified asbestos containing waste. *Advances in Applied Ceramics*, 110(6), 346-352.
- BS EN 1008:2002 (2002). Mixing Water for Concrete e Specification for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water, Including Water Recovered from Processes in the Concrete Industry, as Mixing Water for Concrete.
- Choi, I., & Smith, R. W. (1972). Kinetic study of dissolution of asbestos fibers in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 40(2), 253-262.
- Cookson, W. O., Musk, A. W., Glancy, J. J., De Klerk, N. H., Yin, R., Mele, R., ... & Hobbs, M. S. (1985). Compensation, radiographic changes, and survival in applicants for asbestosis compensation. *Occupational and Environmental Medicine*, 42(7), 461-468.
- Dodson, R. F., Atkinson, M. A., & Levin, J. L. (2003). Asbestos fiber length as related to potential pathogenicity: a critical review. *American journal of industrial medicine*, 44(3), 291-297.
- Spasiano, D., & Pirozzi, F. (2017). Treatments of asbestos containing wastes. *Journal of environmental management*, 204, 82-91.
- EN 934-2:2009 (2009). Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labeling..
- Gibbs, G. W. (1979). Techniques of asbestos determination-research perspective. *Short course in mineralogical techniques of asbestos determination*, 4, 253-279.
- Gualtieri, A. F., Gualtieri, M. L., & Tonelli, M. (2008). In situ ESEM study of the thermal decomposition of chrysotile asbestos in view of safe recycling of the transformation product. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1-3), 260-266.
- Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., & Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 233-240.
- Lawson, I., Danso, K. A., Odoi, H. C., Adjei, C. A., Quashie, F. K., Mumuni, I. I., & Ibrahim, I. S. (2011). Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3(6), 499-504.
- IPCS - International Program for Chemical Safety (1996). Health effects of interactions arising from tobacco use and exposure to chemical, physical or biological aspects, *Draft Monograph, World Health Organization, Geneva*.

- Pontes, J., Santos Silva, A., & Faria, P. (2013). Evaluation of pozzolanic reactivity of artificial pozzolans. In *Materials Science Forum* (Vol. 730, pp. 433-438). Trans Tech Publications.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). *Design and control of concrete mixtures* (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Kusiorowski, R., Zaremba, T., Piotrowski, J., & Gerle, A. (2013). Thermal decomposition of asbestos-containing materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 113(1), 179-188.
- Luther, M. D. (1990). High-Performance Silica Fume (Microsilica)--Modified Cementitious Repair Materials. *Transportation Research Record*, (1284).
- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- NICNAS- National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (1999). Chrysotile asbestos. Priority Existing Chemical Report No 9.
- OVAM (2016). State of the Art: Asbestos - Possible Treatment Methods in Flanders: Constraints and Opportunities.
- Plescia, P., Gizzi, D., Benedetti, S., Camilucci, L., Fanizza, C., De Simone, P., & Paglietti, F. (2003). Mechanochemical treatment to recycling asbestos-containing waste. *Waste management*, 23(3), 209-218.
- Rakha Yadav, M., & Khan, A. (2016). EFFECT OF ASBESTOS CEMENT SHEET WASTE ON FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE: A REVIEW.
- Habaue, S., Hirasa, T., Akagi, Y., Yamashita, K., & Kajiwara, M. (2006). Synthesis and property of silicone polymer from chrysotile asbestos by acid-leaching and silylation. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 16(2), 155-160.
- Tu, X., Yu, L., Yan, J., Cen, K., & Cheron, B. G. (2010). Plasma vitrification of air pollution control residues from municipal solid-waste incineration. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(12), 3319-3325.
- US Department of Transportation (2005). Silica Fume User's Manual, *FHWA-IF-05-016*.
- Valouma, A., Verganelaki, A., Maravelaki-Kalaitzaki, P., & Gidarakos, E. (2016). Chrysotile asbestos detoxification with a combined treatment of oxalic acid and silicates producing amorphous silica and biomaterial. *Journal of hazardous materials*, 305, 164-170.
- Valouma, A., Verganelaki, A., Tectoros, I., Maravelaki-Kalaitzaki, P., & Gidarakos, E. (2017). Magnesium oxide production from chrysotile asbestos detoxification with oxalic acid treatment. *Journal of hazardous materials*, 336, 93-100.
- Viani, A., Gualtieri, A. F., Pollastri, S., Rinaudo, C., Croce, A., & Urso, G. (2013). Crystal chemistry of the high temperature product of transformation of cement-asbestos. *Journal of hazardous materials*, 248, 69-80.
- Weiss, W. (1999). Asbestosis: a marker for the increased risk of lung cancer among workers exposed to asbestos. *Chest*, 115(2), 536-549.
- Zaremba, T., Krzakała, A., Piotrowski, J., & Garczorz, D. (2010). Study on the thermal decomposition of chrysotile asbestos. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 101(2), 479-485.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ

- www.lung.gr
- <https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/>
- <http://civilblog.org/2014/08/30/what-is-standard-sand-used-for-cment-test/>
- <http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/testing-mortar.shtml>
- <http://www.alfatestusa.com/products/cement/c-050-cement-mortar-mixer/>
- http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo106y_lab/photo/metamorphic/marble_1.jpg
- <http://www.matest.com/en/Products/cement-mortar/MOULDS-FOR-CEMENT/water-baths-and-curing-cabinets-for-cement-curing-0/e139-curing-cabinet>
- <http://www.matest.com/en/Products/cement-mortar/COMPRESSION-AND-FLEXURAL-TESTING-MACHINES/cement-compression-and-flexural-machines-with-dual-measuring-range-touch-screen>
- <https://metakaolin.info/quality-criteria/chapelle-test.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Τιμές που μετρήθηκαν κατά την κοκκομετρική ανάλυση.

Μέγεθος	SF	STF	TMX	MW	GEL
0.0582	0.0027	0	0.00091	0	0
0.0679	0.00692	0	0.00378	0	0
0.0791	0.01313	0	0.01139	0	0
0.0921	0.02135	0	0.02794	0	0
0.1073	0.03108	0	0.05761	0	0
0.125	0.04142	0	0.10256	0	0
0.1456	0.05147	0	0.16305	0	0
0.1697	0.06053	0	0.23979	0	0
0.1977	0.06779	0	0.33233	0	0
0.2303	0.0717	0	0.42914	0	0
0.2683	0.07028	0	0.49919	0	0
0.3125	0.06347	0	0.52232	0	0
0.3641	0.05505	0.27883	0.54252	0	0
0.4242	0.04859	0.31159	0.62072	0.09658	0
0.4941	0.04428	0.37589	0.74021	0.12325	0.05784
0.5757	0.04317	0.47087	0.87553	0.16117	0.08264
0.6707	0.04792	0.61144	1.08447	0.22134	0.12745
0.7813	0.05806	0.78065	1.30188	0.29205	0.18579
0.9103	0.07857	0.98417	1.5066	0.40096	0.27142
1.0604	0.1003	1.1846	1.69186	0.51791	0.35872
1.2354	0.12441	1.3818	1.8409	0.65677	0.45418
1.4393	0.15118	1.56274	1.92668	0.81741	0.55309
1.6767	0.1806	1.71856	1.94674	0.99793	0.6484
1.9534	0.21323	1.85972	1.93458	1.21416	0.74496
2.2757	0.24938	1.99223	1.91563	1.47376	0.84458
2.6512	0.28922	2.11878	1.9108	1.76869	0.944
3.0887	0.33361	2.25543	1.95024	2.11045	1.05322
3.5983	0.38222	2.39932	2.0332	2.48669	1.1709
4.192	0.43436	2.54815	2.15009	2.8807	1.2955
4.8837	0.48843	2.6907	2.27195	3.25896	1.41768
5.6895	0.54314	2.8182	2.36925	3.58182	1.52524
6.6283	0.59894	2.93485	2.43435	3.83288	1.61396
7.7219	0.65942	3.06428	2.50034	4.0445	1.69688
8.996	0.72742	3.22508	2.59617	4.23693	1.7809
10.4804	0.80485	3.42787	2.74554	4.42493	1.87117
12.2096	0.89405	3.68133	2.97837	4.63237	1.9792
14.2242	0.99617	3.97875	3.30171	4.86926	2.11304
16.5712	1.11039	4.29746	3.69255	5.11599	2.27421
19.3055	1.2359	4.61029	4.11031	5.34848	2.46562

22.4909	1.37096	4.89042	4.49644	5.53504	2.68679
26.2019	1.51426	5.12671	4.80183	5.66186	2.93872
30.5252	1.66538	5.32745	5.0096	5.74021	3.22201
35.5618	1.8256	5.24161	5.14633	5.44104	3.5358
41.4295	1.9992	4.9573	4.84896	4.90447	3.87704
48.2654	2.19498	4.47167	4.33126	4.16408	4.23622
56.2292	2.42716	3.8092	3.64585	3.29782	4.59222
65.507	2.71663	3.14673	2.8505	2.40347	4.92296
76.3157	3.08697	2.48426	2.04422	1.59029	5.20631
88.9077	3.55734	1.82179	1.34296	0.93972	5.43287
103.5775	4.13531	1.15931	0.83997	0.49515	5.61898
120.6678	4.80636	0	0.56288	0.25203	5.51775
140.578	5.52968	0	0.66007	0.00891	5.19262
163.7733	6.26273	0	0.62383	0	4.64006
190.7959	6.97717	0	0.57357	0	3.90704
222.2773	7.67371	0	0.45637	0	3.06258
258.953	7.7465	0	0.28263	0	2.17787
301.6802	7.27077	0	0.11178	0	1.29315
351.4575	6.24111	0	0.00773	0	0.40844
409.4479	4.80498	0	0	0	0
477.0068	3.20116	0	0	0	0
555.713	1.59734	0	0	0	0
647.4056	0	0	0	0	0
754.2275	0	0	0	0	0
878.675	0	0	0	0	0

Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχηματισμό των καμπύλων αθροιστικών διερχόμενων ποσοστών.

Μέγεθος	αθρ. SF	αθρ. STF	αθρ. TMX	MW	GEL
0.0582	0.0027	0	0.00091	0	0
0.0679	0.00962	0	0.00469	0	0
0.0791	0.02275	0	0.01608	0	0
0.0921	0.0441	0	0.04402	0	0
0.1073	0.07518	0	0.10163	0	0
0.125	0.1166	0	0.20419	0	0
0.1456	0.16807	0	0.36724	0	0
0.1697	0.2286	0	0.60703	0	0
0.1977	0.29639	0	0.93936	0	0
0.2303	0.36809	0	1.3685	0	0
0.2683	0.43837	0	1.86769	0	0
0.3125	0.50184	0	2.39001	0	0
0.3641	0.55689	0.27883	2.93253	0	0
0.4242	0.60548	0.59042	3.55325	0.09658	0
0.4941	0.64976	0.96631	4.29346	0.21983	0.05784
0.5757	0.69293	1.43718	5.16899	0.381	0.14048
0.6707	0.74085	2.04862	6.25346	0.60234	0.26793
0.7813	0.79891	2.82927	7.55534	0.89439	0.45372
0.9103	0.87748	3.81344	9.06194	1.29535	0.72514
1.0604	0.97778	4.99804	10.7538	1.81326	1.08386
1.2354	1.10219	6.37984	12.5947	2.47003	1.53804
1.4393	1.25337	7.94258	14.52138	3.28744	2.09113
1.6767	1.43397	9.66114	16.46812	4.28537	2.73953
1.9534	1.6472	11.52086	18.4027	5.49953	3.48449
2.2757	1.89658	13.51309	20.31833	6.97329	4.32907
2.6512	2.1858	15.63187	22.22913	8.74198	5.27307
3.0887	2.51941	17.8873	24.17937	10.85243	6.32629
3.5983	2.90163	20.28662	26.21257	13.33912	7.49719
4.192	3.33599	22.83477	28.36266	16.21982	8.79269
4.8837	3.82442	25.52547	30.63461	19.47878	10.21037
5.6895	4.36756	28.34367	33.00386	23.0606	11.73561
6.6283	4.9665	31.27852	35.43821	26.89348	13.34957
7.7219	5.62592	34.3428	37.93855	30.93798	15.04645
8.996	6.35334	37.56788	40.53472	35.17491	16.82735
10.4804	7.15819	40.99575	43.28026	39.59984	18.69852
12.2096	8.05224	44.67708	46.25863	44.23221	20.67772
14.2242	9.04841	48.65583	49.56034	49.10147	22.79076
16.5712	10.1588	52.95329	53.25289	54.21746	25.06497
19.3055	11.3947	57.56358	57.3632	59.56594	27.53059

22.4909	12.7657	62.454	61.85964	65.10098	30.21738
26.2019	14.2799	67.58071	66.66147	70.76284	33.1561
30.5252	15.9453	72.90816	71.67107	76.50305	36.37811
35.5618	17.7709	78.14977	76.8174	81.94409	39.91391
41.4295	19.7701	83.10707	81.66636	86.84856	43.79095
48.2654	21.9651	87.57874	85.99762	91.01264	48.02717
56.2292	24.3922	91.38794	89.64347	94.31046	52.61939
65.507	27.1089	94.53467	92.49397	96.71393	57.54235
76.3157	30.1958	97.01893	94.53819	98.30422	62.74866
88.9077	33.7532	98.84072	95.88115	99.24394	68.18153
103.5775	37.8885	100.00003	96.72112	99.73909	73.80051
120.6678	42.6949	100.00003	97.284	99.99112	79.31826
140.578	48.2245	100.00003	97.94407	100	84.51088
163.7733	54.4873	100.00003	98.5679	100	89.15094
190.7959	61.4644	100.00003	99.14147	100	93.05798
222.2773	69.1381	100.00003	99.59784	100	96.12056
258.953	76.8846	100.00003	99.88047	100	98.29843
301.6802	84.1554	100.00003	99.99225	100	99.59158
351.4575	90.3965	100.00003	99.99998	100	100
409.4479	95.2015	100.00003	99.99998	100	100
477.0068	98.4027	100.00003	99.99998	100	100
555.713	100	100.00003	99.99998	100	100
647.4056	100	100.00003	99.99998	100	100
754.2275	100	100.00003	99.99998	100	100
878.675	100	100.00003	99.99998	100	100