



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής ειδικών δομικών στοιχείων από υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα.»

ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΜΑΡΙΑ-ΔΑΦΝΗ

Εξεταστική επιτροπή:

Αν. Καθηγητής Μιχαήλ Γαλετάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Ζαχαρίας Αγιουτάντης

Επικ. Καθηγητής Γεώργιος Αλεβίζος

Χανιά, 2013

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Αφιερωμένη στην οικογένειά μου

Πρόλογος

Πρώτα απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γαλετάκη για την εμπιστοσύνη και την υπομονή που έδειξε μέχρι την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, τον καθηγητή Αγιουτάντη Ζαχαρία και τον επίκουρο καθηγητή Αλεβίζο Γεώργιο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή καθώς και για τις εύστοχες υποδείξεις και διορθώσεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Σ. Μαυριγιαννάκη και την κ. Ε. Ρεπούσκου για τη βοήθειά τους στην διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων που απαιτήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο Χ. Πιπερίδη για την πολύτιμη βοήθειά της σε κάθε πρόβλημα που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ευχαριστώ πολύ την καλή φίλη και συνάδελφο Όλγα Γκίκα όπως και τον Τηλέμαχο Πασσάδη καθώς, χωρίς τη βοήθεια και συμπαράστασή τους, η ολοκλήρωση των σπουδών μου θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και όχι μόνο.

Περίληψη

Στην Ελλάδα σημαντικό μέρος της εξορυκτικής βιομηχανίας αποτελούν τα λατομεία αδρανών υλικών. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η δραστηριότητα αυτή είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων εξαιρετικά λεπτόκοκκου παραπροϊόντος (παιπάλη) που είναι ιδιαίτερα επιβαρυντικό για το περιβάλλον. Η απόθεση ή διαχείρισή του είναι δαπανηρή ενώ η αξιοποίησή του ως πληρωτικό υλικό σε άλλες χρήσεις δεν είναι πάντα εφικτή, για λόγους κυρίως οικονομικούς. Η διερεύνηση λοιπόν χρήσεων που μπορούν να απορροφήσουν μεγάλη ποσότητα παιπάλης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον λατομικό κλάδο. Μια τέτοια χρήση που θα μπορούσε να απορροφήσει σημαντικές ποσότητες παιπάλης είναι η παραγωγή δομικών υλικών για τις ανάγκες του κατασκευαστικού τομέα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται κοκκομετρικός χαρακτηρισμός της λατομικής παιπάλης και πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής ειδικών δομικών στοιχείων με βάση το υπερλεπτομερές αυτό λατομικό παραπροϊόν. Για την παραγωγή των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν μικροτσιμέντο, λατομική άμμος, παιπάλη διαφόρων κοκκομετριών, καθώς επίσης και ειδικά χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος.

Ο θεωρητικός σχεδιασμός των συνθέσεων έγινε με χρήση της τροποποιημένης εξίσωσης Andreassen, η οποία υπολογίζει τη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση μιγμάτων σκυροδέματος με πολύ λεπτόκοκκα υλικά. Βασικές παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη ήταν ο συντελεστής κατανομής και το μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κόκκου που συμμετέχουν στη σύνθεση.

Παρασκευάστηκαν επτά (7) διαφορετικές συνθέσεις, ακολούθησε η σκλήρυνση και ωρίμανση των παρασκευασθέντων δοκιμών σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος και μετά ο εργαστηριακός έλεγχος για τον προσδιορισμό της αντοχής τους σε μονοαξονική θλίψη.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι όλες οι συνθέσεις είχαν αρκετά υψηλή αντοχή, άνω των 32 MPa, και κρίνονται καταρχήν κατάλληλες για την παραγωγή φέροντων δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. Οι παράμετροι που διαδραμάτισαν το σημαντικότερο ρόλο στην τελική αντοχή των δοκιμών ήταν οι

αναλογίες μικροτσιμέντο/αδρανή και νερό/μικροτσιμέντο. Παράμετροι όπως ο συντελεστής κατανομής της κοκκομετρική διαβάθμισης και η αναλογία παιπάλη/λατομική άμμος, δεν επηρέασαν σημαντικά τη μηχανική τους αντοχή.

Τέλος, όσον αφορά τον κοκκομετρικό χαρακτηρισμό της παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε, κατασκευάστηκε ένα νομόγραμμα με βάση τις σχέσεις που υπολογίστηκαν να συνδέουν την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών με την ειδική τους επιφάνεια κατά Blaine. Το σφάλμα της υπολογιζόμενης προσεγγιστικής κοκκομετρικής καμπύλης με βάση την ειδική επιφάνεια κατά Blaine δεν ξεπέρασε το 10%.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Κεφάλαιο 1 ^ο . Εισαγωγή. Το πρόβλημα της παιπάλης κατά την παραγωγή αδρανών υλικών	1
1.1. Παραγωγή αδρανών υλικών στην Ελλάδα	1
1.2. Παιπάλη- Διερεύνηση χρήσεων	3
Κεφάλαιο 2 ^ο . Σκυρόδεμα, μικροσκυρόδεμα – πρώτες ύλες και μεθοδολογία καθορισμού συνθέσεων	10
2.1. Πρώτες ύλες παρασκευής σκυροδέματος	10
2.2. Πρόσμικτα σκυροδέματος	11
2.3. Μικροσκυρόδεμα.....	12
2.4 Μεθοδολογία καθορισμού της σύνθεσης μικροσκυροδέματος με βάση τα κοκκομετρικά μοντέλα.....	13
Κεφάλαιο 3ο . Κοκκομετρικός χαρακτηρισμός παιπάλης – μέθοδος Blaine	16
3.1. Μέθοδοι καθορισμού κοκκομετρίας υλικών	16
3.2. Μέθοδος Blaine.....	19
3.3 Διαδικασία μέτρησης ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο Blaine και συσχέτιση με την κοκκομετρική ανάλυση με laser	20
3.4. Αποτελέσματα Blaine	23
3.5. Νομόγραμμα Blaine – Διερεύνηση δυνατότητας εξαγωγής προσεγγιστικής κοκκομετρικής καμπύλης άγνωστου υλικού	25
Κεφάλαιο 4 ^ο . Υπολογισμός των συνθέσεων και παρασκευή και έλεγχος δοκιμίων μικροσκυροδέματος	33
4.1 Πρώτες ύλες και πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν	33
4.2 Διαδικασία καθορισμού των συνθέσεων μέσω του λογισμικού LISA	38
4.3 Αρχικός καθορισμός μιγμάτων μικροσκυροδέματος μέσω του λογισμικού LISA	40
4.4 Διαδικασία παρασκευής των μιγμάτων και ελέγχου των διαμορφούμενων δοκιμίων	44

Κεφάλαιο 5ο . Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	48
5.1 Παρουσίαση συνθέσεων σκυροδέματος – αντοχής δοκιμών	48
5.1.1. Σύνθεση S1	48
5.1.2. Σύνθεση S2	51
5.1.3. Σύνθεση S3	55
5.1.4. Σύνθεση S4	58
5.1.5. Σύνθεση S5	61
5.1.6. Σύνθεση S6	64
5.1.7. Σύνθεση S7	67
5.2. Μικροσκοπική εξέταση συνθέσεων S3,S5,S6	70
5.3. Συσχέτιση αναλογιών των συνθέσεων με τις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.....	78
Κεφάλαιο 6°. Συμπεράσματα – προτάσεις	86
Βιβλιογραφία	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	93
Διαγράμματα συσχέτισης Blaine – κοκκομετρίας.....	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	102
Θεωρητικές συνθέσεις LISA – TM	102

Κεφάλαιο 1^ο . Εισαγωγή. Το πρόβλημα της παιπάλης κατά την παραγωγή αδρανών υλικών

1.1. Παραγωγή αδρανών υλικών στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα υπολογίζεται ότι λειτουργούν 195 αδειοδοτημένα λατομεία αδρανών. Μέχρι και το 2008 η παραγωγή αδρανών έβαινε αυξανόμενη (για το 2008 η παραγωγή υπολογίζεται σε 100 εκατομμύρια τόνους) ενώ από το 2009, λόγω της ύφεσης και της καθίζησης της οικοδομικής δραστηριότητας, η παραγωγή μειώνεται συνεχώς. Τα στοιχεία που υπάρχουν για το 2011 δείχνουν ότι η παραγωγή έπεσε στα 35-40 εκατομμύρια τόνους αδρανών υλικών (www.latomet.gr, Υ.Π.Ε.Κ.Α., Διεύθυνση Πολιτικής Ορυκτών Πρώτων Υλών).

Στο χάρτη που παρατίθεται στο Σχήμα 1.1 βλέπουμε την κατανομή των λατομείων αδρανών στη χώρα για το έτος 2011. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι λατομεία αδρανών υπάρχουν σε όλες τις περιοχές της χώρας, συνεπώς καταλαβαίνουμε ότι αποτελούν σημαντικό κομμάτι της εθνικής οικονομίας και καθίσταται επιτακτική η σωστή και βιώσιμη εκμετάλλευσή τους.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής των αδρανών υλικών (εξόρυξη, μεταφορά και κυρίως θραύση και κοσκίνιση) δημιουργούνται λεπτόκοκκα σωματίδια, γνωστά και με τον όρο παιπάλη.

Με βάση τον προγενέστερο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το λεπτόκοκκο κλάσμα το οποίο διέρχεται από το αμερικάνικο κόσκινο No200 (το οποίο έχει άνοιγμα τετραγωνικής οπής 0,075 mm) και προσδιορίζεται σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ΣΚ-305. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12620, που υιοθετεί και ο νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος - 97 ως παιπάλη ορίζεται το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2 mm , το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο των 0,063 mm.

Η παραγωγή των λεπτόκοκκων αυτών υλικών για την Ελλάδα υπολογίζεται στο 10-15% της συνολικής παραγωγής των αδρανών (Γαλετάκης, 2004). Τα λεπτόκοκκα κλάσματα, αποτελούν πρόβλημα για τις εξορυκτικές εταιρίες καθώς

αποτελούν περιβαλλοντικό κίνδυνο κυρίως λόγω της μικρής τους κοκκομετρίας, η οποία τα καθιστά εισπνεύσιμα, είτε λόγω τυχόν επιβλαβών χημικών ουσιών που μπορεί να περιέχονται στη σύστασή τους.

Η κοκκομετρία της παιπάλης την εντάσσει στην κατηγορία των αερομεταφερόμενων σκονών. Η επικινδυνότητά της εξαρτάται από τη σύστασή της, τη συγκέντρωσή της στον αέρα, στα νερά ή στο έδαφος, και τέλος από το μέγεθος των κόκκων της. Σχετικά με την αέρια ρύπανση που προκαλεί η παιπάλη, ανάλογα με την κοκκομετρία της μπορεί να είναι εισπνεύσιμη (αιωρούμενα σωματίδια που μπορούν να εισπνευσθούν από τη μύτη και το στόμα) ή αναπνεύσιμη (σωματίδια μικρής διαμέτρου που μπορούν να εναποτεθούν στην περιοχή των πνευμονικών κυψελίδων). Η σύσταση της παιπάλης μπορεί επίσης να είναι επικίνδυνη καθώς η ύπαρξη ελεύθερου κρυσταλλικού διοξειδίου του πυριτίου, εντάσσει τη σκόνη στην κατηγορία των ινογόνων οι οποίες είναι τοξικές και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στην υγεία των ανθρώπων. (www.ergoprolipsis.gr)

Όσον αφορά την επίδραση της παιπάλης στην ποιότητα του νερού μπορούμε να πούμε ότι η ύπαρξή της επηρεάζει τη θολότητά του. Επίσης ανάλογα με τη χημική σύσταση μπορεί να αλλάξει το pH του νερού και σε περίπτωση ύπαρξης βαρέων μετάλλων έχουμε τοξικότητα. Πιο συγκεκριμένα, τυπικές φυσικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στα νερά απαιτούνται για την παρασκευή ενζύμων και την ανάπτυξη των οργανισμών. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις επιβάρυνση των νερών με βαρέα μέταλλα προκαλεί θάνατο και σε μικρότερες συγκεντρώσεις αλλαγές στη μορφολογία, φυσιολογία ή ακόμα και στη συμπεριφορά των οργανισμών. Τα βαρέα μέταλλα και οι ενώσεις τους σε αντίθεση με τις οργανικές ουσίες δεν αποικοδομούνται αλλά παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα και συσσωρεύονται. Για το λόγο αυτό η παρουσία τους στα υγρά απόβλητα και στις λάσπες δημιουργεί προβλήματα στο έδαφος και στους υγρούς αποδέκτες που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και παρακολούθηση. (Οικονομόπουλος, 2001)

Η ασφαλής αποθήκευση της δημιουργούμενης παιπάλης είναι οικονομικά ασύμφορη και ταυτόχρονα δεν είναι δυνατή η διάθεσή της σε μεγάλες ποσότητες σε άλλες βιομηχανίες.

Δραστηριότητα
Λατομείων Αδρανών Ορυκτών
(2011)



Σχήμα 1.1 Χάρτης λατομείων κατά το έτος 2011 για την Ελλάδα (www.latomet.gr)

1.2. Παιπάλη- Διερεύνηση χρήσεων

Σύμφωνα με τα παραπάνω εύκολα καταλαβαίνουμε ότι καθίσταται επιτακτική η διερεύνηση πιθανών χρήσεων της παιπάλης, για λόγους τόσο περιβαλλοντικής συμμόρφωσης των λατομείων όσο και για οικονομικούς, καθώς θα μπορούσε να προκύψει σημαντικό όφελος για τις λατομικές επιχειρήσεις από την εμπορική

αξιοποίηση ενός υλικού που σήμερα θεωρείται απόρριμμα. Επιπλέον η υποκατάσταση μέρους των παραγόμενων αδρανών υλικών, που συμμετέχουν σε μεγάλο ποσοστό σε υλικά κατασκευών από παιπάλη, θα μπορούσε να συμβάλλει στην ορθολογικότερη εκμετάλλευση των γεωλογικών σχηματισμών και να καταστήσει τα λατομεία αδρανών υλικών βιώσιμα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τα προβλήματα που προκύπτουν σε σχέση με την εμπορική αξιοποίηση της παιπάλης είναι ποικίλα. Ένας βασικός περιορισμός είναι το κόστος μεταφορά του προϊόντος, καθώς η χαμηλή του τιμή καθιστά ασύμφορη οικονομικά τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις. Άλλοι περιορισμοί είναι η χημική του σύσταση, το χρώμα ή /και η ακριβής κατανομή της κοκκομετρίας του, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς τα λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα βρίσκουν εφαρμογή, κυρίως ως πληρωτικά, σε πολλές βιομηχανίες. Η εφαρμογή στην οποία απορροφάται μεγάλο μέρος αυτών των υλικών είναι η αποκατάσταση χώρων λατομείων, για την αποκατάσταση του τοπίου καθώς και για την απορρύπανση των εδαφών σε συγκεκριμένες εκμεταλλεύσεις (Ασπρούδη, 2008)

Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν εφαρμογές στην οδοποιία όπου τα λατομικά λεπτομερή μπορούν να υποκαταστήσουν τα αδρανή υπόβασης για δρόμους, σιδηροδρομικές γραμμές κλπ. (Touahamia et al. , 2002). Επίσης η ασβεστολιθική παιπάλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία για την αποκατάσταση εδαφών και ως πληρωτικό και εδαφοβελτιωτικό υλικό σε λιπάσματα, και για περιβαλλοντικούς σκοπούς καθώς λειτουργεί σαν φίλτρο απορρύπανσης. Στη χαλυβουργία και στη μεταλλουργία ο ασβεστόλιθος έχει την ικανότητα να απομακρύνει ακαθαρσίες από το τήγμα (Βορίσση, 2012).

Στις βιομηχανίες στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή τα υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα περιλαμβάνονται και η βιομηχανία πλαστικών, η βιομηχανία χρωμάτων και η χαρτοβιομηχανία. Σ' αυτές τις περιπτώσεις ωστόσο υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την κοκκομετρία του υλικού και τη λευκότητά του.

Τέλος σημαντικό πεδίο αξιοποίησης της παιπάλης αποτελεί η παραγωγή ειδικών τύπων σκυροδέματος και δομικών στοιχείων τσιμέντου, που είναι και η

εφαρμογή που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία. Τα τελευταία χρόνια διενεργείται σημαντική έρευνα στον τομέα αυτό. Οι έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην επίδραση που έχει η κατανομή μεγέθους των κόκκων της παιπάλης στα μίγματα σκυροδέματος καθώς και στις διάφορες ιδιότητες που προσδίδει η χρήση παιπάλης και χημικών προσθέτων στο νωπό και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά οι σημαντικότερες έρευνες που έχουν γίνει πάνω στο αντικείμενο.

Οι Sprung και Siebel (1991) επισήμαναν ότι η κατανομή μεγέθους των κόκκων έχει μια ιδιαίτερη επιρροή στην απαίτηση νερού στο τσιμέντο, δηλαδή μια στενότερη κατανομή μεγέθους των κόκκων οδηγεί σε μια μείωση της απαίτησης σε νερό. Ο εύκολα λειοτριβημένος ασβεστόλιθος συνήθως έχει μια ευρεία κατανομή μεγέθους των κόκκων που επιτρέπει στους κόκκους του ασβεστόλιθου να καλύψουν τα κενά μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου και μειώνει έτσι την απαίτηση νερού στο σκυρόδεμα.

Ο Schmidt (1992) πρότεινε ότι η ευεργετική επίδραση της προσθήκης παιπάλης ασβεστολίθου στη ρεολογία του σκυροδέματος σχετίζεται με τη βελτίωση στην κοκκομετρική κατανομή. Οι λεπτότεροι κόκκοι εκτοπίζουν ένα ποσό νερού από τα κενά μεταξύ των πιο χονδρών κόκκων και το καθιστούν διαθέσιμο ως πρόσθετο εσωτερικό λιπαντικό. Κατά συνέπεια, το σκυρόδεμα έχει καλύτερη εργασιμότητα με μειωμένη περιεκτικότητα σε νερό, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της μηχανικής του αντοχής.

Ακόμη, οι Cochet και Sorrentino (1993) παρατήρησαν ότι μερικοί από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος στο οποίο έχει προστεθεί παιπάλη ασβεστολίθου αποτελούν η λεπτότητα άλεσης της παιπάλης (συνήθως εκφράζεται με την τιμή Blaine) και η σύστασή της.

Μελέτη που διεξήγαγαν οι Ahn et al. (2001) και Ahn and Fowler (2002) πάνω στις επιδράσεις υψηλών ποσοτήτων κλασμάτων λεπτομερών σε σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland, οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

- Η αντοχή σε θλίψη μειώνεται ελαφρά καθώς η συγκέντρωση των λεπτομερών αυξάνεται στο κλάσμα κάτω από 75 μm .
- Με την αύξηση των λεπτομερών με κλάσμα κάτω από 75 μm μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς και η συρρίκνωση ξήρανσης.

Οι Crouch et al. (2003) μελέτησαν την επίδραση των αδρανών λεπτομερών σε ελεγχόμενης χαμηλής αντοχής και καλής ροής πληρωτικά υλικά (Controlled Low – Strength Material – CLSM). Δημιουργήθηκε έτσι ένα υλικό με υψηλή ρευστότητα – γρήγορη εφαρμογή, με ελεγχόμενη χαμηλή αντοχή για εφαρμογές όπου ο παράγοντας του χρόνου είναι κρίσιμος. Ιδιότητες των λεπτομερών αδρανών, όπως η διαβάθμιση και η γωνιότητα των κόκκων, υποδεικνύουν τις αναλογίες που θα χρησιμοποιηθούν στο μίγμα ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ροή και το απαιτούμενο ποσοστό περιεχόμενου αέρα, κι έτσι, έμμεσα, να επηρεαστεί ο χρόνος εφαρμογής και η αναπτυσσόμενη θλιπτική αντοχή.

Μια άλλη μελέτη (Felekoglu and Baradan, 2003) ερευνήσε τη δυνατότητα υποκατάστασης μέρους του τσιμέντου στο σκυρόδεμα με ασβεστολιθική παιπάλη προκειμένου να βελτιωθούν ιδιότητες όπως η δυνατότητα αυτοεπιπέδωσης και αυτοσυμπύκνωσης. Αντικατάσταση του 10% του τσιμέντου με ασβεστολιθική παιπάλη έδειξε ότι οδηγεί στη βέλτιστη απόδοση. Μάλιστα σε μελέτη που διεξήχθη από τους Çelik and Marar (1996) χρησιμοποιήθηκε παιπάλη από πετρώματα (ασβεστόλιθος, <75 μm) για να αντικαταστήσουν άμμο σε σκυρόδεμα σε αναλογία έως 30% με όλα τα υπόλοιπα συστατικά και τις αναλογίες σταθερές. Αφού μετρήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος ενώ ήταν νωπό αλλά και μετά τη σκλήρυνση προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η κάθιση και ο περιεχόμενος αέρας του νωπού σκυροδέματος μειώθηκε καθώς το ποσοστό της παιπάλης αυξήθηκε.
- Βελτιώθηκε η αντοχή σε θλίψη και σε κάμψη του σκυροδέματος καθώς και η συρρίκνωση κατά την ξήρανση με αύξηση της παιπάλης μέχρι 10%. Αύξηση πάνω από 10% συσχετίστηκε με βαθμιαία ελάττωση της ιδιότητας αυτής.

- Η ελάχιστη τιμή απορρόφησης παρατηρήθηκε όταν το περιεχόμενο παιπάλης ανήλθε στο 15%, ενώ μεγαλύτερο ποσοστό αύξησε την απορρόφηση του σκυροδέματος.
- Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος μειώθηκε με την αύξηση του ποσοστού παιπάλης.

Ακόμη η παιπάλη αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά που συνθέτουν το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) και βοηθά στη βελτίωση των ρεολογικών του ιδιοτήτων. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποτελεί είδος σκυροδέματος προηγμένης τεχνολογίας. Έχει την ικανότητα όταν βρίσκεται σε νωπή κατάσταση να τοποθετείται σε καλούπια και να διέρχεται μέσα από τον οπλισμό μόνο με τη δύναμη της βαρύτητας χωρίς τη χρήση δονητών ή άλλης εξωτερικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ομοιογένειά του. Χαρακτηρίζεται λοιπόν από υψηλή ρευστότητα κατά τη νωπή του φάση. Έτσι, έχει τη δυνατότητα να φθάνει, μέσα από εμπόδια όπως πυκνός οπλισμός ή απομακρυσμένες περιοχές του ξυλοτύπου, ακόμη και σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 μέτρων από το σημείο έγχυσης του χωρίς τη βοήθεια αντλίας.

Παρόλα αυτά, το ακριβές ποσοστό των λεπτομερών εξαρτάται από την τελική χρήση και τις ιδιότητές τους (Fowler, 1997). Τα ποσοστά των λεπτομερών, που όπως αναφέρθηκε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα κυμαίνονται από 5% (Jackson and Brown, 1996) έως 15% (Fowler and Constantino, 1997, Ahn and Fowler, 1999). Βάσει μελέτης του Fowler (1995) προέκυψε ότι, μείωση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα κατά 25%, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα λεπτομερή, θα μπορούσε να λάβει χώρα διατηρώντας την αντοχή των 28 ημερών στα ίδια επίπεδα. (Ασπρούδη, 2008)

Την τελευταία πενταετία, πολλές είναι οι εργασίες που έχουν εκπονηθεί στο Πολυτεχνείο Κρήτης με θέμα την παρασκευή διαφόρων τύπων σκυροδέματος με τη χρήση λατομικής παιπάλης.

Ο Βαρβάρης (2010) διερεύνησε τη δυνατότητα παραγωγής αυτοσυμπυκνόμενου μικροτσιμέντου από λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα. Η έρευνά του έδειξε ότι μίγματα με χαμηλό ποσοστό τσιμέντου επί των αδρανών

(<11%) και υψηλή αναλογία νερού / τσιμέντο ($> 2,6$) πληρούν τις προϋποθέσεις για χρήση τους ως πληρωτικά υλικά, ενώ μίγματα με υψηλό ποσοστό τσιμέντου επί των αδρανών ($>24\%$) και χαμηλότερη αναλογία νερού / τσιμέντο ($< 1,2$) πληρούν τις προϋποθέσεις για χρήση τους ως υλικό υποστρωμάτων δαπέδων.

Ο Λεβεντάκης (2009) ασχολήθηκε με το σχεδιασμό ποιότητας ειδικών δομικών στοιχείων βασισμένων σε υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα. Μελέτησε δύο τεχνολογίες παρασκευής δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. Η πρώτη ήταν η τεχνολογία συμπίεσης και η δεύτερη η τεχνολογία εξώθησης. Από τη χρήση της τεχνολογίας συμπίεσης τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων έδειξαν ότι τα μίγματα που περιέχουν παιπάλη και λατομική άμμο ως αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή δομικών στοιχείων τύπου κυβόλιθου. Οι παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν καθοριστικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων δομικών στοιχείων με την τεχνολογία αυτή είναι η κοκκομετρική σύνθεση του μίγματος, η πίεση διαμόρφωσης και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η δεύτερη τεχνολογία που διερευνήθηκε αφορούσε την παραγωγή δομικών στοιχείων με εξώθηση μαζών, που προκύπτουν με ανάμιξη τσιμέντου, ασβεστολιθικής παιπάλης και κοινών χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος (υπερρυστοποιητής, πλαστικοποιητής). Χρησιμοποιώντας τις μέγιστες κατά τον κατασκευαστή δοσολογίες υπερρυστοποιητή και πλαστικοποιητή, έγινε δυνατή η παραγωγή αναμιγμάτων πλαστικής μηχανικής συμπεριφοράς, τα οποία παρουσίαζαν ικανοποιητικές ιδιότητες σκληρυμένου προϊόντος για την παραγωγή διακοσμητικών, μη φερόντων και φερόντων δομικών στοιχείων, ανάλογα με τη σύνθεση.

Τέλος, η Πιπερίδη (2012) κατέληξε στο ότι ο κύριος παράγοντας που επιδρά στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την υδατοαπορρόφηση των δοκιμίων σκυροδέματος είναι ο λόγος τσιμέντο / παιπάλη. Σημαντική επίσης επίδραση στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη φάνηκε να έχει ο λόγος υπερρυστοποιητή / (τσιμέντο + παιπάλη), καθώς μικρή αύξησή του προκαλεί μείωση της αντοχής. Αυτό το αποτέλεσμα δεν ήταν αναμενόμενο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αλλά φαίνεται ότι, ο συγκεκριμένος υπερρυστοποιητής, στην αναλογία που χρησιμοποιήθηκε, έχει διαφορετική επίδραση στο μικροσκυρόδεμα σε σχέση με το κανονικό σκυρόδεμα. Τέλος, συμπεραίνεται ότι σημαντική επίδραση στην υδατοαπορρόφηση είχε ο λόγος

πυριτικής παιπάλης / τσιμέντο, καθώς μικρή αύξηση αυτού του λόγου έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της τιμής της.

Κεφάλαιο 2^ο . Σκυρόδεμα, μικροσκυρόδεμα – πρώτες ύλες και μεθοδολογία καθορισμού συνθέσεων

2.1. Πρώτες ύλες παρασκευής σκυροδέματος

Τα βασικά στοιχεία για την παραγωγή σκυροδέματος είναι το τσιμέντο (συνδετικό υλικό), τα αδρανή και το νερό. Το τσιμέντο είναι υδραυλική λεπτόκοκκη κονία που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα βασικά συστατικά για παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland είναι ασβεστολιθικά και αργιλικά πετρώματα, τα οποία αφού αναμιχθούν σε προκαθορισμένες αναλογίες υποβάλλονται σε όπτηση στους 1450 °C περίπου. Από τη διαδικασία αυτή παραλαμβάνεται το κλίνκερ, το οποίο αλέθεται ούτως ώστε να αποκτήσει τη λεπτότητα του τσιμέντου.

Τα αδρανή υλικά αποτελούνται από λίθινους κόκκους, είτε φυσικούς, οπότε ονομάζονται φυσικά ή συλλεκτά αδρανή, είτε από κόκκους που προκύπτουν από τη θραύση όγκων πετρώματος ή τη θραύση φυσικών αδρανών, οπότε ονομάζονται θραυστά αδρανή. Οι κόκκοι μπορεί να έχουν περίπου το ίδιο ή διαφορετικό μέγεθος (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος – 97).

Τα αδρανή του σκυροδέματος, σκύρα, γαρμπίλι, χαλίκι και άμμος συνιστούν την πετρώδη δομή του σκυροδέματος, της οποίας τα κενά πρέπει να είναι πληρωμένα όσο το δυνατόν περισσότερο με τη συνδετική κονία. Τα αδρανή του σκυροδέματος αποτελούν κατά προσέγγιση το 80% του συνολικού βάρους του σκυροδέματος και καταλαμβάνουν το 70-75% του όγκου του. Χρήση κατάλληλου μεγέθους και κατάλληλης ποιότητας αδρανών βελτιώνει την ποιότητα του σκυροδέματος. Για παραγωγή υψηλής ποιότητας σκυροδέματος, τα αδρανή καθαρίζονται και κοκκομετρούνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με μηχανικές διεργασίες. Κατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος είναι υλικά τα οποία δεν επηρεάζουν τη σκλήρυνση του τσιμέντου, έχουν ισχυρή πρόσφυση με τον τσιμεντοπολτό και δεν αποτελούν κίνδυνο για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (Sika, 2007).

Το νερό αναμίξεως και συντηρήσεως πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Σχεδίου Προτύπου ΕΛΟΤ 345. Σύμφωνα με το Νέο Κανονισμό Τεχνολογίας

Σκυροδέματος – 97 θαλασσινό νερό δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται για παρασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, εκτός αν αυτό καθίσταται αναπόφευκτο από την έλλειψη κατάλληλου νερού και επιτρέπεται από τη φύση του έργου. Επίσης, σύμφωνα πάντα με τον ίδιο κανονισμό, απαγορεύεται η χρησιμοποίηση θαλασσινού νερού για την παρασκευή προεντεταμένου σκυροδέματος ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή φέροντος άοπλου σκυροδέματος, μόνο εφόσον η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του κατασκευαστικού τομέα οδήγησε στην παραγωγή πολλών διαφορετικών ειδών σκυροδέματος, μερικά από τα οποία είναι το απλό σκυρόδεμα, συμβατικό σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα μεγάλου ειδικού βάρους, το ελαφροσκυρόδεμα, το εκτοξευόμενο, το αντλήσιμο, το σκυρόδεμα προκατασκευών κ.α. Οι ορισμοί προσδιορίζουν τον τρόπο σκυροδέτησής τους, τον τρόπο επεξεργασίας και / ή χειρισμού τους κατά τη σκυροδέτηση.

2.2. Πρόσμικτα σκυροδέματος

Τα πρόσμικτα σκυροδέματος είναι ουσίες σε υγρή μορφή ή σκόνη, οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα σε μικρές ποσότητες κατά τη φάση ανάμιξης, συνήθως βάσει του περιεχόμενου τσιμέντου. Επηρεάζουν τις ιδιότητες του νωπού ή/και του σκληρυμένου σκυροδέματος με χημικό ή φυσικό τρόπο. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1, οι ορισμοί και οι χρήσεις των πρόσμικτων σκυροδέματος καθορίζονται από το πρότυπο EN 934-2 ως ακολούθως:

Μειωτής νερού: Καθιστά δυνατή τη μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα μίγμα χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του, ή αυξάνει την εργασιμότητά του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή επιτυγχάνει και τα δύο αποτελέσματα.

Υπερρευστοποιητής: Καθιστά δυνατή τη σημαντική μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα δεδομένο μίγμα σκυροδέματος, χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του ή αυξάνει σημαντικά την εργασιμότητά του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή επιτυγχάνει και τα δύο αποτελέσματα.

Ρυθμιστής ιξώδους: Μειώνει το νερό απόμιξης που προκύπτει λόγω εξίδρωσης στο νωπό σκυροδέμα.

Αερακτικό: Εισάγει συγκεκριμένη ποσότητα αέρα στο μίγμα με τη μορφή μικρών και ομοιόμορφα κατανεμημένων φυσαλίδων αέρα κατά τη φάση ανάμιξης 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).

2.3. Μικροσκυρόδεμα

Το μικροσκυρόδεμα μπορεί να οριστεί ως ένα υλικό υψηλών επιδόσεων με βάση το τσιμέντο, με λεπτομερή αδρανή των οποίων το εύρος μεγέθους ποικίλλει από 0,5 mm έως και κάτω από 1μm. Η ενσωμάτωση λεπτομερών αδρανών στη μάζα του σκυροδέματος βελτιώνει την πυκνότητα στοίβαξης των σωματιδίων και με τον τρόπο αυτό βελτιώνονται οι ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητές του. Το μικροσκυρόδεμα

είναι το τελικό υλικό το οποίο περιέχει όλα τα λεπτόκοκκα (τσιμέντο, ποζολάνες και λεπτόκοκκα αδρανή), νερό και πιθανά χημικά πρόσθετα. Ο βασικότερος παράγοντας για την παραγωγή ενός αποτελεσματικού μικροσκυροδέματος είναι η μεγιστοποίηση της πυκνότητας στοίβαξης των σωματιδίων των διάφορων λεπτόκοκκων αδρανών που το απαρτίζουν. Γενικά, από σχετικές έρευνες φαίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συνοχή του παραγόμενου υλικού είναι η μορφολογία των σωματιδίων, η στοίβαξή τους, τα κενά μεταξύ τους καθώς επίσης και η ρεολογία του νωπού μίγματος.

2.4 Μεθοδολογία καθορισμού της σύνθεσης μικροσκυροδέματος με βάση τα κοκκομετρικά μοντέλα

Το κριτήριο με το οποίο σχεδιάζεται μία σύνθεση, δηλαδή μεγιστοποίηση μηχανικών αντοχών ή αυξημένη ρεολογική ικανότητα του νωπού σκυροδέματος εξαρτάται από την πυκνότητα στοίβαξης των σωματιδίων που συμμετέχουν σε αυτήν. Η πυκνότητα στοίβαξης είναι ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα αδρανή εντός του σκυροδέματος και είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του υλικού (Μαρίνος κ.ά., 2008).

Για τη μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών ενός υλικού πρέπει να υπάρχει αυξημένη πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή όσο το δυνατόν πυκνότερη διαβάθμιση μεταξύ των κόκκων των αδρανών. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι το συνδετικό υλικό (κονίαμα) είναι κατά κανόνα περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών και όσο λιγότερα είναι τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών τόσο μεγαλώνει η μηχανική αντοχή και πυκνότητα του σκυροδέματος (Οικονόμου, 1993).

Αντίθετα, όταν το κριτήριο σχεδιασμού της σύνθεσης είναι η ελαχιστοποίηση του φαινομένου ιξώδους, απαιτείται αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης. Όμως η αύξηση των κενών μεταξύ των κόκκων των αδρανών συνεπάγεται και μείωση των μηχανικών αντοχών.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην τελική κυρίαρχη ιδιότητα του σκυροδέματος, παίζει και η μορφολογία των κόκκων που συμμετέχουν στη σύνθεση (Kwan και

Fung, 2009). Οι κόκκοι σφαιρικού σχήματος εξυπηρετούν στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος, ενώ αντίθετα οι κόκκοι γωνιώδους ή ακανόνιστου σχήματος αποτελούν εμπόδιο.

Στην περίπτωση που θέλουμε ένα μίγμα με αυξημένη μηχανική αντοχή, θέλουμε, όπως ήδη αναφέρθηκε, να έχουμε αυξημένη πυκνότητα στοίβαξης. Για την επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας στοίβαξης χρειαζόμαστε κόκκους σφαιρικού σχήματος καθώς αυτοί μπορούν πιο εύκολα να εισχωρήσουν, λόγω σχήματος, στις θέσεις των κενών που δημιουργούνται στη σύνθεση.

Στην περίπτωση πάλι που θέλουμε να έχουμε ένα μίγμα με αυξημένη ρεολογική ικανότητα, οι κόκκοι γωνιώδους σχήματος προκαλούν προβλήματα, καθώς λόγω του σχήματός τους δεν έχουν την ίδια ικανότητα κύλισης, όπως οι κόκκοι σφαιρικού σχήματος.

Τέλος, η πυκνότητα στοίβαξης επηρεάζεται και από την κοκκομετρική διαβάθμιση του χρησιμοποιούμενου υλικού. Όταν το υλικό που χρησιμοποιείται χαρακτηρίζεται από ευρεία κατανομή μεγεθών κόκκου, τότε διευκολύνεται η επίτευξη μεγάλων μηχανικών αντοχών. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως και στις προηγούμενες ιδιότητες, μειώνονται τα κενά μεταξύ των κόκκων.

Η επιρροή της πυκνότητας στοίβαξης των κόκκων στη ρεολογική ικανότητα και τις μηχανικές αντοχές που παρουσιάζει ένα υλικό ήταν γνωστή πριν το 1930. Θεωρήθηκε λοιπόν αναγκαία η εξεύρεση ειδικών κοκκομετρικών μοντέλων που θα βοηθούσαν στην καλύτερη κατανόηση του χαρακτηριστικού αυτού και συγχρόνως στην επίτευξη κατάλληλης πυκνότητας, ανάλογα με την επιθυμητή ιδιότητα του υλικού.

Το 1930, ο Andreassen κατασκεύασε ημι-εμπειρικά ένα από τα πρώτα κοκκομετρικά μοντέλα, που αναφερόταν στην πυκνότητα στοίβαξης κεραμικών υλικών, ενώ αργότερα προχώρησε και στην τροποποίησή του.

Το 1931, ακολούθησε ο Funas, που κατασκεύασε ένα θεωρητικό και πολύπλοκο κοκκομετρικό μοντέλο που αναφερόταν στη διαβάθμιση κόκκων σφαιρικού σχήματος. Το μοντέλο βασίζεται στο γεγονός ότι οι μικρότεροι κόκκοι

συμπληρώνουν τα κενά που υφίστανται ανάμεσα στους μεγαλύτερους κόκκους, χωρίς να επηρεάζουν τους δεύτερους.

Ο De Larrard, το 1999, προχώρησε στη δημιουργία ενός ακόμα νέου κοκκομετρικού μοντέλου. Το εν λόγω μοντέλο αναφέρεται σε πολλαπλών διαστάσεων κοκκώδη υλικά, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων αυτών. Επίσης εμπεριέχονται σε αυτό πειραματικά προσδιοριστέες παράμετροι (Stark and Mueller, 2003).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen, το οποίο θεωρείται το καταλληλότερο μοντέλο για σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες συμμετέχουν πολύ λεπτόκοκκα υλικά. Στο συγκεκριμένο μοντέλο θα αναφερθούμε αργότερα πιο εκτενώς, στο κεφάλαιο που περιγράφεται η διαδικασία θεωρητικού σχεδιασμού των συνθέσεων μέσω του λογισμικού LISA – TM.

Κεφάλαιο 3ο . Κοκκομετρικός χαρακτηρισμός παιπάλης – μέθοδος Blaine

3.1. Μέθοδοι καθορισμού κοκκομετρίας υλικών

Προκειμένου να μετρήσουμε το μέγεθος των σωματιδίων που απαρτίζουν ένα δείγμα υλικού, να βρούμε την κατανομή του μεγέθους τους και να κατασκευάσουμε την κοκκομετρική του καμπύλη υπάρχουν διάφορες μέθοδοι όπως:

- *Κοσκίνιση.* Η κοσκίνιση είναι η πλέον διαδεδομένη και εύχρηστη μέθοδος κοκκομετρικής ανάλυσης. Τα εργαστηριακά κόσκινα είναι συνήθως στρογγυλά διαμέτρου 20 cm. Ο πυθμένας τους αποτελείται από διάτρητη λαμαρίνα με τετράγωνα ή στρογγυλές οπές προκαθορισμένου μεγέθους. Η περισσότερο διαδεδομένη μορφή κοσκίνου είναι αυτή που ο πυθμένας αποτελείται από πλεγμένο σύρμα. Κατά την κοσκίνιση τα σωματίδια που τοποθετούνται πάνω στο πλέγμα του κοσκίνου, δονούνται με κάποιο μηχανισμό και όσα εξ αυτών είναι μικρότερα από τις οπές του πλέγματος περνούν από το κόσκινο, ενώ πάνω στο πλέγμα παραμένουν όσα είναι μεγαλύτερα από το μέγεθος των οπών. Έτσι το υπό μελέτη δείγμα χωρίζεται σε παραμένον και διερχόμενο. Σε περίπτωση που θέλουμε να χωρίσουμε το δείγμα σε περισσότερα κλάσματα χρησιμοποιούμε σειρά περισσότερων του ενός κοσκίνων. Κάτω από το κόσκινο με το μικρότερο μέγεθος βρόγχου τοποθετείται ένα δοχείο στο οποίο συλλέγεται το μικρότερο εξ όλων των κλασμάτων. Τυπική παρουσίαση δεδομένων κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα δίνεται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Τυπική παρουσίαση δεδομένων κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα
(Σταμπολιάδης, 2004)

1	2	3	4	5
Μέγεθος μm	Βάρος επί κοσκίνου g	Βάρος επί κοσκίνου %	Βάρος % Αθροιστικά Διερχόμενο	Βάρος % Αθροιστικά Παραμένον
250	0,02	0,1	99,9	0,1
180	1,32	2,9	97,0	3,0
125	4,23	9,5	87,5	12,5
90	9,44	21,2	66,3	33,7
63	13,10	29,4	36,9	63,1
45	11,56	26,0	10,9	89,1
- 45	4,87	10,9		
Σύνολο	44,54	100		

- *Μέτρηση μεγέθους με το μικροσκόπιο:* Το μικροσκόπιο είναι μία άμεση μέθοδος μέτρησης του μεγέθους των σωματιδίων. Η εικόνα που παίρνουμε από το μικροσκόπιο είναι μία δισδιάστατη εικόνα ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, οπότε βλέπουμε την προβαλλόμενη επιφάνεια του κάθε κόκκου. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση των υπό μελέτη κόκκων με κόκκους γνωστού μεγέθους και κανονικού σχήματος και θεωρείται ιδιαίτερα επίπονη καθώς απαιτείται η μέτρηση σε πολλούς κόκκους για τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία σε μία κατανομή. Τελευταία έχουν αναπτυχθεί αυτόματες μέθοδοι με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή προγραμμάτων επεξεργασίας της εικόνας, οπότε και γίνεται αυτόματα η μέτρηση του κάθε κόκκου, απλοποιώντας σημαντικά τη διαδικασία. Για κόκκους από 150 μm μέχρι 0,8 μm χρησιμοποιείται οπτικό μικροσκόπιο ενώ για μικρότερα μεγέθη καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.
- *Καθίζηση:* Για σωματίδια κάτω των 75 – 50 μm που είναι το όριο της συνήθους κοσκίνισης χρησιμοποιούμε τεχνικές καθίζησης σαν μέθοδο προσδιορισμού του μεγέθους των σωματιδίων. Η μέθοδος βασίζεται στο νόμο του Stokes που ορίζει τη δύναμη της αντίστασης στην κίνηση ενός σωματιδίου μέσα σε ένα υγρό. Οι κυριότερες τεχνικές της μεθόδου είναι η καθίζηση με απόχυση, η μέθοδος Andreasen και η καθίζηση με υπερχειλίση.

- *Φωτομετρικές μέθοδοι:* Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη διάχυση και διάθλαση του φωτός από τα σωματίδια πολφού που αιωρούνται σε ένα σωλήνα. Σε σωλήνα καθίζησης βρίσκεται πολφός ενώ σε ορισμένο ύψος από την επιφάνεια διέρχεται ακτίνα φωτός η οποία ανιχνεύεται στο απέναντι μέρος από φωτοκύτταρο. Το μέγεθος και η πυκνότητα των σωματιδίων στον πολφό επηρεάζουν τη διέλευση του φωτός από τη μάζα τους. Τα βαρύτερα και μεγαλύτερα σωματίδια καθιζάνουν με την πάροδο του χρόνου. Ηλεκτρονικά συστήματα καταγράφουν αυτόματα τα δεδομένα και υπολογίζουν την κατανομή.
- *Μέθοδος με ακτίνες Laser:* Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα μέθοδος η οποία βασίζεται στη διάθλαση ακτίνων laser επί τεμαχιδίων διαφορετικού μεγέθους δίνοντας την αντίστοιχη διάμετρο σωματιδίου. Το εύρος μεγέθους στο οποίο βρίσκει εφαρμογή η συγκεκριμένη μέθοδος είναι από 1000 μm έως 0,1 μm .
- *Μέθοδος Coulter (Ηλεκτρικής αντίστασης):* Σε αυτήν τη μέθοδο ένα πολύ αραιό αιώρημα του υπό μελέτη δείγματος σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη αναγκάζεται να περάσει από μία οπή, στην οποία διατηρείται ροή ρεύματος μέσω δύο ηλεκτροδίων. Κάθε σωματίδιο που διέρχεται από την οπή λειτουργεί ως αντίσταση (λόγω της μικρότερης αγωγιμότητάς του σε σχέση με τον ηλεκτρολύτη) προκαλώντας έτσι έναν παλμό στη ροή του ρεύματος, ο οποίος είναι ανάλογος του όγκου του σωματιδίου. Με καταγραφή των παλμών του ρεύματος έχουμε μία αυτόματη καταγραφή του αριθμού και του μεγέθους των σωματιδίων του δείγματος.
- *Αναλυτής R.S.M. συνεχούς ροής:* Ο αναλυτής R.S.M. (Reynolds Stress Turbulence Model) παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς μέτρησης της κοκκομετρίας σε λεπτόκοκκα υλικά που μεταφέρονται υπό μορφή πολφού. Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε ορθογώνιο σωλήνα ο οποίος σχηματίζει μία ολόκληρη στροφή έλικας. Το δείγμα διοχετεύεται στο σωλήνα και όπως κινούνται τα σωματίδια, τα μεγαλύτερα εξ αυτών κινούνται γρηγορότερα προς την περιφέρεια από τα λεπτότερα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μία ταξινόμηση του υλικού στο ευθύγραμμο τμήμα του σωλήνα αμέσως μετά την έλικα. Ένα οπτικό σύστημα με ακτίνες β μετρά την πυκνότητα

του πολφού κάθετα στη ροή, η οποία είναι συνάρτηση της ταξινόμησης των σωματιδίων.

- Τέλος υπάρχουν και μέθοδοι οι οποίες μετράνε την ειδική επιφάνεια του υπό μελέτη δείγματος, όπως η μέθοδος προσρόφησης αερίων και η διαπερατότητα. Βρίσκουν εφαρμογή σε τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες του $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Η μέθοδος που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι η δοκιμή αεροπερατότητας (μέθοδος Blaine).

3.2. Μέθοδος Blaine

Η μέθοδος Blaine χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ειδικής επιφάνειας λεπτόκοκκων υλικών. Είναι δηλαδή ένας εύκολος τρόπος καθορισμού της «λεπτότητας» του υπό μελέτη υλικού και χρησιμοποιείται ευρέως για το χαρακτηρισμό της λεπτότητας άλεσης των τσιμέντων.

Το μετρούμενο μέγεθος στη συγκεκριμένη δοκιμή είναι ο χρόνος τον οποίο χρειάζεται συγκεκριμένη ποσότητα αέρα για να διέλθει μέσα από στρώμα λεπτόκοκκου υλικού συγκεκριμένου όγκου που έχει πορώδες 0,5. Η μέθοδος είναι συγκριτική και όχι απόλυτη, γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η βαθμονόμηση της συσκευής με δείγμα γνωστής ειδικής επιφάνειας.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει το κελί διαπερατότητας, τον διάτρητο δίσκο, το έμβολο, ένα μανόμετρο, μανομετρικό υγρό και ένα χρονόμετρο (Εικόνα 3.1). Η θερμοκρασία στο χώρο διεξαγωγής της μέτρησης θα πρέπει να είναι σταθερή στους $20 \pm 2^\circ\text{C}$ και η σχετική υγρασία δεν πρέπει να ξεπερνά το 65%.

Το στρώμα του δείγματος αποτελείται από ένα σύνολο σωματιδίων με συγκεκριμένο όγκο αέρα ανάμεσα στα σωματίδια. Αυτός ο όγκος αέρα προσδιορίζει το κλάσμα του συνολικού όγκου του στρώματος και αποτελεί το πορώδες, e . Κατά συνέπεια το κλάσμα του όγκου που καταλαμβάνεται από τα σωματίδια είναι $(1-e)$. Αν V ο συνολικός όγκος του στρώματος, ο όγκος των κόκκων του δείγματος είναι $V(1-e) \text{ cm}^3$ και η μάζα του δείγματος $m = \rho V(1-e) \text{ g}$, όπου ρ η πυκνότητα των σωματιδίων.

Η χρησιμοποιούμενη σχέση για τον καθορισμό της ειδικής επιφάνειας του δείγματος δίνεται από τη σχέση 3.1 (Πιπερίδη,2012)

$$S = \frac{\rho_0}{\rho} \times \frac{(1 - e_0)}{(1 - e)} \times \frac{\sqrt{e^3}}{\sqrt{e_0^3}} \times \frac{\sqrt{0.1\eta_0}}{\sqrt{0.1\eta}} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t_0}} \times S_0 \text{ (cm}^2\text{/g)} \quad (3.1)$$

Όπου S_0 , η ειδική επιφάνεια του δείγματος αναφοράς

e , το πορώδες του στρώματος του δείγματος που υποβάλλεται στη δοκιμή

e_0 το πορώδες του στρώματος του δείγματος αναφοράς

t , ο χρόνος που καταγράφεται για το δείγμα της δοκιμής

t_0 , ο μέσος όρος των τριών χρόνων που μετρούνται για το δείγμα αναφοράς

ρ , η πυκνότητα του δείγματος της δοκιμής

ρ_0 , η πυκνότητα του δείγματος αναφοράς

η , το ιξώδες του αέρα στη θερμοκρασία της δοκιμής

η_0 , το ιξώδες του αέρα από το μέσο όρο των τριών θερμοκρασιών στις οποίες έγινε η μέτρηση του δείγματος αναφοράς.

Το πορώδες του στρώματος λαμβάνεται ίσο με 0,5 και ανάλογα υπολογίζεται και ζυγίζεται η ποσότητα του δείγματος του οποίου η ειδική επιφάνεια είναι υπό διερεύνηση.

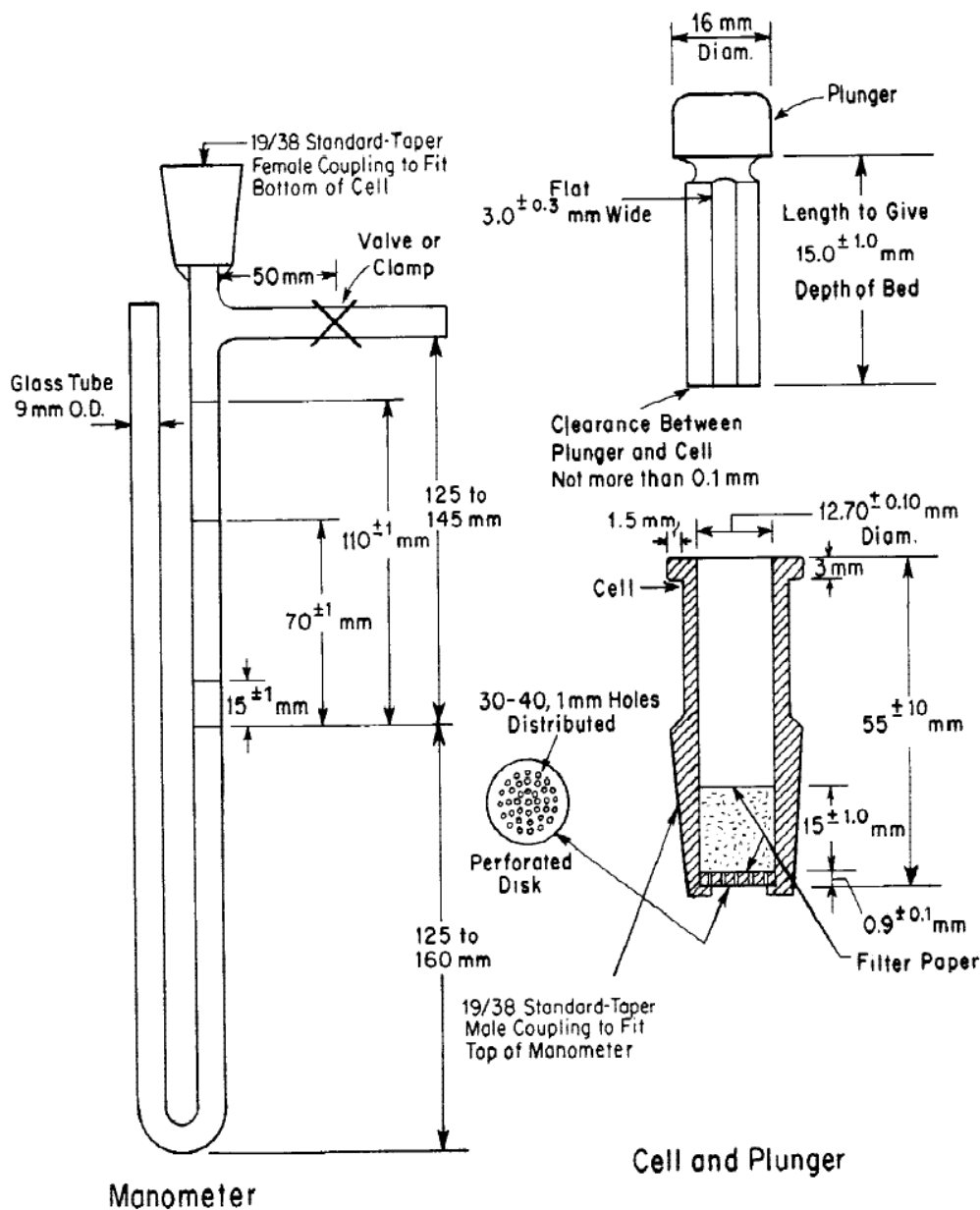
3.3 Διαδικασία μέτρησης ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο Blaine και συσχέτιση με την κοκκομετρική ανάλυση με laser

Το τμήμα αυτό της παρούσας εργασίας αφορά τις μετρήσεις ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο Blaine δειγμάτων παιπάλης μαρμάρου γνωστής κοκκομετρίας. Η κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων αυτών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ακτίνων laser. Οι αναλυτές κοκκομετρίας με τη μέθοδο ακτίνων laser είναι τα πλέον κατάλληλα και ακριβή όργανα είναι όμως υψηλού κόστους και δεν είναι διαθέσιμα στα περισσότερα εργαστήρια των μονάδων παραγωγής λατομικών υλικών και σκυροδέματος. Στόχος λοιπόν της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι η κατασκευή ενός νομογράμματος το οποίο θα μπορούσε να δίνει μία πρώτη προσέγγιση σχετικά με την κοκκομετρία του εξεταζόμενου υλικού με βάση την τιμή Blaine, που υπολογίζεται εύκολα και γρήγορα και με μια συσκευή χαμηλού κόστους.

Τα υλικά τα οποία εξετάστηκαν ήταν δείγματα παιπάλης μαρμάρου διαφόρων κοκκομετριών που προέρχονται από μονάδα παραγωγής ετοιμών κονιαμάτων. Εξετάστηκε παιπάλη μαρμάρου η οποία προέρχεται από τη διαδικασία ξήρανσης των υλικών (παιπάλη ξήρανσης), παιπάλη μαρμάρου που συλλέγεται από τα σακόφιλτρα αποκονίωσης στα σιλό αποθήκευσης του υλικού (παιπάλη αποκονίωσης), παιπάλη μαρμάρου μεγέθους +10 μm και μίγματα παιπάλης αποκονίωσης και ξήρανσης σε ποσοστά 25% - 75%, 50% - 50% , 75% - 25%, αντίστοιχα.

Πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής ήταν απαραίτητο να υπολογιστεί η μάζα του υλικού που θα αποτελούσε το δείγμα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη θεωρία, η μάζα του δείγματος υπολογίζεται με βάση το επιθυμητό πορώδες, $e = 0.5$. Γνωρίζουμε επίσης από τον κατασκευαστή της συσκευής Blaine ότι ο όγκος του κελιού διαπερατότητας είναι $V = 1.887 \text{ cm}^3$ και θεωρούμε την πυκνότητα των λατομικών υλικών $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα και τη σχέση $m = e \cdot \rho \cdot V$ καταλήγουμε ότι πρέπει να ζυγιστεί ποσότητα παιπάλης 2.55 g.

Μετά τη ζύγιση του υλικού, ακολουθεί η κυρίως διαδικασία της μέτρησης. Στη βάση του κελιού διαπερατότητας τοποθετήθηκε ο διάτρητος δίσκος, πάνω στον οποίο τοποθετήθηκε χάρτινο φίλτρο. Μέσα στο κελί προστέθηκε προσεκτικά η ήδη ζυγισμένη ποσότητα του υλικού, προκειμένου να μη χαθεί υλικό. Πάνω από το υλικό τοποθετήθηκε άλλο ένα χάρτινο φίλτρο. Το κελί κλείστηκε με έμβολο με ελαφρά πίεση, και μετά περιστρέφοντας αργά το έμβολο στράφηκε κατά 90° και πιέστηκε ελαφρά και πάλι. Το έμβολο στη συνέχεια απομακρύνεται και το δείγμα είναι έτοιμο για μέτρηση.



Σχήμα 3.1 Εξαρτήματα τυπικής συσκευής μέτρησης της τιμής Blaine κατά ASTM C204-11.

Το κελί μετά την διαδικασία που περιγράφηκε τοποθετείται στο ένα άκρο του μανομετρικού σωλήνα (Εικόνα 3.1). Το κελί κλείνεται ξανά με προσοχή με το έμβολο. Στα σημεία επαφής του κελιού με τον μανομετρικό σωλήνα και του κελιού με το έμβολο απλώνεται μικρή ποσότητα υδραυλικού λαδιού προκειμένου να διασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη στεγανότητα του συστήματος. Ανοίγεται η βαλβίδα και γίνεται ελαφριά και προσεκτική αναρρόφηση του μανομετρικού υγρού

μέχρι την πάνω χαραγμένη γραμμή. Κλείνεται η βαλβίδα και παρατηρούμε αν το υγρό παραμένει στο ίδιο επίπεδο. Αν όχι, θα πρέπει να ξαναγίνει η σύνδεση κελιού – μανομέτρου.

Εφόσον έχει επιτευχθεί η επιθυμητή σύνδεση, αφαιρείται το έμβολο από το κελί διαπερατότητας. Το μανομετρικό υγρό αρχίζει να ρέει. Το μετρούμενο μέγεθος είναι ο χρόνος ο οποίος μετράται από τη στιγμή που το επίπεδο του υγρού θα φτάσει στη δεύτερη γραμμή μέχρι τη στιγμή που θα φτάσει στην τρίτη γραμμή. Η καταγραφή του χρόνου θα πρέπει να έχει ακρίβεια 0,2 sec και η θερμοκρασία ακρίβεια 1°C. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε 5 φορές για κάθε δείγμα και ο χρόνος που χρησιμοποιήθηκε εν συνεχεία για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας είναι ο μέσος όρος των 5 μετρήσεων.

3.4. Αποτελέσματα Blaine

Όπως αναφέρθηκε ήδη στο υποκεφάλαιο 3.1, με χρήση γνωστών σταθερών και μεγεθών της συσκευής Blaine υπολογίστηκε η ποσότητα δείγματος που χρειάστηκε προκειμένου να γίνει η δοκιμή.

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Μετρήσεις χρόνου με τη διάταξη Blaine.

Δείγμα	t ₁ (sec)	t ₂ (sec)	t ₃ (sec)	t ₄ (sec)	t ₅ (sec)	M.O. t (sec)	Τυπική Απόκλιση	√t
Παιπάλη ξηράνσης	18.77	19.54	19.54	18.91	19.14	19.18	0.32	4.38
>10 μm	2.8	3.0	3.1	3.1	3.1	3.02	0.10	1.74
Παιπάλη αποκονίωσης	202.19	204.71	203.37	205.78	203.55	203.92	1.22	14.28
Παιπάλη αποκονίωσης (75%) – ξηράνσης (25%)	117.55	117.01	119.79	119.53	118.48	118.47	1.08	10.88
Παιπάλη αποκονίωσης (50%) – ξηράνσης (50%)	52.03	53.22	50.09	49.45	50.52	51.06	1.37	7.15
Παιπάλη αποκονίωσης (25%) – ξηράνσης (75)	42.69	41.57	44.01	44.82	43.85	43.39	1.14	6.59

Παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για όλα τα δείγματα είναι μικρή οπότε οι μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες και να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω υπολογισμούς.

Το μετρούμενο μέγεθος είναι ο χρόνος οπότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 3.1 στην οποία έχουμε ήδη αναφερθεί παραπάνω.

Οι τιμές Blaine του προτύπου που χρησιμοποιήθηκαν είναι $S_0 = 3774 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\rho_0 = 3,15 \text{ g/cm}^3$ και $\sqrt{t_0} = 9,92$. Το πορώδες των στρωμάτων που δημιουργήθηκαν κατά τις δοκιμές στο εργαστήριο ήταν σταθερό στην τιμή 0,5, όπως και στο δείγμα αναφοράς οπότε οι όροι $(1-e_0) / (1 - e)$ και $(\sqrt{e}^3) / (\sqrt{e_0}^3)$ λαμβάνονται ίσοι με τη μονάδα και απαλείφονται από την εξίσωση. Επίσης, η πυκνότητα ρ θεωρήθηκε σταθερή και ίση με $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ για όλα τα υλικά και όλες οι μετρήσεις έχουν αναχθεί και διορθωθεί ώστε να αντιστοιχούν σε θερμοκρασία 21°C. Με αυτές τις συμβάσεις οι τιμές Blaine που μετρήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

. Πίνακας 3.3. Μετρήσεις ειδικής επιφάνειας κατά Blaine

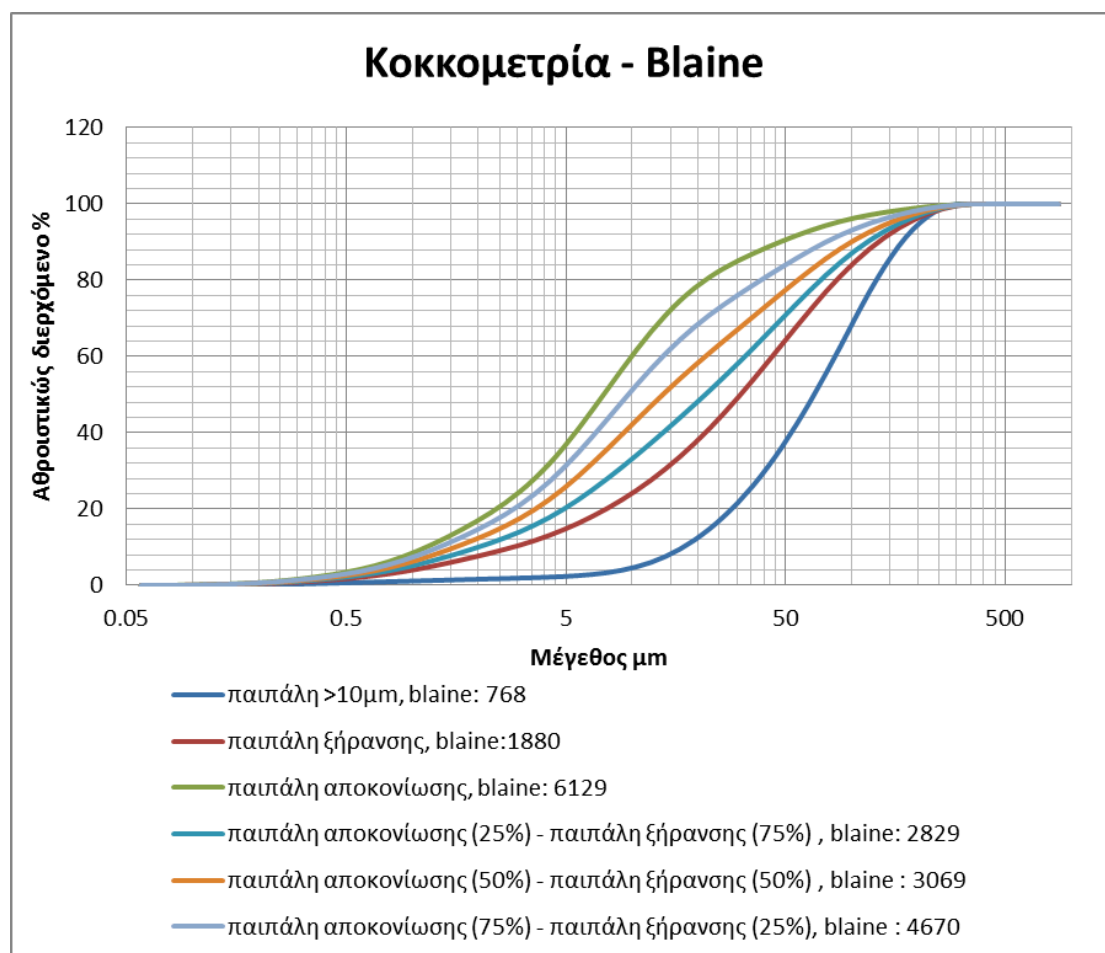
Δείγμα	Χρόνος t	\sqrt{t}	Ειδική επιφάνεια S
Παιπάλη ξήρανσης	19.18	4.45	1880
Παιπάλη μαρμάρου >10 μm	3.02	1.74	768
Παιπάλη αποκονίωσης	203.92	14.28	6129
Παιπάλη αποκονίωσης (25%) - ξήρανσης (75%)	43.39	6.59	2829
Παιπάλη αποκονίωσης (50%) – ξήρανσης (50%)	51.06	7.15	3069
Παιπάλη αποκονίωσης (75%) – ξήρανσης (25%)	118.47	10.88	4670

Το ζητούμενο μετά από τις μετρήσεις ήταν να φτιαχτεί ένα διάγραμμα με τις ήδη γνωστές από προηγούμενες εργασίες κοκκομετρικές εργασίες των υλικών που μελετήθηκαν σε συνδυασμό με τις τιμές ειδικής επιφάνειας που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

3.5. Νομόγραμμα Blaine – Διερεύνηση δυνατότητας εξαγωγής προσεγγιστικής κοκκομετρικής καμπύλης άγνωστου υλικού

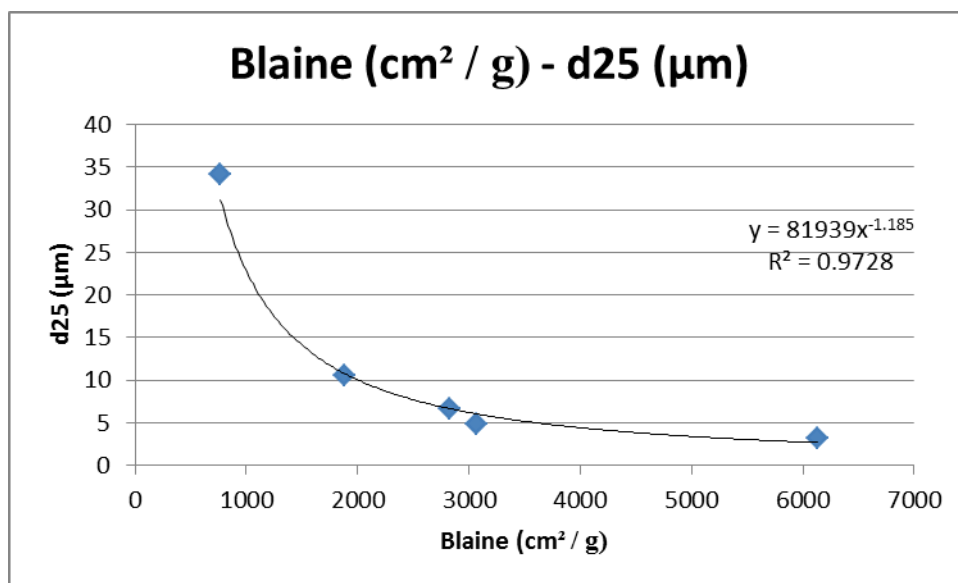
Όπως αναφέρθηκε ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο σκοπός του υπολογισμού της ειδικής επιφάνειας των λεπτόκοκκων υλικών ήταν η δημιουργία ενός νομογράμματος που θα συνδέει την κοκκομετρική καμπύλη με την ειδική επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν 3 μίγματα από παιπάλη αποκονίωσης και

παιπάλη ξήρανσης και μετρήθηκαν οι τιμές Blaine, ενώ οι κοκκομετρικές καμπύλες εξήχθησαν υπολογιστικά με βάση το ποσοστό κάθε παιπάλης στο μίγμα. Οι μετρήσεις Blaine και οι κοκκομετρικές καμπύλες που προέκυψαν δίνονται στο διάγραμμα 3.1.

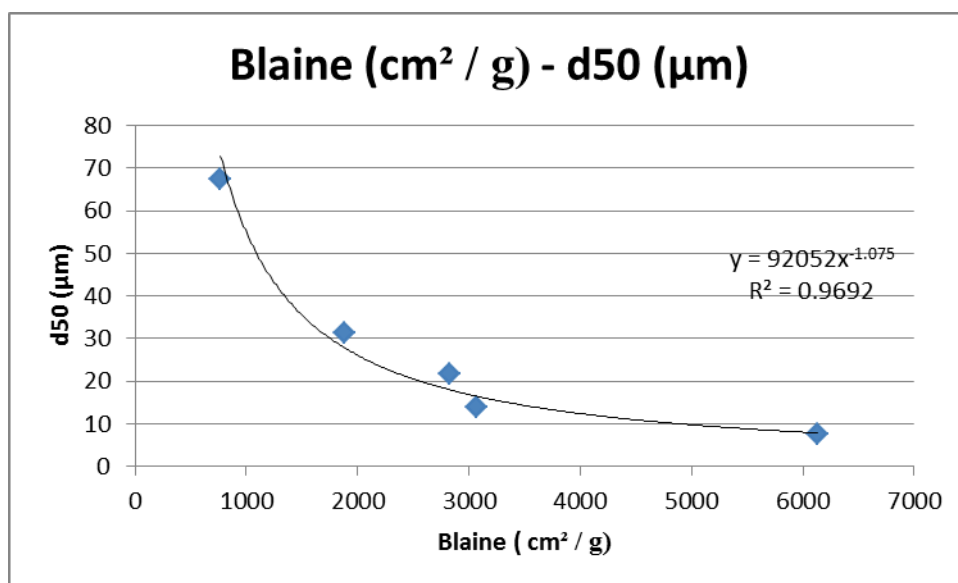


Σχήμα 3.2. Νομόγραμμα κοκκομετρικής καμπύλης – ειδικής επιφάνειας.

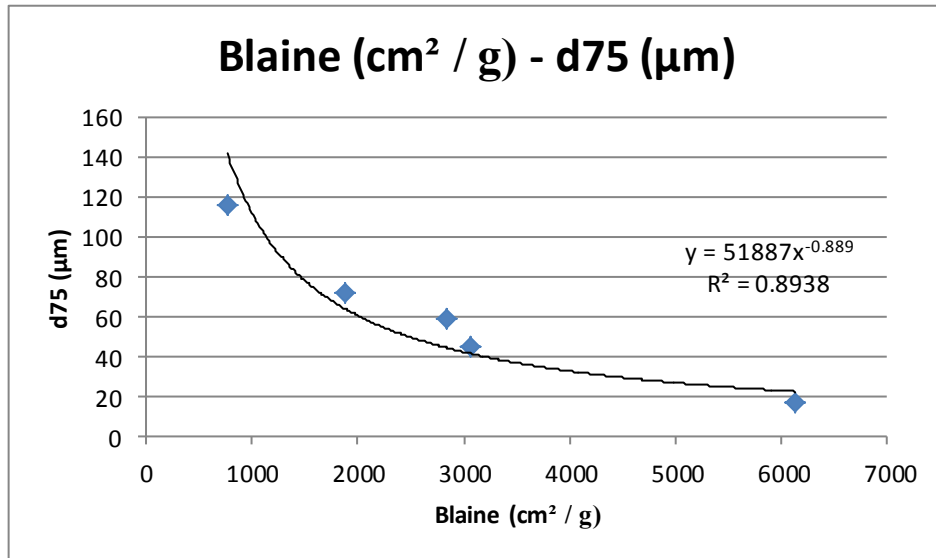
Για την επιβεβαίωση της συσχέτισης κοκκομετρικής διαβάθμισης – Blaine, υπολογίστηκαν με μεθόδους παλινδρόμησης οι σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος κόκκου d_x που αντιστοιχεί σε 20 συγκεκριμένα ποσοστά αθροιστικώς διερχόμενου υλικού x (π.χ. d_5 , d_{10} , κ.ο.κ.) με την τιμή Blaine. Οι σχετικές εξισώσεις που προέκυψαν δίνονται στον πίνακα 3.4 ενώ στα διαγράμματα 3.2 έως 3.4 δίνονται οι συσχετίσεις της τιμής Blaine με τις διαμέτρους d_{25} , d_{50} , d_{75} . Τα διαγράμματα συσχέτισης για τις υπόλοιπες τιμές d_x – Blaine δίνονται στο Παράρτημα Ι.



Σχήμα 3.3. Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 25% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



Σχήμα 3.4. Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 50% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



Σχήμα 3.5. Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 75% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.

Στα διαγράμματα επιλέχθηκε η γραμμή τάσης που χρησιμοποιεί μοντέλο δύναμης, καθώς αυτός είναι ο τύπος εξίσωσης που χρησιμοποιείται και στο μοντέλο Andreassen. Με βάση το λογισμικό Excel υπολογίστηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών όπως επίσης και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 , ο οποίος αποτελεί μέτρο για το κατά πόσο η ανεξάρτητη μεταβλητή x μας δίνει μια ακριβή πρόβλεψη για την εξαρτημένη μεταβλητή y . Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, έχει χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή x , η ειδική επιφάνεια και ως εξαρτημένη μεταβλητή y , το μέγεθος κόκκου που αντιστοιχεί στο κάθε ποσοστό. Η επιλογή της ανεξάρτητης και της εξαρτημένης μεταβλητής έγινε με βάση το σκοπό της διερεύνησης που έγινε, ο οποίος ήταν να εξακριβωθεί το κατά πόσο μπορούμε, μετρώντας με έναν απλό τρόπο την ειδική επιφάνεια του υλικού, να εξαγάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την κοκκομετρία του.

Πίνακας 3.4. Εξισώσεις συσχέτισης ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου, συντελεστών R^2 .

d_x	$y = ax^{-b}$	R^2
1	$y = 18.288x^{-0.518}$	0.7487
5	$y = 60864x^{-1.367}$	0.8505
10	$y = 88513x^{-1.332}$	0.9140
15	$y = 89851x^{-1.276}$	0.9512
20	$y = 83613x^{-1.223}$	0.9661
25	$y = 81939x^{-1.185}$	0.9728
30	$y = 84037x^{-1.159}$	0.9764
35	$y = 87771x^{-1.138}$	0.9777
40	$y = 91172x^{-1.119}$	0.9771
45	$y = 92684x^{-1.098}$	0.9745
50	$y = 92052x^{-1.075}$	0.9698
55	$y = 88665x^{-1.048}$	0.9616
60	$y = 83262x^{-1.018}$	0.9511
65	$y = 78548x^{-1}$	0.9713
70	$y = 63559x^{-0.939}$	0.9169
75	$y = 51887x^{-0.889}$	0.8938
80	$y = 37164x^{-0.821}$	0.8719
85	$y = 21484x^{-0.721}$	0.8529
90	$y = 9674x^{-0.582}$	0.8315
95	$y = 3481.1x^{-0.404}$	0.7794

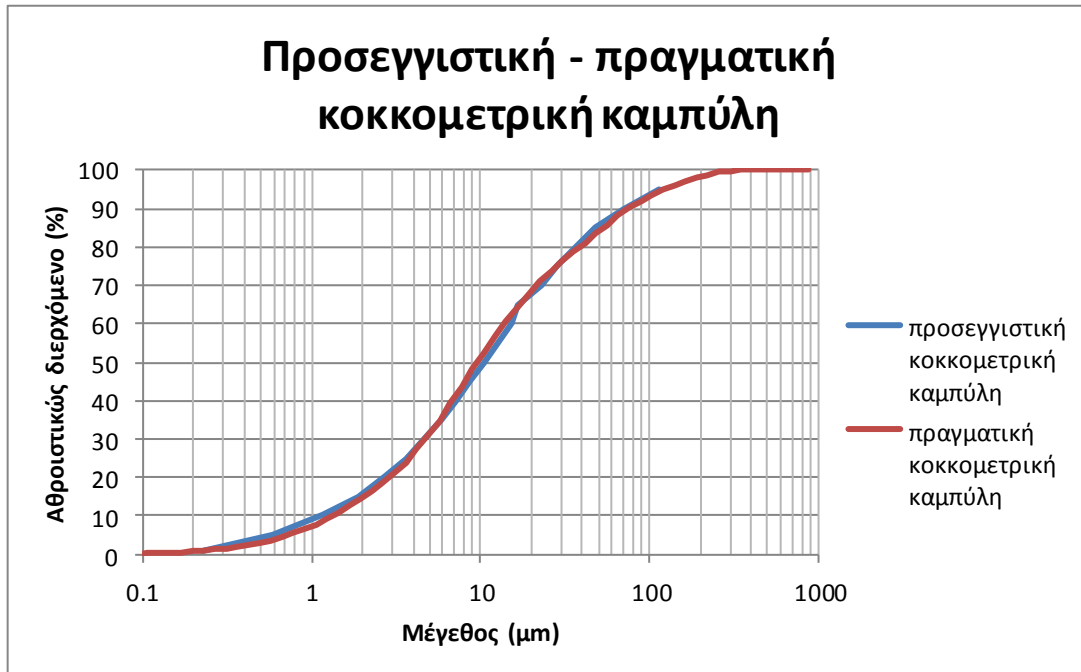
Στον πίνακα 3.4 παρατηρείται ότι η συσχέτιση μεταξύ της κοκκομετρίας και της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine είναι ισχυρή αφού στην πλειοψηφία τους οι τιμές του συντελεστή R^2 είναι μεγαλύτερες του 0.80 και αρκετοί από αυτούς προσεγγίζουν τη μονάδα. Έτσι ο πίνακας 3.4 δίνει ένα σύνολο εξισώσεων οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η κοκκομετρία του υλικού. Μετρώντας την ειδική επιφάνεια κατά Blaine ενός λεπτόκοκκου υλικού, και βάζοντας την τιμή αυτή σε κάθε μία από τις παραπάνω εξισώσεις, στη θέση του x , υπολογίζουμε τις διαμέτρους των κόκκων d_i που αντιστοιχούν στα προκαθορισμένα ποσοστιαία σημεία i του αθροιστικώς διερχόμενου υλικού. Έτσι μπορούμε εύκολα να κατασκευάσουμε μία προσεγγιστική κοκκομετρική καμπύλη για το εξεταζόμενο υλικό.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το μίγμα παιπάλης ξήρασης (25%) – παιπάλης αποκονίωσης (75%) του οποίου γνωρίζουμε την κοκκομετρία και την ειδική επιφάνεια, το οποίο όμως δεν έχει συμπεριληφθεί στη συσχέτιση. Λαμβάνοντας ως x την ειδική επιφάνεια, υπολογίστηκαν τα μεγέθη κόκκου και φτιάχτηκε η προσεγγιστική κοκκομετρική καμπύλη η οποία, εν συνεχεία, συγκρίθηκε με την πραγματική που έχει ήδη μετρηθεί. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της προσεγγιστικής κοκκομετρικής καμπύλης.

Αρχικά έγινε εισαγωγή των εξισώσεων του πίνακα 3.4, καθώς και της τιμής της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine, σε ένα φύλλο του MS – Excel. Έτσι υπολογίστηκε το μέγεθος κόκκου που αντιστοιχεί σε κάθε d_i . Έν συνεχεία, για λόγους σύγκρισης, έγινε αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με την πραγματική κοκκομετρία και υπολογίστηκε το σχετικό και το απόλυτο σφάλμα της μέτρησης (Πίνακας 3.5) και τέλος οι δύο κοκκομετρικές καμπύλες (προσεγγιστική και πραγματική) μπήκαν σε ένα διάγραμμα (Σχήμα 3.6).

Πίνακας 3.5. Σύγκριση πραγματικού μεγέθους κόκκου – προσεγγιστικού.

Blaine	Αθροιστικώς διερχόμενο %	Μέγεθος κόκκου μm	Μέγεθος κόκκου από εξίσωση μm	Απόλυτο σφάλμα	Σχετικό σφάλμα %
4670	1	0.2449	0.2299	-0.015	6.12
	5	0.7306	0.5867	-0.1439	19.70
	10	1.3189	1.1468	-0.1721	13.05
	15	2.0412	1.8684	-0.1728	8.47
	20	2.8945	2.7208	-0.1737	6.00
	25	3.7972	3.6758	-0.1214	3.20
	30	4.7332	4.6960	-0.0372	0.70
	35	5.7306	5.8569	0.1263	2.20
	40	6.8463	7.1433	0.2970	4.34
	45	8.1233	8.6715	0.5482	6.75
	50	9.6341	10.4597	0.8256	8.57
	55	11.4845	12.6563	1.1718	10.20
	60	13.8309	15.3138	1.4829	10.72
	65	17.0050	16.8197	0.1853	1.09
	70	21.5901	22.7871	1.1970	5.54
	75	28.4751	28.3815	-0.0936	0.33
	80	38.6538	36.1088	-2.545	6.58
	85	53.4055	48.5890	-4.8165	9.02
	90	76.1542	70.8050	-5.3492	7.02
	95	122.0933	114.6337	-7.4596	6.11



Σχήμα 3.6. Σύγκριση πραγματικής – προσεγγιστικής κοκκομετρικής καμπύλης.

Από τον πίνακα 3.5 παρατηρείται ότι οι εξισώσεις δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα. Με εξαίρεση το d_5 και το d_{10} , το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής κοκκομετρίας και της υπολογιζόμενης από τις εξισώσεις δεν ξεπερνάει το 10%. Από το σχήμα 3.6 επίσης βλέπουμε ότι η προσεγγιστική καμπύλη ακολουθεί αρκετά πιστά την πραγματική.

Γενικά, η συσχέτιση είχε θετικά αποτελέσματα, και, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τα σφάλματα, οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία αρχική προσέγγιση της κοκκομετρίας κάποιου λεπτόκοκκου λατομικού υλικού.

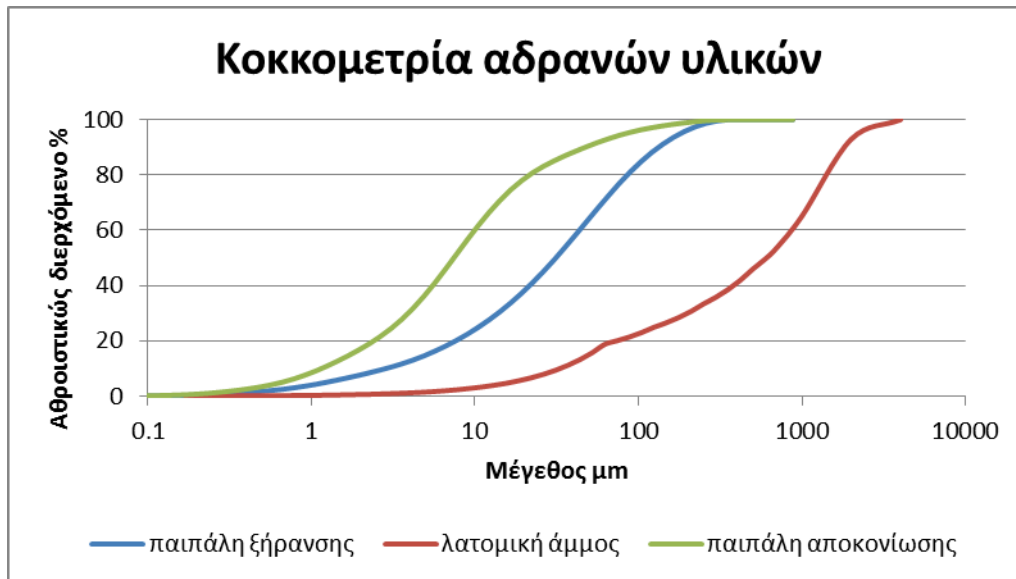
Κεφάλαιο 4^ο . Υπολογισμός των συνθέσεων και παρασκευή και έλεγχος δοκιμίων μικροσκυροδέματος

4.1 Πρώτες ύλες και πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των μιγμάτων σκυροδέματος είναι λατομική άμμος, παιπάλη ξήρανσης, παιπάλη αποκονίωσης, μικροτσιμέντο, πυριτική παιπάλη, υπερρευστοποιητής και επιβραδυντής. Η περιγραφή, η σύσταση και η κοκκομετρική καμπύλη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται παρακάτω.

- Λατομική άμμος, παιπάλη ξήρανσης, παιπάλη αποκονίωσης

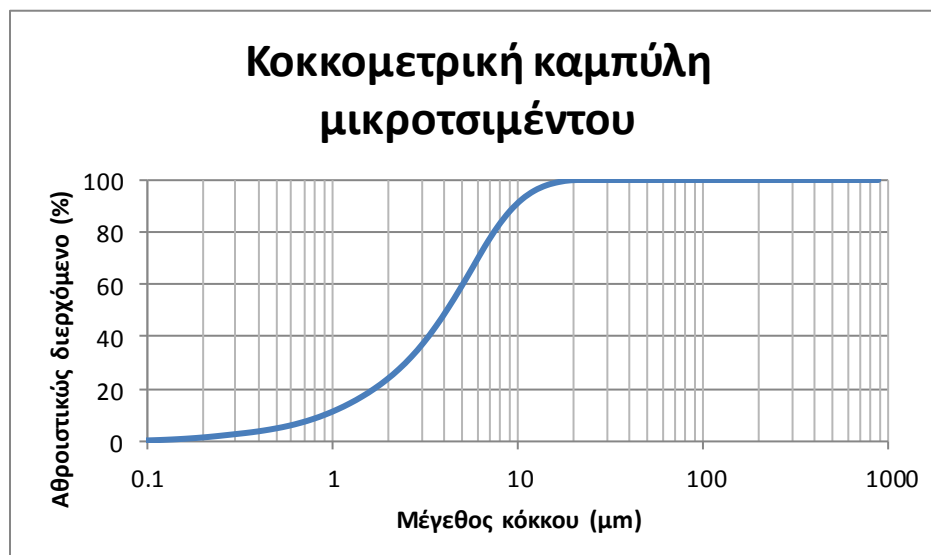
Η λατομική άμμος, η παιπάλη ξήρανσης και η παιπάλη αποκονίωσης είναι τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του μικροσκυροδέματος. Η παιπάλη που προέρχεται από τα φίλτρα αποκονίωσης αποτελεί το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα που έχει απομακρυνθεί από την παιπάλη της μαρμαρόσκονης με μηχανικές διαδικασίες. Τα συγκεκριμένα υλικά προέρχονται από την εταιρία FINOMIX, η οποία δραστηριοποιείται στην παραγωγή σκυροδέματος και έτοιμων κονιαμάτων στην περιοχή Καλόρουμα Ακρωτηρίου Χανίων. Πρόκειται για αδρανή ασβεστολιθικής προέλευσης των οποίων οι κοκκομετρικές καμπύλες δίνονται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Κοκκομετρικές καμπύλες λατομικής άμμου, παιτάλης ξήρανσης, παιτάλης αποκονίωσης.

- Μικροτσιμέντο

Το μικροτσιμέντο (microcement ή Ultra Fine Cement) είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο τσιμέντο που χρησιμοποιείται κυρίως σε ενέματα για τη σφράγιση εξαιρετικά λεπτών σχισμών μεγέθους μικρότερων των 100 μm (τσιμεντενέσεις για σταθεροποίηση βραχώμαζας σε σήραγγες καθώς και σε άλλες εφαρμογές). Το μικροτσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι προϊόν της τσιμεντοβιομηχανίας Heidelberg cement και συγκεκριμένα ο τύπος Ultra Fine 12 του οποίου το 95% των κόκκων έχει μέγεθος μικρότερο από 12 μm , και αποτελεί το συνδετικό υλικό για το σκυρόδεμα.



Σχήμα 4.2. Κοκκομετρική καμπύλη μικροτσιμέντου.

- Πυριτική παιπάλη (Microsilica)

Η πυριτική παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε είναι microsilica 920D της εταιρίας Elkem Materials. Είναι υπέρλεπτη σκόνη διοξειδίου του πυριτίου και είναι υποπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής πυριτίου και κραμάτων σιδηροπυριτίου. Είναι λεπτόκοκκη σκόνη που αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια ή μικροσφαιρίδια με μέση διάμετρο περίπου 0,15 μm και πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια (15.000 – 25.000 cm² / g). Έχει συμμετοχή στην κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος και βοηθάει στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία η ποσότητά του υπολογίστηκε έτσι ώστε η αναλογία microsilica / microcement να παραμένει σταθερή στο 0,05.



Σχήμα 4.3. Κοκκομετρική καμπύλη πυριτικής παιπάλης.



Σχήμα 4.4. Microsilica 920D (www.indiamart.com)

- Υπερρευστοποιητής *melflux 2651F*

Είναι σε μορφή κιτρινωπής σκόνης και έχει ως βάση του τα πολυκαρβοξύλια. Προσδίδει πλαστικότητα και αυξημένη ρευστότητα στο σκυρόδεμα χωρίς να απαιτείται προσθήκη επιπλέον νερού διατηρώντας ή και αυξάνοντας την μηχανική αντοχή του. Έχει πυκνότητα 300 – 600 kg/m³ και η αναλογία στην οποία χρησιμοποιήθηκε σε σχέση με τα συνολικά στερεά ήταν περίπου 0,004.



Σχήμα 4.5. Melflux 2651F (www.basf.com)

- Επιβραδυντής τρυγικό οξύ (tartaric acid)

Το τρυγικό οξύ είναι ένα φυσικό οργανικό καρβοξυλικό οξύ με χημικό τύπο $C_4H_6O_6$. Είναι στερεό, άχρωμο και άοσμο κρυσταλλικό σώμα ή σε μορφή λευκής σκόνης. Ανήκει στην οικογένεια των δι – καρβοξυλικών οξέων και είναι πολύ εύκολα διαλυτό στο νερό και τις αλκοόλες. Η δράση που έχει στο μίγμα του σκυροδέματος είναι ότι επιβραδύνει το χρόνο για την αρχική πήξη και επιμηκώνει την εργασιμότητα. Η ποσότητα στην οποία χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθέσεις είναι 0,5 g.



Σχήμα 4.6. Τρυγικό οξύ (www.icdbiochem.com)

4.2 Διαδικασία καθορισμού των συνθέσεων μέσω του λογισμικού LISA

Το πρόγραμμα LISA – TM της εταιρίας Elkem Material χρησιμοποιεί τις εξισώσεις Andreassen (απλή και τροποποιημένη) προκειμένου να προσδιορίσει τη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση σε μίγματα τσιμεντοκονιαμάτων, ανάλογα με την επιθυμητή ιδιότητα. Οι επιθυμητές ιδιότητες σε μία σύνθεση σκυροδέματος μπορούν να είναι είτε η υψηλή ρεολογική ικανότητα, στο νωπό σκυρόδεμα, είτε η υψηλή μηχανική αντοχή, στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Με το εν λόγω πρόγραμμα έχουμε τη δυνατότητα να καθορίσουμε τη σύνθεση αδρανών – τσιμέντου έτσι ώστε η τελική κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος να είναι η βέλτιστη.

Η πυκνότητα στοίβαξης των σωματιδίων των υλικών που συμμετέχουν σε ένα μίγμα επηρεάζει άμεσα την επιθυμητή ιδιότητα του προς παρασκευή σκυροδέματος. Στην περίπτωση που το μίγμα χαρακτηρίζεται από ευρεία κατανομή μεγέθους κόκκων η στοίβαξη είναι πυκνότερη με άμεση συνέπεια την αύξηση της μηχανικής αντοχής. Αντίθετα, στην περίπτωση που η στοίβαξη είναι πιο αραιή επιτυγχάνεται μείωση του ιξώδους του νωπού μίγματος, δηλαδή αύξηση της ρεολογικής του ικανότητας.

Το LISA – TM χρησιμοποιεί την απλή εξίσωση Andreassen και την τροποποιημένη εξίσωση Andreassen. Αυτές είναι (Bjorn Myhre)

- Εξίσωση Andreassen:

$$CPFT = \left(\frac{d}{D} \right)^q \times 100$$

- Τροποποιημένη εξίσωση Andreassen:

$$CPFT = \left(\frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q} \right) \times 100$$

Όπου CPFT (Cumulative percent finer than): αθροιστικό ποσοστό υλικού με διάμετρο μικρότερη του d

d: μέγεθος κόκκου

d_m : ελάχιστο μέγεθος κόκκου στο δείγμα

D: μέγιστο μέγεθος κόκκου στο δείγμα

q : συντελεστής κατανομής

Στην απλή εξίσωση Andreassen λαμβάνεται υπόψη το μέγιστο μέγεθος κόκκου και θεωρείται μια άπειρη κατανομή προς το μικρότερο μέγεθος. Η μορφή της απεικονίζεται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα και παριστάνεται από μία ευθεία με το q να αντιπροσωπεύει την κλίση της. Στην τροποποιημένη εξίσωση Andreassen λαμβάνεται υπόψη το μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κόκκου και η μορφή της απεικονίζεται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα και παριστάνεται από μία καμπύλη.

Στόχος της χρήσης του μοντέλου Andreassen είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Μέσω του LISA – TM ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δοκιμάσει διάφορους συνδυασμούς ποσοτήτων για το κάθε συστατικό με στόχο να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση στη θεωρητική καμπύλη Andreassen.

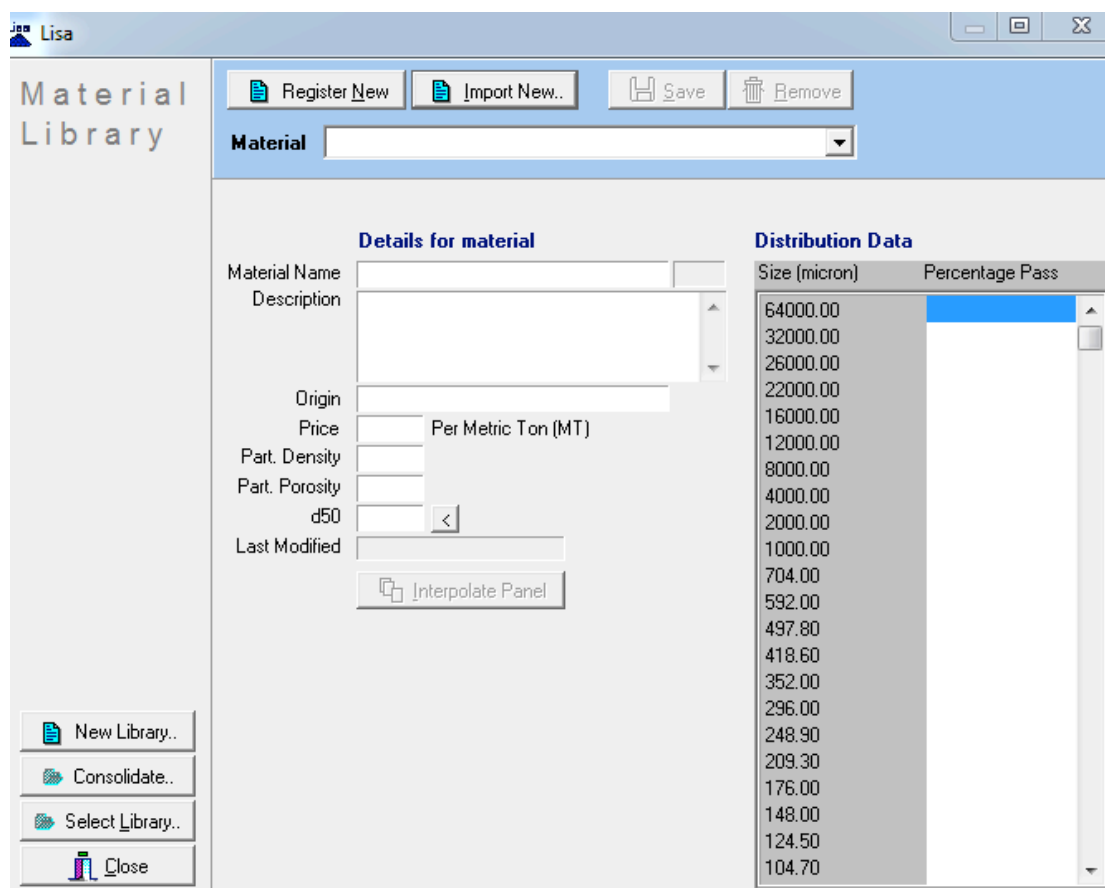
Ο συντελεστής κατανομής, q, εκφράζει την πυκνότητα στοίβαξης των κόκκων στο μίγμα. Για πυκνές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, δηλαδή υψηλή μηχανική αντοχή, το q λαμβάνεται ίσο ή μεγαλύτερο της τιμής 0,36. Για αραιές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, δηλαδή υψηλή ρεολογική ικανότητα, το q λαμβάνεται ίσο ή μικρότερο του 0,30. Στην περίπτωση που θέλουμε να έχουμε ένα συνδυασμό και των δύο αυτών βασικών ιδιοτήτων θα πρέπει το q να βρίσκεται ανάμεσα στο 0,30 και στο 0,36.

Τέλος το πρόγραμμα διαθέτει βιβλιοθήκη εμπορικών υλικών, με τις κοκκομετρικές τους καμπύλες. Ωστόσο, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα, να εισάγει στη βιβλιοθήκη και νέα υλικά, με την κοκκομετρική τους ανάλυση, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στους σχεδιασμούς των συνθέσεων.

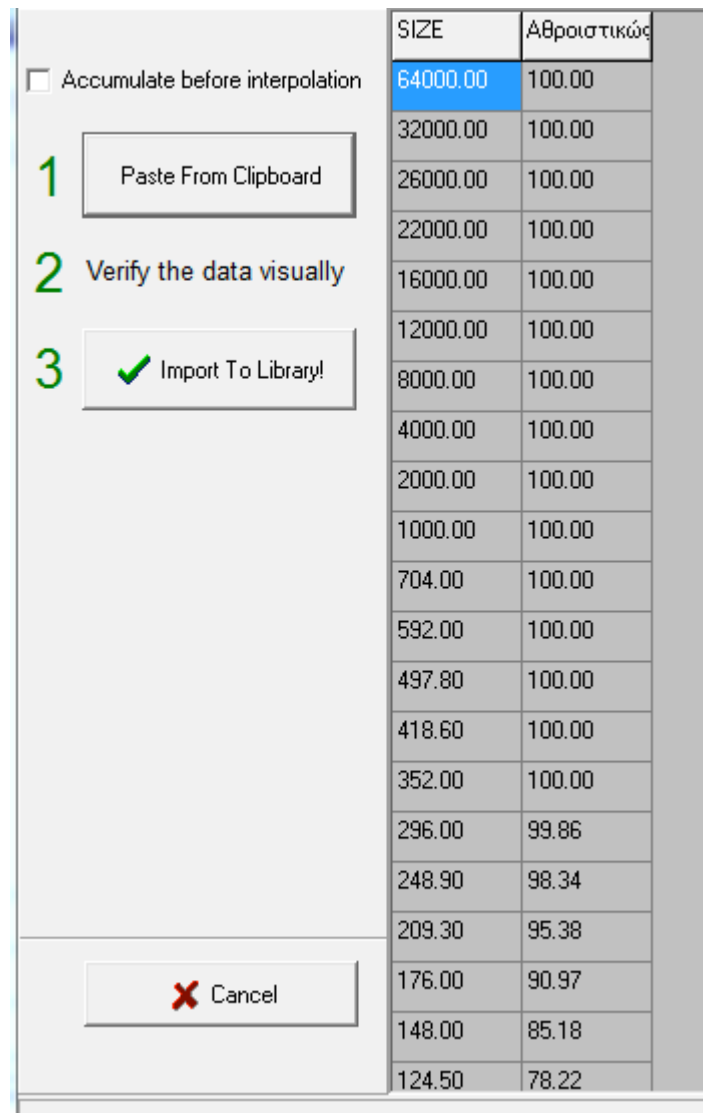
4.3 Αρχικός καθορισμός μιγμάτων μικροσκυροδέματος μέσω του λογισμικού LISA

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης σύνθεσης με βάση το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά έγινε εισαγωγή, στη βιβλιοθήκη του προγράμματος, των δεδομένων της κοκκομετρικής ανάλυσης και της πυκνότητας των υλικών που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή των συνθέσεων μικροσκυροδέματος. Στα σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται τα «παράθυρα» της βιβλιοθήκης του προγράμματος και της εισαγωγής των δεδομένων κοκκομετρίας από φύλλο του MS – Excel.



Σχήμα 4.7. Βιβλιοθήκη υλικών λογισμικού LISA – TM.



Σχήμα 4.8. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων από φύλλο εργασίας του MS - Excel.

Εν συνεχεία καθορίστηκε το ποσοστό συμμετοχής του μικροτσιμέντου στις συνθέσεις καθώς και οι αναλογίες πυριτικής παιπάλης / μικροτσιμέντο που θα χρησιμοποιούνταν. Λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό συμμετοχής του τσιμέντου στο κοινό σκυρόδεμα και θέματα κόστους, το ποσοστό του μικροτσιμέντου διερευνήθηκε εντός του 10 – 20% των συνολικών στερεών (αδρανών). Η αναλογία πυριτικής παιπάλης / μικροτσιμέντο, σύμφωνα με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή οδηγίες επιλέχθηκε και διατηρήθηκε σταθερή στο 0.05.

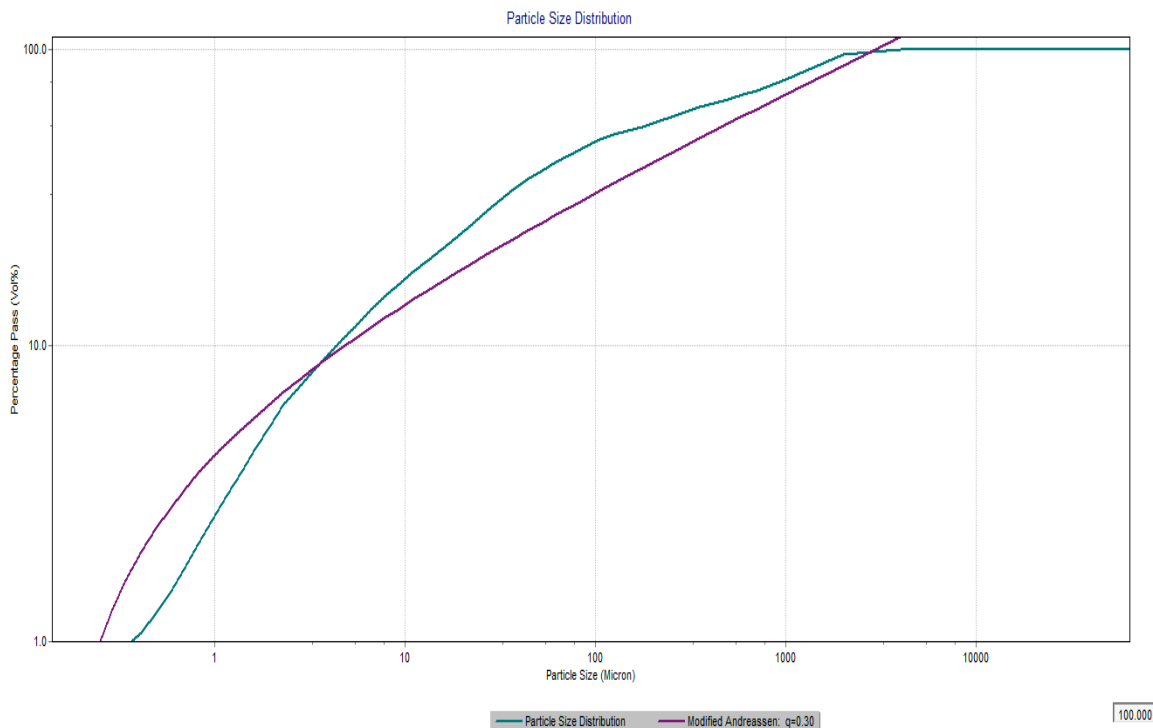
Οι βασικές παράμετροι του τροποποιημένου μοντέλου Andreassen που χρειάστηκε να καθοριστούν ήταν το μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κόκκου και ο συντελεστής κατανομής q . Το μέγιστο μέγεθος κόκκου καθορίστηκε στα 3000 μm , ως

ο προσεγγιστικά μέγιστος κόκκος της λατομικής άμμου, δηλαδή του υλικού με τη μεγαλύτερη κοκκομετρία. Το ελάχιστο μέγεθος κόκκου καθοριζόταν ανάλογα με το πιο λεπτόκοκκο υλικό που συμμετείχε κάθε φορά στη σύνθεση, και σε κάθε περίπτωση κάτω από τα 0,3 μm. Τέλος, ο συντελεστής κατανομής, κυμάνθηκε από 0,18 έως 0,30. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής κατανομής καθορίζει την πυκνότητα στοίβαξης των σωματιδίων. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκαν με βασικό κριτήριο την ικανοποιητική ρεολογική ικανότητα του νωπού μίγματος. Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται εικόνες της σύνθεσης και της κοκκομετρική καμπύλης της από το λογισμικό.

Materials In Composition				
Material Name	Density	Quantity	Vol %	
Sand 0/2	2.80	60.00	59.25	
paipali marmarou	2.70	30.00	30.72	
Microcement	2.94	10.00	9.40	
Microsilica	2.20	0.50	0.63	

Calculation Model		Parameters	
Name	Modified Andreassen	q-Value	0.30
		Max. Particle Size	3000.00
		Min. Particle Size	0.14

Σχήμα 4.9. Παράδειγμα εισαγωγής ποσοτήτων υλικών και παραμέτρων τροποποιημένου μοντέλου Andreassen στο λογισμικό LISA – TM.



Σχήμα 4.10. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική) και πραγματικά επιτευχθείσα με χρήση του λογισμικού LISA.

Τέλος, έγινε ο υπολογισμός της βέλτιστης σύνθεσης με βάση το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen. Αυτό κατέστη δυνατό, με αλλαγή κάθε φορά του ποσοστού συμμετοχής του κάθε υλικού στις συνθέσεις. Ζητούμενο ήταν η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της πραγματικής κοκκομετρικής καμπύλης στη θεωρητική κατά Andreassen καμπύλη.

Εδώ κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί πως τα υδατοδιαλυτά χημικά πρόσθετα δεν επηρεάζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση του τελικού μίγματος και γι' αυτό δεν εμφανίζονται στις συνθέσεις. Οι ποσότητές τους διατηρήθηκαν σταθερές σε όλες τις συνθέσεις και πιο συγκεκριμένα η ποσότητα του υπερρευστοποιητή (melflux) καθορίστηκε στα 4 g και του επιβραδυντή (tartaric acid) στα 0.5 g. Η συνολική μάζα των στερεών (άμμος, παιπάλη και μικροτσιμέντο) διατηρήθηκε σταθερή στα 1000 g.

4.4 Διαδικασία παρασκευής των μιγμάτων και ελέγχου των διαμορφούμενων δοκιμίων

Η πρώτη διαδικασία που πρέπει να γίνει, είναι η ακριβής ζύγιση όλων των υλικών. Λόγω του ότι για κάποια υλικά η απαιτούμενη ποσότητα ήταν πολύ μικρή, λιγότερο από 1 g, η ζύγιση έπρεπε να είναι ακριβής στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο, ακρίβεια που πρόσφερε η εργαστηριακή ζυγαριά. Ανάλογα με τη σύνθεση που ετοιμαζόταν κάθε φορά ζυγιζόταν η προκαθορισμένη ποσότητα του κάθε υλικού.

Οι ζυγισμένες ποσότητες μικροτσιμέντου, λατομικής άμμου, παιπάλης ξήρανσης, παιπάλης αποκονίωσης και microsilica αρχικά μπαίνουν στον εργαστηριακό αναμκτήρα και ανακατεύονται. Το τρυγικό οξύ και ο υπερειστοποιητής Melflux ανακατεύονται με μικρή προζυγισμένη ποσότητα νερού (περίπου 10 mL), σε αναμκτήρα βίαιης ανάμιξης για τη διάλυση πιθανών συσσωματωμάτων. Το μίγμα αυτό προστίθεται στον κάδο του εργαστηριακού αναμκτήρα και αρχίζει η ανάδευση. Εν συνεχεία, προστίθεται σιγά σιγά νερό, του οποίου ο όγκος πάντα μετράται, και συνεχίζει η ανάμιξη. Πάντα όταν προστίθεται νερό πρέπει να περνάει κάποιος χρόνος ώστε να προλάβει να ενσωματωθεί πλήρως στο μίγμα, αλλιώς υπάρχει ο κίνδυνος το τελικό μίγμα να είναι πιο υδαρές από το επιθυμητό.



Σχήμα 4.11. Εργαστηριακός αναμκτήρας κονιαμάτων, EN 196/1 (en.eylullab.com)

Το μίγμα θεωρείται έτοιμο όταν αρχίσει να ξεκολλάει από τα τοιχώματα του κάδου. Σ' αυτό το σημείο η προσθήκη νερού και η ανάμιξη σταματάνε και γίνεται η δοκιμή του μικροκόνου εξάπλωσης.

Η συγκεκριμένη δοκιμή σκοπό έχει να εξετάσει τη ρεολογική ικανότητα του νωπού σκυροδέματος. Η δοκιμή περιλαμβάνει έναν κόλουρο κώνο, μικρής διαμέτρου 21 mm, μεγάλης διαμέτρου 40 mm και ύψους 60 mm και μία μεταλλική πλάκα (Σχήμα 4.10). Ο κώνος γεμίζεται με το νωπό σκυρόδεμα και μετά με την μεγάλη του βάση αφήνεται στη μεταλλική πλάκα. Ο κώνος απομακρύνεται προσεκτικά και αφήνεται το σκυρόδεμα να ρέσει, χωρίς δόνηση, λόγω του βάρους του. Όταν σταματήσει να ρέει το σκυρόδεμα έχει σχηματιστεί προσεγγιστικά ένας κύκλος του οποίου μετρούνται δύο διάμετροι, κάθετες μεταξύ τους και υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων. Για την παρούσα εργασία επιθυμητή διάμετρος του μικροκόνου εξάπλωσης θεωρήθηκαν τα 11-12 cm.



Σχήμα 4.12. Κώνος κάθισης και μεταλλική πλάκα. (Πιπερίδη, 2012)



Σχήμα 4.13. Μέτρηση διαμέτρων κώνου εξάπλωσης. (Πιπερίδη, 2012)

Εφόσον έχουμε καταλήξει στο επιθυμητό επίπεδο ρευστότητας του μίγματος με σταδιακή προσθήκη νερού, το σκυρόδεμα τοποθετείται σε κυβικές μήτρες $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ στις οποίες πρώτα έχει περαστεί ένα λεπτό στρώμα υδραυλικού λαδιού, για την ευκολότερη αφαίρεση των δοκιμίων αργότερα. Το μίγμα αφήνεται να στεγνώσει μέσα στις μήτρες για 24 ώρες περίπου. Αφού στεγνώσει έχουμε πλέον τα διαμορφωμένα δοκίμια.



Σχήμα 4.14. Κυβικές μήτρες $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ (Πιπερίδη, 2012)

Τα δοκίμια εν συνεχεία φυλάσσονται σε θάλαμο ωρίμανσης στους 20 ± 1 °C και σε ελάχιστη υγρασία 95% για 27 ημέρες. Μετά από αυτό το διάστημα, τα δοκίμια βγαίνουν από το θάλαμο και αφήνονται για άλλες 24 ώρες σε συνθήκες περιβάλλοντος. Μετά από αυτές τις διαδικασίες, είναι έτοιμα για τις δοκιμές στις οποίες θα υποβληθούν.

Στην προκειμένη εργασία τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη. Πριν από αυτήν τη διαδικασία όμως, έπρεπε να μετρηθούν οι διαστάσεις τους, κυρίως το ύψος τους που ήταν η μόνη διάσταση στην οποία θα μπορούσε να υπάρξει διαφοροποίηση, και το βάρος τους. Μετά και από αυτό τα κυβικά δοκίμια πέρασαν από τη δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή MTS–1380 (Σχήμα 4.13). Η συσκευή περιλαμβάνει τις παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο, τους χαλύβδινους δίσκους που παρεμβάλλονται μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δοκιμίου προς αποφυγή υπερβολικής παραμόρφωσης του δοκιμίου λόγω των δυνάμεων τριβής, τη σφαιρική κεφαλή έδρασης στο πάνω μέρος του δοκιμίου της οποίας ο άξονας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η επιβολή του φορτίου, όπως και η καταγραφή του και η καταγραφή των παραμορφώσεων γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού συστήματος (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.15. Μηχανή ελέγχου δοκιμών σε θλίψη, τύπου MTS – 1380.

Κεφάλαιο 5ο . Αποτελέσματα - Συζήτηση

5.1 Παρουσίαση συνθέσεων σκυροδέματος – αντοχής δοκιμών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, παρατηρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθώς επίσης και η μηχανική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της κάθε σύνθεσης. Επισημαίνεται ότι από κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν τρία δοκίμια, τα οποία επισημαίνονται ως -0001,-0002,-0003, των οποίων οι αντοχές θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα.

5.1.1. Σύνθεση S1

Οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και η εκατοστιαία σύνθεση κατά βάρος δίνονται στον πίνακα 5.1.

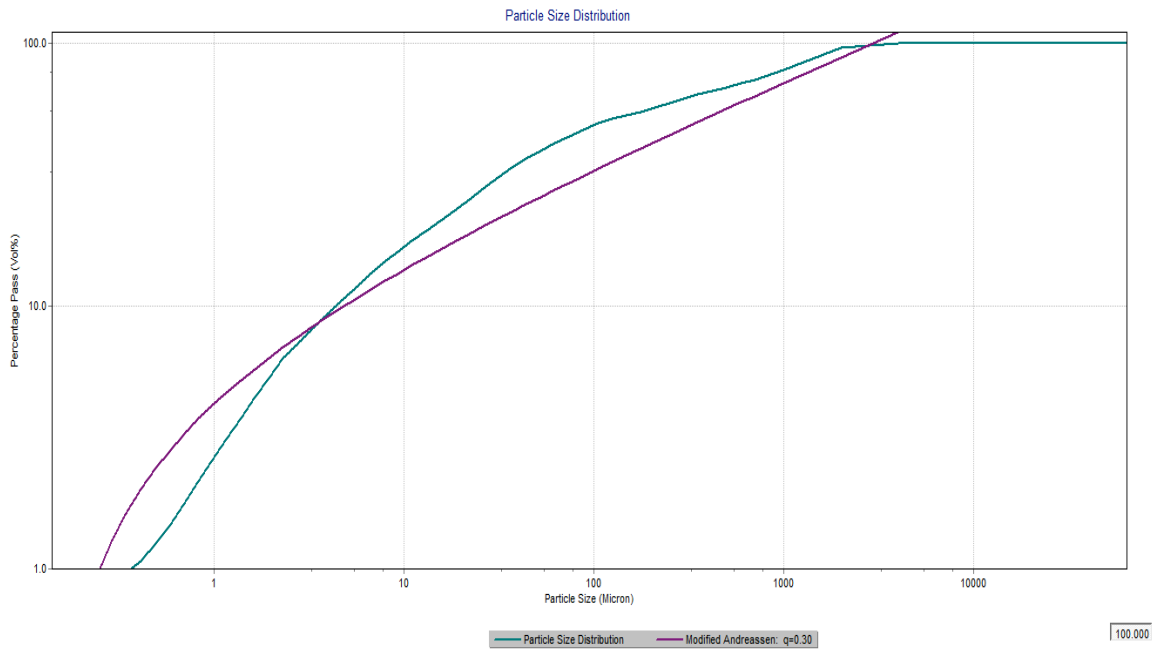
Πίνακας 5.1. Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S1

Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	600 g	60
Παιπάλη ξήρανσης	300 g	30
Microcement	100 g	10
Melflux	4 g	-
Microsilica	5 g	0.005
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	100 mL	-

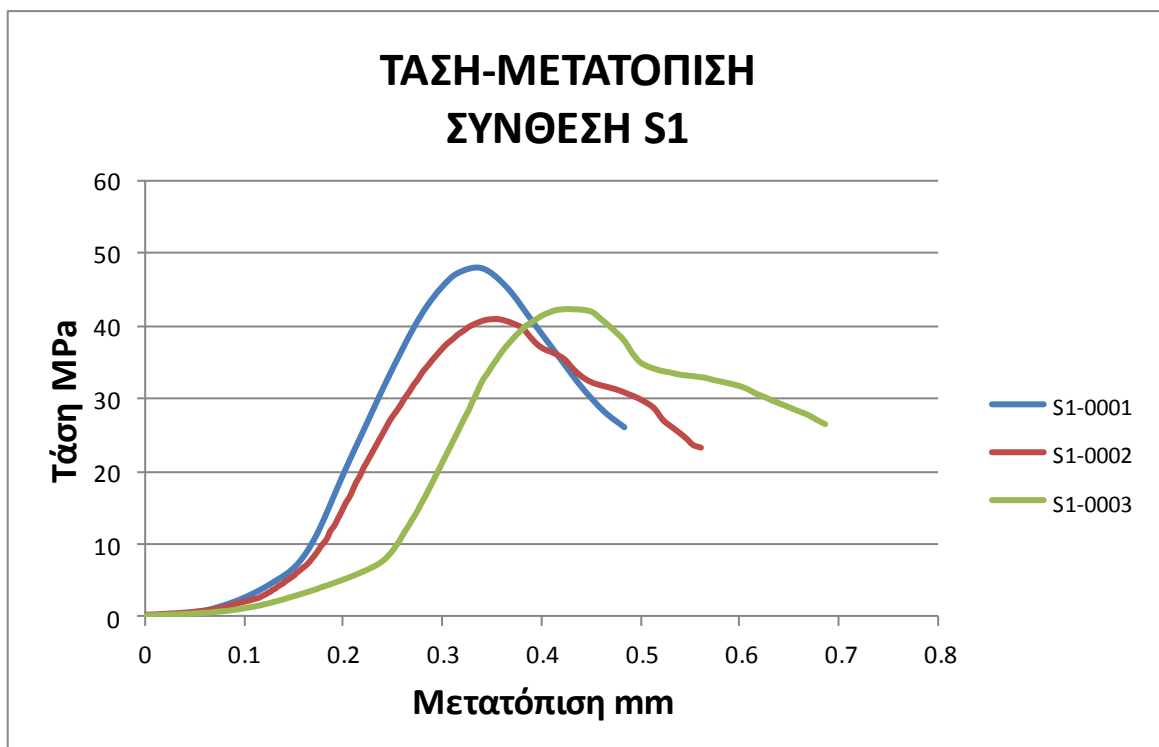
Οι παράμετροι του νωπού σκυροδέματος και των σκληρυμένων δοκιμίων μετά από ωρίμανση 28 ημερών που μετρήθηκαν δίνονται πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S1.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	12.3 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassen της κοκκομετρίας των υλικών	0.30
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.39 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	43.73 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	3.70 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	257 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	32.35 MPa



Σχήμα 5.1. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S1 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.2. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S1 (S1-0001, S1-0002, S1-0003).

Στο διάγραμμα φαίνεται η απόκλιση της αντοχής των τριών δοκιμίων της S1 σε μονοαξονική θλίψη. Η αντοχή όλων υπερβαίνει τα 40 MPa. Η υπολογισθείσα τυπική απόκλιση των 3.7 MPa, που αντιστοιχεί στο 8.4% της μέσης τιμής, κρίνεται ότι είναι εντός των αναμενόμενων ορίων λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά σφάλματα και την ακρίβεια μέτρησης της μηχανής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

5.1.2. Σύνθεση S2

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι ποσότητές τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

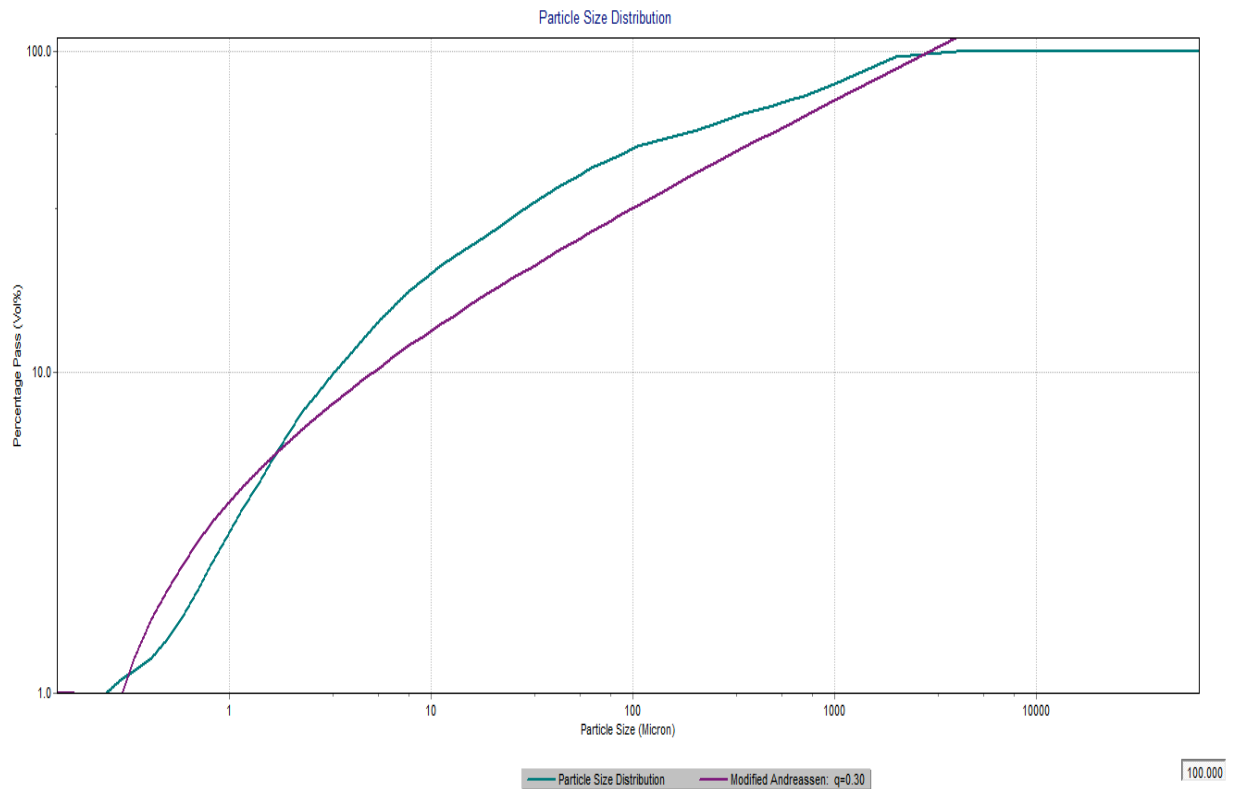
Πίνακας 5.3. Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S2.

Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	600 g	60
Παιπάλη ξήρανσης	250 g	25
Microcement	150 g	15
Melflux	4 g	-
Microsilica	7.5 g	0.0075
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	90 mL	-

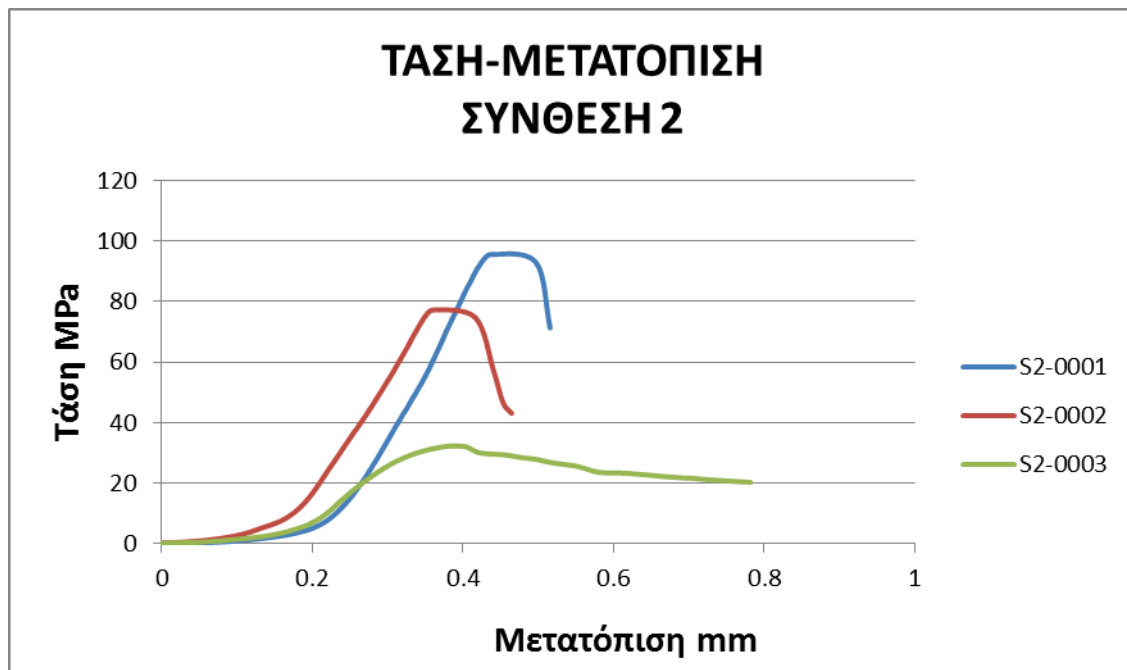
Οι παράμετροι του νωπού σκυροδέματος και των σκληρυμένων δοκιμίων μετά από ωρίμανση 28 ημερών που μετρήθηκαν δίνονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Ιδιότητες ναπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S2.

Κώνος εξάπλωσης ναπού σκυροδέματος	11.3 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassen της κοκκομετρίας των υλικών	0.30
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.32 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	68.39 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	32.56 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	311 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	96.13 MPa



Σχήμα 5.3. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S2 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.4. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S2 (S2-0001,S2-0002,S2-0003).

Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη σύνθεση παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία στη συμπεριφορά της σε κάθε δοκίμιο. Η αντοχή τους διαφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό, πράγμα που γίνεται φανερό τόσο από το διάγραμμα όσο και από την ιδιαίτερα μεγάλη τυπική απόκλιση που εξάγεται από τις τιμές.

Κατά τη διάρκεια της παρασκευής της σύνθεσης και των δοκιμίων δεν έγινε κάποια ιδιαίτερη παρατήρηση, σε σχέση με την ποσότητα του νερού, που επηρεάζει κυρίως την αντοχή του σκυροδέματος, και ο κώνος εξάπλωσης κρίθηκε ικανοποιητικός.

Η ανομοιομορφία στην τελική αντοχή είναι πιθανό να οφείλεται σε προβλήματα κατά τη διάρκεια της φόρτισης των δοκιμίων. Ενδέχεται δηλαδή, η επιφάνεια των δοκιμίων να μην ήταν επίπεδη και έτσι η φόρτιση να μην έγινε ομοιόμορφα με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην είναι αξιόπιστες. Τέλος, υπάρχει το ενδεχόμενο το δοκίμιο S2-0003 να αστόχησε σε διάτμηση και έτσι να δικαιολογείται η πολύ μικρή αντοχή του σε σχέση με τα άλλα δοκίμια.

5.1.3. Σύνθεση S3

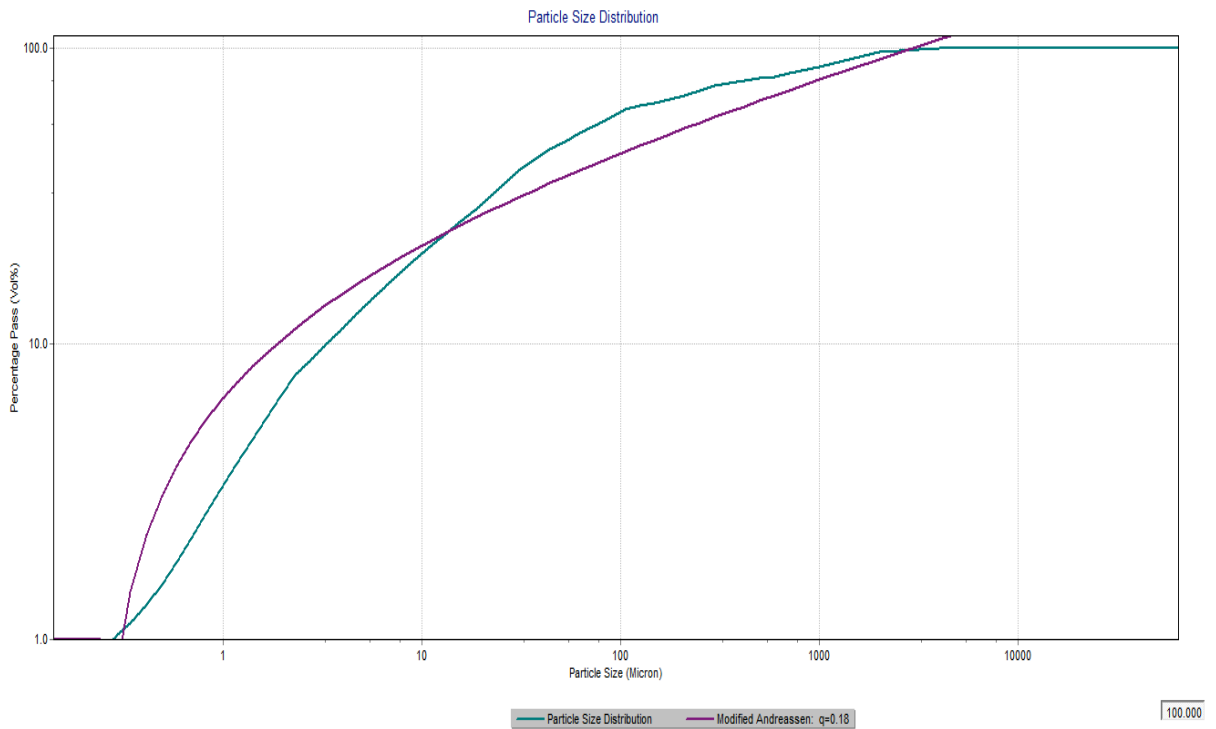
Τα υλικά και οι ποσότητές τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.5 Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S3.

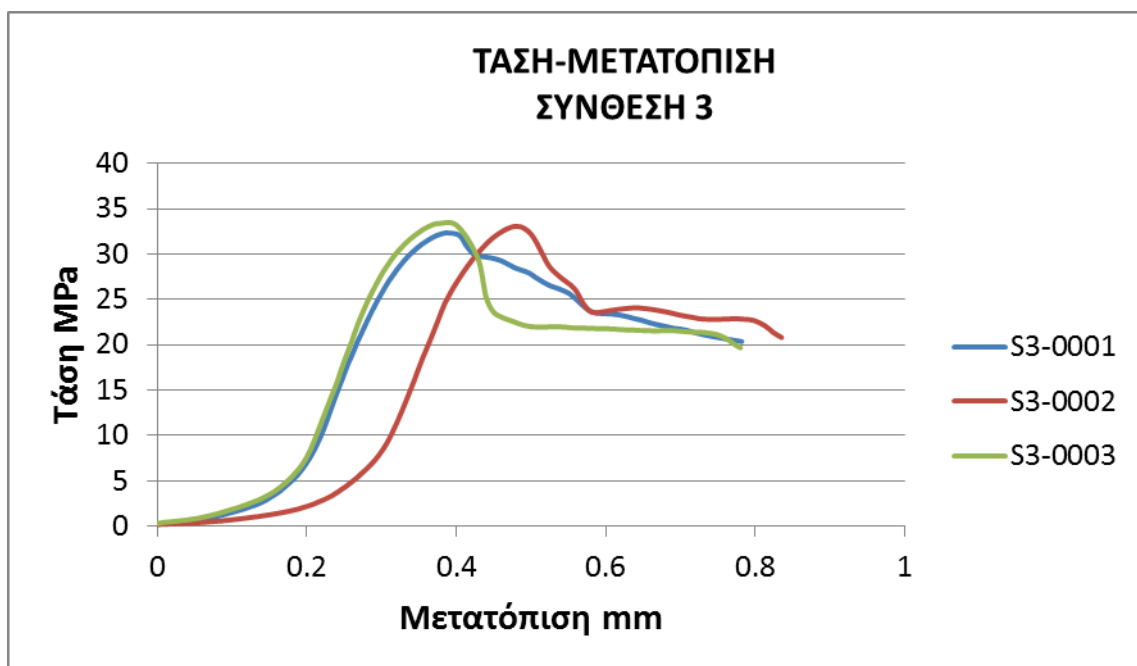
Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	400 g	40
Παιπάλη ξήρανσης	500 g	50
Microcement	100 g	10
Melflux	4 g	-
Microsilica	5 g	0.005
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	97 mL	-

Πίνακας 5.6. Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S3.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	11.6 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassentης κοκκομετρίας των υλικών	0.18
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.32 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	32.91 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	0.53 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	199 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	10.53 MPa



Σχήμα 5.5. Απαιτούμενη κατά Andraessen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S3 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.6. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S3 (S3-0001,S3-0002,S3-0003).

Στη συνταγή S3 παρατηρούμε ότι η αντοχή σε όλα τα δοκίμια είναι σχεδόν ίδια, η τυπική απόκλιση είναι πολύ μικρή και επίσης η συμπεριφορά τους δε διαφέρει σημαντικά. Ιδιαίτερα για τα δοκίμια S3-0001 και S3-0003 η συμπεριφορά τους μέχρι το όριο θραύσης είναι πανομοιότυπη. Η διαφορά στη συμπεριφορά του S3-0002 μέχρι το όριο θραύσης μπορεί να οφείλεται σε αρχική μετατόπιση του εμβόλου φόρτισης της μηχανής. Ωστόσο, η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Αυτό ήταν αναμενόμενο εξαιτίας του χαμηλού συντελεστή κατανομής q που επιλέχθηκε.

5.1.4. Σύνθεση S4

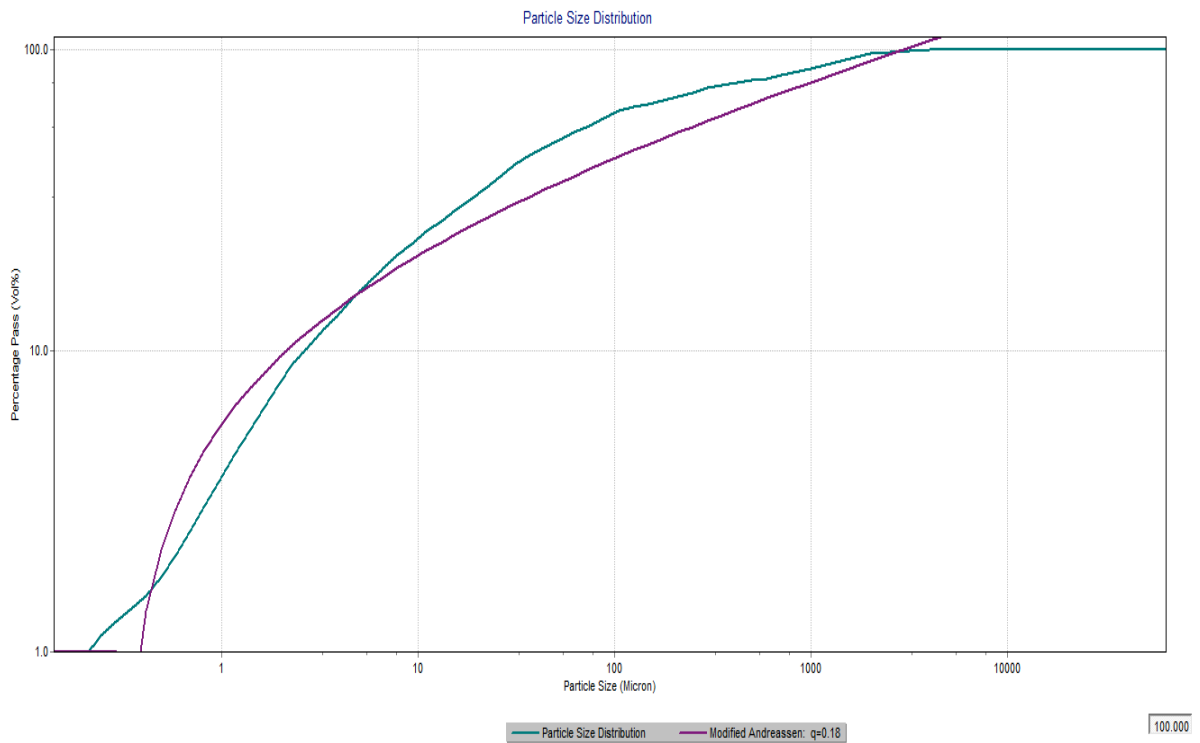
Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι ποσότητές τους. Επίσης βλέπουμε τα στοιχεία που μετρήθηκαν και παρακάτω το διάγραμμα τάσης – μετατόπισης.

Πίνακας 5.7 Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S4.

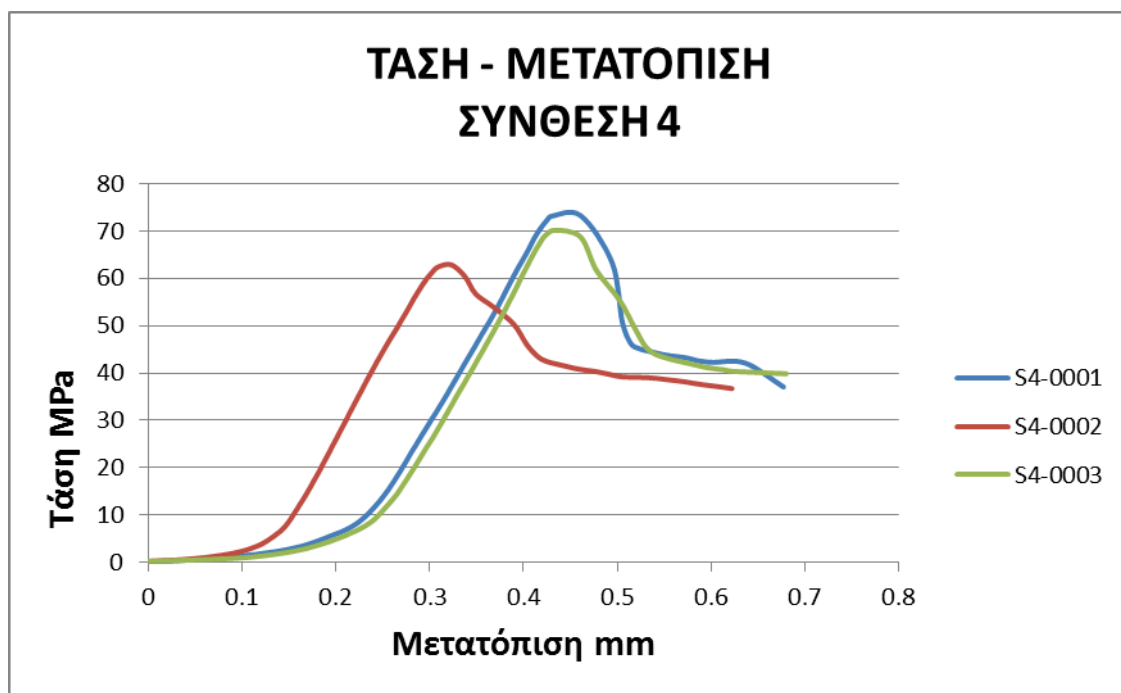
Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	400 g	40
Παιπάλη ξήρανσης	450 g	45
Microcement	150 g	15
Melflux	4 g	-
Microsilica	7.5 g	0.0075
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	98 mL	-

Πίνακας 5.8 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S4.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	11.6 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassen της κοκκομετρίας των υλικών	0.18
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.32 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	68.76 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	5.31 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	320 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	29.83 MPa



Σχήμα 5.7. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για την σύνθεση S4 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.8. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S4 (S4-0001, S4-0002, S4-0003)

Στη συγκεκριμένη σύνθεση παρατηρούμε ότι, αν και ο συντελεστής q έχει οριστεί να είναι εξαιρετικά χαμηλός, στο 0,18, οπότε και θα περιμέναμε μικρή αντοχή και υψηλή ρευστότητα, εν τούτοις η αντοχή είναι μεγάλη σε όλα τα δοκίμια. Αυτό οφείλεται ενδεχομένως στη χαμηλή σχετικά αναλογία νερό / μικροτσιμέντο (0.65) η οποία φαίνεται να έχει θετική επιρροή στην τελική αντοχή των δοκιμίων. Και σ' αυτήν την περίπτωση υπάρχει σχετική διακύμανση στην αντοχή, ωστόσο δεν κρίνεται ιδιαίτερα μεγάλη.

5.1.5. Σύνθεση S5

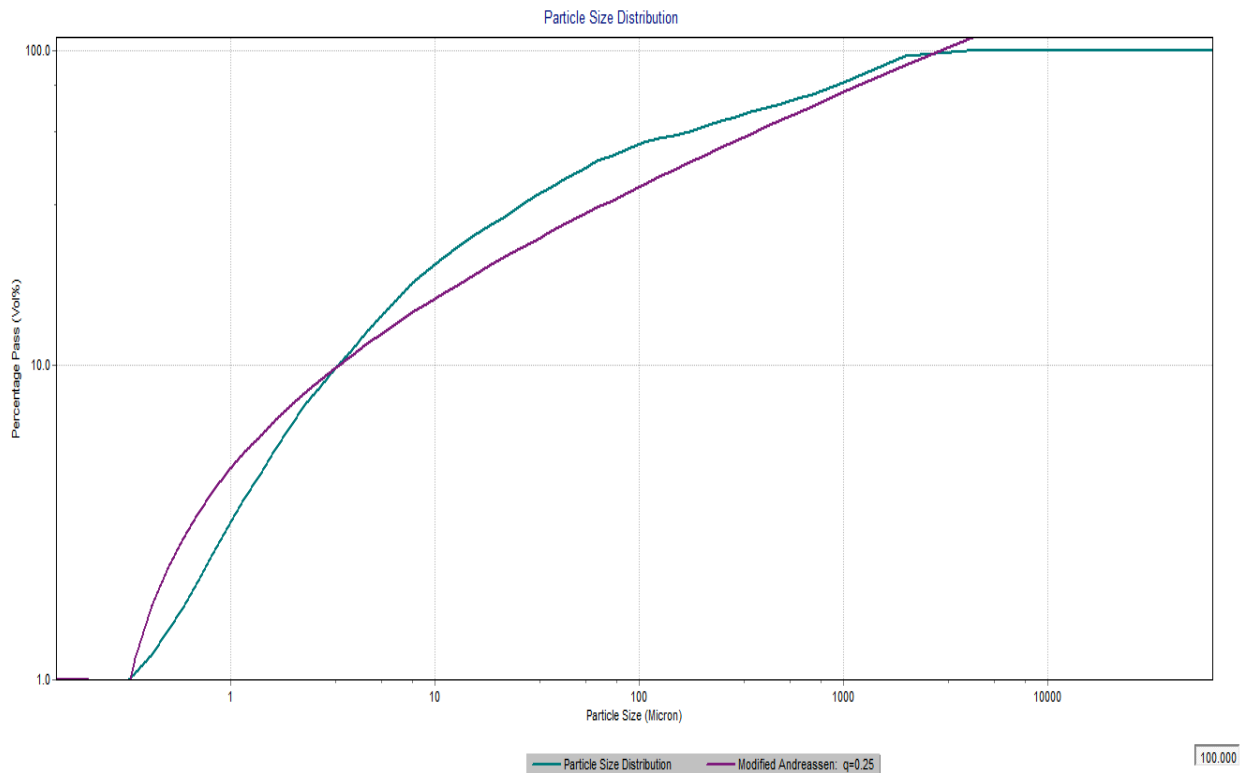
Παρακάτω παρουσιάζεται η σύνθεση της συνταγής S5, τα στοιχεία αντοχής και ρευστότητας του μίγματος και το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης των δοκιμίων.

Πίνακας 5.9. Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S5.

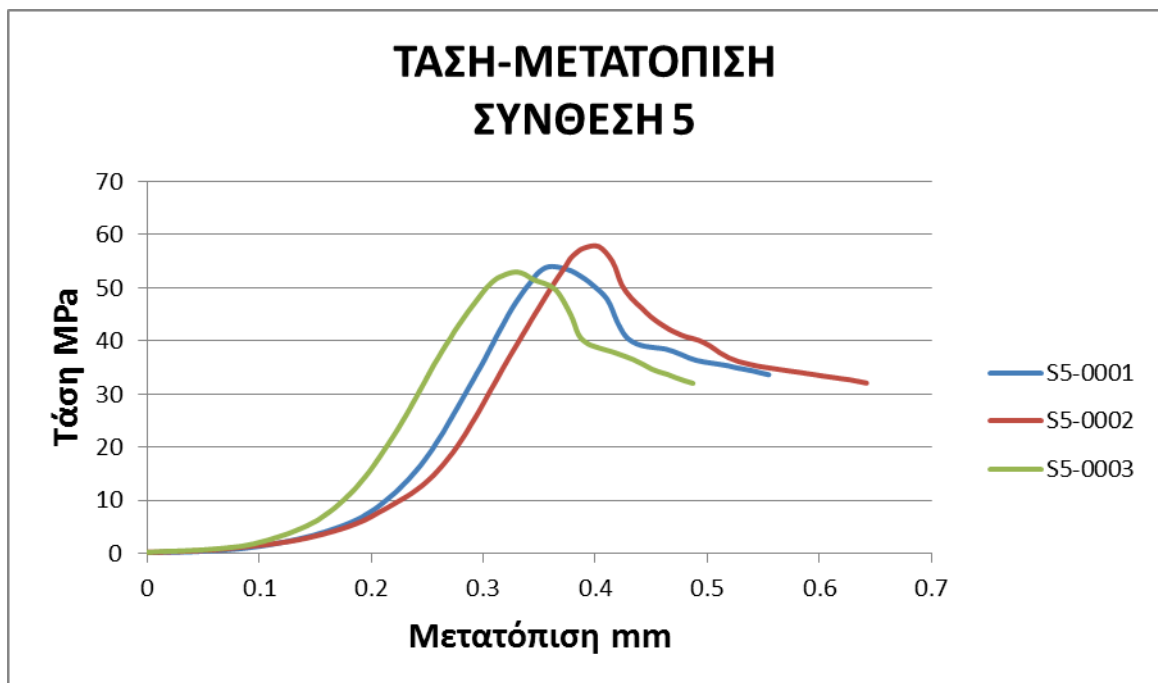
Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	600 g	60
Παιπάλη ξήρανσης	200 g	20
Παιπάλη αποκονίωσης	100 g	10
Microcement	100 g	10
Melflux	4 g	-
Microsilica	5 g	0.005
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	86 mL	-

Πίνακας 5.10 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S5.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	11.1 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassen της κοκκομετρίας των υλικών	0.25
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.35 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	54.94 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.53 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	324 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	22.72 MPa



Σχήμα 5.9. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S5 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.10. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S5 (S5-0001, S5-0002, S5-0003).

Και σ' αυτήν τη συνταγή βλέπουμε ότι υπάρχει συμφωνία στα αποτελέσματα. Και οι τρεις καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή. Αν και τα αποτελέσματα της δοκιμής κώνου εξάπλωσης έδωσαν αποτελέσματα οριακά αποδεκτά (προς το κάτω όριο), εν τούτοις βλέπουμε ότι η αντοχή δεν είναι τόσο αυξημένη όσο θα αναμενόταν. Επίσης είναι η πρώτη συνταγή στην οποία έχουμε προσθήκη παιπάλης φίλτρου. Η αναλογία νερό / μικροτσιμέντο είναι σχετικά υψηλή (0.86) που ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι προστέθηκε στο μίγμα πολύ λεπτόκοκκο υλικό.

5.1.6. Σύνθεση S6

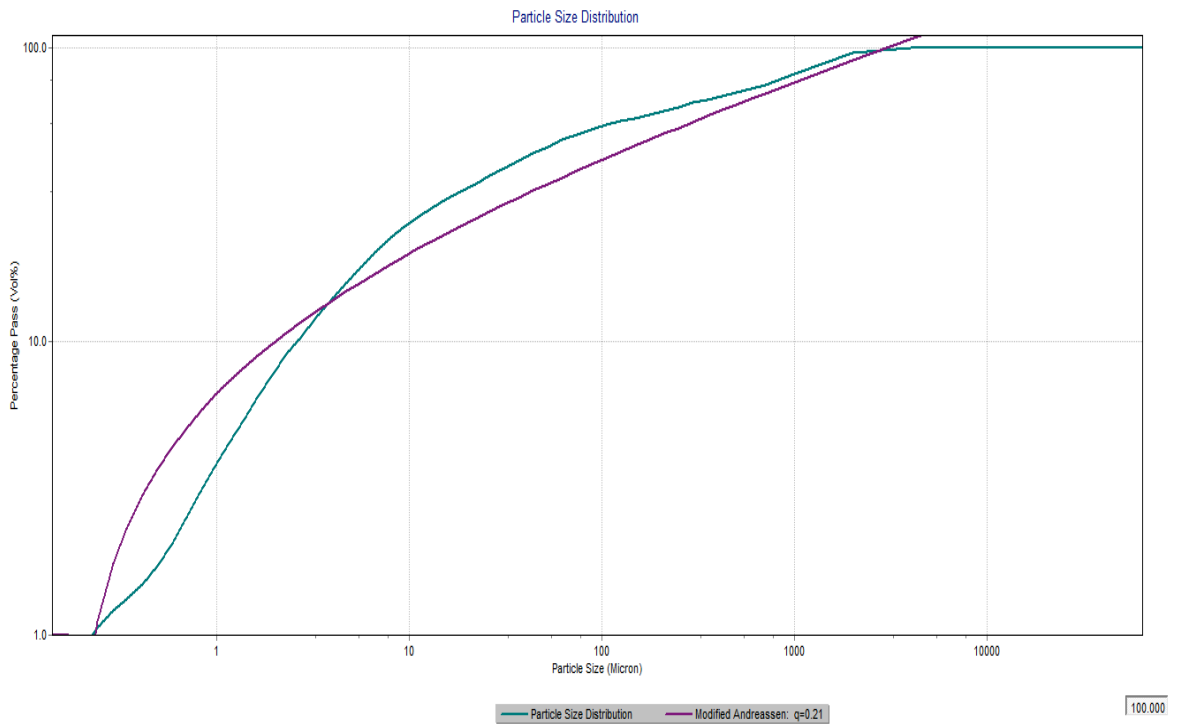
Πίνακας 5.11 Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S6.

Υλικό	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	550 g	55
Παιπάλη ξήρανσης	200 g	20
Παιπάλη αποκονίωσης	100 g	10
Microcement	150 g	15
Melflux	4 g	-
Microsilica	7.5 g	0.0075
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	90 mL	-

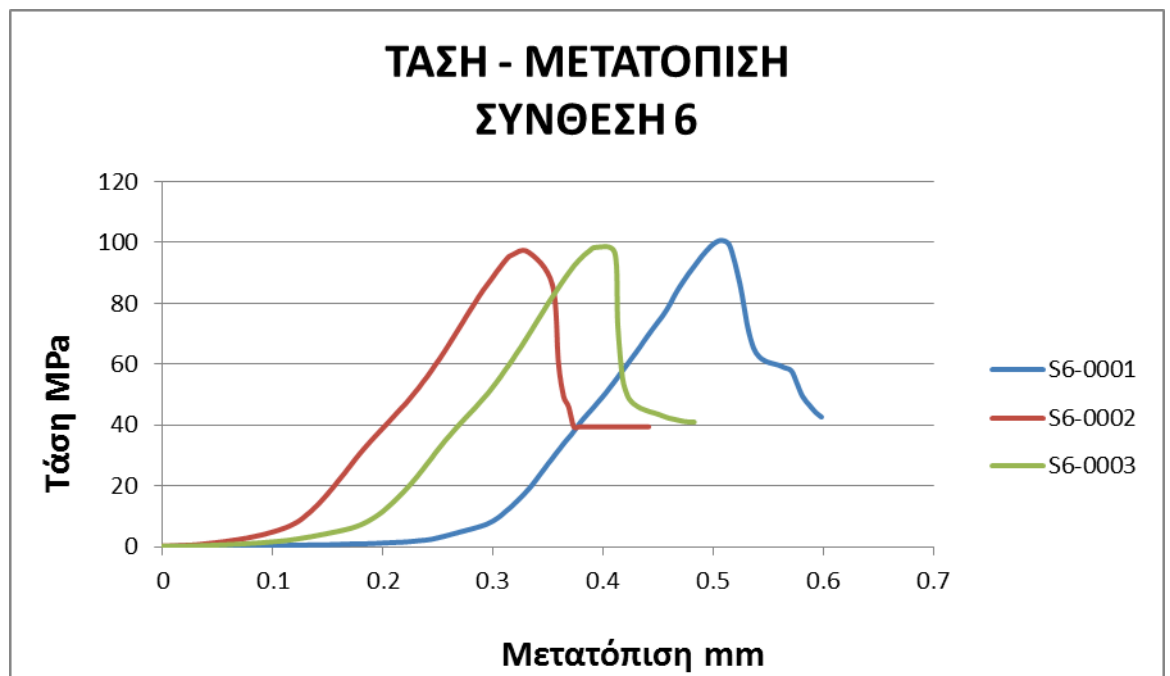
Πίνακας 5.12 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S6.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	11.7 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassen της κοκκομετρίας των υλικών	0.21
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.39 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	98.65 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	1.93 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	423 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	6.65 MPa

Σημείωση: Το μίγμα φαινόταν να έχει τη σωστή υφή ακόμα και σε πολύ μικρές ποσότητες νερού. Με τη δοκιμή του κώνου εξάπλωσης ωστόσο φάνηκε ότι δεν είχε την επιθυμητή ρεολογική ικανότητα. Επίσης παρατηρήθηκε πως ο κώνος εξάπλωσης από κάποιο σημείο και μετά εμφάνισε πολύ απότομη αύξηση. Στα 86 mL νερού η διάμετρος ήταν στα 9 cm ενώ όταν προστέθηκαν και τα τελευταία 4 mL νερού ο κώνος έφτασε στην επιθυμητή διάμετρο.



Σχήμα 5.11. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S6 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.12. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S6 (S6-0001, S6-0002, S6-0003).

Η σύνθεση S6 παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από όλες τις συνθέσεις. Βλέπουμε ότι η αντοχή που παρουσιάζουν τα δοκίμια είναι πολύ μεγάλη και επίσης βλέπουμε ότι δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Και σ' αυτήν τη συνταγή χρησιμοποιήθηκε παιπάλη φίλτρου, ωστόσο φαίνεται ότι η μείωση της ποσότητας της λατομικής άμμου και η αντίστοιχη αύξηση του μικροτσιμέντου επηρέασαν θετικά την τελική μηχανική αντοχή των δοκιμίων. Ο συντελεστής κατανομής q για άλλη μία φορά είναι εξαιρετικά χαμηλός ωστόσο βλέπουμε υψηλή αντοχή.

5.1.7. Σύνθεση S7

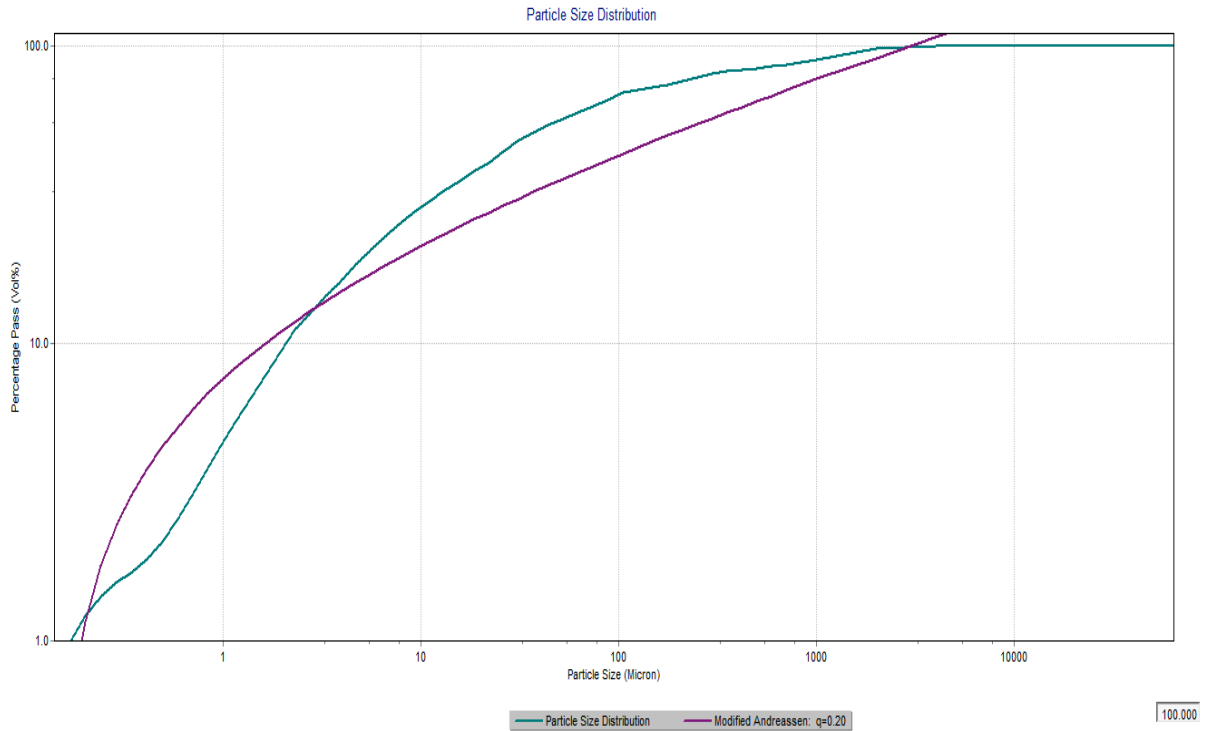
Πίνακας 5.13 Ποσότητες υλικών και ποσοστιαία αναλογία για τη σύνθεση S7.

Υλικά	Ποσότητα	Ποσοστό % κ.β.
Λατομική άμμος	300 g	30
Παιπάλη ξήρανσης	500 g	50
Microcement	200 g	20
Melflux	4 g	-
Microsilica	10 g	0.01
Tartaric acid	0.5 g	-
Νερό	100 mL	-

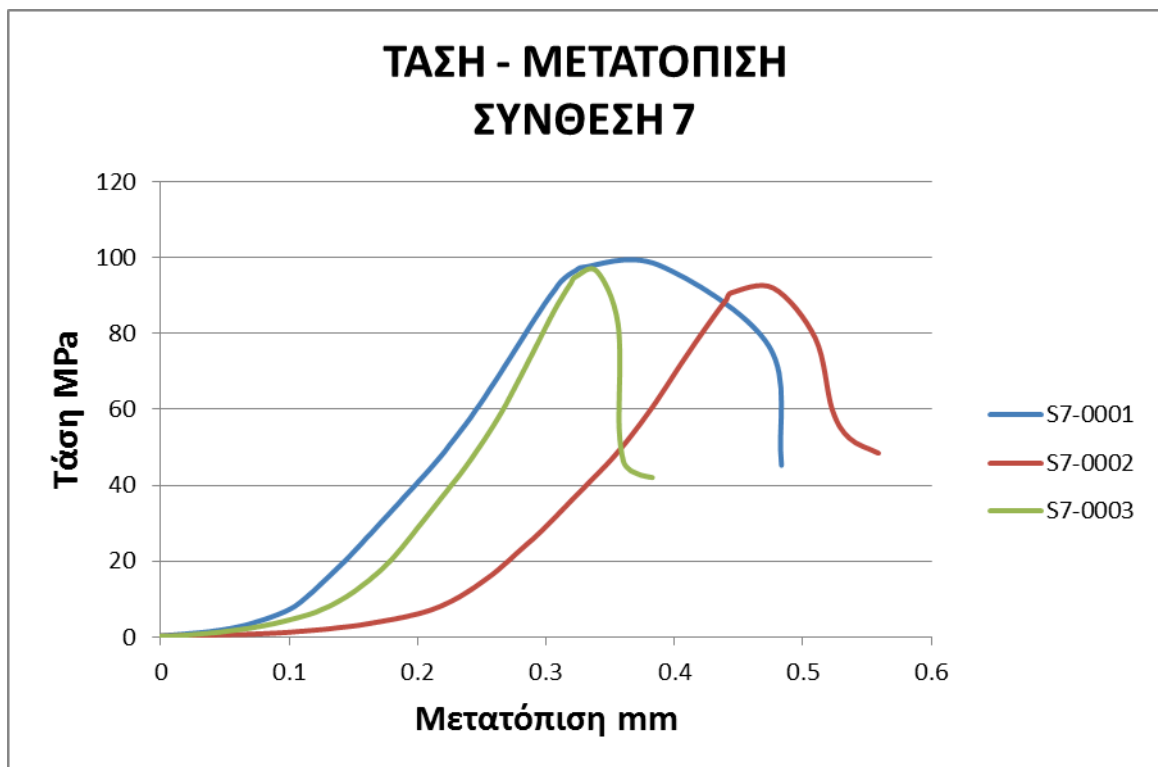
Πίνακας 5.14 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σύνθεσης S7.

Κώνος εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	10.6 cm
Συντελεστής κατανομής q κατά Andreassentης κοκκομετρίας των υλικών	0.20
Μέση πυκνότητα δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	2.26 g/cm ³
Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	95.42 MPa
Τυπική απόκλιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	3.14 MPa
Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	359 MPa
Τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας του Young των δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος	37.50 MPa

Σημείωση: Η διάμετρος του κώνου κάθισης είναι μικρότερη από το επιθυμητό. Ωστόσο κρίθηκε θεμιτό να σταματήσει η προσθήκη νερού στο μίγμα, αφού αυτό είχε καλή ροή και επίσης φαινόταν να μένει νερό στην επιφάνεια του μίγματος. Η υπόθεση για επάρκεια του νερού στο μίγμα επιβεβαιώνεται και από τη μέση αντοχή που αναφέρθηκε.



Σχήμα 5.13. Απαιτούμενη κατά Andreassen καμπύλη κοκκομετρίας (θεωρητική – μωβ καμπύλη) και πραγματικά επιτευχθείσα για τη σύνθεση S7 με χρήση του λογισμικού LISA (γαλάζια καμπύλη).



Σχήμα 5.14. Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης για τα τρία δοκίμια της σύνθεσης S7 (S7-0001, S7-0002, S7-0003).

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η αντοχή των δοκιμίων είναι μεγάλη και επίσης βλέπουμε ότι, αν και η απόκλιση μεταξύ τους είναι λίγο μεγαλύτερη από την απόκλιση της S6, δεν κρίνεται σημαντική. Το δοκίμιο S7-0001 φαίνεται να έχει αρκετά διαφορετική συμπεριφορά (παραμένουσα αντοχή) από τα άλλα ωστόσο η αντοχή του είναι εξίσου μεγάλη.

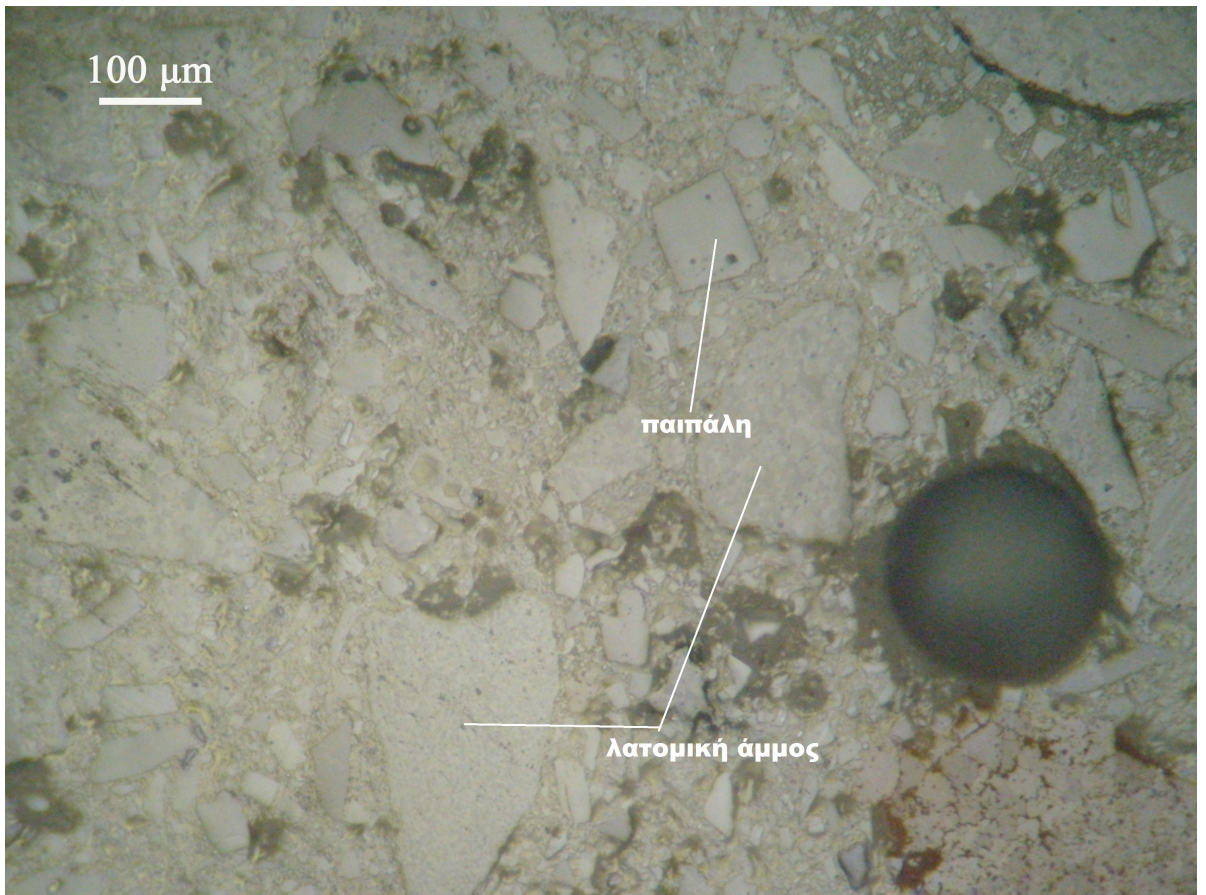
5.2. Μικροσκοπική εξέταση συνθέσεων S3,S5,S6

Οι συνθέσεις S3, S5 και S6 θεωρήθηκαν οι πιο ενδιαφέρουσες λόγω της συμμετοχής ή μη της παιπάλης αποκονίωσης και της διαφορετικής αναλογίας νερό / μικροτσιμέντο που κυμαίνεται από 0.6 (χαμηλή αναλογία) έως 0.97 (υψηλή αναλογία).

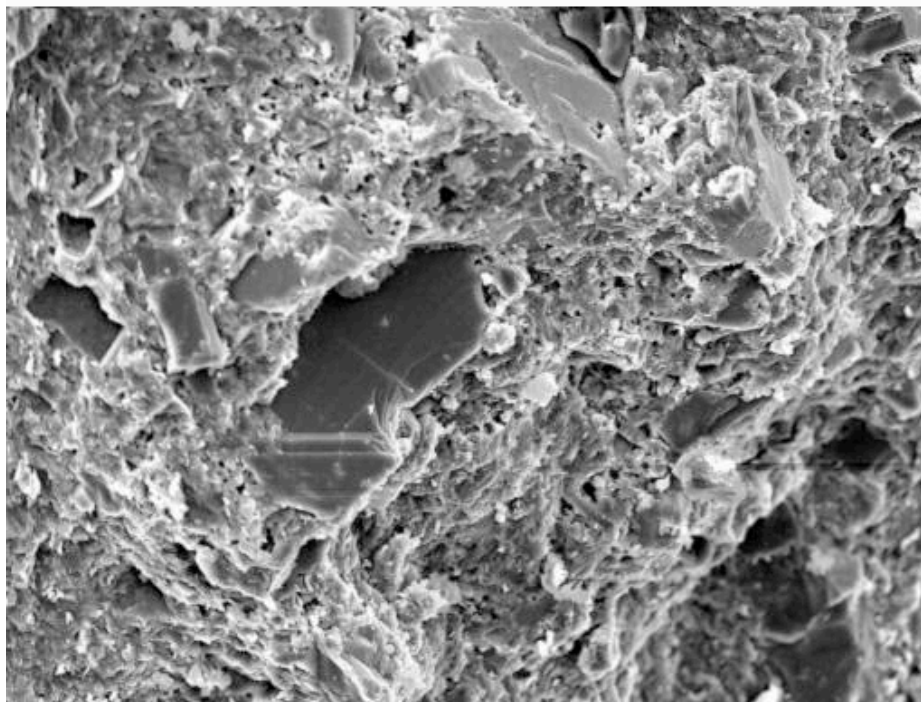
Σκοπός της μικροσκοπικής διερεύνησης ήταν να εξεταστεί πώς η μικροδομή των δοκιμίων (διάταξη κόκκων και συνδετικής κονίας) επηρεάστηκε από την πυκνότητα στοίβαξης, να εξεταστεί η ομοιογένεια του υλικού (κατανομή κόκκων και συνδετικής κονίας) και να ελεγχθεί έτσι η αποτελεσματικότητα της ανάμιξης των υλικών και της καλής ενυδάτωσης του μίγματος, και να εξεταστεί η μορφολογία και η κατανομή των κενών και η ύπαρξη εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρα.

- Σύνθεση S3

Η σύνθεση S3 ήταν η σύνθεση με τη μικρότερη αντοχή αλλά και με τη μικρότερη τυπική απόκλιση. Επίσης, είναι η σύνθεση με τη μεγαλύτερη αναλογία νερό / μικροτσιμέντο (0.97) από τις τρεις που εξετάστηκαν μικροσκοπικά. Γι' αυτούς τους λόγους εξετάστηκε στο μικροσκόπιο.



Σχήμα 5.15. Μικροφωτογραφία δείγματος S3 από πολωτικό μικροσκόπιο (ανωκλώμενο φως, // Nicols).



Σχήμα 5.16. Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης δείγματος S3.

Στη μικροφωτογραφία από το πολωτικό μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός (Σχήμα 5.15), διακρίνονται οι μεγαλύτερου σχετικά μεγέθους κόκκοι της παιπάλης (~10 – 100 μm), οι κόκκοι της λατομικής άμμου, οι φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα και η μάζα της συνδετικής κονιάς που αποτελείται από το μικροτσιμέντο και το λεπτομερές κλάσμα της παιπάλης (<10 μm).

Οι κόκκοι της παιπάλης είναι πρισματοειδούς μορφής, γωνιώδεις, γεγονός το οποίο δε διευκολύνει την πυκνότερη στοίβαξή τους και δυσχεραίνει τη ρεολογική ικανότητα του νωπού σκυροδέματος. Η κατανομή τους εντός της μάζας της συνδετικής κονιάς είναι σχετικά ομοιόμορφη ενώ οι διεπιφάνειες κόκκων – συνδετικής κονιάς δείχνουν ότι έχει επιτευχθεί ικανοποιητική σύμφυση ανάμεσά τους. Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές η ανάμιξη, ενυδάτωση και ωρίμανση της σύνθεσης S3 κρίνεται αρκετά καλή. Η ύπαρξη εγκλωβισμένου αέρα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα εφόσον η περιεκτικότητά του στο σκληρυμένο δοκίμιο

υπερβεί ένα κρίσιμο ποσοστό. Μικρές ποσότητες εγκλωβισμένου αέρα (έως 5-6%) δρουν ευνοϊκά αφού αυξάνουν την αντοχή του μικροσκυροδέματος σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας δεν έγινε υπολογισμός της περιεκτικότητας σε αέρα, προτείνεται όμως να γίνει σε ενδεχόμενη νέα διερεύνηση του προβλήματος.

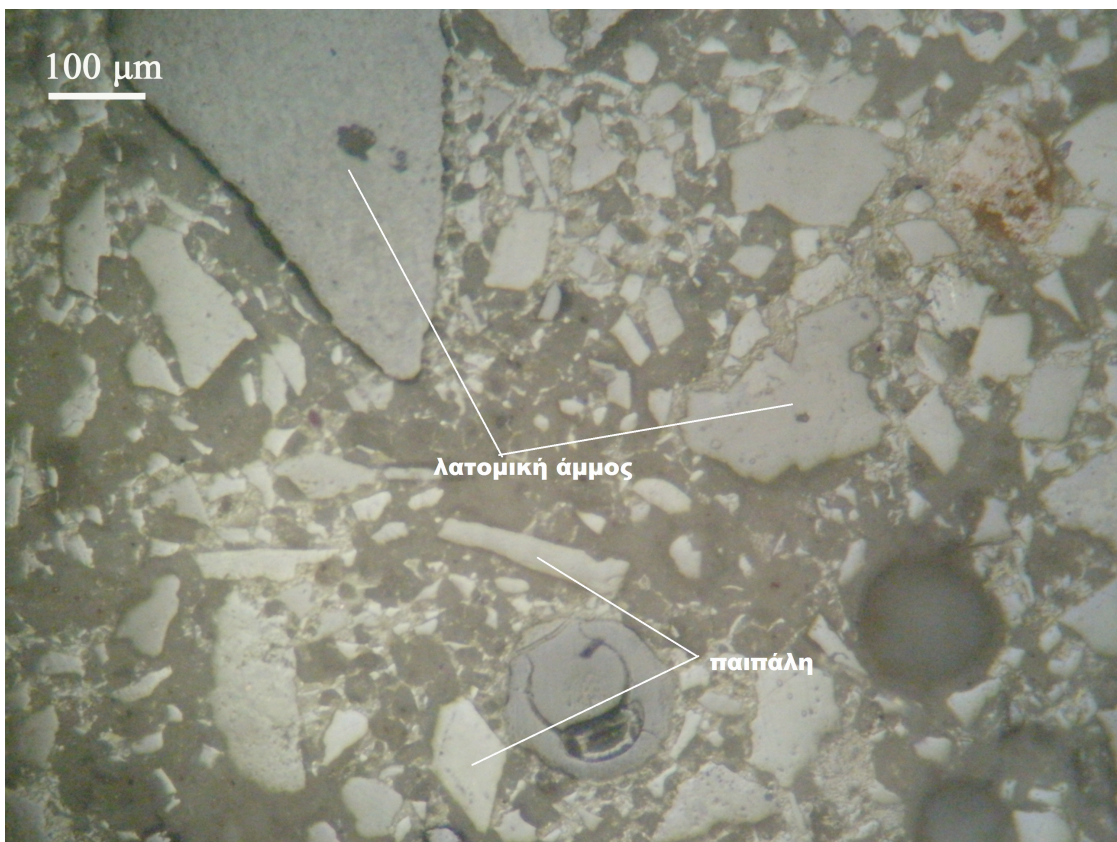
Στην εικόνα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Σχήμα 5.16) διακρίνεται ένας σχετικά μεγάλος κόκκος παιπάλης (~ 100 μm), κάποιιο μικρότερου μεγέθους κόκκοι παιπάλης καθώς και η συνδετική κονία που περιβάλλει τους κόκκους αυτούς.

Οι κόκκοι της παιπάλης που διακρίνονται είναι γωνιώδεις, όπως παρατηρήθηκε και στη μικροφωτογραφία από το πολωτικό μικροσκόπιο. Βλέπουμε ότι και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης επιβεβαιώνεται η αρχική παρατήρηση σχετικά με την καλή κατανομή της συνδετικής κονίας και των κόκκων της παιπάλης και της λατομικής άμμου.

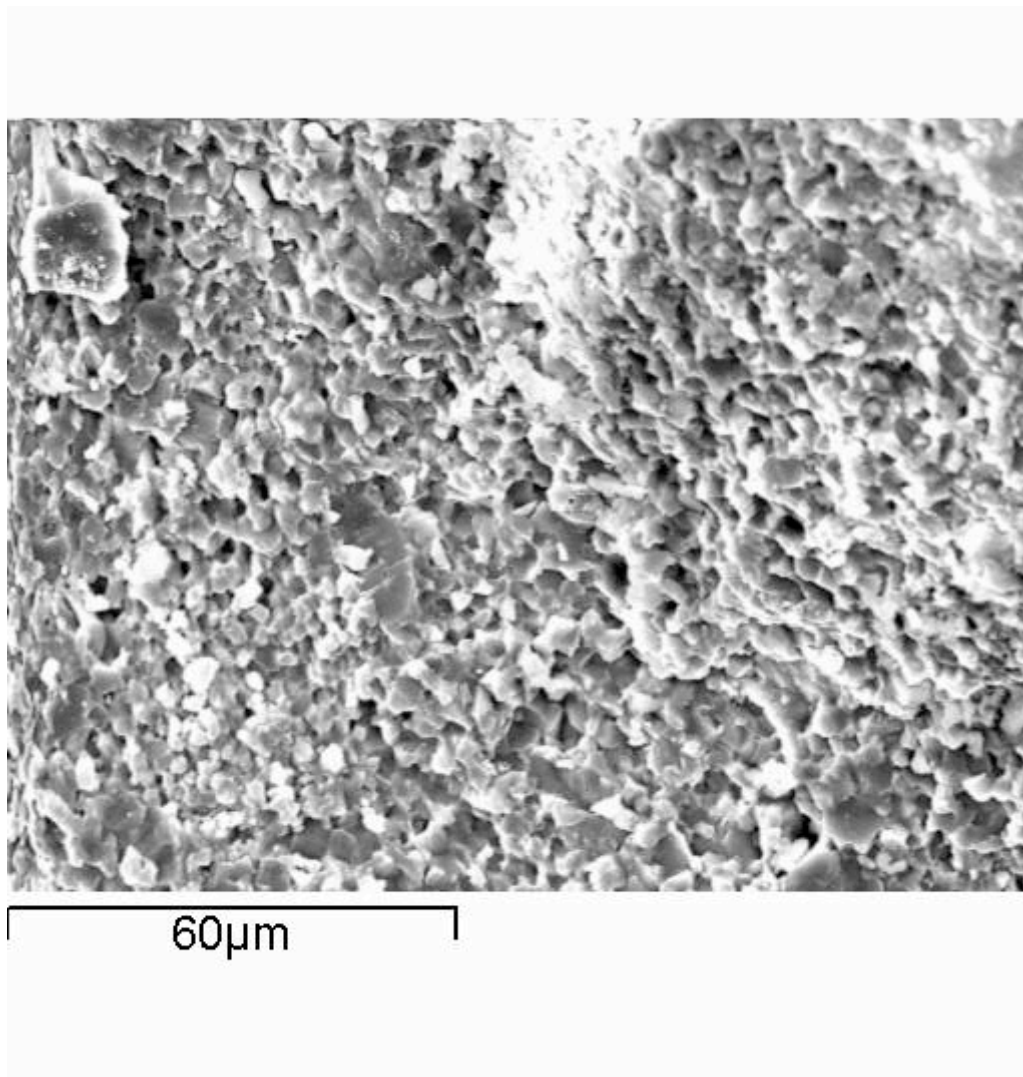
Από τη μελέτη και των δύο μικροφωτογραφιών καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ανάμιξη και η ενυδάτωση του μίγματος μικροσκυροδέματος κρίνεται ικανοποιητική.

- Σύνθεση S5

Η σύνθεση S5 είχε αρκετά καλή αντοχή και σχετικά μικρή απόκλιση μεταξύ των δοκιμίων. Επίσης είναι η μία από τις δύο συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη παιπάλης, ξήρανσης και αποκονίωσης. Η αναλογία νερό / μικροτσιμέντο ήταν 0.86. Παρακάτω παρουσιάζονται οι φωτογραφίες του πολωτικού (Σχήμα 5.17) και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (Σχήμα 5.18).



Σχήμα 5.17. Μικροφωτογραφία δείγματος S5 (ανακλώμενο φως, // Nicols).



Σχήμα 5.18. Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για το δείγμα S5.

Στη μικροφωτογραφία από το πολωτικό μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός της σύνθεσης S5 (Σχήμα 5.17) διακρίνονται αρκετοί κόκκοι παιπάλης και λατομικής άμμου σχετικά μεγάλου μεγέθους και η συνδετική κονία (μικροτσιμέντο, μικρότερο κλάσμα παιπάλης).

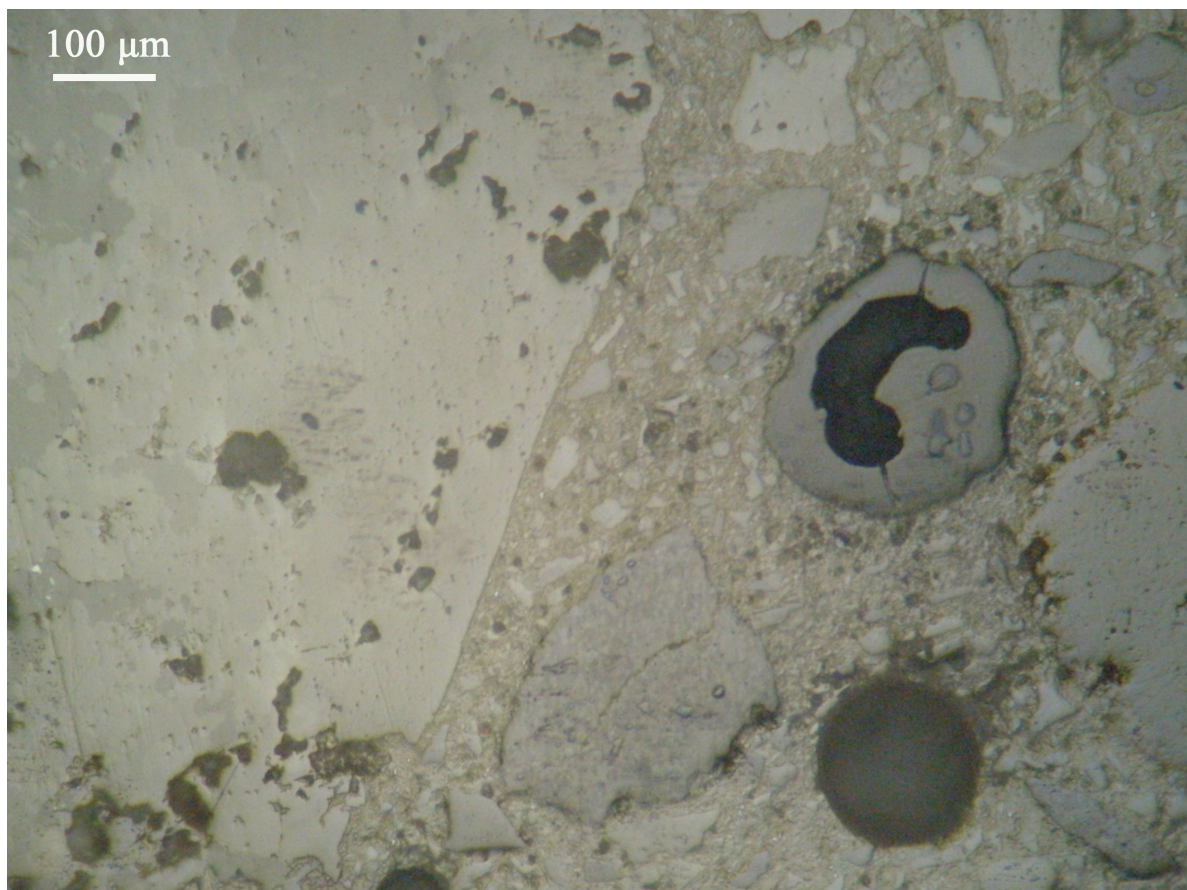
Και σ' αυτήν τη σύνθεση βλέπουμε ότι η πλειοψηφία των κόκκων είναι γωνιώδεις με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η πυκνή στοίβαξη του υλικού και η ρεολογική ικανότητα του νωπού μίγματος. Γενικά η κατανομή των κόκκων της παιπάλης και της λατομικής άμμου στη μάζα του συνδετικού υλικού κρίνεται ικανοποιητική.

Στην εικόνα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης βλέπουμε ένα σημείο του δείγματος στο οποίο επικρατεί η συνδετική κονία. Επίσης βλέπουμε ότι υπάρχουν αρκετά διαμήκη κενά στη μάζα του συνδετικού υλικού, ωστόσο το μέγεθός τους δε φαίνεται να ξεπερνά τα 5 μm.

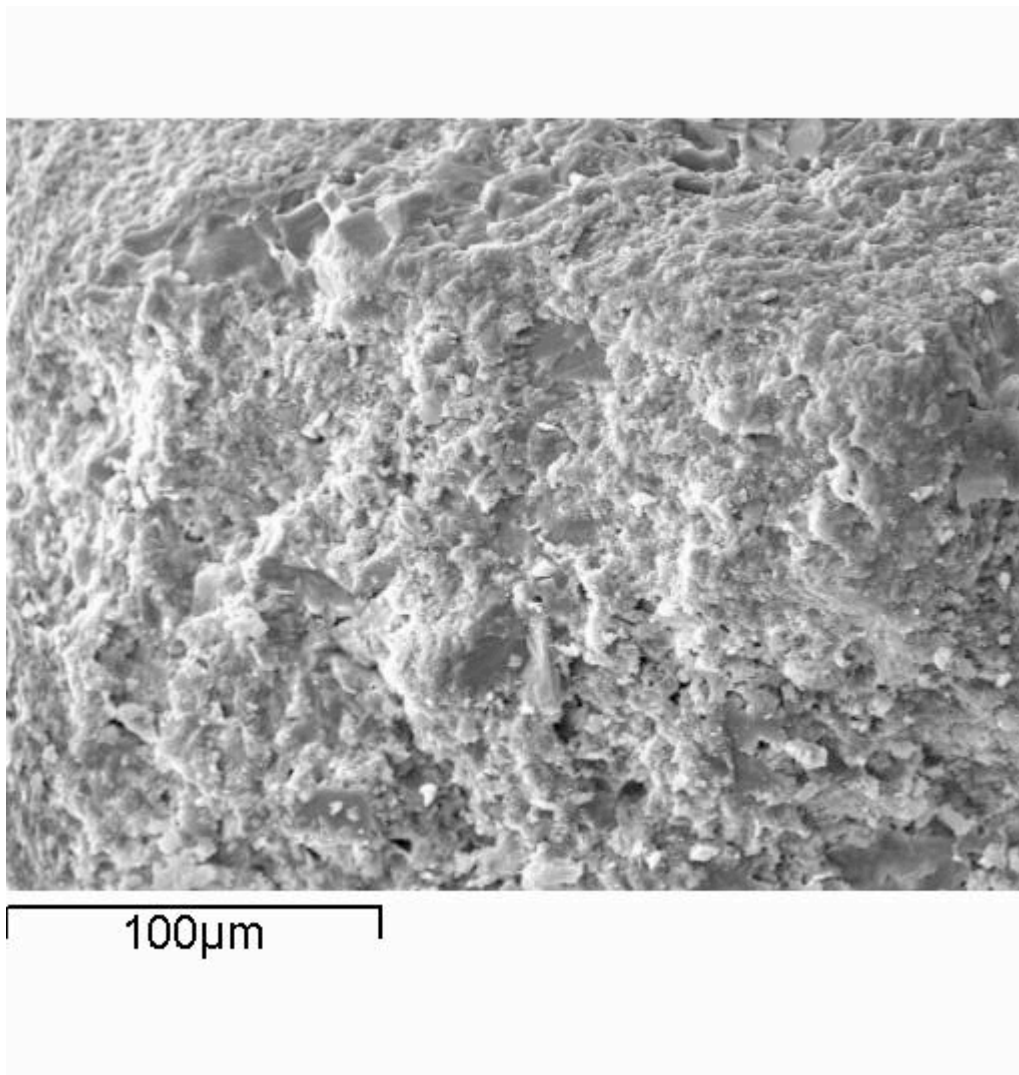
Τελικά, συμπεραίνουμε ότι το μίγμα του μικροσκυροδέματος αναμίχθηκε και ενυδατώθηκε ικανοποιητικά.

- Σύνθεση S6

Η σύνθεση S6 είναι η σύνθεση με τη μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Επίσης είναι η δεύτερη σύνθεση στην οποία χρησιμοποιήθηκε παιπάλη αποκονίωσης και η αναλογία νερό / μικροτσιμέντο είναι η μικρότερη από τις τρεις που εξετάστηκαν μικροσκοπικά (0.6).



Σχήμα 5.19. Μικροφωτογραφία δείγματος S6 από πολωτικό μικροσκόπιο (ανακλώμενο φως, // Nicols).



Σχήμα 5.20. Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για το δείγμα S6.

Στη μικροφωτογραφία από το πολωτικό μικροσκόπιο (Σχήμα 5.19) βλέπουμε ένα μεγάλο κόκκο, πιθανότατα της λατομικής άμμου, κόκκους της παιπάλης καθώς και τη συνδετική κονία.

Και στη σύνθεση S6 παρατηρούμε ότι οι κόκκοι είναι γωνιώδεις. Ωστόσο, βλέπουμε ότι η κατανομή τους σε σχέση με την συνδετική κονία είναι αρκετά καλή. Επίσης, οι διεπιφάνειες κόκκων – συνδετικής κονίας δείχνουν αρκετά καλή σύμφυση μεταξύ τους.

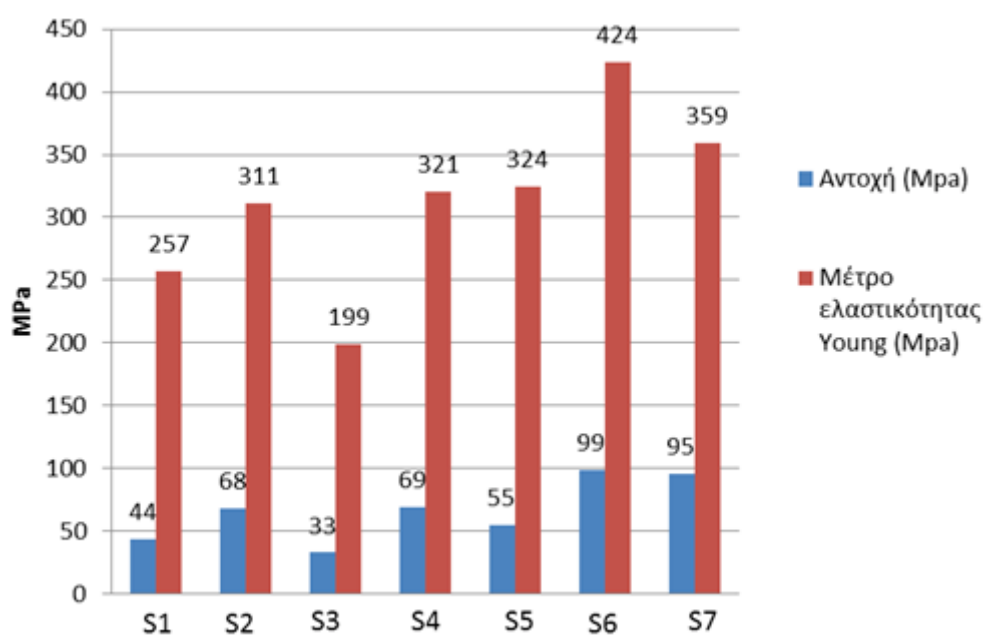
Στην εικόνα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης βλέπουμε και πάλι ότι κυριαρχεί η συνδετική κονία, ωστόσο διακρίνονται αρκετοί κόκκοι της παιπάλης και

κάποια κενά. Οι κόκκοι που βλέπουμε είναι γωνιώδεις, ενώ τα κενά είναι κυρίως διαμήκη και μικρού μεγέθους.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι και σε αυτήν τη σύνθεση η ανάμιξη και ενυδάτωση του μίγματος ήταν αρκετά καλή.

5.3. Συσχέτιση αναλογιών των συνθέσεων με τις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Ο συνολικός πίνακας των στοιχείων των δοκιμίων, στον οποίο παρουσιάζονται οι αντοχές κάθε σύνθεσης ξεχωριστά, η πυκνότητα, οι αναλογίες της σύνθεσής τους, το μέτρο ελαστικότητας Young δίνεται παρακάτω, όπως επίσης και ένας συνοπτικός πίνακας με τις αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας των συνθέσεων.



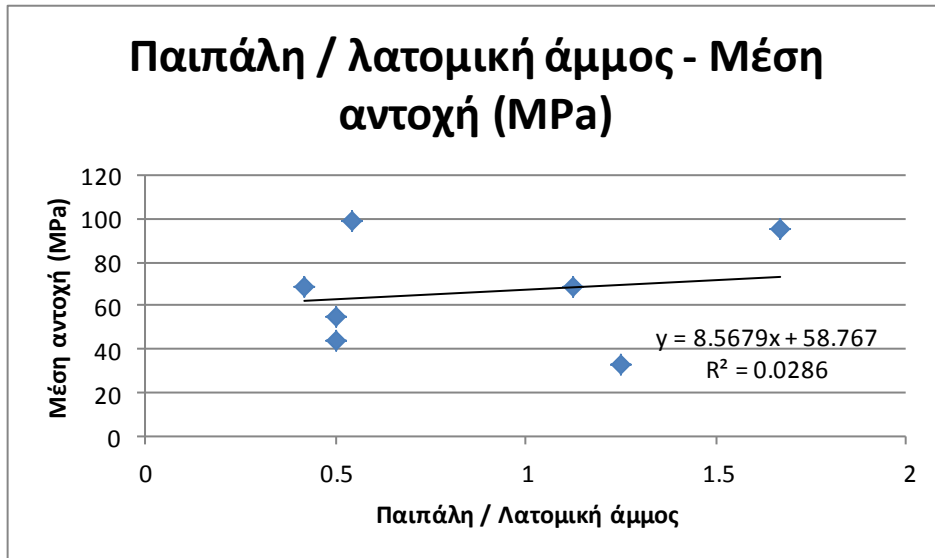
Σχήμα 5.21. Συνολικός πίνακας αντοχών (MPa) – μέτρων ελαστικότητας Young (MPa).

Πίνακας 5.15. Συνολικός πίνακας στοιχείων δοκιμίων.

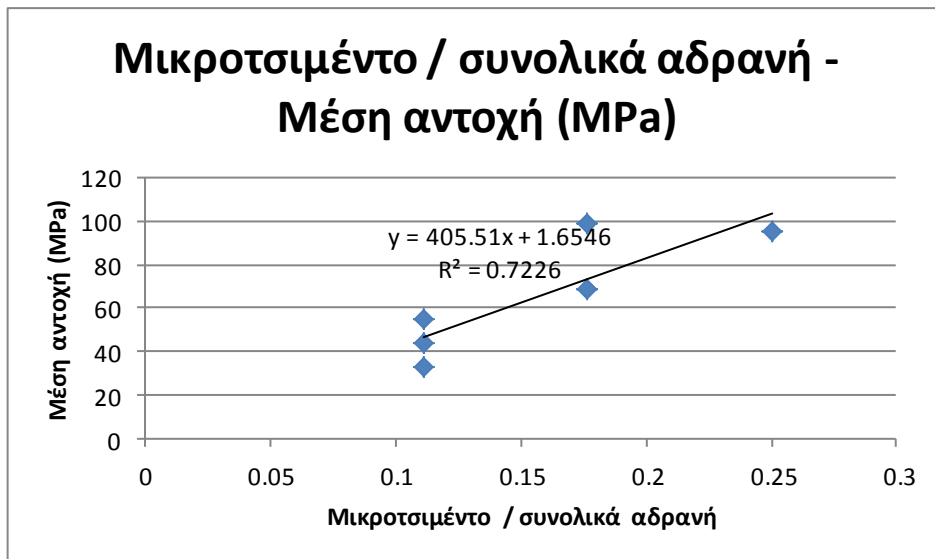
A/A	Λατομική άμμος / συνολικά αδρανή	Παιπάλη ξήρανσης / συνολικά αδρανή	Νερό / MC	MC/ αδρανή	MS / MC	Υπερρευστοποιητής / στερεά	Πυκνότητα	Μέση αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young (MPa)
S1	0.6667	0.3333	1.0000	0.1111	0.0500	0.0040	2.3900	43.7342	257.0000
S2	0.7059	0.2941	0.6000	0.1765	0.0500	0.0040	2.3867	68.3946	311.0000
S3	0.4444	0.5556	0.9700	0.1111	0.0500	0.0040	2.3167	32.9080	199.0000
S4	0.4706	0.5294	0.6533	0.1765	0.0500	0.0040	2.3267	68.7569	320.6667
S5	0.6667	0.2222	0.8700	0.1111	0.0500	0.0040	2.3500	54.9372	324.3333
S6	0.6471	0.2353	0.6000	0.1765	0.0500	0.0040	2.3900	98.6501	423.6667
S7	0.3750	0.6250	0.5000	0.2500	0.0500	0.0040	2.2634	95.4284	359.0000

*MC = μικροτσιμέντο (microcement) , MS = πυριτική παιπάλη (microsilica) , υπερρευστοποιητής = melflux

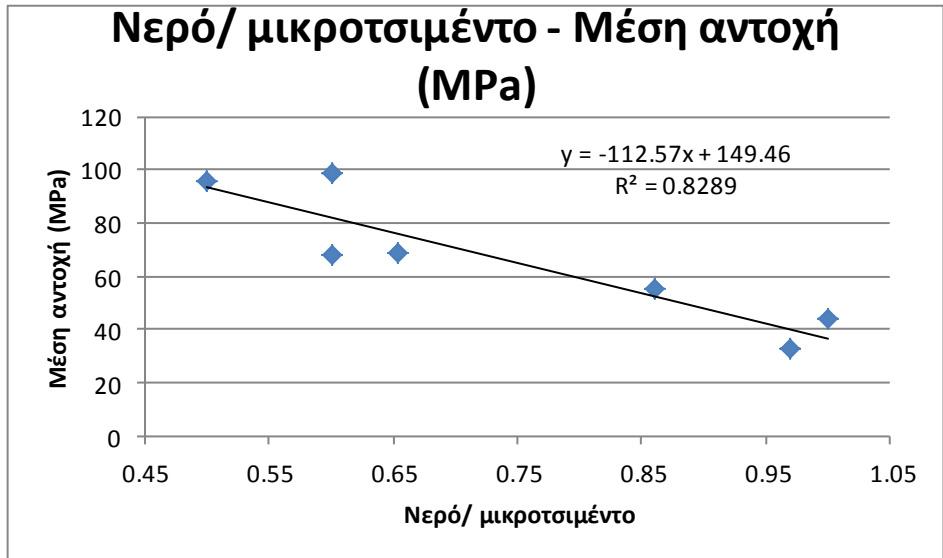
Κρίθηκε απαραίτητο να υπάρξει περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκειμένου να συσχετιστεί η επιρροή του ποσοστού κάθε συστατικού και της κάθε ιδιότητας του νωπού σκυροδέματος στην τελική αντοχή των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης είναι τα διαγράμματα 5.21 έως 5.27, στα οποία απεικονίζονται οι γραμμικές τάσεις, και δίνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις και οι συντελεστές συσχέτισης R^2 .



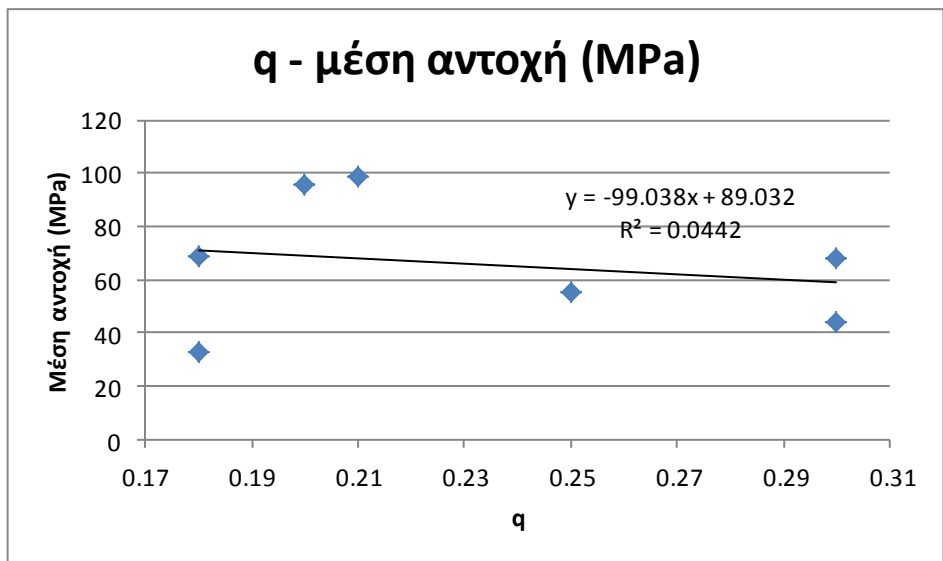
Σχήμα 5.22. Συσχέτιση αναλογίας παιπάλη / λατομική άμμος – μέσης αντοχής (MPa) .



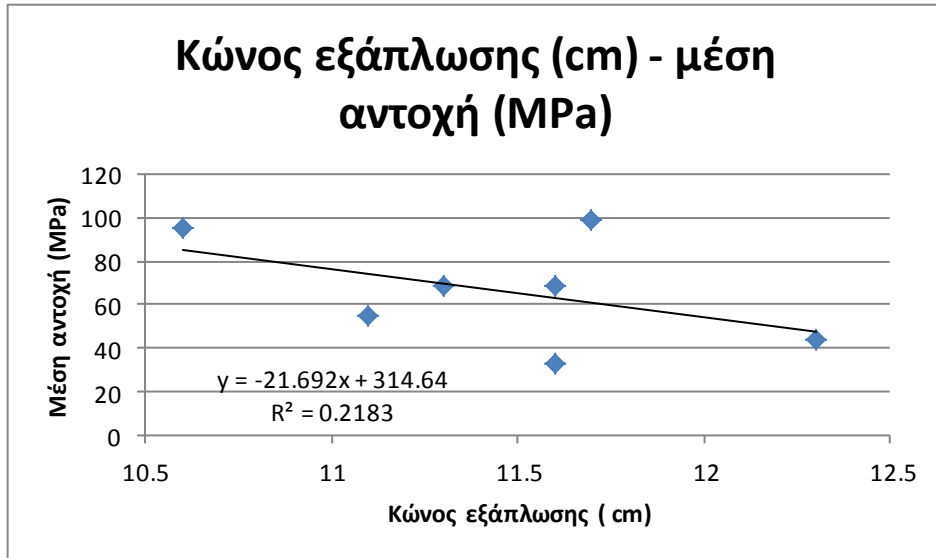
Σχήμα 5.23. Συσχέτιση αναλογίας μικροτσιμέντο / συνολικά αδρανή – μέσης αντοχής (MPa).



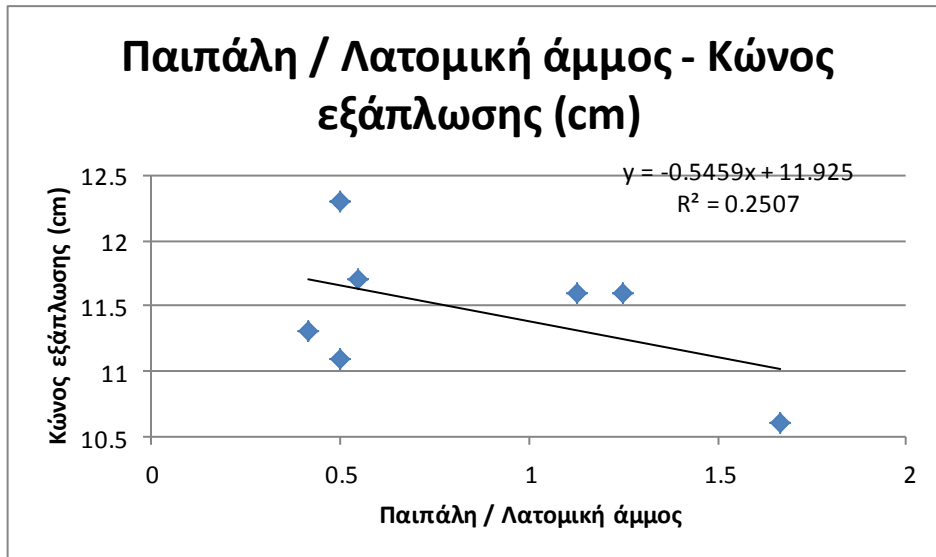
Σχήμα 5.24. Συσχέτιση αναλογίας νερού / μικροτσιμέντο – μέσης αντοχής (MPa).



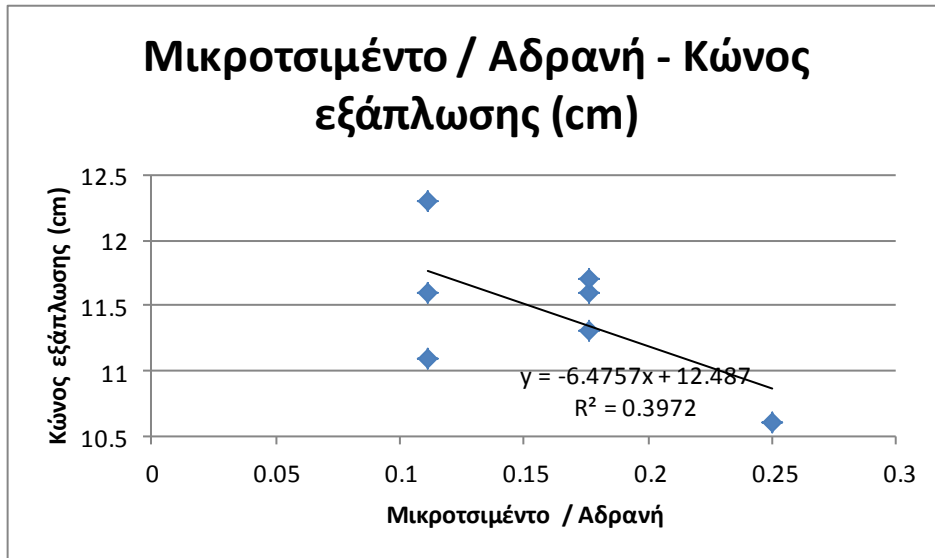
Σχήμα 5.25. Συσχέτιση συντελεστή κατανομής q – μέσης αντοχής (MPa).



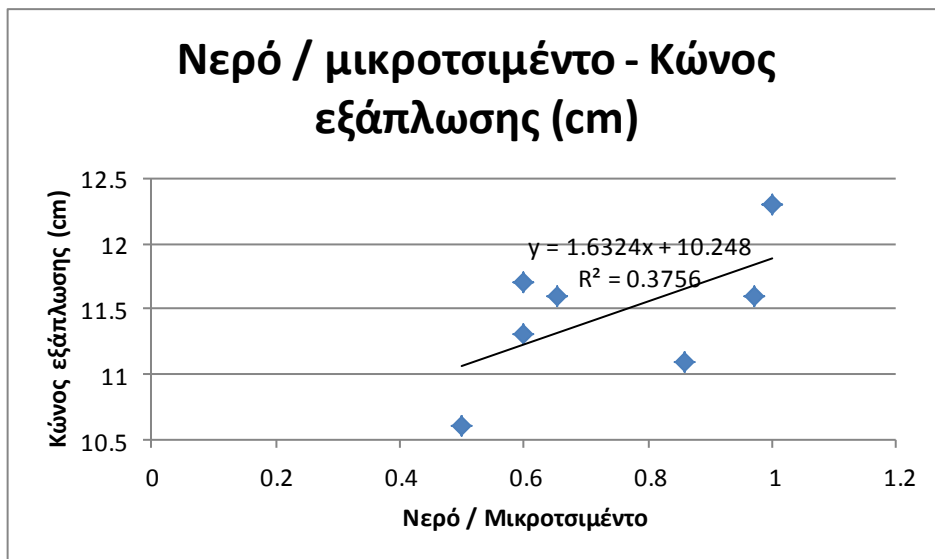
Σχήμα 5.26. Συσχέτιση κώνου εξάπλωσης – μέσης αντοχής (MPa).



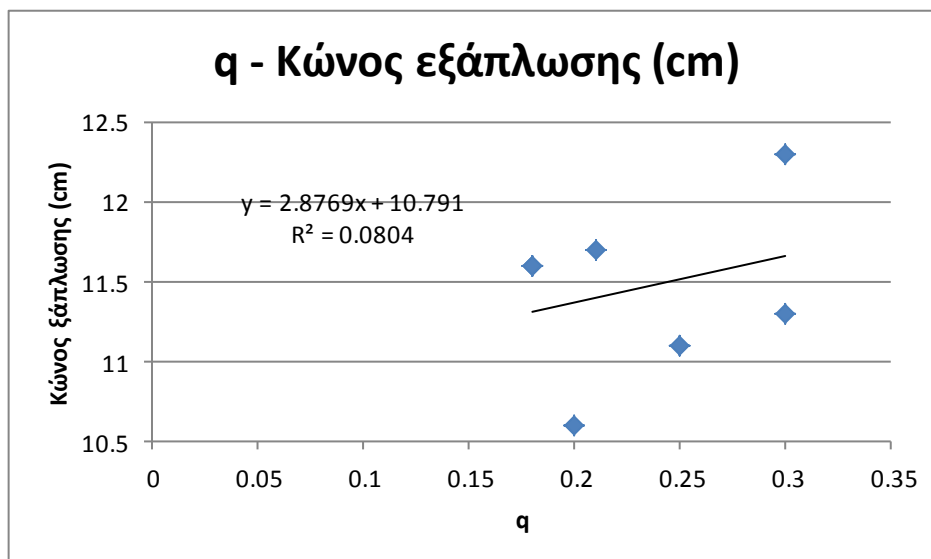
Σχήμα 5.27. Συσχέτιση παιπάλης / λατομική άμμος – κώνου εξάπλωσης (cm).



Σχήμα 5.28. Συσχέτιση μικροτσιμέντου / αδρανή – κώνου εξάπλωσης (cm).



Σχήμα 5.29. Συσχέτιση νερού / μικροτσιμέντο – κώνου εξάπλωσης (cm).



Σχήμα 5.30. Συσχέτιση q – κώνου εξάπλωσης (cm).

Ο συντελεστής R^2 , που φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα αποτελεί μέτρο του κατά πόσο η συσχέτιση μεταξύ της εξεταζόμενης αναλογίας ή ιδιότητας και της μέσης αντοχής ή του κώνου εξάπλωσης είναι ισχυρή ή όχι. Έχει αναφερθεί παραπάνω ότι μια ισχυρή συσχέτιση υποδεικνύεται από τιμές του R^2 κοντά στη μονάδα, ενώ όσο η τιμή αυτή πλησιάζει στο μηδέν η συσχέτιση, από στατιστική άποψη, είναι ανύπαρκτη. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να αναλύσουμε τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων ως εξής:

Στο σχήμα 5.22 βλέπουμε τη συσχέτιση μεταξύ της αναλογίας παιπάλης/λατομική άμμος – μέσης αντοχής. Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι πολύ μικρός και δεν επηρεάζει την τελική αντοχή του σκληρυμένου σκυροδέματος. Επίσης, στο σχήμα 5.27 βλέπουμε τη συσχέτιση της ίδιας αναλογίας με τον κώνο εξάπλωσης. Και σ' αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει σημαντική συσχέτιση.

Στην περίπτωση του σχήματος 5.23 (μικροτσιμέντο / συνολικά αδρανή – μέση αντοχή) βλέπουμε ότι η συσχέτιση είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Ο συντελεστής R^2 είναι αρκετά μεγάλος ($R^2 = 0,72$). Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι μία αύξηση του λόγου μικροτσιμέντο / συνολικά αδρανή από 0.12 σε 0.25 οδηγεί σε μία αύξηση της μέσης αντοχής κατά 50 περίπου MPa. Γενικά βλέπουμε ότι οι χαμηλές αναλογίες μικροτσιμέντο / συνολικά στερεά (~0.12) οδηγούν σε αντοχές μέχρι 58 MPa ενώ η

αύξησή της οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της μέσης αντοχής. Αντίστοιχα, στο σχήμα 5.28 βλέπουμε τη συσχέτιση της αναλογίας μικροτσιμέντο / αδρανή με τον κώνο εξάπλωσης. Και πάλι το R^2 είναι αρκετά μικρό ($R^2 = 0,40$) και δεν μπορούμε να καταλήξουμε αν επηρεάζει ή όχι η συγκεκριμένη αναλογία το μέγεθος του κώνου εξάπλωσης.

Στο σχήμα 5.24 απεικονίζεται η συσχέτιση της αναλογίας νερό / μικροτσιμέντο – μέσης αντοχής. Ο συντελεστής R^2 είναι μεγαλύτερος σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες συσχετίσεις ($R^2 = 0.83$). Η τιμή αυτή κρίνεται ένδειξη σημαντικής σχέσης μεταξύ των δύο μεγεθών. Βλέπουμε ότι η μείωση της αναλογίας συνδέεται με αυξημένη μέση αντοχή. Οι τιμές αναλογίας κοντά στη μονάδα δίνουν αντοχές μέχρι 45 MPa περίπου ενώ προσεγγίζοντας το 0.5 οι αντοχές αυξάνονται μέχρι τα 95 MPa. Επίσης στο σχήμα 5.29 βλέπουμε τη συσχέτιση της αναλογίας με τον κώνο εξάπλωσης. Ο συντελεστής R^2 είναι μικρός ($R^2 = 0.38$) και δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος του κώνου.

Τέλος, στα σχήματα 5.25, 5.26 και 5.30 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια άμεση σχέση μεταξύ του συντελεστή κατανομής και του κώνου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος με την τελική αντοχή των δοκιμίων, όπως επίσης και του συντελεστή κατανομής με τον κώνο εξάπλωσης. Οι συντελεστές R^2 δείχνουν ότι δεν υπάρχει κάποια στατιστική συσχέτιση μεταξύ αυτών των μεγεθών.

Κεφάλαιο 6°. Συμπεράσματα – προτάσεις

Στην παρούσα εργασία έγινε διερεύνηση υπερλεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων, κυρίως όσον αφορά την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Πιο συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια να εξαχθεί ένα νομόγραμμα που να συσχετίζει την κοκκομετρία των υλικών αυτών, καθώς και του μικροτσιμέντου, με την ειδική τους επιφάνεια. Τα αποτελέσματα από αυτήν τη διαδικασία κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά καθώς φάνηκε ότι υπάρχει μεγάλη συνάφεια ανάμεσα στην κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών και της ειδικής τους επιφάνειας.

Επίσης εξετάστηκε πειραματικά σε εργαστηριακή κλίμακα η δυνατότητα παραγωγής ειδικών δομικών στοιχείων από υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα, γνωστά ως παιπάλη. Τα δομικά αυτά στοιχεία σε μορφή εργαστηριακών κυβικών δοκιμίων παρήχθησαν με χύτευση ενός ειδικού τύπου μικροσκυροδέματος που παρασκευάστηκε εργαστηριακά. Χρησιμοποιήθηκαν μικροτσιμέντο, λατομική άμμος, ποσότητες παιπάλης μαρμάρου διαφορετικής κοκκομετρίας καθώς επίσης και διάφορα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής του κοινού σκυροδέματος. Με τα συστατικά αυτά, σε διαφορετικές αναλογίες κάθε φορά, παρασκευάστηκαν επτά (7) διαφορετικές συνθέσεις μικροσκυροδέματος. Ο σχεδιασμός των συνθέσεων των μιγμάτων έγινε με χρήση της τροποποιημένης εξίσωσης Andreassen, η οποία υπολογίζει τη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση μιγμάτων σκυροδέματος με πολύ λεπτόκοκκα υλικά. Βασικές παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη ήταν , ο συντελεστής κατανομής και το μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κόκκου που συμμετέχουν στη σύνθεση. Ο έλεγχος του νωπού μικροσκυροδέματος και των σκληρυμένων δοκιμίων έδειξε ότι:

- Η παράμετρος της κοκκομετρικής κατανομής q κατά Andreassen δε φάνηκε να διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των παραχθέντων δοκιμίων. Η αύξησή του δεν οδήγησε σε αυξημένη μηχανική αντοχή και η μείωσή του δεν οδήγησε σε αυξημένο μέγεθος κώνου εξάπλωσης.

- Η αναλογία παιπάλη / λατομική άμμος επίσης δε φαίνεται να έχει κάποια σημαντική επίδραση στην τελική αντοχή των δοκιμίων , ούτε στη ρεολογική ικανότητα του νωπού μικροσκυροδέματος.
- Οι αναλογίες μικροτσιμέντο / συνολικά αδρανή φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές αντοχές του σκληρυμένου μικροσκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου αυτού επιδρά θετικά στην τελική αντοχή. Σε σχέση με τη ρεολογική ικανότητα δε φαίνεται να υπάρχει κάποια αξιόλογη συσχέτιση.
- Όσον αφορά τη λατομική άμμο, στις αναλογίες και στις ποσότητες που χρησιμοποιήθηκε δεν επηρεάζει την τελική αντοχή του σκυροδέματος. Ωστόσο, η χρήση της συνολικά αύξησε σημαντικά τη μηχανική αντοχή των δοκιμίων καθώς σε σχέση με προηγούμενες εργασίες (Πιπερίδη , 2012) παρατηρούνται αντοχές πολύ μεγαλύτερες (μεγαλύτερες των 32 MPa με μέγιστες στα 98 MPa, σε σύγκριση με 50 MPa μέγιστο).
- Η αναλογία νερό / μικροτσιμέντο φάνηκε να έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην τελική αντοχή του σκληρυμένου μικροσκυροδέματος. Η μείωσή της βελτιώνει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων. Ωστόσο , ούτε αυτή είχε κάποια άμεση επίδραση στη ρεολογική ικανότητα του νωπού μίγματος.
- Σχετικά με τη ρεολογική ικανότητα του νωπού σκυροδέματος, μπορούμε να πούμε ότι καμία από τις αναλογίες και ιδιότητες που εξετάστηκαν δεν την επηρεάζει σημαντικά. Είναι πιθανό, ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη ρεολογική ικανότητα να είναι το σχήμα των κόκκων που συμμετέχουν στη σύνθεση, όμως αυτό δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.
- Εξετάζοντας τη μικροδομή των δοκιμίων συμπεραίνουμε ότι η καλή ανάμιξη και ενυδάτωση των μιγμάτων οδηγεί γενικά σε σταθερή συμπεριφορά του σκληρυμένου μικροσκυροδέματος, χωρίς μεγάλη απόκλιση στην αντοχή μεταξύ των διαφορετικών δοκιμίων της ίδιας σύνθεσης.

- Όσον αφορά την πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παρασκευής δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα στο οποίο συμμετέχουν υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα είναι γενικά θετικά. Οι κανονισμοί ορίζουν τη χρήση σκυροδέματος χαρακτηριστικής αντοχής τουλάχιστον 20 MPa για φέροντα δομικά στοιχεία. Το συγκεκριμένο όριο αντοχής ικανοποιούν ή και ξεπερνούν όλες οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, αφού κυμαίνονται από 33 – 98 MPa.

Προκειμένου σε επόμενες εργασίες να εξαχθούν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα προτείνεται κυρίως η χρήση δονούμενων τραπεζών κατά τη χύτευση των δοκιμίων. Μ' αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να αποφευχθεί η ανομοιομορφία στη μηχανική αντοχή των δοκιμίων της ίδιας σύνθεσης, καθώς η χύτευση γίνεται πιο ελεγχόμενα.

Τα δοκίμια που θα παρασκευαστούν πρέπει να υποβληθούν σε δοκιμασίες υδατοαπορρόφησης, σε κύκλους ψύξης – απόψυξης καθώς και σε τεχνητή γήρανση. Επίσης, προτείνεται να γίνουν δοκιμές σε δοκίμια εμπορικών σχημάτων και διαστάσεων δομικών στοιχείων, προκειμένου να είναι άμεση η σύγκριση των ιδιοτήτων με τα οριζόμενα από τη νομοθεσία.

Τέλος, σχετικά με τη μέτρηση της ειδικής επιφάνειας λεπτόκοκκων υλικών και τη συσχέτισή τους με τις κοκκομετρικές καμπύλες τους έχουμε αρκετά καλά αποτελέσματα. Για λόγους αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, όμως, πρέπει να μετρηθούν περισσότερα υλικά, τα οποία να καλύπτουν ένα μεγαλύτερο εύρος κοκκομετρίας και ειδικής επιφάνειας.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- Αγιουτάντης Ζ. (2002), Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΊΩΝ, Αθήνα
- Ασπρούδη Θ. Σοφία (2008), Ποιοτικά χαρακτηριστικά λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων και διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης τους, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Βαρβάρης Ι. (2010), Πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος από λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Βορρίση Ε. (2012), Αξιοποίηση απορριμμάτων κοπής μαρμάρου και ασβεστολιθικών αδρανών σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, Μεταπτυχιακή εργασία, Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (1997), ΦΕΚ 315
- Λεβεντάκης Κ. (2009), Σχεδιασμός ποιότητας ειδικών δομικών στοιχείων βασισμένων σε υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Οικονομόπουλος Α. (2001), Έλεγχος ρύπανσης νερών, Πρόχειρες πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Κρήτη
- Πιπερίδη Χ. (2012), Χαρακτηρισμός λατομικής παιπάλης και πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της για παραγωγή δομικών στοιχείων, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

- Σταμπολιάδης Η. (2004), Μηχανική των Τεμαχιδίων, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Τ.Ε.Ε., 1997, Εκτίμηση της κατηγορίας αντοχής του σκυροδέματος υφιστάμενων κατασκευών, Εγκύκλιος Ε7, Ενημερωτικό Δελτίο Τ.Ε.Ε. , Τεύχος 1964

Ξενογλώσση

- S.L. Colston, D. O' Connor, P. Barnes, E. L. Mayes, S. Mann, H. Freimuth, W. Ehrfeld, 2000, Functional Micro – concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano – particles into cement micro – structures, Journal of Materials Science Letters 19, Kluwer Academic Publishers, p.p. 1085 - 1088
- Felekoglu B. (2005), Effects of PSD and surface morphology of micro – aggregates on admixture requirement and mechanical performance of microconcrete, Cement and Concrete Composite, Turkey, p.p. 1-4
- Felekoglu B. , 2007, Effects of PSD and surface morphology of micro – aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro – concrete, Cement & Concrete Composite, Turkey, p.p. 481 - 489
- Galetakis M. and Leventakis K. , 2009, Characterisation of quarry fines for construction recycling uses, Proc. of 3rd International Symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG), Athens, Greece, p.p. 131 -137
- Galetakis M., Alevizos G., Leventakis K., 2011, Evaluation of fine limestone quarry by – products, for the production of building elements – An experimental approach, Construction and Building Materials, p.p. 1 – 9
- Leventakis K. , Galetakis M. , Alevizos G. , 2009, Utilization of fine quarry by – products for production of building elements by extrusion – an

experimental approach, Proc. of 3rd International Symposium on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG), Athens, Greece, p.p. 265 – 271

- Myhre B., Let's make a castable, Elkem Materials, Norway, pp. 2-3
- Touahamia M., Sivakumar V. ,McKelvey D. (2002), Shear strength of reinforced recycled material, Construction and Building Materials, 16, p.p. 331 – 339
- Reinhard Wendehorst (2009), Δομικά Υλικά, 3^η έκδοση, Μ. Γκιούρδας, Αθήνα

Πρότυπα

- ASTM C204 – 00: Standard Test Method for fineness of Hydraulic Cement by Air – permeability apparatus, American Association State Highway and Transportation Officials Standard, AASHTO No T153

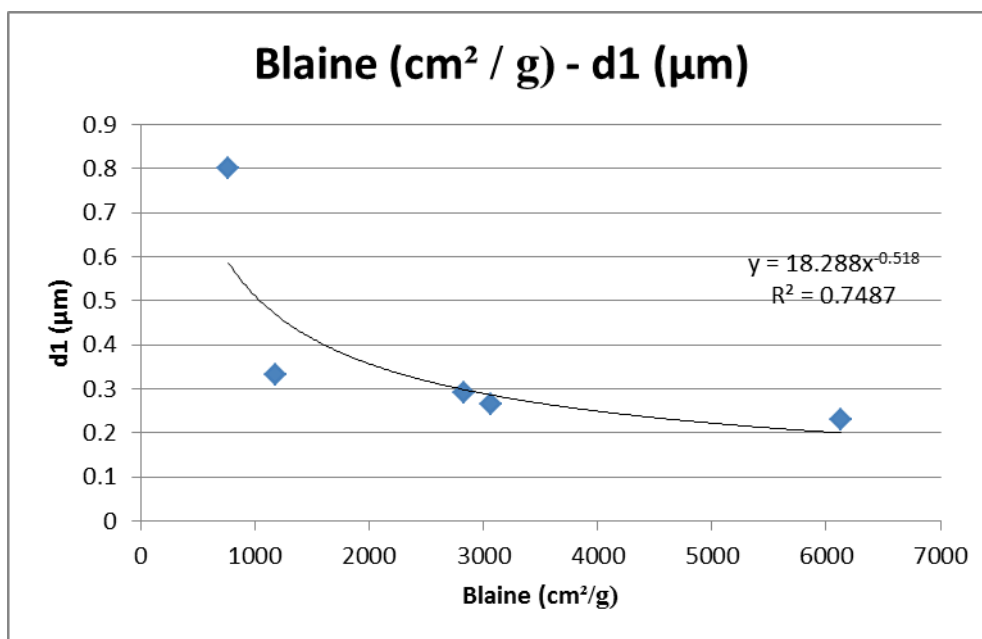
Διαδικτυακές πηγές

- Ασπирτάκης Ι. , Βροντάκης Κ., Γαλετάκης Μ. , Όλες οι σκόρες δεν είναι ίδιες: η σκόνη κρυσταλλικού διοξειδίου του πυριτίου: απειλή για την υγεία των εργαζομένων, διαθέσιμο στο www.ergoprolipsis.gr
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2011, Ετήσια στοιχεία μεταλλείων – λατομείων 2011, Αθήνα, διαθέσιμο στο www.latomet.gr
- BASF Global , διαθέσιμη στο www.basf.com
- Eylullab, διαθέσιμη στο en.eylullab.com
- Indiamart , διαθέσιμη στο www.indiamart.com

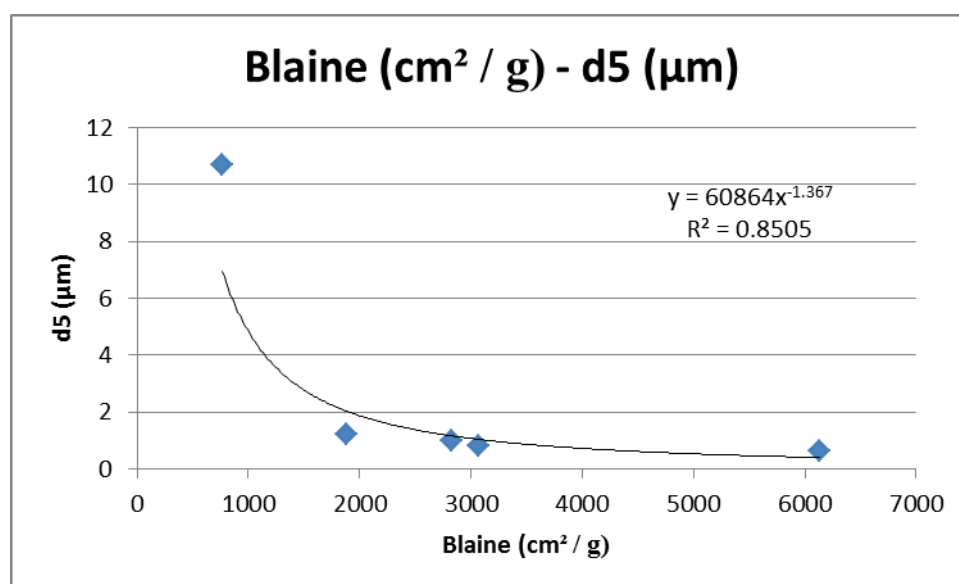
- T. Hirschi, H. Knauber, M. Lanz, J. Schlumpf, J. Schrabach, C. Spirig, U. Waeber (2007), Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika , www.sika.gr
- Qingdao ICD Biochemistry Co., Ltd. , διαθέσιμη στο www.icdbiochem.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

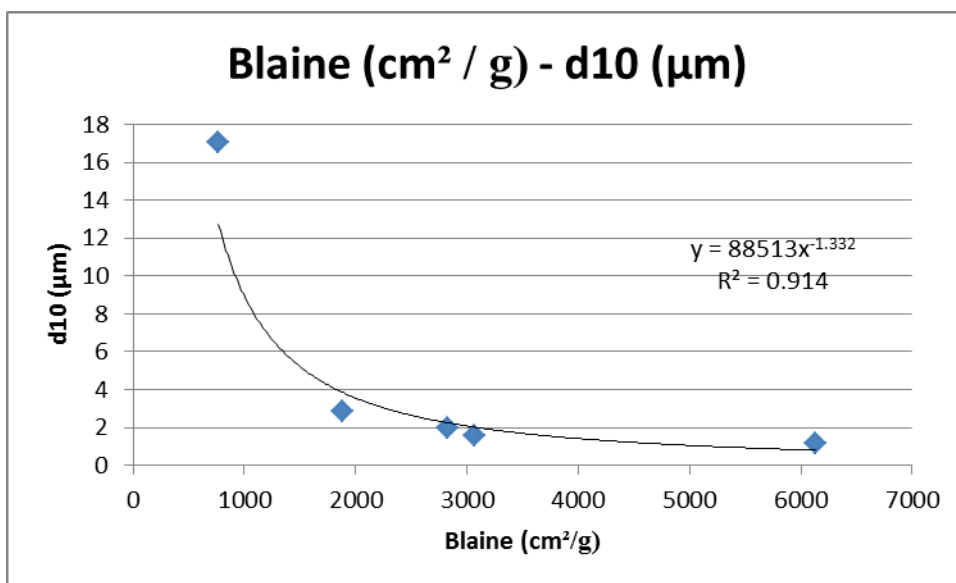
Διαγράμματα συσχέτισης Blaine – κοκκομετρίας



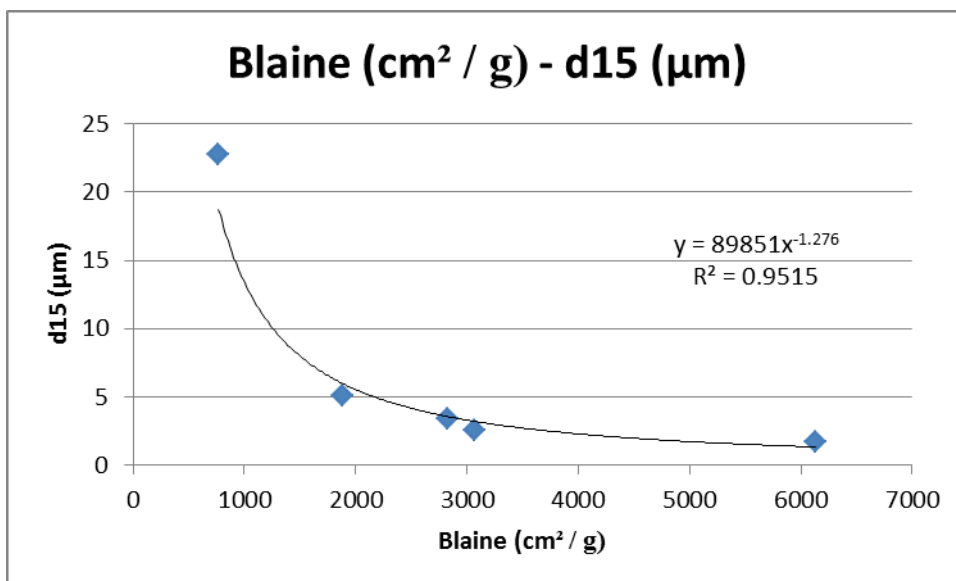
Διάγραμμα Ι.1 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 1% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



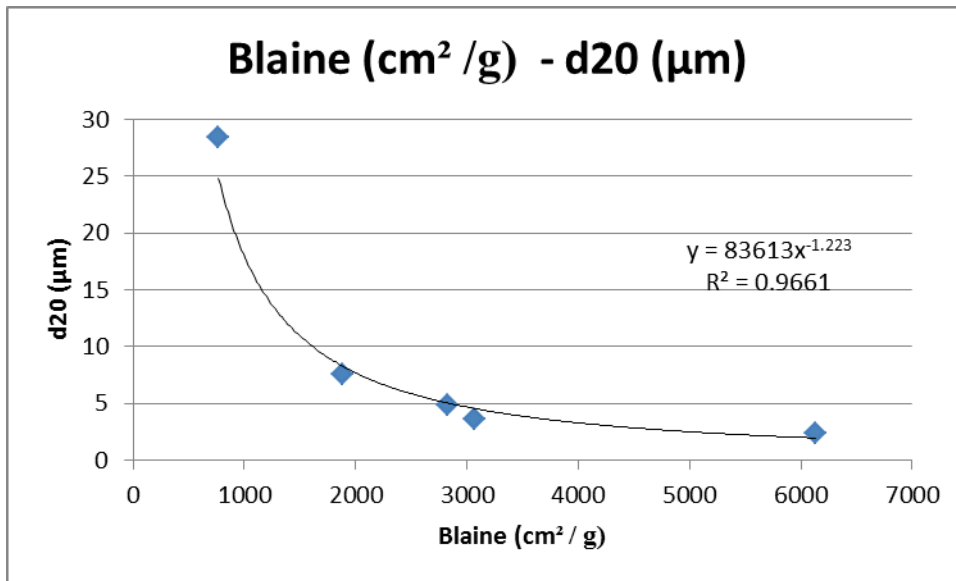
Διάγραμμα Ι.2 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 5% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



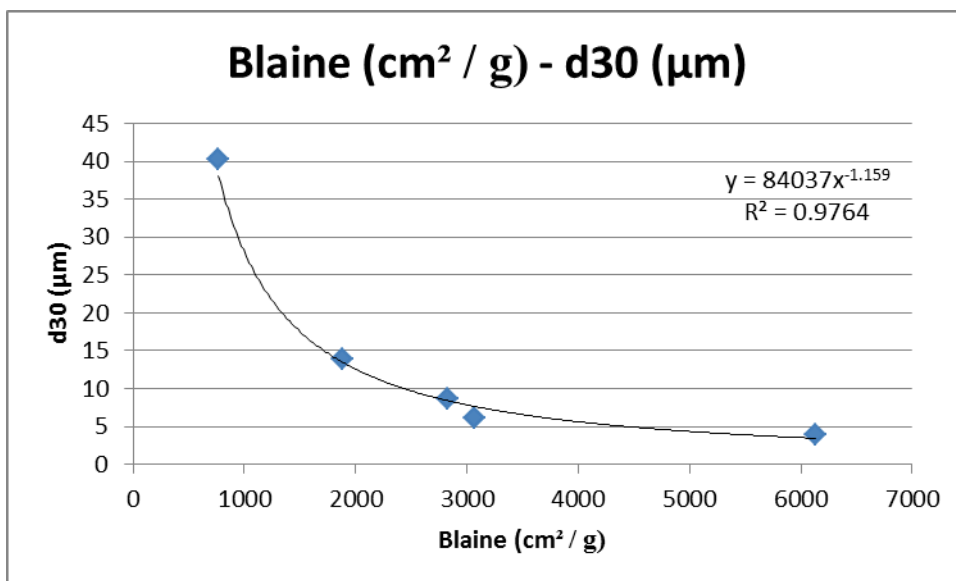
Διάγραμμα I.3 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 10% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



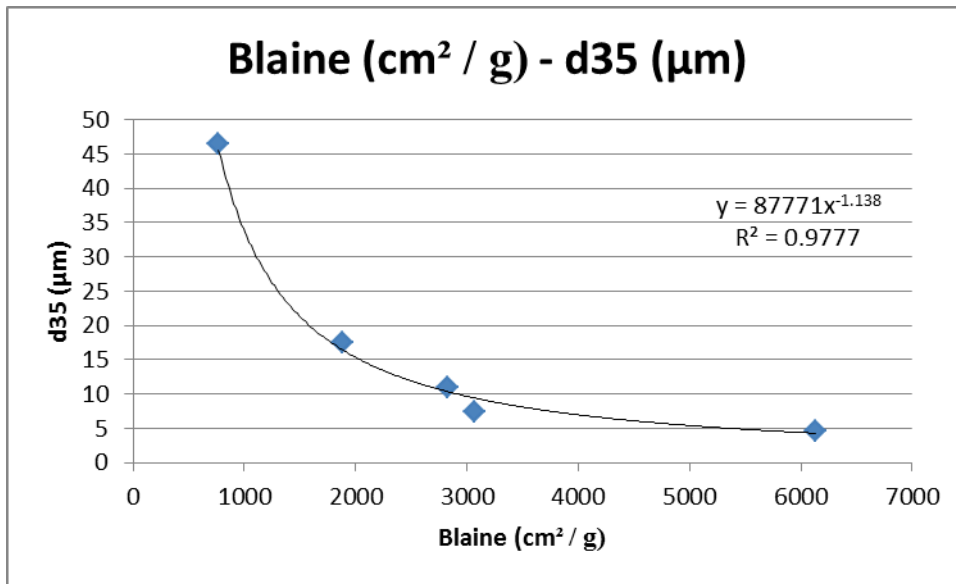
Διάγραμμα I.4 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 15% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



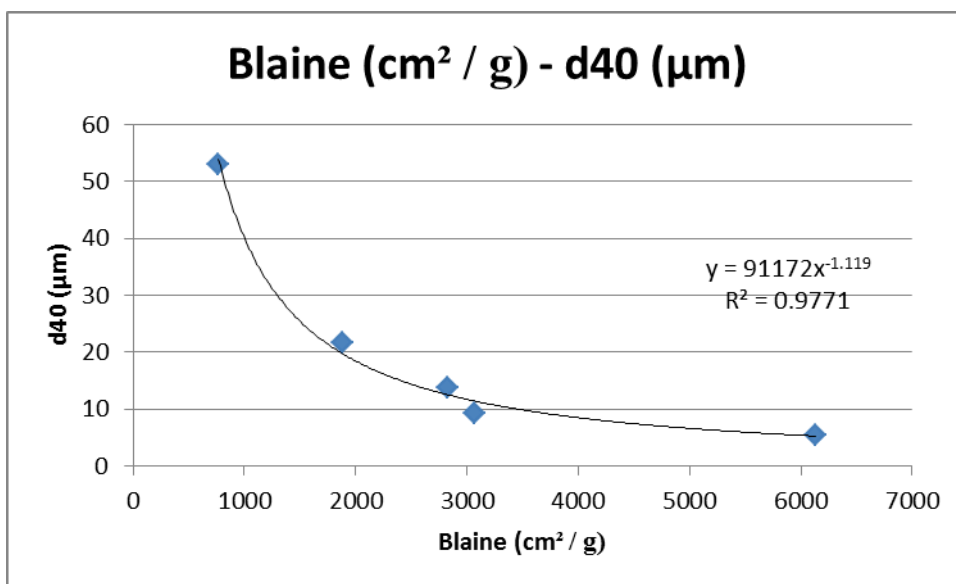
Διάγραμμα I.5 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 20% αθροιστικός διερχόμενου υλικού.



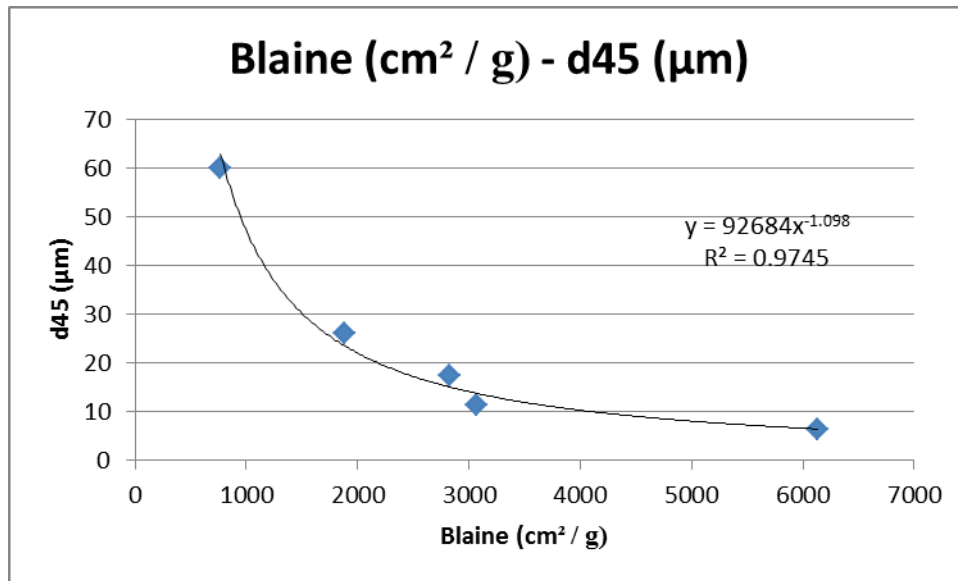
Διάγραμμα I.6 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 30% αθροιστικός διερχόμενου υλικού.



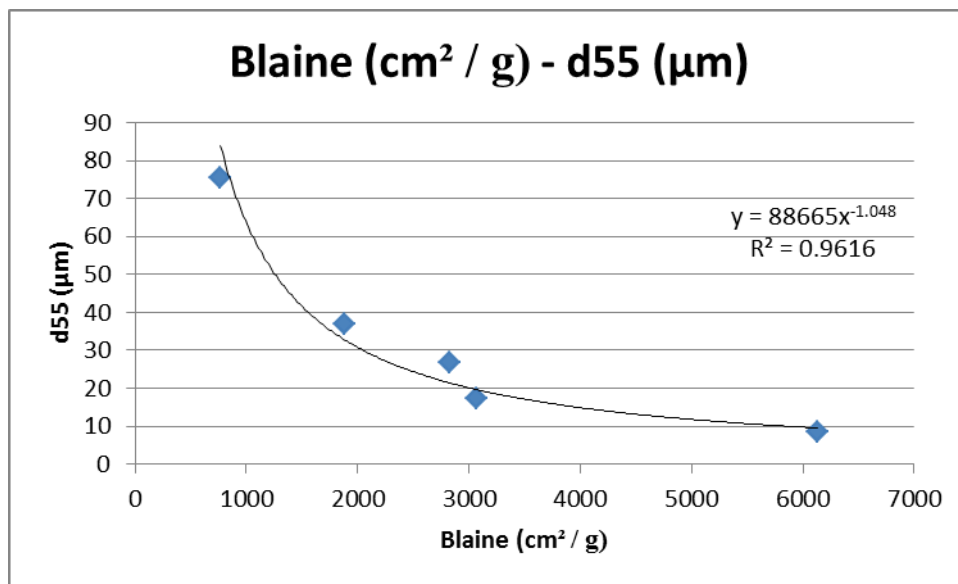
Διάγραμμα I.7 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 35% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



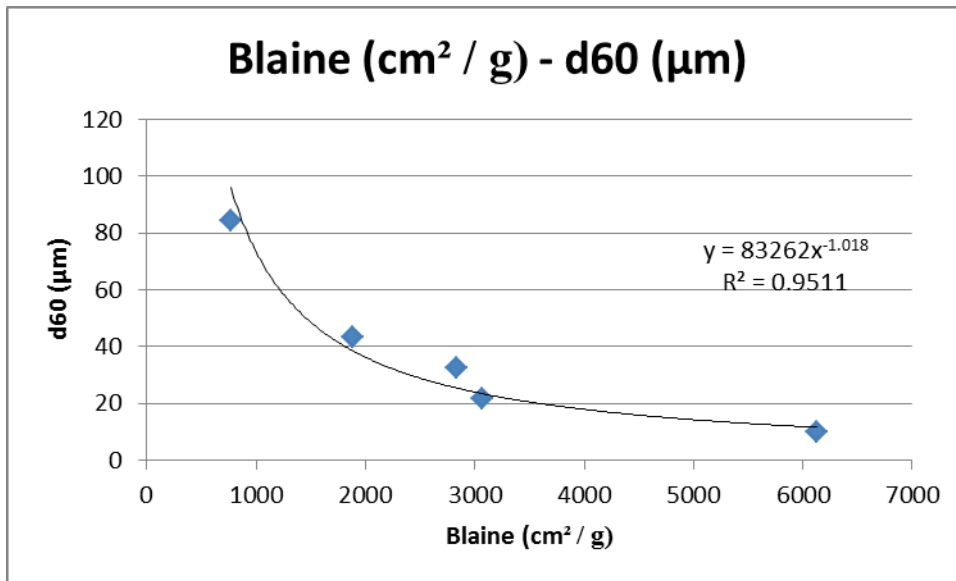
Διάγραμμα I.8 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 40% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



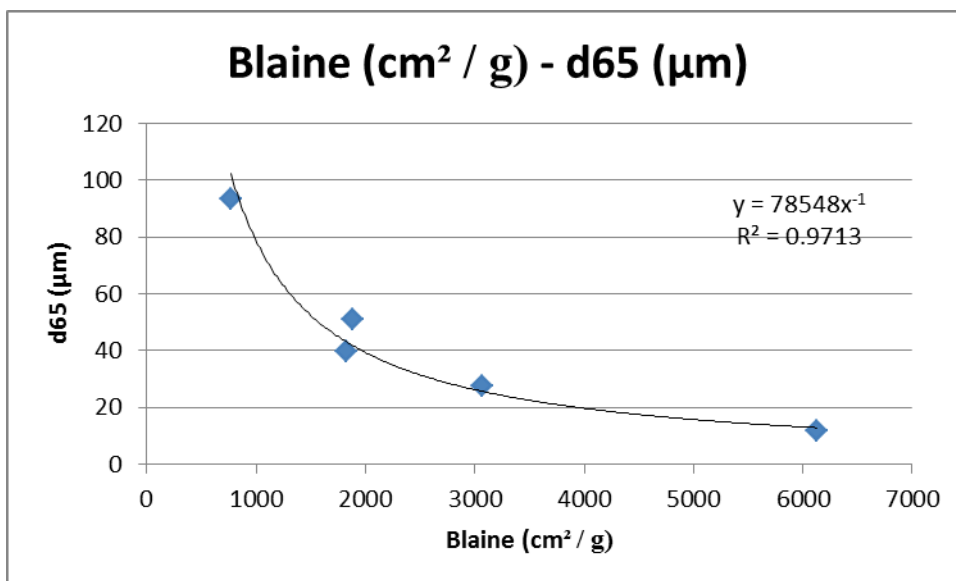
Διάγραμμα I.9 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 45% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



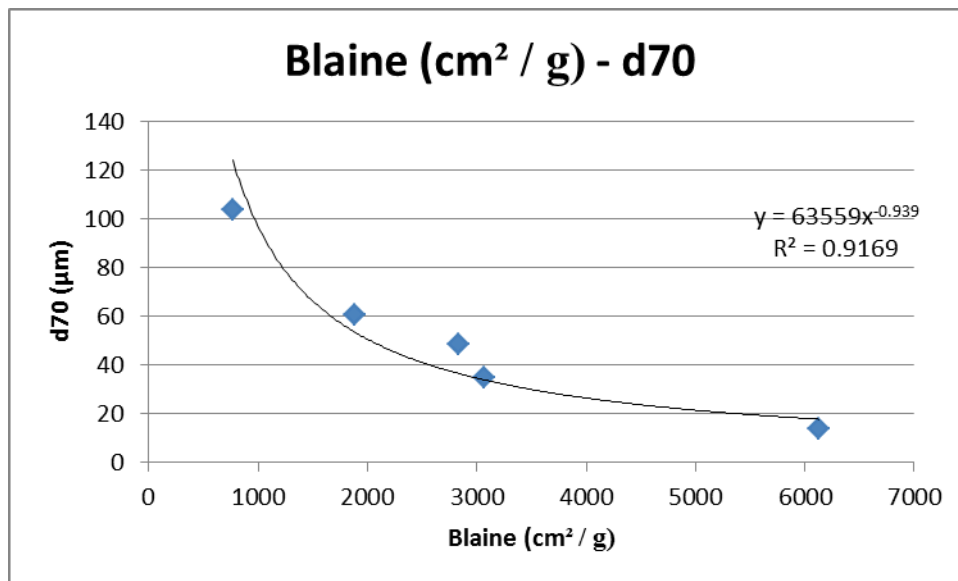
Διάγραμμα I.10 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 55% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



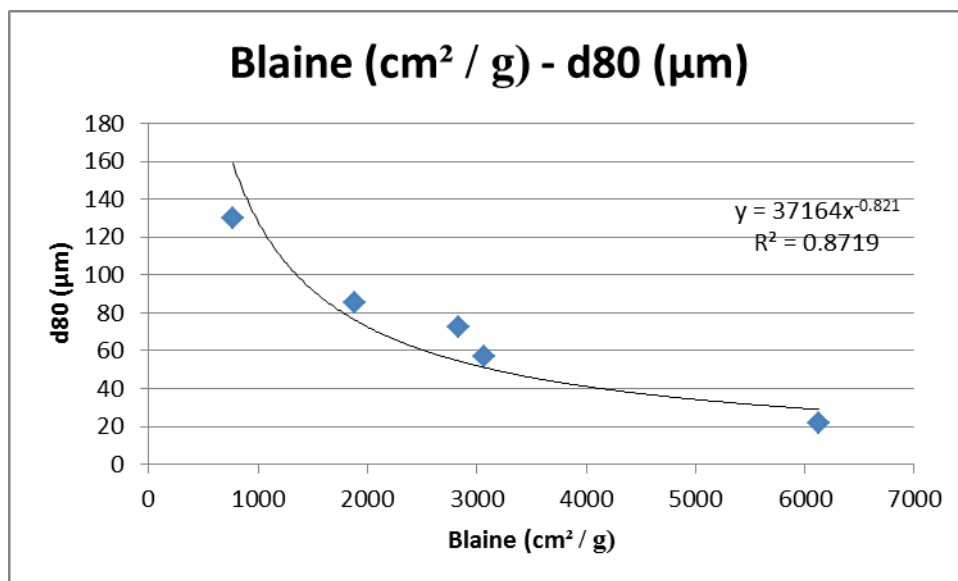
Διάγραμμα I.11 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 60% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



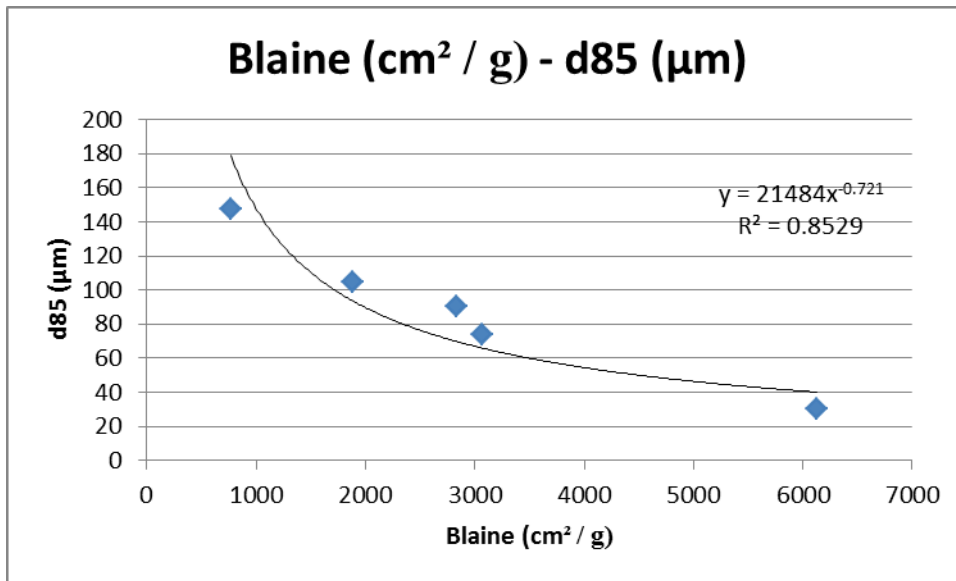
Διάγραμμα I.12 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 65% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



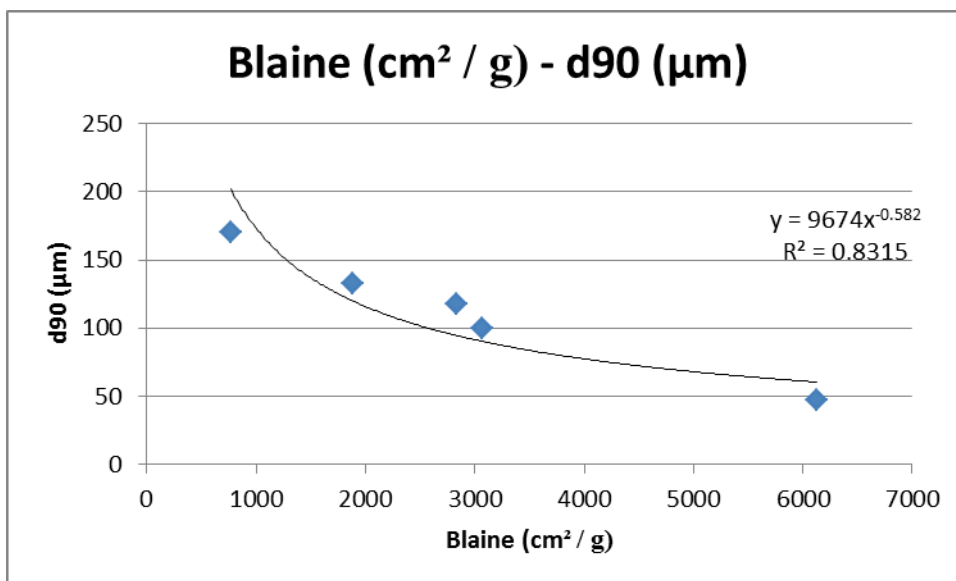
Διάγραμμα I.13 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 70% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



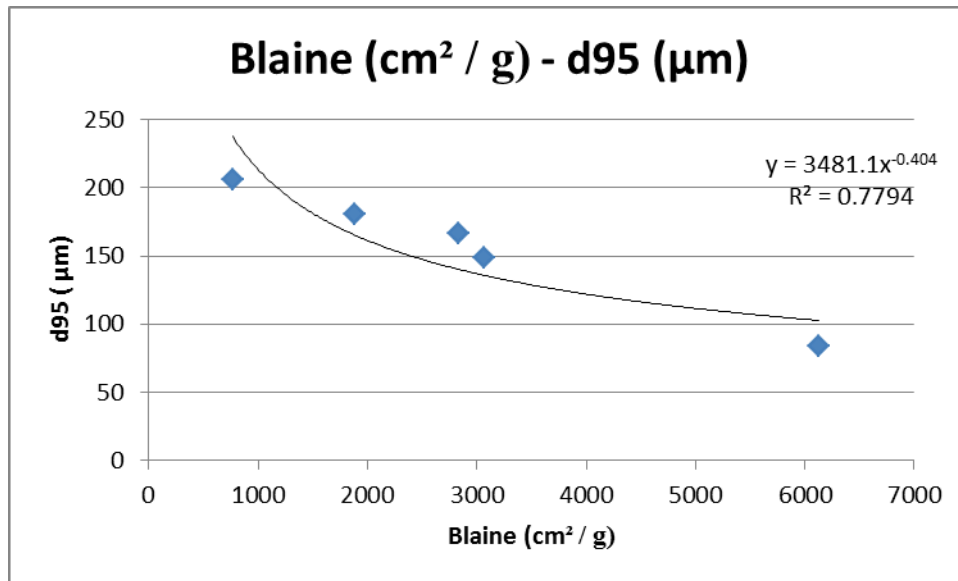
Διάγραμμα I.14 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 80% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



Διάγραμμα I.15 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 85% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



Διάγραμμα I.16 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 90% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.



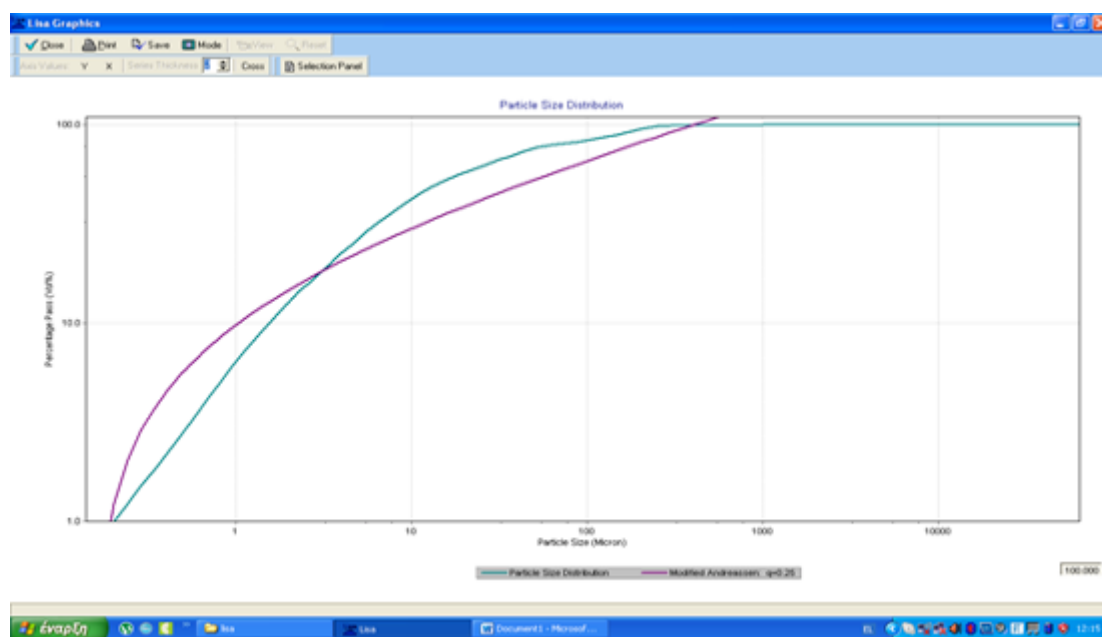
Διάγραμμα Ι.17 Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας – μεγέθους κόκκου στο 95% αθροιστικώς διερχόμενου υλικού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Θεωρητικές συνθέσεις LISA - ΤΜ

Σύνθεση 1

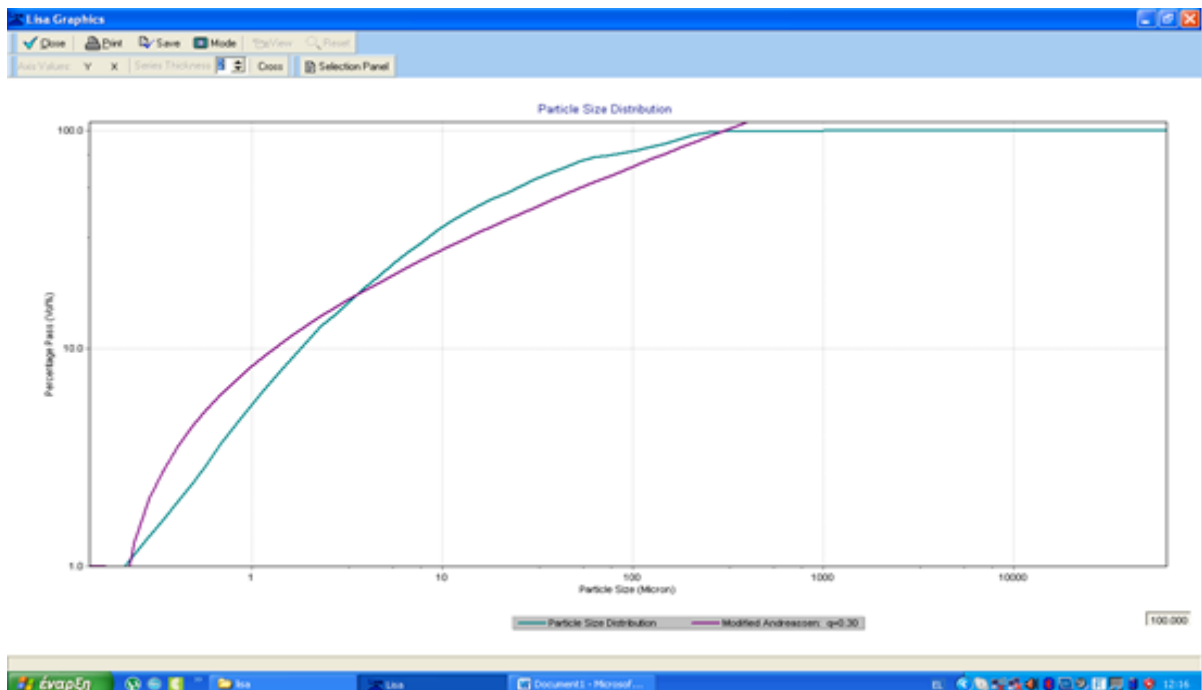
Παιπάλη ξήρασης	60
Παιπάλη αποκονίωσης	40
Μικροσιμέντο	10
Πυριτική παιπάλη	0,5
q	0,25
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	400 μm
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου	0,15 μm



Εικόνα ΙΙ.1 Θεωρητική καμπύλη Andreassen (μωβ γραμμή) – πειραματική καμπύλη (γαλάζια γραμμή)

Σύνθεση 2

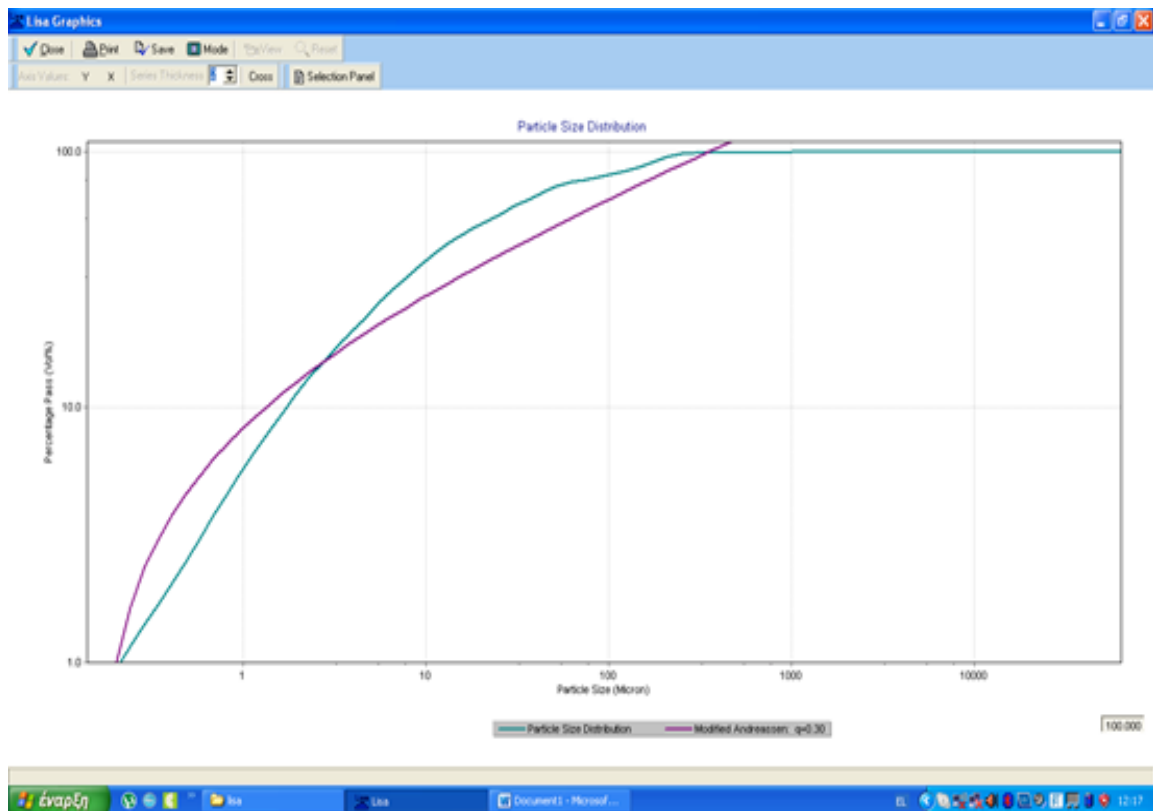
Παιπάλη ξήρασης	80
Παιπάλη αποκονίωσης	20
Μικροτσιμέντο	10
Πυριτική παιπάλη	0,5
q	0,30
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	300 μm
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου	0,17 μm



Εικόνα II.2 Θεωρητική καμπύλη Andreassen (μωβ γραμμή) – πειραματική καμπύλη (γαλάζια γραμμή).

Σύνθεση 3

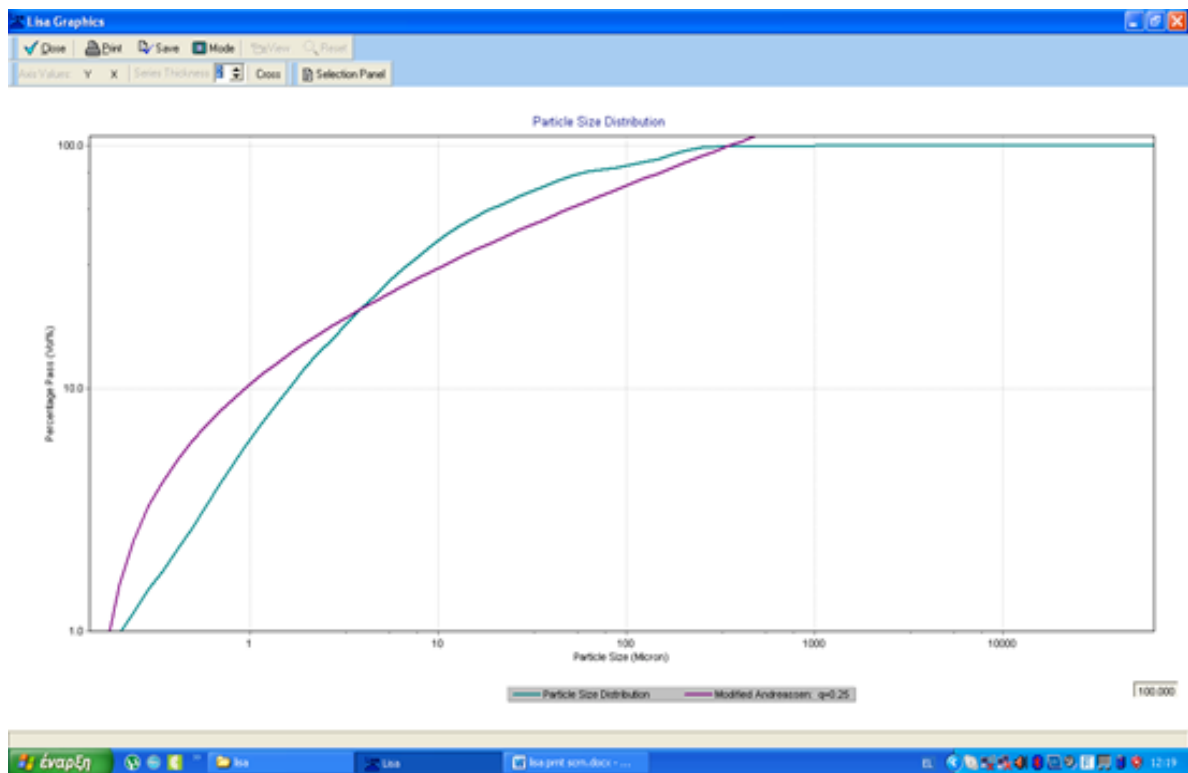
Παιπάλη ξήρασης	75
Παιπάλη αποκονίωσης	25
Μικροσιμέντο	10
Πυριτική παιπάλη	0,5
q	0,30
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	350 μm
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου	0,15 μm



Εικόνα II.3 Θεωρητική καμπύλη Andreassen (μωβ γραμμή) – πειραματική καμπύλη (γαλάζια γραμμή).

Σύνθεση 4

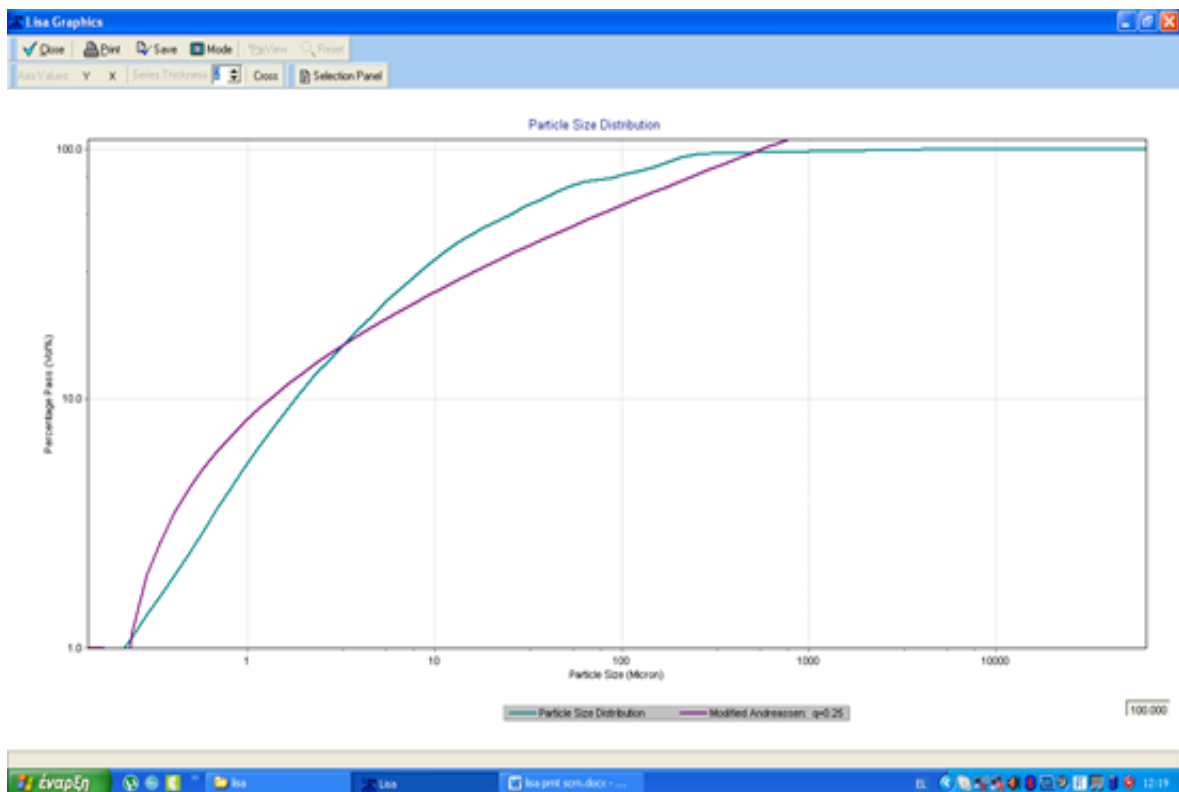
Παιπάλη ξήρανσης	65
Παιπάλη αποκονίωσης	35
Μικροτσιμέντο	10
Πυριτική παιπάλη	0,5
q	0,25
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	350 μm
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου	0,14 μm



Εικόνα II.4: Θεωρητική καμπύλη Andraessen (μωβ γραμμή) – πειραματική καμπύλη (γαλάζια γραμμή).

Σύνθεση 5

Παιπάλη ξήρανσης	75
Παιπάλη αποκονίωσης	25
Λατομική άμμος	5
Μικροτσιμέντο	10
Πυριτική παιπάλη	0,5
q	0,25
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	550
Ελάχιστο μέγεθος κόκκου	0,18



Εικόνα Π.5: Θεωρητική καμπύλη Andreassen (μωβ γραμμή) – πειραματική καμπύλη (γαλάζια γραμμή).

