



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χαρακτηρισμός λατομικής παιπάλης και πειραματική διερεύνηση
της δυνατότητας χρήσης της για παραγωγή δομικών στοιχείων**

ΠΗΠΕΡΙΔΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Γαλετάκης Μιχάλης (επιβλέπων)

Καθηγητής Σταμπολιάδης Ηλίας

Δρ. Κων/νος Κακλής

**Χανιά,
Νοέμβριος 2012**

Αφιερωμένη
στην οικογένειά μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της παιπάλης που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών κατά την παραγωγή τους. Η διερεύνηση περιλαμβάνει την παρασκευή και έλεγχο εργαστηριακών δοκιμίων με μίγμα παιπάλης – μικροτσιμέντου - νερού και ειδικών πρόσμικτων. Για τον υπολογισμό των βέλτιστων αναλογιών για την παρασκευή των παραπάνω δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τόσο το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen, που βασίζεται στη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση των μιγμάτων, όσο και ο παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων.

Στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειας σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η συνεχής και αποτελεσματική συνεργασία μου με τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ.Μ. Γαλετάκη, χωρίς τη βοήθεια και στήριξη του οποίου δεν θα είχε επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και τον ευχαριστώ θερμά.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ηλία Σταμπολιάδη και τον Δρ. Κων/νο Κακλή για τον χρόνο που αφιέρωσαν για τη διόρθωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκ. Καθηγητή κ. Γιώργο Αλεβίζο για την βοήθειά του στα θέματα που σχετίζονται με την ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων παιπάλης, την κα Όλγα Παντελάκη για τις κοκκομετρικές αναλύσεις, τον κ. Σ. Μαυριγιαννάκη για την πολύτιμη βοήθειά του στις δοκιμές μέτρησης της μηχανικής αντοχής των δοκιμίων.

Αισθάνομαι επίσης ότι οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Κ. Λεβεντάκη, Διπλωματούχο Μηχανικό Ορυκτών Πόρων και συνεργάτη της ερευνητικής μονάδας Έλεγχος Ποιότητας – Υγιεινής και Ασφάλειας στη Μεταλλευτική για την βοήθειά του στη διάρκεια του πειραματικού μέρους.

Ευχαριστίες ακόμη οφείλω και στην Εταιρεία «FINOMIX» για την παροχή του υλικού που εξετάστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ασβεστολιθική παιπάλη που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών, δημιουργεί προβλήματα στην απόθεσή της και είναι δύσκολο να απορροφηθεί από άλλους βιομηχανικούς τομείς. Προκειμένου να αξιοποιηθεί το λεπτομερές αυτό υλικό, χωρίς να υποστεί πολύπλοκες και δαπανηρές επεξεργασίες, διερευνήθηκε η δυνατότητα παραγωγής δομικών στοιχείων με την δημιουργία μίγματος παιπάλης και τσιμέντου, ώστε να αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα πρόταση για την αξιοποίηση της παιπάλης.

Για την δημιουργία τέτοιων δομικών στοιχείων έγινε διερεύνηση της επίδρασης των αναλογιών τόσο των πρώτων υλών (παιπάλη, τσιμέντο), όσο και των ειδικών πρόσμικτων στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος που παρασκευάστηκε. Το τελικό προϊόν είναι ένας τύπος σκυροδέματος με αδρανές υλικό την παιπάλη και αποκαλείται μικροσκυρόδεμα, εφόσον το μέγεθος των αδρανών του (παιπάλη) είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο (μικρότερο από 150μm).

Παρασκευάστηκαν δοκίμια χρησιμοποιώντας παιπάλη, ειδικού τύπου τσιμέντο με υψηλή τιμή Blaine (μικροτσιμέντο), νερό και ειδικά πρόσμικτα. Η χρήση των ειδικών πρόσμικτων έγινε για την βελτίωση των μηχανικών αντοχών με την επιτυγχανόμενη μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο και την διατήρηση της συνεκτικότητας και πλαστικότητας των μιγμάτων, όπως προσδιορίστηκε με την δοκιμή μικροκώνου εξάπλωσης.

Για την αρχική μελέτη της σύνθεσης των μιγμάτων παιπάλης-τσιμέντου-πρόσμικτων χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιεί το μοντέλο Andreassen για να πετύχει την κοκκομετρική διαβάθμιση που εξασφαλίζει την επιθυμητή κατά περίπτωση ρευστότητα και μηχανική αντοχή. Η αρχική αυτή διερεύνηση είχε σαν στόχο την επιλογή του εύρους του πειραματικού σχεδιασμού όσον αφορά τις αναλογίες παιπάλης-τσιμέντου-πρόσμικτων. Ταυτόχρονα τέθηκαν και οι περιορισμοί όσον αφορά τις μέγιστες τιμές μικροτσιμέντου και προσμίκτων καθώς είναι εκείνα τα υλικά που αυξάνουν το κόστος των προτεινόμενων μιγμάτων.

Στη συνέχεια έγινε ο καθορισμός των συνθέσεων και υπολογίστηκε η βέλτιστη σύνθεση με βάση τον κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό Box-Behnken.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	I
Περίληψη.....	II
Κατάλογος σχημάτων.....	vi
Κατάλογος πινάκων.....	ix
Πίνακας συμβόλων.....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Πρόβλημα που δημιουργούν τα λεπτομερή παραπροϊόντα (παιπάλη) λατομείων.....	1
1.2 Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Σκυρόδεμα-Μικροσκυρόδεμα.....	4
2.1 Εισαγωγή-Ορισμός Σκυροδέματος.....	4
2.2 Συστατικά Σκυροδέματος.....	5
2.3 Μικροσκυρόδεμα.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Χαρακτηρισμός των υλικών.....	9
3.1 Χαρακτηρισμός παιπάλης.....	9
3.1.1 Αναλύσεις παιπάλης για κοκκομετρία με laser.....	10
3.1.2 Ορυκτολογική ανάλυση.....	11
3.1.3 Μέτρηση της ειδικής επιφάνειας (Blaine)	13
3.2 Μικροτσιμέντο και πρόσμικτα σκυροδέματος.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σχεδιασμός συνθέσεων-Παρασκευή δοκιμίων.....	19
4.1 Μεθοδολογία καθορισμού των συνθέσεων.....	19
4.1.1 Επιλογή και χαρακτηριστικά του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen.....	21
4.1.2 Αρχικός καθορισμός του εύρους των συνθέσεων.....	23
4.1.3 Παραγοντικός σχεδιασμός.....	25
4.1.4 Καθορισμός των συνθέσεων με βάση το σχεδιασμό Box-Behnken	32
4.2 Παρασκευή και ωρίμανση δοκιμίων.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 . Εργαστηριακός έλεγχος δοκιμίων.....	39
5.1 Έλεγχος νωπού μικροσκυροδέματος.....	39
5.1.1 Η δοκιμή μικροκώνου εξάπλωσης.....	39
5.2 Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων.....	41
5.2.1 Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων.....	41
5.2.2 Φυσικές ιδιότητες δοκιμίων.....	43
5.3 Έλεγχος μικροδομής δοκιμίων.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων-Συζήτηση.....	51
6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων παραγοντικού σχεδιασμού.....	51
6.2 Υπολογισμός βέλτιστων συνθέσεων.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	64
7.1 Συμπεράσματα.....	64
7.2 Προτάσεις.....	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67

Παράρτημα 1 Αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πρώτων υλών.....	70
Παράρτημα 2 Περιγραφή συνθέσεων και συνθηκών παρασκευής των μιγμάτων.....	77
Παράρτημα 3 Διαγράμματα Pareto, κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων που προκύπτουν από την ανάλυση του παραγοντικού σχεδιασμού.....	92

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 3.1	Αεροταξινομητής συγκροτήματος παραγωγής έτοιμων κονιαμάτων.....	9
Σχήμα 3.2	Σιλό αποθήκευσης μαρμαρόσκονης και παιπάλης.....	10
Σχήμα 3.3	Καμπύλη αθροιστικά διερχόμενου ποσοστού παιπάλης.....	11
Σχήμα 3.4	Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων X της παιπάλης της μαρμαρόσκονης.....	13
Σχήμα 3.5	Συσκευή μέτρησης της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine.....	15
Σχήμα 4.1	Σχηματική αναπαράσταση της πυκνότητας στοίβαξης των κόκκων.....	20
Σχήμα 4.2	Κοκκομετρικές καμπύλες των μοντέλων Andreassen.....	22
Σχήμα 4.3	Δημιουργία βάσης δεδομένων για την κοκκομετρία και την πυκνότητα υλικών.....	23
Σχήμα 4.4	Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 2^k με 3 παράγοντες (X_1 , X_2 , X_3).....	27
Σχήμα 4.5	Κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός.....	32
Σχήμα 4.6	Σχηματική παράσταση του κεντρικού σύνθετου σχεδιασμού 2 επιπέδων με 3 παράγοντες (X_1 , X_2 , X_3).....	32
Σχήμα 4.7	Παραγοντικός σχεδιασμός Box-Behnken για 3 παράγοντες.....	33
Σχήμα 4.8	Εργαστηριακός αναμικτήρας.....	37
Σχήμα 4.9	Διαδικασία ανάμιξης μίγματος στον εργαστηριακό αναμικτήρα.....	37
Σχήμα 4.10	Τελική μορφή μίγματος στον εργαστηριακό αναμικτήρα.....	38
Σχήμα 4.11	Κυβικές μήτρες δοκιμίων.....	38
Σχήμα 5.1	Συσκευή μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος.....	39

Σχήμα 5.2 Κώνος και μεταλλική επιφάνεια.....	40
Σχήμα 5.3 Μέτρηση διαμέτρου του κώνου εξάπλωσης.....	40
Σχήμα 5.4 Μηχανή MTS 1380.....	42
Σχήμα 5.5 Μεταλλικές πλάκες φόρτισης και δοκίμιο.....	42
Σχήμα 5.6 Τυπικό γράφημα τάσης- ανηγμένης παραμόρφωσης για τα 3 δοκίμια της σύνθεσης X ₂	43
Σχήμα 5.7 Στιλβωμένες τομές δοκιμίων.....	47
Σχήμα 5.8 Μικροφωτογραφία στιλπνής τομής του δοκιμίου X4.....	47
Σχήμα 5.9 Μικροφωτογραφία στιλπνής τομής του δοκιμίου X8.....	48
Σχήμα 5.10 Μεγάλα και πολλά κενά λόγω του εγκλωβισμένου αέρα στο δοκίμιο X4....	49
Σχήμα 5.11 Οπές διαφόρων μεγεθών λόγω των φυσαλίδων του εγκλωβισμένου αέρα στο δοκίμιο X8.....	49
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη Cs.....	55
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων για την μεταβλητή Cs.....	56
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής Cs σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.....	57
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση Wa.....	58
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων για την μεταβλητή Wa.....	59
Σχήμα 6.6 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής Wa σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.....	60
Σχήμα 6.7 Επιφάνεια απόκρισης για την μεταβλητή Cs.....	61
Σχήμα 6.8 Επιφάνεια απόκρισης για την μεταβλητή Wa.....	62
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη Cs και της υδατοαπορρόφησης Wa.....	63

Σχήμα 6.10 Διάγραμμα συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη C_s και της πυκνότητας SG	63
Σχήμα 6.11 Διάγραμμα συσχέτισης της υδατοαπορρόφησης W_a και της πυκνότητας SG	63

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1 Υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine του τσιμέντου αναφοράς και της παιπάλης με βάση το χρόνο t.....	16
Πίνακας 4.1 Παραγοντικός σχεδιασμός 2 επιπέδων.....	26
Πίνακας 4.2 Παραγοντικός σχεδιασμός 2 επιπέδων με κεντρικό σημείο (center point).....	27
Πίνακας 4.3 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 3 παραγόντων για 2 επίπεδα μεταβολής.....	28
Πίνακας 4.4 Αριθμός συνδυασμών που απαιτούνται στον Κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό και στον Box-Behnken σχεδιασμό.....	32
Πίνακας 4.5 Παράγοντες και επίπεδα που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον Box-Behnken σχεδιασμό.....	35
Πίνακας 4.6 Αριθμός συνδυασμών που προκύπτουν από τον Box-Behnken σχεδιασμό για τους 3 παράγοντες (C_D, S_CD, M_C) στα τρία επίπεδα (-1, 0 , 1).....	35
Πίνακας 5.1 Μετρήσεις της υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων των συνθέσεων.....	44
Πίνακας 5.2 Διαστάσεις και υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας κάθε δοκιμίου όλων των συνθέσεων.....	45
Πίνακας 5.3 Πίνακας συνθέσεων και μετρηθείσες ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου μικροσκυροδέματος.....	50
Πίνακας 6.1 Αναλυτική περιγραφή και συμβολισμός των παραγόντων του παραγοντικού σχεδιασμού.....	51
Πίνακας 6.2 Περιγραφή των μεταβλητών απόκρισης του παραγοντικού σχεδιασμού.....	51

Πίνακας 6.3 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών για την μεταβλητή Cs.....	54
Πίνακας 6.4 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών για την μεταβλητή Wa.....	58
Πίνακας 6.5 Βέλτιστος συνδυασμός για μεγιστοποίηση της μεταβλητής Cs.....	61
Πίνακας 6.6 Βέλτιστος συνδυασμός για ελαχιστοποίηση της μεταβλητής Wa.....	62

Πίνακας συμβόλων

A, B, C	Παράγοντες σχεδιασμού
A	Απόσταση από το κέντρο του χώρου σχεδιασμού σε ένα αξονικό σημείο
AB	Αλληλεπίδραση παραγόντων A και B
B	Συντελεστής μοντέλου 2 ^{ης} τάξης
Cs	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη
C_D	Λόγος τσιμέντου/παιπάλη
D	Μέγιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα
D	Μέγεθος κόκκου
d_m	Ελάχιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα
E	Επιφάνεια δοκιμίου
E	Ανηγμένη παραμόρφωση
F	Μέτρο κώνου εξάπλωσης
F_{max}	Μέγιστο φορτίο
K	Αριθμός επιπέδων παραγοντικού σχεδιασμού
M	Μάζα δοκιμίου
M_C	Λόγος πυριτικής παιπάλης (microsilica)/ τσιμέντο
Q	Παράμετρος μορφής του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen
S_CD	Λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο και παιπάλη

SG	Πυκνότητα
V	Όγκος δοκιμίου
Wa	Υδατοαπορρόφηση
W_C	Λόγος νερού/τσιμέντο
W_{H20}	Βάρος δοκιμίου μετά από 24 ώρες στο νερό
W₁₀₅^oC	Βάρος δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση
X₁,X₂,X₃	Παράγοντες παραγοντικού σχεδιασμού
X1	Κωδικός σύνθεσης
X1.1	Κωδικός δοκιμίου σύνθεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Προβλήματα που δημιουργούν τα λεπτομερή παραπροϊόντα (παιπάλη) των λατομείων

Στην βιομηχανία παραγωγής αδρανών υλικών και κατά τις διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και θραύσης, παράγονται μεγάλες ποσότητες λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών, κοινά αποκαλούμενες «ασβεστολιθική παιπάλη» ή απλά «παιπάλη».

Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος και το πρότυπο EN 206-1 ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που έχει μέγεθος $< 63\mu\text{m}$ και προσδιορίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-305. Η παιπάλη της άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της και η παιπάλη των περισσότερων χονδρόκοκκων κλασμάτων («ρυζάκι», «γαρμπίλι», σκύρα), δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του ξηρού βάρους του. Για άοπλο σκυρόδεμα, χωρίς ειδικές απαιτήσεις, επιτρέπεται παιπάλη στην άμμο μέχρι 20% του ξηρού του βάρους.

Η συσσώρευση των λεπτομερών παραπροϊόντων που προέρχονται από την παραγωγή αδρανών υλικών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Τα προϊόντα αυτά, που σε μεγάλο ποσοστό παραμένουν ανεκμετάλλευτα, θα μπορούσαν να είναι σημαντική πηγή πρώτης ύλης για τον κατασκευαστικό τομέα. Η αξιοποίηση του λεπτομερούς υλικού είτε ως έχει υπό τη μορφή πληρωτικού είτε μετά από επεξεργασία του για την παρασκευή νέων προϊόντων, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των αποθεμάτων ασβεστόλιθου και κατά συνέπεια των λατομείων. Επιπλέον, απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών θα έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη λόγω μειωμένων εξόδων για απόθεση ή απόρριψη και πρόσθετων εσόδων από την πώληση των νέων προϊόντων. Το μέγεθος του προβλήματος που δημιουργούν τα λεπτομερή είναι χαρακτηριστικό στην Ελλάδα, όπου η παραγωγή αδρανών για το έτος 2008 υπολογίζεται στα 100 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων 10-10.5 εκατομμύρια τόνοι είναι τα λεπτομερή παραπροϊόντα (ποσοστό 10-15%) (Τζεφέρης, 2009). Σήμερα (2012) λόγω της μείωσης της οικοδομικής δραστηριότητας εκτιμάται στο μισό περίπου του 2008. Λαμβάνοντας υπόψη και τους κανονισμούς που περιορίζουν

ολοένα και περισσότερο το ποσοστό παιπάλης στα διάφορα προϊόντα όπου συμμετέχουν τα αδρανή (ασφαλτομίγματα, έτοιμα κονιάματα), γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για εξεύρεση λύσεων.

Μέχρι σήμερα τα λεπτομερή ασβεστολιθικά προϊόντα, από τα οποία αποτελείται κυρίως η παιπάλη των ελληνικών λατομείων, έχουν περιορισμένη χρήση ως γεωργικά πρόσθετα ή πληρωτικά υλικά σε άλλους τομείς της βιομηχανίας. Η διεύρυνση των πεδίων χρήσης προϋποθέτει εκτενή μελέτη ώστε οι προτάσεις που θα προκύψουν να είναι τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες. Σε πολλές περιπτώσεις το κόστος μεταφοράς καθιστά απαγορευτική τη διάθεση της παιπάλης σε άλλες βιομηχανίες, ενώ σε κάποιες άλλες η επεξεργασία του υλικού ώστε να καταστεί σε μορφή κατάλληλη για να συμμετέχει σε ένα προϊόν είναι αρκετά δύσκολη ή αρκετά δαπανηρή. Πριν αναζητηθεί λοιπόν οποιαδήποτε λύση θα πρέπει να γίνει η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της παιπάλης ώστε οι ιδιότητες του υλικού να αποτελέσουν έναν αρχικό οδηγό για τους πιθανούς τομείς απορρόφησής του. Στη συνέχεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση του λατομείου και η ύπαρξη βιομηχανιών που να ενδιαφέρονται για το νέο προϊόν, η οικονομική απόκτηση και συντήρηση του εξοπλισμού που θα απαιτηθεί για να παραχθεί το νέο προϊόν και η ικανότητα του ανθρώπινου δυναμικού να το υλοποιήσει. Τέλος, πρέπει να ελεγχθούν διάφορες παράμετροι του προϊόντος που θα παραχθεί για να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες ή παραλείψεις στη φάση που το προϊόν βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

1.2 Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων

Τα λεπτομερή προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα της βιομηχανίας, με αποτέλεσμα η ζήτηση να εξαρτάται άμεσα από την οικοδομική δραστηριότητα, τα έργα υποδομών (οδοποιία, λιμάνια, αεροδρόμια κ.α.) και άλλων συναφών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, η δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών αδρανών υλικών (δηλαδή άλλων από τα πρωτογενή αδρανή) στις κατασκευές δεν έχει ακόμη επιτευχθεί λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως (i) η αβεβαιότητα σχετικά με τις φυσικές τους ιδιότητες και τον τρόπο με τον οποίο θα επιδράσουν στις ιδιότητες του

τελικού προϊόντος, και (ii) ο κίνδυνος για μόλυνση του περιβάλλοντος (Hill et al., 2001). Ο Hill et al. έδειξε ότι τα εναλλακτικά υλικά, όπως τα απόβλητα των λατομείων, μπορούν να αποδώσουν το ίδιο καλά ή ακόμη και καλύτερα από τα συνήθη αδρανή που χρησιμοποιούνται για υποβάσεις δρόμων και επιχώσεις. Όπως υποστηρίχτηκε από τον Rockliff (1996), είναι σημαντικό η χρήση των αδρανών στις κατασκευές να κατευθύνεται από προδιαγραφές για την τελική απόδοση που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα εύρος υλικών διαφορετικής προέλευσης.

Μια ευρεία χρήση των λατομικών λεπτομερών παραπροϊόντων είναι ως υλικά επιχώσεων που χρησιμοποιούνται κυρίως για έργα οδοποιίας για τους δρόμους μεταφοράς εντός του χώρου των λατομείων. Οι Fraser και McBride (2000) παρουσίασαν μια μελέτη με τις ιδιαίτερες γεωτεχνικές ιδιότητες των λεπτομερών όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά για επιχώσεις σε λατομεία δολομίτη. Άρθρο του Touahamia et al. (2002) δείχνει ότι τα λατομικά λεπτομερή μπορεί να υποκαταστήσουν τα αδρανή υποβάσης για δρόμους και σιδηροδρομικές γραμμές. Μια άλλη εφαρμογή των λατομικών λεπτομερών προϊόντων είναι η χρήση τους ως συστατικό σε ασφαλτοσκυροδέματα και σε άλλα υλικά οδοποιίας. Ο Hill et al. (2001) υποστηρίζει ότι τα λεπτόκοκκα αδρανή είναι λιγότερο κατάλληλα σε σχέση με τα χονδρόκοκκα υλικά στην κατασκευή των δρόμων επειδή δεν έχουν την απαιτούμενη αντοχή. Είναι όμως κατάλληλα για την κατασκευή συνδετικών υλικών με βάση την άσφαλτο και άλλα υλικά οδοποιίας. Η αποκατάσταση χώρων λατομείων αποτελεί ίσως την πλέον οικονομικά βιώσιμη λύση για την χρήση των υπερλεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων (Harrison 2003). Τέλος, έχει προταθεί η χρήση λεπτομερών ως αδρανή στο σκυρόδεμα. Η περιεκτικότητα σε λεπτομερή μπορεί να φτάνει το 40-50% και σε ορισμένες περιοχές να καταναλώνεται όλη η ποσότητα των λεπτομερών που παράγεται από τα τοπικά λατομεία. Τα έτοιμα μίγματα σκυροδέματος περιέχουν 30% λεπτομερή αδρανή αποτελούμενα από ίσες ποσότητες λατομικών αδρανών (κυρίως ασβεστόλιθο) και άμμο. Οι ποσότητες λεπτομερών από ψαμμίτη και ιζηματογενή πετρώματα που χρησιμοποιούνται με αυτό τον τρόπο είναι περιορισμένες λόγω της υψηλής απαίτησης σε νερό, η οποία δημιουργεί προβλήματα συρρίκνωσης κλπ. Αυτά τα προβλήματα περιορίζονται με την χρήση χημικών πρόσθετων, το κόστος των οποίων μπορεί υπό τις κατάλληλες συνθήκες να εξισορροπείται από το μειωμένο κόστος μεταφοράς (Λεβεντάκης, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΜΙΚΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 Εισαγωγή-Ορισμός Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι δομικό υλικό που παράγεται με την ανάμειξη αδρανών υλικών, τσιμέντου, νερού και πρόσθετων (για βελτίωση των ιδιοτήτων του κατά τη παραγωγή, τη διάστρωση, αλλά και κατά τη σκλήρυνσή του). Με τη σημερινή του μορφή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στις αρχές του 20ου αιώνα, ενώ μετά το 1950 η χρήση του γενικεύτηκε, καθιστώντας το σήμερα το κυριότερο, παγκοσμίως, υλικό κατασκευών μαζί με το χάλυβα, ως οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι διαφορετικές ιδιότητες των πρώτων υλών που αναμιγνύονται στη παραγωγή του σκυροδέματος (μάζα, όγκος, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά) ανάγουν την παραγωγή σκυροδέματος σε μία εξαιρετικά πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Οι αυστηρές διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος του 1997 και του προτύπου ΕΛΟΤ EN 206-1, προβλέπουν τις ελάχιστες δοσολογίες των πρώτων υλών ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της προβλεπόμενης εφαρμογής του σκυροδέματος, όπως η εργασιμότητα, η αντοχή, η πλαστιμότητα, το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, η απόδοση και διάρκεια ζωής της κατασκευής. Εξαιτίας της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που σημειώνεται στη χώρα μας, τόσο η διαδικασία παραγωγής όσο και η τελική ενσωμάτωση του σκυροδέματος στις κατασκευές διέπονται από τον εξαιρετικά απαιτητικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ο οποίος ισχύει σήμερα καλύπτοντας τις απαιτήσεις για σύγχρονες ασφαλείς και αντισεισμικές κατασκευές.

Θεωρείται το οικονομικότερο και ασφαλέστερο οικοδομικό υλικό, με εξαιρετική σχέση κόστους - παρεχόμενων ιδιοτήτων και για το λόγο αυτό είναι αναντικατάστατο. Είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό, αφού μπορεί όταν είναι νωπό να λάβει οποιαδήποτε μορφή και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες ιδιότητες που προσφέρουν ανθεκτικότητα και προστασία από διάφορα επιθετικά περιβάλλοντα έκθεσης. Χάρη στη μεγάλη ευελιξία του είναι το πιο εύχρηστο δομικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα με τη μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί το αργότερο εντός μίας ώρας και τριάντα λεπτών από τη παραγωγή του.

Ένα σωστά σχεδιασμένο σκυρόδεμα διαθέτει καλή εργασιμότητα όταν είναι φρέσκο και εξαιρετική ανθεκτικότητα και αντοχή όταν σκληρύνεται. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο στο σκυρόδεμα καθορίζει την ποιότητα του και κατ'επέκταση την αντοχή του. Σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας παρασκευάζεται με τη χρήση λιγότερου νερού, αρκεί να μπορεί να διαστρωθεί, να συμπυκνωθεί και να συντηρηθεί κατάλληλα.

Για να επιτευχθεί η ανθεκτικότητα σκυροδέματος απαιτείται προσεκτική ανάμιξη συγκεκριμένων αναλογιών των συστατικών του. Για παράδειγμα, μια σύνθεση σκυροδέματος, η οποία δεν έχει αρκετή πάστα (νερό-τσιμέντο-υπερλεπτομερή αδρανή), ώστε να καλύψει επαρκώς τα αδρανή, θα είναι εξαιρετικά δύσκολη στη διάστρωσή της και θα προκαλέσει κενά και πόρους στην επιφάνεια και στη μάζα της μειώνοντας την ανθεκτικότητα. Αντίθετα μια σύνθεση με υπερβολική πάστα διαστρώνεται εύκολα και δημιουργεί ομαλή τελική επιφάνεια, αλλά καταλήγει να δημιουργεί ένα σκυρόδεμα που συρρικνώνεται και ρηγματώνεται.

2.2 Συστατικά Σκυροδέματος

Τα συστατικά του σκυροδέματος, καθορίζονται ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες του εκάστοτε μίγματος, όμως πρέπει να συμφωνούν με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 206-1:2000. Τα συνήθη συστατικά που αποτελούν τις πρώτες ύλες παρασκευής του σκυροδέματος είναι (Wendehorst, 2009) :

- Τσιμέντο (cement): Το τσιμέντο είναι μια λεπτόκοκκη υδραυλική κονία που χρησιμοποιείται τόσο για την παρασκευή τσιμεντοκονιάματος (προϊόν ανάμιξης άμμου, τσιμέντου και νερού), όσο και για την παρασκευή σκυροδέματος. Παρασκευάζεται από αργιλοπυριτικά πετρώματα (σχιστόλιθος, άργιλος κ.α.) και ασβεστόλιθο, τα οποία αλέθονται, αναμιγνύονται, αντιδρούν και τέλος κονιορτοποιούνται για να δώσουν τη γνωστή τσιμεντοκονία. Το τσιμέντο αποτελεί το συνδετικό υλικό των αδρανών, που έχει την ιδιότητα να σκληρύνεται υπό την παρουσία νερού. Ο κλασικός τύπος είναι το τσιμέντο τύπου Portland. Το τσιμέντο πρέπει να διατηρεί σταθερό τον όγκο του και να έχει συγκεκριμένη αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες μετά την παρασκευή του.

- **Αδρανή υλικά (aggregates):** Καταλαμβάνουν το 75% του όγκου του σκυροδέματος. Λόγω του μικρού τους κόστους σε σχέση με το τσιμέντο, είναι λογικό να επιδιώκεται να καταλάβουν αυτά τον κατά το δυνατόν μεγαλύτερο όγκο στη μάζα του σκυροδέματος. Γι αυτό και επιβάλλεται να είναι καλά διαβαθμισμένα. Όσον αφορά τις διαστάσεις και φύση τους, αυτά χαρακτηρίζονται ως σκύρα, χαλίκι, γαρμπίλι, "ρυζάκι". Το κλάσμα των αδρανών που έχουν μέγεθος 0-4,75mm αποτελεί την άμμο. Κατάλληλο για σκυρόδεμα μπορεί να είναι κάθε πετρώδες υλικό που παρουσιάζει ικανοποιητικές σχετικές παραμέτρους (ειδικό βάρος, αντοχή σε τριβή και κρούση (Los Angeles), αντοχή σε αποσάθρωση (υγεία), υδατοαπορροφητικότητα, απουσία οργανικών προσμίξεων κλπ.). Ακόμα και ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη πηγή αδρανών. Για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 ή μεγαλύτερης, τα αδρανή πρέπει να προσκομίζονται χωρισμένα σε τρία (3) τουλάχιστον κλάσματα: άμμος (0-4,75mm), γαρμπίλι (4,75-12,5mm), σκύρα ή χαλίκι (12,5-25mm) (Κ.Τ.Σ., Αρθ.4.3.2.2.).
- **Νερό:** Το νερό προστίθεται με το τσιμέντο και τα αδρανή στον αναμικτήρα κατά την παρασκευή του σκυροδέματος για την ενυδάτωση του τσιμέντου και για να αυξηθεί η εργασιμότητά του. Η αναλογία του νερού στο μίγμα είναι καθοριστικός παράγοντας επίτευξης των επιθυμητών αντοχών στο σκυρόδεμα, και πρέπει να διατηρείται αυστηρά στα όρια που καθορίζει η μελέτη σύνθεσης. Λιγότερο νερό συνεπάγεται μεγαλύτερες αντοχές και περισσότερο νερό σημαίνει υψηλότερη εργασιμότητα (ρευστότητα). Θαλασσινό νερό είναι εν γένει ακατάλληλο (Κ.Τ.Σ., Αρθ.4.4.2.), ενώ στις προεντεταμένες κατασκευές απαγορεύεται ρητά.
- **Συνήθη χημικά πρόσμικτα (admixtures):** Τα πρόσμικτα που προστίθενται συνήθως στο σκυρόδεμα είναι :
 1. Υπερρευστοποιητές (plasticizers): Χρησιμοποιούνται για την αύξηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος χωρίς προσθήκη νερού ή τη διατήρηση της εργασιμότητας με μείωση του νερού, που συνεπάγεται αυξημένες αντοχές. Οι πιο διαδεδομένοι έχουν ως βάση τους την σουλφοναφθαλίνη, τα πολυκαρβοξύλια, την σουλφομελανίνη και την αμινοσουλφαμίνη.

2. Επιταχυντές (accelerators): Χρησιμοποιούνται για την αύξηση του ρυθμού σκλήρυνσης του σκυροδέματος και την επίσπευση της εμφάνισης των αντοχών του.
3. Επιβραδυντές (retarders): Χρησιμοποιούνται για την επιβράδυνση της σκλήρυνσης και τον περιορισμό έτσι της έκλυσης θερμότητας. Με τη χρήση επιβραδυντικού περιορίζεται ο κίνδυνος δημιουργίας ρωγμών από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη σκυροδέτηση μεγάλων διαστάσεων στοιχείων.
4. Αερακτικά πρόσθετα (air-entraining agents): Προσθέτουν αέρα στη μάζα του σκυροδέματος, αντιμετωπίζοντας έτσι τον κίνδυνο παγετού και αυξάνοντας ταυτόχρονα την αντοχή του στα θειικά και την εργασιμότητά του.

Η δραστηριότητα των χημικών πρόσμικτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τον τύπο τους, την χρονική στιγμή της εισαγωγής τους στο μίγμα, την δοσολογία τους, την κοκκομετρική τους διαβάθμιση, τον λόγο νερού/τσιμέντου, τη θερμοκρασία του σκυροδέματος, το είδος των υπολοίπων πρόσμικτων υλικών κ.α. Υπάρχει συγκεκριμένη ποσότητα πρόσμικτου για βέλτιστα αποτελέσματα εργασιμότητας του μίγματος για το επιθυμητό χρονικό διάστημα, που να αποτρέπει την απόμειξη και με ελάχιστη επίδραση στο χρόνο πήξης και τις μηχανικές ιδιότητες στις μικρές ηλικίες. Σημείο ιδιαίτερης προσοχής είναι η επιλογή των χημικών πρόσμικτων ώστε να είναι συμβατά τόσο με το τσιμέντο του μίγματος όσο και μεταξύ τους.

- **Ειδικά πρόσθετα**: Χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση ικανοποιητικών ρεολογικών χαρακτηριστικών και παράλληλα για τη μείωση του κινδύνου διαχωρισμού ή εξίδρωσης. Τα κυριότερα τέτοια πρόσμικτα είναι:

1. Σκωρία υψικαμίνων (ground granulated blast furnace slag): Λεπτότατοι κόκκοι προερχόμενοι από κονιορτοποίηση παραπροϊόντων υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων. Στην σκόνη την σκωρίας προστίθεται και λίγη ποσότητα γύψου.
2. Ιπτάμενη τέφρα λιγνιτών (IT , γνωστή και ως pulverized fuel ash, PFA –EN450-1:2005): Παραπροϊόν της καύσης λεπτοαλεσμένου άνθρακα στα ηλεκτροπαραγωγικά εργοστάσια (π.χ. λιγνίτη για την Ελλάδα).

Είναι υλικό με ποζολανικές ιδιότητες πολύ λεπτής διαβάθμισης (ποσοστό διερχόμενων από το κόσκινο $45\mu\text{m} > 75\%$). Το κυριότερο συστατικό της είναι το οξείδιο του πυριτίου SiO_2 .

3. Μπεντονίτης: Αργιλικό υλικό προϊόν εξαλλοίωσης όξινων ηφαιστειακών ορυκτών. Το κύριο συστατικό του είναι ο μοντμοριλλονίτης. Περιέχει και άλλα ορυκτά όπως χαλαζία, αστρίους, μαρμαρυγία, πυρίτιο, ασβέστιο κ.α. Χρησιμοποιείται σε αναλογία που κυμαίνεται από 0,5 μέχρι το πολύ 3% του βάρους του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Η προσθήκη μπεντονίτη κάνει το σκυρόδεμα πιο ευκατέργαστο.
4. Χρωστικές ουσίες: Είναι σκόνες αμιγούς χρωστικής ουσίας, αποτελούμενες από μικρούς κόκκους μεγέθους 0,1 έως $1\mu\text{m}$. Πρέπει να είναι ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον του τσιμέντου και είναι σχεδόν αποκλειστικά συνθετικής προελεύσεως. Είναι υδρόφιλες και συνδέονται εύκολα με το νερό και το τσιμέντο.

Πριν από την χρησιμοποίηση των πρόσθετων υλικών και εφόσον υπάρχουν αμφιβολίες ως προς την ποιότητά τους, πρέπει να ελέγχονται αν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των προδιαγραφών (όπως DIN 1045). Η χρήση προσθέτων επιτρέπεται όταν δεν επηρεάζουν δυσμενώς τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, την αντοχή του, και αν δεν αυξάνουν τον κίνδυνο διαβρώσεως του οπλισμού.

2.3 Μικροσκυρόδεμα

Το μικροσκυρόδεμα (micro-concrete) μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, που έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό του την λεπτή κοκκομετρία των αδρανών υλικών που το απαρτίζουν. Η κοκκομετρία των αδρανών υλικών που λαμβάνουν μέρος στη σύνθεσή του ξεκινά από 0.5mm και φτάνει έως κάτω από $1\mu\text{m}$. Η κοκκομετρική λεπτότητα των υλικών του μικροσκυροδέματος βελτιώνει σημαντικά τη διάσθρωση και συμπύκνωσή του και το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο για μια σειρά από ειδικές εφαρμογές. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια γίνεται αντικείμενο ερευνητικής διερεύνησης (Felekoglou 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 Χαρακτηρισμός παιπάλης

Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από την εταιρεία FINOMIX, η οποία δραστηριοποιείται στην παραγωγή σκυροδέματος και ετοιμών κονιαμάτων στην περιοχή Καλόρουμα Ακρωτηρίου Χανίων, στο νομό Χανίων. Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προέρχεται από τον αεροταξινομητή συγκροτήματος παραγωγής έτοιμων κονιαμάτων (Σχήμα 3.1). Το βασικό αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα έτοιμα αυτά κονιάματα είναι η μαρμαρόσκονη. Το λεπτόκοκκο μέρος της μαρμαρόσκονης (παιπάλη) απομακρύνεται με τη χρήση ρεύματος αέρα και συγκεντρώνεται σε σιλό (Σχήμα 3.2) . Η απομάκρυνση της παιπάλης από τη μαρμαρόσκονη επιβάλλεται από τις προδιαγραφές κοκκομετρίας των αδρανών των ετοιμών κονιαμάτων. Η ποσότητα της παιπάλης που απομακρύνεται αποτελεί σημαντικό ποσοστό της χρησιμοποιούμενης μαρμαρόσκονης (~25%).



Σχήμα 3.1 Αεροταξινομητής συγκροτήματος παραγωγής έτοιμων κονιαμάτων.



Σχήμα 3.2 Σιλό αποθήκευσης μαρμαρόσκονης (αριστερά) και παιπάλης (δεξιά).

Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που έχει μέγεθος $<63\mu\text{m}$ και προσδιορίζεται σύμφωνα με την μέθοδο ΣΚ-305.

Από τα σιλό αποθήκευσης της παιπάλης πάρθηκαν 3 σάκοι 25Kg έκαστος προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητοι εργαστηριακοί προσδιορισμοί. Οι εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι:

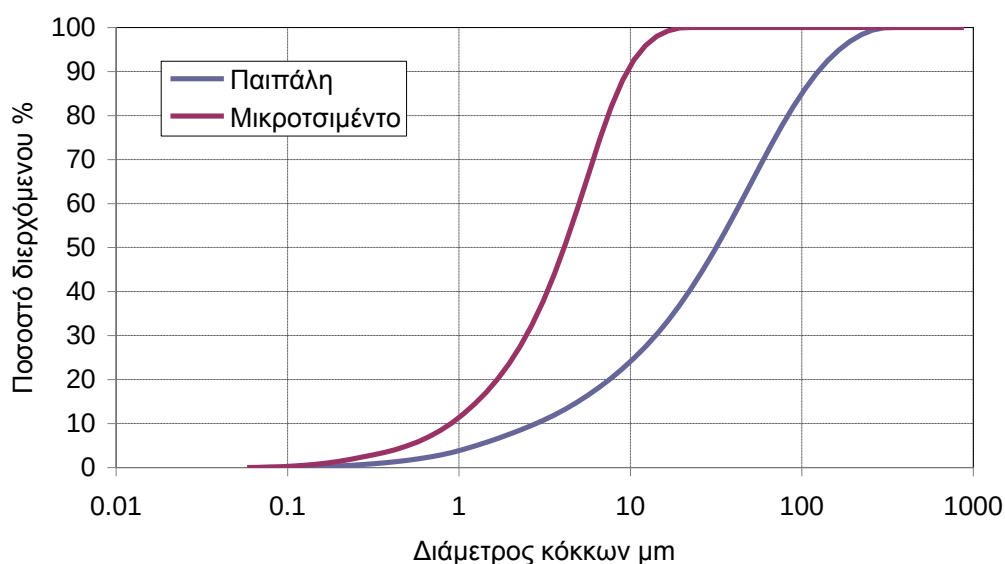
- Κοκκομετρική ανάλυση
- Ορυκτολογική ανάλυση
- Ειδική επιφάνεια κατά Blaine

3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση παιπάλης

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser, με την βοήθεια του συστήματος “Mastersizer S” του οίκου Malvern instruments. Με τη μέθοδο περίθλασης των ακτίνων laser μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου (dv) και το εύρος μεγεθών που μετρείται περιλαμβάνει πολύ λεπτά σωματίδια (από $1000\mu\text{m}$ - $0.1\mu\text{m}$) που δεν

υπολογίζονται εύκολα με τις άλλες μεθόδους. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην διάχυση και διάθλαση των ακτίνων laser από αιωρούμενα σωματίδια. Καθώς η ακτίνα laser διέρχεται από το προς ανάλυση δείγμα ανακλάται σχηματίζοντας ένα μεγάλο εύρος γωνιών σε σχέση με τον ανιχνευτή που βρίσκεται απέναντι. Το εύρος των γωνιών ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που εξετάζονται. Εκτός από το μέγεθος των σωματιδίων, η διέλευση της ακτίνας laser εξαρτάται και από τον δείκτη διάθλασής τους. Η πυκνότητα του δείγματος της παιπάλης για την κοκκομετρική ανάλυση είναι 2.65g/cm^3 .

Η καμπύλη του αθροιστικά διερχόμενου ποσοστού της παιπάλης και του μικροτσιμέντου φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Κοκκομετρική καμπύλη αθροιστικά διερχόμενου ποσοστού παιπάλης και μικροτσιμέντου.

Στο Παράρτημα 1 παρατίθεται πίνακας , όπου περιέχει τα αθροιστικώς διερχόμενα ποσοστά των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

3.1.2 Ορυκτολογική ανάλυση

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction), χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D-500 της εταιρείας Siemens. Με τη μέθοδο

αυτή είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν σε παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως. Το περιθλασίμετρο ακτίνων X αποτελείται από τα εξής μέρη:

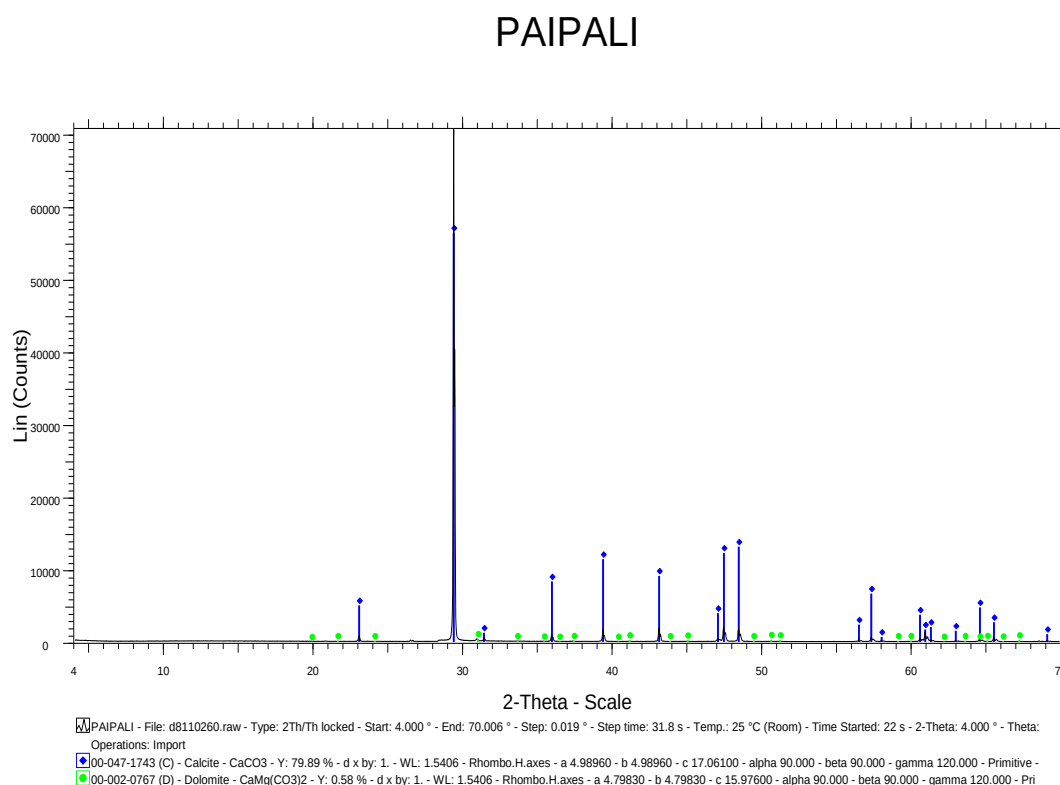
- την μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης (χρησιμοποιήθηκε τάση 35 KV)
- τη λυχνία των ακτίνων X (Cu)
- το γωνιόμετρο με ταχύτητα $1^\circ/\text{sec}$
- τον απαριθμητή κρούσεων και
- την μονάδα μικροϋπολογιστή για καθοδήγηση του συστήματος και αξιολόγηση των καταγραφών.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η τοποθέτηση μικρής ποσότητας παιπάλης στην κοιλότητα κατάλληλου κυκλικού πλαστικού υποδοχέα. Έπειτα ο υποδοχέας τοποθετήθηκε στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων X και με τρόπο ώστε το επίπεδο της επιφάνειας του δείγματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου. Στη συνέχεια ο απαριθμητής περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $2\theta/\text{min}$ και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min , ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση απαριθμητή και δείγματος, ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος, όπως και το σημείο εξόδου των ακτίνων X της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό καταγράφεται η ακτινοβολία που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων – X, ώστε να πληρούται για κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων η εξίσωση του BRAGG : $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$. Για κάθε ακέραιο αριθμό n, προκύπτει κατά την ανάκλαση των ακτίνων X θετική συμβολή τους. Καθώς το μήκος κύματος των ακτίνων είναι σταθερό (μονοχρωματική ακτινοβολία), η γωνία θ εξαρτάται μόνο από την απόσταση d, πράγμα που επιτρέπει μετρώντας τη γωνία θ στην οποία εμφανίζεται η θετική συμβολή, να προσδιορισθεί η απόσταση που χαρακτηρίζει τα πλεγματικά επίπεδα στα οποία πραγματοποιείται η ανάκλαση (Κωστάκης, 1988).

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια βιβλιογραφικών πινάκων αναφοράς προσδιορίζονται τα

ορυκτά που αποτελούν τις κρυσταλλικές φάσεις του δείγματος. Το ακτινοδιάγραμμα που προέκυψε για την παιπάλη που εξετάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων X της παιπάλης της μαρμαρόσκονης. Το βασικό ορυκτολογικό συστατικό που την αποτελεί είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3) ενώ εμφανίζεται σε μικρή ποσότητα και δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Από το ακτινοδιάγραμμα παρατηρείται ότι η σύσταση της παιπάλης είναι κυρίως ασβεστιτική με μικρό ποσοστό δολομίτη. Η ημιποσοτική ανάλυση του ακτινοδιαγράμματος (λογισμικό EVAL) έδωσε 97,3% ασβεστίτη (CaCO_3) και 2,7% δολομίτη $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

3.1.3 Μέτρηση της ειδικής επιφάνειας (Blaine)

Η λεπτότητα της άλεσης του υλικού εκφράζεται με την ειδική επιφάνεια κατά Blaine σε cm^2/g . Όσο λεπτότερα έχει αλεστεί το υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη επιφάνεια των κόκκων που έρχεται σε επαφή με το νερό, και συνεπώς η

ενυδάτωση γίνεται γρηγορότερα. Η υψηλή ή η χαμηλή ταχύτητα της ενυδάτωσης του υλικού έχει ως αποτέλεσμα ανάλογη αντοχή του υλικού σε μικρό χρονικό διάστημα.

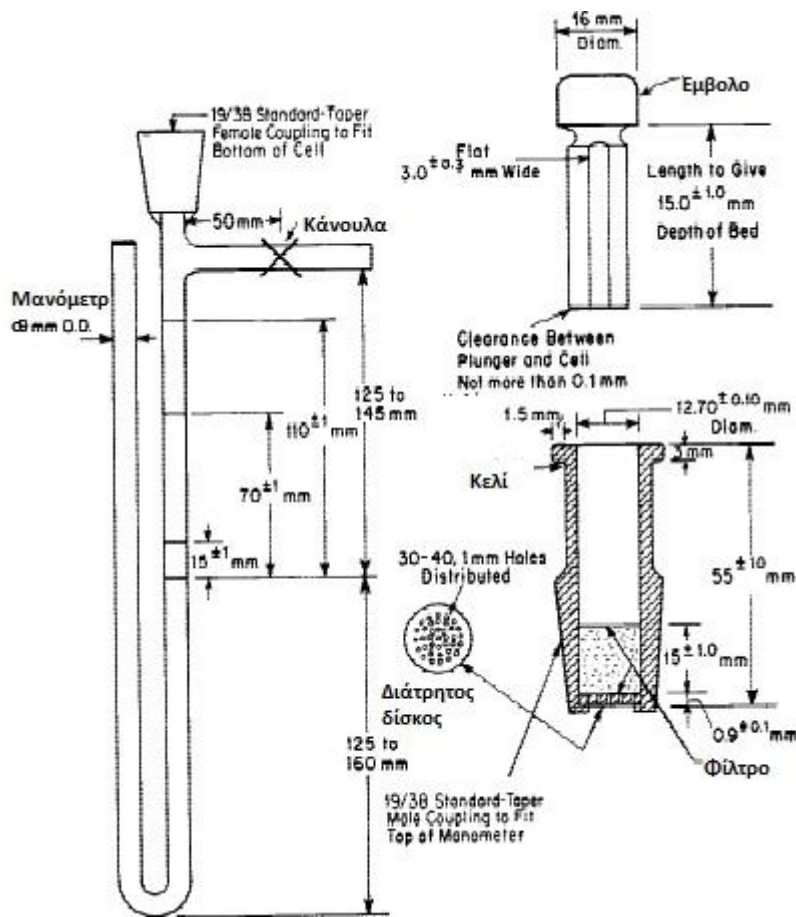
Όταν η λεπτότητα άλεσης είναι χαμηλή, δηλαδή οι κόκκοι είναι χονδροί, τότε το υλικό δεν ενυδατώνεται πλήρως και παρουσιάζει μειωμένες αντοχές, ενώ, όταν η λεπτότητα άλεσης είναι πολύ υψηλή, εμφανίζονται ραγίσματα στο σκληρυνθέντα τσιμεντοπολτό.

Η ειδική επιφάνεια Blaine, υπολογίζεται με μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για να διέλθει μια συγκεκριμένη ποσότητα αέρα μέσα από ένα στρώμα λεπτόκοκκου υλικού συγκεκριμένων διαστάσεων και πορώδους. Σε κανονικές συνθήκες, η ειδική επιφάνεια του υλικού είναι ανάλογη του $\sqrt{t}$, όπου t είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να περάσει μια δεδομένη ποσότητα αέρα μέσα από ένα στρώμα υλικού. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των μεμονωμένων πόρων μέσα στο συγκεκριμένο στρώμα προσδιορίζονται σύμφωνα με την κατανομή των διαστάσεων των σωματιδίων του υλικού που καθορίζουν τον απαιτούμενο χρόνο για τη διέλευση του αέρα.

Η μέθοδος είναι συγκριτική και όχι απόλυτη, και για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο ένα δείγμα αναφοράς γνωστής ειδικής επιφάνειας.

Η συσκευή μέτρησης αποτελείται από το:

- κελί διαπερατότητας
- διάτρητο δίσκο
- έμβολο
- μανόμετρο και
- το μανομετρικό υγρό (Σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5 Συσκευή μέτρησης της ειδικής επιφάνειας Blaine

Η διαδικασία μέτρησης περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα 1.

Υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας

Η ειδική επιφάνεια S του υλικού που υποβάλλεται στη δοκιμή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση :

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

όπου: S_0 , η ειδική επιφάνεια του υλικού (τσιμέντο) αναφοράς

e , το πορώδες του στρώματος του υλικού (παιπάλη) που υποβάλλεται στη δοκιμή

e_0 , το πορώδες του στρώματος του υλικού (τσιμέντο) αναφοράς

t , ο χρόνος που καταγράφεται για το υλικό (παιπάλη) της δοκιμής

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

ρ , η πυκνότητα του υλικού (παιπάλη) της δοκιμής

ρ_0 , η πυκνότητα του υλικού (τσιμέντο) αναφοράς

η , το ιξώδες του αέρα στη θερμοκρασία της δοκιμής

η_0 , το ιξώδες του αέρα από το μέσο όρο των τριών θερμοκρασιών του υλικού (τσιμέντο) αναφοράς.

Το εργαστήριο στο οποίο θα διεξαχθεί η δοκιμή της διαπερατότητας του αέρα πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία $20 \pm 2^\circ\text{C}$ και η σχετική υγρασία δεν πρέπει να ξεπερνά το 65%. Όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα υλικά της δοκιμής και η συσκευή, πρέπει να βρίσκονται σε θερμοκρασία εργαστηρίου και κατά τη διάρκεια της συντήρησης /διατήρησης πρέπει να προστατεύονται από την απορρόφηση υγρασίας από την ατμόσφαιρα.

Η σχέση (3.1) απλοποιείται αφού $e=e_0=0.5$ για τις παραπάνω συνθήκες εργαστηρίου. Για τον λόγο αυτό ισχύει $\eta=\eta_0$.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine.

Πίνακας 3.1 Υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine του τσιμέντου αναφοράς και της παιπάλης (πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις για το υλικό αναφοράς και 2 μετρήσεις ανά δείγμα παιπάλης) με βάση το χρόνο t .

A/A Μέτρησης	Υλικό	Χρόνος, t (sec)	Θερμοκρασία, θ ($^\circ\text{C}$)	Μέση τιμή χρόνου, t (sec)	Ειδική επιφάνεια Blaine, S (cm^2/g)
1	Τσιμέντο αναφοράς	101,4	20		
2		91,07			
3		96,76		98,39	3774
4	Παιπάλη	12,37	21		
5		11,83		12,10	1544
6	Παιπάλη	12,37	20		
7		12,06		12,21	1551
8	Παιπάλη	12,33	20		
9		13,00		12,66	1580
10	Παιπάλη	11,45	20		
11		11,37		11,41	1499
12	Παιπάλη	11,70	20		
13		12,06		11,88	1530

Η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων της παιπάλης που εξετάστηκε κυμαίνεται από 1499 έως 1580cm²/g, με μέση τιμή 1541cm²/g, τυπική απόκλιση 30cm²/g και σχετική τυπική απόκλιση 1,92%. Η σχετική διακύμανση είναι πολύ μικρή γεγονός που δείχνει ότι η παιπάλη που εξετάστηκε είναι ομοιογενής όσον αφορά την κοκκομετρική της σύνθεση.

3.2 Μικροτσιμέντο και πρόσμικτα σκυροδέματος

Microcement (μικροτσιμέντο)

Το microcement ή Ultra Fine Cement (μικροτσιμέντο) είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο τσιμέντο που χρησιμοποιείται κυρίως σε ενέματα για τη σφράγιση εξαιρετικά λεπτών σχισμών μεγέθους μικρότερων των 100μm (τσιμεντενέσεις για σταθεροποίηση βραχώμαζας σε σήραγγες καθώς και σε άλλες εφαρμογές). Είναι προϊόν της τσιμεντοβιομηχανίας Heildeberg cement. Υπάρχουν τρεις τύποι μικροτσιμέντου της εταιρείας αυτής, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους. Αυτοί είναι: το Injektering 30 με το 95% των κόκκων να έχουν μέγεθος μικρότερο από 30μm, το Ultra Fine 16 με το 95% των κόκκων να είναι μικρότεροι από 16μm και το Ultra Fine 12 με το 95% των κόκκων του να έχουν μέγεθος μικρότερο από 12μm.

Το μικροτσιμέντο που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία για την παρασκευή των δοκιμών είναι το λεπτότερο, το Ultra Fine 12.

Πρόσμικτα σκυροδέματος

Τα πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή του μικροσκυροδέματος είναι τα εξής:

- 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 έτσι ή και αυξάνοντας την μηχανική αντοχή του. Έχει πυκνότητα 300 – 600 kg/m³ και η δοσολογία του

κυμαίνεται από 0,05 έως 1,00 % του βάρους του συνδετικού υλικού (τσιμέντου).

- Επιβραδυντής: Τρυγικό οξύ (Tartaric acid)

Το tartaric acid (τρυγικό οξύ ή παλαιότερα ταρταρικό οξύ) είναι ένα φυσικό οργανικό καρβοξυλικό οξύ με χημικό τύπο $C_4H_6O_6$. Είναι οπτικά ενεργός χημική ένωση, δηλαδή στρέφει το επίπεδο του πολωμένου φωτός κατά συγκεκριμένη γωνία ανάλογα με τη δομή του στο χώρο. 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 στις αλκοόλες.

- Πυριτική παιπάλη (Microsilica ή Silica Fume)

Η πυριτική παιπάλη (Microsilica ή Silica Fume) που χρησιμοποιήθηκε είναι το microsilica 920D της εταιρείας Elkem Materials. Το microsilica είναι υπέρλεπτη σκόνη διοξειδίου του πυριτίου και είναι υπο-προϊόν της βιομηχανίας παραγωγής πυριτίου και κραμάτων σιδηροπυριτίου. Είναι λεπτόκοκκη σκόνη που αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια ή μικροσφαιρίδια με μέση διάμετρο περίπου 0,15μm με μια πολύ υψηλή ειδική επιφάνεια (15.000-25.000 m² / Kg). Κάθε μικροσφαιρίδιο είναι κατά μέσο όρο 100 φορές μικρότερο από τον κόκκο του κοινού τσιμέντου. Σε μια τυπική δοσολογία του 10% κατά βάρος του τσιμέντου, θα υπάρξουν 50.000-100.000 σωματίδια microsilica ανά κόκκο τσιμέντου. Περιέχει τουλάχιστον 85% w/w άμορφο SiO₂ ενώ η περιεκτικότητα σε αλκάλια είναι <1%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1 Μεθοδολογία καθορισμού των συνθέσεων

Για τον καθορισμό των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε αρχικά το λογισμικό EMMA προκειμένου να προσδιοριστεί το εύρος των αναλογιών της παιπάλης και του μικροτσιμέντου. Λόγω των παραδοχών και των απλοποιήσεων που εισάγονται στο μοντέλο Andreassen που χρησιμοποιεί το λογισμικό EMMA οι εκτιμήσεις του είναι προσεγγιστικές και για τον λόγο αυτό και χρησιμοποιείται στο αρχικό στάδιο καθορισμού των συνθέσεων. Στη συνέχεια, με βάση τις αρχικές εκτιμήσεις από το πρόγραμμα EMMA, επιλέχθηκαν τα επίπεδα πειραματισμού για τις αναλογίες των συστατικών αυτών καθώς και των πρόσθετων. Για την αποδοτικότερη λειτουργία της πειραματικής διαδικασίας έγινε χρήση του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού Box-Behnken.

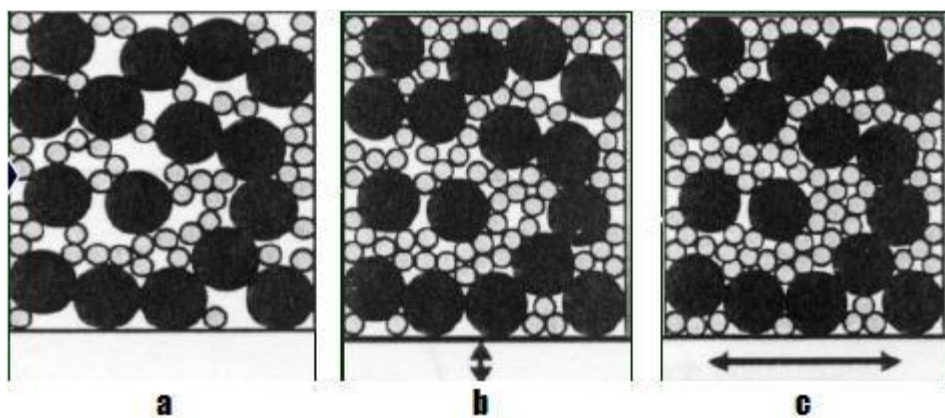
Για τον καθορισμό των συνθέσεων με το πρόγραμμα EMMA λαμβάνεται υπόψη η σχέση που έχει η πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή ο τρόπος διάστρωσης των κόκκων των αδρανών υλικών στο σκυρόδεμα, στη μηχανική αντοχή του και στην ρεολογία του.

Οι κόκκοι των αδρανών υλικών στηρίζονται ο ένας πάνω στο άλλον, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος που έχουν, δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους και αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά γεμίζουν με συνδετικό υλικό που συνδέει με αυτό τον τρόπο τους κόκκους σε ένα συμπαγές υλικό. Για τον λόγο αυτό η ποσότητα του συνδετικού υλικού πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τα μεταξύ των κόκκων κενά. Επειδή το συνδετικό υλικό είναι περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών, όσο λιγότερα είναι τα κενά που γεμίζει το συνδετικό υλικό τόσο μεγαλώνει η αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος (Οικονόμου,1993).

Όταν το κριτήριο σχεδιασμού είναι η ρεολογική ικανότητα του τελικού μίγματος, τότε απαιτείται αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή αύξηση των κενών μεταξύ των κόκκων των αδρανών (Σχήμα 4.1). Η αύξηση όμως αυτή, των κενών μεταξύ των

κόκκων των αδρανών, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μηχανικών αντοχών του τελικού σκυροδέματος.

Η πυκνότητα στοίβαξης εξαρτάται και από την κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών που λαμβάνουν μέρος στη σύνθεση (Kwan and Fung, 2009). Όταν η κοκκομετρική κατανομή των αδρανών που χρησιμοποιούνται οδηγεί στη μείωση των κενών στο νωπό σκυρόδεμα, τότε επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών του σκληρυμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση της πυκνότητας στοίβαξης. α)Σύνθεση με αραιότερη κοκκομετρική διαβάθμιση, β και γ)Συνθέσεις με πυκνή κοκκομετρική διαβάθμιση. Οι μαύρες σφαίρες αναπαριστούν τους μεγάλους κόκκους αδρανών και οι γκρι σφαίρες τους μικρότερους σε μέγεθος κόκκους (Διαμαντώνης, 2008).

Επίσης, το σχήμα και η μορφή των κόκκων επηρεάζει, άσχετα από την επιρροή του μεγέθους, κατά ποικίλους τρόπους τις ιδιότητες του σκυροδέματος (Οικονόμου,1993). Κόκκοι σφαιρικού σχήματος εξυπηρετούν την επίτευξη της επιθυμητής ιδιότητας. Όσο η μορφή των κόκκων απομακρύνεται από τη σφαιρική, τόσο αυξάνεται η εσωτερική τριβή και μειώνεται η εργασιμότητα του υλικού, αλλά αντίθετα βελτιώνεται η στήριξη των κόκκων μεταξύ τους και η αύξηση της επιφάνειας επαφής τους με το κονίαμα. Κατά τον ίδιο τρόπο και οι κυβοειδείς και πλακοειδείς κόκκοι συντελούν στην μηχανική αντοχή του σκυροδέματος, λόγω καλύτερης εδράσεως αυτών.

Το πρόγραμμα EMMA προσδιορίζει τη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση με βάση το κριτήριο με το οποίο σχεδιάζουμε την κάθε σύνθεση. Για τον καθορισμό των

συνθέσεων το πρόγραμμα χρησιμοποιεί το κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen. Το μοντέλο Andreassen θεωρεί ότι οι κόκκοι είναι σφαιρικού σχήματος.

4.1.1 Επιλογή και χαρακτηριστικά του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen

Το μοντέλο Andreassen είναι κατάλληλο για τον σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες συμμετέχουν πολύ λεπτόκοκκα υλικά όπως η παιπάλη και τα υπερλεπτομερή πυριτικά (microsilica). Το πρόγραμμα EMMA (έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Elkem και διατίθεται ελεύθερα προς χρήση) βασίζεται στο κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen. Προσφέρει την δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στην αρχική και την τροποποιημένη εξίσωση Andreassen. Για τον καθορισμό των συνθέσεων στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη εξίσωση Andreassen, στην οποία λαμβάνει υπόψη το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος κόκκου και την παράμετρο q που εκφράζει την πυκνότητα στοίβαξης. Ο τύπος της τροποποιημένης εξίσωσης Andreassen είναι:

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

Όπου:

CPFT (Cumulative Percent Finer Than) = το αθροιστικό ποσοστό του υλικού με διάμετρο μικρότερη από d , δηλαδή το αθροιστικώς διερχόμενο.

d = μέγεθος κόκκου

d_m = ελάχιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα

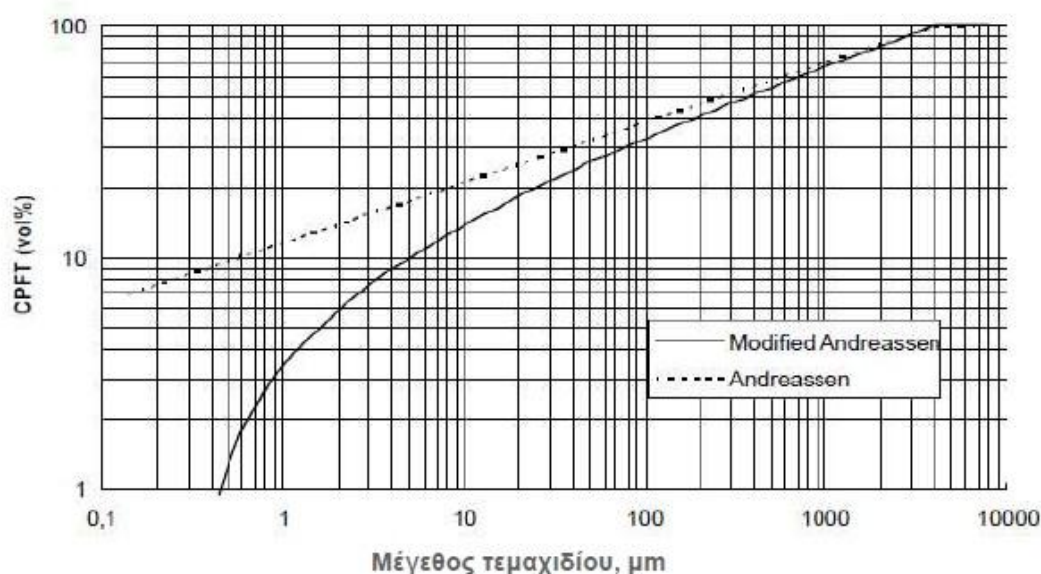
D = μέγιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα

q = παράμετρος μορφής της κοκκομετρικής καμπύλης

Στον τύπο της αρχικής εξίσωσης Andreassen το d_m λαμβάνεται ίσο με μηδέν και απαιτείται έτσι μόνο η γνώση του D και του q .

Η εξίσωση αυτή παρίσταται ως καμπύλη σε λογαριθμική κλίμακα (Σχήμα 4.2). Με την χρήση της εξίσωσης Andreassen γίνεται η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση επιτυγχάνεται όταν η καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης του μίγματος των

υλικών της σχεδιαζόμενης σύνθεσης προσεγγίζει κατά το μέγιστο δυνατό βαθμό την θεωρητική καμπύλη της εξίσωσης Andreassen.

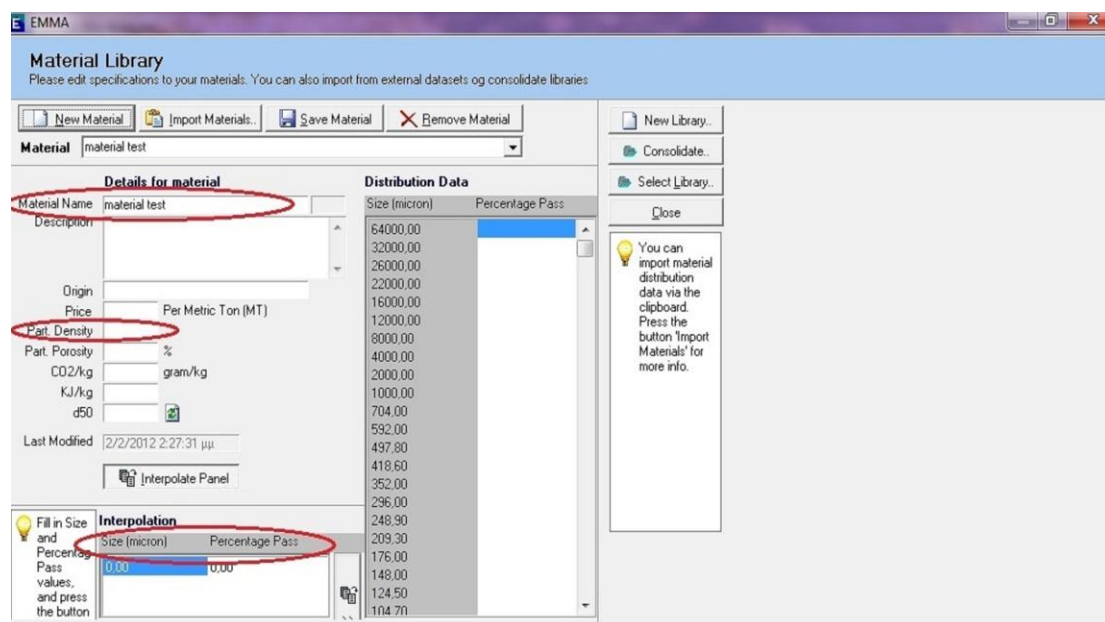


Σχήμα 4.2 Κοκκομετρικές καμπύλες των μοντέλων Andreassen.

Το λογισμικό EMMA με την χρήση του μοντέλου Andreassen, βοηθά στον καθορισμό της ποσότητας κάθε υλικού της σύνθεσης χωριστά, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση. Τα άνω και κάτω όρια της κοκκομετρίας, εκφράζονται ως μέγιστος και ελάχιστος κόκκος, δηλαδή ως μέγεθος κόκκου με διερχόμενο το 99% και με συγκρατούμενο το 99% της κοκκομετρίας της εκάστοτε σύνθεσης αντίστοιχα. Η παράμετρος q , που όπως αναφέρθηκε παραπάνω εκφράζει την πυκνότητα στοίβαξης, εξαρτάται άμεσα από την ιδιότητα που έχει επιλεγεί να χαρακτηρίζει το προς παρασκευή σκυρόδεμα. Για σκυρόδεμα υψηλών αντοχών η παράμετρος q παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,36. Για σκυρόδεμα υψηλής ρεολογικής ικανότητας η παράμετρος q παίρνει τιμές μικρότερες από 0,30 ενώ αν είναι επιθυμητό το σκυρόδεμα που θα παρασκευαστεί να έχει ρεολογική ικανότητα και ικανοποιητικές τιμές αντοχών επιλέγεται q μεταξύ 0,30 και 0,36. Για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων q , d_m , D , αντιστοιχεί και μια διαφορετική πρότυπη καμπύλη.

Το πρόγραμμα EMMA παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει πλήθος εμπορικών υλικών που οι κοκκομετρικές καμπύλες τους βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του προγράμματος. Αν ο χρήστης θέλει να χρησιμοποιήσει κάποιο άλλο εμπορικό υλικό, υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθεί η κοκκομετρία, το όνομα και η

πυκνότητα του υλικού αυτού στη βιβλιοθήκη και να εμφανιστεί από το πρόγραμμα η κοκκομετρική καμπύλη του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Δημιουργία βάσης δεδομένων για την κοκκομετρία και την πυκνότητα υλικών.

4.1.2 Αρχικός καθορισμός του εύρους των συνθέσεων

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης σύνθεσης με βάση το μοντέλο Andreassen και τον παραγοντικό σχεδιασμό στη συνέχεια έγιναν τα παρακάτω βήματα:

1. Εισήχθηκαν τα δεδομένα των κοκκομετρικών αναλύσεων και των πυκνοτήτων όλων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για τις συνθέσεις στη βάση δεδομένων του λογισμικού EMMA.
2. Καθορίστηκε το εύρος των επιπέδων για το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση την αναμενόμενη χρήση του μικροσκυροδέματος. Με δεδομένο την έλλειψη προτύπων για τέτοια υλικά, η επιλογή βασίστηκε σε οικονομικά κριτήρια και στην υπάρχουσα γνώση από την τεχνολογία του συμβατικού σκυροδέματος. Με βάση τον επιλεγθέντα τύπο παραγοντικού σχεδιασμού καθορίστηκε ο λόγος τσιμέντου προς παιπάλη (C/D), υπερρευστοποιητή προς τσιμέντο και παιπάλη (S/CD) και η αναλογία microsilica προς τσιμέντο (M/C). Σημείο ιδιαίτερης προσοχής είναι η αναλογία του νερού στο τσιμέντο (W/C) αφού επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος γιατί το περίσσιο νερό (αυτό που δεν συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις) μειώνει την μηχανική αντοχή του.

3. Καθορίστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου Andreassen: D , d_m και q . Να διευκρινιστεί εδώ ότι οι μεγάλες τιμές της παραμέτρου q αναφέρονται σε συνθέσεις με μεγάλη πυκνότητα στοίβαξης των κόκκων (packing) των κόκκων, με αποτέλεσμα συνακόλουθη την αύξηση των αντοχών του σληρυμένου σκυροδέματος. Αποτελεί στην ουσία ένα συμβιβασμό ανάμεσα στην επίτευξη μέγιστων μηχανικών αντοχών και της καλύτερης ρεολογικής συμπεριφοράς. Για καλή ρεολογική συμπεριφορά και καλές μηχανικές αντοχές επιλέχθηκε q μεταξύ 0,35 με 0,47.

4. Υπολογίστηκε η βέλτιστη σύνθεση (ποσοστό παιπάλης καθώς και τσιμέντου) με διαδοχικές δοκιμές, συγκρίνοντας την κοκκομετρική καμπύλη της εκάστοτε προκύπτουσας σύνθεσης με εκείνη της πρότυπης. Ως βέλτιστη επιλέχθηκε εκείνη που παρουσίαζε την μικρότερη απόκλιση από την πρότυπη. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ταύτιση των καμπυλών στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Μετά τον υπολογισμό των αναλογιών των υλικών καθορίστηκαν οι ποσότητες του νερού και των ειδικών χημικών πρόσμικτων που θα χρησιμοποιηθούν. Για τα χημικά πρόσθετα συνήθως υπάρχουν κάποιες προτεινόμενες τιμές από τον κατασκευαστή τους που αναφέρονται στη συνήθη και τη μέγιστη επιτρεπόμενη δοσολογία. Στη παρούσα διπλωματική εργασία τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένας υπερρευστοποιητής (εμπορική ονομασία melflux) και ένας επιβραδυντής (τρυγικό οξύ). Το melflux αυξάνει την εργασιμότητα και μειώνει το λόγο νερού/τσιμέντου, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση των μηχανικών αντοχών. Το τρυγικό οξύ, επιβραδύνει την σκλήρυνση του μικροσκυροδέματος και βοηθά στον περιορισμό της έκλυσης θερμότητας επομένως και της δημιουργίας ρωγμών.

Σε όλες τις συνθέσεις ορίστηκε η ποσότητα παιπάλης στο μίγμα να είναι 1000g και η ποσότητα του επιβραδυντή να είναι 0,5g. Ο κώνος εξάπλωσης ορίστηκε στα 11cm (παράγραφος 5.1.1) και η απαιτούμενη ποσότητα νερού για το μικροσκυρόδεμα (και για τις δεδομένες δοσολογίες προσμίκτων) καθορίστηκε κατά τη διάρκεια παρασκευής των μιγμάτων με βάση την τιμή αυτή του κώνου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος. Η πραγματικά επιτευχθείσα διάμετρος δεν ήταν πάντα εφικτό να είναι στα 11cm και για το λόγο αυτό μετρήθηκε και καταχωρήθηκε χωριστά για κάθε σύνθεση.

4.1.3 Παραγοντικός σχεδιασμός

Ο παραγοντικός σχεδιασμός αποδεικνύεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διεξαγωγή πειραμάτων, όταν εξετάζεται η επίδραση που έχουν στα χαρακτηριστικά ενός προϊόντος πολλοί παράγοντες ταυτόχρονα και μάλιστα ενώ βρίσκονται σε διαφορετικό αριθμό επιπέδων. Με τη μέθοδο αυτή εξάγονται συμπεράσματα τόσο για τις κύριες επιδράσεις, όσο και για τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Επίσης, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τον βέλτιστο συνδυασμό επιπέδων των παραγόντων και τον τρόπο μεταβολής των παραγόντων για μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας μεταβλητής, προκειμένου να μεταβούμε σε επόμενη πειραματική φάση. Έτσι, τα πειράματα λαμβάνουν χώρα σταδιακά και με συγκεκριμένες κατευθύνσεις εφόσον είναι γνωστές οι σημαντικές παράμετροι που εμπλέκονται στο σχεδιασμό, με συνέπεια να μη γίνεται σπατάλη χρόνου και κόπου σε περιοχές που δεν αναμένονται ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στην στατιστική, ένα πλήρες παραγοντικό πείραμα είναι ένα πείραμα του οποίου το σχέδιο αποτελείται από δύο ή περισσότερους παράγοντες (παράγοντας είναι μια σημαντική ανεξάρτητη μεταβλητή), ο καθένας με διακριτές δυνατές τιμές ή "επίπεδα" (το επίπεδο είναι μια υποδιαίρεση ενός παράγοντα), και των οποίων οι πειραματικές μονάδες περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς σε αυτά τα επίπεδα σε όλους τους παράγοντες αυτούς. Ένα τέτοιο πείραμα επιτρέπει την εξέταση της επίδρασης του κάθε παράγοντα στη μεταβλητή απόκρισης, καθώς και τις επιπτώσεις των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων στην μεταβλητή απόκρισης. Η μεταβλητή απόκρισης είναι το χαρακτηριστικό ποιότητας του οποίου οι τιμές ενδιαφέρουν τον μελετητή.

Παραγοντικός σχεδιασμός 2 επιπέδων (Two-level factorial design)

Στα περισσότερα παραγοντικά πειράματα κάθε παράγοντας έχει μόνο δύο επίπεδα. Ένα τέτοιο παραγοντικό πείραμα με 2 παράγοντες έχει τέσσερις συνδυασμούς στο σύνολο, ονομάζεται **2 x 2 ή 2²** (2^K όπου K=αριθμός παραγόντων) **παραγοντικός σχεδιασμός (Two-level factorial design)** και τα επίπεδα τιμών χαρακτηρίζονται συνήθως ως υψηλό (high) και χαμηλό (low). Στα πειράματα 2^K χρησιμοποιείται

ειδικός συμβολισμός, ο οποίος παρουσιάζεται μέσω του απλούστερου δυνατού σχεδιασμού, του 2^2 (δηλαδή για πείραμα με δύο παράγοντες, A και B, σε δύο επίπεδα, K=2). Συγκεκριμένα, οι συνδυασμοί των επιπέδων των τιμών A και B συμβολίζονται ως σειρές γραμμάτων (τα αντίστοιχα μικρά γράμματα για κάθε παράγοντα), όπου η παρουσία ενός γράμματος σημαίνει ότι ο αντίστοιχος παράγοντας είναι στο υψηλό του επίπεδο (+1), ενώ απουσία του γράμματος σημαίνει ότι ο παράγοντας είναι στο χαμηλό του επίπεδο (-1). Ο συνδυασμός με όλους τους παράγοντες στα χαμηλά τους επίπεδα συμβολίζεται (1). Στον πίνακα 4.1 περιγράφεται ο σχεδιασμός του πειράματος 2^2 χρησιμοποιώντας τον παραπάνω συμβολισμό.

Πίνακας 4.1 Παραγοντικός σχεδιασμός 2 επιπέδων

Συνδυασμός	A	B	AB
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

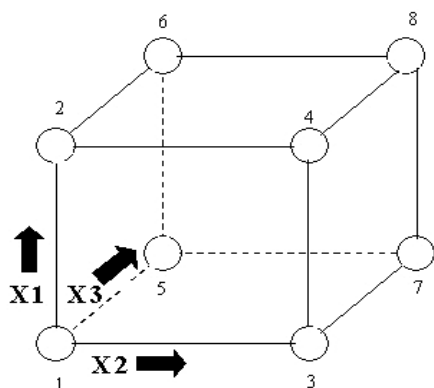
Τα πρόσημα στη στήλη της αλληλεπίδρασης AB προκύπτουν ως γινόμενα των πρόσημων των στηλών A και B και δεν έχουν κάποιο φυσικό νόημα όσον αφορά στο σχεδιασμό και την εκτέλεση του πειράματος αλλά αξιοποιούνται στους υπολογισμούς. Τα σύμβολα (1), (2), (3), (4) εκφράζουν ταυτόχρονα και το άθροισμα των n πειραματικών παρατηρήσεων των αντίστοιχων συνδυασμών τιμών A, B. Τα κεφαλαία A, B και AB συμβολίζουν επίσης τα μεγέθη των κύριων επιδράσεων και της αλληλεπίδρασής τους, όπως αυτά εκτιμώνται από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ο 2^K παραγοντικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί το μοντέλο αλληλεπίδρασης δύο παραγόντων ("2FI" model):

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC$$

Το μοντέλο αυτό δεν απαιτεί ένα πλήρη 3^K σχεδιασμό, αλλά ένα 2^K σχεδιασμό. Ωστόσο, για να είναι ασφαλές, είναι καλύτερο να προστεθεί ένα κεντρικό σημείο (center point) που επαναλαμβάνεται τουλάχιστον τέσσερις φορές για να παρέχει τις ικανοποιητικές πληροφορίες για την κυρτότητα στο σύστημα (Πίνακας 4.2). Ο 2^K παραγοντικός σχεδιασμός με K=3 (3 παράγοντες) παράγει οκτώ μοναδικούς

συνδυασμούς (runs) (χωρίς επαναλήψεις ή συνδυασμούς κεντρικών σημείων), αρκετούς για να ταιριάζει το "2FI" model, το οποίο περιλαμβάνει μόνο επτά συντελεστές (Πίνακας 4.3). Ο σχεδιασμός αυτός αντιπροσωπεύει τον κύβο που φαίνεται στο Σχήμα 4.4 .



Σχήμα 4.4 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 2^K με 3 παράγοντες (X_1, X_2, X_3).

Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση αύξησης των παραγόντων. Οι αριθμοί 1 έως 8 στις γωνίες του κύβου αντιπροσωπεύουν τους συνδυασμούς. Για παράδειγμα ο συνδυασμός 1 είναι στο χαμηλό επίπεδο και για τους τρεις παράγοντες.

Κανόνας για την σύνταξη ενός πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού 2^K για τρεις παράγοντες ($K=3$).

Η πρώτη (X_1) στήλη ξεκινά με -1 και επαναλαμβάνεται εναλλάξ με +1. Η δεύτερη (X_2) στήλη ξεκινά με -1 και επαναλαμβάνεται 2 φορές και εναλλάσσεται με αντίθετο πρόσημο για δύο σειρές και επαναλαμβάνεται μέχρι την συμπλήρωση των θέσεων. Η τρίτη (X_3) στήλη ξεκινά με -1 και επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές και εναλλάσσεται με τέσσερις επαναλήψεις +1. Η σύνταξη φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 3 παραγόντων για 2 επίπεδα μεταβολής (2^3 συνδυασμοί).

Συνδυασμός	Παράγοντας		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1

4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Αν προσθέσουμε και τα κεντρικά σημεία (μεσαίο επίπεδο, που συμβολίζεται με 0) τότε έχουμε 12 συνδυασμούς (8 μοναδικοί και 4 κεντρικοί συνδυασμοί). Οι συνδυασμοί αυτοί φαίνονται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί:

Πίνακας 4.2 Παραγοντικός σχεδιασμός 2 επιπέδων με κεντρικό σημείο (center point). Αποτελείται από οκτώ γωνιακούς συνδυασμούς και τέσσερις κεντρικούς.

Συνδυασμοί	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional Factorial Design)

Εάν ο αριθμός των συνδυασμών σε ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι πολύ μεγάλος από πρακτική και οικονομική άποψη, τότε χρησιμοποιείται ο **κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός** (fractional factorial design) , στον οποίο μερικοί από τους

πιθανούς συνδυασμούς (συνήθως τουλάχιστον οι μισοί) παραλείπονται. Με τον κατάλληλο κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό είναι δυνατό να εκτιμηθούν όλες οι κύριες επιδράσεις των παραγόντων και ενδεχομένως ορισμένες αλληλεπιδράσεις χαμηλής τάξης, αλλά όχι όλες οι δυνατές αλληλεπιδράσεις. Στα κλασματικά παραγοντικά πειράματα οι αλληλεπιδράσεις που δεν εξετάζονται άμεσα συγχωνεύονται με κύριες επιδράσεις ή αλληλεπιδράσεις χαμηλότερης ή και ίδιας τάξης, οι οποίες όμως εκτιμώνται μέσα από το πείραμα. Αυτό σημαίνει ότι η εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων χαμηλής τάξης δεν είναι αμιγής, αλλά εμπεριέχει και κάποιες αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης, οι οποίες όμως θεωρούνται αμελητέες. Καθίσταται όμως αναγκαίος ο προσεκτικός σχεδιασμός του πειράματος, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα με τον αποτελεσματικότερο τρόπο.

Ένα μοντέλο δευτέρης τάξης (ή τετραγωνικό μοντέλο) χρησιμοποιείται γενικά για την προσέγγιση της απόκρισης, μόλις διαπιστώνεται ότι το πείραμα είναι κοντά στη βέλτιστη περιοχή απόκρισης. Το τετραγωνικό μοντέλο παλινδρόμησης είναι συνήθως επαρκές για τη βέλτιστη περιοχή και παίρνει την ακόλουθη μορφή για K παράγοντες:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K +$$

$$\beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \dots + \beta_{KK} X_K^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{K-1,K} X_{K-1} X_K + \epsilon$$

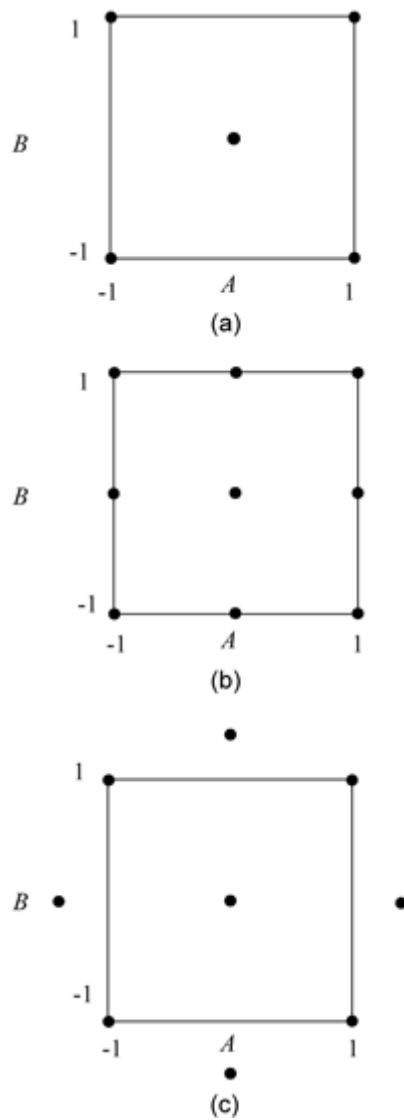
Το μοντέλο περιλαμβάνει $P = (K + 1)(K + 2)/2$ παραμέτρους παλινδρόμησης που περιλαμβάνει συντελεστές για τα κύρια αποτελέσματα $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K)$, συντελεστές για τετραγωνικά κύρια αποτελέσματα $(\beta_{11}, \beta_{22}, \dots, \beta_{KK})$ και συντελεστές για δύο-παραγόντων αποτελέσματα αλληλεπίδρασης $(\beta_{12}, \beta_{13}, \dots, \beta_{K-1,K})$.

Ένας πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός με όλους τους παράγοντες σε τρία επίπεδα θα παρέχει εκτίμηση όλων των απαιτούμενων παραμέτρων παλινδρόμησης. Ωστόσο, ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός με τρία επίπεδα είναι ακριβός για να χρησιμοποιηθεί, γιατί ο αριθμός των δοκιμών αυξάνεται ραγδαία με τον αριθμό των παραγόντων.

Στην περίπτωση που κάθε παράγοντας δεν έχει μόνο δύο επίπεδα αλλά τρία ή περισσότερα, ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός για 3 παράγοντες σε 3 επίπεδα δίνει $3^3 (=27)$ συνδυασμούς, ενώ ένα σχέδιο με τέσσερις παράγοντες θα απαιτούσε $3^4 (=81)$ συνδυασμούς. Τα σχέδια αυτά περιλαμβάνουν την εκτίμηση όλων των αλληλεπιδράσεων, πολλές από τις οποίες (ιδιαίτερα των υψηλότερων τάξεων) συνήθως δεν είναι τόσο σημαντικές για τον ερευνητή. Ως εκ τούτου, για τους σκοπούς ανάλυσης των επιφανειών τους χρησιμοποιούνται ειδικοί σχεδιασμοί (κλασματικοί) που βοηθούν τον ερευνητή να ταιριάζει το τετραγωνικό μοντέλο με χρήση ενός μικρότερου (ελάχιστου δυνατού) αριθμού συνδυασμών. Παραδείγματα τέτοιων σχεδιασμών είναι τα Central Composite Designs (CCD) και τα Box-Behnken Designs (BBD).

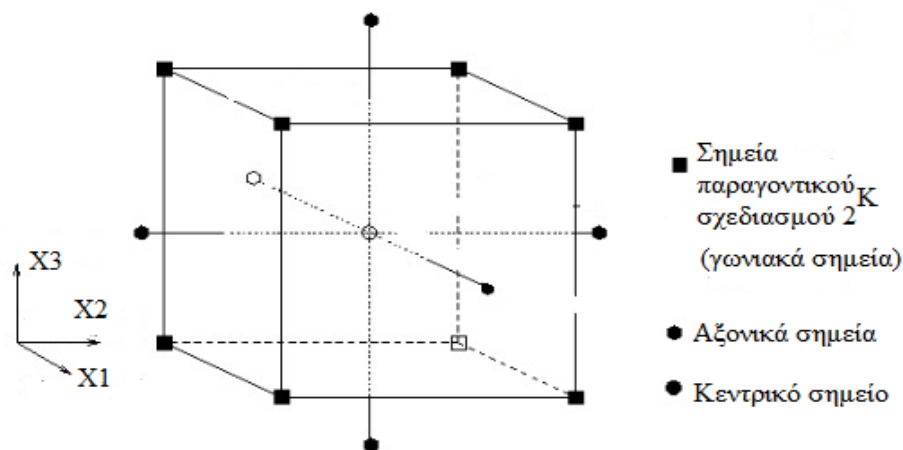
Κεντρικός Σύνθετος Σχεδιασμός (Central Composite Designs (CCD))

Ο κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός περιέχει ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό δύο επιπέδων (two-level factorial design 2^K) επαυξημένο με μία ομάδα από σημεία που επιτρέπουν την εκτίμηση της καμπυλότητας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (a)). Στον κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό έχουν προστεθεί τέσσερα άλλα σημεία $(-1,0)$, $(1,0)$, $(0,-1)$ και $(0,1)$. Τα σημεία αυτά αναφέρονται ως αξονικά σημεία και αντιπροσωπεύουν νέες ακραίες τιμές (χαμηλές και υψηλές) για κάθε παράγοντα στο σχεδιασμό. Ο αριθμός των αξονικών σημείων σε έναν κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό που έχει K παράγοντες είναι 2^K . Αν η απόσταση από το κέντρο του χώρου σχεδιασμού σε ένα παραγοντικό σημείο είναι ± 1 μονάδα για κάθε παράγοντα, η απόσταση από το κέντρο του χώρου σχεδιασμού σε ένα αξονικό σημείο είναι α , με $|\alpha| > 1$. Η ακριβής τιμή των α εξαρτάται από ορισμένες ιδιότητες που θέλουμε για τον σχεδιασμό και τον αριθμό των παραγόντων που εμπλέκονται. Ομοίως, ο αριθμός των κεντρικών σημείων εξαρτάται από ορισμένες ιδιότητες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό. Για παράδειγμα, το κεντρικό σύνθετο σχέδιο στο Σχήμα 4.5 (b) έχει $\alpha=1$, ενώ για το σχεδιασμό του Σχήματος 4.5 (c) $\alpha=\sqrt{2}=1.414$. Να σημειωθεί ότι για $\alpha > 1$, κάθε παράγοντας λειτουργεί σε πέντε επίπεδα $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ αντί για τα τρία συνήθη επίπεδα $(-1, 0, 1)$.



Σχήμα 4.5 Κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός - (a) δείχνει τον 2^2 σχεδιασμό με κεντρικό σημείο, (b) δείχνει τον δύο-παράγοντες κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό με $\alpha=1$ και (c) δείχνει τον δύο-παράγοντες κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό με $\alpha=\sqrt{2}$.

Στην περίπτωση που έχουμε τρεις παράγοντες, ο κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός αποτελείται από δυο-επιπέδων παραγοντικό σχεδιασμό (συν τα κεντρικά σημεία) και από αξονικά σημεία που παρουσιάζονται με αστέρια (Σχήμα 4.6). Το αποτέλεσμα είναι ένας σύνθετος σχεδιασμός που ταιριάζει στις μεθόδους επιφάνειας απόκρισης.



Σχήμα 4.6 Σχηματική παράσταση του κεντρικού σύνθετου σχεδιασμού 2 επιπέδων με 3 παράγοντες (X_1 , X_2 , X_3).

4.1.4 Καθορισμός των συνθέσεων με βάση το σχεδιασμό Box-Behnken

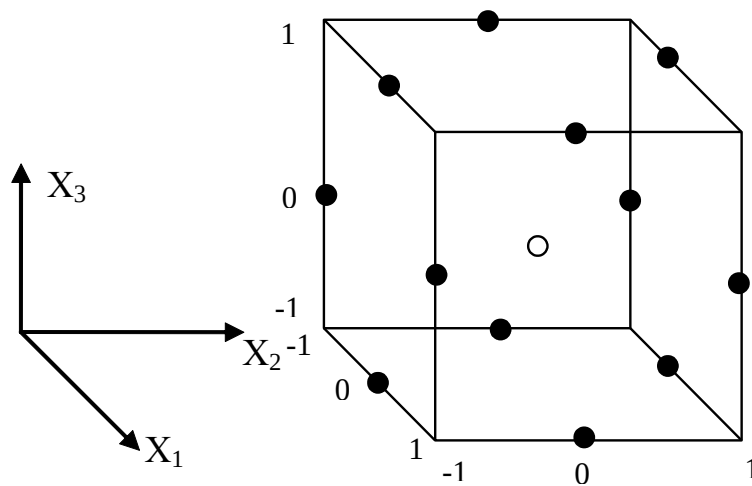
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση τριών παραγόντων (C_D , S_{CD} , M_C) σε τρία επίπεδα (-1, 0, 1) (Πίνακας 4.5). Χρησιμοποιείται ο κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός κατά **Box-Behnken** και όχι ο Central Composite σχεδιασμός, γιατί προσφέρει πλεονέκτημα όταν έχουμε τρεις παράγοντες να απαιτούνται λιγότεροι συνδυασμοί. Για 4 ή περισσότερους παράγοντες το πλεονέκτημα αυτό εξαφανίζεται. Το πλεονέκτημα αυτό φαίνεται στον Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4 Αριθμός συνδυασμών που απαιτούνται στον Κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό (Central Composite Design) και στο Box-Behnken σχεδιασμό.

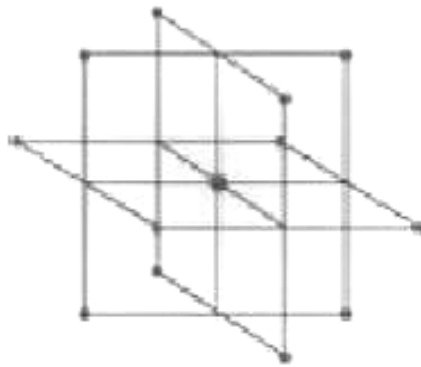
Αριθμός παραγόντων (number of factors)	Αριθμός συνδυασμών	
	Κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός	Box-Behnken σχεδιασμός
2	13 (5 κεντρικά σημεία)	-
3	20 (6 συνδυασμοί κεντρικών σημείων)	15
4	30 (6 συνδυασμοί κεντρικών σημείων)	27

	σημείων)	
5	33 (κλασματικοί παράγοντες) ή 52 (πλήρεις παράγοντες)	46
6	54 (κλασματικοί παράγοντες) ή 91 (πλήρεις παράγοντες)	54

Τα **Box-Behnken** σχέδια, είναι πειραματικά σχέδια που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους επιφάνειας απόκρισης και επινοήθηκαν από τους George EP Box και Donald Behnken το 1960. Τα σχέδια χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάπτυξη μοντέλων δεύτερης τάξης όταν γίνεται χρήση των επιφανειών απόκρισης για την βελτιστοποίηση. Σε αυτά τα σχέδια οι συνδυασμοί βρίσκονται στο μεσοδιάστημα των γωνιακών σημείων και στο κέντρο (Σχήμα 4.7). Τα Box-Behnken σχέδια απαιτούν τρία επίπεδα για κάθε παράγοντα.



(α)



(b)

Συνδυασμός	Παράγοντας		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	-1	+1
11	0	+1	-1
12	0	+1	+1
13	0	0	0

(c)

Σχήμα 4.7 Παραγοντικός σχεδιασμός Box-Behnken για τρεις παράγοντες - (a), (b) Σχηματική αναπαράσταση των συνδυασμών-επιπέδων και (c) Πίνακας σχεδίαση

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι παράγοντες και τα επίπεδα που επιλέχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και η τιμή του κάθε παράγοντα στα επίπεδα και στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται όλοι οι συνδυασμοί, των τριών παραγόντων, που προκύπτουν σύμφωνα με τον Box-Behnken σχεδιασμό.

Πίνακας 4.5 Παράγοντες και επίπεδα που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον Box-Behnken σχεδιασμό. Παρουσιάζεται η τιμή του κάθε παράγοντα στα κάθε ένα από τα τρία επίπεδα (-1, 0,+1).

Επίπεδα	Παράγοντας		
	C_D (λόγος τσιμέντο /παιπάλη)	S_CD (λόγος υπερρευστοποιητή /(τσιμέντο+ παιπάλη)	M_C (λόγος πυριτικής παιπάλης/τσιμ έντο)
-1 (χαμηλό)	0.1	0.004	0.05
0 (μεσαίο)	0.15	0.006	0.1
+1 (υψηλό)	0.20	0.008	0.15

Πίνακας 4.6 Αριθμός συνδυασμών που προκύπτουν από τον Box-Behnken σχεδιασμό για τους 3 παράγοντες (C_D, S_CD, M_C) στα τρία επίπεδα (-1, 0,+1). Προκύπτουν 13 διαφορετικοί συνδυασμοί και 2 επαναλήψεις του κεντρικού σημείου (συνθέσεις 6, 10, 11).

Συνδυασμός	Παράγοντας		
	C_D (λόγος τσιμέντου/ παιπάλης)	S_CD (λόγος υπερρευστοποιητή /τσιμέντο και παιπάλη)	M_C (λόγος πυριτικής παιπάλης/ τσιμέντο)
X1	0,15	0,008	0,05
X2	0,20	0,006	0,05
X3	0,10	0,006	0,05
X4	0,15	0,004	0,15
X5	0,20	0,008	0,10
X6	0,15	0,006	0,10
X7	0,10	0,004	0,10
X8	0,10	0,008	0,10
X9	0,20	0,006	0,15
X10	0,15	0,006	0,10
X11	0,15	0,006	0,10
X12	0,15	0,008	0,15
X13	0,20	0,004	0,10
X14	0,15	0,004	0,05
X15	0,10	0,006	0,15

4.2 Παρασκευή και ωρίμανση δοκιμίων

Αρχικά, συγκεντρώθηκαν όλες οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιούνταν και έγινε η αναγωγή των περιεκτικοτήτων σε γραμμάρια. Στη συνέχεια ακολούθησε η επιμέρους ζύγιση της ποσότητας κάθε υλικού. Λόγω των μικρών ποσοτήτων όλων των υλικών είναι απαραίτητη η ακρίβεια όλων των ζυγίσεων μέχρι το εκατοστό του g, ακρίβεια που προσέφερε η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε. Το συνολικό βάρος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρασκευή των δοκιμίων, με βάση τη συνταγή που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά ήταν περίπου 1,1Kg έως 1,2Kg, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το νερό και τα ειδικά χημικά πρόσμικτα που χρειάστηκαν να προστεθούν.

Μετά τη ζύγιση, ο υπερρευστοποιητής και ο επιβραδυντής τοποθετήθηκαν σε αναμικτήρα βίαιης ανάμιξης με μικρή ποσότητα νερού, ώστε να διαλυθούν πιθανά συσσωματώματα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στον εργαστηριακό αναμικτήρα (Σχήμα 4.8) στον οποίο είχε ήδη τοποθετηθεί και αναμιχθεί ελαφρώς η προζυγισμένη ποσότητα της παιπάλης, του μικροτσιμέντου και του microsilica. Η ποσότητα του νερού καθορίστηκε από τη διάμετρο του κώνου εξάπλωσης που απαιτούνταν. Η ανάμιξη στον εργαστηριακό αναμικτήρα έγινε με την συνήθη ταχύτητα περιστροφής (το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με συχνότητα 285 στροφών το λεπτό και περιμετρικά του δοχείου με συχνότητα 125 στροφών το λεπτό).



Σχήμα 4.8 Εργαστηριακός αναμικτήρας



Σχήμα 4.9 Διαδικασία ανάμιξης μίγματος στον εργαστηριακό αναμικτήρα



Σχήμα 4.10 Τελική μορφή μίγματος στον εργαστηριακό αναμικτήρα

Όταν το μίγμα είχε τον επιθυμητό κώνο εξάπλωσης (παράγραφος 5.1.1), τοποθετήθηκε σε κυβικές μήτρες διαστάσεων $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ (Σχήμα 4.11). Την επόμενη μέρα τα δοκίμια απομακρύνονταν από τις μήτρες και ακολουθούσε η διαδικασία της ωρίμανσης. Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος σε εργαστηριακό θάλαμο ωρίμανσης της εταιρείας MATEST, σε θερμοκρασία $20 \pm 1^\circ \text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Έπειτα, παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών.



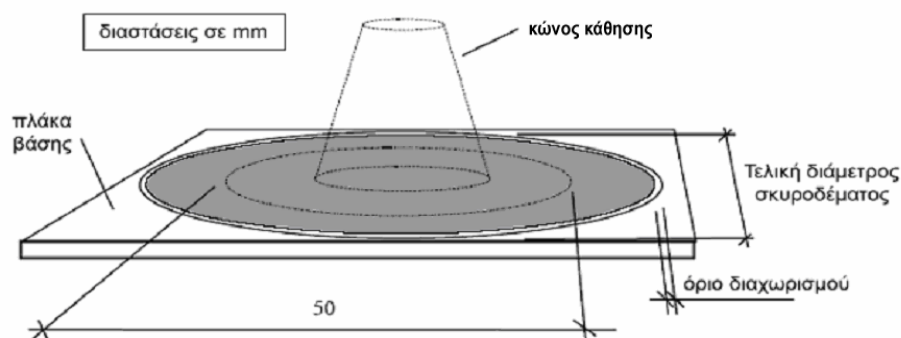
Σχήμα 4.11 Κυβικές μήτρες δοκιμίων διαστάσεων $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.1 Έλεγχος νωπού μικροσκυροδέματος

5.1.1 Η δοκιμή μικροκώνου εξάπλωσης

Η ποσότητα νερού που εισήχθη στο μίγμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθορίστηκε από την τιμή της δοκιμής του μικροκώνου εξάπλωσης. Με βάση τη δοκιμή αυτή εκτιμάται η ρεολογική συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος που σχετίζεται άμεσα με την εργασιμότητα του και την ικανότητα του να ρέει και να γεμίζει τα καλούπια εντός των οποίων τοποθετείται (ικανότητα πλήρωσης). Για να γίνει η μέτρηση χρειάζεται ένας συνηθισμένος κώνος κάθισης και μια μεταλλική επιφάνεια (Σχήμα 5.2). Η δοκιμή του μικροκώνου εξάπλωσης για την μέτρηση της ρεολογικής ικανότητας του μίγματος αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή της δοκιμής EN11041 (Felekoglou, 2007). Ο κώνος γεμίζει σε μια στρώση και στη συνέχεια αφού σκουπιστεί τριγύρω για τυχόν υπολείμματα, ανασηκώνεται αφήνοντας το σκυρόδεμα να εξαπλωθεί. Λόγω της ρευστότητας του μίγματος σχηματίζεται μια στρογγυλή επιφάνεια (Σχήμα 5.3). Υπολογίζοντας το μέσο όρο των μετρήσεων δύο κάθετων μεταξύ τους διαμέτρων της επιφάνειας αυτής, καθορίζεται η τιμή της δοκιμής.



Σχήμα 5.1 Συσκευή μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος.

Για να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος ώστε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ποσότητα νερού για να επιτευχθεί το επιθυμητό μέτρο εξάπλωσης, χρειάζεται ο κατάλληλος κώνος. Ο κώνος που χρησιμοποιήθηκε έχει διαστάσεις 21mm η μικρή διάμετρος, 40mm η μεγάλη διάμετρος και 60mm το ύψος του κώνου.



Σχήμα 5.2 Κώνος και μεταλλική επιφάνεια

Όταν το μέτρο εξάπλωσης που είχε προσδιοριστεί πριν την έναρξη της παρασκευής του μίγματος, ήταν το επιθυμητό, σταματούσε η προσθήκη του νερού στο μίγμα.



Σχήμα 5.3 Μέτρηση διαμέτρου του κώνου εξάπλωσης. Ακολουθεί το πρότυπο EN11041

5.2 Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων

5.2.1 Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων

Οι μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμίων που μετρήθηκαν είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young.

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Μετά το πέρας των 28 ημερών, έγινε η μέτρηση των διαστάσεων (ύψος, πλάτος, μήκος) και του βάρους καθενός δοκιμίου και ακολούθησε η διαδικασία της δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-304. Για κάθε μία σύνθεση έγινε θραύση τριών δοκιμίων και υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντοχής τους.

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή MTS 1380 (Σχήμα 5.4) με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0,5 – 1,0 MPa/sec. Η συσκευή περιλαμβάνει: α) παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο, β) χαλύβδινους δίσκους που τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και το δοκίμιο με σκοπό την ελάττωση της υπερβολικής πλευρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής, γ) σφαιρική κεφαλή έδρασης στο πάνω μέρος του δοκιμίου, ο άξονας της οποίας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η επιβολή του φορτίου και η καταγραφή φορτίου και μετατόπισης γίνεται από ηλεκτρονικό σύστημα. Τα δεδομένα επεξεργάζονται και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_s προκύπτει από τη σχέση $C_s = F_{\max} / E$, όπου $F_{\max}$ το μέγιστο φορτίο (δύναμη) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και E η επιφάνεια του δοκιμίου (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.4 Μηχανή MTS 1380

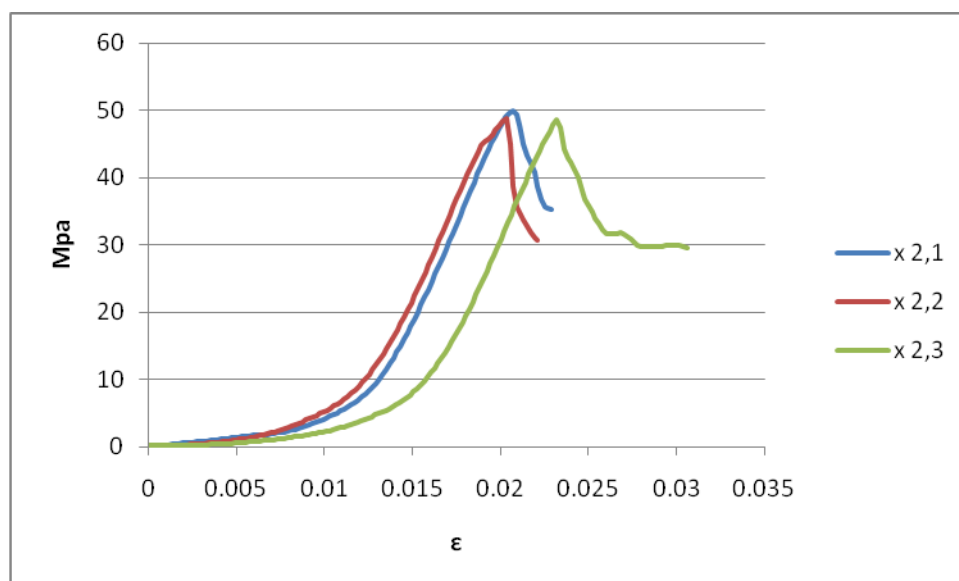
Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ανάμεσα στις δύο μεταλλικές πλάκες στην μηχανή φόρτισης (Σχήμα 5.5). Στη συνέχεια έγινε φόρτιση με έλεγχο της μετατόπισης κατά τον διαμήκη άξονά τους και συγχρόνως έγινε καταγραφή της αντίστοιχης ανηγμένης παραμόρφωσης.



Σχήμα 5.5 Μεταλλικές πλάκες φόρτισης και δοκίμιο

Μέτρο ελαστικότητας Young

Το μέτρο ελαστικότητας Young, εκφράζει την ακαμψία ενός υλικού, παρόμοια με την ακαμψία ενός ελατηρίου, όταν αυτό συμπιέζεται ή εκτείνεται (Αγιουτάντης, 2002). Αν για ένα υλικό γίνει η γραφική παράσταση της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης, προκύπτει μια καμπύλη της παρακάτω μορφής (Σχήμα 5.6)



Σχήμα 5.6 Τυπικό γράφημα τάσης (MPa) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ) για τα 3 δοκίμια της σύνθεσης X2.

Το μέτρο ελαστικότητας Young, υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης.

Το μέτρο ελαστικότητας βοηθά την τεχνολογία των κατασκευών, γιατί προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά των υλικών σε διάφορες καταπονήσεις. Κανένα υλικό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται εκτός της ελαστικής του περιοχής. Υλικά που έχουν χαμηλό μέτρο ελαστικότητας δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν πρόκειται να δεχθούν κάμψεις.

5.2.2 Φυσικές ιδιότητες δοκιμίων

Οι φυσικές ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμίων που μετρήθηκαν, είναι η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα.

Υδατοαπορρόφηση

Ο προσδιορισμός της υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων, δηλαδή η ικανότητα που έχει ένα δοκίμιο να απορροφά νερό, είναι σημαντικό για όλες τις κατασκευαστικές εφαρμογές.

Αντιπροσωπευτικά κομμάτια δοκιμίων από τις συνθέσεις τοποθετήθηκαν σε δοχείο με απεσταγμένο νερό για 24 ώρες. Μετά το πέρας των 24 ωρών, τα δοκίμια σκουπίστηκαν, ζυγίστηκαν και μετρήθηκε το βάρος του. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν για 24 ώρες σε φούρνο στους 105°C και αφού έμειναν σε υάλωνα κώδωνα για να κρυώσουν, ζυγίστηκαν ξανά και μετρήθηκε το βάρος τους. Για τον υπολογισμό του νερού που απορροφήθηκε γίνεται χρήση της σχέσης:

$$[(W_{\text{H}_2\text{O}} - W_{105^{\circ}\text{C}}) / W_{105^{\circ}\text{C}}] * 100$$

όπου, $W_{\text{H}_2\text{O}}$ το βάρος του δοκιμίου μετά από 24 ώρες στο νερό και $W_{105^{\circ}\text{C}}$ το βάρος του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση μετά την παραμονή του εντός του φούρνου.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται το βάρος και οι τιμές της υδατοαπορρόφησης για τα κομμάτια των δοκιμίων των συνθέσεων που μετρήθηκαν.

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις της υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων των συνθέσεων.

Κωδικός σύνθεσης	$W_{105^{\circ}\text{C}}$ (Βάρος δοκιμίου μετά από 24 ώρες στους 105°C)	$W_{\text{H}_2\text{O}}$ (Βάρος δοκιμίου μετά από 24 ώρες στο νερό)	% ποσοστό νερού που απορροφήθηκε
X1	46,42	49,62	6,89
X2	40,47	43,66	7,88
X3	44,69	49,17	10,02
X4	65,39	68,51	4,77
X5	46,46	48,48	4,35
X6	49,26	52,32	6,21
X7	43,11	47,42	10,00
X8	60,34	66,45	10,13
X9	56,78	58,00	2,15
X10	34,59	36,93	6,76
X11	46,04	48,95	6,32
X12	50,94	54,12	6,24
X13	63,02	66,29	5,19

X14	75,51	81,21	7,55
X15	76,84	83,11	8,16

Φαινόμενη πυκνότητα

Η φαινόμενη πυκνότητα του κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε από τον τύπο $d = m/V$, όπου d είναι η πυκνότητα του δοκιμίου, m είναι η μάζα του και V ο όγκος του.

Η μάζα του κάθε δοκιμίου μετρήθηκε σε ζυγαριά ενώ ο όγκος του υπολογίστηκε από τον πολλαπλασιασμό των διαστάσεών του (μήκος, πλάτος, ύψος).

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου όλων των συνθέσεων καθώς και η φαινόμενη πυκνότητά τους.

Πίνακας 5.2 Διαστάσεις και υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας κάθε δοκιμίου όλων των συνθέσεων.

Κωδικός σύνθεσης	Κωδικός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
		Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X1	X1.1	5,030	4,910	5,005	267,7	2,16
	X1.2	5,020	5,015	5,010	275,0	2,18
	X1.3	5,020	5,040	5,020	276,5	2,17
X2	X2.1	5,010	5,065	5,005	275,4	2,17
	X2.2	5,030	5,010	5,015	276,8	2,19
	X2.3	5,025	4,955	5,030	273,2	2,18
X3	X3.1	4,840	5,015	5,090	267,1	2,16
	X3.2	4,830	5,015	5,085	266,7	2,16
	X3.3	4,890	5,005	5,090	262,6	2,11
X4	X4.1	5,035	5,200	5,020	280,0	2,13
	X4.2	5,005	5,198	5,025	279,1	2,13
	X4.3	5,025	5,175	5,010	274,6	2,11
X5	X5.1	5,060	5,030	5,060	278,4	2,16
	X5.2	5,060	5,125	5,085	284,9	2,16
	X5.3	5,175	5,080	5,070	279,4	2,11
X6	X6.1	5,015	5,035	5,015	274,6	2,17
	X6.2	5,015	5,010	5,020	270,7	2,15
	X6.3	5,085	5,010	5,025	270,5	2,11
X7	X7.1	5,020	5,075	5,020	277,5	2,17
	X7.2	5,025	5,010	5,025	278,4	2,20
	X7.3	5,020	5,095	5,025	277,4	2,16
X8	X8.1	4,990	5,025	5,010	262,7	2,09

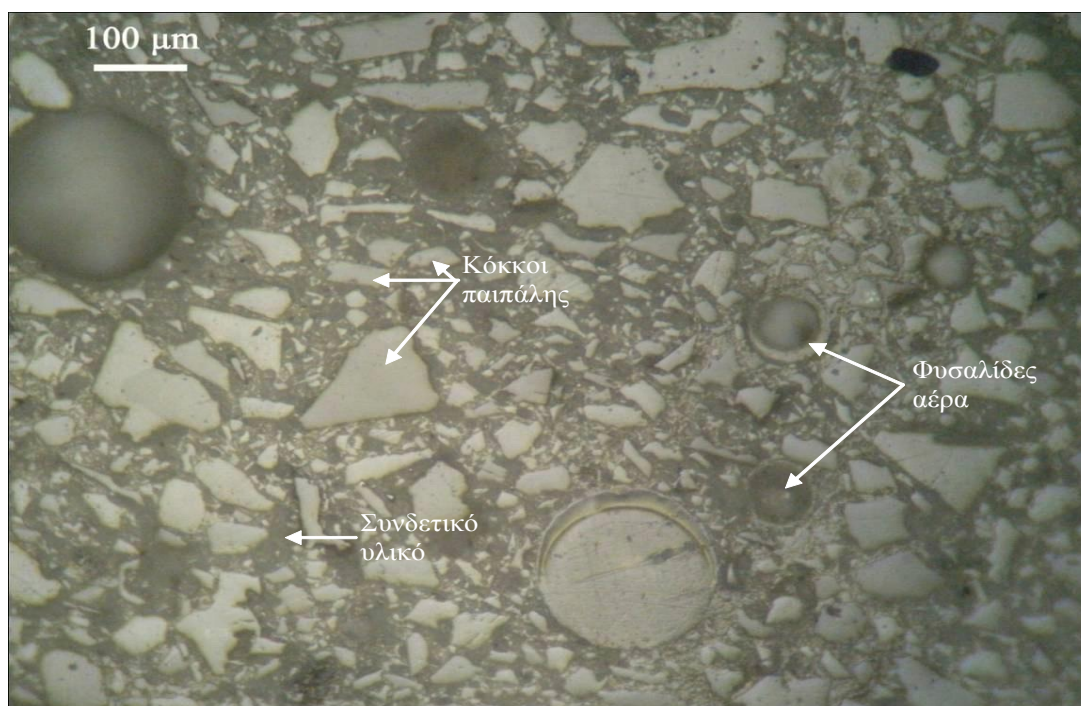
	X8.2	5,015	4,975	5,025	263,1	2,10
	X8.3	5,025	5,075	5,025	268,1	2,09
X9	X9.1	5,105	5,110	5,175	286,2	2,12
	X9.2	5,180	5,130	5,180	287,2	2,09
	X9.3	5,090	5,120	5,075	283,9	2,15
X10	X10.1	5,015	5,045	5,020	273,1	2,15
	X10.2	5,015	5,150	5,010	278,0	2,15
	X10.3	5,010	5,170	5,010	278,8	2,15
X11	X11.1	5,010	5,160	5,025	283,7	2,18
	X11.2	5,120	5,020	5,015	280,2	2,17
	X11.3	5,020	5,135	5,005	279,3	2,17
X12	X12.1	5,025	5,215	5,010	281,1	2,14
	X12.2	5,005	5,160	5,025	278,0	2,14
	X12.3	5,010	5,150	5,010	275,1	2,13
X13	X13.1	5,085	5,040	5,015	274,7	2,14
	X13.2	5,040	5,105	5,020	282,2	2,18
	X13.3	5,045	5,075	5,020	280,9	2,18
X14	X14.1	5,080	5,025	5,025	278,2	2,17
	X14.2	5,015	5,160	5,025	280,9	2,16
	X14.3	5,125	5,025	5,025	279,1	2,16
X15	X15.1	5,020	5,010	5,040	272,1	2,15
	X15.2	5,020	5,055	5,025	273,0	2,14
	X15.3	5,025	5,025	5,020	272,2	2,15

5.3 Έλεγχος μικροδομής δοκιμίων

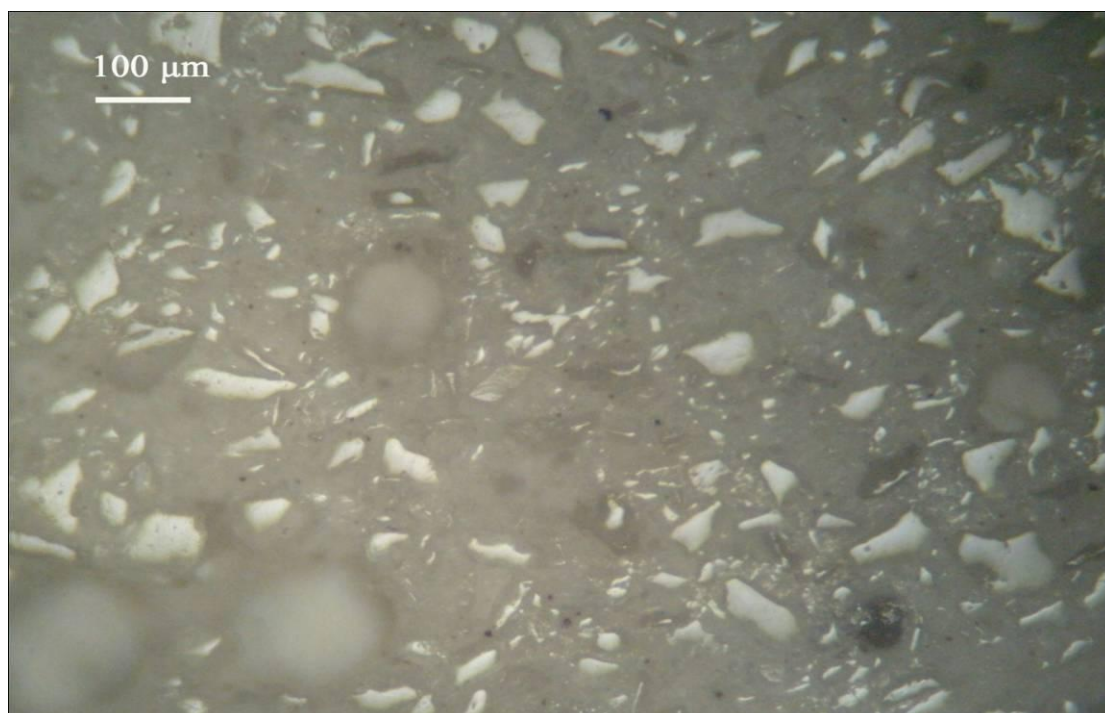
Η μικροδομή των σκληρυμένων δοκιμίων εξετάστηκε με πολωτικό μικροσκόπιο ανακλωμένου φωτός. Για την εξέταση της δομής με το πολωτικό μικροσκόπιο, κατασκευάστηκαν στιλβωμένες τομές (Σχήμα 5.7) από τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν. Στα σχήματα 5.8 -5.9 φαίνονται τυπικές μικροφωτογραφίες των δοκιμίων με το πολωτικό μικροσκόπιο, ενώ στα 5.10 και 5.11 φωτογραφίες της φυσικής επιφάνειας των δοκιμίων.



Σχήμα 5.7 Στιλβωμένες τομές δοκιμίων συνθέσεων X1, X4, X5, X8 και X10



Σχήμα 5.8 Μικροφωτογραφία στιλπνής τομής δοκιμίου της σύνθεσης X4. Οι κόκκοι της παιπάλης είναι ακανόνιστου σχήματος γωνιώδεις ή/και επιμήκεις διεσπαρμένοι ομοιόμορφα εντός του συνδετικού υλικού. Οι κυκλικές οπές είναι φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα. Ανακλώμενο φως, //Nicols.

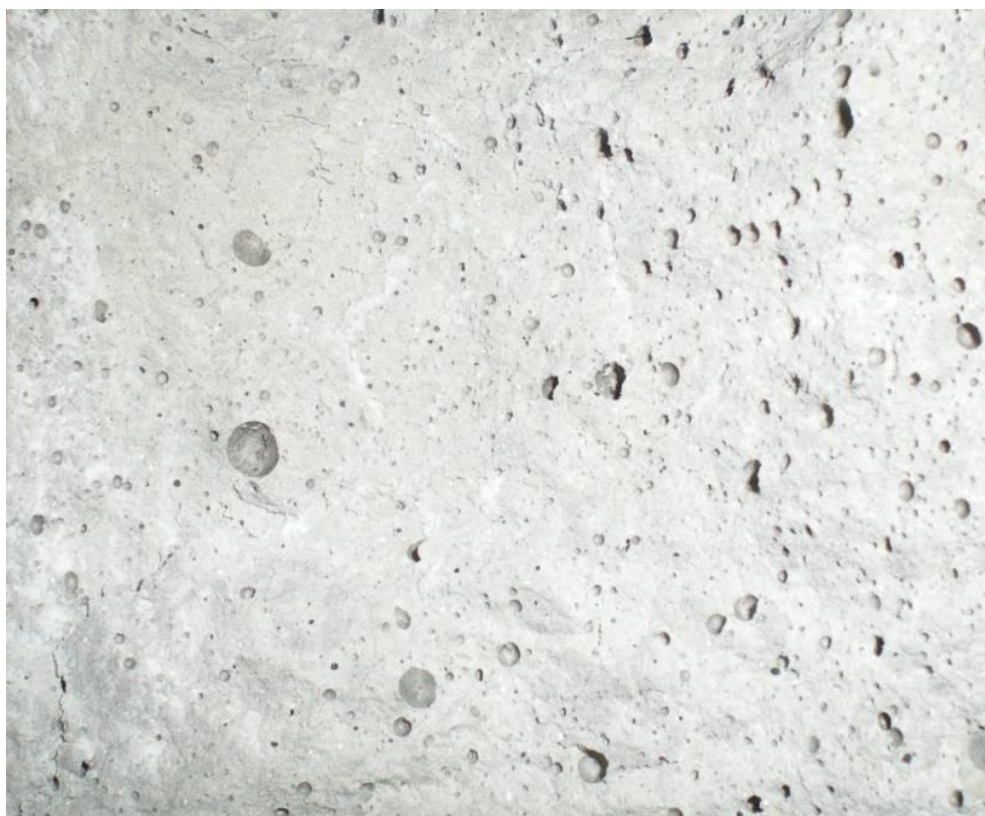


Σχήμα 5.9 Μικροφωτογραφία στίλπνης τομής δοκιμίου της σύνθεσης X8. Οι κόκκοι της παιπάλης είναι ακανόνιστου σχήματος γωνιώδεις ή/και επιμήκεις διεσπαρμένοι ομοιόμορφα εντός του συνδετικού υλικού. Οι κυκλικές οπές είναι φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα. Ανακλώμενο φως, //Nicols.

Απ τις φωτογραφίες αυτές, παρατηρούμε ότι οι κόκκοι της παιπάλης είναι κυρίως ακανόνιστου σχήματος, γωνιώδεις, πρισματικοί και η μορφή τους σχετίζεται άμεσα με την κρυσταλλική δομή (ρομβοεδρική) του βασικού ορυκτολογικού της συστατικού του ασβεστίτη. Υπάρχει μικρός μόνο αριθμός στρογγυλεμένων κόκκων παιπάλης. Παρατηρείται επίσης ομοιογενής διασπορά των διαφόρων μεγεθών των κόκκων εντός του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε (μικροτσιμέντο και microsilica).

Στις φωτογραφίες αυτές, φαίνονται επίσης, κενά-φυσαλίδες αέρα σε διάφορα μεγέθη που οφείλονται κυρίως στον εγκλωβισμένο αέρα εντός του μίγματος.

Η χρήση δονούμενης τράπεζας μετά τη χύτευση του μίγματος στα καλούπια μπορεί να μειώσει τον αριθμό των φυσαλίδων. Τα κενά αέρα φαίνονται και μακροσκοπικά στα σχήματα 5.10 και 5.11.



Σχήμα 5.10 Μεγάλα και πολλά κενά λόγω του εγκλωβισμένου αέρα σε δοκίμιο της σύνθεσης X4



Σχήμα 5.11 Οπές διαφόρων μεγεθών λόγω των φυσαλίδων του εγκλωβισμένου αέρα σε δοκίμιο της σύνθεσης X8.

Περισσότερες φωτογραφίες της μικροδομής των δοκιμών δίνονται στο Παράρτημα 1.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθέσεις που προέκυψαν από τον παραγοντικό σχεδιασμό Box-Behnken, καθώς και οι μετρηθείσες ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου μικροσκυροδέματος.

Πίνακας 5.3. Πίνακας συνθέσεων και μετρηθείσες ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου μικροσκυροδέματος.

	<i>Παράγοντες σχεδιασμού</i>				<i>q</i>	<i>F</i>	<i>Μεταβλητές απόκρισης</i>								
	<i>C_D</i>	<i>S_CD</i>	<i>M_C</i>	<i>W_C</i>			<i>Cs</i>	<i>Cs 1</i>	<i>Cs 2</i>	<i>Cs 3</i>	<i>SG</i>	<i>SG1</i>	<i>SG2</i>	<i>SG3</i>	<i>Wa</i>
Αριθμός σύνθεσης	Λόγος τσιμέντο/ παιπάλη	Λόγος υπερρευστοποιητή/ τσιμέντο και παιπάλη	Λόγος προριτικής παιπάλης/ τσιμέντο	Λόγος νερού/ τσιμέντο	Παράμετρος Andreassen	Μέτρο κώνου εξάπλωσης (σε mm)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε MPa	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε MPa	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε MPa	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε MPa	Πυκνότητα g/cm ³	Πυκνότητα g/cm ³	Πυκνότητα g/cm ³	Πυκνότητα g/cm ³	% Υδατοαπορρόφηση
X1	0,15	0,008	0,05	1,03	0,43	1250	29,7	32,3	24,2	32,6	2,17	2,16	2,18	2,17	6,89
X2	0,20	0,006	0,05	0,79	0,45	1350	49,2	50,0	48,8	48,7	2,18	2,17	2,19	2,18	7,88
X3	0,10	0,006	0,05	1,65	0,47	1325	15,7	15,0	16,4	15,8	2,14	2,16	2,16	2,11	10,02
X4	0,15	0,004	0,15	1,07	0,40	1175	50,5	47,2	51,5	52,9	2,12	2,13	2,13	2,11	4,77
X5	0,20	0,008	0,10	0,90	0,40	925	41,7	54,0	36,0	35,2	2,14	2,16	2,16	2,11	4,35
X6	0,15	0,006	0,10	1,05	0,45	1100	31,5	30,7	31,6	32,2	2,14	2,17	2,15	2,11	6,21
X7	0,10	0,004	0,10	1,70	0,47	1350	25,6	25,8	25,8	25,3	2,18	2,17	2,20	2,16	10,00
X8	0,10	0,008	0,10	1,60	0,47	1300	17,3	17,4	17,3	17,1	2,09	2,09	2,10	2,09	10,13
X9	0,20	0,006	0,15	0,95	0,35	1050	22,3	22,3	26,7	17,9	2,12	2,12	2,09	2,15	2,15
X10	0,15	0,006	0,10	1,05	0,45	1100	27,2	30,9	27,5	23,1	2,15	2,15	2,15	2,15	6,76
X11	0,15	0,006	0,10	1,05	0,45	1100	32,5	38,0	30,6	28,9	2,17	2,18	2,17	2,17	6,32
X12	0,15	0,008	0,15	1,02	0,40	1150	31,9	32,4	31,1	32,1	2,14	2,14	2,14	2,13	6,24
X13	0,20	0,004	0,10	0,85	0,38	1225	46,3	50,7	46,8	41,5	2,17	2,14	2,18	2,18	5,19
X14	0,15	0,004	0,05	1,03	0,43	1125	35,6	33,9	38,8	34,0	2,16	2,17	2,16	2,16	7,55
X15	0,10	0,006	0,15	1,50	0,45	1200	22,7	24,5	20,8	22,8	2,15	2,15	2,14	2,15	8,16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων παραγοντικού σχεδιασμού

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα παραγοντικό πείραμα επιτρέπει την εξέταση της επίδρασης κάθε παράγοντα στην μεταβλητή απόκρισης, καθώς και τις επιπτώσεις των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων στην μεταβλητή απόκρισης.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση τριών παραγόντων (C_D, S_CD, M_C) σε τρία επίπεδα (-1, 0, +1).

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι συμβολισμοί των παραγόντων και η περιγραφή τους.

Πίνακας 6.1 Συμβολισμός των παραγόντων του πειραματικού σχεδιασμού.

Συμβολισμός	Περιγραφή παράγοντα
A:C_D	Λόγος τσιμέντο/παιπάλη (ratio of Cement to Dust)
C:S_CD	Λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο-παιπάλη (ratio of Superfluidizier to Cement and Dust)
B:M_C	Λόγος πυριτικής παιπάλης/τσιμέντο (ratio of Microsilica to Cement)

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συμβολισμοί των μεταβλητών που μετρήθηκαν και η περιγραφή τους.

Πίνακας 6.2 Περιγραφή των μεταβλητών απόκρισης του παραγοντικού σχεδιασμού

Συμβολισμός	Περιγραφή μεταβλητής
Cs	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Compressive strength)
Wa	Υδατοαπορρόφηση (Water absorption)
W_C	Λόγος νερού/τσιμέντο (ratio of Water to Cement)

SG ή d	Πυκνότητα (density)
Q	Παράμετρος Andreassen (Andreassen parameter)

Ως μεταβλητές απόκρισης επιλέχθηκαν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη Cs και η υδατοαπορρόφηση Wa.

Για την ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγιναν τα εξής:

- Υπολογισμός των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων των παραγόντων που επιδρούν στην μεταβλητή απόκρισης και υπολογισμός του τυπικού σφάλματος για κάθε έναν.
- Πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης της εξίσωσης που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις.

Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι:

- Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές και τις κανονικοποιημένες τιμές
- Διάγραμμα κύριων επιδράσεων
- Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων
- Επιλογή μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης 2^{ov} βαθμού
- Επιφάνεια απόκρισης-βελτιστοποίηση

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του παραγοντικού σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα STATGRAPHICS Centurion XVII.

Αρχικά έγινε υπολογισμός των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων των παραγόντων που επιδρούν στην μεταβλητή απόκρισης και υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα για κάθε έναν.

Για να εκτιμηθεί η κύρια επίδραση κάθε παράγοντα στην αντοχή στην εξεταζόμενη μεταβλητή απόκρισης, υπολογίζεται η μέση τιμή της μεταβλητής απόκρισης στο χαμηλό και στο υψηλό επίπεδο για κάθε παράγοντα και στη συνέχεια ως κύρια επίδραση θεωρείται η διαφορά των μέσων τιμών της μεταβλητής στα δυο επίπεδα.

Υπολογισμός επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην Cs

Η μέση τιμή της Cs για το χαμηλό επίπεδο (0,10) του παράγοντα C_D είναι:

$$C_s = \frac{15,7 + 25,6 + 17,3 + 22,7}{4} = 20,325 \text{Mpa}$$

Για το υψηλό επίπεδο C_D (0,20) είναι:

$$C_s = \frac{49,2 + 41,7 + 22,3 + 46,3}{4} = 39,875 \text{Mpa}$$

Και η κύρια επίδραση του C_D στην Cs είναι:

$$C_s = |39,875 - 20,325| = 19,55 \text{Mpa}$$

Ομοίως υπολογίζω την κύρια επίδραση για τους άλλους δυο παράγοντες στην Cs.

Για το χαμηλό επίπεδο του S_CD (0,004):

$$C_s = \frac{50,5 + 25,6 + 46,3 + 35,6}{4} = 39,5 \text{Mpa}$$

Για το υψηλό επίπεδο του S_CD (0,008)

$$C_s = \frac{29,7 + 41,7 + 17,3 + 31,9}{4} = 30,15 \text{Mpa}$$

Και η κύρια επίδραση του S_CD στην Cs είναι:

$$C_s = |30,15 - 39,5| = 9,35 \text{Mpa}$$

Για το χαμηλό επίπεδο του M_C (0,05)

$$C_s = \frac{29,7 + 49,2 + 15,7 + 35,6}{4} = 32,55 \text{Mpa}$$

Για το υψηλό επίπεδο του M_C (0,15)

$$C_s = \frac{50,5 + 22,3 + 31,9 + 22,7}{4} = 31,85 \text{Mpa}$$

Και η κύρια επίδραση του M_C στην Cs είναι:

$$C_s = |31,85 - 32,55| = 0,7 \text{Mpa}$$

Για την εκτίμηση του πειραματικού σφάλματος στη μέτρηση των μεταβλητών απόκρισης υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση σ_x των 3 επαναληπτικών μετρήσεων που έγιναν στα δοκίμια της κεντρικής σύνθεσης.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (x_i - m_x)^2$$

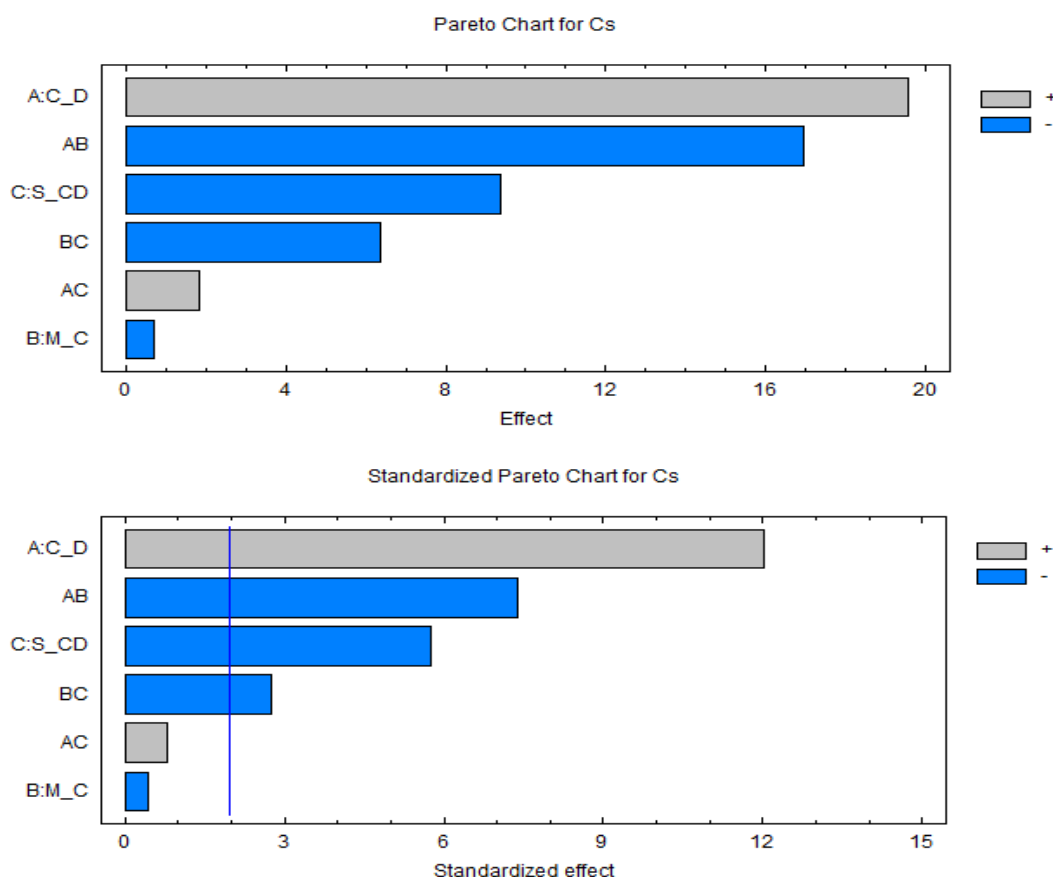
Όπου $M=3$, x_i = η τιμή της μεταβλητής απόκρισης για κάθε μια από τις 3 μετρήσεις και m_x = η μέση τιμή των τριών μετρήσεων.

Οι τιμές της C_s για την κύρια σύνθεση, στην οποία έγιναν τρεις επαναλήψεις, είναι: 31,5MPa, 27,2MPa και 32,5MPa με μέση τιμή 30,4 MPa και $\sigma_x = 2,82$ MPa. Για τον έλεγχο της στατιστικής σημαντικότητας των κύριων επιδράσεων αλλά και των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων που επιδρούν στην C_s υπολογίστηκαν οι κανονικοποιημένες τιμές των επιδράσεων. Οι κανονικοποιημένες τιμές για τις επιδράσεις στην C_s υπολογίστηκαν ως ο λόγος m_x/σ_x . Στατιστικά σημαντικές θεωρούνται οι κανονικοποιημένες τιμές που οι απόλυτες τιμές τους υπερβαίνουν την τιμή 2,0. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο επίπεδο βεβαιότητας 95%, που επιλέχθηκε ως ικανοποιητικό για τους σκοπούς της εργασίας αυτής.

Πίνακας 6.3 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών.

Παράγοντας	Κύρια επίδραση	Κανονικοποιημένη τιμή
A:C_D	19,55	8,503697
B:M_C	-0,7	-0,30448
C:S_CD	-9,35	-4,06699
AB	-16,95	-7,37277
AC	1,85	0,804698
BC	-6,35	-2,76207

Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται οι επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις όπως εκτιμήθηκαν. Τα διαγράμματα Pareto για τις αρχικές και τις κανονικοποιημένες τιμές δίνονται στο Σχήμα 6.1:

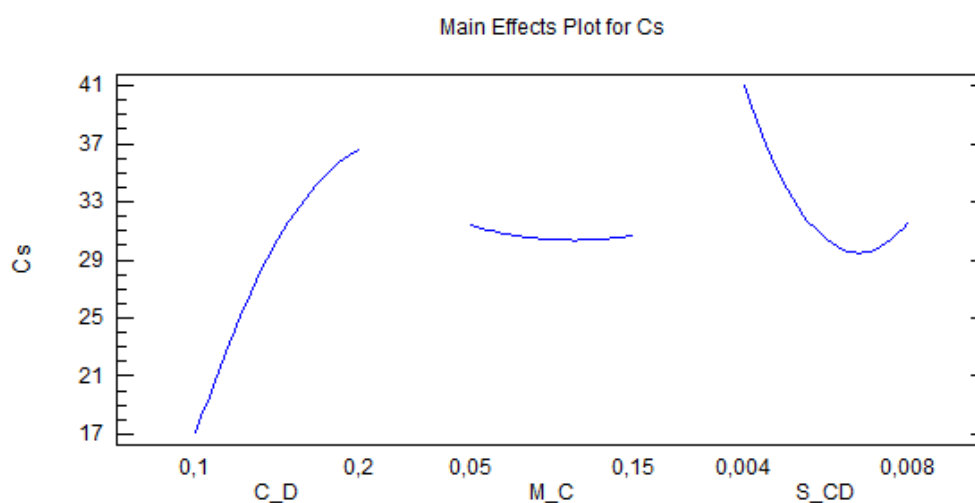


Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη Cs.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα Pareto, τη μεγαλύτερη επίδραση (θετική) στη μεταβολή της μεταβλητής Cs έχει ο παράγοντας A, δηλαδή ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη (C_D). Ακολουθούν η αλληλεπίδραση AB, ο παράγοντας C, δηλαδή ο λόγος υπερρευστοποιητή/(τσιμέντο και παιπάλη) (S_CD), η αλληλεπίδραση BC με μικρότερη επίδραση. Η αλληλεπίδραση AC και ο παράγοντας B, δηλαδή ο λόγος microsilica/τσιμέντο (M_C) δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο της τιμής 2,0 (μπλε γραμμή).

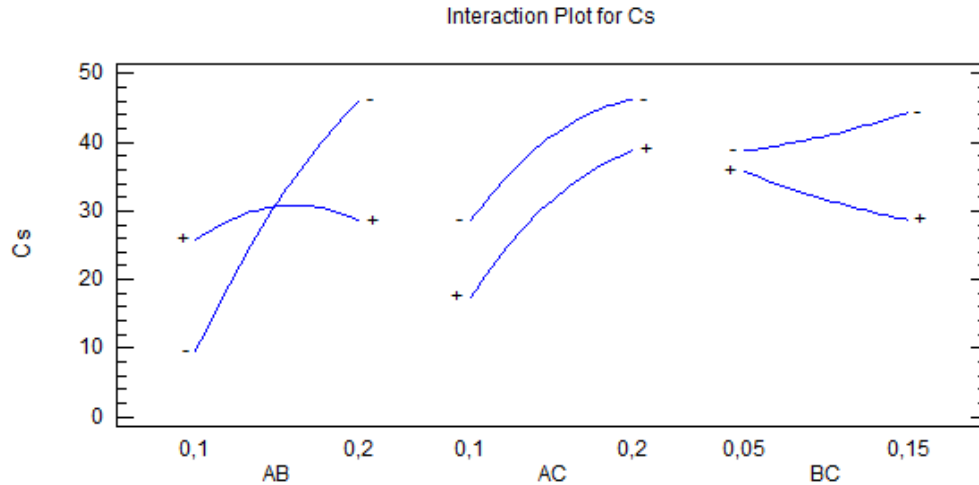
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων (Σχήμα 6.2) και αλληλεπιδράσεων (Σχήμα 6.3). Στο διάγραμμα των κύριων επιδράσεων παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Παρατηρείται ότι και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης Cs. Ο παράγοντας A επιδρά θετικά στην τιμή της μεταβλητής Cs και επηρεάζει την Cs στις χαμηλές τιμές και έχει μεγάλη κλίση, γεγονός που σημαίνει ότι μικρή αύξησή του προκαλεί μεγάλη αύξηση στην

τιμή της Cs. Ο παράγοντας B δεν έχει σημαντική επίδραση στη μεταβλητή Cs. Ο παράγοντας C έχει αρνητική επίδραση στην τιμή της μεταβλητής Cs, έχει μεγάλη κλίση στις υψηλές τιμές, δηλαδή μικρή αύξησή του προκαλεί μεγάλη μείωση στην τιμή της Cs. Καθώς πλησιάζουμε σε λίγο μικρότερες τιμές, η κλίση της επίδρασης αλλάζει σημαντικά υποδηλώνοντας μικρότερη μεταβολή στην Cs. Ο παράγοντας C καλύπτει μικρότερο εύρος τιμών της Cs, δηλαδή έχει μικρότερη επίδραση από τον παράγοντα A. Τέλος, ο παράγοντας B είναι μικρότερος και από τον A και από τον C.



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων για την μεταβλητή Cs.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής Cs σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Σε κάθε περίπτωση ο δεύτερος παράγοντας (π.χ. ο B στην αλληλεπίδραση AB) εμφανίζεται με μια γραμμή για το υψηλό του επίπεδο και μια άλλη για το χαμηλό του, ενώ η μετάβαση του πρώτου παράγοντα από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται κατά τον άξονα των τετμημένων. Στην περίπτωση των παραγόντων A και B οι γραμμές τέμνονται άρα υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση των παραγόντων A και B στην μεταβλητή Cs. Στην περίπτωση των παραγόντων A και C δεν παρατηρείται καμία αλληλεπίδραση, αφού η μεταβολή του C ακολουθεί την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του A από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο (παράλληλες γραμμές). Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης των B και C, φαίνεται να υπάρχει αλληλεπίδραση, καθώς οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του C αποκλίνουν από την παραλληλία.



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής Cs σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.

Από την ανάλυση των επιδράσεων προέκυψε ότι τα πλέον κατάλληλα μοντέλα, που συνδέουν τις παραμέτρους σχεδιασμού x_i με την μεταβλητή απόκρισης y , είναι τα μοντέλα παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + \dots + a_7x_2^2 + a_8x_2x_3 + a_9x_3^2$$

Η εξίσωση που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του λογισμικού Statgraphics για την Cs είναι:

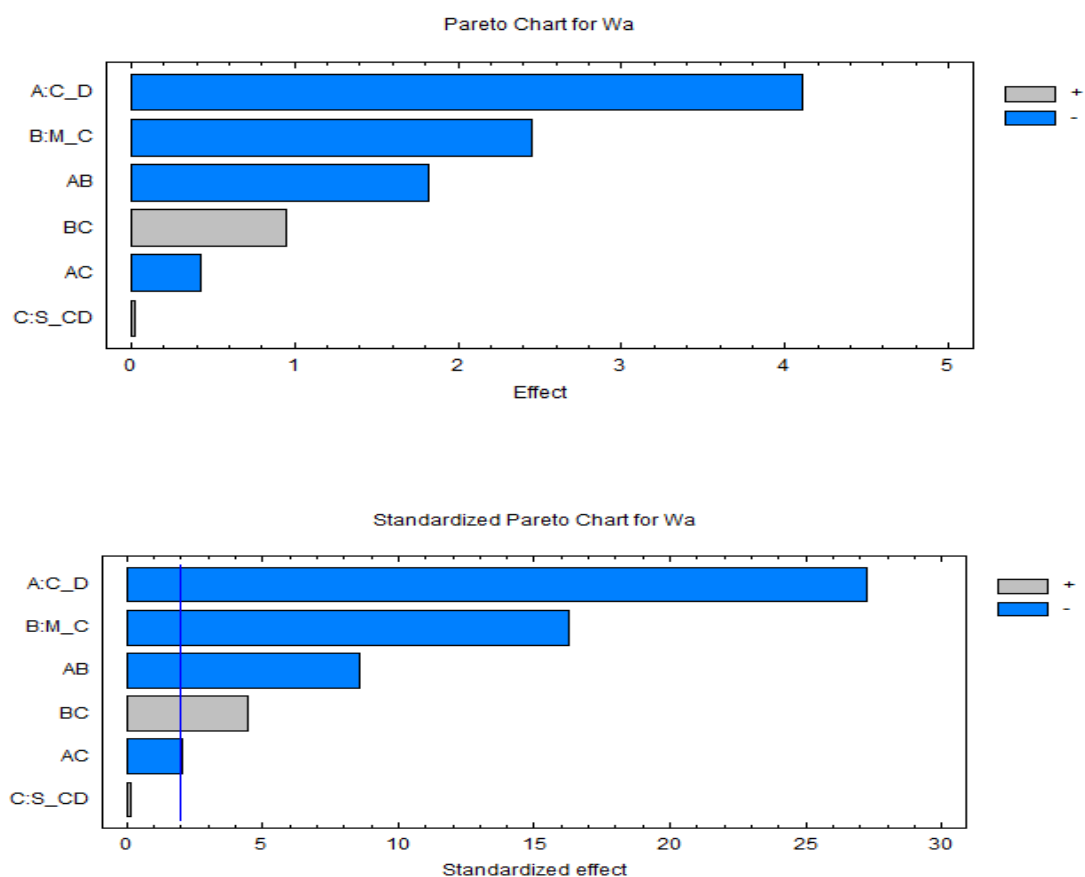
$$Cs = -22,3 + 906,5xC_D + 641,0xM_C - 18212,5xS_CD - 1425,0xC_D^2 - 3390,0xC_DxM_C + 9250,0xC_DxS_CD + 255,0xM_C^2 - 31750,0xM_CxS_CD + 1,47188 \times 10^6 \times S_CD^2$$

Υπολογισμός επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση W_a

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκαν οι επιδράσεις των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση W_a . Οι κύριες επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις δίνονται στον πίνακα 6.4, ενώ τα σχετικά διαγράμματα Pareto στο Σχήμα 6.4.

Πίνακας 6.4 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών για την Wa.

Παράγοντας	Κύρια επίδραση	Κανονικοποιημένες τιμές
A:C_D	-4,685	-17,352
B:M_C	-2,755	-10,2037
C:S_CD	0,025	0,09259
AB	-1,935	-7,1666
AC	-0,485	-1,79629
BC	1,065	3,944444

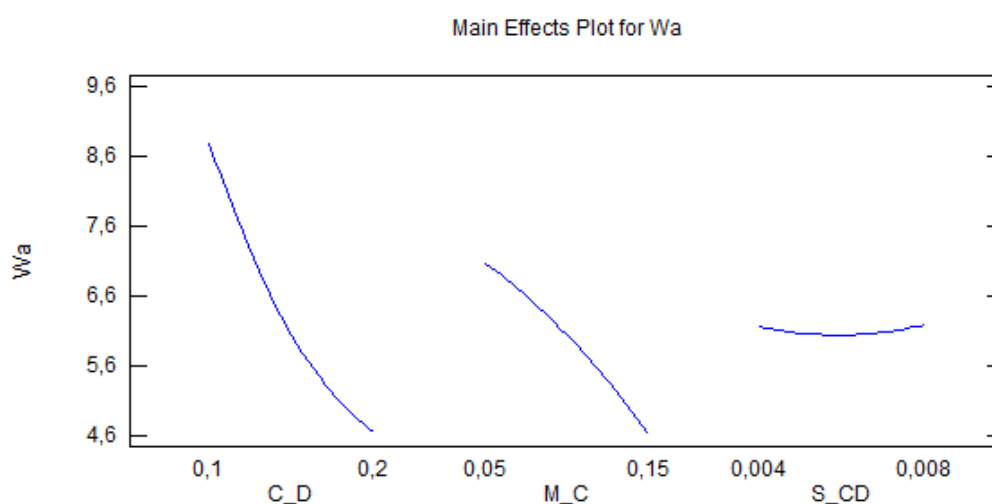


Σχήμα 6.4. Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση Wa.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.4 , τη μεγαλύτερη επίδραση (αρνητική) στη μεταβολή της μεταβλητής Wa έχει ο παράγοντας A, δηλαδή ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη (C_D). Ακολουθούν ο παράγοντας B, δηλαδή ο λόγος microsilica/τσιμέντο (M_C), η αλληλεπίδραση AB και η αλληλεπίδραση BC με μικρότερη επίδραση. Η

αλληλεπίδραση AC και ο παράγοντας C, δηλαδή ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη (S_CD) δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο (μπλε γραμμή).

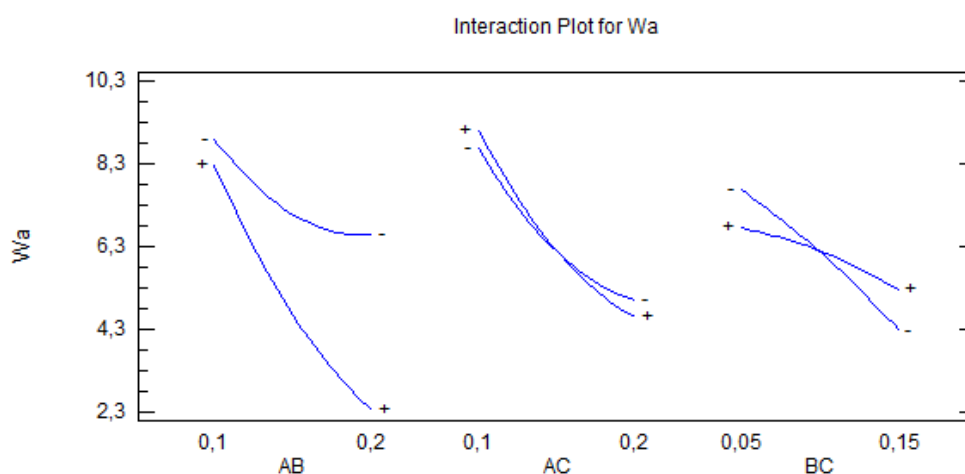
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων (Σχήμα 6.5) και αλληλεπιδράσεων (Σχήμα 6.6). Στο διάγραμμα των κύριων επιδράσεων παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Παρατηρείται ότι και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης W_a . Ο παράγοντας A επιδρά έντονα αρνητικά στην τιμή της μεταβλητής W_a . Αυτό σημαίνει ότι μικρή αύξησή του επιφέρει μεγάλη μείωση στην τιμή του W_a . Ο παράγοντας B έχει αρνητική επίδραση στη μεταβλητή W_a και έχει μεγάλη κλίση στις χαμηλές τιμές, δηλαδή μικρή αύξησή του προκαλεί μεγάλη μείωση στην τιμή της W_a . Ο παράγοντας C δεν έχει σημαντική επίδραση στη μεταβλητή W_a . Ο παράγοντας B καλύπτει μικρότερο εύρος τιμών της W_a , δηλαδή έχει μικρότερη επίδραση από τον παράγοντα A. Τέλος, η επίδραση του παράγοντα C είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα.



Σχήμα 6.5 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων για την μεταβλητή W_a .

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής C_s σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Σε κάθε περίπτωση ο δεύτερος παράγοντας (π.χ. ο B στην αλληλεπίδραση AB) εμφανίζεται με μια γραμμή για το υψηλό του επίπεδο και μια άλλη για το χαμηλό του, ενώ η μετάβαση του πρώτου παράγοντα από το ένα

επίπεδο στο άλλο γίνεται κατά τον άξονα των τετμημένων. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης των A και B, φαίνεται να υπάρχει αλληλεπίδραση, καθώς οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του B αποκλίνουν από το να είναι παράλληλες. Στην περίπτωση των παραγόντων A και C οι γραμμές τέμνονται άρα υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση των παραγόντων A και C στην μεταβλητή Wa. Στην περίπτωση των παραγόντων B και C παρατηρείται και εδώ σημαντική αλληλεπίδραση, αφού οι γραμμές τέμνονται.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής Wa σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.

Τέλος η εξίσωση για το μοντέλο παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού είναι:

$$Wa = 19,405 - 94,25x_{C_D} + 15,85x_{M_C} - 608,75x_{S_CD} + 335,5x_{C_D}^2 - 387,0x_{C_D}x_{M_C} - 2425,0x_{C_D}x_{S_CD} - 86,5x_{M_C}^2 + 5325,0x_{M_C}x_{S_CD} + 37187,5x_{S_CD}^2$$

Η ανάλυση και τα διαγράμματα για τις άλλες μεταβλητές απόκρισης που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα 3.

6.2 Υπολογισμός βέλτιστων συνθέσεων

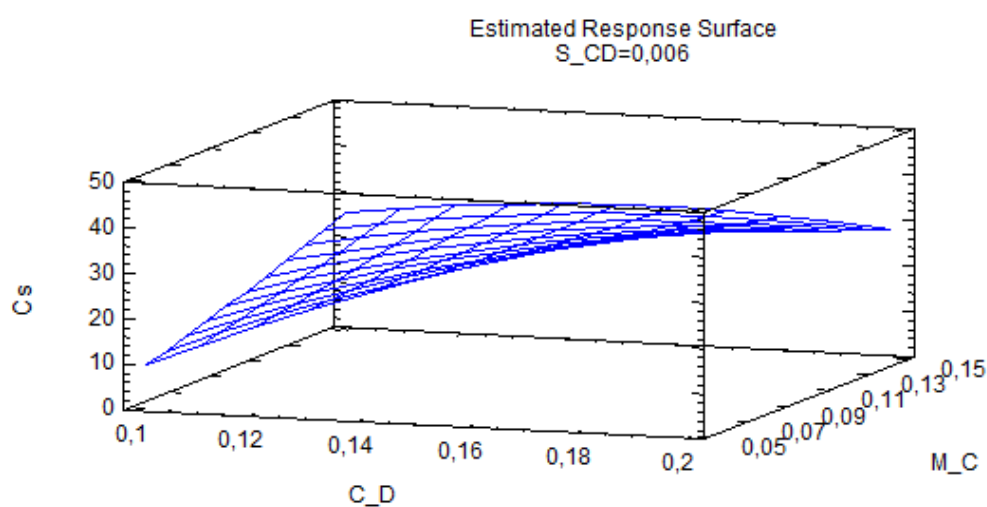
Για τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού, ως στόχοι τέθηκαν η μεγιστοποίηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη Cs και η ελαχιστοποίηση της υδατοαπορρόφησης Wa.

Με το πρόγραμμα STATGRAPHICS Centurion XVII προέκυψαν οι Πίνακες 6.5 και 6.6 οι οποίοι δείχνουν τον συνδυασμό των παραγοντικών επιπέδων που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν τις μεταβλητές Cs και Wa αντίστοιχα, καθώς και οι επιφάνειες απόκρισης για την κάθε μια μεταβλητή.

Πίνακας 6.5 Βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για μεγιστοποίηση της Cs.

Παράγοντας	Χαμηλό επίπεδο	Υψηλό επίπεδο	Βέλτιστο
C_D	0,1	0,2	0,2
M_C	0,05	0,15	0,05
S_CD	0,004	0,008	0,004

Από τον Πίνακα 6.5 παρατηρούμε ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγοντικών επιπέδων, για την μεγιστοποίηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, προκύπτει όταν ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη είναι κοντά στο υψηλό επίπεδο και ο λόγος microsilica/τσιμέντο και υπερρρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη είναι στο χαμηλό επίπεδο. Η βέλτιστη τιμή για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη Cs προκύπτει ότι είναι 52,0MPa. Η τιμή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.7 που απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης.



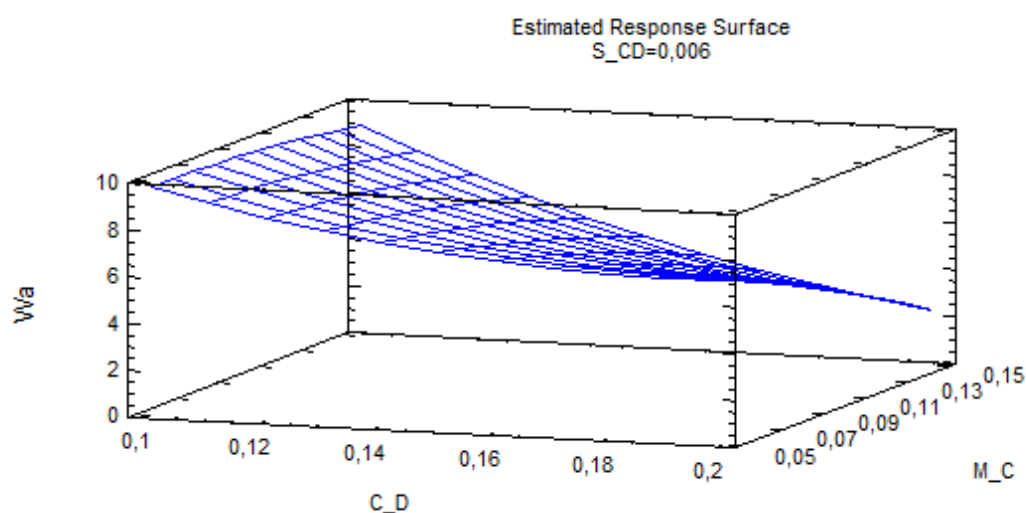
Σχήμα 6.7 Επιφάνεια απόκρισης για την μεταβλητή Cs.

Η επιφάνεια απόκρισης δείχνει ότι αν ο παράγοντας S_CD διατηρηθεί σε ένα μεσαίο επίπεδο, τότε παίρνουμε τις μέγιστες τιμές αντοχής όταν οι άλλοι δύο παράγοντες βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο.

Πίνακας 6.6 Βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για ελαχιστοποίηση της Wa.

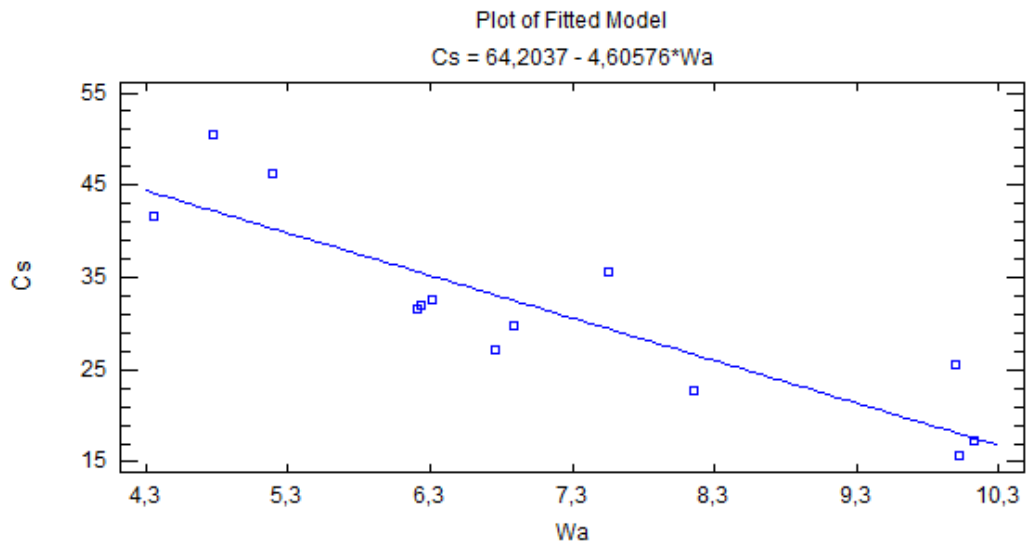
Παράγοντας	Χαμηλό επίπεδο	Υψηλό επίπεδο	Βέλτιστο
C_D	0,1	0,2	0,2
M_C	0,05	0,15	0,15
S_CD	0,004	0,008	0,004

Ομοίως, από τον Πίνακα 6.6 παρατηρούμε ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγοντικών επιπέδων, για την ελαχιστοποίηση της υδατοαπορρόφησης προκύπτει όταν ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη και microsilica/τσιμέντο είναι στο υψηλό επίπεδό τους, ενώ ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη είναι στο χαμηλό επίπεδο. Η βέλτιστη τιμή για την υδατοαπορρόφηση προκύπτει ότι είναι 2,22%. Η τιμή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.8 που απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης.



Σχήμα 6.8 Επιφάνεια απόκρισης για την μεταβλητή Wa.

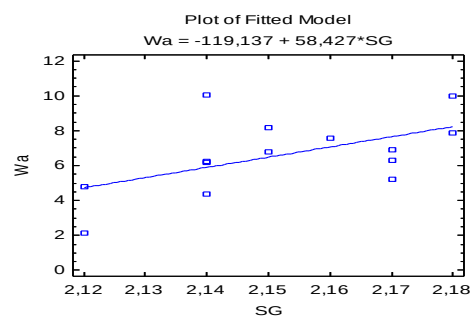
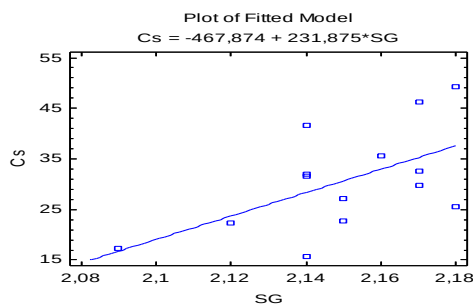
Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η συσχέτιση των δύο μεταβλητών και παρατηρείται ότι όταν μεγιστοποιείται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ελαχιστοποιείται η τιμή της υδατοαπορρόφησης.



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη Cs και της υδατοαπορρόφησης Wa . Τα τετραγωνάκια παρουσιάζουν την τιμή αυτών των δύο μεταβλητών για κάθε σύνθεση.

Με βάση τη μεθοδολογία αυτή προκύπτει ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγοντικών επιπέδων, για την μεγιστοποίηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και την ελαχιστοποίηση της υδατοαπορροφητικότητας είναι όταν ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη και πυριτική παιπάλη/τσιμέντο είναι στο υψηλό επίπεδό τους, ενώ ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο και παιπάλη είναι στο χαμηλό επίπεδο. Η τιμή που αντιστοιχεί στο βέλτιστο συνδυασμό σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι $-0,874$.

Στα σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη Cs με την πυκνότητα SG και της υδατοαπορρόφησης Wa με την πυκνότητα SG .



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα συσχέτισης Cs και SG.

Σχήμα 6.11 Διάγραμμα συσχέτισης Wa και SG.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Ο χαρακτηρισμός των υλικών έδειξε ότι:

- Το απομακρυνόμενο υπερλεπτομερές κλάσμα της μαρμαρόσκονης από το σύστημα ξήρανσης-αποκονίωσης είναι αδρομερέστερο από εκείνο της συμβατικά οριζόμενης παιπάλης, εφόσον σημαντικό ποσοστό του (~30%) υπερβαίνει τα 63 μm .
- Η ειδική επιφάνεια κατά Blaine των δειγμάτων της παιπάλης που εξετάστηκε κυμάνθηκε από 1500 έως 1580 cm^2/g , με μέση τιμή 1540 cm^2/g , τυπική απόκλιση 30 cm^2/g και σχετική τυπική απόκλιση 1.92%. Η σχετική διακύμανση είναι πολύ μικρή γεγονός που δείχνει ότι η παιπάλη είναι ομοιογενής όσον αφορά την κοκκομετρική της σύνθεση, αφού η ειδική επιφάνεια κατά Blaine εξαρτάται άμεσα από την κοκκομετρία του υλικού.
- Η ορυκτολογική ανάλυση με βάση το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X έδειξε ότι το βασικό ορυκτολογικό συστατικό της παιπάλης είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3) σε ποσοστό 97%, ενώ σε μικρή ποσότητα (3%) εμφανίζεται δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Η πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της ασβεστολιθικής παιπάλης για παραγωγή δομικών στοιχείων, που έγινε με βάση το κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen και τον παραγοντικό σχεδιασμό Box -Behnken έδειξε τα εξής:

- Ο κύριος παράγοντας που επιδρά στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την υδατοαπορρόφηση των παρασκευασθέντων δοκιμίων είναι ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη.
- Σημαντική επίδραση στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχει επίσης ο λόγος υπερρευστοποιητή/(τσιμέντο και παιπάλη), καθώς μικρή αύξησή του προκαλεί μείωση της αντοχής. Η αρνητική αυτή επίδραση είναι μη αναμενόμενη με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα που υπάρχουν για την δράση τέτοιων πρόσμικτων στο σκυρόδεμα. Φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος

υπερρευστοποιητής για την περιοχή δοσολογιών που δοκιμάστηκαν λειτουργεί διαφορετικά στο μικροσκυρόδεμα από ότι στο κοινό σκυρόδεμα.

- Η αλληλεπίδραση των παραγόντων τσιμέντο/παιπάλη και microsilica/τσιμέντο (AB) είναι επίσης σημαντική (αρνητική).
- Στην υδατοαπορρόφηση σημαντική επίδραση έχει ο λόγος microsilica/τσιμέντο, καθώς μικρή αύξηση αυτού του λόγου έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της τιμής της.

Η μικροσκοπική και μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων έδειξε ότι:

- Οι κόκκοι της παιπάλης είναι κυρίως ακανόνιστου σχήματος, γωνιώδεις, πρισματικοί και η μορφή τους σχετίζεται άμεσα με την κρυσταλλική δομή (ρομβοεδρική) του βασικού ορυκτολογικού της συστατικού του ασβεστίτη. Υπάρχει μικρός μόνο αριθμός στρογγυλεμένων κόκκων παιπάλης.
- Παρατηρείται ομοιογενής διασπορά των διαφόρων μεγεθών των κόκκων εντός του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε (μικροτσιμέντο και microsilica) και αυτό δείχνει ότι έχει επιτευχθεί ικανοποιητική ανάμιξη στον εργαστηριακό αναμίκτη.
- Υπάρχουν αρκετά κενά από φυσαλίδες αέρα σε διάφορα μεγέθη που οφείλονται στον εγκλωβισμό αέρα εντός του μίγματος.

Τέλος, σύμφωνα με τα πρότυπα EN 771-3, ASTM C-90, που ορίζουν τις απαιτήσεις όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες για φέροντα δομικά στοιχεία, όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν, εκτός εκείνα των συνθέσεων 3 και 8, πληρούν τις απαιτήσεις για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (>20 MPa) και την υδατοαπορροφητικότητα ($<10\%$).

7.2 Προτάσεις

Προκειμένου να γίνει μια πλήρης διερεύνηση των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν όσον αφορά την καταλληλότητα τους για παραγωγή δομικών στοιχείων, θα πρέπει να εξεταστούν και άλλες ιδιότητές τους, όπως είναι η ανθεκτικότητα στο χρόνο, η συμπεριφορά τους σε περιβάλλον υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας καθώς και το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα και το πορώδες.

Επίσης, πρέπει να παρασκευαστούν δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων και να διερευνηθεί το κατά πόσο η χρήση ταχείας ανάμιξης επιτυγχάνει τη καλύτερη αποσυσσωμάτωση και διασπορά των κόκκων του τσιμέντου εντός των αδρανών σε σύγκριση με την συνήθη ανάμιξη. Επιπλέον θα μπορούσε να προστεθεί και μια διαδικασία απαέρωσης, εφόσον οι μετρήσεις του περιεχόμενου αέρα δείξουν ότι ο εγκλωβισμένος αέρας είναι πάνω από το επιτρεπτό ποσοστό, που εκτιμάται ότι θα αυξήσει τις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων, λόγω της απομάκρυνσης μέρους του εγκλωβισμένου αέρα ή να γίνεται η διαμόρφωση των δομικών στοιχείων με τεχνικές εξώθησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Carsten Vort (2010). Ultrafine particles in concrete.
- Reinhard Wendehorst (2009). Δομικά υλικά, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 2009.
- Felekoglou, B. (2005). Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete, *Cement and Concrete composites*, Turkey, October 2005, pp.1-4.
- Harrison, D. J. (2003). From waste to wealth: developing saleable mineral products from quarry waste. *In: Recycling and Reuse of Waste Materials*. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.281-286
- Hill, A. R., Dawson, A. R. and Mundy, M. (2001). Utilisation of aggregate materials in road construction and bulk fill. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, pp.305-320.
- Kwan and Fung (2009). Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar. Department of Civil Engineering, University Hong Kong, China, pp. 349-356.
- Mark J. Anderson and Patrick J. Whitcoub (2005). RSM Simplified. *Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*.
- NIST / SEMATECH e- Εγχειρίδιο των στατιστικών μεθόδων, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3362.htm>
- S. Shihada and M. Arafa (2010). Effects of Silica Fume , Ultrafine and Mixing Sequences on Properties of Ultra High Performance Concrete. Department of Civil Engineering the Islamic University of Gaza, P. O. Box, Gaza, Palestine.

- Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. (2002). Shear strength of Reinforced -recycled material. *Construction and Building Materials*, 16, pp 331- 339. 087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003
- Mineral Solutions Ltd., <http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>
- X. Jia , R. A. Williams (2001). A packing algorithm for particles of arbitrary shapes.
- Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Μηχανική Πετρωμάτων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ.99-105 , Χανιά.
- Βαρβάρης, Ι. (2010). Πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος από λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα , Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ.37, Χανιά.
- Διαμαντώνης, Νικόλαος (2008). Ιδιότητες πάστας τσιμέντου σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σελ.73.
- Κανιτάκη, Ειρήνη (2008). Πρότυπα και Τεχνικές Προδιαγραφές για Σκυρόδεμα και Χάλυβα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Ημερίδα, Αλεξανδρούπολη, Ιούνιος 2008.
- Κωστάκης, Γ. (1988). Γενική Ορυκτολογία, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ.184, Χανιά.
- Λεβεντάκης, Κ. (2009). Σχεδιασμός ποιότητας ειδικών δομικών στοιχείων βασισμένων σε υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Λίτινας, Νικόλαος (2008). Νέες απαιτήσεις για τα αδρανή υλικά στις κατασκευές εμπειρία από την εφαρμογή της σήμανσης CE στην Ελλάδα, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, Μάιος 2008.

- Μ. Γαλετάκης και Χ. Πιπερίδη (2012). Αξιοποίηση υπερλεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων για παραγωγή ειδικών δομικών υλικών, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Οικονόμου, Μ.Χ. (1993). Τεχνολογία του Σκυροδέματος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, σελ.25-50.

Παράρτημα 1

Αναλυτική παρουσίαση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων των πρώτων υλών.

Κοκκομετρία πρώτων υλών

Στον Πίνακα Π1 παρουσιάζονται οι κοκκομετρίες της παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε και του τσιμέντου.

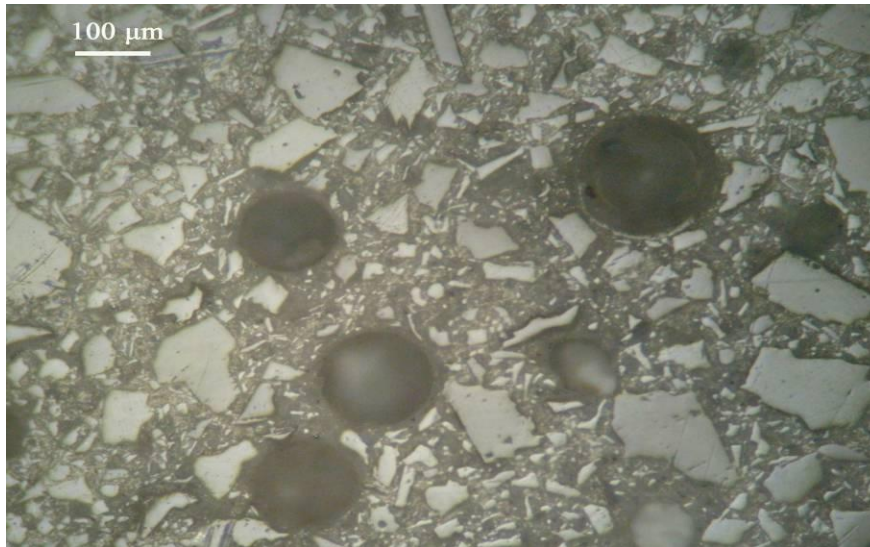
Πίνακας Π1 Κοκκομετρία παιπάλης- τσιμέντου.

Διάμετρος προβαλλομένης επιφάνειας (μm)	Αθροιστικώς διερχόμενη παιπάλη finomix	Αθροιστικώς διερχόμενο Ultra Fine
0,0582	0,00261	0,00976
0,0679	0,00916	0,03768
0,0791	0,02148	0,09322
0,0921	0,04173	0,18458
0,1073	0,07226	0,31789
0,125	0,11557	0,49778
0,1456	0,17451	0,72897
0,1697	0,25275	1,01838
0,1977	0,35512	1,37581
0,2303	0,48719	1,8107
0,2683	0,65262	2,31022
0,3125	0,84919	2,82337
0,3641	1,07105	3,36941
0,4242	1,31918	4,04749
0,4941	1,60966	4,85645
0,5757	1,95538	5,81821
0,6707	2,36132	7,01723
0,7813	2,85364	8,44598
0,9103	3,43676	10,15307
1,0604	4,10908	12,14817
1,2354	4,86996	14,44693
1,4393	5,70485	17,07873
1,6767	6,59421	20,08775
1,9534	7,52986	23,55148
2,2757	8,51915	27,57234
2,6512	9,57009	32,25646

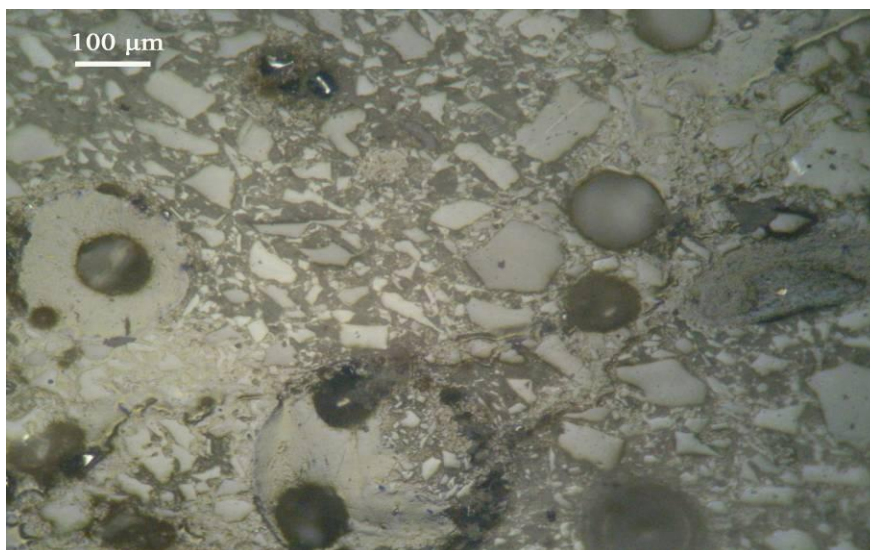
3,0887	10,70275	37,70274
3,5983	11,94237	43,95551
4,192	13,31281	50,97079
4,8837	14,82955	58,59099
5,6895	16,498	66,57358
6,6283	18,31904	74,695
7,7219	20,30361	81,95967
8,996	22,46851	87,99029
10,4804	24,83318	92,60957
12,2096	27,4254	95,86957
14,2242	30,275	97,98376
16,5712	33,40711	99,23581
19,3055	36,84101	99,90789
22,4909	40,58448	100
26,2019	44,63282	100
30,5252	48,96485	100
35,5618	53,53973	100
41,4295	58,29849	100
48,2654	63,16925	100
56,2292	68,08126	100
65,507	72,98175	100
76,3157	77,64206	100
88,9077	81,96825	100
103,5775	85,89235	100
120,6678	89,36384	100
140,578	92,34732	100
163,7733	94,84279	100
190,7959	96,85025	100
222,2773	98,3697	100
258,953	99,40114	100
301,68021	99,94457	100
351,45749	99,99999	100
409,44791	99,99999	100
477,00681	99,99999	100
555,71301	99,99999	100
647,40558	99,99999	100
754,22748	99,99999	100
878,67499	99,99999	100

Φωτογραφίες της μικροδομής των δοκιμίων

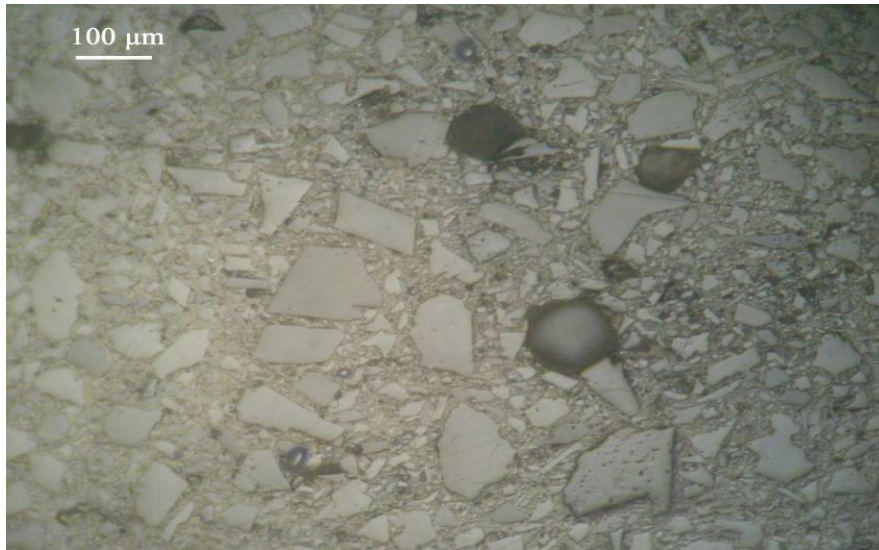
Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνεται η μικροδομή των στιλβωμένων τομών, των δοκιμίων των συνθέσεων που εξετάστηκαν.



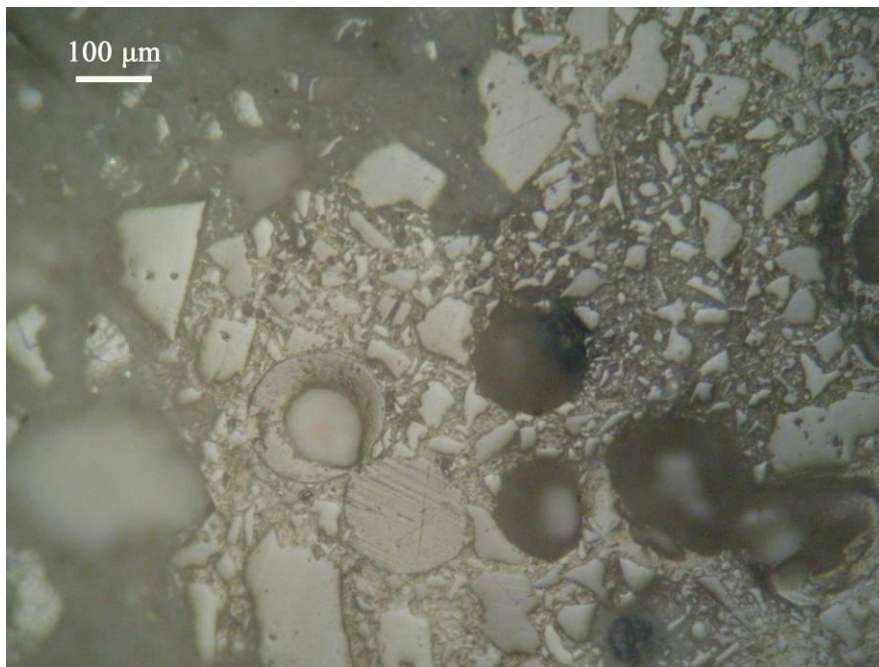
Σχήμα Π1 Κόκκοι παιπάλης ακανόνιστου σχήματος, γωνιώδεις και φυσαλίδες αέρα διάφορων μεγεθών, Δείγμα X1, Ανακλώμενο φως, //Nicols.



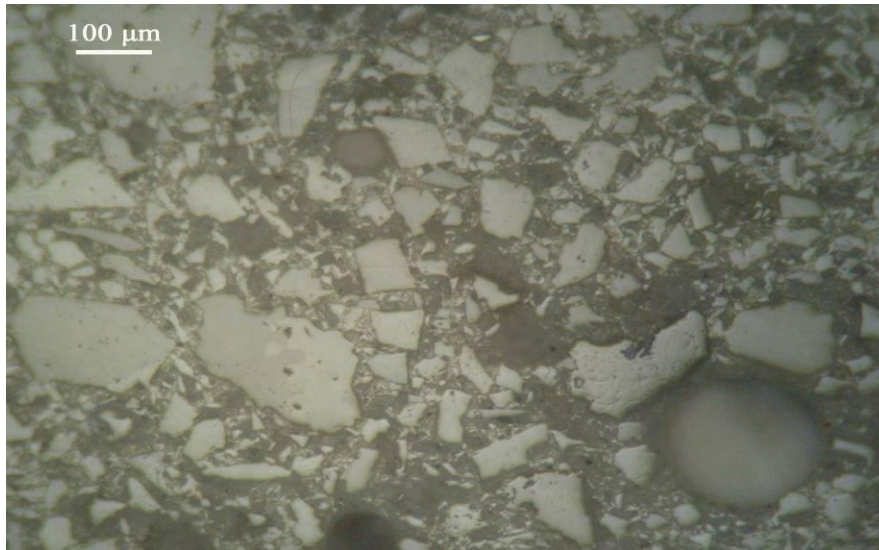
Σχήμα Π2 Στρογγυλεμένοι και ακανόνιστου σχήματος κόκκοι παιπάλης και φυσαλίδες αέρα, Δείγμα X4, Ανακλώμενο φως, //Nicols.



Σχήμα Π3 Μίγμα όχι καλά ομογενοποιημένο, Δείγμα X5, Ανακλώμενο φως, //Nicols.



Σχήμα Π4 Μίγμα όχι καλά ομογενοποιημένο με κάποιους στρογγυλεμένους κόκκους παιπάλης και φυσαλίδες αέρα, Δείγμα X8, Ανακλώμενο φως, //Nicols.



Σχήμα Π5 Κόκκοι παιπάλης ακανόνιστου σχήματος και λίγες φυσαλίδες αέρα, Δείγμα X10, Ανακλώμενο φως, //Nicols.

Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μέτρησης της ειδικής επιφάνειας κατά Blaine

Η διαδικασία μέτρησης είναι η εξής:

1. Ζυγίζουμε ποσότητα υλικού (παιπάλη) m_1 για να διαμορφωθεί ένα στρώμα με πορώδες $e=0.500$.
2. Τοποθετούμε τον διάτρητο δίσκο στην κάτω βάση του κελιού και πάνω από τον δίσκο ένα χάρτινο φίλτρο.
3. Πιέζουμε ελαφρά με μια μικρή ράβδο ώστε να βεβαιωθούμε ότι ο διάτρητος δίσκος και το φίλτρο έχουν τοποθετηθεί σωστά μέσα στο κελί και βρίσκονται σε επίπεδη θέση.
4. Τοποθετούμε τη ζυγισμένη ποσότητα υλικού (παιπάλη) m_1 πάνω από το χάρτινο φίλτρο μέσα στο κελί προσπαθώντας να σχηματίζεται ένα όσο το δυνατόν επίπεδο στρώμα και στη συνέχεια τοποθετούμε άλλο ένα χάρτινο φίλτρο.
5. Τοποθετούμε με ελαφριά πίεση το έμβολο μέσα στο κελί μέχρι να έρθει σε επαφή με το φίλτρο. Περιστρέφοντας αργά, ανασηκώνουμε κατά 5mm περίπου το έμβολο, το στρέφουμε κατά 90° και ξαναπιέζουμε ελαφρά. Το στρώμα του υλικού (παιπάλη) είναι έτοιμο για τη δοκιμή. Αποσύρουμε το έμβολο.
6. Προσέχοντας να μην διαταραχτεί το στρώμα του υλικού, τοποθετούμε το κελί στην ειδική υποδοχή του μανομέτρου.
7. Κλείνουμε το άνω τμήμα του κυλίνδρου με κατάλληλο καπάκι.
8. Ανοίγουμε την κάνουλα και με μια ελαφριά αναρρόφηση ανεβάζουμε το επίπεδο του μανομετρικού υγρού μέχρι την ανώτερη χαραγμένη γραμμή. Κλείνουμε την κάνουλα. Το λάδι πρέπει να παραμένει σε σταθερό επίπεδο. Αν όχι, ξαναφτιάχνουμε τη σύνδεση κελί-μανόμετρο και ελέγχουμε την κάνουλα μέχρι το ερμητικό κλείσιμο να επιτρέπει ένα σταθερό επίπεδο στο υγρό.
9. Ανοίγουμε την κάνουλα και με μια ελαφριά αναρρόφηση ανεβάζουμε το επίπεδο του υγρού στην άνω χαραγμένη γραμμή. Κλείνουμε την κάνουλα. Αφαιρούμε το καπάκι από το άνω τμήμα του κυλίνδρου. Το μανομετρικό υγρό συνεχίζει να ρέει. Ξεκινάμε το χρονόμετρο μόλις το υγρό φτάσει στη δεύτερη χαραγμένη γραμμή και το σταματάμε μόλις φτάσει στην τρίτη χαραγμένη γραμμή. Καταγράφουμε το χρόνο t με ακρίβεια 0.2 sec και την θερμοκρασία με ακρίβεια 1°C .

10. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία στο ίδιο στρώμα και καταγράφουμε τις νέες τιμές t και θ .
11. Ετοιμάζουμε ένα νέο στρώμα από το ίδιο υλικό ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία και καταγράφουμε δύο φορές t και θ .

Παράρτημα 2

Περιγραφή συνθέσεων και συνθηκών παρασκευής των μιγμάτων

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 1

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 7.5g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 9.2g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12).

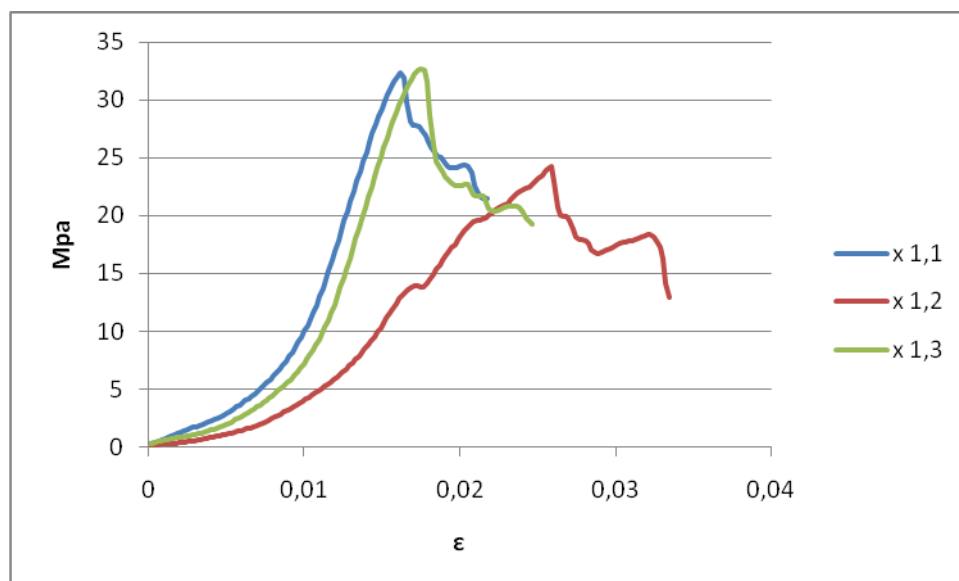
Νερό: 155ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 12.5cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X1.1	5.030	4.910	5.005	267.7	2.16
X1.2	5.020	5.015	5.010	275.0	2.18
X1.3	5.020	5.040	5.020	276.5	2.17



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν φυσαλίδες αέρα

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 2

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Τσιμέντο: 200g (Ultra fine 12)

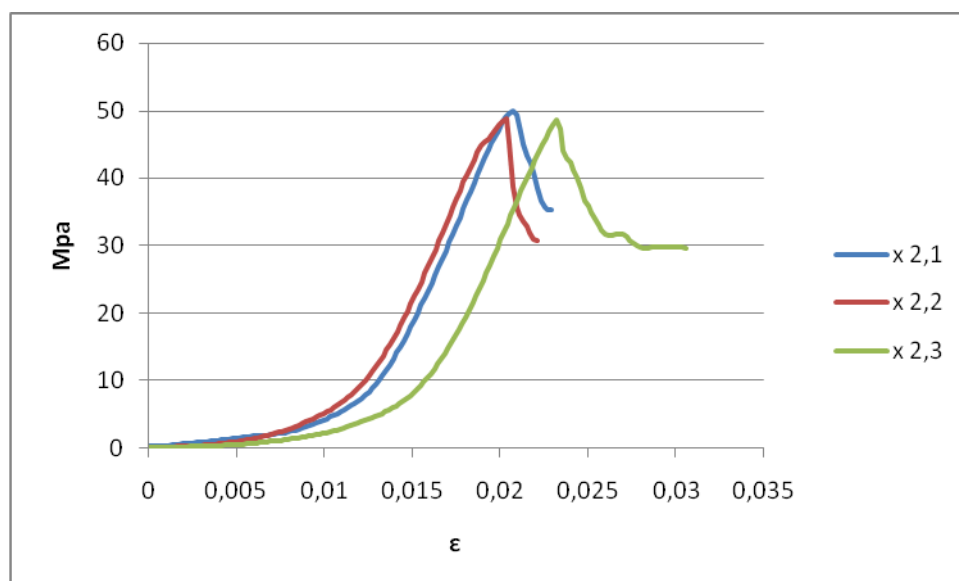
Microsilica: 10g (Elkem microsilica Grade 920-D)
Υπερρευστοποιητής: 7.2g (Melflux 2651F).

Νερό: 158ml.
Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 13.5cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X2.1	5.010	5.065	5.005	275.4	2.17
X2.2	5.030	5.010	5.015	276.8	2.19
X2.3	5.025	4.955	5.030	273.2	2.18



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν μικρές φυσαλίδες αέρα

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 3

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη Τσιμέντο: 100g (Ultra fine 12).)

Microsilica: 5g (Elkem microsilica Grade 920-D)
Υπερρευστοποιητής: 6.6g Melflux 2651F ().

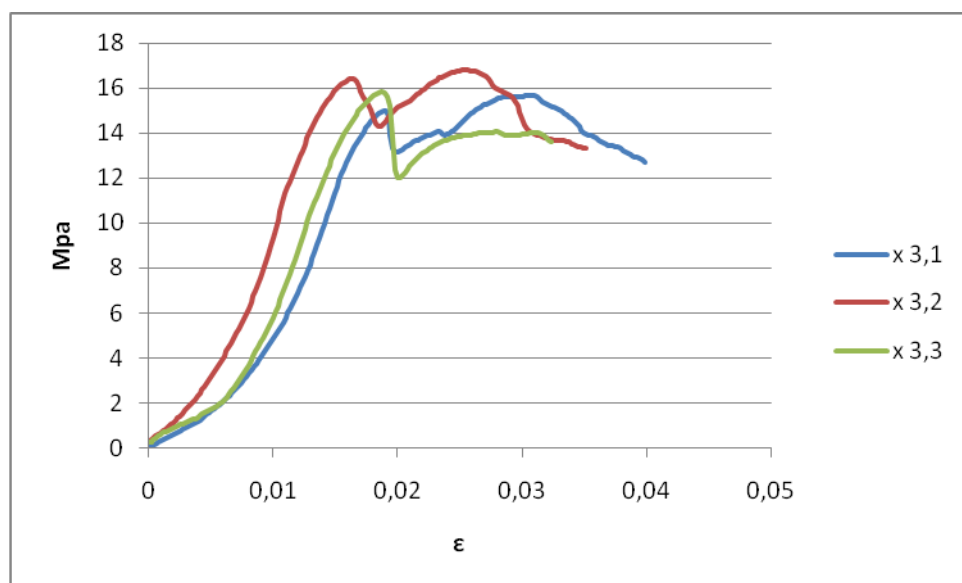
Νερό: 165ml.
Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 13.25cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		

X3.1	4.840	5.015	5.090	267.1	2.16
X3.2	4.830	5.015	5.085	266.7	2.16
X3.3	4.890	5.005	5.090	262.6	2.11



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν μικρές φυσαλίδες αέρα. Ήταν πιο ανοιχτόχρωμα από τα δοκίμια των προηγούμενων συνθέσεων. Η πάνω επιφάνειά τους είχε μαύρο χρώμα και ήταν τραχιά.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 4

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 22.5g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 4.6g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12)

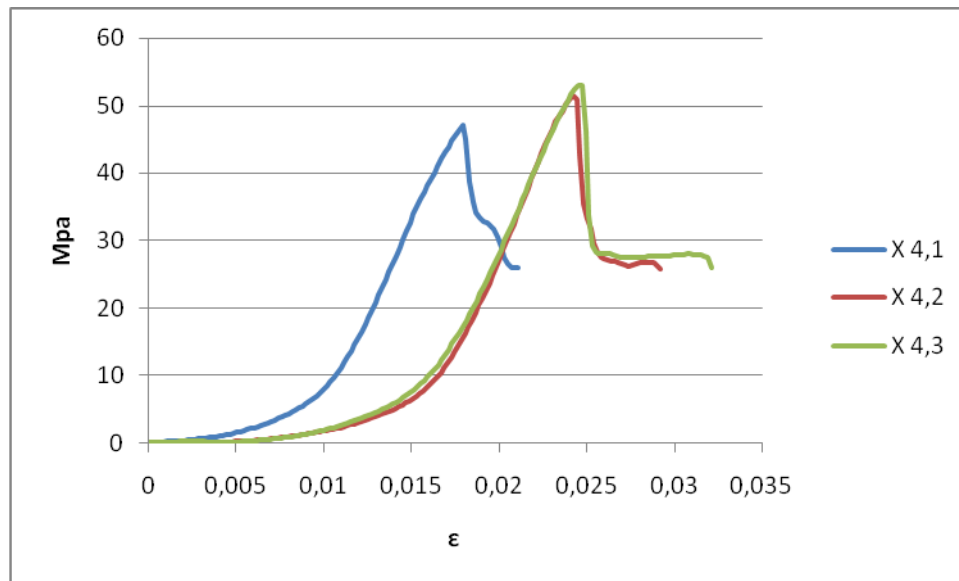
Νερό: 160ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11.75cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X4.1	5.035	5.200	5.020	280.0	2.13
X4.2	5.005	5.198	5.025	279.1	2.13
X4.3	5.025	5.175	5.010	274.6	2.11



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν μεγάλες φυσαλίδες αέρα.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 5

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 20g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 9.6g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 200g (Ultra fine 12)

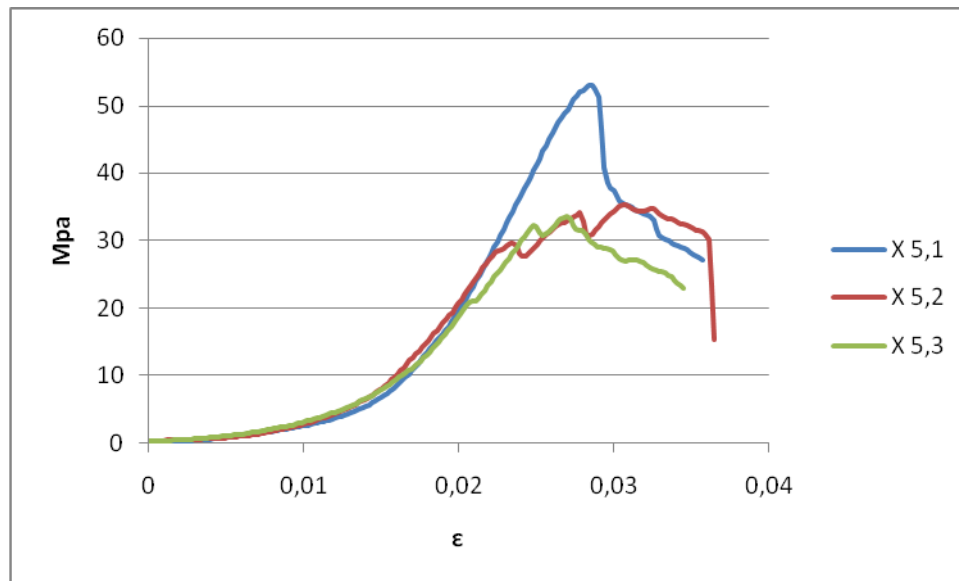
Νερό: 180ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 9.25cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ²)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X5.1	5.060	5.030	5.060	278.4	2.16
X5.2	5.060	5.125	5.085	284.9	2.16
X5.3	5.175	5.080	5.070	279.4	2.11



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν λίγες μεγάλες φυσαλίδες αέρα. Το μίγμα είχε δύσκολη ρεολογία. Ο κώνος εξάπλωσης είναι μικρότερος από αυτούς των άλλων συνθέσεων.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 6

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 15g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 6.9g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12)

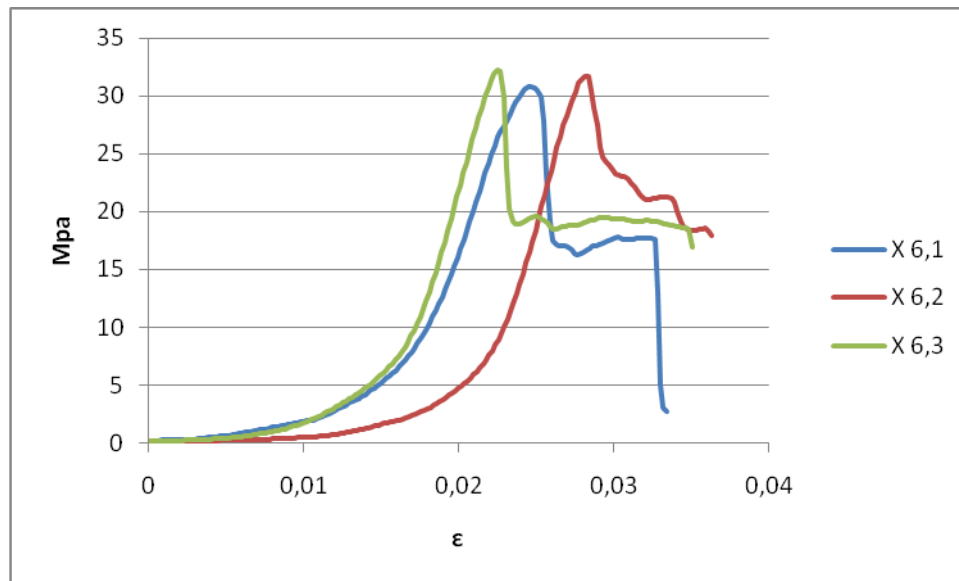
Νερό: 158ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X6.1	5.015	5.035	5.015	274.6	2.17
X6.2	5.015	5.010	5.020	270.7	2.15
X6.3	5.085	5.010	5.025	270.5	2.11



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν λίγες μικρές φυσαλίδες αέρα.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 7

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 10g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 4.4g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 100g (Ultra fine 12)

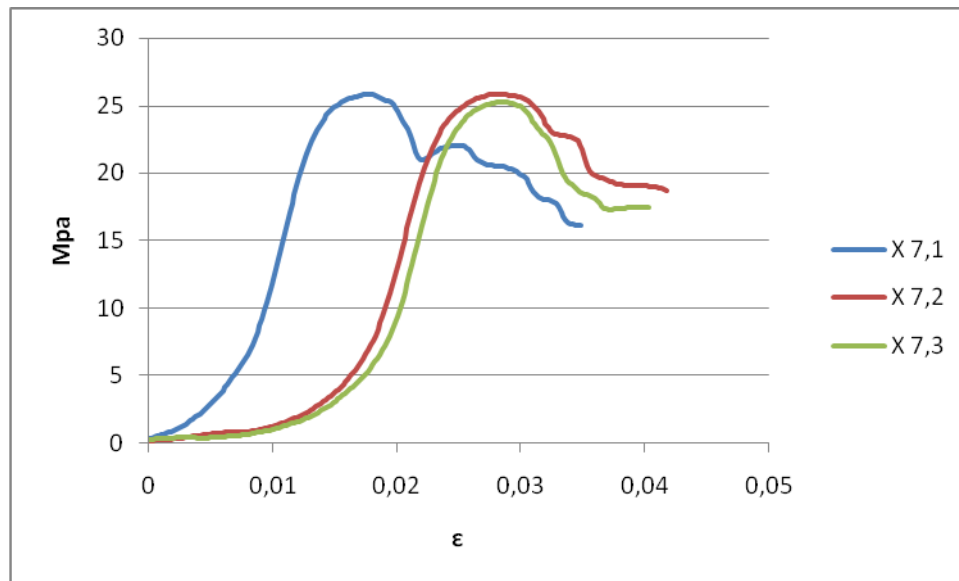
Νερό: 170ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 13.5cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X7.1	5.020	5.075	5.020	277.5	2.17
X7.2	5.025	5.010	5.025	278.4	2.20
X7.3	5.020	5.095	5.025	277.4	2.16



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν μικρές φυσαλίδες αέρα. Ήταν πιο ανοιχτόχρωμα από τα δοκίμια των συνθέσεων 4 και 5. Η πάνω επιφάνειά τους είχε μαύρο χρώμα.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 8

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 10g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 8.8g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 100g (Ultra fine 12)

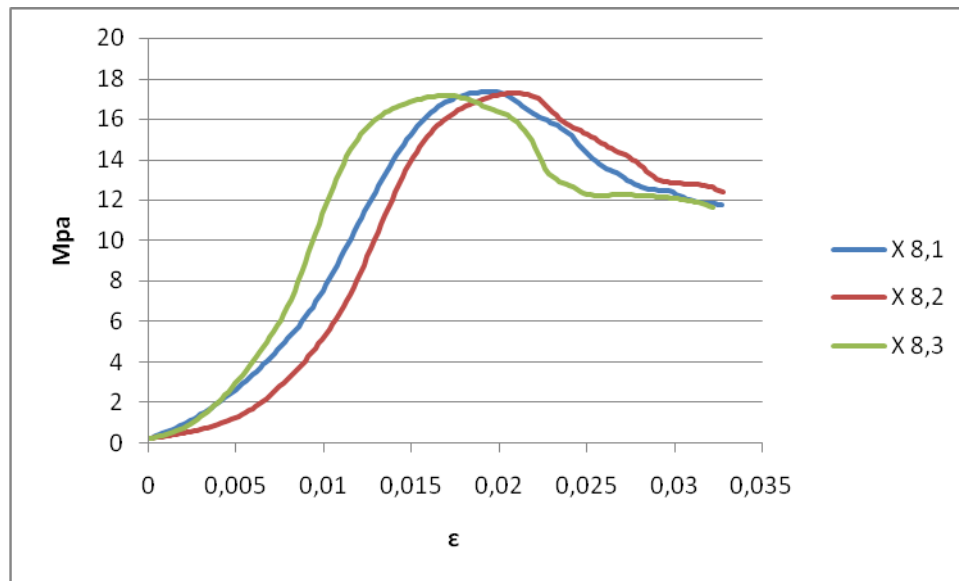
Νερό: 160ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 13cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ²)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X8.1	4.990	5.025	5.010	262.7	2.09
X8.2	5.015	4.975	5.025	263.1	2.10
X8.3	5.025	5.075	5.025	268.1	2.09



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν λίγες μικρές φυσαλίδες αέρα. Ήταν πιο ανοιχτόχρωμα από τα δοκίμια των συνθέσεων 4 και 5. Η πάνω επιφάνειά τους είχε μαύρο χρώμα. Τα δοκίμια X8.1 και X8.2 έσπασαν στην μια πλευρά όταν αφαιρέθηκε το καλούπι.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 9

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 30g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 7.2g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 200g (Ultra fine 12).

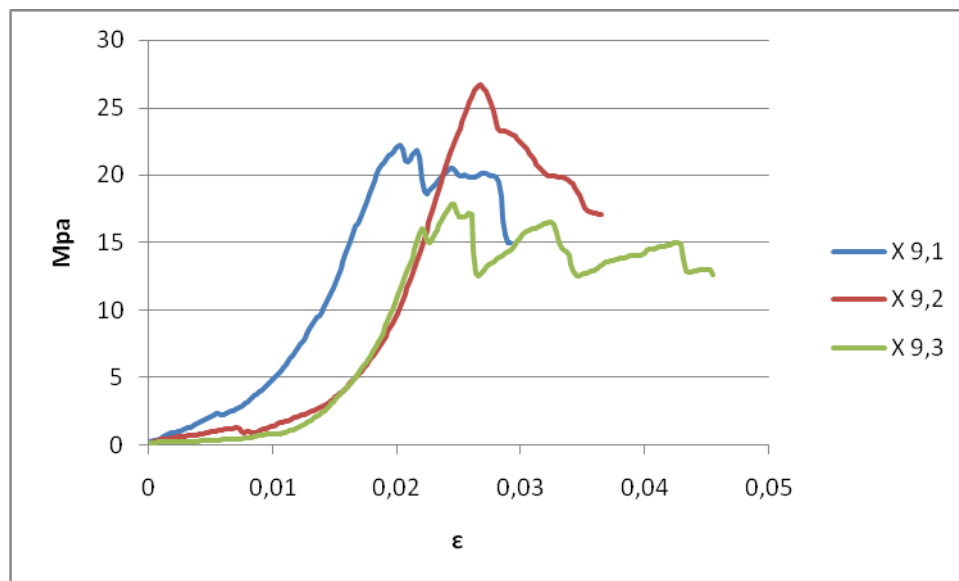
Νερό: 190ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 10.5cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X9.1	5.105	5.110	5.175	286.2	2.12
X9.2	5.180	5.130	5.180	287.2	2.09
X9.3	5.090	5.120	5.075	283.9	2.15



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν λίγες φυσαλίδες αέρα και ήταν σκουρόχρωμα. Στη σύνθεση αυτή χρησιμοποιήθηκε περισσότερο νερό σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις. Το μίγμα αν και ήταν εύπλαστο δεν είχε εύκολη ρεολογία.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 10

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 15g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 6.9g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12).

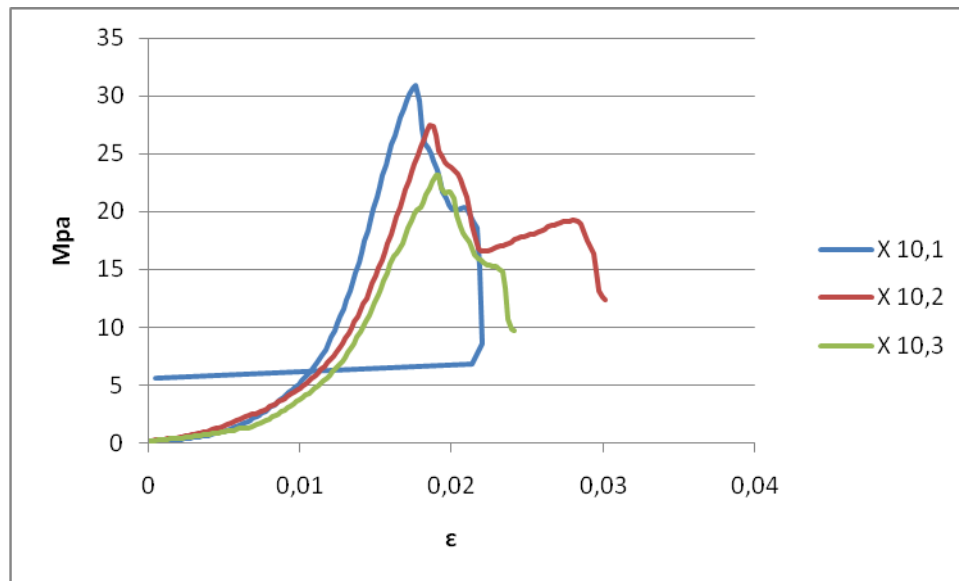
Νερό: 158ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ²)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.015	5.045	5.020	273.1	2.15
X10.2	5.015	5.150	5.010	278.0	2.15
X10.3	5.010	5.170	5.010	278.8	2.15



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν λίγες φυσαλίδες αέρα.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 11

Δοσολογία υλικών

Πατάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 15g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 6.9g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12).

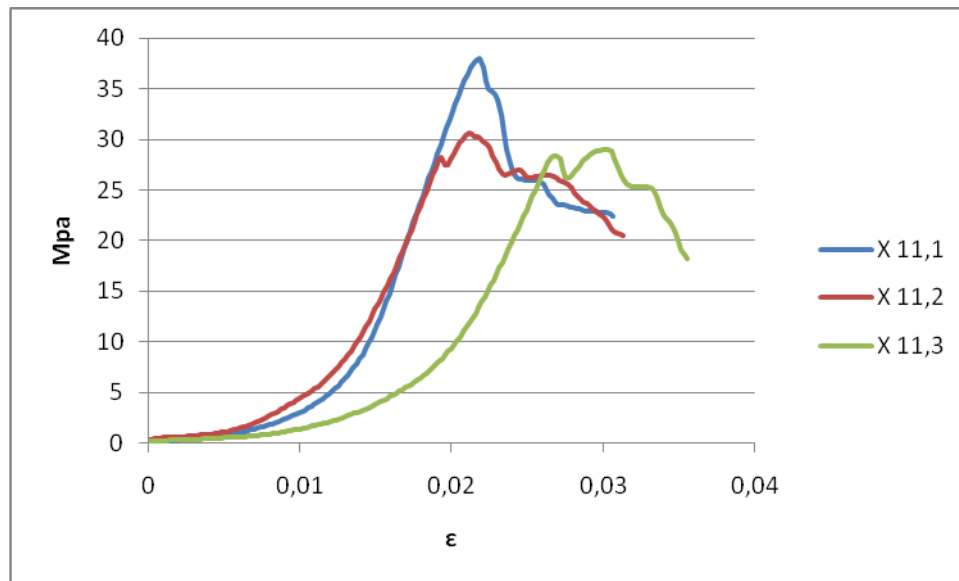
Νερό: 158ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.010	5.160	5.025	283.7	2.18
X10.2	5.120	5.020	5.015	280.2	2.17
X10.3	5.020	5.135	5.005	279.3	2.17



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν φυσαλίδες αέρα.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 12

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 22.5g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 9.2g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12).

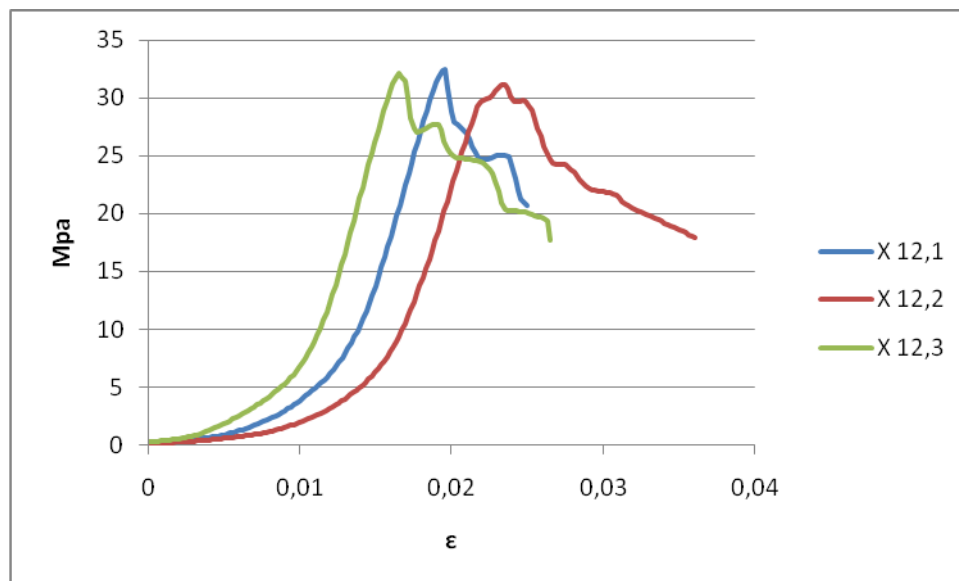
Νερό: 153ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11.5cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.025	5.215	5.010	281.1	2.14
X10.2	5.005	5.160	5.025	278.0	2.14
X10.3	5.010	5.150	5.010	275.1	2.13



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις:

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 13

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 20g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 4.8g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 200g (Ultra fine 12).

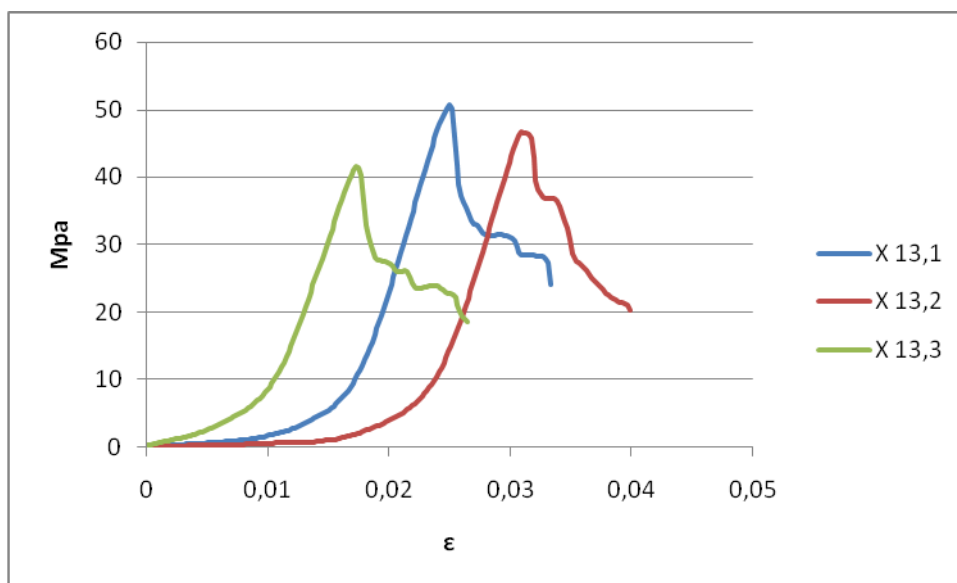
Νερό: 170ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 12.25cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.085	5.040	5.015	274.7	2.14
X10.2	5.040	5.105	5.020	282.2	2.18
X10.3	5.045	5.075	5.020	280.9	2.18



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Και τα τρία δοκίμια είχαν μαύρες φυσαλίδες αέρα στο πάνω μέρος τους και ήταν πιο σκούρα σε σχέση με τα άλλα. Επίσης έγινε γρήγορη προσθήκη νερού.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 14

Δοσολογία υλικών

Παιπάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 7.5g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 4.6g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 150g (Ultra fine 12).

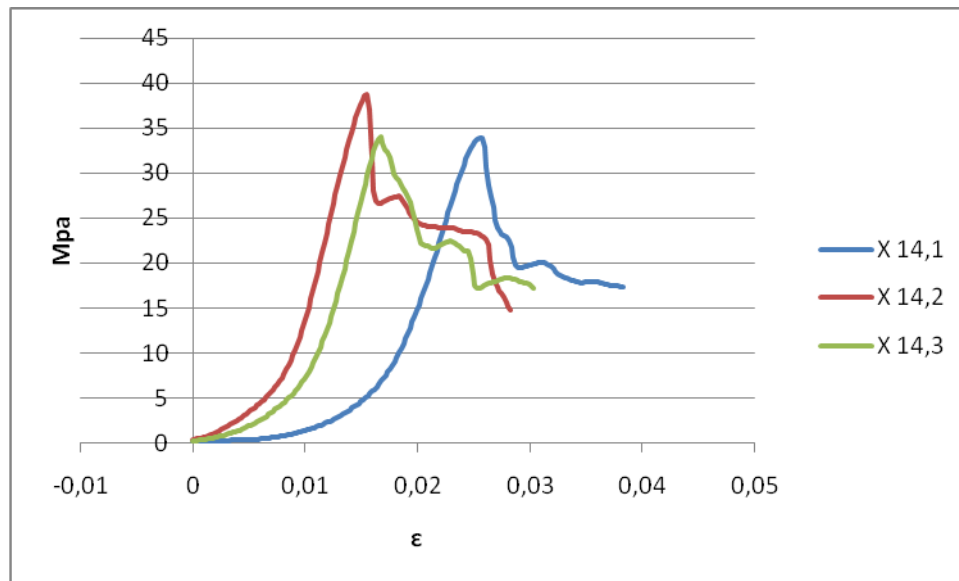
Νερό: 155ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 11.25cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.080	5.025	5.025	278.2	2.17
X10.2	5.015	5.160	5.025	280.9	2.16
X10.3	5.125	5.025	5.025	279.1	2.16



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Τα δοκίμια είχαν ανομοιόμορφη υφή. Το μίγμα ήταν πολύ σφικτό, είχε γρήγορη πήξη και αργή εξάπλωση.

ΣΥΝΘΕΣΗ Νο 15

Δοσολογία υλικών

Παιτάλη: 1000g (FINOMIX, από μαρμαρόσκονη)

Microsilica: 15g (Elkem microsilica Grade 920-D)

Υπερρευστοποιητής: 6.6g (Melflux 2651F).

Τσιμέντο: 100g (Ultra fine 12).

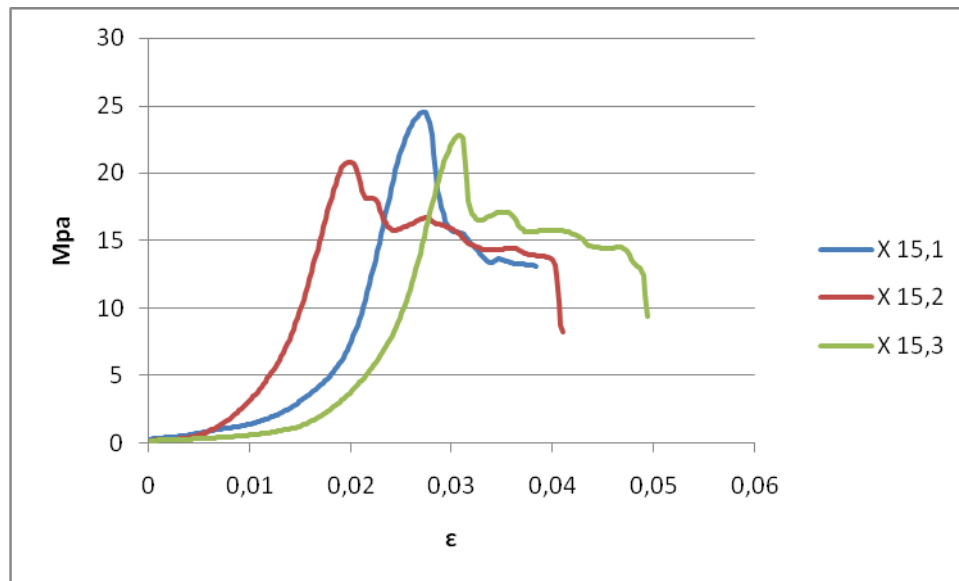
Νερό: 150ml.

Επιβραδυντής: 0.5g (Τρυγικό οξύ)

Κώνος εξάπλωσης: 12cm

Περιγραφή δοκιμίων μετά την ωρίμανση τους (28 ημέρες σε θάλαμο)

Αριθμός δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίων			Βάρος (g)	Πυκνότητα (g/cm ²)
	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)		
X10.1	5.020	5.010	5.040	272.1	2.15
X10.2	5.020	5.055	5.025	273.0	2.14
X10.3	5.025	5.025	5.020	272.2	2.15



Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων

Παρατηρήσεις: Το μίγμα είχε αργή ροή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Διαγράμματα Pareto, κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων που προκύπτουν από την ανάλυση του παραγοντικού σχεδιασμού.

Υπολογισμός επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην W_C

Η μέση τιμή της W_C για το χαμηλό επίπεδο (0,10) του παράγοντα C_D είναι:

$$W_C = \frac{1,65 + 1,70 + 1,60 + 1,50}{4} = 1,6125$$

Για το υψηλό επίπεδο C_D (0,20) είναι:

$$W_C = \frac{0,79 + 0,90 + 0,95 + 0,85}{4} = 0,8725$$

Και η κύρια επίδραση του C_D στην W_C είναι:

$$Cs = |0,8725 - 1,6125| = 0,74$$

Ομοίως υπολογίζω την κύρια επίδραση για τους άλλους δυο παράγοντες στην W_C :

Για το χαμηλό επίπεδο S_{CD} (0,004)

$$W_C = \frac{1,07 + 1,70 + 0,85 + 1,03}{4} = 1,1625$$

Για το υψηλό επίπεδο S_{CD} (0,008)

$$W_C = \frac{1,03 + 0,90 + 1,60 + 1,02}{4} = 1,1375$$

Και η κύρια επίδραση του S_{CD} στην W_C είναι:

$$W_C = |1,1375 - 1,1625| = 0,025$$

Για το χαμηλό επίπεδο του παράγοντα M_C (0,05) είναι:

$$W_C = \frac{1,03 + 0,79 + 1,65 + 1,03}{4} = 1,125$$

Για το υψηλό επίπεδο M_C (0,15) είναι:

$$W_C = \frac{1,07 + 0,95 + 1,02 + 1,50}{4} = 1,135$$

Και η κύρια επίδραση είναι:

$$W_C = |1,135 - 1,125| = 0,01$$

Για την εκτίμηση του πειραματικού σφάλματος στη μέτρηση των μεταβλητών απόκρισης υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση σ_x των 3 επαναληπτικών μετρήσεων που έγιναν στα δοκίμια της κεντρικής σύνθεσης.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (x_i - m_x)^2$$

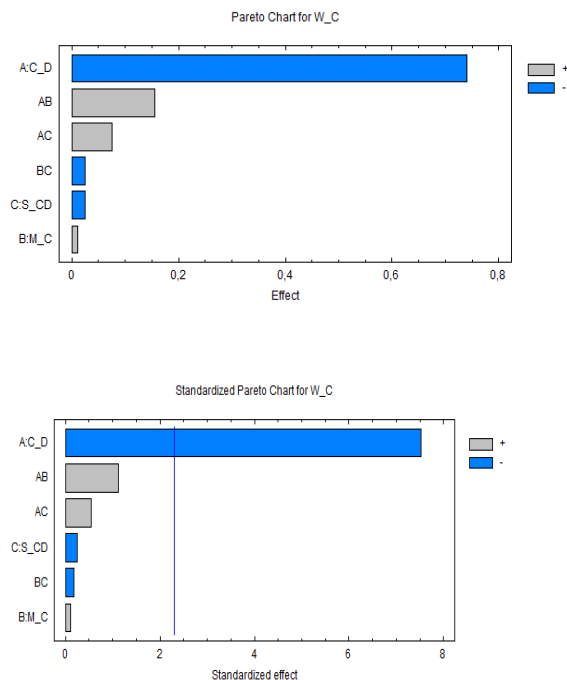
Όπου M=3, x_i = η τιμή της μεταβλητής απόκρισης για κάθε μια από τις 3 μετρήσεις και m_x = η μέση τιμή των τριών μετρήσεων.

Πίνακας Π2 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών για την μεταβλητή W_C.

Παράγοντας	Κύρια επίδραση	Κανονικοποιημένες τιμές
A:C_D	-0,74	-0,74
B:M_C	0,01	0,01
C:S_CD	-0,025	-0,025
AB	0,155	0,155
AC	0,075	0,075
BC	-0,025	-0,025

Στον Πίνακα Π2 φαίνονται οι επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις όπως εκτιμήθηκαν από το πρόγραμμα για κάθε επίδραση.

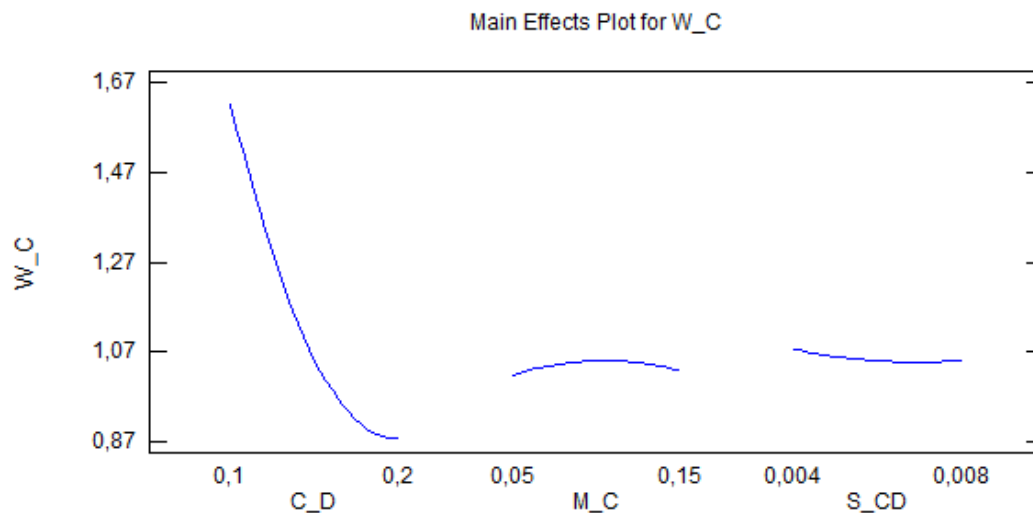
Τα διαγράμματα Pareto για τις αρχικές και τις κανονικοποιημένες τιμές δίνονται στο Σχήμα Π6.



Σχήμα Π6 Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στον λόγο νερού/τσιμέντο W_C.

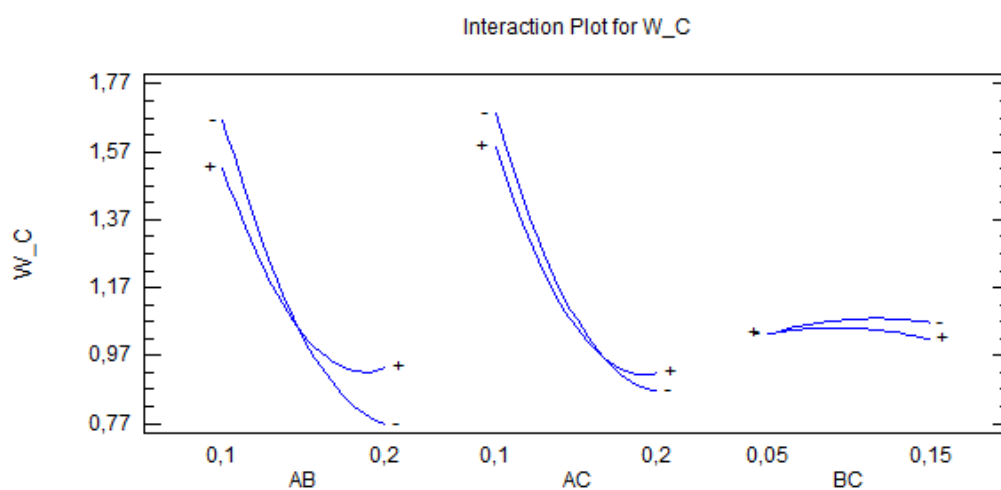
Όπως φαίνεται από το Σχήμα Π6, τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της μεταβλητής W_C έχει ο παράγοντας A, δηλαδή ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη. Η αλληλεπίδραση AB, AC, ο παράγοντας C δηλαδή ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο και παιπάλη, η αλληλεπίδραση BC και ο παράγοντας B δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο (μπλε γραμμή).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων (Σχήμα Π7) και αλληλεπιδράσεων (Σχήμα Π8). Στο διάγραμμα των κύριων επιδράσεων παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Παρατηρείται ότι και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης W_C. Ο παράγοντας A επιδρά αρνητικά στην τιμή της μεταβλητής W_C και επηρεάζει την W_C στις υψηλές τιμές και έχει μεγάλη κλίση, γεγονός που σημαίνει ότι μικρή μείωσή του προκαλεί μεγάλη μείωση στην τιμή της W_C. Οι παράγοντες B και C δεν έχουν σημαντική επίδραση στη μεταβλητή W_C.



Σχήμα Π7 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων

Στο Σχήμα Π8 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής W_C σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Σε κάθε περίπτωση ο δεύτερος παράγοντας (π.χ. ο B στην αλληλεπίδραση AB) εμφανίζεται με μια γραμμή για το υψηλό του επίπεδο και μια άλλη για το χαμηλό του, ενώ η μετάβαση του πρώτου παράγοντα από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται κατά τον άξονα των τετμημένων. Στην περίπτωση των παραγόντων A και B οι γραμμές τέμνονται άρα υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση των παραγόντων A και B στην μεταβλητή W_C . Σημαντική αλληλεπίδραση υπάρχει και μεταξύ των παραγόντων A και C. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης των B και C, φαίνεται να υπάρχει αλληλεπίδραση, καθώς οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του C αποκλίνουν από το να είναι παράλληλες.



Σχήμα Π8 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής W_C σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.

Από την ανάλυση των επιδράσεων προέκυψε ότι τα πλέον κατάλληλα μοντέλα, που συνδέουν τις παραμέτρους σχεδιασμού x_i με την μεταβλητή απόκρισης y , είναι τα μοντέλα παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + \dots + a_7x_2^2 + a_8x_2x_3 + a_9x_3^2$$

Η εξίσωση που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του λογισμικού Statgraphics για την W_C είναι:

$$W_C = 4,7225 - 36,6 \cdot C_D - 1,7 \cdot M_C - 91,25 \cdot S_CD + 79,5 \cdot C_D^2 + 31,0 \cdot C_D \cdot M_C + 375,0 \cdot C_D \cdot S_CD - 10,5 \cdot M_C^2 - 125,0 \cdot M_C \cdot S_CD + 3437,5 \cdot S_CD^2$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι σχεδιασμού που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην μεταβλητή απόκρισης W_C είναι ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη C_D. Η επίδραση του λόγου microsilica/τσιμέντο M_C στην μεταβλητή απόκρισης και ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη S_CD είναι αμελητέα. Και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης W_C. Αλληλεπίδραση υπάρχει κυρίως ανάμεσα στο λόγο τσιμέντο/παιπάλη και στο λόγο microsilica/τσιμέντο, στο λόγο τσιμέντο/παιπάλη και υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη. Αλληλεπίδραση φαίνεται να υπάρχει και μεταξύ του λόγου microsilica/τσιμέντο και υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη.

Υπολογισμός επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην πυκνότητα SG (ή d)

Η μέση τιμή της d για το χαμηλό επίπεδο C_D (0,10) είναι:

$$d = \frac{2,14 + 2,18 + 2,09 + 2,15}{4} = 2,14 \text{ g/cm}^3$$

Για το υψηλό επίπεδο C_D (0,20) είναι:

$$d = \frac{2,18 + 2,14 + 2,12 + 2,17}{4} = 2,1525 \text{ g/cm}^3$$

Και η κύρια επίδραση είναι:

$$d = |2,1525 - 2,14| = 0,0125 \text{ g/cm}^3$$

Ομοίως υπολογίζω την κύρια επίδραση και για τους άλλους δυο παράγοντες στην d:

Για το χαμηλό επίπεδο S_CD (0,004) είναι:

$$d = \frac{2,12 + 2,18 + 2,17 + 2,16}{4} = 2,1575 \text{ g/cm}^3$$

Για το υψηλό επίπεδο S_CD (0,008) είναι:

$$d = \frac{2,17 + 2,14 + 2,09 + 2,14}{4} = 2,135 \text{ g/cm}^3$$

Και η κύρια επίδραση είναι:

$$d = |2,135 - 2,1575| = 0,0225 \text{ g/cm}^3$$

Για το χαμηλό επίπεδο M_C (0,05) είναι:

$$d = \frac{2,17 + 2,18 + 2,14 + 2,16}{4} = 2,1625 \text{ g/cm}^3$$

Για το υψηλό επίπεδο M_C (0,15) είναι:

$$d = \frac{2,12 + 2,12 + 2,14 + 2,15}{4} = 2,1325 \text{ g/cm}^3$$

Και η κύρια επίδραση είναι:

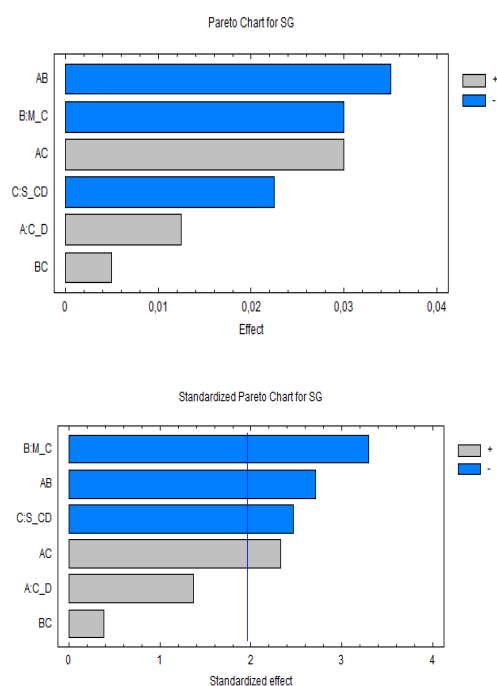
$$d = |2,1325 - 2,1625| = 0,03 \text{ g/cm}^3$$

Πίνακας Π3 Πίνακας κύριων επιδράσεων και κανονικοποιημένων τιμών για την πυκνότητα d.

Παράγοντας	Κύρια επίδραση	Κανονικοποιημένες τιμές
A:C_D	0,0125	0,968992
B:M_C	-0,03	-2,32558
C:S_CD	-0,0225	-1,74419
AB	-0,035	-2,71318
AC	0,03	2,325581
BC	0,005	0,387597

Στον Πίνακα Π3 φαίνονται οι επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις που εκτιμήθηκαν από το πρόγραμμα, καθώς και το τυπικό σφάλμα για κάθε επίδραση. Οι κανονικοποιημένες τιμές προκύπτουν μετά από διαίρεση της επίδρασης με το τυπικό σφάλμα και χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί το διάγραμμα Pareto.

Τα διαγράμματα Pareto για τις αρχικές και τις κανονικοποιημένες τιμές δίνονται στο Σχήμα Π9:

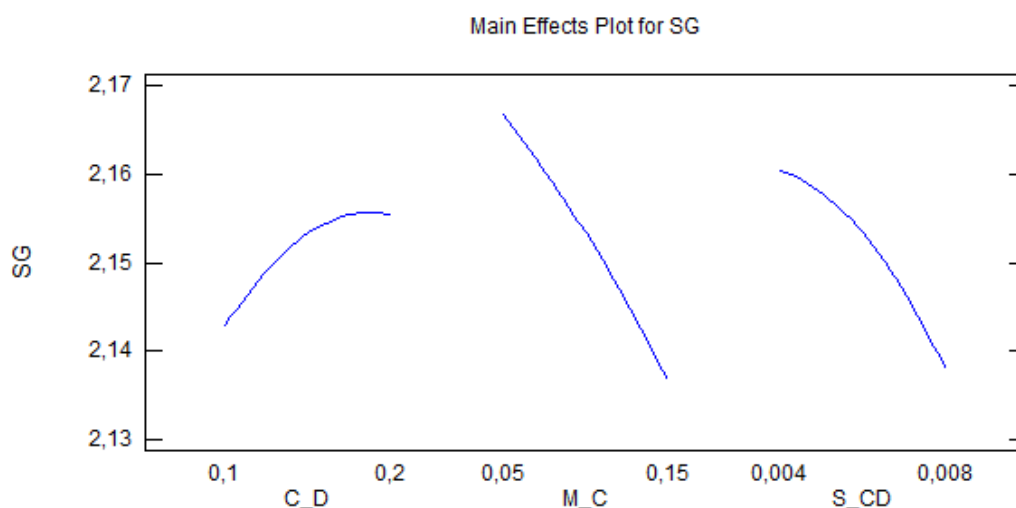


Σχήμα Π9 Διάγραμμα Pareto για τις αρχικές (effect) και τις κανονικοποιημένες τιμές (standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην πυκνότητα d.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα Π9 , τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της μεταβλητής d ή SG έχει ο παράγοντας B δηλαδή ο λόγος microsilica/τσιμέντο.

Ακολουθούν η αλληλεπίδραση AB, ο παράγοντας C δηλαδή ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη, η αλληλεπίδραση AC. Η αλληλεπίδραση BC και ο παράγοντας A, δηλαδή ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση στην πυκνότητα d, καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο (μπλε γραμμή).

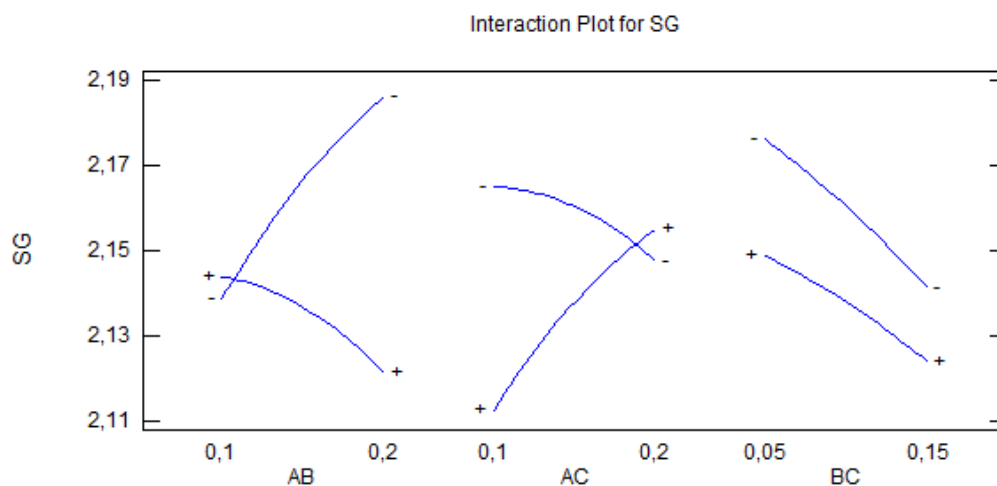
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων (Σχήμα Π10) και αλληλεπιδράσεων (Σχήμα Π11). Στο διάγραμμα των κύριων επιδράσεων παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Παρατηρείται ότι και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης d. Ο παράγοντας A επιδρά θετικά στην τιμή της μεταβλητής d, δηλαδή μικρή αύξησή του προκαλεί μεγάλη αύξηση στην τιμή της d. Οι παράγοντες B και C έχουν αρνητική επίδραση στην πυκνότητα, που σημαίνει ότι μικρή μείωσή τους προκαλεί μεγάλη μείωση στην μεταβλητή απόκρισης. Ο παράγοντας έχει την μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβλητή d, ενώ ο παράγοντας A έχει την μικρότερη επίδραση.



Σχήμα Π10 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων για την μεταβλητή d

Στο Σχήμα Π11 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής d σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Σε κάθε περίπτωση ο δεύτερος παράγοντας (π.χ. ο B στην αλληλεπίδραση AB) εμφανίζεται με μια γραμμή για το υψηλό του επίπεδο και μια άλλη για το χαμηλό του, ενώ η μετάβαση του πρώτου παράγοντα από το ένα

επίπεδο στο άλλο γίνεται κατά τον άξονα των τετμημένων. Στην περίπτωση των παραγόντων A και B οι γραμμές τέμνονται άρα υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση των παραγόντων A και B στην μεταβλητή d. Σημαντική αλληλεπίδραση υπάρχει και μεταξύ των παραγόντων A και C. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης των B και C, φαίνεται να υπάρχει αλληλεπίδραση, καθώς οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του C αποκλίνουν από το να είναι παράλληλες.



Σχήμα Π11 Διάγραμμα της μεταβολής της μεταβλητής d σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων.

Από την ανάλυση των επιδράσεων προέκυψε ότι τα πλέον κατάλληλα μοντέλα, που συνδέουν τις παραμέτρους σχεδιασμού x_i με την μεταβλητή απόκρισης y , είναι τα μοντέλα παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + \dots + a_7x_2^2 + a_8x_2x_3 + a_9x_3^2$$

Η εξίσωση που προκύπτει απ τα δεδομένα είναι η ακόλουθη:

$$SG = 2,16167 + 0,425 \cdot C_D + 0,733333 \cdot M_C - 18,125 \cdot S_CD - 1,66667 \cdot C_D^2 - 7,0 \cdot C_D \cdot M_C + 150,0 \cdot C_D \cdot S_CD - 0,666667 \cdot M_C^2 + 25,0 \cdot M_C \cdot S_CD - 1041,67 \cdot S_CD^2$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι σχεδιασμού που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην μεταβλητή απόκρισης d είναι ο παράγοντας B δηλαδή ο

λόγος microsilica/τσιμέντο και ο παράγοντας C δηλαδή ο λόγος υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη. Η επίδραση του λόγου τσιμέντο/παιπάλη C_D στην μεταβλητή απόκρισης είναι αμελητέα. Και οι τρεις παράγοντες εμφανίζουν μη γραμμική συσχέτιση με την παράμετρο απόκρισης W_C. Αλληλεπίδραση υπάρχει κυρίως ανάμεσα στο λόγο AB τσιμέντο/παιπάλη και στο λόγο microsilica/τσιμέντο, στο λόγο AC τσιμέντο/παιπάλη και υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη. Αλληλεπίδραση φαίνεται να υπάρχει και μεταξύ του λόγου BC microsilica/τσιμέντο και υπερρευστοποιητή/τσιμέντο κ παιπάλη.