



Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο:

**«Εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης
λατομικών παραπροϊόντων και της παραγωγής δομικών
στοιχείων»**

Γκέκα-Σερπετσιδάκη Πανδώρα

Τριμελής Επιτροπή:

Καθηγητής Γαλετάκης Μιχαήλ (Επιβλέπων)

Καθηγητής Κομνίτσας Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής Αλεβίζος Γεώργιος

Χανιά,

Μάιος 2018

Αφιερωμένη στη μητέρα μου ...

Η έγκριση της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ.2).

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την εργαστηριακή διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της παιπάλης που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα κατά την παραγωγή αδρανών υλικών, με στόχο την παραγωγή ινοπλισμένου κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης (χωρίς χρήση αυτοκλείστου, Non Autoclaved Aerated Concrete ή NAAC).

Η διερεύνηση περιλαμβάνει την παρασκευή και έλεγχο εργαστηριακών δοκιμών μιγμάτων παιπάλης, λευκού τσιμέντου, υδρασβέστου, νερού, ειδικών πρόσμικτων και ινών πολυπροπυλενίου. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν βασίστηκαν σε συνθέσεις που έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο «Έλεγχος ποιότητας-Υγιεινή και Ασφάλεια στη Μεταλλευτική», στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής που εκπονείται, από τη διδακτορική φοιτήτρια Σουλτανά Αθανασία.

Στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειας σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η συνεχής και αποτελεσματική συνεργασία μου με τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Γαλετάκη Μιχάλη, χωρίς τη στήριξη του οποίου δε θα είχε επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και τον ευχαριστώ θερμά. Θερμά ευχαριστήρια εκφράζω επίσης και στην υποψήφια διδάκτορα και συνεργάτιδα του εργαστηρίου, κ. Σουλτανά Αθανασία για τη συνεχή βοήθεια της στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών και στην επεξεργασία-ερμηνεία των μετρήσεων.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλεβίζο Γεώργιο για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη διόρθωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα η δυνατότητα αξιοποίησης της παιπάλης που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα κατά την παραγωγή αδρανών υλικών για την παραγωγή ινοπλισμένου κυψελωτού σκυροδέματος. Η παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση αυτοκλείστου (NAAC-Non Autoclaved Aerated Concrete), με σκοπό την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, καθώς για την παραγωγή του απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το κυψελωτό σκυρόδεμα υδροθερμικής κατεργασίας που απαιτεί χρήση αυτοκλείστου (AAC-Autoclaved Aerated Concrete).

Η διερεύνηση περιελάμβανε την παρασκευή και έλεγχο εργαστηριακών δοκιμίων μιγμάτων παιπάλης, λευκού τσιμέντου, υδρασβέστου, ινών πολυπροπυλενίου, νερού και άλλων ειδικών πρόσμικτων. Μετρήθηκαν οι αντοχές σε θλίψη και κάμψη, η πυκνότητα και η υδατοαπορρόφηση, ενώ υπολογίστηκε και ο λόγος νερό/τσιμέντο όλων των δοκιμίων, για όλες τις συνθέσεις.

Με βάση τον παραγοντικό σχεδιασμό παρασκευάστηκαν 18 συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου και επιπλέον 3 συνθέσεις χωρίς την προσθήκη ινών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως συνθέσεις-οδηγοί για σκοπούς σύγκρισης με τις υπόλοιπες συνθέσεις. Τέλος, μελετήθηκαν 4 σενάρια βελτιστοποίησης των συνθέσεων απ' όπου προέκυψαν οι συνδυασμοί των παραγοντικών επιπέδων που ικανοποιούν τα σενάρια αυτά για τις τιμές των μεταβλητών απόκρισης που ορίστηκαν. Τα αποτελέσματα του παραγοντικού σχεδιασμού έδειξαν ότι η προσθήκη ινών, είτε μικρού μήκους (2,2mm) είτε του μεγάλου μήκους (6-8mm), στην προτεινόμενη από τον κατασκευαστή δοσολογία ($0,9\text{kg/m}^3$), βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και ιδιαίτερα την αντοχή σε κάμψη (F_s) και το λόγο αντοχή σε κάμψη προς πυκνότητα ($F_s/\text{Density}$). Η προσθήκη ινών σε δοσολογία μεγαλύτερη (αύξηση κατά 50% και 100%) από εκείνη που προτείνει ο κατασκευαστής δε βελτιώνει σημαντικά την επιτυγχανόμενη αντοχή σε κάμψη και θλίψη, ενώ η ταυτόχρονη χρήση ινών μεγάλου μήκους και σε αυξημένη δοσολογία οδηγεί σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο για να επιτευχθεί ικανοποιητική εργασιμότητα στο νωπό μίγμα γεγονός που επιδρά αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμίων. Η πυκνότητα και η

υδατοαπορρόφηση των σκληρυμένων δοκιμίων δε φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από την προσθήκη ινών.

Από τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης προέκυψε ότι η σύνθεση που εμφανίζει τον καλύτερο συνδυασμό αντοχής-πυκνότητας (μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) με ταυτόχρονη επίτευξη πυκνότητας $\leq 0,80 \text{ g/cm}^3$) επιτυγχάνει αντοχή σε θλίψη 6,30MPa και πυκνότητα 0,80g/cm³.

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος πινάκων.....	8
Κατάλογος σχημάτων.....	9
Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή	11
1.1 Λατομική παιπάλη.....	11
1.2 Κυψελωτό σκυρόδεμα υδροθερμικής κατεργασίας-Autoclaved Aerated Concrete (AAC)....	16
Κεφάλαιο 2-Βελτίωση ποιότητας με στατιστικά πειράματα-Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός	19
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο παραγοντικού σχεδιασμού	19
2.1.1 Πλήρεις παραγοντικοί σχεδιασμοί με δύο ή περισσότερα επίπεδα	19
2.1.2 Βελτιστοποίηση.....	22
2.2 Ανάλυση παραγοντικού σχεδιασμού-Παράγοντες σχεδιασμού και παράγοντες απόκρισης..	23
Κεφάλαιο 3-Χαρακτηρισμός πρώτων υλών	25
3.1 Χαρακτηρισμός παιπάλης.....	25
3.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.....	26
3.2.1 Ίνες πολυπροπυλενίου	26
3.2.2 Συνδετικά υλικά και πρόσθετα	27
Κεφάλαιο 4-Παρασκευή δοκιμίων και έλεγχος εργαστηριακών δοκιμών.....	28
4.1 Καθορισμός συνθέσεων.....	28
4.2 Παρασκευή δοκιμίων	29
4.3 Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων	32
4.3.1 Φυσικές ιδιότητες δοκιμίων	32
4.3.1.1 Πυκνότητα.....	32
4.3.1.2 Υδατοαπορρόφηση	32

4.3.1.3 Λόγος νερό/τσιμέντο	33
4.3.2 Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων.....	33
4.3.2.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	33
4.3.2.2 Αντοχή σε κάμψη (κάμψη τριών σημείων)	34
Κεφάλαιο 5-Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού και αποτελέσματα μετρήσεων πειραματικών ιδιοτήτων.....	36
5.1 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων	36
5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων παραγοντικού σχεδιασμού	39
5.2.1 Αντοχή σε θλίψη (Cs).....	39
5.2.2 Πυκνότητα (Density).....	44
5.2.3 Αντοχή σε κάμψη (Fs).....	48
5.2.4 Υδατοαπορρόφηση (Wa).....	50
5.2.5 Λόγος νερό/τσιμέντο (W/C).....	53
5.2.6 Συσχετίσεις παραμέτρων απόκρισης.....	56
5.3 Υπολογισμός βέλτιστων συνθέσεων	58
Κεφάλαιο 6-Συμπεράσματα	62
Βιβλιογραφία	65

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Τυπική χημική σύσταση παιπάλης (%).....	12
Πίνακας 1.2: Τυπικές ιδιότητες του κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας.....	16
Πίνακας 1.3: Ιδιότητες AAC.....	17
Πίνακας 2.1: Παράδειγμα παραγοντικού σχεδιασμού της μορφής 2^2 , με παράγοντες A, B και αλληλεπίδραση AB.....	20
Πίνακας 2.2: Αλγεβρικά πρόσημα για τον υπολογισμό των επιδράσεων του παραγοντικού σχεδιασμού 2^2	21
Πίνακας 2.3: Συμβολισμός των παραγόντων σχεδιασμού και επίπεδα τιμών.....	24
Πίνακας 2.4: Εξαρτημένες μεταβλητές.....	24
Πίνακας 3.1: Ορυκτολογική ανάλυση παιπάλης.....	26
Πίνακας 4.1: Σύνολο συνθέσεων που πραγματοποιήθηκαν.....	28
Πίνακας 5.1: Συνθέσεις δοκιμίων και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.....	37
Πίνακας 5.2: Σύγκριση του λόγου $F_s/\text{Density}$ ινοπλισμένων και άοπλων δοκιμίων αντίστοιχων συνθέσεων. Η περιεκτικότητα % σε ίνες είναι η προτεινόμενη από τον κατασκευαστή των ινών.....	38
Πίνακας 5.3: Σύγκριση μέσων τιμών των λόγων $F_s/\text{Density}$, νερό/τσιμέντο και πυκνότητας για τις ινοπλισμένες και μη συνθέσεις.....	39
Πίνακας 5.4: Συσχετίσεις μεταβλητών απόκρισης.....	56
Πίνακας 5.5: Απεικόνιση σεναρίων βελτιστοποίησης.....	61

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Απόθεση παιπάλης.....	11
Σχήμα 1.2: Συσσώρευση παιπάλης σε αυλή εργοταξίου.....	12
Σχήμα 1.3: Ξηρή λατομική παιπάλη.....	13
Σχήμα 1.4: Κατηγοριοποίηση του κυψελωτού σκυροδέματος.....	14
Σχήμα 1.5: Φάσεις παραγωγής AAC.....	16
Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική κατανομή δειγμάτων παιπάλης.....	24
Σχήμα 3.2: Ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 6-8mm.....	27
Σχήμα 4.1: Εργαστηριακός αναμικτήρας.....	30
Σχήμα 4.2: Το σύνολο των δοκιμών που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο.....	31
Σχήμα 4.3: α) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες 0.9kg/m^3 , μήκος ινών 6-8mm και πυκνότητα 0.8g/cm^3 , β) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες 1.8kg/m^3 , μήκος ινών 2.2mm και πυκνότητα 0.78g/cm^3 , γ) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες 0.9kg/m^3 , μήκος ινών 6-8mm και πυκνότητα 0.87g/cm^3 . Η οριζόντια διάσταση της κάθε φωτογραφίας είναι 40mm.....	31
Σχήμα 4.4: Εικόνα στερεοσκοπίου για τη σύνθεση AC11, όπου φαίνεται οι ίνες πολυπροπυλενίου και η διασπορά τους εντός της κυψελώδους δομής του δοκιμίου.....	32
Σχήμα 4.5: Μηχανή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη.....	35
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε θλίψη (Cs).....	42
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την αντοχή σε θλίψη (Cs).....	43
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την αντοχή σε θλίψη (Cs).....	44

Σχήμα 5.4: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην πυκνότητα (Density).....	45
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την πυκνότητα (Density).....	46
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την πυκνότητα (Density).....	47
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε κάμψη (Fs).....	48
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την αντοχή σε κάμψη (Fs).....	49
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την αντοχή σε κάμψη (Fs).....	50
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση (Wa).....	51
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την υδατοαπορρόφηση (Wa).....	52
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την υδατοαπορρόφηση (Wa).....	53
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στο λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).....	54
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).....	55
Σχήμα 5.15: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).....	55
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα συσχέτισης των μεταβλητών απόκρισης.....	57
Σχήμα 5.17: Βελτιστοποίηση της συνάρτησης επιθυμητής τιμής για το σενάριο 1 (Ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη Cs και ελαχιστοποίηση της πυκνότητας Density).....	59
Σχήμα 5.18: Απεικόνιση βέλτιστου σημείου για το σενάριο 1.....	60

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή

1.1 Λατομική παιπάλη

Στην Ελλάδα, η συντριπτική πλειοψηφία των λατομείων αδρανών υλικών εξορύσσουν ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, με αποτέλεσμα τα παραγόμενα, κατά την όλη διαδικασία παραγωγής, λεπτομερή παραπροϊόντα να είναι επίσης ασβεστολιθικής σύστασης. Η συσσώρευση των λεπτομερών ασβεστολιθικών παραπροϊόντων (<63 μm), κοινώς λεγόμενα ασβεστολιθική παιπάλη ή απλώς παιπάλη, που προκύπτουν κατά την παραγωγή αδρανών υλικών (διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και θραύσης) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα - προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών υλικών και ένα μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα (Galetakis et al., 2012).



Σχήμα 1.1: Απόθεση παιπάλης (Galetakis and Soultana, 2016)

Η απομάκρυνση σημαντικού μέρους του λεπτόκοκκου αυτού υλικού από τα αδρανή που προορίζονται για σκυρόδεμα, ασφαλτομίγματα και έτοιμα κονιάματα είναι επιβεβλημένη από τους σχετικούς κανονισμούς και τις προδιαγραφές ποιότητας που καθορίζουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε παιπάλη ανάλογα με τη χρήση των αδρανών υλικών.

Η παιπάλη προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΕΚΤΣ-16), αλλά και το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-1. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα ποσοστά παιπάλης προέρχονται τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

Ειδικότερα, ως παιπάλη (fines), ορίζεται το μέρος του αδρανούς που περνάει από το κόσκινο 0,063mm. Η παιπάλη των χονδρόκοκκων αδρανών δεν μπορεί να υπερβαίνει το 1,5% του ξηρού βάρους τους. Η παιπάλη του θραυστού λεπτόκοκκου αδρανούς (άμμου) δεν μπορεί να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους του. Η παιπάλη του συλλεκτού λεπτόκοκκου αδρανούς (άμμου) δεν μπορεί να υπερβαίνει το 3% του ξηρού βάρους του. Στον Πίνακα 1.1, δίνεται μια τυπική χημική σύσταση παιπάλης.

Πίνακας 1.1: Τυπική χημική σύσταση παιπάλης (%) (Galetakis et al., 2012).

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂
55,34	0,07	0,58	0,12	0,23	<0,1	<0,1	43,62

Σε έναν τυπικό καταναλωτή αδρανών υλικών ο οποίος δε χρησιμοποιεί τα αδρανή υλικά ως έχουν από το λατομείο (π.χ. επιχωματώσεις, υποβάσεις οδοποιίας κ.τ.λ.), οι κυρίαρχες χρήσεις των αδρανών είναι για την παραγωγή σκυροδέματος (ready mix concrete) και ασφαλτομίγματος. Στις περιπτώσεις αυτές οι ισχύοντες κανονισμοί επιβάλλουν τη διατήρηση της παιπάλης εντός θεσμοθετημένων ορίων, πράγμα που αναγκάζει στην (κατά κανόνα) απομάκρυνσή της. Έτσι η παιπάλη μπορεί να διαχωριστεί ανάλογα με τη μέθοδο συλλογής σε ποιότητες διαφορετικών ιδιοτήτων (Galetakis et al., 2012).



Σχήμα 1.2: Συσσώρευση παιπάλης σε αυλή εργοταξίου (Galetakis and Soultana, 2016)

Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί πολλοί τρόποι επαναχρησιμοποίησης της παιπάλης όπως αγροτικές χρήσεις, εξουδετέρωση βιομηχανικών αποβλήτων ή χρήση ως πληρωτικό μέσο για τη βιομηχανία χαρτιού και πλαστικού, δεν έχουν επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό εξαιτίας της δυσκολίας μεταφοράς της από τους χώρους απόθεσης της, δηλαδή στους χώρους τους οποίους παράγεται ως απόρριμμα.

Γι' αυτό το λόγο, γίνονται προσπάθειες κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο, η παιπάλη να χρησιμοποιηθεί στον κατασκευαστικό τομέα, με σκοπό να επαναχρησιμοποιείται από τη βιομηχανία που παράγεται ως απόρριμμα, γεγονός που σίγουρα θα οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Πιο συγκεκριμένα, η παιπάλη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή διαφόρων τύπων δομικών στοιχείων όπως τα τούβλα και οι τεχνητοί λίθοι, στην παραγωγή τσιμέντου και τέλος στην παραγωγή διαφόρων τύπων σκυροδέματος όπως είναι και το κυψελωτό σκυρόδεμα (Galetakis and Soultana, 2016).

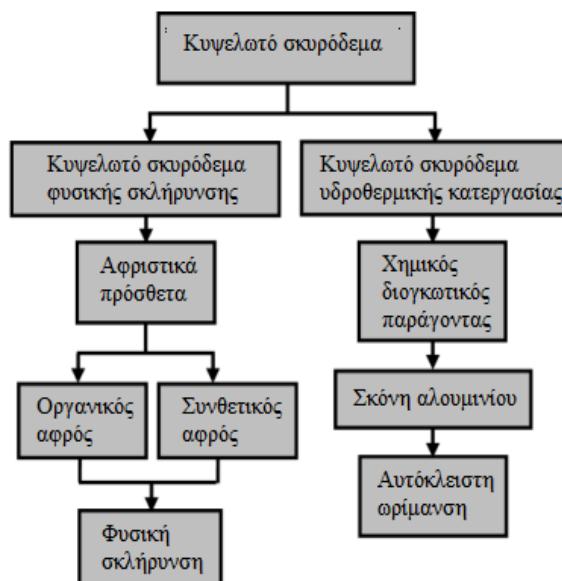


Σχήμα 1.3: Ξηρή λατομική παιπάλη (Galetakis and Soultana, 2016)

1.2 Κυψελωτό σκυρόδεμα υδροθερμικής κατεργασίας-Autoclaved Aerated Concrete (AAC)

Το κυψελωτό σκυρόδεμα είναι ένας τύπος ελαφροβαρούς σκυροδέματος, το οποίο σύμφωνα με τη μέθοδο ωρίμανσης διακρίνεται σε κυψελωτό σκυρόδεμα υδροθερμικής κατεργασίας (autoclaved aerated concrete - AAC) και σε κυψελωτό σκυρόδεμα φυσικής σκλήρυνσης (non-autoclaved aerated concrete - NAAC). Επιπλέον, διακρίνονται δύο τρόποι παραγωγής κυψελωτού σκυροδέματος (Σχήμα 1.4) (Hamad, 2014; Narayanan and Ramamurthy, 2000):

- με χρήση διογκωτικού παράγοντα, οπότε το παραγόμενο κυψελωτό σκυρόδεμα ονομάζεται αεριομετόν, και
- με χρήση αφριστικών πρόσθετων οπότε το παραγόμενο κυψελωτό σκυρόδεμα ονομάζεται αφρομετόν.



Σχήμα 1.4: Κατηγοριοποίηση του κυψελωτού σκυροδέματος (τροποποιημένο από Hamad, 2014).

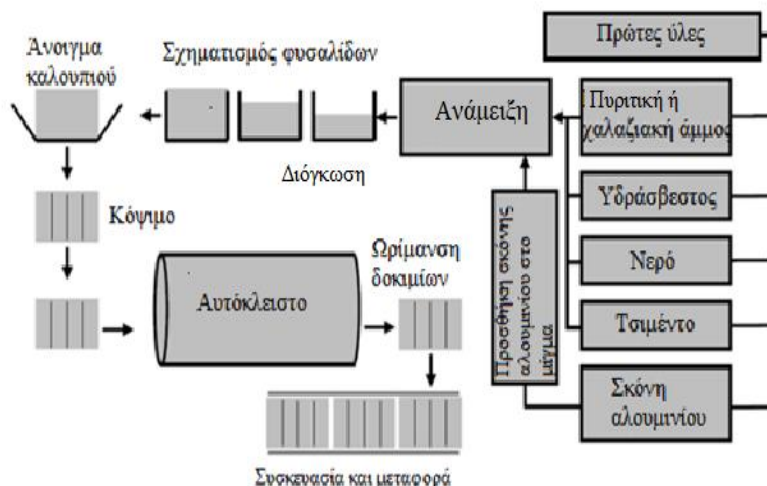
Ειδικότερα, για την παραγωγή του αεριομετόν ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος διογκωτικός παράγοντας είναι η σκόνη αλουμινίου. Η σκόνη αλουμινίου χρησιμοποιείται σε παγκόσμια

κλίμακα για την παραγωγή AAC και προστίθεται κυρίως σε ποσοστά 0,2% έως 0,5% κ.β. τσιμέντου (Boggelen, 2011).

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή αεριομετόν είναι: χαλαζιακή άμμος, άσβεστος, τσιμέντο και σκόνη αλουμινίου. Όλα τα λεπτομερή πρόσθετα, δηλαδή η χαλαζιακή άμμος και η άσβεστος, ανακατεύονται με το τσιμέντο. Στη συνέχεια, προστίθεται νερό και στο τελευταίο στάδιο της ανάμειξης, προστίθεται η σκόνη αλουμινίου, η οποία αυξάνει τον όγκο του δοκιμίου από 2-5 φορές, σε σχέση με τον αρχικό. Αυτό συμβαίνει διότι η σκόνη αλουμινίου αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου. Η αντίδραση της σκόνης αλουμινίου με το υδροξείδιο του ασβεστίου προκαλεί το σχηματισμό μικροσκοπικών φυσαλίδων υδρογόνου, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν την αύξηση του όγκου του δοκιμίου (Σχήμα 1.5). Το υδρογόνο που παράγεται από αυτήν την αντίδραση, ως ελαφρύτερο αέριο και με μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα, διαφεύγει και αντικαθίσταται από τον αέρα. Η αύξηση του όγκου η οποία θα προκύψει εξαρτάται κυρίως από την αναλογία σκόνης αλουμινίου/τσιμεντόπαστας. Η αντίδραση (1) περιγράφει την αντίδραση παραγωγής υδρογόνου:



Η μέθοδος ωρίμανσης με τη διαδικασία του αυτοκλείστου πραγματοποιείται σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η πίεση μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος πιέσεων (5-20bar), η θερμοκρασία από 120-250°C και ο χρόνος παραμονής από 8-20 ώρες. Οι ιδιότητες όπως η αντοχή σε θλίψη, η συστολή ξήρανσης και η υδατοαπορρόφηση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο παραγωγής και το χρόνο ωρίμανσης (Hamad, 2014; Somi, 2011; Domingo, 2008; Pytlc and Saxena, 1992; Ekaputri et al., 2013). Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι τυπικές ιδιότητες του κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας.



Σχήμα 1.5: Φάσεις παραγωγής AAC (τροποποιημένο από Hamad, 2014).

Πίνακας 1.2: Τυπικές ιδιότητες του κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας (Newman et al., 2003; Hamad, 2014)

Ξηρή πυκνότητα (kg/m ³)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)
450	3,2	0,65
525	4,0	0,75
600	4,5	0,85
675	6,3	1,00
750	7,5	1,25

1.3 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του κυψελωτού σκυροδέματος

Το πορώδες του κυψελωτού σκυροδέματος διακρίνεται στους τεχνητούς πόρους (μακροπόροι) που προκύπτουν κατά τη διόγκωση του μίγματος και στους πόρους των τοιχωμάτων μεταξύ των μακροπόρων (μικροπόροι). Ο προσδιορισμός του πορώδους στην περίπτωση του κυψελωτού σκυροδέματος είναι πολύ σημαντικός καθώς είναι μεγαλύτερο του 80%. Το πορώδες και η

κατανομή των πόρων ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεση και τη μέθοδο της ωρίμανσης (Alexanderson, 1979; Narayanan and Ramamurthy, 2000).

Η αναλογία νερό/τσιμέντο (W/C) σχετίζεται με τη διόγκωση του μίγματος και συνεπώς και με την πυκνότητα. Για το κυψελωτό σκυρόδεμα, η χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντου οδηγεί σε μη επαρκή διόγκωση, ενώ υψηλότερη αναλογία νερού/τσιμέντου οδηγεί σε κατάρρευση της κυψελωτής δομής (Ramamurthy and Narayanan, 2000). Έτσι, η απαίτηση σε νερό του μίγματος πρέπει να εκτιμηθεί από τη σταθερότητα του νωπού μίγματος και όχι με μία προκαθορισμένη αναλογία νερού/τσιμέντου ή νερού/στερεών (Valore, 1954). Πολλές φυσικές ιδιότητες του κυψελωτού σκυροδέματος εξαρτώνται από την πυκνότητα ($300-1800\text{kg/m}^3$), άρα είναι σημαντικό οι ιδιότητες του να εξετάζονται σε σχέση με αυτήν. Το κυψελωτό σκυρόδεμα διαθέτει ένα μεγάλο εύρος πυκνοτήτων για συγκεκριμένες εφαρμογές, που μπορούν να παρασκευαστούν με αλλαγές στη σύνθεση, γεγονός το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει τη δομή, το μέγεθος και την κατανομή των πόρων (Prim and Wittmann, 1983).

Η αντοχή σε θλίψη του κυψελωτού σκυροδέματος φαίνεται να επηρεάζεται από τη μέθοδο σχηματισμού των πόρων, τη σύνθεση και τη μέθοδο ωρίμανσης των δοκιμίων. Η δομή και η κατανομή των πόρων φαίνεται να έχουν αξιοσημείωτη επιρροή στην αντοχή σε θλίψη, καθώς μια πιο πυκνή και ομοιόμορφη κατανομή πόρων αυξάνει, την αντοχή για συγκρίσιμες πυκνότητες δοκιμίων (Gelim and Khalid, 2011).

Αντίθετα, η μείωση στην πυκνότητα με τον σχηματισμό των μακροπόρων φαίνεται να προκαλεί σημαντική μείωση στην αντοχή. Σε γενικές γραμμές, η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται με την πυκνότητα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Ιδιότητες AAC (Narayanan and Ramamurthy, 2000)

Ξηρή πυκνότητα (kg/m^3)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
400	1,3-2,8
500	2,0-4,4
600	2,8-6,3
700	3,9-8,5

Η διαδικασία της υδροθερμικής ωρίμανσης ενισχύει σημαντικά την αντοχή σε θλίψη, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις καταλήγουν στο σχηματισμό μίας σταθερής μορφής τομπερμορίτη (tobermorite). Η τελική αντοχή σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται κυρίως από την πίεση και τη διάρκεια ωρίμανσης. Η αντοχή του NAAC αυξάνεται από 30-80% από τις 28 ημέρες μέχρι και τους 6 μήνες. Ένα μέρος αυτής της αύξησης οφείλεται στη διαδικασία της ενανθράκωσης (Narayanan and Ramamurthy, 2000).

Κεφάλαιο 2-Βελτίωση ποιότητας με στατιστικά πειράματα-Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός

2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο παραγοντικού σχεδιασμού

2.1.1 Πλήρεις παραγοντικοί σχεδιασμοί με δύο ή περισσότερα επίπεδα

Στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης για την εύρεση της βέλτιστης ποσότητας και μήκους ινών που θα προστεθούν στο νωπό μίγμα για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων κυψελωτού μικροσκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης επιλέχθηκε η μέθοδος του παραγοντικού σχεδιασμού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί στατιστικές τεχνικές για τη βελτίωση της ποιότητας με σκοπό να επιβεβαιωθούν υποθέσεις ή να διερευνηθούν οι σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της ποιότητας του προϊόντος. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον καθορισμό των παραμέτρων που επιδρούν στην ποιότητα ενός προϊόντος ή μιας παραγωγικής διαδικασίας και είναι πολύ χρήσιμη στην περίπτωση που αυτές οι παράμετροι είναι πολλές. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα η μέθοδος του ενός παράγοντα, όπου κάθε φορά μελετάται η επίδραση από τη μεταβολή ενός παράγοντα, ενώ διατηρούνται σταθεροί οι υπόλοιποι παράγοντες. Με τον τρόπο αυτό μελετάται κάθε φορά η επίδραση του παράγοντα που μεταβάλλεται, χωρίς όμως τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι πάντα αξιόπιστα. Όταν οι παράγοντες είναι πολλοί το πείραμα απαιτεί αρκετό χρόνο για να ολοκληρωθεί και επιπλέον δεν είναι εφικτό να εξεταστούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Τα προβλήματα αυτά καλείται να ξεπεράσει η μέθοδος του παραγοντικού σχεδιασμού των πειραμάτων.

Οι παραγοντικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πειράματα που περιλαμβάνουν αρκετούς παράγοντες και ζητείται η μελέτη της επίδρασης των παραγόντων αυτών στην απόκριση (y). Οι απλούστεροι τύποι παραγοντικών σχεδιασμών είναι αυτοί με δύο μόνο επίπεδα (levels) γνωστοί και ως 2^k Παραγοντικοί Σχεδιασμοί.

Με τον όρο *παραγοντικός σχεδιασμός* εννοούμε τον πειραματικό σχεδιασμό κατά τον οποίο σε κάθε πλήρη δοκιμή ή επανάληψη του πειράματος, εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των επιπέδων (levels) των παραγόντων. Για παράδειγμα α επίπεδα του παράγοντα Α και b επίπεδα

του παράγοντα B λέμε ότι είναι ταξινομημένα σε έναν παραγοντικό σχεδιασμό, όταν κάθε επανάληψη του πειράματος περιλαμβάνει όλους τους ab συνδυασμούς των επιπέδων. Συνήθως ένας παραγοντικός σχεδιασμός επαναλαμβάνεται n φορές (Ευθυμίου, 2010).

Αν έχουμε δύο μόνο παράγοντες, έστω A και B, καθένα σε δύο επίπεδα (levels) τότε λέμε ότι έχουμε έναν “δύο στη δεύτερα παραγοντικό σχεδιασμό” και το συμβολίζουμε ως εξής: 2^2 παραγοντικό σχεδιασμό. Τα επίπεδα (στάθμες) των παραγόντων μπορούν χάριν ευκολίας να ονομαστούν χαμηλή και υψηλή στάθμη αντίστοιχα. Συνήθως συμβολίζουμε την επίδραση ενός παράγοντα με ένα κεφαλαίο λατινικό γράμμα. Έτσι το A αναφέρεται στην επίδραση του παράγοντα A, το B αναφέρεται στην επίδραση του παράγοντα B και το AB αναφέρεται στην αλληλεπίδραση των παραγόντων A και B. Στον 2^2 παραγοντικό σχεδιασμό η χαμηλή και υψηλή στάθμη των A και B συμβολίζεται με – και + αντίστοιχα στους παράγοντες A και B. Έτσι το – στον παράγοντα A συμβολίζει τη χαμηλή στάθμη του A, το + την υψηλή στάθμη του A, το – στον παράγοντα B τη χαμηλή στάθμη του B και τέλος το + στον B, την υψηλή στάθμη του B.

Οι τέσσερις αγωγές (συνδυασμοί επιπέδων) στο σχεδιασμό συνήθως παριστάνονται με μικρά γράμματα. Επομένως, η υψηλή στάθμη οποιουδήποτε παράγοντα σε αγωγή συμβολίζεται με το αντίστοιχο μικρό γράμμα και η χαμηλή στάθμη ενός παράγοντα συμβολίζεται με την απουσία του αντίστοιχου γράμματος. Δηλαδή, η αγωγή a παριστάνει τον παράγοντα A στην υψηλή στάθμη και τον B στην χαμηλή στάθμη, η αγωγή b παριστάνει τον παράγοντα A στην χαμηλή στάθμη και τον B στην υψηλή στάθμη και το ab παριστάνει και τους δύο παράγοντες στην υψηλή στάθμη. Συνήθως το (1) το χρησιμοποιούμε για να συμβολίζουμε την περίπτωση στην οποία και οι δύο παράγοντες βρίσκονται στη χαμηλή στάθμη (Ευθυμίου, 2010).

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα παραγοντικού σχεδιασμού της μορφής 2^2 , με παράγοντες A, B και αλληλεπίδραση AB.

Επιδράσεις	(1)	a	b	Ab
A	-1	+1	-1	+1
B	-1	-1	+1	+1
AB	+1	-1	-1	+1

Πίνακας 2.2: Αλγεβρικά πρόσημα για τον υπολογισμό των επιδράσεων του παραγοντικού σχεδιασμού 2^2

Συνδυασμός Αγωγής	Παραγοντική επίδραση			
	(I)	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

Η επίδραση ενός παράγοντα ορίζεται ως η αλλαγή που γίνεται στην απόκριση (response) από την αλλαγή στο επίπεδο του παράγοντα. Αυτό συνήθως καλείται κύρια επίδραση (main effect) επειδή αναφέρεται στους παράγοντες που είναι πρωταρχικής σημασίας στο πείραμα. Σε κάποια πειράματα η διαφορά στην απόκριση μεταξύ των επιπέδων ενός παράγοντα δεν είναι η ίδια σε όλα τα επίπεδα των άλλων παραγόντων. Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι υπάρχει αλληλεπίδραση (interaction) μεταξύ των παραγόντων.

Παρατηρούμε επομένως ότι οι παραγοντικοί σχεδιασμοί 2 ή και περισσότερων επιπέδων έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά, είναι περισσότερο αποδοτικοί απ' ό,τι τα πειράματα ενός παράγοντα τη φορά, τα οποία αλλάζουν έναν παράγοντα κάθε φορά. Επιπλέον, ένας παραγοντικός σχεδιασμός είναι αναγκαίος όταν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις για να αποφύγουμε τυχόν παραπλανητικά συμπεράσματα. Τέλος, οι παραγοντικοί σχεδιασμοί επιτρέπουν οι επιδράσεις ενός παράγοντα να εκτιμώνται σε αρκετά επίπεδα των άλλων παραγόντων, παρέχοντάς μας συμπεράσματα, τα οποία είναι έγκυρα σε ένα εύρος πειραματικών συνθηκών (Ευθυμίου, 2010).

Ορίζουμε τη μέση επίδραση ενός παράγοντα ως την αλλαγή που προξενείται στην απόκριση από την αλλαγή στη στάθμη αυτού του παράγοντα, που προσδιορίζεται κατά μέσο όρο πάνω στις στάθμες του άλλου παράγοντα.

Οι πιο δημοφιλείς παραγοντικοί σχεδιασμοί είναι αυτοί των δύο επιπέδων. Παρόλα αυτά όμως χρησιμοποιούνται (σπανιότερα ίσως) και παραγοντικοί σχεδιασμοί με περισσότερα από δύο

επίπεδα, όπως για παράδειγμα οι παραγοντικοί σχεδιασμοί 3^k , 4^k ,...κ.τ.λ. Οι πλήρεις παραγοντικοί σχεδιασμοί τριών ή περισσότερων επιπέδων είναι πολύ χρήσιμοι στην εύρεση των τετραγωνικών επιδράσεων (quadratic effects), και συμβολίζονται ως εξής: l^k . Αυτό σημαίνει ότι οι k παράγοντες εξετάζονται ο κάθε ένας σε l επίπεδα. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση του 3^k σχεδιασμού ο κάθε ένας από τους k παράγοντες εξετάζεται σε τρία επίπεδα. Όμοια, ίδιο αποτέλεσμα ισχύει και στην περίπτωση περισσότερων επιπέδων.

Ο λόγος για τον οποίο μπορεί κάποιος ερευνητής να χρησιμοποιήσει στην έρευνα του έναν παραγοντικό σχεδιασμό με τρία ή περισσότερα επίπεδα είναι για να μπορεί να προσαρμόσει την πιθανή κυρτότητα στην συνάρτηση απόκρισης και για να μπορέσει επίσης να αντιμετωπίσει την περίπτωση στην οποία μπορεί να εμφανιστούν περισσότερα από δύο ονομαστικά ή ποιοτικά επίπεδα στους k παράγοντες. Τέλος, οι παραγοντικοί σχεδιασμοί με τρία ή περισσότερα επίπεδα διευκολύνουν την έρευνα του επιστήμονα και του επιτρέπουν τη μελέτη τετραγωνικών σχέσεων (quadratic relationship) μεταξύ της συνάρτησης απόκρισης και κάθε ενός από τους παράγοντες του μοντέλου που εξετάζει. Δυστυχώς όμως, παρόλα τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρουν οι παραγοντικοί σχεδιασμοί με περισσότερα από δύο επίπεδα, από πλευράς κόστους η εκτέλεση τέτοιων σχεδιασμών είναι πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα, συνεπώς οι σχεδιασμοί αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιορισμένη κλίμακα (Ευθυμίου, 2010).

2.1.2 Βελτιστοποίηση

Η μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (Response Surface Methodology-RSM) αποτελείται από μια σειρά στατιστικών και μαθηματικών εργαλείων, που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μιας κατάλληλης σχέσης μεταξύ των πολλαπλών εισόδων x_i (που αναφέρονται ως παράμετροι ελέγχου μιας διεργασίας) και της απόκριση ενδιαφέροντος y (αναφέρεται ως μεταβλητή απόκρισης). Η RSM χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων των x_i που έχουν ως αποτέλεσμα τη μέγιστη ή την ελάχιστη απόκριση y (ανάλογα με τη φύση του προβλήματος) σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος. Στην RSM, η σχέση μεταξύ της απόκρισης y και των παραμέτρων ελέγχου x_i είναι γενικά άγνωστες, αλλά δίνεται η δυνατότητα να διαμορφωθούν εμπειρικά. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι τα πολυωνυμικά μοντέλα πρώτου και δεύτερου βαθμού (Galetakis et al, 2016).

Στην περίπτωση πολλών μεταβλητών απόκρισης, ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων ελέγχου, που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα όλες τις αποκρίσεις, είναι ένα πιο περίπλοκο πρόβλημα. Μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους που χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση των πολλαπλών αποκρίσεων είναι η μέθοδος που βασίζεται στη συνάρτηση της επιθυμητής τιμής (desirability function). Η μέθοδος βρίσκει τιμές των παραμέτρων ελέγχου που παρέχουν τις πιο «επιθυμητές» τιμές απόκρισης. Η βασική ιδέα της προσεγγίσεως της λειτουργίας της συνάρτησης της επιθυμητής τιμής είναι να μετασχηματίσει ένα πρόβλημα πολλαπλής απόκρισης, σε ένα απλό πρόβλημα απόκρισης (μονής απόκρισης) μέσω μαθηματικών μετασχηματισμών (Galetakis et al, 2016).

Για κάθε απόκριση y_i , μια συνάρτηση επιθυμητής τιμής $d_i(y_i)$ αποδίδει αριθμούς μεταξύ 0 και 1 στις πιθανές τιμές του y_i , με το $d_i(y_i) = 0$ να αντιπροσωπεύει μια εντελώς ανεπιθύμητη τιμή του y_i και του $d_i(y_i) = 1$, να αντιπροσωπεύει μια εντελώς επιθυμητή ή ιδανική τιμή απόκρισης. Η συνολική αντικειμενική συνάρτηση, που αναφέρεται ως συνολική συνάρτηση επιθυμητής τιμής D , ορίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος των n επιμέρους d_i . Αν θεωρηθεί ότι ορισμένες αποκρίσεις είναι πιο σημαντικές από άλλες, μπορεί να καθοριστεί ένας κατάλληλος συντελεστής βαρύτητας w_i για κάθε απόκριση d_i . Στην περίπτωση αυτή η συνολική συνάρτηση επιθυμητής τιμής D είναι ο σταθμισμένος γεωμετρικός μέσος και δίνεται από τη σχέση 2.1:

$$D = (d_1^{w_1} d_2^{w_2} \dots d_i^{w_i} \dots d_n^{w_n})^{1/\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.1)$$

Όταν ο αριθμός των μεταβλητών απόκρισης είναι έως 2, αντί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση επιθυμητής τιμής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαγράμματα που υπολογίζουν για κάθε μεταβλητή απόκρισης το βέλτιστο σημείο γραφικά (Galetakis et al, 2016).

2.2 Ανάλυση παραγοντικού σχεδιασμού-Παράγοντες σχεδιασμού και παράγοντες απόκρισης

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ένας πλήρης μικτός παραγοντικός σχεδιασμός της μορφής: $3^2 \times 2^1$. Ο σχεδιασμός αυτό περιλαμβάνει την εξέταση 2 παραγόντων σε 3 επίπεδα (3^2) και ενός παράγοντα σε 2 επίπεδα (2^1).

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται οι παράγοντες πειραματικού σχεδιασμού, ενώ οι παράμετροι απόκρισης (εξαρτημένες μεταβλητές) φαίνονται στον Πίνακα 2.4. Για την ανάλυση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο STATGRAPHICS 5 Plus.

Πίνακας 2.3: Συμβολισμός των παραγόντων σχεδιασμού και επίπεδα τιμών

Επίπεδα παράγοντα	Παράγοντες		
	A Τσιμέντο/παιπάλη, Composition	B Ποσοστό ινών (kg/m³), Fiber_Content	C Μήκος ινών (mm) Fiber_Length
-1 χαμηλό	0,39	0,90	2,2
0 μεσαίο	0,44	1,35	-
+1 υψηλό	0,67	1,80	7

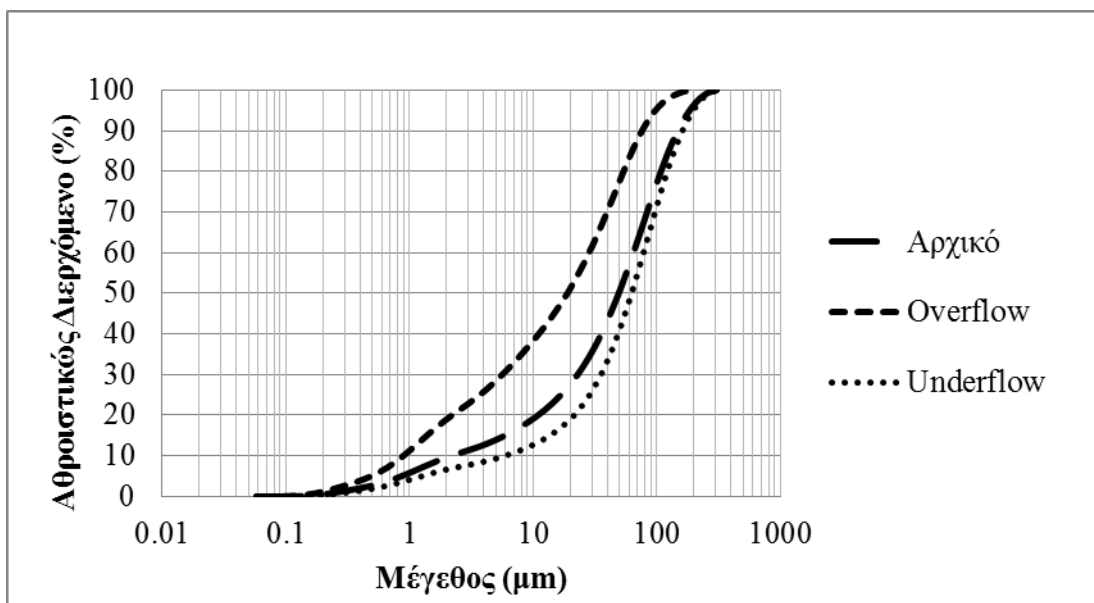
Πίνακας 2.4: Εξαρτημένες μεταβλητές

Συμβολισμός	Περιγραφή μεταβλητής
Cs	Αντοχή σε θλίψη (Compressive strength, MPa)
Density	Πυκνότητα (Density, g/cm ³)
Fs	Αντοχή σε κάμψη (Flexural strength, MPa)
W/C	Αναλογία νερού/τσιμέντο (Water to cement ratio)
Wa	Υδατοαπορρόφηση (Water absorption, %)

Κεφάλαιο 3-Χαρακτηρισμός πρώτων υλών

3.1 Χαρακτηρισμός παιπάλης

Η παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα που χρησιμοποιήθηκε για να αντικαταστήσει τη χαλαζιακή άμμο στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν συλλέγεται από το σύστημα ξήρανσης (παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα) της μαρμαρόσκονης που αποτελεί το βασικό αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται σε έτοιμα κονιάματα. Στον Πίνακα 3.1 φαίνεται η ορυκτολογική της ανάλυση, ενώ στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρία της παιπάλης και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ένα μεγάλο ποσοστό (30%) της παιπάλης που χρησιμοποιήθηκε είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο ($<20\mu\text{m}$), γεγονός που αυξάνει την απαίτηση του μίγματος σε νερό. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε ο διαχωρισμός της παιπάλης μέσω αεροταξινόμησης σε δυο κοκκομετρικά κλάσματα: στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα (Overflow) και το πιο χονδρόκοκκο (Underflow) (Σχήμα 3.1). Στα πειράματα που έγιναν, χρησιμοποιήθηκε μόνο το χονδρόκοκκο κλάσμα της παιπάλης αεροταξινόμησης (Underflow).



Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική κατανομή δειγμάτων παιπάλης

Πίνακας 3.1: Ορυκτολογική ανάλυση παιπάλης

	Παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα (%)
Χαλαζίας	1
Ασβεστίτης	94
Δολομίτης	5

3.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία

3.2.1 Ίνες πολυπροπυλενίου

Οι ίνες πολυπροπυλενίου (Σχήμα 3.2) είναι συνθετικές ίνες από πολυπροπυλένιο ειδικής επεξεργασίας, που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κονιαμάτων και σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ινών με μήκος 6-8mm και 2,2mm, σε διαφορετικές αναλογίες ($0,9\text{kg/m}^3$, $1,35\text{kg/m}^3$ και $1,8\text{kg/m}^3$). Οι ίνες πολυπροπυλενίου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου αναμένεται να δημιουργηθούν ρηγματώσεις, λόγω συρρίκνωσης κατά την πήξη ή λόγω παραμορφώσεων, όπως π.χ. σε πλάκες μεγάλης επιφάνειας, προκατασκευασμένα στοιχεία κλπ. Προστίθενται στα κονιάματα και το σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της ανάδευσης, όμως δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τον οπλισμό του σκυροδέματος. Ο έλεγχος των ρωγμών παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του σκυροδέματος, συνεπώς η ενσωμάτωση ινών μπορεί να φανεί αποτελεσματική και λειτουργική (Song et al., 2005).



Σχήμα 3.2: Ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 6-8mm.

3.2.2 Συνδετικά υλικά και πρόσθετα

Τα συνδετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η υδράσβεστος τύπου CL-90 και το λευκό τσιμέντο τύπου CEM I 52,5 N. Ως παράγοντας διόγκωσης χρησιμοποιήθηκε σκόνη αλουμινίου τύπου R0 260. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής τύπου Melflux 2651F με σκοπό να δώσει στο μίγμα αυξημένη ρευστότητα, χωρίς να απαιτείται η επιπλέον προσθήκη νερού. Η πυκνότητα του κυμαίνεται από $300-600\text{kg/m}^3$ και η δοσολογία του είναι από 0,05-1% κατά βάρος στερεών. Στα πειράματα που έγιναν η δόση που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0,35% κατά βάρος στερεών για όλες τις συνθέσεις.

Κεφάλαιο 4-Παρασκευή δοκιμίων και έλεγχος εργαστηριακών δοκιμών

4.1 Καθορισμός συνθέσεων

Οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκαν με βάση πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιείται στο εργαστήριο «Έλεγχος ποιότητας-Υγιεινή και Ασφάλεια στη Μεταλλευτική», στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής. Με βάση τον παραγοντικό σχεδιασμό παρασκευάστηκαν 18 συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου και επιπλέον 3 συνθέσεις χωρίς την προσθήκη ινών (AC19-21), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως συνθέσεις-οδηγοί για σκοπούς σύγκρισης με τις υπόλοιπες συνθέσεις. Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Σύνολο συνθέσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Κωδικός σύνθεσης	Περιεκτικότητα σε ίνες (kg/m ³)	Μήκος ινών (mm)	Υδράσβεστος (%κ.β.στ.)	Τσιμέντο (%κ.β.στ.)	Παιπάλη (%κ.β.στ.)	Σκόνη Αλουμινίου (%κ.β.στ.)
AC1	0,9	6-8	16,5	32,9	49,4	1,2
AC2	0,9	6-8	18,5	24,6	55,9	1
AC3	0,9	6-8	21,5	21,5	55,8	1,3
AC4	1,35	6-8	18,5	24,6	55,9	1
AC5	1,35	6-8	16,5	32,9	49,4	1,2
AC6	1,35	6-8	21,5	21,5	55,8	1,3
AC7	1,8	6-8	18,5	24,6	55,9	1
AC8	1,8	6-8	16,5	32,9	49,4	1,2
AC9	1,8	6-8	21,5	21,5	55,8	1,3
AC10	0,9	2,2	18,5	24,6	55,9	1

Πίνακας 4.1(συνεχ.): Σύνολο συνθέσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Κωδικός σύνθεσης	Περιεκτικότητα σε ίνες (kg/m ³)	Μήκος ινών (mm)	Υδράσβεστος (%κ.β.στ.)	Τσιμέντο (%κ.β.στ.)	Παιπάλη (%κ.β.στ.)	Σκόνη Αλουμινίου (%κ.β.στ.)
AC11	0,9	2,2	16,5	32,9	49,4	1,2
AC12	0,9	2,2	21,5	21,5	55,8	1,3
AC13	1,35	2,2	18,5	24,6	55,9	1
AC14	1,35	2,2	16,5	32,9	49,4	1,2
AC15	1,35	2,2	21,5	21,5	55,8	1,3
AC16	1,8	2,2	18,5	24,6	55,9	1
AC17	1,8	2,2	16,5	32,9	49,4	1,2
AC18	1,8	2,2	21,5	21,5	55,8	1,3
AC19	–	–	18,5	24,6	55,9	1
AC20	–	–	16,5	32,9	49,4	1,2
AC21	–	–	21,5	21,5	55,8	1,3

4.2 Παρασκευή δοκιμίων

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν από παιπάλη, υδράσβεστο και τσιμέντο σε διαφορετικές αναλογίες, ενώ στο μίγμα προστέθηκε επίσης υπερρυστοποιητής και σκόνη αλουμινίου (όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 3). Τα υλικά αυτά αναμιγνύονται σε εργαστηριακό αναμικτήρα, προσθέτοντας όσο νερό χρειάζεται το μίγμα ώστε να αποκτήσει την απαιτούμενη ρευστότητα. Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκε για κάθε μίγμα ο λόγος νερό/τσιμέντο.

Σε πρώτη φάση, όλες οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα μίγματα, ζυγίστηκαν με ακρίβεια εκατοστού του γραμμαρίου σε ειδική ζυγαριά ακριβείας. Αμέσως μετά τη ζύγιση

των υλικών, ακολούθησε η ανάμειξη τους στον εργαστηριακό αναμικτήρα τύπου MATEST Mortar mixer E094 (Εικόνα 4.1) με συχνότητα περιστροφής του βάκτρου ανάμειξης 285 στροφές/λεπτό και συχνότητα περιστροφής του μηχανισμού περιφερειακής κίνησης 125 στροφές/λεπτό. Κατά τη διάρκεια της ανάμειξης, έγινε η προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας νερού για να επιτευχθεί η επιθυμητή ρευστότητα του νωπού μίγματος.



Σχήμα 4.1: Εργαστηριακός αναμικτήρας

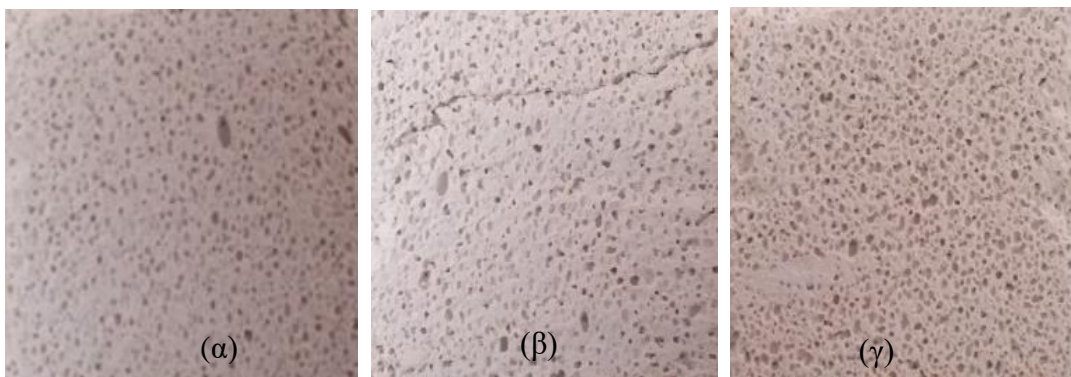
Όταν το μίγμα ήταν έτοιμο, τοποθετήθηκε σε πρισματικές μήτρες διαστάσεων $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Κατά τη χύτευση η καθεμία από τις 3 μήτρες γεμίζονταν περίπου μέχρι τη μέση, για να υπάρχει έτσι αρκετός ελεύθερος χώρος για τη διόγκωση των δοκιμίων. Για την κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια.

Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος σε εργαστηριακό θάλαμο ωρίμανσης της εταιρείας MATEST Curing chamber E139, σε θερμοκρασία $20 \pm 1^\circ \text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Στη συνέχεια, βγήκαν από το θάλαμο ωρίμανσης και έμειναν για 1 ημέρα στο φούρνο ξήρανσης (60°C), για να ελαχιστοποιηθεί το ποσοστό της υγρασίας. Έπειτα, προσδιορίστηκε η πυκνότητα, οι αντοχές σε κάμψη και θλίψη των δοκιμίων, καθώς και η υδατοαπορρόφησή τους.

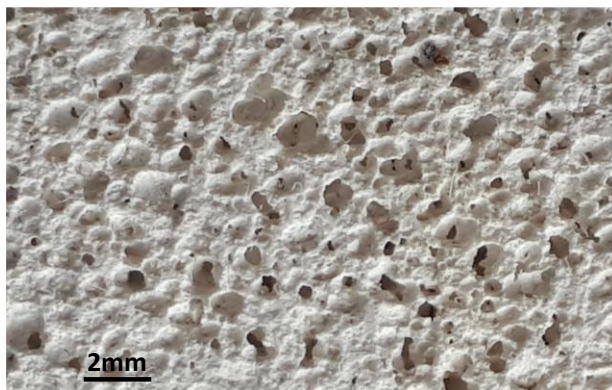


Σχήμα 4.2: Το σύνολο των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο.

Στο σχήμα 4.3 φαίνονται 3 φωτογραφίες δοκιμίων, που επιλέχθηκαν από το σύνολο των συνθέσεων με βάση την πυκνότητά τους.



Σχήμα 4.3: α) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες $0,9\text{kg/m}^3$, μήκος ινών 6-8mm και πυκνότητα $0,8\text{g/cm}^3$, β) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες $1,8\text{kg/m}^3$, μήκος ινών 2,2mm και πυκνότητα $0,78\text{g/cm}^3$, γ) Σύνθεση, με περιεκτικότητα σε ίνες $0,9\text{kg/m}^3$, μήκος ινών 6-8mm και πυκνότητα $0,87\text{g/cm}^3$. Η οριζόντια διάσταση της κάθε φωτογραφίας είναι 40mm.



Σχήμα 4.4: Εικόνα στερεοσκοπίου για τη σύνθεση AC11, όπου φαίνεται οι ίνες πολυπροπυλενίου και η διασπορά τους εντός της κυψελώδους δομής του δοκιμίου.

4.3 Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων

4.3.1 Φυσικές ιδιότητες δοκιμίων

4.3.1.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε από τον τύπο $D=m/V$, όπου D είναι η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου, m είναι η μάζα του και V ο όγκος του. Η μάζα του κάθε δοκιμίου μετρήθηκε σε ζυγαριά ακριβείας, ενώ ο όγκος του υπολογίστηκε από τις διαστάσεις του (μήκος, πλάτος, ύψος) που μετρήθηκαν με τη βοήθεια του παχύμετρου (EN 99).

4.3.1.2 Υδατοαπορρόφηση

Η υδατοαπορρόφηση είναι η ικανότητα που έχει ένα σώμα να απορροφά νερό και είναι σημαντική γιατί έχει ευρεία εφαρμογή κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα. Στην προκειμένη περίπτωση, κομμάτια δοκιμίων από όλες τις συνθέσεις, τοποθετήθηκαν σε δοχείο με απεσταγμένο νερό για 24 ώρες. Στη συνέχεια, τα δοκίμια σκουπίστηκαν και ζυγίστηκαν. Έπειτα, τοποθετήθηκαν για 24 ώρες σε φούρνο στους 105°C και τέλος, τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα για να κρυσώσουν και μετρήθηκε ξανά το βάρος τους (EN 99).

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$[(W_{\text{νερ.}} - W_{\text{ξηρ.}}) / W_{\text{νερ.}}] * 100 \quad (4.1)$$

Όπου, $W_{\text{νερ.}}$ το βάρος των δοκιμίων μετά από 24 ώρες μέσα στο νερό και $W_{\text{ξηρ.}}$ το βάρος του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση.

4.3.1.3 Λόγος νερό/τσιμέντο

Ο λόγος νερό/τσιμέντο (W/C) σχετίζεται με τη διόγκωση του μίγματος και συνεπώς και με την πυκνότητα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντου οδηγεί σε μη επαρκή διόγκωση, ενώ η υψηλή αναλογία νερού/τσιμέντου οδηγεί σε κατάρρευση της κυψελωτής δομής, γι' αυτό το λόγο είναι μία μεταβλητή μεγάλης σημασίας και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια της παρασκευής των μιγμάτων (Ramamurthy and Narayanan, 2000).

4.3.2 Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων

4.3.2.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Μετά το πέρας των 28 ημερών, έγινε η μέτρηση των διαστάσεων (ύψος, μήκος, πλάτος) και του βάρους κάθε δοκιμίου και μετρήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σύμφωνα με το Πρότυπο EN 196-1. Για κάθε σύνθεση έγινε θραύση τριών δοκιμίων και υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντοχής τους. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή τύπου C 123N της Matest (Σχήμα 4.4) με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0,5 – 1,0 MPa/s. Η συσκευή περιλαμβάνει παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο και 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 (Σχήμα 4.4). 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:

$$C_s = F_{\text{max}} / A \quad (4.2)$$

όπου F_{\max} το μέγιστο φορτίο (δύναμη) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και A η επιφάνεια της πλάκας φόρτισης ($40 \times 40 \text{ mm}^2$).

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη των πρισματικών δοκιμίων έχει ακρίβεια $\pm 1\%$ του καταγραφόμενου φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 7500-1 και ρυθμό φόρτισης $2400 \pm 200 \text{ N/s}$. Το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή και αυξάνεται γραμμικά το επιβαλλόμενο φορτίο με ρυθμό φόρτισης $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ μέχρι να γίνει η θραύση του δοκιμίου.

4.3.2.2 Αντοχή σε κάμψη (κάμψη τριών σημείων)

Η συσκευή που χρησιμοποιείται εφαρμόζει φορτία 10 kN με ακρίβεια $\pm 1\%$ του καταγραφόμενου φορτίου με ρυθμό φόρτισης $50 \pm 10 \text{ N/s}$. Το κελί φόρτισης που χρησιμοποιείται έχει δύο χαλύβδινους κυλίνδρους διαμέτρου $10 \pm 0,5 \text{ mm}$ για την έδραση του πρισματικού δοκιμίου. Η μεταξύ τους απόσταση είναι $100 \pm 0,5 \text{ mm}$ ενώ ένας τρίτος χαλύβδινος κύλινδρος ίδιας διαμέτρου, που είναι τοποθετημένος στο μέσο της απόστασης των άλλων δύο, εφαρμόζει το φορτίο (δοκιμή κάμψης τριών σημείων). Τοποθετούμε το πρισματικό δοκίμιο στη συσκευή και εφαρμόζουμε κατακόρυφο φορτίο αυξάνοντάς το γραμμικά με ρυθμό $50 \pm 10 \text{ N/s}$ μέχρι τη θραύση (EN 196-1).

Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_s = (1,5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (4.4)$$

Όπου,

F_s : η αντοχή σε κάμψη, σε MPa

b : η πλευρά της τετραγωνικής διατομής του πρίσματος, σε mm

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

l : η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων, σε mm

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη μια σύνθεσης χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια και υπολογίζεται η μέση τιμή.



Σχήμα 4.5: Μηχανή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη

Κεφάλαιο 5-Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού και αποτελέσματα μετρήσεων πειραματικών ιδιοτήτων

5.1 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι αναλογίες των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων των σκληρυμένων δοκιμίων μετά την ωρίμανση. Για κάθε σύνθεση, παρουσιάζεται αναλυτικά ποια υλικά και σε τι ποσοστά χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθεί. Όλες οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν περιείχαν τσιμέντο, υδράσβεστο, παιπάλη και σκόνη αλουμινίου σε διαφορετικά ποσοστά. Τα ποσοστά αυτά υπολογίστηκαν σε στερεή μορφή, πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ανάμειξης, άρα μετρήθηκαν κατά βάρος στερεών. Ο υπερρευστοποιητής προστέθηκε σε μία συγκεκριμένη ποσότητα (0,35% κ.β.στ.) (δηλαδή στα 100g στερεού μίγματος των υλικών, τα 0,35g ήταν ο υπερρευστοποιητής, με τον ίδιο τρόπο ζυγίστηκαν όλα τα υλικά που προστέθηκαν στο μίγμα). Στη συνέχεια, στις δύο πρώτες στήλες του πίνακα φαίνεται ποιές συνθέσεις περιείχαν ίνες, σε τι ποσοστά και αν χρησιμοποιήθηκαν οι μικρές ή οι μεγάλες ίνες. Έπειτα, ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στον πίνακα για βοηθητικούς-επεξηγηματικούς σκοπούς. Τέλος, φαίνονται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αντοχών σε θλίψη και κάμψη, της πυκνότητας, του λόγου νερό/τσιμέντο και της υδατοαπορρόφησης για κάθε σύνθεση.

Πίνακας 5.1: Συνθέσεις δοκιμών και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

Κωδικός σύνθεσης	Περιεκτικό- τητα σε ίνες (kg/m ³)	Μήκος ινών (mm)	Υδράσβεστος %κ.β.στ.	Τσιμέντο %κ.β.στ.	Παιπάλη %κ.β.στ.	Τσιμέντο/ παιπάλη	Σκόνη ΑΙ %κ.β.στ.	Νερό/ Τσιμέντο	Πυκνότητα (g/cm ³)	Αντοχή σε θλίψη MPa	Αντοχή σε κάμψη MPa	Υδατοαπορ- ροφητικότητα %
AC1	0,9	6-8	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,71	0,80	6,34	2,72	30,26
AC2	0,9	6-8	18,5	24,6	55,9	0,44	1	1,00	0,87	5,18	2,59	29,23
AC3	0,9	6-8	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,17	0,80	3,39	1,57	33,12
AC4	1,35	6-8	18,5	24,6	55,9	0,44	1	1,00	0,79	4,00	1,67	33,18
AC5	1,35	6-8	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,67	0,87	7,46	1,96	27,71
AC6	1,35	6-8	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,16	0,81	3,65	1,42	37,14
AC7	1,8	6-8	18,5	24,6	55,9	0,44	1	0,98	0,80	4,12	2,17	32,34
AC8	1,8	6-8	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,74	0,77	4,94	2,29	32,51
AC9	1,8	6-8	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,11	0,81	3,11	1,87	31,51
AC10	0,9	2,2	18,5	24,6	55,9	0,44	1	0,89	0,85	4,87	2,6	29,00
AC11	0,9	2,2	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,70	0,79	5,89	2,55	32,53
AC12	0,9	2,2	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,09	0,84	3,69	2,23	31,20
AC13	1,35	2,2	18,5	24,6	55,9	0,44	1	0,98	0,78	4,18	1,95	32,86
AC14	1,35	2,2	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,69	0,80	6,23	2,93	31,99
AC15	1,35	2,2	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,13	0,82	3,98	2,11	31,92
AC16	1,8	2,2	18,5	24,6	55,9	0,44	1	0,94	0,83	5,28	2,19	31,86
AC17	1,8	2,2	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,72	0,81	6,38	2,74	31,27
AC18	1,8	2,2	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,11	0,86	4,33	1,65	29,06
AC19	–	–	18,5	24,6	55,9	0,44	1	0,92	0,85	5,48	2,27	29,75
AC20	–	–	16,5	32,9	49,4	0,67	1,2	0,71	0,78	5,74	2,34	32,87
AC21	–	–	21,5	21,5	55,8	0,39	1,3	1,09	0,92	5,33	1,83	29,69

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων όσον αφορά τις συνθέσεις με ίνες και χωρίς ίνες. Σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι να διερευνηθεί αν τα δοκίμια με ίνες είχαν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αυτά χωρίς τις ίνες. Για τη σύγκριση αυτή επιλέχθηκε ο λόγος $F_s/\text{Density}$, διότι η αντοχή σε κάμψη F_s είναι αυτή που αναμένεται να έχει την πιο αξιοσημείωτη βελτίωση στο σύνολο των άλλων ιδιοτήτων, καθώς είναι αυτή που επηρεάζεται περισσότερο μετά την προσθήκη ινών. Η πυκνότητα (Density) λαμβάνεται υπόψη γιατί η σύγκριση γίνεται μεταξύ υλικών που έχουν διαφορετικές πυκνότητες. Επίσης, όλες οι συνθέσεις που συγκρίθηκαν είχαν ποσοστό σε ίνες το προτεινόμενο του κατασκευαστή, δηλαδή $0,9\text{kg/m}^3$. Υπολογίστηκε ο λόγος $F_s/\text{Density}$ για τις 3 συνθέσεις χωρίς ίνες και συγκρίθηκε με τον αντίστοιχο λόγο για τις αντίστοιχες συνθέσεις με μικρές και με μεγάλες ίνες. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2 φαίνεται ότι οι συνθέσεις με ίνες (μικρές ή μεγάλες, ανεξαρτήτου μεγέθους) παρουσίασαν αύξηση στο λόγο $F_s/\text{Density}$, σε σχέση με τις αντίστοιχες χωρίς ίνες.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση του λόγου $F_s/\text{Density}$ ινοπλισμένων και άοπλων δοκιμίων αντίστοιχων συνθέσεων. Η περιεκτικότητα % σε ίνες είναι η προτεινόμενη από τον κατασκευαστή των ινών.

Κωδικοί αντίστοιχων συνθέσεων	Περιεκτικότητα και μήκος ινών	Λόγος $F_s/\text{Density}$, $\text{MPa}/(\text{t/m}^3)$
AC19	Σύνθεση χωρίς ίνες	2,67
AC10	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 2,2mm	3,05
AC2	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 6-8mm	2,97
AC20	Σύνθεση χωρίς ίνες	3,00
AC11	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 2,2mm	3,22
AC1	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 6-8mm	3,40
AC21	Σύνθεση χωρίς ίνες	1,98
AC12	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 2,2mm	2,65
AC3	0,9% kg/m^3 με μήκος ινών 6-8mm	1,96

Πίνακας 5.3: Σύγκριση μέσων τιμών των λόγων $F_s/\text{Density}$, νερό/τσιμέντο και πυκνότητας για τις ινοπλισμένες και μη συνθέσεις.

	$F_s/\text{Density}$, MPa/(t/m ³)	Νερό/τσιμέντο	Πυκνότητα
Συνθέσεις χωρίς ίνες	2,55	0,90	0,85 g/cm ³
Συνθέσεις με μικρές ίνες	2,97	0,89	0,82 g/cm ³
Συνθέσεις με μεγάλες ίνες	2,77	0,96	0,82 g/cm ³

Η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε κάμψη και η πυκνότητα των προϊόντων κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας - Autoclaved Aerated Concrete (AAC) της αγοράς κυμαίνονται από 2-5 MPa, 1,2-1,6 MPa και 0,5-0,7 g/cm³, αντίστοιχα. Έτσι, ο λόγος $F_s/\text{Density}$ για τα δοκίμια του εμπορίου είναι ίσος με 2,33 MPa/(t/m³). Από τον πίνακα 5.3 φαίνεται ότι για όλες τις συνθέσεις δοκιμών που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ο λόγος $F_s/\text{Density}$ είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίστηκε για τα προϊόντα κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας - Autoclaved Aerated Concrete (AAC) του εμπορίου. Αντίστοιχα, για τα δοκίμια του εμπορίου ο λόγος $C_s/\text{Density}$ υπολογίστηκε σε 6,67 MPa/(t/m³), ενώ για τα δοκίμια με ίνες που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ο λόγος $C_s/\text{Density}$ ήταν 5,96 MPa/(t/m³).

5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων παραγοντικού σχεδιασμού

5.2.1 Αντοχή σε θλίψη (C_s)

Οι επιδράσεις των παραγόντων υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία ανάλυσης πειραματικών σχεδίων. Για παράδειγμα, η επίδραση του παράγοντα A (Composition), δηλαδή η σύνθεση, στην αντοχή σε θλίψη (C_s), υπολογίζεται ως η διαφορά των μέσων τιμών της αντοχής σε θλίψη C_s στο υψηλό και στο χαμηλό επίπεδο του παράγοντα A (Composition). Αναλυτικότερα, ανατρέχοντας στον πίνακα 5.1, αναζητούνται οι συνθέσεις που έχουν τον παράγοντα A (Composition) στο υψηλό του επίπεδο. Αυτές είναι οι AC1, AC5, AC8, AC11, AC14 και AC17. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος της αντοχής σε θλίψη (C_s) για αυτές τις συνθέσεις, που προκύπτει ότι είναι 6,21 MPa. Μετά υπολογίζεται ο μέσος όρος των

συνθέσεων που έχουν τον παράγοντα A (Composition) στο χαμηλό τους επίπεδο. Αυτές είναι οι AC3, AC6, AC9, AC12, AC15 και η AC18, που προκύπτει ότι είναι 3,69 MPa. Η διαφορά λοιπόν αυτών των δύο τιμών είναι η κύρια επίδραση του παράγοντα A (Composition) στην αντοχή σε θλίψη (Cs), η οποία είναι $6,21-3,69=2,52$. Στη συνέχεια η κύρια επίδραση διαιρείται με το εκάστοτε εργαστηριακό σφάλμα που στην περίπτωση της αντοχής σε θλίψη (Cs), υπολογίστηκε στο 0,5. Η τιμή που προκύπτει από αυτή την πράξη $2,52/0,5=5,04$ είναι η κανονικοποιημένη τιμή. Οι κανονικοποιημένες τιμές χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν τα διαγράμματα Pareto που αναλύονται παρακάτω.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο υπολογίζονται όλες οι επιδράσεις για κάθε έναν από τους παράγοντες και στη συνέχεια αναλύονται για κάθε μεταβλητή που εξετάστηκε ξεχωριστά. Η ανάλυση αυτή έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Statgraphics και περιγράφεται παρακάτω.

Τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για κάθε μεταβλητή από τα πειραματικά δεδομένα είναι:

Για την αντοχή σε θλίψη (Cs): 0,5

Για την πυκνότητα (Density): 0,02

Για την αντοχή σε κάμψη (Fs): 0,5

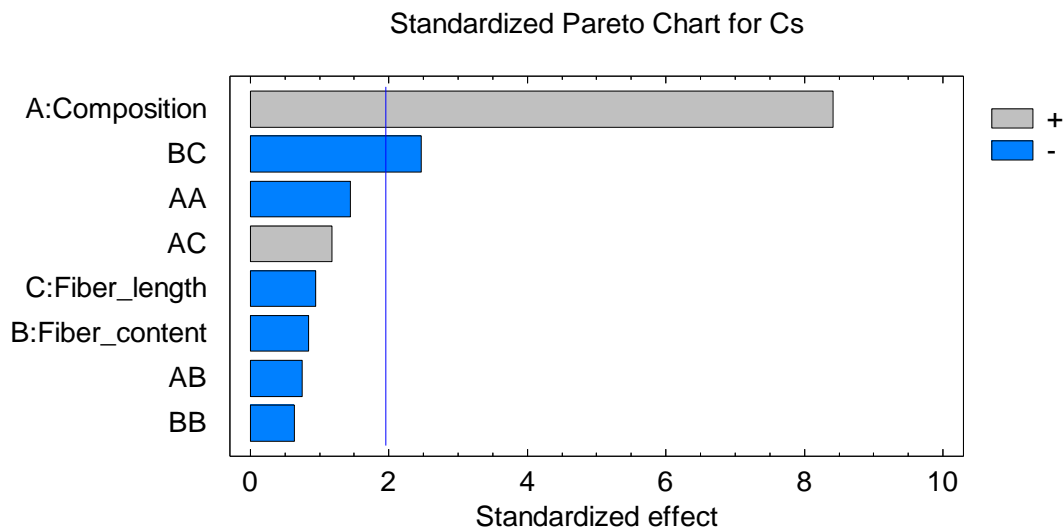
Για το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C): 0,02

Για την υδατοαπορρόφηση (Wa): 1

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Η αλληλεπίδραση AB, των παραγόντων A (Composition) και B (fiber_content) υπολογίζεται ως εξής: Επιλέγεται ως σημείο αναφοράς το υψηλό επίπεδο του παράγοντα B (fiber_content) και υπολογίζεται η διαφορά των μέσων όρων των τιμών της αντοχής σε θλίψη (Cs) στο υψηλό και στο χαμηλό επίπεδο του παράγοντα A. Δηλαδή από τον πίνακα 5.1, για τις συνθέσεις AC8 και AC17 ο μέσος όρος των τιμών τους σε αντοχή σε θλίψη για το υψηλό επίπεδο του παράγοντα A είναι 5,66 MPa. Έπειτα, για το υψηλό επίπεδο του B και το χαμηλό επίπεδο του A υπολογίζεται ο αντίστοιχος μέσος όρος της αντοχής σε θλίψη για τις συνθέσεις AC9 και AC18 σε 3,72 MPa. Στη συνέχεια αφαιρώντας αυτές τις δύο τιμές $5,66-3,72=1,94$ η τιμή που προκύπτει αντιστοιχεί στη μεταβολή του παράγοντα A από το χαμηλό στο υψηλό του επίπεδο, για τον παράγοντα B στο υψηλό του επίπεδο.

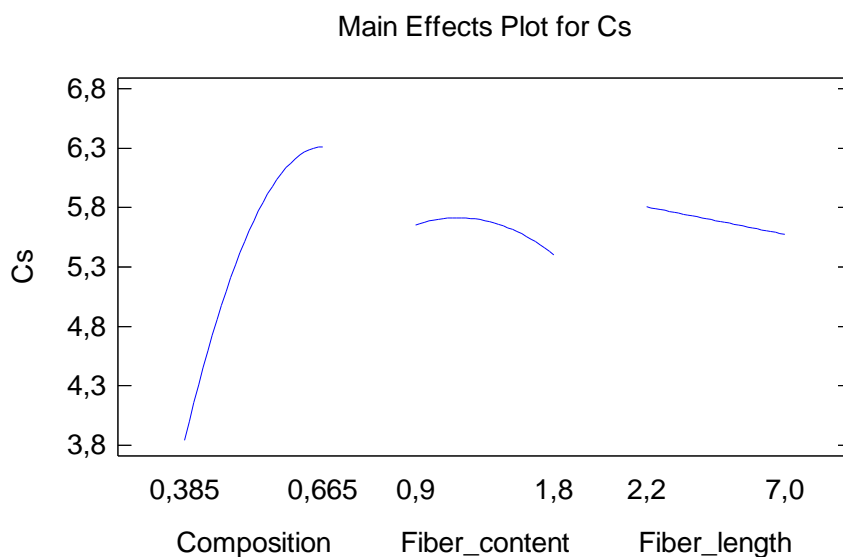
Αντίστοιχα, βρίσκουμε για τον παράγοντα B στο χαμηλό του επίπεδο, τη μεταβολή του A από το χαμηλό στο υψηλό του επίπεδο από τα δεδομένα του πίνακα 5.1: Για το υψηλό επίπεδο του A για τις συνθέσεις AC1 και AC11 ο μέσος όρος των αντοχών τους είναι 6,12. Για το χαμηλό επίπεδο του A και τις συνθέσεις AC3 και AC12 ο μέσος όρος των αντοχών τους είναι 3,54. Άρα, η μεταβολή του A από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο, για τον B παράγοντα στο χαμηλό επίπεδο είναι 2,58. Αφαιρώντας τις δύο τιμές που προέκυψαν για το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του παράγοντα B προκύπτει η τιμή της αλληλεπίδρασης AB η οποία ισούται με $1,94 - 2,58 = -0,64$. Αν η τιμή που προκύπτει είναι μηδενική δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων. Αν προκύπτει θετική τιμή υπάρχει θετική αλληλεπίδραση, ενώ αν προκύπτει αρνητική τιμή τότε υπάρχει αρνητική αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων. Θετική επίδραση, υπάρχει όταν ο παράγοντας ή η αλληλεπίδραση, αυξάνεται ή μειώνεται και την ίδια συμπεριφορά έχει και η μεταβλητή που εξετάζεται. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν παρατηρείται αρνητική επίδραση, τα μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα, και όσο αυξάνεται το ένα, μειώνεται το άλλο. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων για κάθε μεταβλητή. Οι αλληλεπιδράσεις 2^{ου} βαθμού πχ. AA, BB, CC υπολογίζονται με πιο σύνθετο τρόπο, μέσω του προγράμματος Statgraphics. Στατιστικά σημαντικές θεωρούνται οι κανονικοποιημένες τιμές που οι απόλυτες τιμές τους υπερβαίνουν την τιμή 1.96 (το όριο της μπλε γραμμής στο διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην εκάστοτε μεταβλητή). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο επίπεδο βεβαιότητας 95%, που επιλέχθηκε ως ικανοποιητικό για τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα Pareto, στο Σχήμα 5.1 στατιστικά σημαντικές είναι η επίδραση A και η επίδραση BC. Ο παράγοντας A (composition) που είναι ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη έχει θετική επίδραση στη μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (μεταβλητή Cs), ενώ η επίδραση BC έχει αρνητική. Ακολουθούν οι επιδράσεις AA, AC, ο παράγοντας C (fiber_length), ο παράγοντας B (fiber_content), και τέλος οι επιδράσεις AB και BB με φθίνουσα σειρά και χωρίς στατιστικά σημαντική επίδραση.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε θλίψη (Cs).

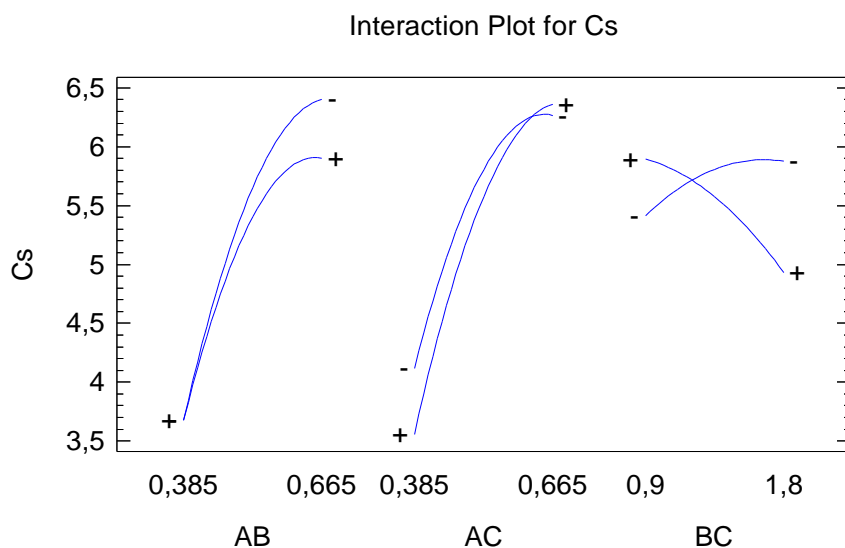
Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2 η μεταβολή της Cs ως συνάρτηση των παραγόντων A, B και C. Σε αυτού του είδους τα διαγράμματα μπορούμε να διακρίνουμε τη μορφή της επίδρασης του κάθε παράγοντα στην Cs (γραμμική ή μη). Παρατηρούμε ότι ο παράγοντας A (composition), δηλαδή η αναλογία τσιμέντο/παιπάλη, επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και η επίδραση της είναι σχεδόν γραμμική. Η μη γραμμική συμπεριφορά έχει μικρή σχετικά συνεισφορά στη συνολική μεταβολή και αυτό αντικατοπτρίζεται και στις μικρές τιμές της επίδρασης του όρου AA (Σχήμα 5.1). Η επίδραση του παράγοντα B (fiber_content, ποσοστό ινών) είναι μη γραμμικής μορφής και δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή, καθώς επιφέρει μικρή μεταβολή της. Τέλος, ο παράγοντας C (fiber_length, μήκος ινών), έχει γραμμική συμπεριφορά και επηρεάζει ελάχιστα την αντοχή σε θλίψη.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την αντοχή σε θλίψη (Cs)

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη Cs, συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο δεύτερος παράγοντας (πχ. ο B στην αλληλεπίδραση του AB), εμφανίζεται με μια γραμμή για το υψηλό επίπεδο και μια άλλη για το χαμηλό επίπεδο, ενώ η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται κατά τον άξονα των τετμημένων.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση AB, δεν παρατηρούνται σημαντικές αλληλεπιδράσεις, αφού οι μεταβολές του B, ακολουθούν την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του A από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο (όταν οι γραμμές είναι παράλληλες, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων). Στην περίπτωση του AC φαίνεται να υπάρχει μικρή αλληλεπίδραση, ενώ η αλληλεπίδραση BC εμφανίζεται ισχυρή, αφού οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του C και στις δύο περιπτώσεις τέμνονται. Αν αυξηθούν παράλληλα και οι δύο παράγοντες B (fiber_content, ποσοστό ινών) και C (fiber_length, μήκος ινών) μειώνεται η εργασιμότητα του μίγματος και αυξάνεται η απαίτησή του σε νερό γεγονός που μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την αντοχή σε θλίψη (C_s)

Για τη συσχέτιση της C_s με τους παράγοντες A, B και C χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική παλινδρόμηση. Η εξίσωση 2^{ου} βαθμού που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος Statgraphics που συσχετίζει την αντοχή σε θλίψη C_s με τις παραμέτρους σχεδιασμού A, B, C και με συντελεστή συσχέτισης $R=0,93$ είναι η ακόλουθη:

$$C_s = -10,7291 + 42,2116xA + 4,43612xB + 0,140351xC - 31,3837xA^2 - 1,97589xAxB + 0,489873xAxC - 0,799202xB^2 - 0,330247xBxC$$

Όπου A: Composition=Λόγος τσιμέντο/παιπάλη

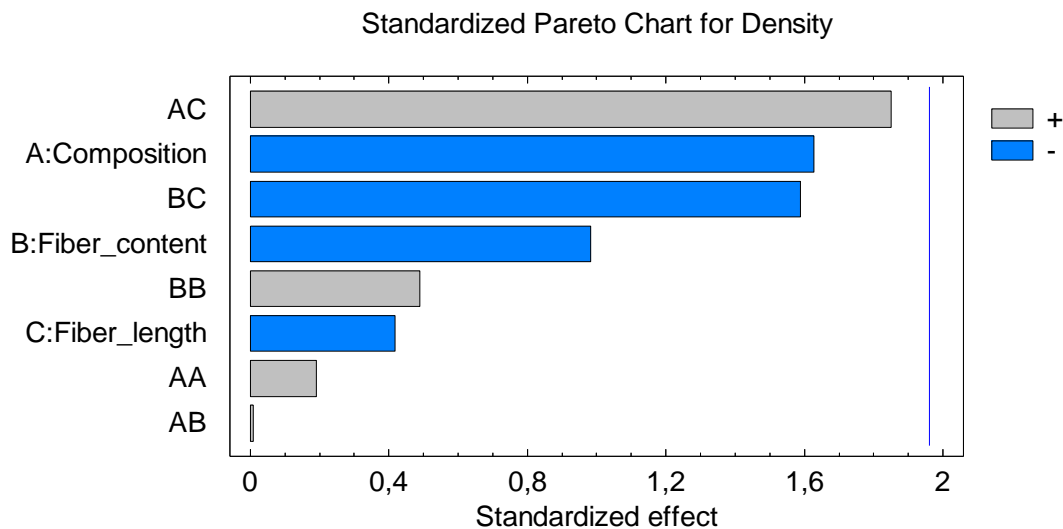
B: Fiber_content=Περιεχόμενο σε ίνες (% κ.β.στ.)

C: Fiber_length=Μήκος ινών (mm)

5.2.2 Πυκνότητα (Density)

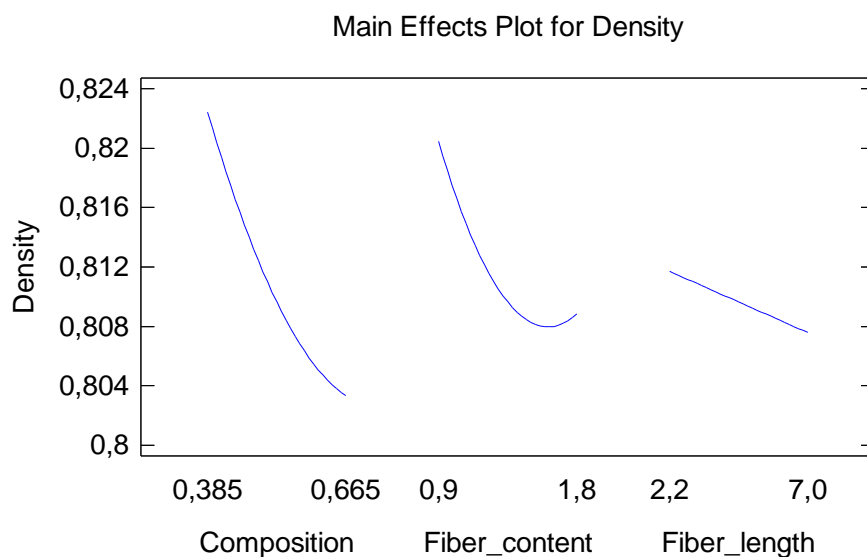
Στη συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο αναλύεται η μεταβλητή της πυκνότητας. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.4, εμφανίζονται με φθίνουσα σειρά, η αλληλεπίδραση AC, ο παράγοντας A

(composition), η αλληλεπίδραση BC, ο παράγοντας B (fiber_content), η επίδραση BB, ο παράγοντας C (fiber_length) και οι επιδράσεις AA, AB, όμως κανένας παράγοντας ή αλληλεπίδραση δεν επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα.



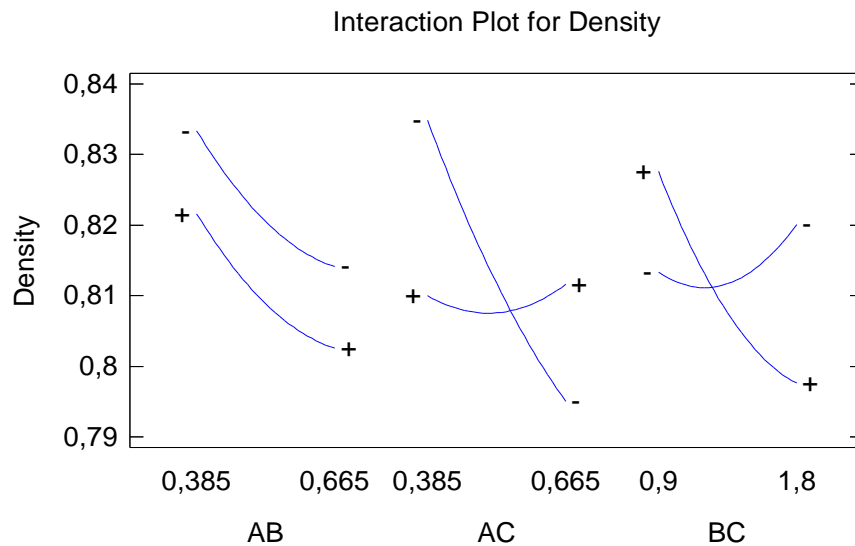
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην πυκνότητα (Density).

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η μεταβολή της πυκνότητας ως συνάρτηση των παραγόντων A, B και C. Παρατηρούμε ότι ο παράγοντας A (composition), δηλαδή η αναλογία τσιμέντο/παιπάλη επηρεάζει αρνητικά την πυκνότητα και εμφανίζει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και ο παράγοντας B (fiber_content), επηρεάζοντας αρνητικά την πυκνότητα. Για υψηλότερες τιμές του B η συμπεριφορά του είναι μη γραμμική. Ο παράγοντας C (fiber_length) έχει γραμμική συμπεριφορά αλλά επηρεάζει ελάχιστα (αρνητικά) την πυκνότητα.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την πυκνότητα (Density).

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας, συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων A,B,C. Παρατηρούμε από το Σχήμα 9 ότι οι παράγοντες A, B δεν αλληλεπιδρούν, αφού οι μεταβολές του B, ακολουθούν την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του A από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο. Αντίθετα οι παράγοντες A,C και B,C εμφανίζουν αλληλεπιδράσεις, αφού οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του C τέμνονται μεταξύ τους.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα αλληλοεπιδράσεων για την πυκνότητα (Density).

Για τη συσχέτιση της πυκνότητας (Density) με τους παράγοντες A , B και C χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική παλινδρόμηση. Η εξίσωση 2^{ου} βαθμού που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος Statgraphics που συσχετίζει την πυκνότητα (Density) με τις παραμέτρους σχεδιασμού A, B, C και με συντελεστή συσχέτισης R=0,52 είναι η ακόλουθη:

$$\text{Density} = 0,980284 - 0,385569x_A - 0,0412885x_B - 0,00560857x_C + 0,165764x_A^2 + 0,000841432x_Ax_B + 0,0308707x_Ax_C + 0,0247966x_B^2 - 0,00848765x_Bx_C$$

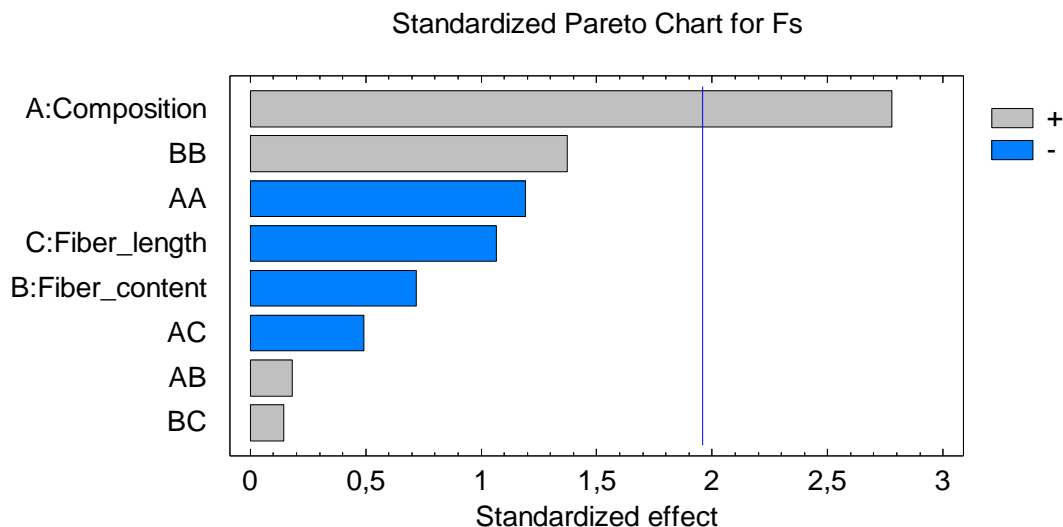
Όπου A: Composition=Λόγος τσιμέντο/παιπάλη

B: Fiber_content=Περιεχόμενο σε ίνες (% κ.β.στ.)

C: Fiber_length=Μήκος ινών (mm)

5.2.3 Αντοχή σε κάμψη (Fs)

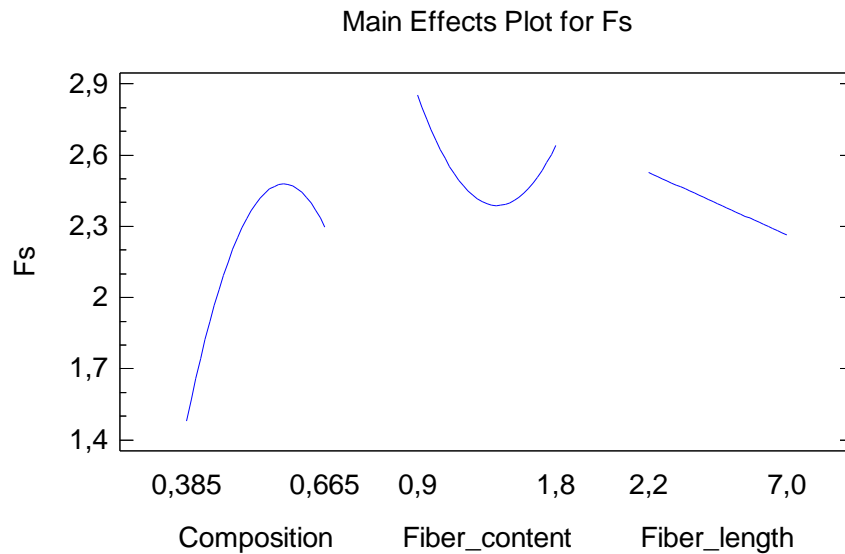
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.7 για τις κανονικοποιημένες τιμές για τη μεταβλητή της Fs, τη μεγαλύτερη θετική επίδραση έχει ο παράγοντας A (composition), καθώς είναι και ο μόνος στατιστικά σημαντικός, αφού είναι ο μόνος που ξεπερνάει το όριο της μπλε γραμμής. Στη συνέχεια ακολουθούν με φθίνουσα σειρά, αλλά χωρίς στατιστική σημασία οι επιδράσεις BB, AA, οι παράγοντες B (fiber_content) και C (fiber_length), καθώς και οι επιδράσεις AC, AB και BC.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε κάμψη (Fs).

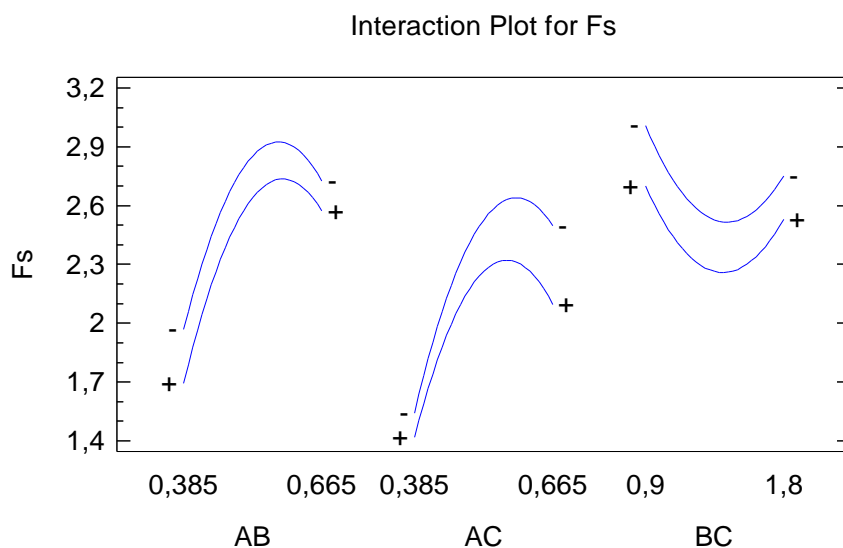
Στο Σχήμα 5.8 παρατηρούμε ότι ο παράγοντας A (composition) επηρεάζει θετικά την αντοχή σε κάμψη και η συμπεριφορά του είναι σχεδόν γραμμική. Αντιθέτως, ο παράγοντας B (fiber_content), μειώνεται μη γραμμικά μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια υπάρχει μια μικρή

αύξηση. Ο παράγοντας C (fiber_length), δηλαδή το μήκος των ινών, είναι γραμμικής μορφής και επηρεάζει ελάχιστα αρνητικά την αντοχή σε κάμψη.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την αντοχή σε κάμψη (Fs).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής της αντοχής σε κάμψη, συναρτήσει των παραγόντων A, B και C. Παρατηρούμε στο Σχήμα 5.9 ότι σε όλες τις περιπτώσεις AB, AC, BC, δεν παρατηρούνται αλληλεπιδράσεις, αφού οι μεταβολές του B και του C αντιστοίχως, ακολουθούν την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του A και του C αντίστοιχα, από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την αντοχή σε κάμψη (F_s).

Για τη συσχέτιση της αντοχής σε κάμψη F_s με τους παράγοντες A, B και C χρησιμοποιήθηκε η πολυωνμική παλινδρόμηση. Η εξίσωση 2^{ου} βαθμού που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος Statgraphics που συσχετίζει την αντοχή σε κάμψη F_s με τις παραμέτρους σχεδιασμού A, B, C και με συντελεστή συσχέτισης $R=0,90$ είναι η ακόλουθη:

$$F_s = -2,5707 + 30,3897xA - 5,2646xB + 0,0270431xC - 25,8761xA^2 + 0,478354xAxB - 0,20567xAxC + 1,7364xB^2 + 0,0192901xBxC$$

Όπου A: Composition=Λόγος τσιμέντο/παιπάλη

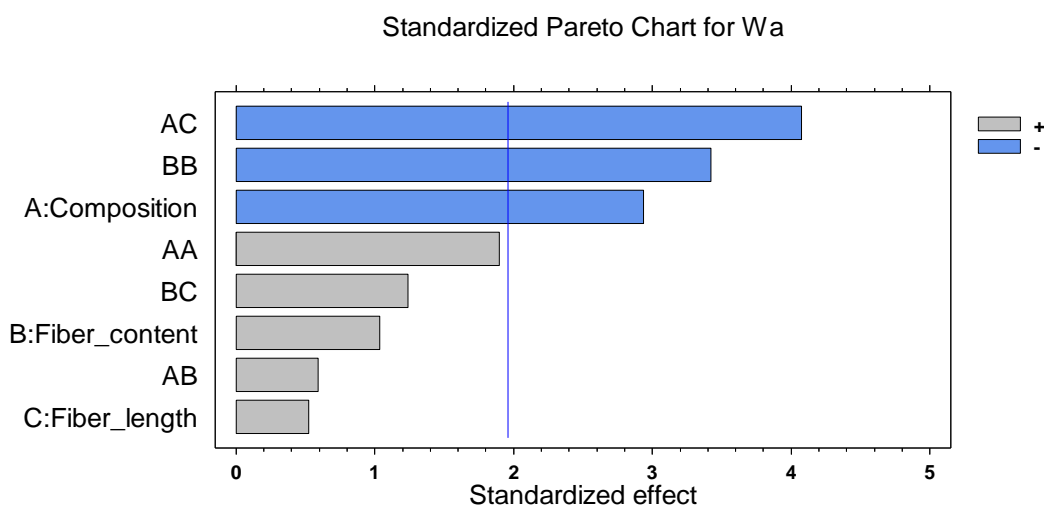
B: Fiber_content=Περιεχόμενο σε ίνες (% κ.β.στ.)

C: Fiber_length=Μήκος ινών (mm)

5.2.4 Υδατοαπορρόφηση (W_a)

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.10 για την υδατοαπορρόφηση, τις μεγαλύτερες επιδράσεις (αρνητικές), τις έχουν οι επιδράσεις AC, BB και ο παράγοντας A (composition), καθώς είναι τα

μόνα στατιστικά σημαντικά, αφού ξεπερνούν το όριο της μπλε γραμμής. Στη συνέχεια ακολουθούν με φθίνουσα σειρά, αλλά χωρίς στατιστική σημασία οι επιδράσεις AA, BC, ο παράγοντας B (fiber_content), η επίδραση AB και ο παράγοντας C (fiber_length).



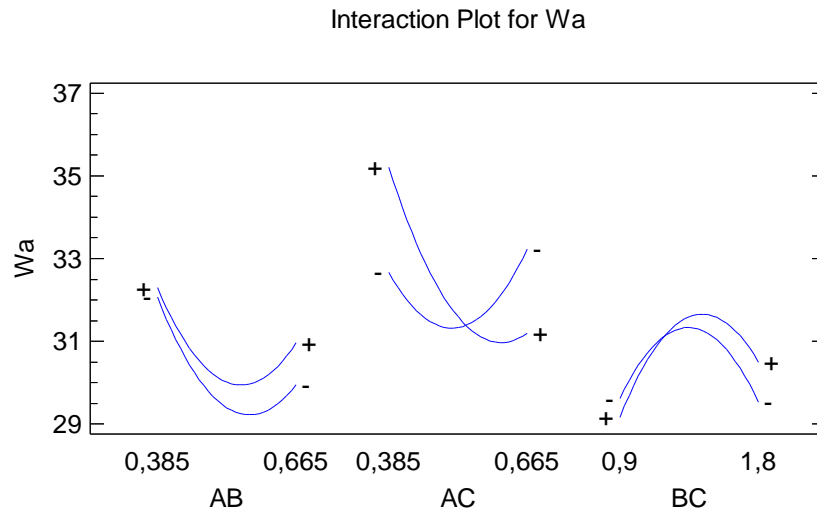
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην υδατοαπορρόφηση (Wa).

Στο Σχήμα 5.11 παρατηρούμε ότι ο παράγοντας A (composition), δηλαδή η αναλογία τσιμέντο/παιπάλη επηρεάζει αρνητικά την υδατοαπορρόφηση και μειώνεται μη γραμμικά με αυτήν μέχρι ένα σημείο, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται. Αντιθέτως, ο παράγοντας B (fiber_content), αυξάνεται μη γραμμικά μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια υπάρχει μία μικρή μείωση. Ο παράγοντας C (fiber_length), δηλαδή το μήκος των ινών, είναι γραμμικής μορφής και επηρεάζει ελάχιστα θετικά την υδατοαπορρόφηση.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για την υδατοαπορρόφηση (Wa).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η υδατοαπορρόφηση, συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων A, B και C. Παρατηρούμε από το Σχήμα 5.12 ότι στην περίπτωση AB δεν παρατηρούνται αλληλεπιδράσεις, αφού οι μεταβολές του B ακολουθούν την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του A από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις AC και BC παρατηρείται αλληλεπίδραση, αφού οι γραμμές τέμνονται.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για την υδατοαπορρόφηση (Wa).

Για τη συσχέτιση της υδατοαπορρόφησης (Wa) με τους παράγοντες A, B και C χρησιμοποιήθηκε η πολυωνμική παλινδρόμηση. Η εξίσωση 2^{ου} βαθμού που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος Statgraphics που συσχετίζει την υδατοαπορρόφηση (Wa) με τις παραμέτρους σχεδιασμού A, B, C και με συντελεστή συσχέτισης R=0,72 είναι η ακόλουθη:

$$Wa = 36,5164 - 81,324xA + 20,9278xB + 1,39155xC + 82,4618xA^2 + 3,11877xAxB - 3,39919xAxC - 8,66852xB^2 + 0,331019xBxC$$

Όπου A: Composition=Λόγος τσιμέντο/παιπάλη

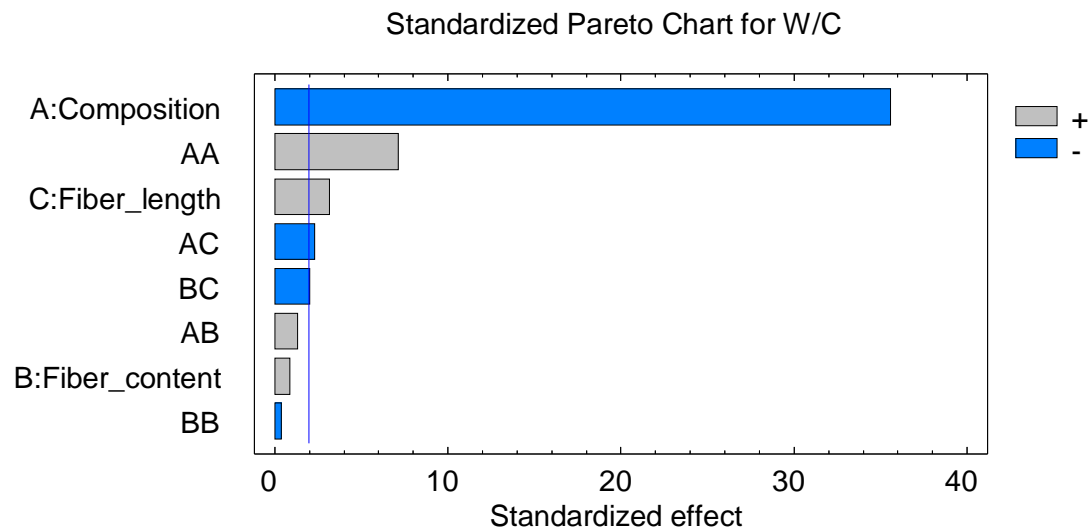
B: Fiber_content=Περιεχόμενο σε ίνες (% κ.β.στ.)

C: Fiber_length=Μήκος ινών (mm)

5.2.5 Λόγος νερό/τσιμέντο (W/C)

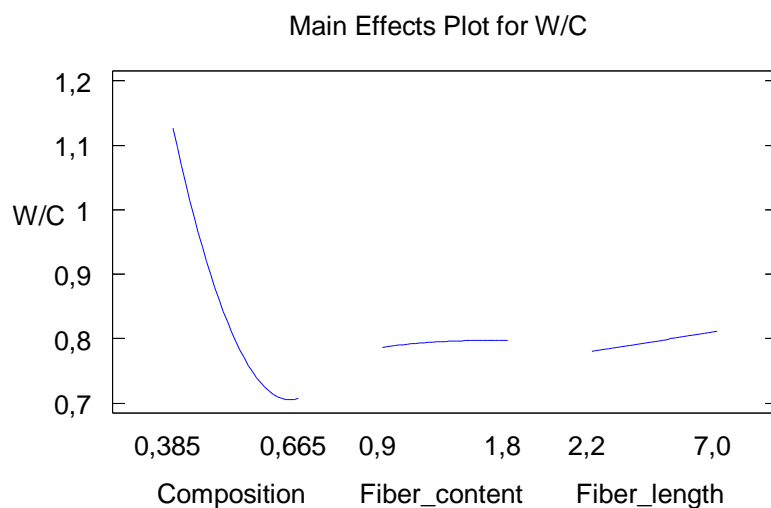
Ακολούθως, θα προσδιοριστεί με ποιο τρόπο έχει επηρεαστεί ο λόγος νερό/τσιμέντο, σε σχέση με τους παράγοντες A, B και C. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.13 για το λόγο νερό/τσιμέντο, τη μεγαλύτερη αρνητική επίδραση έχει ο παράγοντας A (composition) και

ακολουθούν η επίδραση AA, ο παράγοντας C (fiber_length), η επίδραση AC και τέλος η BC ως στατιστικά σημαντική. Τέλος, ακολουθούν η επίδραση AB, ο παράγοντας B (fiber_content) και η επίδραση BB ως μη στατιστικά σημαντική.



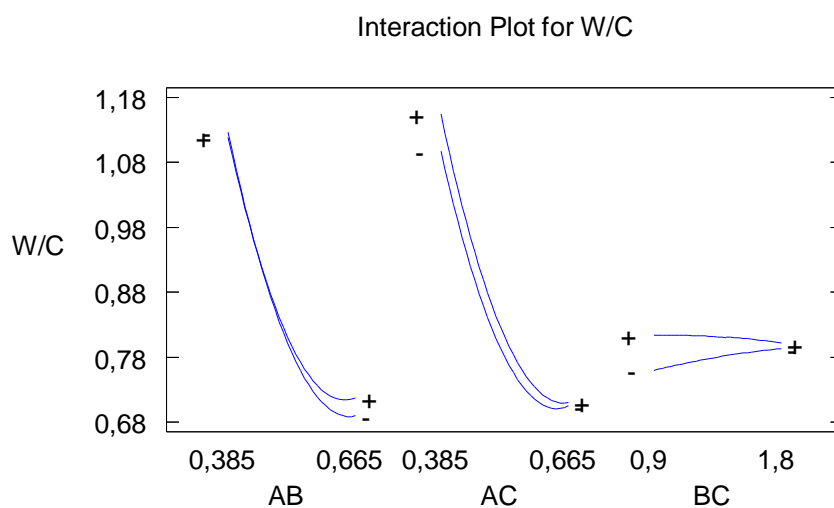
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στο λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).

Στο Σχήμα 5.14 παρατηρούμε ότι ο παράγοντας A (composition), δηλαδή η αναλογία τσιμέντο/παιπάλη, επηρεάζει αρνητικά την υδατοαπορρόφηση. Αντιθέτως, οι παράγοντες B (fiber_content) και C (fiber_length), φαίνεται να μην επηρεάζουν το λόγο νερό/τσιμέντο.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).

Τέλος, στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου νερό/τσιμέντο, συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων A, B και C. Παρατηρείται από το Σχήμα 5.15 ότι σε όλες τις περιπτώσεις δεν παρατηρούνται σημαντικές αλληλεπιδράσεις, αφού οι γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων για το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C).

Για τη συσχέτιση του λόγου νερό/τσιμέντο (W/C) με τους παράγοντες A, B και C χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική παλινδρόμηση. Η εξίσωση 2^{ον} βαθμού που προέκυψε από τα δεδομένα με τη βοήθεια του προγράμματος Statgraphics που συσχετίζει το λόγο νερό/τσιμέντο (W/C) με τις παραμέτρους σχεδιασμού A, B, C και με συντελεστή συσχέτισης R=0,98 είναι η ακόλουθη:

$$W/C = 3,14662 - 8,00583xA + 0,0381479xB + 0,0412682xC + 6,18708xA^2 + 0,14115xAxB - 0,0384776xAxC - 0,0189458xB^2 - 0,0108025xBxC$$

Όπου A: Composition=Λόγος τσιμέντο/παιπάλη

B: Fiber_content=Περιεχόμενο σε ίνες (% κ.β.στ.)

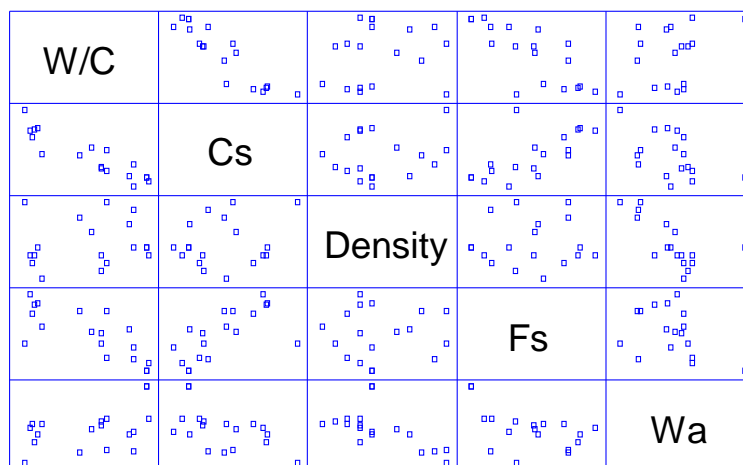
C: Fiber_length=Μήκος ινών (mm)

5.2.6 Συσχετίσεις παραμέτρων απόκρισης

Ο πίνακας 5.4 παρουσιάζει τους συντελεστές συσχέτισης Pearson των μεταβλητών απόκρισης (Cs, Fs, Density, W/C και Wa) που υπολογίστηκαν. Αυτοί οι συντελεστές συσχέτισης κυμαίνονται μεταξύ -1 και +1 και μετρούν την ισχύ της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών (Σχήμα 5.16).

Πίνακας 5.4: Συσχετίσεις μεταβλητών απόκρισης

	W/C	Cs	Density	Fs	Wa
W/C					
Cs	-0,90				
Density	0,12	0,21			
Fs	-0,76	0,67	0,03		
Wa	0,44	-0,53	-0,61	-0,50	



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα συσχέτισης των μεταβλητών απόκρισης

Στο Σχήμα 5.16 φαίνονται οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών απόκρισης, ενώ στον πίνακα 5.4 προσδιορίζονται οι ακριβείς τιμές των συντελεστών συσχέτισης. Ο λόγος νερό/τσιμέντο (W/C) φαίνεται να συσχετίζεται αρνητικά με την αντοχή σε θλίψη (Cs) και με την αντοχή σε κάμψη (Fs). Επίσης, παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη (Cs) και της αντοχής σε κάμψη (Fs). Ομοίως, η πυκνότητα (Density) με την υδατοαπορρόφηση (Wa) συσχετίζονται αρνητικά. Οι συσχετίσεις μεταξύ των υπολοίπων μεταβλητών, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 5.4 δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

Συνεπώς, για τη βελτιστοποίηση των συνθέσεων είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μόνο η αντοχή σε θλίψη (Cs) και η πυκνότητα (Density), καθώς αυτές συσχετίζονται με την αντοχή σε κάμψη (Fs) και την υδατοαπορρόφηση (Wa), αντίστοιχα.

Τα δοκίμια κυψελωτού μικροσκυροδέματος που εξετάζονται προορίζονται για χρήση ως υλικά τοιχοποιίας με βελτιωμένες ηχομονωτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες. Συνεπώς, για τη

βελτιστοποίηση των συνθέσεων είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της πυκνότητας.

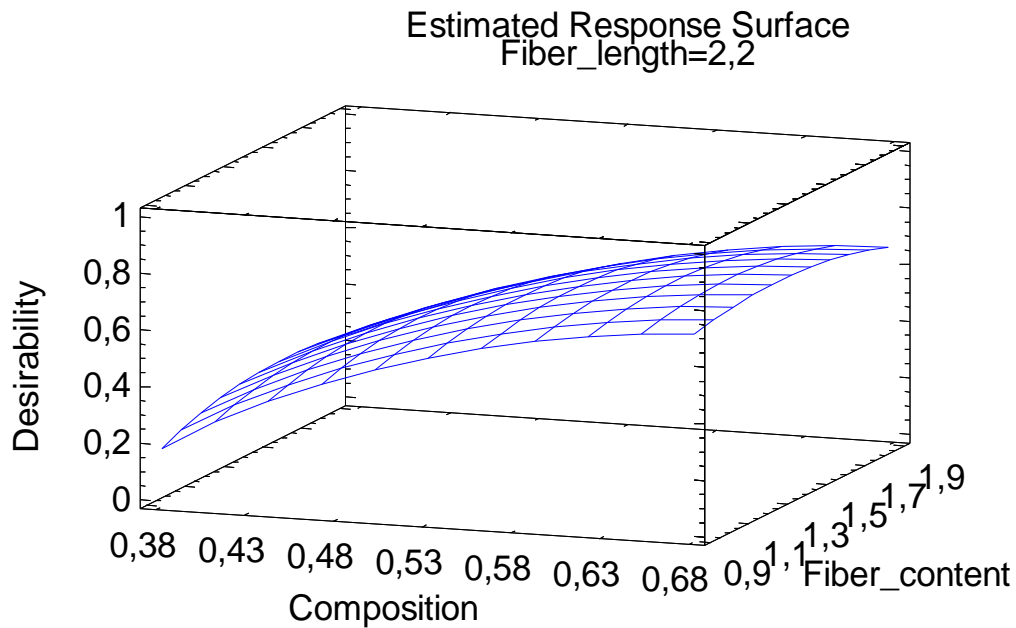
5.3 Υπολογισμός βέλτιστων συνθέσεων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται 4 σενάρια βελτιστοποίησης των συνθέσεων με χρήση των συναρτήσεων επιθυμητής τιμής (desirability functions), όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.1.2. Η χρήση των συναρτήσεων επιθυμητής τιμής κρίνεται αναγκαία αφού πραγματοποιείται βελτιστοποίηση περισσότερων της μιας μεταβλητών απόκρισης. Τα 4 σενάρια βελτιστοποίησης που εξετάστηκαν είναι:

1. Μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) και ελαχιστοποίηση της πυκνότητας (Density).
2. Μεγιστοποίηση του λόγου της αντοχής σε θλίψη/πυκνότητα (Cs/Density) και ελαχιστοποίηση της πυκνότητας (Density).
3. Επίτευξη μιας ελάχιστης αντοχής σε θλίψη ($Cs \geq 5 \text{ MPa}$) και ελαχιστοποίηση της πυκνότητας (Density).
4. Μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) με ταυτόχρονη επίτευξη μιας μέγιστης αποδεκτής τιμής πυκνότητας ($\text{Density} \leq 0,8 \text{ g/cm}^3$).

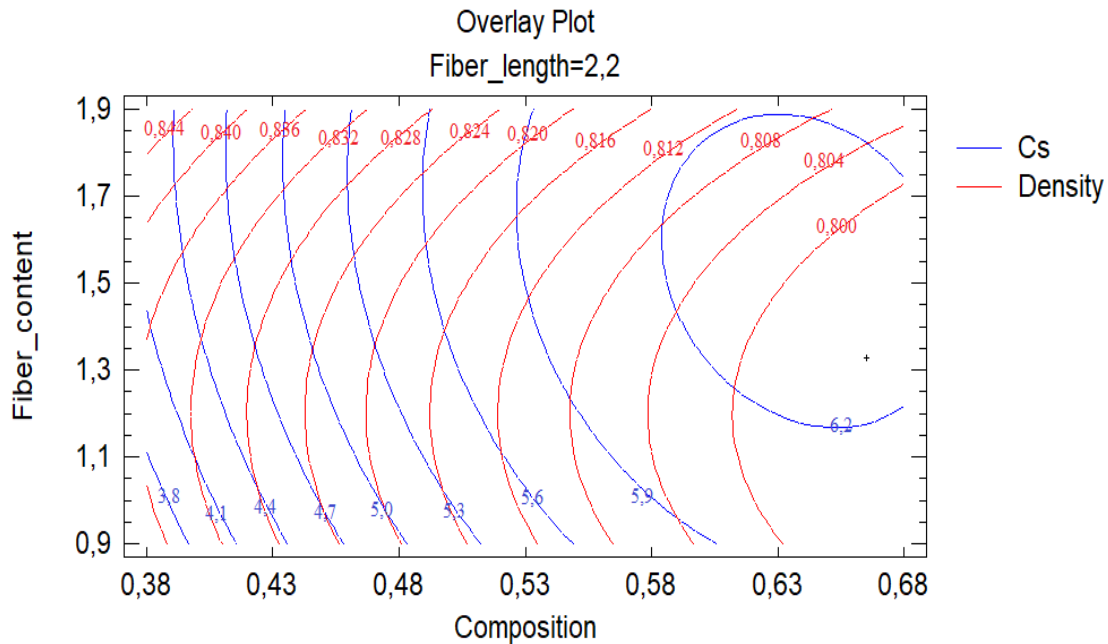
Σενάριο 1: Μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) - Ελαχιστοποίηση της πυκνότητας (Density)

Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται ότι για τη βέλτιστη συνάρτηση της επιθυμητής τιμής (πιο κοντά στο 1), δηλαδή για μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη και ταυτόχρονα ελαχιστοποίηση της πυκνότητας, ο παράγοντας A (composition) είναι στο υψηλό του επίπεδο, ο παράγοντας B παραμένει σχεδόν αμετάβλητος, ενώ το βέλτιστο μήκος ινών είναι στο χαμηλό επίπεδο. Το βέλτιστο σημείο όσον αφορά το σενάριο 1 αντιστοιχεί σε τιμές για τον παράγοντα A (Composition)=0,665, για τον παράγοντα B (Fiber_content)=1,33g/cm³ και για τον παράγοντα C (Fiber_length)=2,2mm, με τη συνάρτηση της επιθυμητής τιμής να είναι: Desirability=0,74.



Σχήμα 5.17: Βελτιστοποίηση της συνάρτησης επιθυμητής τιμής για το σενάριο 1 (Ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη Cs και ελαχιστοποίηση της πυκνότητας Density).

Στο Σχήμα 5.18 που ακολουθεί, απεικονίζεται το βέλτιστο σημείο (+) για τη μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της πυκνότητας (Density) που ορίστηκε για το σενάριο 1. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε τιμή της αντοχής σε θλίψη Cs=6,26 MPa και πυκνότητας Density=0,79 g/cm³. Από αυτό το διάγραμμα μπορεί πολύ εύκολα να «διαβαστεί» η σύνθεση που επιθυμεί κάποιος να υλοποιήσει με τις συγκεκριμένες επιθυμητές προδιαγραφές. Για παράδειγμα, για συγκεκριμένη τιμή αντοχής σε θλίψη και συγκεκριμένη πυκνότητα προκύπτει η κατάλληλη σύνθεση και περιεκτικότητα σε ίνες που απαιτεί το μίγμα. Με αντίστοιχο τρόπο ερμηνεύεται και το διάγραμμα για τις μεγάλες ίνες.



Σχήμα 5.18: Απεικόνιση βέλτιστου σημείου για το σενάριο 1. Το Composition αντιπροσωπεύει τον λόγο τσιμέντο προς παιπάλη. Η αντοχή σε θλίψη (Cs) είναι σε MPa και η πυκνότητα (Density) σε g/cm^3 .

Με αντίστοιχο τρόπο αναλύονται όλα τα υπόλοιπα σενάρια και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 5.5. Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζεται για κάθε σενάριο ξεχωριστά, η βέλτιστη σύνθεση (οι τιμές των παραγόντων σχεδιασμού που ικανοποιούν τη συνθήκη), οι τιμές των παραμέτρων και τέλος η τιμή της συνάρτησης επιθυμητής τιμής, που δείχνει κατά πόσο επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος.

Πίνακας 5.5: Απεικόνιση σεναρίων βελτιστοποίησης

Σενάριο	Βέλτιστη σύνθεση	Τιμές παραμέτρων	Συνάρτηση επιθυμητής τιμής
1.Max {Cs} \cap min {Density}	A=0,67 B=1,33(kg/m ³) C=2,2mm	Cs=6,26MPa Density=0,79g/cm ³	Desirability=0,74
2.Max {Cs/Density} \cap min {Density}	A=0,67 B=1,30(kg/m ³) C=2,2mm	Cs=6,18 Density=0,79g/cm ³	Desirability=0,80
3.{Cs \geq 5 MPa} \cap min {Density}	A=0,57 B=1,8(kg/m ³) C=7mm	Cs=5,28 MPa Density=0,80g/cm ³	Desirability=0,85
4.Max {Cs} \cap {Density \leq 0,8 g/cm ³ }	A=0,64 B=1,55(kg/m ³) C=2,2mm	Cs=6,30 MPa Density=0,80g/cm ³	Desirability=0,86

Στον πίνακα 5.5 παρατηρείται ότι για όλα τα σενάρια η πυκνότητα είναι σχεδόν ίδια (0,79-0,80 g/cm³), ενώ η αντοχή σε θλίψη κυμαίνεται από 5,28-6,30 MPa. Το σενάριο 4, το οποίο αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) με πυκνότητα \leq 0,8 g/cm³, φαίνεται να είναι το βέλτιστο, αφού η συνάρτηση επιθυμητής τιμής έδωσε τη μεγαλύτερη τιμή (desirability = 0,86).

Με βάση το σενάριο 4, για την επιβεβαίωση της παραπάνω μεθοδολογίας παρασκευάστηκε ένα πρόσθετο μίγμα με λόγο τσιμέντο/παιπάλη 0,64, περιεκτικότητα σε ίνες 1,55kg/m³ και μήκος ινών 2,2mm. Η πυκνότητα και η αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν ήταν 0,81 g/cm³ και 6,55 MPa, αντίστοιχα. Οι μετρούμενες τιμές επιβεβαιώνουν τη μεθοδολογία σχεδιασμού, καθώς η διαφορά μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των μετρούμενων τιμών βρίσκεται στην περιοχή του σφάλματος μέτρησης.

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα

Η συσσώρευση της ασβεστολιθικής παιπάλης, που παράγεται ως παραπροϊόν κατά την παραγωγή αδρανών υλικών, αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα τόσο για τη βιομηχανία των αδρανών υλικών, όσο και για το περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο έχουν γίνει προσπάθειες και έρευνες για την αξιοποίηση και επαναχρησιμοποίηση της παιπάλης σε διάφορες εφαρμογές με έμφαση σε αυτές που σχετίζονται με τον κατασκευαστικό τομέα. Οι έως τώρα έρευνες που έχουν γίνει για τη χρήση της παιπάλης στην παραγωγή ελαφροβαρούς κυψελωτού σκυροδέματος είναι σχετικά περιορισμένες.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε εργαστηριακά η δυνατότητα βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων ελαφροβαρούς κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με προσθήκη ινών. Η διερεύνηση περιλάμβανε την παρασκευή και έλεγχο εργαστηριακών δοκιμίων μιγμάτων παιπάλης, λευκού τσιμέντου, υδρασβέστου, νερού, ειδικών πρόσμικτων και ινών πολυπροπυλενίου. Η διερεύνηση έγινε σε δυο φάσεις. Στη πρώτη φάση προστέθηκαν ίνες σε μίγματα στις δοσολογίες που προτείνονται από τον κατασκευαστή και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων και στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού και του μήκους των προστιθέμενων ινών στις μηχανικές ιδιότητες με χρήση παραγοντικού σχεδιασμού.

Τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης έδειξαν ότι η προσθήκη ινών, είτε μικρού μήκους (2,2mm) είτε του μεγάλου μήκους (6-8mm), στην προτεινόμενη από τον κατασκευαστή δοσολογία ($0,9\text{kg/m}^3$) βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και ιδιαίτερα την αντοχή σε κάμψη (F_s) και τον λόγο αντοχή σε κάμψη προς πυκνότητα ($F_s/\text{Density}$) και για τις τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετήθηκαν.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του παραγοντικού σχεδιασμού έδειξε ότι:

- Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, καθώς και την αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων που ελέγχθηκαν είναι ο λόγος τσιμέντο προς παιπάλη (composition).

- Η προσθήκη ινών σε δοσολογία μεγαλύτερη (αύξηση κατά 50% και 100%) από εκείνη που προτείνει ο κατασκευαστής δεν βελτιώνει σημαντικά την επιτυγχανόμενη αντοχή σε κάμψη και θλίψη.
- Η ταυτόχρονη χρήση ινών μεγάλου μήκους και σε αυξημένη δοσολογία οδηγεί σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο για επιτευχθεί ικανοποιητική εργασιμότητα στο νωπό μίγμα. Ο υψηλός λόγος νερό/τσιμέντο επιδρά αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμών.
- Η πυκνότητα και η υδατοαπορρόφηση των σκληρυμένων δοκιμών δε φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από την προσθήκη ινών.

Εκτός από τον υπολογισμό των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού των συνθέσεων στις ιδιότητες των σκληρυμένων δοκιμών υπολογίστηκαν επίσης και οι βέλτιστες συνθέσεις για τέσσερες διαφορετικές περιπτώσεις (σενάρια). Ο κύριος στόχος όλων των σεναρίων ήταν να επιτευχθεί η όσον το δυνατόν μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη (Cs) διατηρώντας ταυτόχρονα την πυκνότητα σε χαμηλά επίπεδα. Η επιτυχία των στόχων της βελτιστοποίησης κάθε σεναρίου μετρήθηκε με τη χρήση της συνάρτησης επιθυμητής τιμής (desirability function). Σε όλα τα σενάρια η ελάχιστη επιτυγχανόμενη πυκνότητα είναι σχεδόν ή ίδια ($0,79-0,80 \text{ g/cm}^3$) ενώ η αντοχή σε θλίψη κυμαίνεται από 5,28-6,30 MPa.

- Το σενάριο 4 που αναφέρεται στην μεγιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη (Cs) με ταυτόχρονη επίτευξη πυκνότητας $\leq 0,8 \text{ g/cm}^3$ εκπλήρωσε περισσότερο από τα άλλα τους στόχους της βελτιστοποίησης αφού η συνάρτηση επιθυμητής τιμής έλαβε την μεγαλύτερη τιμή (desirability = 0,86). Επιπλέον εμφανίζει και την μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη (6,30 MPa) με πυκνότητα $0,80 \text{ g/cm}^3$. Κατά συνέπεια η υπολογισθείσα σύνθεση του σεναρίου αυτού κρίνεται ως η βέλτιστη.
- Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το πρόσθετο μίγμα που αφορούσε στο σενάριο 4 φάνηκε ότι οι μετρούμενες τιμές επιβεβαιώνουν τη μεθοδολογία σχεδιασμού, καθώς η διαφορά μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των μετρούμενων τιμών βρίσκεται στην περιοχή του σφάλματος μέτρησης.

Η σύγκριση μεταξύ των προϊόντων κυψελωτού σκυροδέματος υδροθερμικής κατεργασίας του εμπορίου σε σχέση με αυτά που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο, έδειξε ότι για όλες τις συνθέσεις δοκιμών που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ο λόγος $F_s/\text{Density}$ είναι

μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίστηκε για τα εμπορικά προϊόντα, ενώ ο λόγος Cs/Density που υπολογίστηκε για τα δοκίμια της αγοράς δεν διαφοροποιείται σημαντικά από το λόγο Cs/Density των δοκιμίων παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο.

Για περαιτέρω διερεύνηση προτείνεται η βελτιστοποίηση της σύνθεσης βασισμένη σε οικονομικά κριτήρια που θα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους των πρώτων υλών, του κόστους παραγωγής και του κόστους επεξεργασίας των παραγόμενων προϊόντων.

Προτείνεται επίσης η χρήση ινών με μήκος μικρότερο από αυτό των ινών του εμπορίου και σε περιεκτικότητα μικρότερη από την προτεινόμενη του κατασκευαστή.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Alexanderson, J. (July 1979). Relations between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 9:507-514.

Boggelen, R., Safe aluminium dosing in AAC plants. (2011) 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, Bydgoszcz, Poland September, 14-17.

Domingo, Eric Ray (2008). An introduction to autoclaved aerated concrete including design requirements using strength design, M.S. thesis. Kansas State University, Manhattan, Kansas, pp102.

Ekaputri, J., Triwulan, Brahmantyo D., and Nasir F. (2013). Optimization of pressure and curing time in producing autoclaved aerated concrete, *Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in Asia Region: Embracing the Future through Sustainability*, DOI: 10.13140/2.1.2505.6964.

Galetakis M., Alevizos G. and Leventakis K. (2012). Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements-An experimental approach. *Construction and Building Materials* 26:122-130.

Galetakis M., and Soultana A. (2016). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials* 102:769-781.

Galetakis M., Piperidi C., Vasiliou A., Alevizos G., Steiakakis E., Komnitsas K., and Soultana A. (2016). Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting. *Construction and Building Materials* 107:247-254.

Gelim, M., and Khalid, A. (2011). Mechanical and physical properties of fly ash foamed concrete. Thesis, University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), pp40.

- Hamad, J.A. (2014). Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review. *International Journal of Materials Science and Engineering* 2:152-157.
- Middendorf, B., and Just, A. (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characterization* 60:741–748.
- Narayanan, N., and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, 321-329.
- Newman J., Choo. B. S., and Owens P. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*, Elsevier Ltd, part 2, pp. 2/7-2/9.
- Prim, P., and Wittmann, F. (1983). Structure and water absorption of aerated concrete . *Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties* , 71-89.
- Pytlík, E.C., and Saxena, J. (1992). *Autoclaved cellular concrete: The building material for the 21st century* . A.A Balkema.
- Ramamurthy, K. and Narayanan, N. (2000). Factors influencing the density and compressive strength of aerated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52:163-168.
- Somi, S. (2011). Humidity intrusion effects on properties of autoclaved aerated concrete, M.S. thesis. Eastern Mediterranean University, North Cyprus, pp87
- Song, P.S., Wu, J.C., Hwang, S, and Sheu B.C. (2005). Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel–polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 19:1-9.
- Valore, R.C. (1954). Cellular concrete-physical properties . *Journal American Concrete Institution* , 25:817-36.

Ελληνική

Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Μηχανική Πετρωμάτων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Χανιά, σελ.99-105.

Ευθυμίου Ιφιγένεια (2010), Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Στατιστικής και Αναλογιστικών-Χρηματοοικονομικών Μαθηματικών, Διπλωματική εργασία: Παραγοντικοί σχεδιασμοί και οι ιδιοτητές τους, Καρλόβασι, σελ. 11-15, 22-23.