



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**  
**ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**  
**ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΙΠΑΛΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**Ράκα Στυλιανή**

**Μηχ. Ορυκτών Πόρων**

**Εξεταστική Επιτροπή**

**Γαλετάκης Μιχαήλ, Λέκτορας (Επιβλέπων)**

**Περδικάτσης Βασίλειος, Αν. Καθηγητής**

**Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής**

Χανιά, Φεβρουάριος 2005



Στη μνήμη της Βίκυς

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιοποίηση της παιπάλης που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών κατά τη λατομική διεργασία. Η διερεύνηση για την αξιοποίηση του λεπτομερούς αυτού υλικού περιλαμβάνει την παρασκευή δομικών στοιχείων με μίγμα τσιμέντου – νερού – παιπάλης και συμπίεση, ενώ για τον καθορισμό των παραμέτρων της σύνθεσης χρησιμοποιήθηκε ο παραγοντικός σχεδιασμός.

Στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειας σημαντικό ρόλο έπαιξε η συνεχής και αποτελεσματική συνεργασία με τον Λέκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ.Μ. Γαλετάκη, χωρίς τη βοήθεια και στήριξη του οποίου δεν θα είχε επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για τους λόγους αυτούς τον ευχαριστώ θερμά.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους Αναπληρωτές Καθηγητές κ.κ. Κ. Κομνίτσα και Β. Περδικάτση που δέχτηκαν να αξιολογήσουν την εργασία και συνέβαλαν σημαντικά στην ολοκλήρωσή της με τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους.

Σημαντική ήταν επίσης, η συνεισφορά της Ε.Τ.Ε.Π. κας Ο. Παντελάκη στο τμήμα της εργασίας που αφορά τις κοκκομετρικές αναλύσεις, του κ. Σ. Μαυριγιαννάκη στα πειράματα αντοχής των δοκιμίων, του Λέκτορα κ. Γ. Αλεβίζου στην ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων παιπάλης, της Διευθύντριας του Εργαστηρίου Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων Αναπληρώτριας Καθηγήτριας Δ. Βάμβουκα στην θερμοβαρυτομετρική ανάλυση των δειγμάτων και του παρασκευαστή κ. Γ. Αποστολάκη στην διαμόρφωση των δοκιμίων, τους οποίους και ευχαριστώ.

Ευχαριστίες ακόμη οφείλονται και στην Ανώνυμη Εταιρεία «Ασφαλτική Μπετόν» για την οικονομική ενίσχυση και την παροχή του ασβεστολιθικού υλικού που εξετάστηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ασβεστολιθική παιπάλη που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών στην Κρήτη 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.

Για την δημιουργία τέτοιων δομικών στοιχείων χρησιμοποιήθηκε ως πιο κατάλληλη μέθοδος η παραγωγή τους σε πρέσα υψηλής πίεσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απαιτούμενη ποσότητα του τσιμέντου, να μειωθεί στο ελάχιστο η προσθήκη νερού και να παραχθεί ένα συμπαγές και με καλές μηχανικές ιδιότητες υλικό.

Για τη μελέτη της σύνθεσης χρησιμοποιήθηκε ο παραγοντικός σχεδιασμός ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για την επίδραση των παραγόντων που συμμετέχουν στην παρασκευή των δοκιμίων και να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για το πείραμα. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα STATGRAPHICS PLUS 5.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδες

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>i</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>ii</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>iii</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ .....</b>	<b>4</b>
2.1 Γενικά για τον ασβεστόλιθο.....	4
2.2 Μέθοδοι εξόρυξης και επεξεργασίας αδρανών υλικών.....	4
2.3 Χαρακτήρας των αποβλήτων.....	8
2.4 Χρήσεις λεπτόκοκκων ασβεστολιθικών παραπροϊόντων.....	9
2.5 Προδιαγραφές του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος για τα αδρανή...	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....</b>	<b>14</b>
3.1 Προέλευση του υλικού.....	14
3.2 Εργαστηριακές μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό του υλικού.....	20
3.3 Αξιολόγηση της παιπάλης με χρήση κριτηρίων.....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ .....</b>	<b>32</b>
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Στατιστικά πειράματα με έναν παράγοντα.....	33
4.3 Στατιστικά πειράματα με πολλούς παράγοντες.....	38
4.3.1 Παραγοντικά πειράματα.....	39
4.3.2 Πειράματα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα ( $2^K$ ).....	43
4.4 Κλασματικά παραγοντικά πειράματα.....	46
4.4.1 Κλασματικά πειράματα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα.....	47
4.5 Μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης.....	50
4.5.1 Εμπειρικά μοντέλα παλινδρόμησης.....	51
4.5.2 Μέθοδος μέγιστης ανόδου.....	52

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....</b>	<b>56</b>
5.1 Υλικά-Παρασκευή δοκιμίων.....	57
5.2 Φύλαξη δοκιμίων-Κωδικοποίηση.....	60
5.3 Εργαστηριακές δοκιμές.....	61
5.4 Παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων.....	63
5.5 Πειραματικά αποτελέσματα και εφαρμογή παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης Α φάσης.....	65
5.5.1 Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού Α φάσης.....	68
5.6 Πειραματικά αποτελέσματα και εφαρμογή παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης Β φάσης.....	72
5.6.1 Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού Β φάσης για τη μεταβλητή Cs.....	75
5.6.2 Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού Β φάσης για τη μεταβλητή Wa.....	80
5.7 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>88</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	88
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	89
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>92</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αναγωγή της αντοχής σε δοκίμια με λόγο ύψους/διάμετρος=2</b>	<b>94</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Συμπληρωματικά διαγράμματα ισοϋψών, επιφάνειες απόκρισης και διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων.....</b>	<b>96</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 2004 υπολογίζεται στα 30 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων 3-4.5 εκατομμύρια τόνοι είναι τα λεπτομερή παραπροϊόντα (ποσοστό 10-15%) (Γαλετάκης, 2004). Λαμβάνοντας υπόψη και τους κανονισμούς που περιορίζουν ολόένα και περισσότερο το ποσοστό παιπάλης στα διάφορα προϊόντα όπου συμμετέχουν τα αδρανή, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για εξεύρεση λύσεων.

Μέχρι σήμερα τα λεπτομερή ασβεστολιθικά προϊόντα 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.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, επιχειρείται μέσα από την εργασία αυτή να γίνει μια διερεύνηση για την αξιοποίηση των λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών (παιπάλη) που παράγονται σε υπολογίσιμες ποσότητες από τα λατομεία αδρανών στην Κρήτη. Λόγω μη ύπαρξης στο νησί βιομηχανικών τομέων που θα μπορούσαν να απορροφήσουν το εξεταζόμενο υλικό το ενδιαφέρον στρέφεται σε παραγωγή νέων προϊόντων που θα είναι οικονομικά και πρακτικά εφικτό με κάποια σχετικά απλή επεξεργασία να παρασκευάζονται στις εγκαταστάσεις του λατομείου.

Το πρώτο στάδιο της διερεύνησης αφορά στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού μέσω εργαστηριακών μετρήσεων. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την παρασκευή δοκιμίων με σκοπό να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους για χρήση ως δομικό στοιχείο (συνθετικός δομικός λίθος ή κυβόλιθος). Τα δοκίμια παρασκευάζονται από παιπάλη και τσιμέντο σε διάφορες αναλογίες και μορφοποιούνται με τη βοήθεια πρέσας σε διάφορες πιέσεις προκειμένου να αποκτήσουν συνεκτικότητα. Στη συνέχεια ελέγχονται κύριες ιδιότητες του προϊόντος, όπως είναι η αντοχή τους σε θλίψη, η πυκνότητα και η υδαταπορροφητικότητα.

Εκτός όμως από το ίδιο το προϊόν, εξετάζεται και η πειραματική διαδικασία. Εφαρμόζεται η μέθοδος του σχεδιασμού πειραμάτων η οποία χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους για τη βελτίωση της ποιότητας με σκοπό να επιβεβαιωθούν υποθέσεις ή να διερευνηθούν σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά 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 την 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.

Στη συγκεκριμένη εργασία οι παράγοντες που επιδρούν στα χαρακτηριστικά ποιότητας (αντοχή σε θλίψη και υδατοαπορροφητικότητα) του προϊόντος (δοκίμια παιπάλης) είναι το ποσοστό τσιμέντου, η πίεση μορφοποίησης, η εμφάνιση ή όχι των δοκιμίων σε νερό και η λεπτότητα του τσιμέντου. Για την ανάλυση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο STATGRAPHICS Plus 5.

Τέλος, προτείνονται κάποιες εναλλακτικές λύσεις για την αξιοποίηση της παιπάλης με άλλες μεθόδους και σε τομείς που αναπτύσσονται ακόμη, όπως είναι η χρήση της στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα που προς το παρόν δεν έχει χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

#### 2.1 Γενικά για τον ασβεστόλιθο

Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα χημικής ή βιογενούς προέλευσης που αποτελείται κυρίως από το ορυκτό ασβεστίτης (ανθρακικό ασβέστιο  $\text{CaCO}_3$ ). Άλλα ορυκτά που μπορεί να περιέχονται στον ασβεστόλιθο σε μικρές ποσότητες είναι ο δολομίτης, ο χαλαζίας, ο χλωρίτης, ο οπάλιος, αργιλικά ορυκτά, άστριοι, μαρμαρυγίες, ο λειμωνίτης, ο αιματίτης, ο σιδηρίτης, καθώς και οργανικές ουσίες. Η ύπαρξη οργανικών ουσιών προσδίδει στο πέτρωμα τεφρό χρώμα, ενώ αντίθετα ο λειμωνίτης και ο σιδηρίτης το χρωματίζουν ανοικτοκίτρινο ως καστανό, ο χλωρίτης τεφροπράσινο και ο αιματίτης ροδόχρουν ως κεραμέρυθρο. Ο καθαρός ασβεστόλιθος έχει λευκό χρώμα και ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του ασβεστίτη χαρακτηρίζεται από λεπτόκοκκος ως κρυσταλλικός ασβεστόλιθος. Όταν το πέτρωμα αποτελείται από 10% έως 50% από το ορυκτό δολομίτης ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ονομάζεται δολομίτης ή δολομιτικός ασβεστόλιθος.

Το ειδικό βάρος του ασβεστόλιθου είναι  $2.72 \text{ gr/cm}^3$  και η σκληρότητα κατά Mosh 3. Η αντοχή του σε θλίψη κυμαίνεται από 200-2000  $\text{kg/cm}^2$ , σαν συνέπεια των ποικίλων γεωλογικών διεργασιών που έχουν επιδράσει κατά τη δημιουργία του πετρώματος και έπειτα. Αναβράζει έντονα σε ψυχρό υδροχλωρικό οξύ, σε αντίθεση με τον δολομίτη και τον μαγνησίτη. Η επιφανειακή εξάπλωση των ασβεστόλιθων είναι πολύ μεγάλη. Περίπου το 75% της συνολικής χερσαίας επιφάνειας της γης καλύπτεται από ιζηματογενή πετρώματα, με τους ασβεστόλιθους και τους δολομίτες να αποτελούν το 20% του τμήματος αυτού. Βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια σε όλες τις ηπείρους ενώ η ηλικία τους ποικίλει από το Προκάμβριο ως πρόσφατα.

#### 2.2 Μέθοδοι εξόρυξης και επεξεργασίας αδρανών υλικών

Ο ασβεστόλιθος παράγεται κυρίως με υπαίθρια και πολύ λιγότερο με υπόγεια εκμετάλλευση. Η μέθοδος της υπαίθριας εκμετάλλευσης επιτυγχάνει υψηλότερη

παραγωγή και είναι οικονομικότερη από την υπόγεια εκμετάλλευση. Η συνηθέστερη μέθοδος εξόρυξης είναι η μέθοδος της ασυνεχούς λειτουργίας που βρίσκει εφαρμογή σε σκληρούς σχηματισμούς. Επιτυγχάνεται με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης και ανατίναξης. Χαρακτηρίζεται από τη χρησιμοποίηση εκρηκτικών υλών για την προχαλάρωση ή την απευθείας εξόρυξη του πετρώματος και εκσκαφών – φορτωτών – χωματουργικών αυτοκινήτων για την φόρτωση και τη μεταφορά.

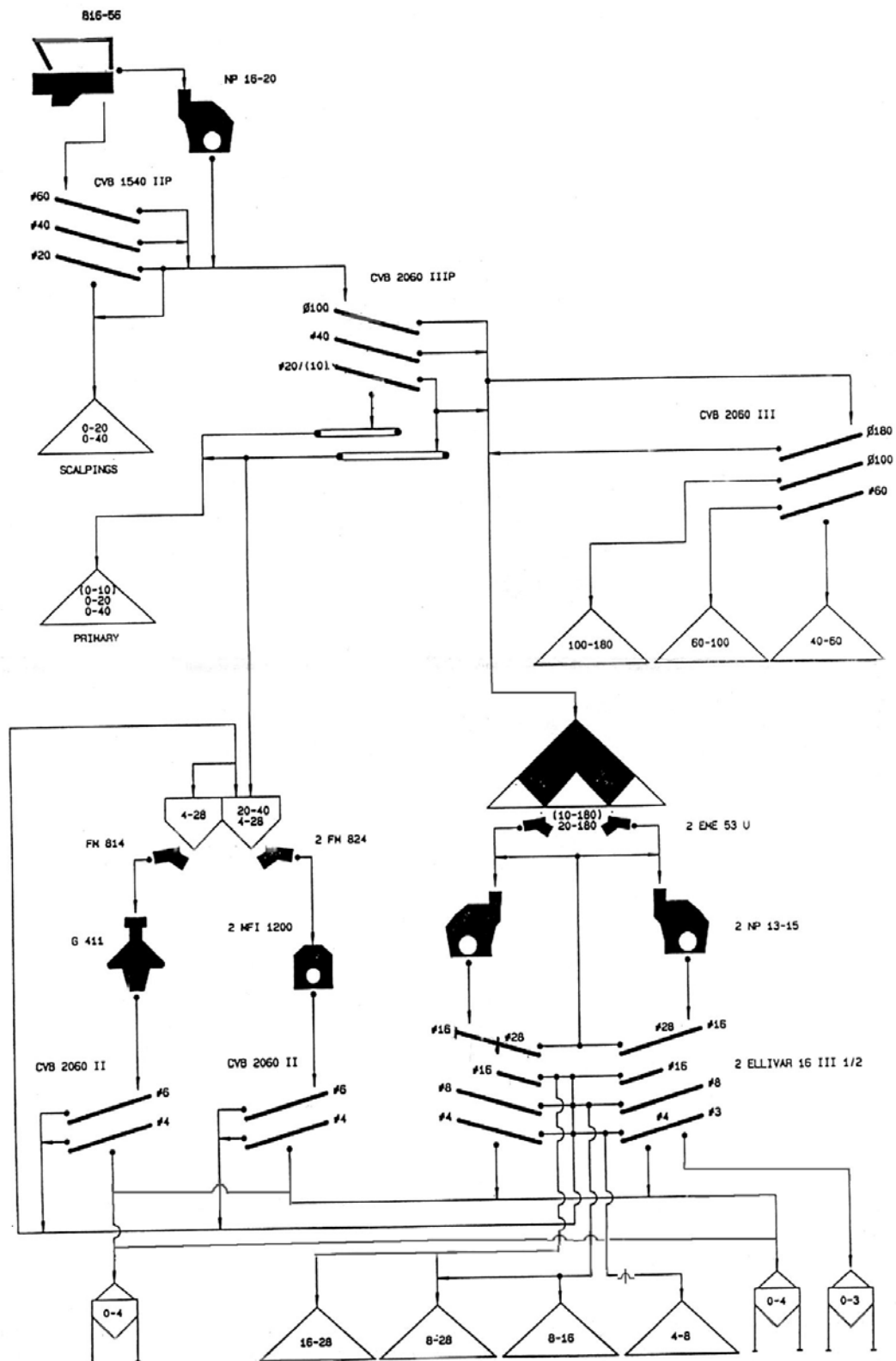
Ο τρόπος τοποθέτησης των διατηρημάτων παίζει σημαντικό ρόλο στον όγκο και την ομοιομορφία των τεμαχίων πετρώματος που προκύπτουν. Το κατάλληλο αρχικό μέγεθος των τεμαχίων του πετρώματος είναι σημαντικό για την ομαλή λειτουργία του σπαστήρα. Αν ο σπαστήρας τροφοδοτηθεί με πολύ μεγάλα τεμάχια μπορεί να μπλοκάρει και να καθυστερήσει όλη την παραγωγή έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητική μείωση του μεγέθους του βράχου. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, πολλές φορές χρησιμοποιούνται σφύρες που μειώνουν το μέγεθος των βράχων πριν ακόμη γίνει η φόρτωση και μεταφορά τους.

Μετά την ανατίναξη του πετρώματος γίνεται η φόρτωση και η μεταφορά του στη μονάδα θραύσης. Αρχικά, γίνεται ένας διαχωρισμός των λεπτότερων τεμαχίων από τα μεγαλύτερα μέσω μιας σχάρας. Στο σημείο αυτό αποβάλλονται πρωτογενή λεπτομερή, τα οποία κυρίως περιέχουν αργιλικά υλικά από τα υπερκείμενα του ασβεστόλιθου, ενώ τα υπόλοιπα τεμάχια τροφοδοτούνται στους σπαστήρες για περαιτέρω μείωση του μεγέθους τους.

Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σπαστήρων, όπως ο σιαγονωτός, ο κωνικός, ο κυλινδρικός, κ.ά. Στην πρωτογενή θραύση, όπου γίνεται μείωση του μεγέθους των τεμαχίων του ασβεστόλιθου γύρω στα 10 cm, χρησιμοποιούνται κυρίως οι δύο πρώτοι τύποι σπαστήρων. Η θραύση επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: μέσω σύνθλιψης του πετρώματος όπου το φορτίο ασκείται σταθερά και προκύπτουν κυρίως επιμήκη σωματίδια και μέσω κρούσης όπου το πέτρωμα υπόκειται σε ξαφνική φόρτιση με αποτέλεσμα να παράγεται μεγάλη ποσότητα λεπτομερών αλλά και να υπάρχει καλύτερη ομοιομορφία στο μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων. Κατά την δευτερογενή θραύση το υλικό περνάει από άλλους σπαστήρες που μειώνουν το μέγεθος στα επιθυμητά κλάσματα χαλικιών και άμμου που προορίζονται για την παρασκευή

σκυροδέματος. Στα σημεία αυτά, και κυρίως στα αμμοτριβεία, παρατηρείται η μεγαλύτερη παραγωγή παιπάλης.

Μετά τους σπαστήρες τα αδρανή διέρχονται από δονούμενα συνήθως κόσκινα όπου διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθός τους. Το ξέπλυμα των αδρανών με νερό, ώστε να απομακρυνθούν τα λεπτομερή, είναι απαραίτητο τόσο στην περίπτωση που προορίζονται για αδρανή σκυροδέματος όσο και για αδρανή ασφαλτομίγματος. Αφού γίνει και ο διαχωρισμός στα κόσκινα, τα αδρανή ταξινομούνται σε σωρούς σύμφωνα με το μέγεθός τους σε υλικά βάσεων/υποβάσεων, σκύρα, χαλίκια και άμμο για τις τελικές χρήσεις. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό συγκρότημα θραύσης και τα κλάσματα που προκύπτουν ως τελικά προϊόντα.



Σχήμα 2.1: Τυπικό συγκρότημα θραύσης.

### 2.3 Χαρακτήρας των αποβλήτων

Τα απόβλητα όλων των ενεργών δραστηριοτήτων κατατάσσονται σύμφωνα με την πιθανότητα να προκαλέσουν περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι κατηγορίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τα απόβλητα είναι (Colman, 2003):

- Αδρανή
- Μη επικίνδυνα
- Επικίνδυνα
- Ορυκτά που περιέχουν επικίνδυνες ενώσεις ως αποτέλεσμα εξόρυξης ή επεξεργασίας των ορυκτών.

Τα λατομεία ασβεστόλιθου παράγουν ποικίλες ποσότητες αποβλήτων, ανάλογα με την τοπογραφία και την γεωλογία της περιοχής. Μπορεί να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες υπερκείμενων που θα πρέπει να απομακρυνθούν. Ένα μέρος αυτών χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση του λατομείου μετά το πέρας της λειτουργίας του. Μέσα στο σώμα του ασβεστόλιθου μπορεί να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες λεπτοκρυσταλλικού χαλαζία ή/και άργιλος. Οι προσμίξεις αυτές εναποτίθενται ως απόβλητα και χαρακτηρίζονται ως μη επικίνδυνα. Σε λατομεία ασβεστόλιθου που βρίσκονται κοντά σε περιοχές όπου γινόταν εξόρυξη μετάλλων είναι πιθανόν να εξαχθούν μικρές ποσότητες ορυκτών, όπως γαληνίτης, σφαλερίτης, σιδηροπυρίτης, φθορίτης και βαρύτης. Τα ορυκτά αυτά μπορεί να περιέχουν επικίνδυνες ενώσεις, όπως μόλυβδο, φθόριο, βάριο και αρσενικό σε διάφορες μορφές. Ωστόσο, τέτοιες περιοχές τείνουν να αποφεύγονται καθώς μειώνεται η ποιότητα του προϊόντος και αυξάνεται η ποσότητα των αποβλήτων (Colman, 2003).

Γενικότερα πάντως, τα απόβλητα που δημιουργούνται από τη λατομική δραστηριότητα θεωρούνται μη επικίνδυνα, καθώς είναι πολύ σπάνιο να περιέχουν επιβλαβή ορυκτά. Ακόμη όμως και στην περίπτωση που εμφανίζονται μικρές ποσότητες σουλφιδίων, τα διαλύματα με χαμηλό pH που δημιουργούνται εξουδετερώνονται από την υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη.

## 2.4 Χρήσεις λεπτομερών ασβεστολιθικών προϊόντων

Τα πετρώματα του ανθρακικού ασβεστίου εξαπλώνονται σε όλο τον κόσμο, γεγονός στο οποίο οφείλεται η ευρεία χρήση του υλικού αυτού εδώ και 5000 χρόνια. Οι Αιγύπτιοι κατασκεύασαν τις πυραμίδες με ασβεστόλιθο, ενώ σήμερα εξακολουθούμε να χρησιμοποιούμε εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους ανθρακικού ασβεστίου μόνο στον τομέα των κτιριακών κατασκευών. Ωστόσο, αν και τα αποθέματα είναι αρκετά, μόνο λίγα έχουν ικανοποιητικά υψηλή ποιότητα για να επεξεργαστούν και ακόμη λιγότερα μπορούν να τροφοδοτήσουν πρώτη ύλη για γεωργικές και βιομηχανικές χρήσεις άλλες από την κατασκευή κτιρίων και δρόμων. Η εξόρυξη για εμπορικούς σκοπούς θεωρείται ότι αξίζει μόνο όταν εξασφαλίζεται η καθαρότητα, η λευκότητα, το μέγεθος των κόκκων και η ομοιομορφία. Μετά την εξόρυξη απαιτείται επιπλέον επεξεργασία για την παραγωγή φυσικού ανθρακικού ασβεστίου με την υψηλότερη ποιότητα, γνωστό ως Ground Calcium Carbonate (GCC). Το χημικά καταβυθισμένο ανθρακικό ασβέστιο (Precipitated Calcium Carbonate) PCC παράγεται συνθετικά στη βιομηχανία.

Τόσο το GCC όσο και το PCC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποικίλες εφαρμογές. Για κάθε τελική χρήση υπάρχει ένα κατάλληλο προϊόν, όπου η λεπτότητα και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων συνδυάζονται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνονται οι βέλτιστες ιδιότητες για την συγκεκριμένη χρήση (European Industrial Minerals Association, 2004).

Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το θραυστό πέτρωμα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή σκληρών αδρανών που συμμετέχουν στο σκυρόδεμα και σαν υλικό βάσης για την κατασκευή δρόμων. Συμμετέχει ακόμη στις βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, στην υαλουργία, στη χημική βιομηχανία και στην γεωργία. Το ευρύ αυτό φάσμα εφαρμογών κατατάσσει τον ασβεστόλιθο στις σημαντικότερες ορυκτές πρώτες ύλες μαζί με τους γαιάνθρακες, το πετρέλαιο και τα μεταλλικά ορυκτά.

Οι παραπάνω εφαρμογές των ασβεστολιθικών πετρωμάτων εξαρτώνται από τα βασικά χαρακτηριστικά των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους, όπως είναι η σκληρότητα, η αντίσταση στην τριβή, η καθαρότητα, η λευκότητα, κ.ά. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης σε ικανή ποσότητα και στην κατάλληλη γεωγραφική



θέση, καθώς πολλές φορές τα έξοδα μεταφοράς μπορεί να υπερβαίνουν το κόστος παραγωγής.

**Βιομηχανία χαρτιού :** το ανθρακικό ασβέστιο είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό στην παρασκευή χαρτιού. Τόσο το GCC όσο και το PCC χρησιμοποιούνται ως πληρωτικό και χρωστική ουσία, συμβάλλοντας στην παραγωγή χαρτιού υψηλής λευκότητας, γυαλιστερό και με καλές ιδιότητες για εκτύπωση (Boynton, 1980).

**Βιομηχανία πλαστικών :** το ανθρακικό ασβέστιο αποτελεί το βασικότερο συστατικό μαζί με τα πολυμερή. Αποτελεί πάνω από το 60% κατά βάρος του πληρωτικού. Στις κυριότερες εφαρμογές συμπεριλαμβάνονται το πλαστικοποιημένο και άκαμπτο PVC, οι ακόρεστοι πολυεστέρες, το προπυλένιο και το πολυαιθυλένιο. Άλλους σημαντικούς τομείς χρήσης αποτελούν τα λάστιχα, το αφρώδες λάτεξ για την ενίσχυση χαλιών, οι στεγανωτικές ουσίες και οι συγκολλητικές ουσίες. Το ανθρακικό ασβέστιο δεν αποτελεί απλώς ένα πληρωτικό που μειώνει το κόστος και τη χρήση πετρελαϊκών προϊόντων, αλλά επηρεάζει πολλές από τις ιδιότητες των πλαστικών, όπως η αντοχή σε κρούση, και η δυσκαμψία (Boynton, 1980).

**Βιομηχανία γυαλιού :** λειοτριβημένος ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται ως φορέας του  $\text{CaO}$ . Οι απαιτήσεις ως προς την ποιότητά του εξαρτώνται από το είδος του παραγόμενου γυαλιού. Τις δυνατότητες χρήσης της πρώτης ύλης καθορίζει η περιεκτικότητα των οξειδίων του Fe, Cr και Mn, που χρωματίζουν το γυαλί. Για πράσινο γυαλί φιαλών πρέπει το ποσοστό του  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  στον ασβεστόλιθο να είναι  $\leq 0.3\%$ , ενώ για διαυγές γυαλί  $\leq 0.08\%$ . Περιεκτικότητα  $\text{MgO}$  στον ασβεστόλιθο είναι επιτρεπτή σε ποσοστό  $< 2\%$ . Ταυτόχρονα, πρέπει η κοκκομετρική κατανομή του ασβεστόλιθου να ανταποκρίνεται σε εκείνη της χρησιμοποιούμενης άμμου. Καθιστά το γυαλί περισσότερο αδιάλυτο ώστε να μπορεί να έρθει σε επαφή με χημικά, βελτιώνει την εμφάνισή του και τις μηχανικές του ιδιότητες κάνοντάς το λιγότερο εύθραυστο. Επιπλέον, αποτελεί τον οικονομικότερο παράγοντα σύντηξης της άμμου (Κωστάκης, 1994).

**Παραγωγή σιδήρου :** κατά την διαδικασία παραγωγής σιδήρου χρησιμοποιούνται ανθρακικά υλικά ως α) προσθήκη  $\text{CaCO}_3$  κατά την έψηση του μεταλλεύματος για τον υποβιβασμό του σημείου τήξεως του  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  κατά  $400^\circ\text{C}$  β) προσθήκη στην υψικάμινο

για την δημιουργία εύτηκτης σκωρίας βασικής σύστασης η οποία δεσμεύει το θείο που ελευθερώνεται από το κωκ και γ) προσθήκη σε χυτήρια στην κάμινο ανατήξεως για δέσμευση του  $\text{SiO}_2$  και τέφρας του κωκ σε εύτηκτη σκωρία. Οι απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της πρώτης ύλης είναι χαμηλές. Τα ανθρακικά πετρώματα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν φτωχά σε θείο και να περιέχουν όσο το δυνατόν περισσότερο  $\text{CaCO}_3$ . Επίσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ασβεστόλιθων πλούσιων σε  $\text{MgO}$  και δολομιτών (Κωστάκης, 1994).

**Παραγωγή άνυδρης ασβέστου :** οι απαιτήσεις για την ποιότητα ασβεστόλιθου που προορίζεται για την παραγωγή άνυδρης ασβέστου εξαρτώνται από την προβλεπόμενη χρήση της ασβέστου και συνδέονται με την χημική σύσταση, την ενεργότητα και την κοκκομετρία της. Αυτοί οι παράγοντες με τη σειρά τους, συνδέονται με την χημική σύσταση, την ορυκτολογική σύσταση, τις φυσικές ιδιότητες, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων της πρώτης ύλης. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζουν το είδος του κλιβάνου στον οποίο ψήνεται ο ασβεστόλιθος και το είδος και η ποσότητα του καυσίμου. Όταν η άνυδρη άσβεστος προορίζεται για την χημική βιομηχανία, απαιτείται καθαρότητα που να πλησιάζει κατά το δυνατόν το 100% σε  $\text{CaO}$ , ενώ όταν τελικός χρήστης είναι η μεταλλουργία απαιτείται  $\text{SO}_3 < 0,1\%$ ,  $\text{MgO} < 2\%$  και όσο το δυνατόν λιγότερο  $\text{SiO}_2$  (Κωστάκης, 1994).

**Βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου :** τα τσιμέντα είναι κονίες που παράγονται μετά από όπτηση της πρώτης ύλης σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $1400^\circ\text{C}$  και αποτελούνται κυρίως από ενώσεις του  $\text{CaO}$  με  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Κατά την θέρμανση της φαρίνας μέχρι την περίτηξη δημιουργούνται τα ορυκτά του κλίνκερ. Το κλίνκερ αποτελείται κατά κύριο λόγο από πυριτικό τριασβέστιο (αλίτης  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), πυριτικό διασβέστιο (μπελίτης  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), αργιλικό τριασβέστιο (αργιλική φάση  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) και σιδηροαργιλικό ασβέστιο (σιδηροαργιλική φάση ή φάση του φερρίτη  $2\text{CaO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (1-x)\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), που συνήθως δεν είναι στοιχειομετρικά καθαρά. Το κλίνκερ περιέχει σε πολύ μικρά ποσοστά και υαλώδη φάση, ενώ μπορεί να περιέχει και ελεύθερη άσβεστο  $\text{CaO}$  ( $< 1\%$ ) και περίκλαστο  $\text{MgO}$  (όταν το κλίνκερ έχει  $\text{MgO} > 5\%$ ) (Κωστάκης, 1994).

Οι φαρίνες του τσιμέντου είναι συνήθως μείγματα δύο ή και περισσότερων πρώτων υλών, η κυριότερη από τις οποίες – από πλευράς ποιότητας – είναι ο ασβεστόλιθος. Οι

προδιαγραφές που ισχύουν σε γενικές γραμμές για την ποιότητα του ασβεστόλιθου είναι :

$\text{CaCO}_3 \geq 78\%$
$\text{MgO} \leq 2.5\%$
$\text{SO}_3 \leq 1.5\%$
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \leq 1.0\%$
$\text{Cl} \leq 0.1\%$

Ανάλογα δε με τη χημική σύσταση των υπόλοιπων συστατικών της φαρίνας, την αναλογία του μείγματος και τη τεχνολογία παραγωγής του τσιμέντου, είναι δυνατές ορισμένες αποκλίσεις από τις παραπάνω τιμές (Κωστάκης, 1994).

**Επικαλυπτικά** : σε χρώματα και άλλα επικαλυπτικά υλικά, το ανθρακικό ασβέστιο αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα. Η λεπτότητα και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων συνεισφέρουν στην αδιαφάνεια των επικαλυπτικών. Επιπλέον, το ανθρακικό ασβέστιο επιφέρει βελτιώσεις στην αντίσταση από εξαλλοίωση και στις ρεολογικές ιδιότητες (European Industrial Minerals Association, 2004).

**Περιβάλλον** : ως φυσικό προϊόν, το ανθρακικό ασβέστιο είναι κατάλληλο για εφαρμογές περιβαλλοντικής προστασίας. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για την επεξεργασία πόσιμου νερού και υγρών αποβλήτων, καθώς και για την εξουδετέρωση της όξινης βροχής σε δάση και λίμνες.

**Αγροτικός τομέας** : τα ασβεστιτικά λιπάσματα ήταν από τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν στη σύγχρονη εποχή, ενώ και στην αρχαιότητα οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι αντιλήφθηκαν από πολύ νωρίς τη συνεισφορά τους. Η χρήση τους εγγυάται την απαραίτητη παροχή ασβεστίου και μαγνησίου για τα φυτά και σταθεροποιεί την τιμή του pH του εδάφους. Συμβάλλει στην αύξηση θρεπτικών συστατικών, οργανικής ύλης, ιχνοστοιχείων και μικροοργανισμών του εδάφους. Τέλος, καθιστά το έδαφος περισσότερο εργάσιμο και βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των λιπασμάτων. Οι απαιτήσεις ποιότητας της πρώτης ύλης περιορίζονται σε συγκέντρωση  $\text{CaO}+\text{MgO}$  μεγαλύτερη από 45%. Κάθε χρόνο, στην Ευρώπη μόνο, καταναλώνονται από τον συγκεκριμένο τομέα της αγοράς 4.5 εκατομμύρια τόνοι. Επίσης, χρησιμοποιείται ως συστατικό στην παρασκευή ζωοτροφών, όπου απαιτείται περιεκτικότητα  $\text{CaCO}_3 \geq 90\%$  και  $\text{F} < 0.1\%$  (Boynton, 1980).

**Άλλοι τομείς :** στο ανθρακικό ασβέστιο βασίζονται ακόμη βιομηχανίες όπως των κεραμικών όπου δρα περισσότερο χημικά και λιγότερο ως πληρωτικό, οδοντικής φροντίδας και κοσμετολογίας. Ως φυσικό ορυκτό, έχει πολλά χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδανική πρώτη ύλη για αρκετές διαφορετικές εφαρμογές (European Industrial Minerals Association, 2004).

## **2.5 Προδιαγραφές του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος για τα αδρανή**

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (1997) τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές ως προς το ποσοστό παιπάλης που περιέχουν.

Ως παιπάλη ορίζεται το κλάσμα του αδρανούς που περνάει από το Αμερικανικό πρότυπο Κόσκινο Νο 200 (75  $\mu\text{m}$ ). Βρίσκεται είτε προσκολλημένη στους κόκκους του υλικού εμποδίζοντας την πρόσφυση των αδρανών με την κονία, είτε σχηματίζοντας συσσωματώματα δημιουργώντας αδύναμα σημεία στην μάζα του σκυροδέματος, ή ακόμη διασκορπισμένη ομοιόμορφα μέσα στην μάζα του αδρανούς με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή. Η παιπάλη έχει γενικά την ιδιότητα να αυξάνει την αναγκαία ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα και να ελαττώνει αντίστοιχα την αντοχή του. Για τον λόγο αυτό, η παιπάλη της θραυστής άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της και η παιπάλη των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων (ρυζάκι, γαρμπίλι, σκύρα) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του ξηρού βάρους τους. Για άοπλα σκυροδέματα χωρίς ειδικές απαιτήσεις επιτρέπεται παιπάλη στην άμμο μέχρι 20% του ξηρού βάρους της. Αντίθετα, η παιπάλη της φυσικής άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% του ξηρού βάρους της άμμου.

Στο ασφαλικό σκυρόδεμα το ποσοστό παιπάλης των αδρανών πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 5-12 %. Μεγάλο ποσοστό παιπάλης δίδει στο ασφαλικό σκυρόδεμα μεγάλη πλαστικότητα. Επειδή η παιπάλη έχει την ιδιότητα να προσκολλάται πάνω στο χονδρόκοκκο υλικό, ο διαχωρισμός της από αυτό με τον συνήθη τρόπο κοσκίνισματος είναι αρκετά δύσκολος και όχι πλήρης. Γι' αυτό και η απομάκρυνσή της γίνεται με έκπλυση ή με απαγωγή από ρεύμα αέρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

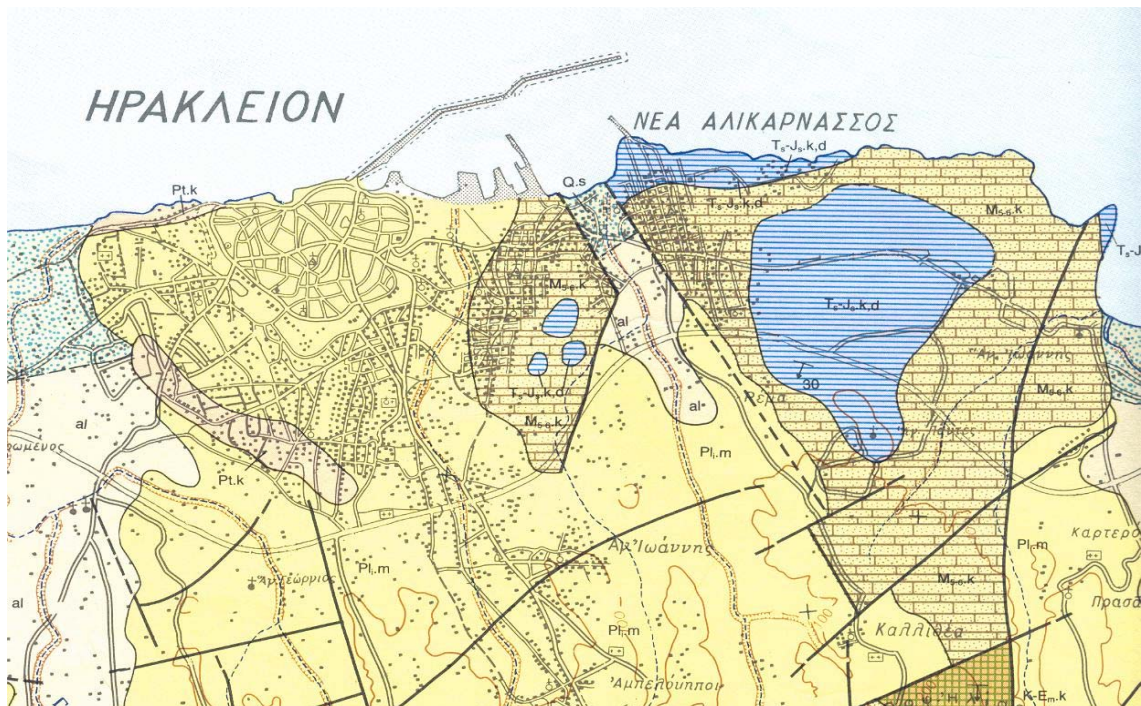
#### 3.1 Προέλευση του υλικού

Το υλικό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι ασβεστολιθική παιπάλη η οποία προέρχεται από λατομείο αδρανών υλικών που βρίσκεται στις Γούβες Ηρακλείου. Το λατομείο τροφοδοτεί με τα προϊόντα του τέσσερις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου. Στις εταιρείες αυτές συγκαταλέγεται η Ασφαλτική Μπετόν ΑΕ, η οποία διαθέτει συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου και μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος εντός του λατομείου αδρανών στις Γούβες. Η εταιρία αυτή καλείται να απομακρύνει την παιπάλη από τα αδρανή με τα οποία την τροφοδοτεί το λατομείο, καθώς η συγκέντρωσή της στο κλάσμα των χαλικιών και της ψηφίδας υπερβαίνει τα όρια των προδιαγραφών και για το σκυρόδεμα αλλά και για το ασφαλτόμιγμα.

Στην Εικόνα 3.1 δίνεται ο χάρτης του Νομού Ηρακλείου (Εικόνα 3.1) όπου φαίνεται μέσα σε ορθογώνιο πλαίσιο η περιοχή που βρίσκεται το λατομείο αδρανών, ενώ στον γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 3.2) φαίνονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ίδιας περιοχής.



Εικόνα 3.1. Γεωγραφικός χάρτης του Νομού Ηρακλείου.



**Εικόνα 3.2.** Γεωλογικός χάρτης περιοχής Ηρακλείου (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, φύλλο Ηράκλειο 1:50.000).

Ο σχηματισμός απ' όπου εξορύσσεται ο ασβεστόλιθος συμβολίζεται ως Ts-Js.k,d και πρόκειται για **ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες** που αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλονιτωμένοι λόγω τεκτονισμού. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτους, τεφρόμαυρους, ενώ τα ανώτερα μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, μεσοστρωματώδεις, τεφρόλευκους μέχρι τεφρόμαυρους. Στο σύνολό τους είναι καρστικοί, κυρίως στα ανώτερα μέλη. Το μέγιστο πάχος τους ανέρχεται περίπου στα 300m.

Οι υπόλοιποι σχηματισμοί της περιοχής περιγράφονται στην Εικόνα 3.3 που ακολουθεί. Παρατίθεται επίσης η στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών, όπου συναντώνται οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι (Εικόνα 3.4).



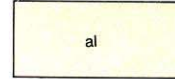
## ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

### ΟΛΟΚΑΙΝΟ

**Κώνιοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα:** λατύπες, κυρίως ανθρακικής σύστασης, ποικίλου μεγέθους, αναμεμιγμένες με ερυθρογή, χαλαρές και κατά θέσεις ελαφρά συγκολλημένες.



**Ποτάμιες αποθέσεις και αποθέσεις κλειστών λεκανών.**



### ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ - ΟΛΟΚΑΙΝΟ

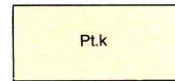
**Αδιαίρετες θαλάσσιες αναβαθμίδες και άμμοι ακτών.**



### ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

**Σχηματισμός Ηρακλείου:** θαλάσσιοι, βιοκλαστικοί, καλοστρωμένοι ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες με σταυρωτή στρώση, ψαμμίτικα κροκαλοπαγή και μάργες. Σε ασυμφωνία με τον υποκείμενο σχηματισμό Φοινικιάς.

Απολιθώματα:



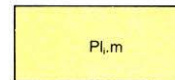
Πάχος: δεν υπερβαίνει τα 25 m.

## ΝΕΟΓΕΝΕΣ

### ΚΑΤΩΤΕΡΟ-ΜΕΣΟ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ

**Σχηματισμός Φοινικιάς:** λευκές, ομοιογενείς μάργες ή μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τεφρωπές αργίλοι με καστανές συχνά λεπτοστρωμένες παρεμβολές, λευκόφαιες απολιθωματοφόρες μάργες, φυλλώδεις μάργες ή διατομίτες (με υπολείμματα φυτών, ψαριών και βελόνες σπόγγων) και βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι. Η βάση του σχηματισμού γενικά συνίσταται από ένα αδιαβάθμητο «μαργαϊκό λατυποπαγές», με συστατικά λευκών ομοιογενών μαργών, ασβεστολίθων και μαργών του σχηματισμού Αγ. Βαρβάρας, πρασινωπών αργίλων και προνεογενών πετρωμάτων. Επίκειται ασύμφωνα του σχηματισμού Αγ. Βαρβάρας.

Απολιθώματα:

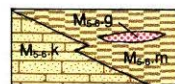


Πάχος: υπερβαίνει τα 150 m.

### ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

### ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΟΡΤΟΝΙΟ – ΜΕΣΣΗΝΙΟ

**Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας:** βιοκλαστικοί υφαλώδεις ασβεστόλιθοι ( $M_{5.6.k}$ ) κατά τόπους κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς, πλούσιοι σε *Clypeaster*, *Pecten*, *Heterostegina*, *Bryozoa* και *Κοράλλια* κατά θέσεις. Αυτά πλευρικά μεταβαίνουν σε εναλλαγές φυλλωδών και ομοιογενών συχνά ασβεστιτικών **μαργών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων** ( $M_{5.6.m}$ ) που ενίοτε βρίσκονται σε τοπική ασυμφωνία, με τον υποκείμενο σχηματισμό. Μέσα στις φυλλώδεις μάργες παρεμβάλλονται ενστρώσεις **γύψου ή κροκαλοπαγών γύψου** ( $M_{5.6.g}$ ). Οι φυλλώδεις μάργες συχνά περιέχουν υπολείμματα ψαριών και φυτικά λείψανα. Εντός αυτών προσδιορίστηκαν τα απολιθώματα:

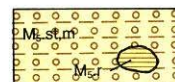


Πάχος: φθάνει τα 280 m.

### ΤΟΡΤΟΝΙΟ

**Σχηματισμός Αμπελούζου** ( $M_{5.st,m}$ ): ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους, μάργες και λιγνίτες. Παρεμβολές θραυσμάτων **υφάλων** ( $M_{5.r}$ ) με *Κοράλλια*, *Φύκη* και *Υδρόζωα*, κυρίως στο ανατολικό περιθώριο του Ψηλορείτη. Σε ασυμφωνία με το σχηματισμό Βιάννου και Προφ. Ηλία.

Απολιθώματα:



Μέγιστο πάχος: 300 m.

### ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

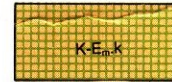
#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ-ΟΛΙΓΟΚΑΙΝΟ

**Φλύσσης:** εναλλαγές σοκολατόχρωων αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών με μικρές ενστρώσεις τεφρών ασβεστολιθικών τουρβιδιτών. Πρόκειται για μικρές εμφανίσεις με πάχος που δεν υπερβαίνει τα 40 m.



#### ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ-ΜΕΣΟ ΗΩΚΑΙΝΟ;

**Ασβεστόλιθοι:** τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτοι, βιτουμενιούχοι, κατά θέσεις μικρολατυποπαγείς και στα ανώτερα μέλη δολομιτικοί. Μέγιστο πάχος: 100 m περίπου.

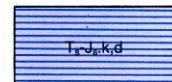


#### ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ – ΑΝΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ ;

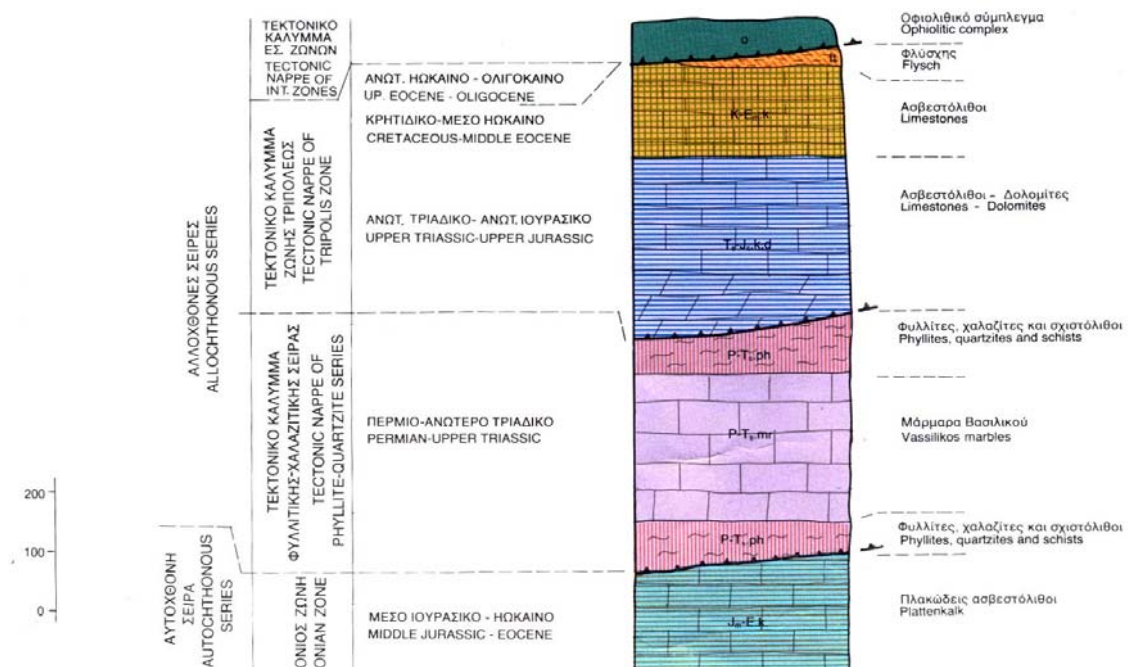
**Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες:** αποτελούν την βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλονιτωμένοι λόγω τεκτονισμού. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτους, τεφρόμαυρους, ενώ τα ανώτερα μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, μεσοστρωματώδεις, τεφρόλευκους μέχρι τεφρόμαυρους. Στο σύνολό τους είναι καρστικοί, κυρίως στα ανώτερα μέλη.

Μέγιστο πάχος: 300 m περίπου.

Η ηλικία συμπεραίνεται από συσχετισμό με γειτονικά φύλλα.



**Εικόνα 3.3.** Περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Ηρακλείου (ΙΓΜΕ - φύλλο Ηράκλειο 1:50.000).



**Εικόνα 3.4.** Στρωματογραφική στήλη αλπικών σχηματισμών (ΙΓΜΕ - φύλλο Ηράκλειο 1:50.000).



Η παιπάλη που συγκεντρώνει η Ασφαλτική Μπετόν ΑΕ προέρχεται τόσο από το συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος όσο και από τη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Στην πρώτη περίπτωση η παιπάλη συσσωρεύεται κατά τον καθαρισμό των χαλικιών με πεπιεσμένο αέρα κατά τη διέλευσή τους από ταινιοζυγό. Το λεπτόκοκκο υλικό απάγεται από τον αέρα και παγιδεύεται σε κυκλώνες και σακόφιλτρα (Εικόνα 3.5). Στην περίπτωση του ασφαλτομίγματος η απαγωγή της παιπάλης γίνεται στον κυλινδρικό περιστροφικό κλίβανο θέρμανσης των αδρανών από τα απαέρια του καυστήρα. Τελικοί συλλέκτες της παιπάλης είναι και πάλι κυκλώνες και σακόφιλτρα.



**Εικόνα 3.5.** Συλλογή της παιπάλης σε σακόφιλτρα.

Από τους κυκλώνες και τα σακόφιλτρα η παιπάλη μεταφέρεται σε ένα χώρο που είναι διαμορφωμένος υπό κλίση, ώστε αφού γίνει διαβροχή της με νερό να είναι εύκολο για τους φορτωτές να παραλάβουν τον πολφό και να τον μεταφέρουν στο τελικό σημείο απόθεσης (Εικόνες 3.6 και 3.7). Ωστόσο, η λύση αυτή είναι αναγκαστική χωρίς να επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Παρά τη διαβροχή, το πρόβλημα εξακολουθεί να υπάρχει αφού το υλικό που συσσωρεύεται εκεί με την πάροδο του χρόνου χάνει την υγρασία του και με τη μορφή λεπτότατης σκόνης παρασύρεται πολύ εύκολα και μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις δημιουργώντας προβλήματα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8, παρά τα μέτρα που λαμβάνει η εταιρεία για τη διαβροχή της παιπάλης, όλος ο χώρος του συγκροτήματος είναι καλυμμένος από ένα παχύ στρώμα παιπάλης.



**Εικόνα 3.6.** Κεκλιμένο επίπεδο συγκέντρωσης και διαβροχής της παιπάλης για τη μεταφορά της από φορτωτές.



**Εικόνα 3.7.** Τελικό σημείο απόθεσης του πολφού.



**Εικόνα 3.8.** Στρώμα παιπάλης στο χώρο της εταιρείας.

Στην ίδια περιοχή δραστηριοποιούνται άλλες τρεις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος. Η ποσότητα παιπάλης που συσσωρεύεται ετησίως και από τις τέσσερις αυτές εταιρείες υπολογίζεται ότι ανέρχεται στους 40000 τόνους.

Είναι σαφές λοιπόν, ότι εκτός από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από την απόρριψη της παιπάλης, παραμένει ανεκμετάλλευτη μια μεγάλη ποσότητα ασβεστολιθικού υλικού. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να γίνουν γνωστές οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν τις πιθανές χρήσεις του.

### **3.2 Εργαστηριακές μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό του υλικού**

Για τον χαρακτηρισμό του υλικού έγιναν αναλύσεις για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής και χημικής του σύστασης, της κοκκομετρικής του διαβάθμισης, της ειδικής επιφάνειας, του pH, καθώς και θερμοβαρυτομετρική ανάλυση.

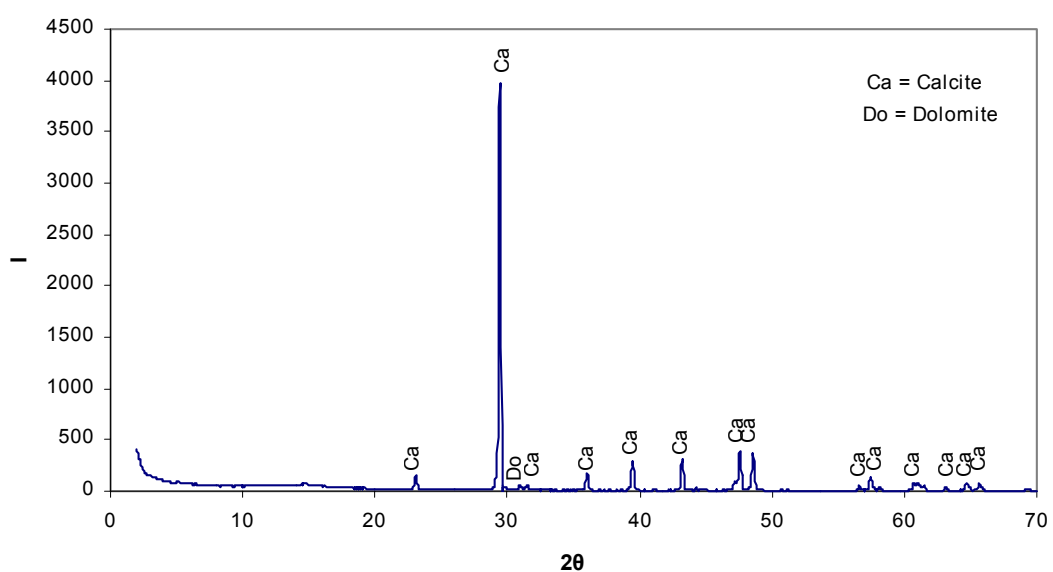
Η **ορυκτολογική ανάλυση** έγινε στο λεπτομερές υλικό με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction) χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D-500 της εταιρείας Siemens. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν σε παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως. Οι βασικές μονάδες του περιθλασίμετρου ακτίνων X είναι η μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης (35 KV), η λυχνία των ακτίνων X (Cu), γωνιόμετρο με ταχύτητα 1°/sec, απαριθμητής των κρούσεων και μονάδα μικροϋπολογιστή για καθοδήγηση του συστήματος και αξιολόγηση των καταγραφών.

Για τον προσδιορισμό των ορυκτολογικών φάσεων της παιπάλης χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα υλικού, η οποία τοποθετήθηκε στην κοιλότητα κατάλληλου πλαστικού υποδοχέα. Στη συνέχεια 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.

Ο απαριθμητής περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $2\theta/\text{min}$  και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα  $\theta/\text{min}$ , 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  $\theta$  εξαρτάται μόνο από την απόσταση  $d$ , πράγμα που επιτρέπει μετρώντας τη γωνία  $\theta$  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. Από την ορυκτολογική ανάλυση που έγινε στο λεπτόκοκκο ασβεστολιθικό υλικό προέκυψε το ακτινοδιάγραμμα της Εικόνας 3.9, όπου φαίνεται ότι τα ορυκτά που απαντώνται στην παιπάλη είναι ο ασβεστόλιθος και ο δολομίτης.



**Εικόνα 3.9.** Ακτινοδιάγραμμα ασβεστολιθικής παιπάλης

Η **χημική ανάλυση** έγινε τόσο στην ασβεστολιθική παιπάλη όσο και στο αρχικό πέτρωμα με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων X φθορισμού (X-ray fluorescence) με αυτόματο σύστημα τύπου SRS 303 της εταιρείας Siemens. Το σύστημα διαθέτει λυχνία παραγωγής πρωτογενούς ακτινοβολίας X με στοιχείο αντικαθόδου Rh, φίλτρο πρωτογενούς ακτινοβολίας, ευθυγραμμιστή, σύστημα 6 κρυστάλλων, ανιχνευτή ροής αερίου και ανιχνευτή σπινθηροβολισμού (Γαλετάκης, 1991).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής στηρίζεται στο φαινόμενο της εκπομπής δευτερογενούς ακτινοβολίας (φθορισμός) ακτίνων X από τα άτομα των στοιχείων, όταν αυτά διεγερθούν από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Η δέσμη των ακτίνων X φθορισμού διέρχεται κατόπιν από τον ευθυγραμμιστή για να γίνει παράλληλη και προσπίπτει στον αναλυτή κρύσταλλο, όπου και περιθλάται. Η περιθλώμενη ακτινοβολία μετριέται από τον ανιχνευτή, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε κατάλληλη γωνία  $2\theta$  και καταγράφει την ένταση της συγκεκριμένης ακτινοβολίας. Έτσι, μετρώντας το μήκος κύματος της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας των στοιχείων, με τη βοήθεια της εξίσωσης του Bragg  $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$  (ποσοτική ανάλυση) και του νόμου του Moseley  $1/\lambda^{1/2} = K(Z - \sigma)$  (ποιοτική ανάλυση) μπορούμε να υπολογίσουμε τον ατομικό αριθμό των στοιχείων, όπου  $K$ = σταθερά γνωστή για δεδομένη σειρά φασματικών γραμμών,  $\sigma$ = σταθερά,  $Z$ = ατομικός αριθμός στοιχείου.

Η σύσταση των υλικών που αναλύθηκαν φαίνεται στον πίνακα 3.1.

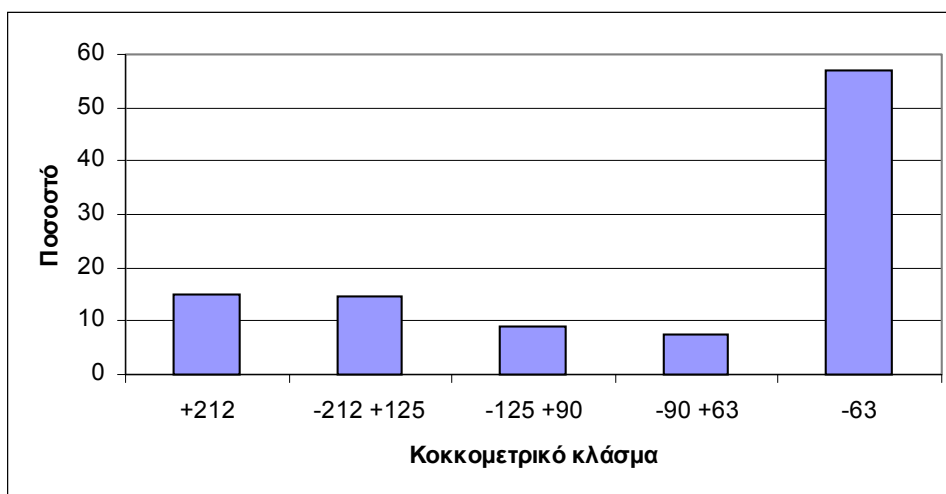
**Πίνακας 3.1.** Χημική ανάλυση ασβεστολιθικής παιπάλης και πετρώματος

Δείγμα	Περιγραφή	CaO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	SrO %	CO <sub>2</sub> %	CaCO <sub>3</sub> %
P1A	Παιπάλη	55.34	0.07	0.58	0.12	0.23	<0.1	<0.1	0.04	43.62	98.82
P1B	Παιπάλη	55.30	0.07	0.61	0.13	0.24	<0.1	<0.1	0.04	43.61	98.74
P2A	Παιπάλη	55.11	0.06	0.53	0.12	0.25	<0.1	<0.1	0.03	43.90	98.41
P2B	Παιπάλη	55.17	0.06	0.55	0.11	0.23	<0.1	<0.1	0.04	43.85	98.51
	Μέση τιμή	55.23	0.07	0.57	0.12	0.24	<0.1	<0.1	0.04	43.75	98.62
T1	Πέτρωμα	55.44	0.03	0.26	0.10	0.24	<0.1	<0.1	0.04	43.89	99.00
T2	Πέτρωμα	55.34	0.03	0.36	0.10	0.23	<0.1	<0.1	0.04	43.90	98.83
	Μέση τιμή	55.39	0.03	0.31	0.10	0.24	<0.1	<0.1	0.04	43.90	98.91

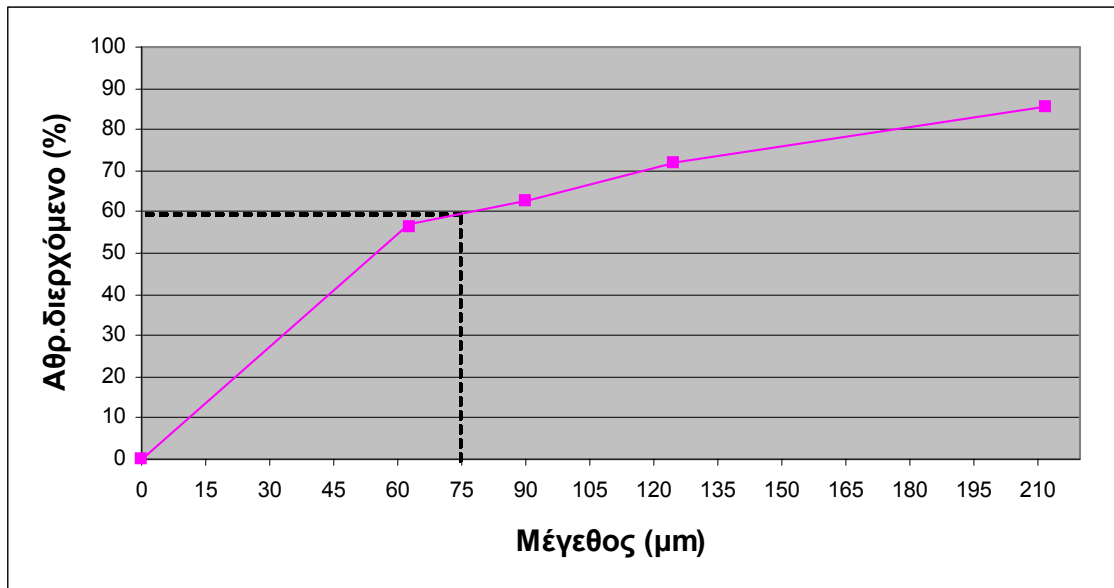
Παρατηρείται ότι τα δείγματα της παιπάλης έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και ελαφρά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε  $\text{CaO}$ . Η μεταβολή αυτή σχετίζεται με την τάση συγκέντρωσης των αργιλοπυριτικών προσμίξεων του ασβεστόλιθου στα λεπτότερα κλάσματα.

Η **κοκκομετρική ανάλυση** έγινε τόσο με τη μέθοδο υγρής κοσκίνισης όσο και με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser. Με τη μέθοδο περίθλασης των ακτίνων Laser μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου ( $d_v$ ) και το εύρος μεγεθών που μετρείται περιλαμβάνει πολύ λεπτά σωματίδια που δεν υπολογίζονται εύκολα με τις άλλες μεθόδους. Αντίθετα, στην κλασική κοσκίνιση μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας ( $d_a$ ) που έχει την ίδια προβαλλόμενη επιφάνεια σε οριζόντιο επίπεδο με το υπό εξέταση σωματίδιο και είναι κατάλληλη για μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια (Σταμπολιάδης, 1995).

Η υγρή κοσκίνιση έχει το πλεονέκτημα ότι σπάζει τα συσσωματώματα των κόκκων, έχει όμως το μειονέκτημα ότι απαιτείται στη συνέχεια ξήρανση των δειγμάτων. Από το Διάγραμμα 3.1 φαίνεται ότι το υλικό δεν αποτελείται μόνο από κόκκους με μέγεθος  $<75\mu\text{m}$  (όπως ορίζεται η παιπάλη), αλλά περιέχει και σημαντικό ποσοστό κόκκων σε μεγαλύτερα κλάσματα. Το κλάσμα των  $75\mu\text{m}$  αποτελεί το 60% περίπου του υλικού, όπως υπολογίστηκε από το διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής για το διερχόμενο κλάσμα (Διάγραμμα 3.2). Ωστόσο, στη συνέχεια της εργασίας το υλικό χαρακτηρίζεται παιπάλη λόγω του λεπτότατου καταμερισμού του.



**Διάγραμμα 3.1.** Κοκκομετρική διαβάθμιση της ασβεστολιθικής παιπάλης



**Διάγραμμα 3.2.** Κοκκομετρική κατανομή για το αθροιστικώς διερχόμενο.

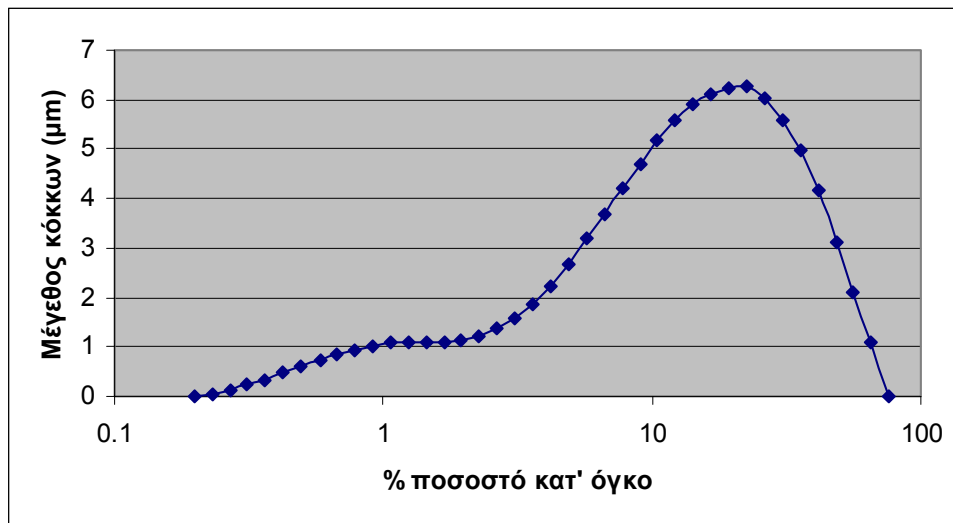
Η μέθοδος της περίθλασης ακτίνων Laser στηρίζεται στην διάχυση και διάθλαση των ακτίνων από αιωρούμενα σωματίδια. Καθώς η ακτίνα Laser διέρχεται από το προς ανάλυση δείγμα ανακλάται σχηματίζοντας ένα μεγάλο εύρος γωνιών σε σχέση με τον ανιχνευτή που βρίσκεται απέναντι. Το εύρος των γωνιών ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που εξετάζονται. Εκτός από το μέγεθος των σωματιδίων, η διέλευση της ακτίνας Laser εξαρτάται και από την πυκνότητά τους.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του δείγματος αποτελείται από τις εξής βασικές μονάδες:

- Πηγή Laser ως πηγή φωτός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Το Laser είναι τύπου He-Ne ( $\lambda=0.63\mu\text{m}$ ), ιδιαίτερα διαδεδομένο, καθώς προσφέρει ακρίβεια και μικρό σήμα θορύβου απ' ό,τι τα Laser μεγαλύτερου μήκους κύματος.
- Ανιχνευτής. Συνήθως υπάρχει ένα τεμάχιο από φωτοευαίσθητη σιλικόνη με έναν αριθμό διακεκριμένων ανιχνευτών. Χρησιμοποιείται ένας βέλτιστος αριθμός ανιχνευτών, χωρίς να σημαίνει ότι ο μεγάλος αριθμός δηλώνει καλύτερη ανάλυση ([www.malvern.co.uk](http://www.malvern.co.uk)).

Η ανάλυση που έγινε με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.3. Από τη μορφή της καμπύλης συμπεραίνεται ότι πρόκειται για δύο πληθυσμούς, εκ των οποίων ο μικρότερος πιθανόν να αντιστοιχεί στα αργιλικά ορυκτά που συγκεντρώνονται στο λεπτότερο κλάσμα του ασβεστόλιθου.





**Διάγραμμα 3.3.** Κοκκομετρική διαβάθμιση της ασβεστολιθικής παιπάλης για το κλάσμα -63μm.

Η μέτρηση της **ειδικής επιφάνειας** της παιπάλης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο B.E.T (Brunauer, Emmett και Teller). Η ειδική επιφάνεια ενός δείγματος σκόνης μπορεί να μετρηθεί από την απορρόφηση κάποιου αερίου που γίνεται πάνω στην επιφάνεια των κόκκων. Ο όγκος του απορροφούμενου αερίου είναι μεγαλύτερος όσο μειώνεται η θερμοκρασία. Ο ισοδύναμος όγκος του απορροφούμενου αερίου που χρειάζεται για να σχηματιστεί ένα μόνο στρώμα μορίων πάνω στην επιφάνεια του στερεού συμβολίζεται με  $V_m$ . Οι B.E.T. έδωσαν την εξίσωση που συνδέει την πίεση και τον όγκο του απορροφούμενου αερίου:

$$\frac{P}{V(P - P_o)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \frac{P}{P_o}$$

όπου  $V$  ο όγκος του αερίου που απορροφάται σε πίεση  $P$  και θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών του υγρού αερίου είναι  $P_o$  και  $C$  σταθερά.

Σε ένα διάγραμμα του  $P/V(P_o - P)$  συναρτήσει του  $P/P_o$  η παραπάνω εξίσωση είναι μια ευθεία γραμμή που τέμνει τον κατακόρυφο άξονα στο  $1/V_m C$  και έχει κλίση  $(C - 1)/V_m C$ . Από αυτά υπολογίζουμε τα  $V_m$  και  $C$ . Τέλος, η ειδική επιφάνεια  $S_w$  για την απορρόφηση αζώτου υπολογίζεται από την σχέση  $S_w = 4.35 V_m/W$ , όπου  $W$  το βάρος του δείγματος σε γραμμάρια.



Πριν πραγματοποιηθεί το πείραμα της προσρόφησης, η στερεή επιφάνεια θα πρέπει να απελευθερωθεί από παράγοντες όπως το νερό και τα έλαια. Ο καθαρισμός της επιφάνειας (εξάερωση) γίνεται με την τοποθέτηση του δείγματος σε γυάλινο κελί και τη θέρμανσή του, υπό κενό ή με ροή αερίου, για χρονικό διάστημα 12 ωρών.

Μόλις το δείγμα καθαριστεί, αποκαθίσταται μια σταθερή θερμοκρασία με τη βοήθεια ενός εξωτερικού λουτρού. Κατόπιν, μικρά ποσά αερίου αζώτου εισάγονται βαθμηδόν στον εκκενωθέντα θάλαμο του δείγματος. Τα μόρια του αερίου που προσκολλούνται στην επιφάνεια του στερεού καλούνται προσροφημένα και τείνουν να σχηματίσουν ένα λεπτό στρώμα που καλύπτει ολόκληρη την προσροφητική επιφάνεια. Με βάση τη γνωστή θεωρία των B.E.T. μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα βάρους στερεού που απαιτείται για να καλυφθεί η προσροφητική επιφάνεια με ένα μονομοριακό στρώμα προσροφημένων μορίων. Πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των μορίων με τη διατομή της επιφάνειας ενός μορίου προσροφημένης ουσίας προκύπτει η ειδική επιφάνεια του δείγματος.

Η ειδική επιφάνεια της ασβεστολιθικής σκόνης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο απορρόφησης αζώτου (BET) κυμαίνεται από 1.1 ως 1.6 m<sup>2</sup>/g.

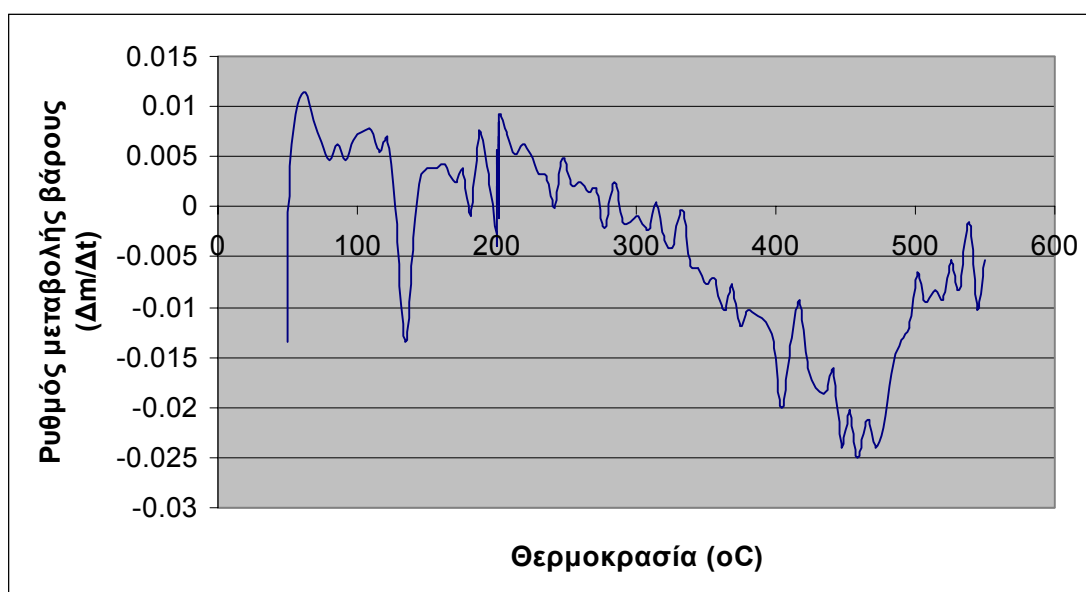
**Η θερμοβαρυτομετρική ανάλυση** πραγματοποιήθηκε με τον θερμοζυγό TGA-6 της εταιρείας Perkin Elmer. Ο θερμοζυγός υποστηρίζεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο λειτουργίας και την διαχείριση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού PYRIS. Τα κύρια μέρη του θερμοζυγού είναι ο φούρνος και ο ηλεκτρονικός μικρο-ζυγός. Η θερμοκρασιακή κλίμακα λειτουργίας του φούρνου είναι από 0-100°C με ακρίβεια 2°C και ο ρυθμός θέρμανσης κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100 °C/min. Η θέρμανση του δείγματος γίνεται με συνδυασμό ακτινοβολίας και κυκλοφορίας φέροντος αερίου.

Για την εκτέλεση του πειράματος, δείγμα 35mg τοποθετείται στον δειγματοφορέα και κατόπιν στον υποδοχέα μέσα στον φούρνο. Ο υποδοχέας συνδέεται με τον ζυγό μέσω ενός βραχίονα με δύο μέρη, ο οποίος αντισταθμίζεται από ένα απόβαρο. Ο βραχίονας στηρίζεται σε ηλεκτρικό πηνίο που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η θέση του βραχίονα υπολογίζεται από έναν οπτικό αισθητήρα και οποιαδήποτε εκτροπή προκαλεί

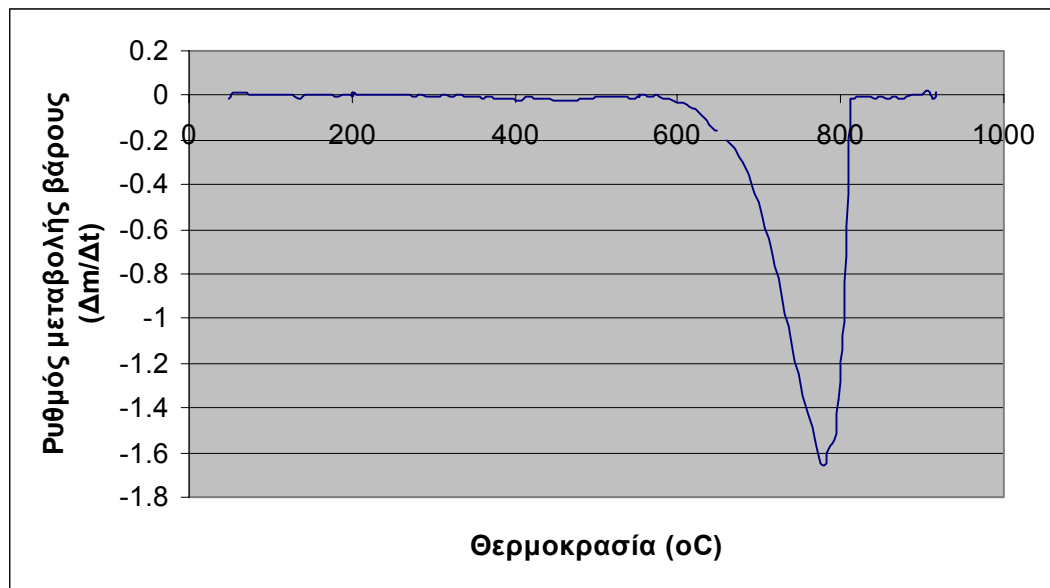
παροχή ρεύματος στο πηνίο. Η σχετική αλλαγή θέσης του βραχίονα σε σχέση με την θέση αναφοράς προσδιορίζει την μέτρηση της μάζας του δείγματος (Καστανάκη, 2002). Οι πειραματικές συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής ήταν οι εξής:

Το δείγμα παρέμεινε στους 50°C για ένα λεπτό, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 50°C στους 200°C έγινε με ρυθμό 10°C/min. Το δείγμα παρέμεινε σ' αυτή τη θερμοκρασία για διάστημα 15 λεπτών ώστε να παρατηρηθεί η μεταβολή του βάρους λόγω αποβολής της υγρασίας. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 200°C στους 550°C με ρυθμό ξανά 10°C/min και το δείγμα παρέμεινε εκεί για 15 λεπτά. Στο συγκεκριμένο διάστημα μεταβολής της θερμοκρασίας παρατηρείται η καύση και απομάκρυνση των οργανικών υλικών. Το τελικό στάδιο του πειράματος περιελάμβανε άνοδο της θερμοκρασίας ως τους 900°C με ρυθμό 10°C/min και παραμονή του δείγματος για 15 λεπτά. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται η διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου.

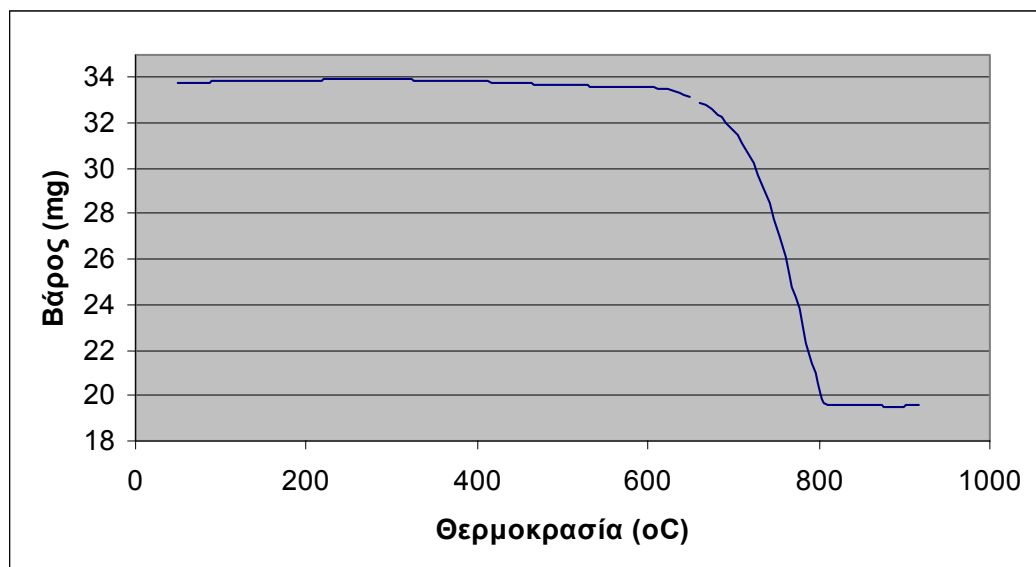
Το Διάγραμμα 3.4 απεικονίζει τη μεταβολή για θερμοκρασίες από 0°C έως 550°C όπου παρατηρούνται σχετικά μικρές μεταβολές του βάρους, ενώ αντίθετα το Διάγραμμα 3.5 απεικονίζει την έντονη μεταβολή που προκύπτει λόγω της διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου σε όλο το εύρος θερμοκρασιών του πειράματος. Το Διάγραμμα 3.6 απεικονίζει τη μεταβολή του βάρους ως προς τον χρόνο.



**Διάγραμμα 3.4.** Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης έως τους 550°C



**Διάγραμμα 3.5.** Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης έως τους καθ' όλη τη διάρκεια της καύσης.



**Διάγραμμα 3.6.** Μεταβολή του βάρους του υλικού κατά την καύση ως προς τον χρόνο

Η μέτρηση του pH πολφού έγινε σε  $\theta=25^{\circ}\text{C}$  και αναλογία ασβεστολιθική σκόνη / νερό 1:2. Η μέση τιμή που προέκυψε είναι  $\text{pH}=8.71$ .

Ο δείκτης λευκότητας είναι μικρότερος του 80%.

### 3.3 Αξιολόγηση της παιπάλης με χρήση κριτηρίων

Γνωρίζοντας τις παραπάνω βασικές ιδιότητες του υλικού και με τη βοήθεια του Πίνακα 3.2 είναι δυνατό να εκτιμηθεί η καταλληλότητά του για χρήση σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Οι τιμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν είτε όρια που θέτουν οι βιομηχανίες είτε όρια προδιαγραφών. Ο πίνακας αυτός αποτελεί έναν οδηγό για την προκαταρκτική αξιολόγηση λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών συγκρίνοντας τις τιμές του με εκείνες που έχει το προς εξέταση υλικό.

Εκτός όμως από τις τιμές των ιδιοτήτων του υλικού, χρησιμοποιούνται και κάποιοι δείκτες που σχετίζονται με την σημασία που έχει η συγκεκριμένη ιδιότητα για την παραγωγή κάποιου προϊόντος όσο και το κατά πόσο εύκολα ή δύσκολα επεξεργάζεται το υλικό ώστε να προσεγγίσουν οι τιμές της ιδιότητας τα όρια του πίνακα. Η σημαντικότητα της ιδιότητας του υλικού για τον κάθε τομέα αποδίδεται με έναν αριθμό από το 1 έως το 10: Ο αριθμός 1 εκφράζει την απουσία σημασίας, το 5 εκφράζει μέση σημασία και το 10 μέγιστη. Όταν η τιμή μιας ιδιότητας μπορεί εύκολα με κάποια επεξεργασία να προσεγγίσει το όριο των προδιαγραφών χρησιμοποιείται το σύμβολο +, όταν υπάρχει δυσκολία το σύμβολο -, ενώ σε μια ενδιάμεση περίπτωση το σύμβολο ± (Kolb, 2001).

Τέλος, όταν μετά από συνδυασμό των παραπάνω δεικτών, η τιμή της ιδιότητας του υλικού ανταποκρίνεται στην τιμή των προδιαγραφών το αντίστοιχο κελί απεικονίζεται με ένα χρώμα ενώ στην αντίθετη περίπτωση με κάποιο άλλο. Γίνεται έτσι σαφές σε ποιες περιπτώσεις η πρώτη ύλη είναι κατάλληλη για χρήση και σε ποιες όχι.

Συγκρίνοντας τις τιμές των ιδιοτήτων της ασβεστολιθικής παιπάλης που προέρχονται από τις εργαστηριακές αναλύσεις με εκείνες των προδιαγραφών του πίνακα 3.2 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το σύνολο των ανθρακικών και οι υπόλοιπες ενώσεις που προσδιορίστηκαν καλύπτουν τις προδιαγραφές,
- το pH είναι ελαφρώς χαμηλότερο (απαιτείται >9 στις περισσότερες περιπτώσεις),
- το μέγεθος των κόκκων είναι ικανοποιητικό για τις περισσότερες εφαρμογές,

- ο η λευκότητα των δειγμάτων της παιπάλης είναι μικρότερη του 80 (απαιτείται >91).

Προσδιορισμός της απορρόφησης λαδιού δεν έχει γίνει, ενώ η ειδική επιφάνεια μετρήθηκε κατά B.E.T. κι έτσι οι τιμές δεν είναι συγκρίσιμες.

Εκτός όμως από τις τιμές των ιδιοτήτων του υλικού, σημαντικό ρόλο για την αξιοποίησή του παίζει η γεωγραφική θέση όπου παράγεται. Στην Κρήτη δεν υπάρχουν οι περισσότερες από τις βιομηχανίες που μπορούν να απορροφήσουν το υλικό και η μεταφορά της πρώτης ύλης εκτός του νησιού είναι οικονομικά ασύμφορη. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια της εργασίας διερευνάται η δυνατότητα χρήσης της ασβεστολιθικής παιπάλης στην παραγωγή δομικών στοιχείων. Στην περίπτωση των δομικών στοιχείων δεν απαιτείται κάποια περαιτέρω επεξεργασία του υλικού ώστε οι ιδιότητές του να προσεγγίζουν τιμές προδιαγραφών, απαιτείται όμως μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης σύνθεσης, με δεδομένο τη δυσκολία που παρουσιάζουν τα μίγματα λεπτόκοκκων αδρανών, όπως η παιπάλη και το τσιμέντο.

	Ορυκτολογικές και χημικές ιδιότητες												Φυσικές ιδιότητες				
	Σύνολο ανθρακικών	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Αδιάλυτο HCl	Απώλεια πύρωσης	pH	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων	Παραμένον (40 μm) d <sub>50</sub> , d <sub>30</sub> , d <sub>10</sub>	Ειδική επιφάνεια (κατά Blaine)	Λευκότητα	Απορρόφηση λαδιού
Βιομηχανία χάρτου (φίλερ)	98 (-8)	-	>	<0.15 (+8)	-	-	-	-	-	<1.5(±8)	44(-1)	9.5 (±6)	<30μm(+6)	<0.1% d <sub>50</sub> =5μm d <sub>30</sub> =0.5μm d <sub>10</sub> =15μm (+8)	4000- 8000cm <sup>2</sup> /g (+6)	93.5(±10)	15g/100g (+10)
Βιομηχανία χάρτου (επικάλυμμα)	>98 (-8)	-	-	<0.15 (+8)	-	-	-	-	<0.1 (-2)	<0.7(±8)	>44(-1)	9 (-8)	90%<2μm(+6)	0.01% d <sub>50</sub> =0.8μm d <sub>30</sub> =0.15μm d <sub>10</sub> =2μm (+8)	>30000 cm <sup>2</sup> /g (+7)	>94(±10)	-(+1)
Βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών	-	-	>	<0.15 (+8)	-	-	-	-	-	<1.5(±7)	-	(+9)	<60μm <30μm (+8)	<0.1%(+8)	4000- 8000cm <sup>2</sup> /g (+8)	>91-94 (±10)	15-20g/100g (+10)
Βιομηχανία πλαστικών	-	-	>	<0.15 (+8)	<1 (-10)	-	-	-	-	<1.5(±7)	-	(+9)	<60μm <30μm(+8)	<0.1% d <sub>50</sub> =5 μm d <sub>30</sub> =0.5 μm d <sub>10</sub> =15μm (+6)	4000- 8000cm <sup>2</sup> /g (+8)	>91(±8)	15-20g/100g (+10)
Χημική βιομηχανία – περιβαλλοντικ ές τεχνολογίες	>95 (-8)	-	-	-	-	<0.1 (-6)	<0.1 (-6)	-	<	<5(±10)	42(-1)	-	<90μm(+6)	<150 μm (+6)	>>(+6)	-	-(+1)
Βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών	92 (-8)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<60μm(+6)	<15-20 μm(+6)	4000- 8000cm <sup>2</sup> /g (+6)	-	>20g/100g (+10)
Βιομηχανία λιπασμάτων	60 (-8)	-	(-5)	-	<1 (-10)	-	-	-	-	<1(±10)	-	-	<90μm (+8)	-	>>(+6)	-	-(+1)
Βιομηχανία παραγωγής σιδήρου	>92	-	<	-	-	<	<	<	-	<	-	-	0.8mm(+6)	-	-	-	-
Βιομηχανία γυαλιού	>97 (-8)	-	-	<0.1 (+10)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1-0.3mm(+8)	-	-	-	-(+1)

**Πίνακας 3.2.** Προδιαγραφές και δείκτες για την αξιολόγηση λεπτόκοκκου ασβεστολιθικού υλικού (Kolb, 2001).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

#### 4.1 Εισαγωγή

Οι τεχνικές βελτίωσης της ποιότητας που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό αποσκοπούν στη βέλτιστη εκλογή των τιμών των ελεγχόμενων παραμέτρων προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών, ώστε τα χαρακτηριστικά ποιότητας να προσεγγίζουν όσο περισσότερο γίνεται τις επιθυμητές τιμές. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των τυχαίων παραγόντων, είτε κατά την παραγωγή είτε κατά την λειτουργία, στα χαρακτηριστικά της ποιότητας.

Η ορθολογική σχεδίαση και η βελτίωση προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών επιτυγχάνονται κυρίως μέσω του σχεδιασμού, εκτέλεσης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων στατιστικών πειραμάτων (designed experiments). Σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι η επιβεβαίωση υποθέσεων ή η διερεύνηση σχέσεων μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του εξεταζόμενου συστήματος.

Ο πειραματισμός αποτελούσε πάντοτε βασικό στάδιο στην ανάπτυξη νέων προϊόντων και διαδικασιών ή στη βελτίωση ήδη υπαρχόντων. Η ανάγκη για πειραματισμό με οργανωμένο και συστηματοποιημένο τρόπο παραπέμπει στον Francis Bacon και το κρίσιμο πείραμά του, όπου ακολουθήθηκε η μέθοδος πειραματισμού με αλλαγή ενός παράγοντα κάθε φορά. Κατά τη μέθοδο αυτή, παρατηρούνται τα αποτελέσματα που επιφέρει στην ποιότητα του προϊόντος η αλλαγή ενός παράγοντα όταν όλοι οι άλλοι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί. Η διαδικασία αυτή, πέρα από το γεγονός ότι είναι χρονοβόρα όταν εξετάζονται πολλοί παράγοντες, μπορεί να οδηγήσει σε αναξιόπιστα και λανθασμένα αποτελέσματα (Λογοθέτης, 1993).

Όμως, η αποτελεσματική σχεδίαση σύνθετων πειραμάτων και η επιστημονική ανάλυση των αποτελεσμάτων τους χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1920, οπότε ο sir Ronald Fisher ανέπτυξε και χρησιμοποίησε την ανάλυση μεταβλητότητας για να μελετήσει την επίδραση χρήσης διαφόρων λιπασμάτων στην απόδοση γεωργικών καλλιεργειών. Οι σχετικές τεχνικές που μελετήθηκαν και εξελίχθηκαν στη συνέχεια

από πληθώρα ερευνητών, είναι γνωστές με τον γενικό όρο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiments–DOE) και αφορούν στην ανάλυση των επιδράσεων μίας ή περισσότερων μεταβλητών στη μέση τιμή μιας εξαρτημένης μεταβλητής (Ταγαράς, 2001).

Γενικά, ο σχεδιασμός πειραμάτων ακολουθεί ορισμένα στάδια, τα οποία είναι:

- Διατύπωση της στατιστική υπόθεσης που είναι συναφής με το επιστημονικό πρόβλημα
- Προσδιορισμό των πειραματικών συνθηκών (εξαρτημένη μεταβλητή, ανεξάρτητες μεταβλητές και τα επίπεδά τους και μη ελεγχόμενοι παράγοντες)
- Προσδιορισμός του πειραματικού σχεδιασμού που θα ακολουθηθεί
- Εκτέλεση του πειράματος
- Στατιστική ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Kirk, 1995).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση μεταβλητότητας αρχικά για την πιο απλή περίπτωση, όπου δηλαδή γίνεται στατιστικό πείραμα με την εξέταση ενός μόνο παράγοντα που επηρεάζει τη μέση τιμή του χαρακτηριστικού ποιότητας, και έπειτα για περιπτώσεις με περισσότερους παράγοντες. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία Taguchi που έχει ως βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας του χαρακτηριστικού ποιότητας.

#### **4.2 Στατιστικά πειράματα με έναν παράγοντα**

Ο πιο απλός τύπος στατιστικών πειραμάτων είναι εκείνος που εξετάζει την επίδραση ενός μόνο ελεγχόμενου παράγοντα σε συγκεκριμένη μεταβλητή απόκρισης. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να είναι παράμετρος ενός προϊόντος ή παράμετρος μιας παραγωγικής διαδικασίας. Η μεταβλητή απόκρισης είναι το χαρακτηριστικό ποιότητας του οποίου οι τιμές ενδιαφέρουν τον μελετητή.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων τέτοιων πειραμάτων γίνεται με την τεχνική της ανάλυσης μεταβλητότητας (Analysis of Variance – ANOVA) που περιγράφεται στη συνέχεια.



### Ανάλυσης μεταβλητότητας

Σκοπός των πειραμάτων με έναν παράγοντα είναι να εξακριβωθεί κατά πόσο οι τιμές μιας τυχαίας μεταβλητής  $Y$  είναι συνάρτηση των τιμών του παράγοντα. Έστω ότι εξετάζονται  $a$  διαφορετικές τιμές του παράγοντα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδρασή του. Τα αποτελέσματα ενός πειράματος με  $n$  παρατηρήσεις για κάθε μια από τις  $a$  τιμές του παράγοντα παρουσιάζονται με τη μορφή του πίνακα 4.1, όπου  $y_{ij}$  είναι η  $j$  τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $Y$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) για τον παράγοντα  $i$  ( $i=1,2,\dots,a$ ). Τα δεδομένα  $y_{ij}$  θεωρείται ότι ακολουθούν το μαθηματικό πρότυπο (Ταγαράς, 2001)

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \dots\dots\dots (4.1)$$

όπου  $\mu$  είναι η συνολική μέση τιμή της μεταβλητής  $Y$ ,  $\tau_i$  είναι η επίδραση της τιμής  $i$  του παράγοντα και  $\varepsilon_{ij}$  είναι το τυχαίο σφάλμα, που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και μεταβλητότητα  $\sigma^2$ . Η μεταβλητότητα  $\sigma^2$  θεωρείται σταθερή σε όλα τα επίπεδα τιμών του παράγοντα και προέρχεται από σφάλματα μέτρησης και άλλους παράγοντες που μπορεί να επιδρούν στη διαμόρφωση των τιμών της  $Y$  αλλά δεν περιλαμβάνονται στον πειραματικό σχεδιασμό. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανή επίδραση τέτοιων παραγόντων ώστε να προσδιοριστεί η πραγματική επίδραση του εξεταζόμενου παράγοντα και μόνο, είναι σκόπιμο οι παρατηρήσεις να λαμβάνονται με τυχαία σειρά, οπότε ο σχεδιασμός του πειράματος λέγεται πλήρως τυχαιοποιημένος.

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα πειράματος με έναν παράγοντα

Τιμή παράγοντα $i$	Τιμές μεταβλητής $Y$	Σύνολο	Μέση τιμή
1	$y_{11} \ y_{12} \dots y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	$y_{21} \ y_{22} \dots y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
...	.....	...	...
...	.....	...	...
...	.....	...	...
<b>a</b>	$y_{a1} \ y_{a2} \dots y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
		$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Οι τιμές  $y_{i.}$  του πίνακα 4.1 είναι τα αθροίσματα των  $n$  παρατηρήσεων στο επίπεδο τιμών  $i$  του παράγοντα, ενώ με  $\bar{y}_{i.}$  συμβολίζονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές:

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad i=1,2,\dots,a \quad (4.2)$$

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad i=1,2,\dots,a \dots\dots\dots (4.3)$$

Η τιμή  $y_{..}$  αποτελεί το συνολικό άθροισμα όλων των παρατηρήσεων και η  $\bar{y}_{..}$  είναι η συνολική μέση τιμή:

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (4.4)$$

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{an} \quad (4.5)$$

δηλαδή η τελεία ως δείκτης εκφράζει άθροιση ως προς τον δείκτη τον οποίο αντικαθιστά.

Η επιλογή των  $a$  διαφορετικών επιπέδων τιμών του παράγοντα μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους. Ο συνηθέστερος είναι αυτός κατά τον οποίο ο ερευνητής επιλέγει  $a$  συγκεκριμένες τιμές και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το πείραμα αφορούν αυτά και μόνο τα επίπεδα τιμών. Το πρότυπο λέγεται τότε ορισμένων επιδράσεων. Κατά τον δεύτερο τρόπο, τα  $a$  επίπεδα τιμών του παράγοντα επιλέγονται τυχαία από ένα ευρύ σύνολο τιμών και τα συμπεράσματα της ανάλυσης επεκτείνονται τότε σε όλες τις τιμές αυτού του συνόλου. Αυτό το πρότυπο λέγεται τυχαίων επιδράσεων. Η στατιστική ανάλυση των δύο προτύπων είναι παρόμοια, αλλά η ερμηνεία των αποτελεσμάτων διαφέρει.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση μεταβλητότητας για το πρότυπο ορισμένων επιδράσεων. Στην περίπτωση του προτύπου αυτού, τα  $\tau_i$  ορίζονται ως αποκλίσεις από την συνολική μέση τιμή

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (4.6)$$

και το πείραμα αποσκοπεί στον έλεγχο της υπόθεσης ισότητας των μέσων τιμών της  $Y$  σε όλα τα  $a$  επίπεδα τιμών που επελέγησαν. Συγκεκριμένα, η μηδενική υπόθεση  $H_0$  και η εναλλακτική υπόθεση  $H_1$  διατυπώνονται μαθηματικά ως εξής:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad \text{και} \quad H_1 : \exists i : \tau_i \neq 0 \quad (4.7)$$

Απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης σημαίνει ότι η μέση τιμή της  $Y$  παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές σε διαφορετικά επίπεδα τιμών του παράγοντα, άρα οι τιμές της  $Y$  επηρεάζονται πράγματι από τις τιμές του ελεγχόμενου παράγοντα.

Η διαδικασία στατιστικού ελέγχου των υποθέσεων (4.7) με χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων του πίνακα 4.1 λέγεται ανάλυση μεταβλητότητας ή ανάλυση διασποράς, διότι βασίζεται στο διαχωρισμό της συνολικής διασποράς των δεδομένων στα δύο συστατικά της, δηλαδή στη μεταβλητότητα των τιμών  $y_{ij}$  που οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα τιμών του εξεταζόμενου παράγοντα και σε εκείνη που οφείλεται σε άλλους παράγοντες (τυχαίο σφάλμα).

Συγκεκριμένα, η συνολική διασπορά των τιμών  $y_{ij}$  εκφράζεται από το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των  $y_{ij}$  από τη συνολική μέση τιμή τους  $\bar{y}_{..}$  (Ταγαράς, 2001):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.8)$$

Το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων  $SS_T$  (Sum of Squares Total) μπορεί να αναλυθεί και να πάρει τελικά τη μορφή:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (4.9)$$

όπου πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της (3.9) περιέχει το άθροισμα τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των μέσων τιμών στα διάφορα επίπεδα  $i$  του παράγοντα και της συνολικής μέσης τιμής, εκφράζοντας τη μεταβλητότητα που οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα τιμών του παράγοντα και συμβολίζεται  $SS_F$  ( $F=Factor$ ):

$$SS_F = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.10)$$

Ο δεύτερος όρος στο δεξί σκέλος της (4.9) είναι το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των μεμονωμένων τιμών  $y_{ij}$  και της μέσης τιμής για το αντίστοιχο επίπεδο τιμών  $i$  του παράγοντα. Εκφράζει, δηλαδή, μια μεταβλητότητα που οφείλεται στο τυχαίο σφάλμα και συμβολίζεται  $SS_E$  ( $E=Error$ ):

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (4.11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.10) και (4.11) η σχέση (4.9) μπορεί να εκφρασθεί ως

$$SS_T = SS_F + SS_E \quad (4.12)$$

Είναι πλέον προφανές ότι το συνολικό άθροισμα τετραγώνων  $SS_T$  αποτελείται από δύο επιμέρους αθροίσματα τετραγώνων: το πρώτο άθροισμα εκφράζει το μέγεθος της επίδρασης του παράγοντα ( $SS_F$ ) και το δεύτερο την επίδραση του τυχαίου σφάλματος ( $SS_E$ ). Όσο μεγαλύτερο είναι το άθροισμα των τετραγώνων  $SS_F$ , που οφείλεται στις διαφορετικές τιμές του ελεγχόμενου παράγοντα, σε σχέση με το άθροισμα των τετραγώνων  $SS_E$ , που οφείλεται στο τυχαίο σφάλμα, τόσο ισχυρότερη είναι η ένδειξη σημαντικής επίδρασης του παράγοντα στη μέση τιμή της μεταβλητής  $Y$ .

Η παραπάνω σύγκριση γίνεται πιο κατανοητή όταν διαιρούνται τα αθροίσματα τετραγώνων με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Το άθροισμα  $SS_F$  έχει  $a-1$  βαθμούς ελευθερίας, καθώς αποτελείται από  $a$  όρους οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω της συνολικής μέσης τιμής. Το άθροισμα  $SS_E$  έχει  $n-1$  βαθμούς ελευθερίας σε κάθε επίπεδο  $i$  του παράγοντα, άρα συνολικά  $a(n-1)$  βαθμούς ελευθερίας. Εφόσον υπάρχουν συνολικά  $an$  δεδομένα, το άθροισμα  $SS_T$  έχει  $an-1$  βαθμούς ελευθερίας. Οι λόγοι των αθροισμάτων τετραγώνων  $SS_F$ ,  $SS_E$  προς τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας λέγονται μέσα τετράγωνα

$$MS_F = \frac{SS_F}{a-1} \quad \text{και} \quad MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)} \quad (4.13)$$

Το μέσο τετράγωνο σφάλματος  $MS_E$  είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της μεταβλητότητας  $\sigma^2$  του τυχαίου σφάλματος, όπως είναι και το μέσο τετράγωνο του παράγοντα όταν ισχύει η μηδενική υπόθεση. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, όταν ισχύει η μηδενική υπόθεση, ο λόγος  $F_0 = MS_F / MS_E$  ακολουθεί κατανομή  $F$  με  $a-1$  και  $a(n-1)$  βαθμούς ελευθερίας. Επομένως, η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$  όταν  $F_0 > F_{1-\alpha, a-1, a(n-1)}$ , οπότε συμπεραίνεται ότι ορισμένες τουλάχιστον επιδράσεις  $\tau_i$  των διαφόρων τιμών του παράγοντα είναι μη μηδενικές, άρα οι μέσες τιμές της  $Y$  διαφέρουν σημαντικά και τελικά οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής  $Y$  εξαρτώνται από τις τιμές του παράγοντα που εξετάζουμε στο πείραμα (Οι τιμές  $F_{1-\alpha, a-1, a(n-1)}$  προκύπτουν από πίνακες που παρατίθενται στο παράρτημα).

Η ανάλυση μεταβλητότητας παρουσιάζεται συνοπτικά με τη μορφή του πίνακα 4.2. Για πιο εύκολο υπολογισμό των αθροισμάτων τετραγώνων, αντί των σχέσεων (4.8), (4.10) και (4.11), προτείνεται η χρήση των αμέσως επόμενων σχέσεων:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{an} \quad (4.14)$$

$$SS_F = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{an} \quad (4.15)$$

$$SS_E = SS_T - SS_F \quad (4.16)$$

Η ανάλυση μεταβλητότητας πραγματοποιείται κατά κανόνα με κατάλληλο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο παρέχει αυτόματα και το ελάχιστο επίπεδο σημαντικότητας στο οποίο είναι δυνατό να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση.

**Πίνακας 4.2:** Ανάλυση μεταβλητότητας για πείραμα με έναν παράγοντα

Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F <sub>0</sub>
Παράγοντας	SS <sub>F</sub>	a-1	MS <sub>F</sub>	MS <sub>F</sub> /MS <sub>E</sub>
Σφάλμα	SS <sub>E</sub>	a(n-1)	MS <sub>E</sub>	
Σύνολο	SS <sub>T</sub>	an-1		

### 4.3 Στατιστικά πειράματα με πολλούς παράγοντες

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η κατανομή τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής Y, η οποία εκφράζει το χαρακτηριστικό ποιότητας που ενδιαφέρει, εξαρτάται από δύο ή περισσότερους παράγοντες, οι οποίοι γενικά αλληλεπιδρούν. Κύρια επίδραση ενός παράγοντα σε μια τυχαία μεταβλητή Y λέγεται η μεταβολή της τυχαίας μεταβλητής που οφείλεται σε αλλαγή της τιμής του παράγοντα, ενώ αλληλεπίδραση μεταξύ παραγόντων υπάρχει όταν η μεταβολή της Y μεταξύ δύο τιμών ενός παράγοντα εξαρτάται από τα επίπεδα τιμών των άλλων παραγόντων.

Προκειμένου να εξεταστούν όχι μόνο οι κύριες επιδράσεις (όπως γίνεται με τον παραδοσιακό τρόπο διεξαγωγής πειραμάτων) αλλά και οι αλληλεπιδράσεις, τα επίπεδα τιμών των διαφόρων παραγόντων είναι αναγκαίο να μεταβάλλονται ταυτόχρονα.

Για να εξεταστούν όλες οι κύριες επιδράσεις και όλες οι δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων, ο πιο απλός και ακριβής τρόπος είναι να αναζητηθούν στοιχεία (τιμές της  $Y$ ) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών των παραγόντων που εξετάζονται. Τα πειράματα που σχεδιάζονται και εκτελούνται με αυτόν τον τρόπο λέγονται παραγοντικά πειράματα (factorial experiments). Όταν οι παράγοντες είναι πολλοί και τα επίπεδα τιμών κάθε παράγοντα είναι επίσης πολλά, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών γίνεται απαγορευτικά μεγάλος από οικονομική άποψη. Χρησιμοποιούνται τότε τα κλασματικά παραγοντικά πειράματα (fractional factorial experiments), που περιλαμβάνουν μέρος των δυνατών συνδυασμών.

#### 4.3.1 Παραγοντικά πειράματα

Η πλέον άμεση γενίκευση των πειραμάτων με έναν παράγοντα είναι τα παραγοντικά πειράματα με δύο παράγοντες σε οποιοδήποτε αριθμό επιπέδων τιμών, που περιγράφονται στη συνέχεια της παραγράφου.

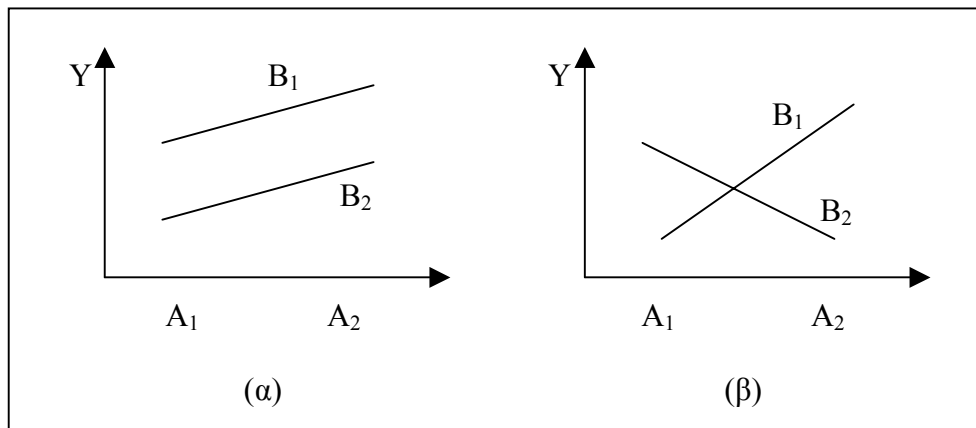
##### Πειράματα με δύο παράγοντες

Έστω ότι εξετάζεται η επίδραση δύο παραγόντων  $A$  και  $B$  στην τυχαία μεταβλητή  $Y$ . Αν τα επίπεδα τιμών του παράγοντα  $A$  είναι  $a$  και τα επίπεδα τιμών του παράγοντα  $B$  είναι  $b$ , το παραγοντικό πείραμα εξετάζει όλους τους  $ab$  δυνατούς συνδυασμούς των  $A$ ,  $B$ . Αν το πείραμα επαναληφθεί  $n$  φορές για κάθε συνδυασμό, προκύπτουν  $abn$  παρατηρήσεις  $y_{ijk}$ , που θεωρείται ότι περιγράφονται από το μαθηματικό πρότυπο

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4.17)$$

όπου  $y_{ijk}$  είναι η  $k$  τιμή της  $Y$  για την  $i$  τιμή του  $A$  και τη  $j$  τιμή του  $B$ ,  $\mu$  είναι η συνολική μέση τιμή,  $\tau_i$  είναι η επίδραση της τιμής  $i$  του παράγοντα  $A$ ,  $\beta_j$  είναι η επίδραση της τιμής  $j$  του παράγοντα  $B$ ,  $(\tau\beta)_{ij}$  είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ  $A$  και  $B$  και  $\varepsilon_{ijk}$  είναι το τυχαίο σφάλμα. Αλληλεπίδραση δύο παραγόντων υπάρχει όταν οι διαφορές των τιμών της  $Y$  μεταξύ των διαφόρων τιμών του ενός παράγοντα δεν είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα τιμών του άλλου παράγοντα. Το σχήμα 4.1 δείχνει γραφικά τις περιπτώσεις έλλειψης αλληλεπίδρασης (α) και ύπαρξης αλληλεπίδρασης (β) σε πείραμα δύο παραγόντων με δύο επίπεδα τιμών. Οι τιμές της  $Y$  εμφανίζονται ως συνάρτηση των τιμών του παράγοντα  $A$  ( $A_1, A_2$ ) και για τα δύο

επίπεδα του παράγοντα B ( $B_1, B_2$ ). Στην πρώτη περίπτωση οι γραμμές που συνδέουν τις τιμές της  $Y$  σε  $A_1$  και  $A_2$  είναι παράλληλες ενώ στη δεύτερη τέμνονται.



**Σχήμα 4.1:** Έλλειψη (α) και ύπαρξη (β) αλληλεπίδρασης σε πείραμα δύο παραγόντων A και B

Ο πίνακας 4.3 περιγράφει την οργάνωση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Όπως και στην απλούστερη περίπτωση πειραμάτων με έναν παράγοντα, οι μετρήσεις  $y_{ijk}$  είναι σκόπιμο να γίνονται με τυχαία σειρά (πλήρως τυχαιοποιημένος σχεδιασμός), ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση των άλλων παραγόντων.

**Πίνακας 4.3:** Οργάνωση αποτελεσμάτων παραγοντικού πειράματος με δύο παράγοντες

		B			
		1	2	...	B
A	1	$y_{111} \dots y_{11n}$	$y_{121} \dots y_{12n}$	...	$y_{1b1} \dots y_{1bn}$
	2	$y_{211} \dots y_{21n}$	$y_{221} \dots y_{22n}$	...	$y_{2b1} \dots y_{2bn}$
	...	...	...	...	...
	a	$y_{a11} \dots y_{a1n}$	$y_{a21} \dots y_{a2n}$	...	$y_{ab1} \dots y_{abn}$

Τα στοιχεία του πίνακα συμβολίζονται γενικά ως εξής:

$y_{i.}$ : άθροισμα όλων των παρατηρήσεων  $y_{ijk}$  με τον παράγοντα A στην τιμή i,

$y_{.j}$ : άθροισμα όλων των παρατηρήσεων  $y_{ijk}$  με τον παράγοντα B στην τιμή j,

$y_{ij.}$ : άθροισμα όλων των παρατηρήσεων  $y_{ijk}$  με τον παράγοντα A στην τιμή i και τον B στην τιμή j,

$y_{...}$ : γενικό άθροισμα όλων των παρατηρήσεων  $y_{ijk}$ .

Οι αντίστοιχες μέσες τιμές συμβολίζονται  $\bar{y}_{i..}$ ,  $\bar{y}_{.j.}$ ,  $\bar{y}_{ij.}$ ,  $\bar{y}_{...}$  και υπολογίζονται από τις μαθηματικές σχέσεις που ακολουθούν

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i=1,2,\dots,a \quad (4.18)$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad i=1,2,\dots,b \quad (4.19)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad i=1,2,\dots,a, j=1,2,\dots,b \quad (4.20)$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad (4.21)$$

Τα επίπεδα τιμών των δύο παραγόντων είναι συγκεκριμένα και τόσο οι κύριες επιδράσεις  $\tau_i$ ,  $\beta_j$ , όσο και οι αλληλεπιδράσεις  $(\tau\beta)_{ij}$  ορίζονται ως αποκλίσεις από τη συνολική μέση τιμή:

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0, \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0, \quad \sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad (4.22)$$

Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη των κύριων επιδράσεων των παραγόντων A και B και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης AxB στη μέση τιμή της μεταβλητής Y. Σύμφωνα με τη στατιστική ορολογία, ο σκοπός του πειράματος είναι ο έλεγχος των ακόλουθων στατιστικών υποθέσεων:

α) Ισότητα των τιμών της Y σε όλα τα (a) επίπεδα τιμών του παράγοντα A:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad \text{και} \quad H_1: \exists i: \tau_i \neq 0 \quad (4.23)$$

β) Ισότητα των μέσων τιμών της Y σε όλα τα (b) επίπεδα τιμών του παράγοντα B:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \quad \text{και} \quad H_1: \exists j: \beta_j \neq 0 \quad (4.24)$$

γ) Ανυπαρξία αλληλεπίδρασης μεταξύ των A και B σε οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών A, B:

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \forall i, j \quad \text{και} \quad H_1: \exists (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad (4.25)$$

Ο έλεγχος των υποθέσεων αυτών πραγματοποιείται με ανάλυση μεταβλητότητας, παρόμοια με την περίπτωση μεταβλητότητας στα πειράματα με έναν παράγοντα. Η συνολική διασπορά των πειραματικών δεδομένων  $y_{ijk}$  διαχωρίζεται στα συστατικά της, αναλύεται και εκφράζεται συμβολικά με τη σχέση

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (4.26)$$



όπου  $SS_A$  είναι η διασπορά που οφείλεται στον παράγοντα A (άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των διαφορών  $\bar{y}_{i..}$  από τη συνολική μέση τιμή των μετρήσεων  $\bar{y}_{...}$ ),  $SS_B$  είναι η διασπορά που οφείλεται στον παράγοντα B,  $SS_{AB}$  είναι η διασπορά που οφείλεται στην αλληλεπίδραση A και B (AxB) και  $SS_E$  είναι η διασπορά λόγω των τυχαίων σφαλμάτων.

Διαιρώντας τα αθροίσματα τετραγώνων με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας προκύπτουν τα μέσα τετράγωνα των επιδράσεων A, B, AxB και του σφάλματος (E):

$$MS_A = \frac{SS_A}{a-1} \quad (4.27)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{b-1} \quad (4.28)$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad (4.29)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)} \quad (4.30)$$

Το μέσο τετράγωνο σφάλματος αποτελεί αμερόληπτη εκτιμήτρια της μεταβλητότητας  $\sigma^2$ . Το ίδιο ισχύει και για τα μέσα τετράγωνα  $MS_A$ ,  $MS_B$ ,  $MS_{AB}$  μόνο όμως εφόσον ισχύουν οι αντίστοιχες μηδενικές υποθέσεις των ελέγχων υποθέσεων (α), (β), (γ) που διατυπώθηκαν παραπάνω. Τότε, οι λόγοι  $MS_A/MS_E$ ,  $MS_B/MS_E$  και  $MS_{AB}/MS_E$  που συμβολίζονται γενικά με  $F_0$ , αποδεικνύεται ότι ακολουθούν την κατανομή F με βαθμούς ελευθερίας αριθμητή και παρονομαστή όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας των αντίστοιχων μέσων τετραγώνων. Υψηλές τιμές των λόγων  $F_0$  οδηγούν σε απόρριψη των μηδενικών υποθέσεων. Αν π.χ.  $MS_B/MS_E > F_{1-\alpha, b-1, ab(n-1)}$ , τότε η μηδενική υπόθεση του ελέγχου (β) απορρίπτεται σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$  και συνάγεται ότι οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής Y εξαρτώνται από τις τιμές του παράγοντα B, δηλαδή η κύρια επίδραση B είναι στατιστικά σημαντική. Η διαδικασία ελέγχου συνοψίζεται στον πίνακα ανάλυσης μεταβλητότητας με τη μορφή του πίνακα 3.4 που περιέχει όλα τα αναγκαία στοιχεία.

**Πίνακας 4.4:** Ανάλυση μεταβλητότητας σε πείραμα με δύο παράγοντες A και B

Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS <sub>B</sub>	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Σφάλμα	SS <sub>E</sub>	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Σύνολο	SS <sub>T</sub>	abn-1		

Για τον υπολογισμό των αθροισμάτων τετραγώνων πολύ βοηθητικές αποδεικνύονται οι παρακάτω σχέσεις (Ταγαράς, 2001):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (4.31)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (4.32)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (4.33)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (4.34)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (4.35)$$

#### 4.3.2 Πειράματα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα (2<sup>K</sup>)

Η ανάλυση μεταβλητότητας γενικεύεται στη μελέτη της επίδρασης περισσότερων παραγόντων, αλλά περιπλέκεται σημαντικά από υπολογιστική άποψη λόγω της αύξησης των δυνατών επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων. Στην ειδική περίπτωση όμως όπου όλοι οι παράγοντες εξετάζονται σε δύο επίπεδα, η ανάλυση απλοποιείται αρκετά. Επιπλέον, τα πειράματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον, κυρίως στα αρχικά στάδια πειραματισμού, όπου ο αριθμός των παραγόντων είναι κατά κανόνα

μεγάλος και η ταυτόχρονη εξέτασή τους σε περισσότερα επίπεδα θα ήταν απαγορευτικά δαπανηρή.

Εάν ο αριθμός των ελεγχόμενων παραγόντων είναι  $K$ , το παραγοντικό πείραμα κατά το οποίο όλοι αυτοί οι παράγοντες εξετάζονται σε δύο επίπεδα τιμών αναφέρεται ως παραγοντικό πείραμα  $2^K$  ή παραγοντικός σχεδιασμός  $2^K$  ( $2^K$  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 (+), ενώ απουσία του γράμματος σημαίνει ότι ο παράγοντας είναι στο χαμηλό του επίπεδο (-). Ο συνδυασμός με όλους τους παράγοντες στα χαμηλά τους επίπεδα συμβολίζεται (1). Στον πίνακα 4.5 περιγράφεται ο σχεδιασμός του πειράματος  $2^2$  χρησιμοποιώντας τον παραπάνω συμβολισμό. 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.

**Πίνακας 4.5:** Σχεδιασμός παραγοντικού πειράματος  $2^2$

Συνδυασμός	A	B	AB
1 (1)	-	-	+
2 a	+	-	-
3 b	-	+	-
4 ab	+	+	+

Τα σύμβολα (1), a, b, ab 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. Ειδικότερα, η κύρια επίδραση της αλλαγής της τιμής του παράγοντα  $A$  από το χαμηλό του επίπεδο, που

εμφανίζεται στους συνδυασμούς τιμών (1) και b με συνολικά 2n πειραματικές παρατηρήσεις, στο υψηλό του επίπεδο, που χαρακτηρίζει τους συνδυασμούς τιμών a και ab με επίσης 2n πειραματικές τιμές, είναι

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] = \frac{\Delta_A}{2n} \quad (4.36)$$

όπου  $\bar{y}_{A+} = \frac{a + ab}{2n}$  και  $\bar{y}_{A-} = \frac{b + (1)}{2n}$  είναι οι μέσες τιμές των πειραματικών μετρήσεων με τον παράγοντα A στο υψηλό και χαμηλό επίπεδο αντίστοιχα. Με ανάλογο τρόπο προκύπτει η κύρια επίδραση B:

$$B = \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} = \frac{b + ab}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [b + ab - a - (1)] = \frac{\Delta_B}{2n} \quad (4.37)$$

Οι ποσότητες  $\Delta_A = [a + ab - b - (1)]$  και  $\Delta_B = [b + ab - a - (1)]$  στις σχέσεις (4.36) και (4.37) ονομάζονται διαφορές ή αντιθέσεις των διαφόρων επιδράσεων και η μορφή τους προσδιορίζεται από τον πίνακα 3.5, αθροίζοντας τα γινόμενα των συμβόλων κάθε συνδυασμού, (1), a, b, ab, επί τα αντίστοιχα πρόσημα της στήλης. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται και η αντίθεση που αντιστοιχεί στην αλληλεπίδραση AB

$$\Delta_{AB} = (1) - a - b + ab$$

και τελικά το μέγεθος της αλληλεπίδρασης AB:

$$AB = \frac{\Delta_{AB}}{2n} = \frac{1}{2n} [(1) - a - b + ab] \quad (4.38)$$

Σημειώνεται ότι το μέγεθος της αλληλεπίδρασης υπολογίζεται από τη διαφορά της μέσης τιμής της Y όταν και οι δύο παράγοντες είναι στο ίδιο επίπεδο, μείον τη μέση τιμή της Y όταν ο ένας παράγοντας είναι στο υψηλό επίπεδο και ο άλλος στο χαμηλό.

Εφόσον υπολογιστούν αριθμητικές τιμές των  $\Delta_A$ ,  $\Delta_B$ ,  $\Delta_{AB}$ , τα άθροισμα των τετραγώνων στο πείραμα  $2^2$  υπολογίζονται πλέον εύκολα από τη σχέση

$$SS_F = \frac{\Delta_F^2}{4n}, \text{ όπου } F=A, B, AB \quad (4.39)$$

και η ανάλυση μεταβλητότητας συνεχίζεται και ολοκληρώνεται καταρτίζοντας πίνακα ανάλογο με τον πίνακα 4.4.

Η παραπάνω μεθοδολογία γενικεύεται άμεσα στα παραγοντικά πειράματα  $2^K$  με  $K > 2$  παράγοντες. Το μέγεθος κάθε επίδρασης  $F$ , κύριας ή αλληλεπίδρασης, εκτιμάται από τα πειραματικά δεδομένα σύμφωνα με τη γενική σχέση

$$F = \frac{\Delta_F}{n2^{K-1}} \quad (4.40)$$

όπου  $\Delta_F$  είναι η τιμή της αντίθεσης που αντιστοιχεί στην επίδραση  $F$  και η οποία προσδιορίζεται από πίνακα ανάλογο του 3.5. Ο παρονομαστής είναι  $n2^{K-1}$  διότι οι συνολικά  $n2^K$  πειραματικές παρατηρήσεις ισοκατανέμονται μεταξύ των δύο επιπέδων τιμών του παράγοντα, καθώς σε  $2^K/2 = 2^{K-1}$  συνδυασμούς τιμών ο παράγοντας είναι στο υψηλό του επίπεδο και στους υπόλοιπους  $2^{K-1}$  είναι στο χαμηλό. Τα αθροίσματα τετραγώνων  $SS_F$  υπολογίζονται από τη σχέση

$$SS_F = \frac{\Delta_F^2}{n2^K} \quad (4.41)$$

ενώ το συνολικό άθροισμα τετραγώνων  $SS_T$  υπολογίζεται από τη σχέση (4.31). Σημειώνεται ότι σε πειράματα με περισσότερους από δύο παράγοντες εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις όχι μόνο δύο παραγόντων, αλλά και τριών ή και περισσότερων ( $K$ ) παραγόντων σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

#### 4.4 Κλασματικά παραγοντικά πειράματα

Όταν ο αριθμός των συνδυασμών τιμών των ελεγχόμενων παραγόντων σε ένα παραγοντικό πείραμα αυξηθεί τόσο ώστε η διεξαγωγή του πειράματος να δυσχεραίνεται σε πρακτικό αλλά και σε οικονομικό επίπεδο, τότε είναι προτιμότερο να εκτελεστεί πείραμα που περιλαμβάνει κλάσμα μόνο των συνδυασμών του αρχικού παραγοντικού πειράματος. Τα πειράματα αυτά λέγονται κλασματικά παραγοντικά πειράματα και ο σχεδιασμός τους ονομάζεται κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (fractional factorial design). 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. Στην παράγραφο 4.4.1 περιγράφεται ο κλασικός τρόπος σχεδιασμού κλασματικών παραγοντικών πειραμάτων για την περίπτωση όπου όλοι οι παράγοντες εξετάζονται σε δύο επίπεδα

#### 4.4.1 Κλασματικά πειράματα με όλους τους παράγοντες σε δύο επίπεδα

Το κλάσμα  $1/2^P$  του παραγοντικού πειράματος  $2^K$  λέγεται κλασματικό παραγοντικό πείραμα  $2^{K-P}$ . Προκειμένου ένα τέτοιο πείραμα να είναι αποτελεσματικό, η επιλογή του υποσυνόλου των  $N=2^{K-P}$  συνδυασμών τιμών των παραγόντων από το σύνολο των  $2^K$  δυνατών συνδυασμών πρέπει να γίνει με ορισμένα κριτήρια. Το σημαντικότερο και προφανέστερο από αυτά είναι ότι το πείραμα  $2^{K-P}$  πρέπει να είναι συμμετρικό, δηλαδή το πλήθος συνδυασμών κάθε επιπέδου τιμών ενός παράγοντα με κάθε επίπεδο τιμών όλων των άλλων παραγόντων να είναι ακριβώς το ίδιο. Π.χ. στο συμμετρικό πείραμα  $2^{6-2}$ , που έχει  $N=2^4=16$  συνδυασμούς τιμών παραγόντων, ο παράγοντας Α εμφανίζεται 8 φορές στο υψηλό και 8 φορές στο χαμηλό του επίπεδο και σε κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα συνδυάζεται από 4 φορές με το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του παράγοντα Β και κάθε άλλου παράγοντα που εξετάζεται στο πείραμα. Επιπλέον, είναι επιθυμητό το πείραμα να διαχωρίζει όσο καλύτερα γίνεται τις κύριες επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης που ενδιαφέρουν από τις άλλες αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης που δεν θεωρούνται σημαντικές. Οι έννοιες αυτές αναλύονται και διευκρινίζονται παρακάτω για τα κλασματικά πειράματα  $2^{K-1}$  στα οποία επικεντρώνεται αυτή η παράγραφος.

Το πείραμα  $2^{K-1}$  είναι το κλάσμα  $1/2$  (δηλαδή το μισό) του παραγοντικού πειράματος  $2^K$  και έχει  $N=2^{K-1}$  συνδυασμούς τιμών των ελεγχόμενων παραγόντων. Ο πίνακας 3.6α δείχνει το σχεδιασμό και τα πρόσημα επιδράσεων του κλασματικού πειράματος  $2^{3-1}$  για τη μελέτη τριών παραγόντων Α, Β, C. Οι  $N=4$  συνδυασμοί τιμών χαρακτηρίζονται από το ότι το πρόσημο της αλληλεπίδρασης ABC είναι πάντοτε θετικό και για το λόγο αυτό η ABC ονομάζεται γεννήτρια αυτού του πειράματος. Το άλλο μισό του παραγοντικού πειράματος  $2^3$ , δηλαδή το εναλλακτικό κλάσμα  $1/2$  στο οποίο εμφανίζονται οι υπόλοιποι  $N=4$  συνδυασμοί τιμών, παρουσιάζεται στον πίνακα 3.6β. Επειδή όλα τα

πρόσημα είναι κοινά και πάλι μόνο στην αλληλεπίδραση ABC αλλά αυτή τη φορά είναι αρνητικά, η γεννήτρια του πειράματος αυτού είναι η -ABC. Είναι προφανές ότι και τα δύο πειράματα είναι συμμετρικά και ότι συνδυαζόμενα δημιουργούν το πλήρες παραγοντικό πείραμα  $2^3$ .

**Πίνακας 4.6α:** Πρόσημα επιδράσεων κλασματικού πειράματος  $2^{3-1}$  με γεννήτρια ABC

Συνδυασμός	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
c	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+

**Πίνακας 4.6β:** Πρόσημα επιδράσεων κλασματικού πειράματος  $2^{3-1}$  με γεννήτρια -ABC

Συνδυασμός	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
1	-	-	+	-	+	+	-
ab	+	+	+	-	-	-	-
ac	+	-	-	+	+	-	-
bc	-	+	-	+	-	+	-

Γενικά σε πείραμα με  $N$  συνδυασμούς και  $n$  παρατηρήσεις ανά συνδυασμό, οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας είναι  $Nn-1$  και οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος είναι  $N(n-1)=Nn-N$ , άρα οι βαθμοί ελευθερίας για την εκτίμηση επιδράσεων (είτε κύριων είτε αλληλεπιδράσεων) είναι  $Nn-1-(Nn-N)=N-1$ . Επομένως οι 4 συνδυασμοί τιμών του πειράματος  $2^{3-1}$  προσφέρουν  $N-1=3$  βαθμούς ελευθερίας για την εκτίμηση επιδράσεων, άρα επιτρέπουν μόνο την εκτίμηση των τριών κύριων επιδράσεων A, B, C, ακόμη και αν διατίθενται  $n>1$  παρατηρήσεις ανά συνδυασμό. Κατά συνέπεια οι αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης, ενώ θεωρητικά υπάρχουν δεν μπορούν πρακτικά να εκτιμηθούν. Προσεκτική παρατήρηση όμως του πίνακα 3.6α αποκαλύπτει ότι τα πρόσημα στη στήλη A ταυτίζονται με τα πρόσημα στη στήλη BC και επομένως ταυτίζονται και οι αντιθέσεις  $\Delta_A$  και  $\Delta_{BC}$  που αντιστοιχούν στις επιδράσεις A και BC. Συνεπώς, είναι αδύνατο να γίνει διάκριση ανάμεσα στις A και BC και όταν χρησιμοποιούμε την  $\Delta_A$  για την εκτίμηση του μεγέθους της επίδρασης A στη μεταβλητή απόκρισης Y, στην πραγματικότητα εκτιμούμε το συνδυασμένο αποτέλεσμα των επιδράσεων A+BC. Δύο

(ή περισσότερες) επιδράσεις που έχουν αυτή την ιδιότητα καλούνται σύμφυτες. Ο πίνακας 3.6α δείχνει ότι οι επιδράσεις B και AC είναι επίσης σύμφυτες, καθώς και οι C και AB. Αντίστοιχα, από τον πίνακα 3.6β προκύπτει ότι στο κλασματικό πείραμα με γεννήτρια -ABC, σύμφυτες είναι οι A και -BC, B και -AC, C και -AB.

Από πρακτική άποψη είναι επιθυμητό να επιλεγεί το κατάλληλο κλασματικό πείραμα, έτσι ώστε οι κύριες επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης που ενδιαφέρουν να συμφύονται μόνο με αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης που πιθανότατα είναι αμελητέες. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η έννοια της διαχωριστικότητας του πειραματικού σχεδιασμού. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι πειραματικοί σχεδιασμοί διαχωριστικότητας III, IV και V, που ορίζονται ως εξής:

Σχεδιασμός διαχωριστικότητας *III*: περιλαμβάνει τα κλασματικά παραγοντικά πειράματα στα οποία καμιά κύρια επίδραση δεν είναι σύμφυτη με άλλη κύρια επίδραση, αλλά κύριες επιδράσεις είναι σύμφυτες με αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης και ορισμένες από τις αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης μπορεί να συμφύονται με άλλες αλληλεπιδράσεις της ίδιας τάξης.

Σχεδιασμός διαχωριστικότητας *IV*: περιλαμβάνει τα πειράματα στα οποία καμιά κύρια επίδραση δεν είναι σύμφυτη με άλλη κύρια επίδραση ή αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης, αλλά αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης συμφύονται με άλλες αλληλεπιδράσεις της ίδιας τάξης.

Σχεδιασμός διαχωριστικότητας *V*: περιλαμβάνει τα πειράματα στα οποία καμιά κύρια επίδραση ή αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης δεν είναι σύμφυτη με άλλη κύρια επίδραση ή αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης, αλλά αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης συμφύονται με αλληλεπιδράσεις τρίτης τάξης.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, τα πειράματα των πινάκων 3.6α και 3.6β είναι διαχωριστικότητας *III* και συνήθως συμβολίζονται  $2^{3-1}_{III}$ .

Προκειμένου να κατασκευαστεί το κλασματικό παραγοντικό πείραμα  $2^{K-1}$  με τη μέγιστη δυνατή διαχωριστικότητα, αρχικά καταστρώνεται ο πίνακας σχεδιασμού και



πρόσημων του πλήρους παραγοντικού πειράματος με K-1 παράγοντες σε δύο επίπεδα και στη συνέχεια προστίθεται ο παράγοντας K στη στήλη της αλληλεπίδρασης υψηλότερης τάξης. Οι σύμφυτες επιδράσεις προσδιορίζονται πολλαπλασιάζοντας κάθε στήλη με τη γεννήτρια του πειράματος, όπου τα τετράγωνα απαλείφονται.

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός κλασματικού πειράματος  $2^{K-P}$  δεν διαφέρει ουσιαστικά από την ανάλυση των παραγοντικών πειραμάτων  $2^K$ . Το μέγεθος κάθε επίδρασης F, κύριας ή αλληλεπίδρασης, εκτιμάται από τη σχέση

$$F = \frac{\Delta_F}{n(N/2)} \quad (4.42)$$

όπου  $\Delta_F$  είναι η τιμή της αντίθεσης που αντιστοιχεί στην επίδραση F. Τα αθροίσματα τετραγώνων  $SS_F$  υπολογίζονται από τη σχέση

$$SS_F = \frac{\Delta_F^2}{nN} \quad (4.43)$$

ενώ το συνολικό άθροισμα τετραγώνων  $SS_T$  υπολογίζεται από τη σχέση (4.31).

#### 4.5 Μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης

Τα στατιστικά πειράματα που παρουσιάστηκαν ως τώρα, συμβάλλουν στην αναγνώριση των ελεγχόμενων παραμέτρων των προϊόντων και των παραγωγικών διαδικασιών που επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές ενός χαρακτηριστικού ποιότητας. Αφού αναγνωριστούν αυτές οι παράμετροι, το επόμενο ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών τους, ώστε το χαρακτηριστικό ποιότητας να προσεγγίζει όσο περισσότερο γίνεται την επιθυμητή του τιμή με τη μικρότερη δυνατή μεταβλητότητα. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης (Response Surface Methodology, RSM) για τη βέλτιστη επιλογή τιμών των ελεγχόμενων παραμέτρων προϊόντων και διαδικασιών.

Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί ένα συνδυασμό στατιστικών και μαθηματικών τεχνικών, που έχει αποδειχτεί αποτελεσματικός σε προβλήματα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής απόκρισης Y, οι τιμές της οποίας επηρεάζονται από τις τιμές διαφόρων ελεγχόμενων μεταβλητών  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Συγκεκριμένα, οι τιμές y της τυχαίας μεταβλητής Y είναι συνάρτηση των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , σύμφωνα με τη γενική σχέση  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)+\varepsilon$ ,

όπου  $\varepsilon$  είναι το τυχαίο σφάλμα με μέση τιμή 0. Η μέση τιμή της μεταβλητής απόκρισης είναι επίσης συνάρτηση των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_k$  :

$$E(Y) = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.44)$$

Ο γεωμετρικός τόπος των  $E(Y)$  λέγεται επιφάνεια απόκρισης. Αν  $k=2$ , η επιφάνεια απόκρισης μπορεί να παρασταθεί γραφικά είτε ως επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο, είτε ως σύνολο ισοϋψών καμπυλών στο επίπεδο  $(x_1, x_2)$ .

Το πρώτο στάδιο κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός της μορφής της συνάρτησης  $f$ . Η επόμενη παράγραφος περιγράφει συνοπτικά τον τρόπο προσεγγιστικού προσδιορισμού της συνάρτησης  $f$  με εμπειρικά μοντέλα παλινδρόμησης. Το δεύτερο στάδιο είναι η βελτιστοποίηση της  $f$  με τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού. Επίσης, παρουσιάζεται η μέθοδος της μέγιστης ανόδου, που χρησιμοποιείται όταν επιδιώκεται μεγιστοποίηση της μεταβλητής απόκρισης. Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου παρουσιάζει συνολικά τη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων με τη μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης.

#### 4.5.1 Εμπειρικά μοντέλα παλινδρόμησης

Στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών η ακριβής μορφή της συνάρτησης  $f$  και επομένως της επιφάνειας απόκρισης είναι άγνωστη. Έτσι, ο προσδιορισμός της  $f$  γίνεται κατά προσέγγιση από πειραματικά δεδομένα. Η συνηθέστερη πρακτική είναι η ανάπτυξη ενός εμπειρικού μαθηματικού προτύπου με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Ταγαράς, 2001).

Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν η μεταβλητή απόκρισης εκφράζεται ως γραμμική συνάρτηση των ελεγχόμενων μεταβλητών:

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon. \quad (4.45)$$

Το τυχαίο σφάλμα  $\varepsilon$  είναι ανάλογο προς το αντίστοιχο σφάλμα των προτύπων ανάλυσης μεταβλητότητας. Το παραπάνω πρότυπο λέγεται πρώτης τάξης (first order model) και οι παράμετροι  $\alpha, \beta_i, i=1, 2, \dots, k$  λέγονται συντελεστές παλινδρόμησης. Εάν στο πρότυπο αυτό προστεθούν και όροι που εκφράζουν αλληλεπιδράσεις  $(x_i, x_j)$ , τότε το πρότυπο μετατρέπεται σε δεύτερης τάξης. Π.χ. για  $k=2$ , το πρότυπο παλινδρόμησης γίνεται:

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (4.46)$$

ή ισοδύναμα

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (4.47)$$

όπου  $x_3 = x_1 x_2$  και  $\beta_3 = \beta_{12}$ . Η γενική μορφή του προτύπου δεύτερης τάξης είναι

$$y = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.48)$$

Το γενικό πρότυπο δεύτερης τάξης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν η εξάρτηση της  $Y$  από τις μεταβλητές  $X_i$  είναι μη γραμμική. Με κατάλληλο όμως μετασχηματισμό των ελεγχόμενων μεταβλητών (π.χ.  $x_1^2 = x_{k+1}$ ), οποιοδήποτε πρότυπο δεύτερης ή και υψηλότερης τάξης μετατρέπεται σε πρότυπο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (ως προς τους συντελεστές  $\alpha, \beta_i$ ), ανεξάρτητα από τη μορφή της επιφάνειας απόκρισης.

Η εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι εφικτή και σχετικά απλή εφόσον βέβαια διατίθενται τουλάχιστον  $n > k$  πειραματικές μετρήσεις, όπου  $k$  ο τελικός αριθμός των ελεγχόμενων μεταβλητών μετά τους όποιους μετασχηματισμούς. Οι ακριβείς μαθηματικές σχέσεις περιέχονται σε όλα σχεδόν τα συγγράμματα στατιστικής. Σημειώνεται ότι ο όρος πειραματική παρατήρηση υποδηλώνει σύνολο  $k+1$  τιμών, δηλαδή περιλαμβάνει την τιμή  $y$  της απόκρισης και τις αντίστοιχες τιμές  $x_1, x_2, \dots, x_k$  των ελεγχόμενων μεταβλητών.

#### 4.5.2 Μέθοδος μέγιστης ανόδου

Εφόσον προσδιοριστεί η συνάρτηση  $f$ , είναι πλέον δυνατή η ανάλυση της επιφάνειας απόκρισης, δηλαδή του γεωμετρικού τόπου των  $E(Y)$ , μέσω της σχέσης

$$E(Y) = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.49)$$

Η γραφική απεικόνιση της επιφάνειας απόκρισης είναι βέβαια εφικτή μόνο αν  $k \leq 2$ .

Από πρακτική άποψη, ανάλυση της επιφάνειας απόκρισης σημαίνει προσδιορισμός των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , για τις οποίες η  $E(Y)$  λαμβάνει την πιο επιθυμητή τιμή, η οποία κατά περίπτωση μπορεί να είναι η μεγαλύτερη ή η μικρότερη δυνατή. Ακόμα και όταν η επιθυμητή τιμή για το χαρακτηριστικό ποιότητας  $Y$  είναι συγκεκριμένη, συχνά οι αρχικές εκτιμήσεις των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_k$  (που χρησιμοποιούνται στο πείραμα) οδηγούν σε μέσες τιμές  $E(Y)$  που απέχουν αρκετά από την επιθυμητή. Είναι συνεπώς

αναγκαίο να προσδιοριστεί εκείνη η κατεύθυνση αλλαγών στις τιμές των ελεγχόμενων παραγόντων, η οποία θα οδηγήσει ταχύτερα και αποτελεσματικότερα στην περιοχή του βέλτιστου συνδυασμού των τιμών αυτών. Κατά κανόνα λοιπόν, η συνάρτηση  $f$  πρέπει να βελτιστοποιηθεί, δηλαδή να μεγιστοποιηθεί ή ελαχιστοποιηθεί, ως προς τις τιμές των  $x_1, x_2, \dots, x_k$ .

Για τη βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών παρουσιάζεται η κλασική και αποτελεσματική μέθοδος της μέγιστης ανόδου (steepest ascent), η οποία συχνά εντάσσεται στη μεθοδολογία της επιφάνειας απόκρισης ως εργαλείο για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού τιμών των ελεγχόμενων παραγόντων. Η μέθοδος μέγιστης ανόδου αφορά μεγιστοποίηση συναρτήσεων, αλλά οι τροποποιήσεις της μεθόδου για την περίπτωση ελαχιστοποίησης είναι απλές και θα δοθούν στη συνέχεια.

Για την οικονομία της παρουσίασης, οι μεταβλητές  $x_1, x_2, \dots, x_k$  θεωρούνται στοιχεία του  $k \times 1$  διανύσματος  $x$  και η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση συμβολίζεται  $f(x)$ . Η μέθοδος της μέγιστης ανόδου βασίζεται στην παρατήρηση ότι για μικρές μεταβολές του  $x$ , ο ρυθμός μεταβολής της  $f(x)$  είναι μέγιστος όταν οι μεταβολές του  $x$  είναι κατά την κατεύθυνση του διανύσματος κλίσης της  $f(x)$ , δηλαδή του  $k \times 1$  διανύσματος  $\nabla f(x)$  με στοιχεία τις πρώτες μερικές παραγώγους της  $f(x)$  ως προς  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, η τιμή  $x$  μεταβάλλεται στην κατεύθυνση αυτή και η διαδικασία τερματίζεται όταν όλες οι μερικές παράγωγοι πρώτης τάξης είναι μηδενικές με ανοχή σφάλματος  $\varepsilon$ . Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος της μέγιστης ανόδου αποτελείται από τα εξής στάδια.

- Αρχικό στάδιο: Επιλογή ανοχής  $\varepsilon$  και αρχικής δοκιμαστικής λύσης  $x$ . Πραγματοποιείται έλεγχος τερματισμού.
- Επαναληπτικό στάδιο: Αποτελείται από τρία βήματα.
  1. Η  $f(x)$  εκφράζεται ως συνάρτηση μη αρνητικού πραγματικού αριθμού  $\alpha$  ως εξής:
$$f(\alpha) = f(x + \alpha \nabla f(x)).$$
  2. Προσδιορίζεται το  $\alpha^*$ , που μεγιστοποιεί την  $f(\alpha)$  στην περιοχή τιμών  $\alpha \geq 0$ .
  3. Υπολογίζεται νέα δοκιμαστική λύση  $x + \alpha^* \nabla f(x)$ .
- Έλεγχος τερματισμού: Αν στο νέο σημείο  $x$  ισχύει

$$\left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right| \leq \varepsilon, \quad i=1, 2, \dots, k$$

η διαδικασία τερματίζεται: η τρέχουσα λύση  $x$  είναι ικανοποιητική προσέγγιση της βέλτιστης. Σε αντίθετη περίπτωση η διαδικασία συνεχίζεται με το επαναληπτικό στάδιο.

Η μέθοδος της μέγιστης ανόδου συγκλίνει σε τοπικό μέγιστο της  $f(x)$  και συνεπώς δεν εγγυάται γενικά τον προσδιορισμό της συνολικά βέλτιστης λύσης. Αν όμως η  $f(x)$  είναι κοίλη συνάρτηση και επομένως έχει μοναδικό μέγιστο, τότε η μέθοδος της μέγιστης ανόδου θα συγκλίνει προς τη βέλτιστη λύση.

Αν ζητείται να ελαχιστοποιηθεί η  $f(x)$ , η μέθοδος τροποποιείται ως προς τα δύο ακόλουθα σημεία και ονομάζεται μέθοδος μεγίστης καθόδου (steepest descent):

- Επειδή η  $x$  πρέπει να κινείται αντίθετα από την κατεύθυνση του διανύσματος κλίσης, η νέα δοκιμαστική λύση στο 3<sup>ο</sup> βήμα του επαναληπτικού σταδίου είναι  $x - \alpha^* \nabla f(x)$ .
- Η τιμή  $\alpha^*$  στο επαναληπτικό στάδιο είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί την  $f(\alpha) = f(x - \alpha \nabla f(x))$ .

Ο βαθμός δυσκολίας της βελτιστοποίησης της  $E(Y)$  εξαρτάται από τη μορφή της συνάρτησης  $f$ . Στα πλαίσια όμως της μεθοδολογίας της επιφάνειας απόκρισης χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε τα μαθηματικά πρότυπα της πρώτης και δεύτερης τάξης των σχέσεων (4.45) και (4.48) αντίστοιχα, τα οποία είναι σχετικά απλά και η βελτιστοποίησή τους δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες. Για τα πρότυπα αυτά μάλιστα δεν απαιτείται ούτε η γνώση και η χρήση της μεθόδου της μέγιστης ανόδου. Παρόλα αυτά είναι πρακτικά χρήσιμο και ενδιαφέρον η βελτιστοποίηση των εμπειρικών μοντέλων να εξετάζεται κάτω από το πρίσμα και με τη λογική της μεθόδου μέγιστης ανόδου.

Η κίνηση κατά την κατεύθυνση της μέγιστης ανόδου εξασφαλίζει ότι από όλα τα σημεία  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , που απέχουν εξίσου από το κέντρο  $(0, 0, \dots, 0)$  του πειραματικού σχεδιασμού, επιλέγεται εκείνο που μεγιστοποιεί τη μέση απόκριση. Ουσιαστικά λύνεται το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της  $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  με τον περιορισμό

$$\sum_{i=1}^k x_i^2 = r^2 \quad (4.50)$$

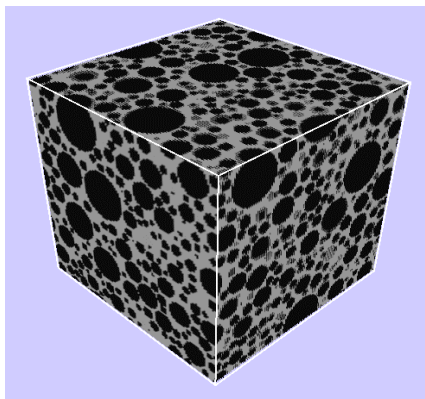
όπου  $r$  είναι η απόσταση από το κέντρο. Δεδομένης της κωδικοποίησης των  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , ο περιορισμός (4.50) ορίζει κύκλο ακτίνας  $r$  στην περίπτωση  $k=2$  και γενικότερα σφαίρα ακτίνας  $r$  στο χώρο των  $k$  διαστάσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από την περιγραφή και τον χαρακτηρισμό του υλικού που έγινε στο Κεφάλαιο 3, προέκυψε ότι η ασβεστολιθική παιπάλη που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών στην Κρήτη 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, όπως είναι η υγρή κοσκίνιση, η αεροταξινόμηση, ή η υπερλεπτομερής λειοτρίβηση κ.ά., διερευνήθηκε η δυνατότητα παραγωγής δομικών στοιχείων, όπως πλάκες και δομικοί λίθοι με την δημιουργία μίγματος παιπάλης και τσιμέντου. Αξίζει ωστόσο, να τονιστεί η δυσκολία χρήσης λεπτόκοκκων αδρανών για παραγωγή δομικών στοιχείων, λόγω του υψηλού ποσοστού νερού που απορροφούν και των προβλημάτων που δημιουργούνται κατά την στερεοποίησή τους.

Λόγω έλλειψης βιβλιογραφικών δεδομένων για την δημιουργία δομικών στοιχείων με τη χρήση τόσο λεπτομερών αδρανών υλικών, χρησιμοποιήθηκε ως πιο κατάλληλη μέθοδος η παραγωγή δομικών στοιχείων σε πρέσα υψηλής πίεσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απαιτούμενη ποσότητα του τσιμέντου, να μειωθεί στο ελάχιστο η προσθήκη νερού και να παραχθεί ένα συμπαγές και με καλές μηχανικές ιδιότητες υλικό. Η επιλογή αυτή βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες εφαρμογές, όπου όμως η κοκκομετρική κατανομή των κόκκων καλύπτει ένα μεγαλύτερο εύρος μεγεθών και τα αδρανή δεν είναι τόσο λεπτόκοκκα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, σε υλικά παρασκευασμένα από αδρανή και τσιμεντοκονία, η τσιμεντοκονία καλύπτει τα κενά που δημιουργούνται από τη διάταξη των κόκκων. Αντίθετα, στα δοκίμια που παρασκευάζονται από παιπάλη και τσιμεντοκονία δεν παρουσιάζεται η εικόνα αυτή, αλλά η κονία και το αδρανές υλικό έχουν παρόμοια κοκκομετρία.



**Σχήμα 5.1.** Σχηματική παράσταση κόκκων αδρανών και κονιάς σε συνήθη τσιμεντοκονιάματα υλικά

Η μελέτη της σύνθεσης περιλαμβάνει την παρασκευή εργαστηριακών δοκιμίων με διαφορετικές αναλογίες και σε διάφορες πιέσεις προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη σύνθεση του μίγματος και η πιο κατάλληλη πίεση. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν αποθηκεύτηκαν σε ειδικό δοχείο φύλαξης που εξασφαλίζει τις απαιτούμενες συνθήκες υγρασίας. Ο έλεγχος των δοκιμίων περιελάμβανε τον προσδιορισμό της αντοχής ξηρών και υγρών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη μετά την πάροδο 28 ημερών, τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, της πυκνότητας και της υδατοαπορρόφησης.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για τους παράγοντες που συμμετέχουν στην παρασκευή των δοκιμίων και να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για το πείραμα. Έτσι, αφού παρασκευάστηκαν τα δοκίμια της πρώτης φάσης και μετρήθηκαν χαρακτηριστικές τους ιδιότητες, συλλέχθηκαν τα δεδομένα, εισήχθησαν στο λογισμικό πακέτο STATGRAPHICS PLUS 5 και έγινε η ανάλυση του σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν ώστε στη δεύτερη φάση παρασκευής δοκιμίων οι παράμετροι του πειράματος να τροποποιηθούν κατάλληλα. Ανάλυση του σχεδιασμού έγινε και για τη δεύτερη φάση παρασκευής δοκιμίων.

### **5.1 Υλικά-παρασκευή δοκιμίων**

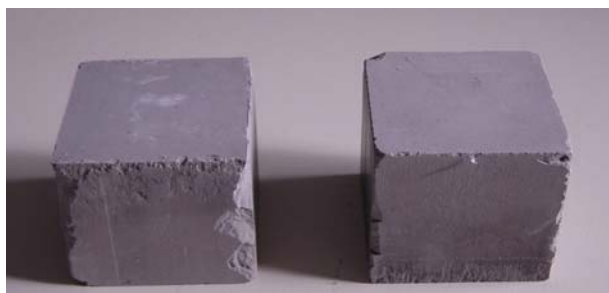
Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε παιπάλη ασβεστολιθικής σύστασης της εταιρείας Ασφαλτική Μπετόν ΑΕ, κοινό τσιμέντο και νερό. Σε πρώτη φάση έγινε παρασκευή δειγμάτων με κοινό τσιμέντο ενώ σε δεύτερη φάση έγινε παρασκευή



δειγμάτων και με λεπτόκοκκο τσιμέντο που παρασκευάστηκε εργαστηριακά με άλεση του κοινού τσιμέντου. Το ασβεστολιθικό υλικό θερμάνθηκε σε φούρνο ώστε να αποβάλλει την υγρασία που περιείχε και στη συνέχεια παρέμεινε σε θερμοκρασία δωματίου για να αποκτήσει φυσική υγρασία.

Στη συνέχεια, προετοιμάστηκαν τα μίγματα τσιμέντου και ασβεστόλιθου με ανάμιξή τους σε περιστρεφόμενο κύλινδρο ώστε να ομοιογενοποιηθεί το υλικό και να μην υπάρχουν συσσωματώματα. Κατόπιν, το μίγμα μεταφέρθηκε σε εργαστηριακό αναμικτήρα, όπου έγινε η προσθήκη του νερού. Από δοκιμές που έγιναν για τον προσδιορισμό της ποσότητας του νερού προέκυψε ότι περίπου 25-30g νερού είναι ικανοποιητική ποσότητα για να ενυδατωθεί μίγμα τσιμέντου και ασβεστόλιθου 450g. Η προσθήκη του νερού έγινε με ψεκασμό και ταυτόχρονη ανάδευση ώστε να διαχέεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του μίγματος. Αφού ολοκληρώθηκε η ανάδευση των υλικών για κάθε σειρά δοκιμών, έγινε η διαμόρφωσή τους σε καλούπια και η συμπίεσή τους σε πρέσα. Τέλος, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη υγρασία για την ωρίμανσή τους.

Αρχικά, έγινε προσπάθεια να παρασκευαστούν κυβικά δοκίμια ακμής 5 cm. Η διαδικασία της παρασκευής ήταν ικανοποιητική στις χαμηλές πιέσεις αλλά δεν κατέστη δυνατόν να εξαχθούν ακέραια δοκίμια στην μεγαλύτερη πίεση. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα κυβικά δοκίμια όπου φαίνονται οι ατέλειες που προέκυψαν κατά την εξαγωγή των δοκιμών από το καλούπι. Για το λόγο αυτό οι δοκιμές συνεχίστηκαν διαμορφώνοντας το υλικό σε κυλινδρικά δοκίμια. Συγκεκριμένα, από κάθε σειρά διαμορφώθηκαν σε κυλινδρική μήτρα δοκίμια βάρους περίπου 80g και η συμπίεση έγινε σε πιέσεις 246bar, 308bar, 369bar και 430bar. Τα δοκίμια έχουν διάμετρο 40.8mm ενώ το ύψος τους κυμαίνεται από 30.1mm ως 32.1mm.



**Εικόνα 5.1.** Κυβικά δοκίμια.

Στις εικόνες 5.2, 5.3 και 5.4 φαίνονται το καλούπι στο οποίο μορφοποιήθηκε το μίγμα, η πρέσα που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση του μίγματος και μια σειρά δοκιμίων.



*Εικόνα 5.2.* Καλούπι για την παρασκευή των δοκιμίων.



*Εικόνα 5.3.* Πρέσα για τη συμπίεση των δοκιμίων.



**Εικόνα 5.4.** Δοκίμια όπως εξάγονται από το καλούπι μετά τη συμπίεση.

Στην πρώτη φάση (φάση Α) παρασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμίων με περιεκτικότητα σε τσιμέντο **10%, 12.5% και 15% κατά βάρος επί του βάρους της παιπάλης** και πίεση μορφοποίησης 246bar, 308bar και 369bar.

Στην δεύτερη φάση (φάση Β) παρασκευάστηκαν δυο σειρές δοκιμίων με περιεκτικότητα σε τσιμέντο **12.5% και 15% κατά βάρος επί του βάρους της παιπάλης χρησιμοποιώντας και αλεσμένο τσιμέντο** σε πίεση μορφοποίησης 308bar, 369bar και 430bar. Οι διαδικασίες ανάμειξης, ύγρυνσης, μορφοποίησης και συμπίεσης ήταν ίδιες και για τις δύο φάσεις.

## 5.2 Φύλαξη δοκιμίων – Κωδικοποίηση

Μετά την ολοκλήρωση κάθε σειράς δοκιμίων, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε θάλαμο που περιείχε νερό ώστε να υπάρχει αρκετή υγρασία, χωρίς όμως να έρχονται σε απευθείας επαφή με το νερό. Τα δοκίμια έμειναν στο περιβάλλον αυτό για διάστημα 28 ημερών, ενώ μετά την πρώτη εβδομάδα ένα δοκίμιο της Φάσης Α από κάθε σύσταση και κάθε πίεση βυθίστηκε σε νερό για να εξεταστεί η συμπεριφορά τους όταν βρίσκονται σε συνθήκες πλήρους υγρασίας. Οι τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ήταν μεγαλύτερες για τα εμβαπτισμένα δοκίμια και για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η **εμβάπτιση όλων των δοκιμίων της Φάσης Β**. Στα δοκίμια της φάσης αυτής έγινε επίσης μέτρηση της υδατοαπορρόφησης.

Για την κωδικοποίηση των δοκιμίων εφαρμόστηκαν οι παρακάτω συμβάσεις:

Ο πρώτος χαρακτήρας του κωδικού (αριθμός) αναφέρεται στην σύσταση του μίγματος, ο δεύτερος χαρακτήρας (γράμμα) στην φύση του τσιμέντου (Αλεσμένο ή Κοινό), και ο τελευταίος χαρακτήρας (αριθμός) στην πίεση μορφοποίησης (ένδειξη της πρέσας). Στον πίνακα 5.1 δίνεται η αντιστοιχία κωδικών και συνθηκών.

**Πίνακας 5.1.** Κωδικοποίηση δειγμάτων

Δυο πρώτοι χαρακτήρες του κωδικού δείγματος	Περιεκτικότητα μίγματος σε τσιμέντο κατά βάρος	Δεύτερος χαρακτήρας κωδικού δείγματος	Τύπος τσιμέντου	Δυο τελευταίοι χαρακτήρες του κωδικού δείγματος	Πίεση μορφοποίησης σε bar
10	10%	K	Κοινό	40	246
12	12.5%	A	Κοινό αλεσμένο	50	308
15	15%			60	369
				70	430

Για παράδειγμα, το δείγμα 15A60 είναι το δοκίμιο που παρασκευάστηκε με μίγμα 15% σε Αλεσμένο τσιμέντο και πίεση μορφοποίησης 369 bar.

### 5.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Μετά την παρέλευση του διαστήματος των 28 ημερών έγινε ζύγιση και διαστασιολόγηση των δοκιμίων για να προσδιοριστεί η πυκνότητα των δοκιμίων. Ακολούθησε η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης που έγινε σε μηχανή MTS 1380 (εικόνα 5.5). Για κάθε μια σύνθεση θραύστηκαν 5 δοκίμια και υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντοχής. Επειδή η δοκιμή δεν έγινε σε δοκίμια πρότυπων διαστάσεων παρατίθενται στο παράρτημα οι ανηγμένες τιμές αντοχής για τα δοκίμια με λόγο ύψος/διάμετρος=2. Στα δοκίμια της φάσης Β έγινε επίσης, προσδιορισμός της υδατοαπορρόφησης.

- **Προσδιορισμός της αντοχής σε θλίψη**

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή MTS 1380 με ρυθμό φόρτισης 200N/s. 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, 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  $C_o$  προκύπτει από τη σχέση  $C_o = F_{max}/A$ , όπου  $F_{max}$  η μέγιστη δύναμη που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και  $A$  η επιφάνεια του δοκιμίου (Αγιουτάντης, 1999).

- **Προσδιορισμός υδατοαπορρόφησης**

Το δοκίμιο τοποθετείται σε δοχείο με απεσταγμένο νερό για 24 ώρες, σκουπίζεται, ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος του. Στη συνέχεια, αφήνεται για 24 ώρες σε φούρνο στους 105°C και αφού μείνει σε ξηραντήρα για να κρυώσει ζυγίζεται ξανά. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται τρεις φορές και κάθε φορά, για τον υπολογισμό του ποσοστού του νερού που απορροφήθηκε, γίνεται χρήση της σχέσης

$$\frac{W_{H_2O} - W_{105^\circ C}}{100 \times W_{H_2O}}, \text{ όπου}$$

$W_{H_2O}$ : το βάρος του δοκιμίου μετά από 24 ώρες στο νερό

$W_{105^\circ C}$ : το βάρος του δοκιμίου μετά από 24 ώρες στους 105 °C.

Τέλος, η υδατοαπορρόφηση κάθε δοκιμίου υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των ποσοστών απορρόφησης νερού που προέκυψαν μετά τους τρεις κύκλους.

- **Προσδιορισμός πυκνότητας**

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας των δοκιμίων έγινε μετά από τη διαστασιολόγηση των δοκιμίων και τη ζύγιση τους με χρήση της σχέσης  $\rho = m/V$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα,  $m$  η μάζα και  $V$  ο όγκος των δοκιμίων.



*Εικόνα 5.5.* Η μηχανή MTS 1380 και δοκίμιο.

#### 5.4 Παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων

Ο παραγοντικός σχεδιασμός που εφαρμόστηκε για τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα βασίζεται στις μεθόδους που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 και πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό STATGRAPHICS PLUS 5. Πραγματοποιήθηκε ένας σχεδιασμός για τα δοκίμια της Α φάσης και ένας σχεδιασμός για τα δοκίμια της Β φάσης.

Οι περισσότερες μεταβλητές εμφανίζονται σε όλους τους σχεδιασμούς και οι συμβολισμοί τους διατηρούνται κάθε φορά οι ίδιοι. Στον σχεδιασμό της Α φάσης έγινε ανάλυση με εξαρτημένη μεταβλητή την αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων,  $C_s$ , ενώ στον σχεδιασμό της Β φάσης έγινε ανάλυση με εξαρτημένη μεταβλητή τόσο την  $C_s$  όσο και την υδατοαπορρόφηση,  $W_a$ . Οι ανεξάρτητες μεταβλητές, που επίσης εμφανίζονται σε όλους τους σχεδιασμούς, είναι ο λόγος της περιεκτικότητας τσιμέντο/παιπάλη ( $C_d$ ) και η πίεση μορφοποίησης ( $C_p$ ). Τέλος, εμφανίζονται οι μεταβλητές  $DW$  στον σχεδιασμό της Α φάσης και  $C_{em}$  της Β φάσης, που εκφράζουν αντίστοιχα την υγρή ή ξηρή κατάσταση των δοκιμίων και την κατάσταση του τσιμέντου (κοινό ή αλεσμένο). Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συμβολισμοί των μεταβλητών και οι περιγραφές τους.

**Πίνακας 5.2.** Συμβολισμός και περιγραφή των μεταβλητών.

Συμβολισμός	Περιγραφή μεταβλητής
Cs	Αντοχή σε θλίψη ( <b>C</b> ompressive <b>s</b> trength). Εξαρτημένη
Wa	Υδατοαπορρόφηση ( <b>W</b> ater <b>a</b> bsorption). Εξαρτημένη
Cd	Λόγος τσιμέντου παιπάλης ( <b>C</b> ement to <b>d</b> ust ratio). Ανεξάρτητη
Cp	Πίεση μορφοποίησης ( <b>C</b> ompaction <b>p</b> ressure). Ανεξάρτητη
DW	Ξηρά ή εμβαπτισμένα δοκίμια ( <b>D</b> ry- <b>W</b> et). Ανεξάρτητη
Cem	Κοινό ή αλεσμένο τσιμέντο ( <b>C</b> ement). Ανεξάρτητη

Επιλέχθηκε ο σχεδιασμός πειράματος με παράγοντες σε 3 επίπεδα. Οι τιμές που παίρνουν τα επίπεδα αυτά είναι -1, 0, 1 και αντιστοιχούν σε χαμηλό, μέσο και υψηλό επίπεδο. Τέλος, καθορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων και προκύπτουν όλοι οι συνδυασμοί των επιπέδων των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Για την ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγιναν τα παρακάτω:

- Υπολογισμός των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων των παραγόντων που επιδρούν στην μεταβλητή απόκρισης, καθώς και το τυπικό σφάλμα για κάθε έναν.
- Ανάλυση μεταβλητότητας (ANOVA). Παρουσιάζεται η μεταβλητότητα της εξαρτημένης μεταβλητής. Ελέγχεται η στατιστική σημασία για κάθε επίδραση συγκρίνοντας το μέσο τετράγωνο με την εκτίμηση του πειραματικού σφάλματος.
- Πίνακας με τους συντελεστές παλινδρόμησης της εξίσωσης που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις.
- Διαδρομή μέγιστης ανόδου (ή καθόδου). Είναι η διαδρομή από το κέντρο της εκάστοτε πειραματικής περιοχής κατά μήκος της οποίας η εκτιμώμενη απόκριση αλλάζει γρηγορότερα όταν σημειώνεται η μικρότερη μεταβολή των πειραματικών παραγόντων.
- Πίνακας βελτιστοποίησης. Δείχνει τον συνδυασμό των παραγοντικών επιπέδων που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την εξαρτημένη μεταβλητή στην υποδεικνυόμενη περιοχή.

Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι τα ακόλουθα:

- Διάγραμμα Pareto

- Διάγραμμα κύριων επιδράσεων
- Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων
- Διάγραμμα κανονικής κατανομής
- Επιφάνεια απόκρισης
- Ισοϋψείς επιφάνειας απόκρισης
- Διάγραμμα υπολοίπων

Από όλα τα παραπάνω παρατίθενται όσοι πίνακες και διαγράμματα-σχήματα κρίνονται σημαντικοί για κάθε φάση. Τα υπόλοιπα, κυρίως σχήματα και διαγράμματα, παρουσιάζονται το παράρτημα 2.

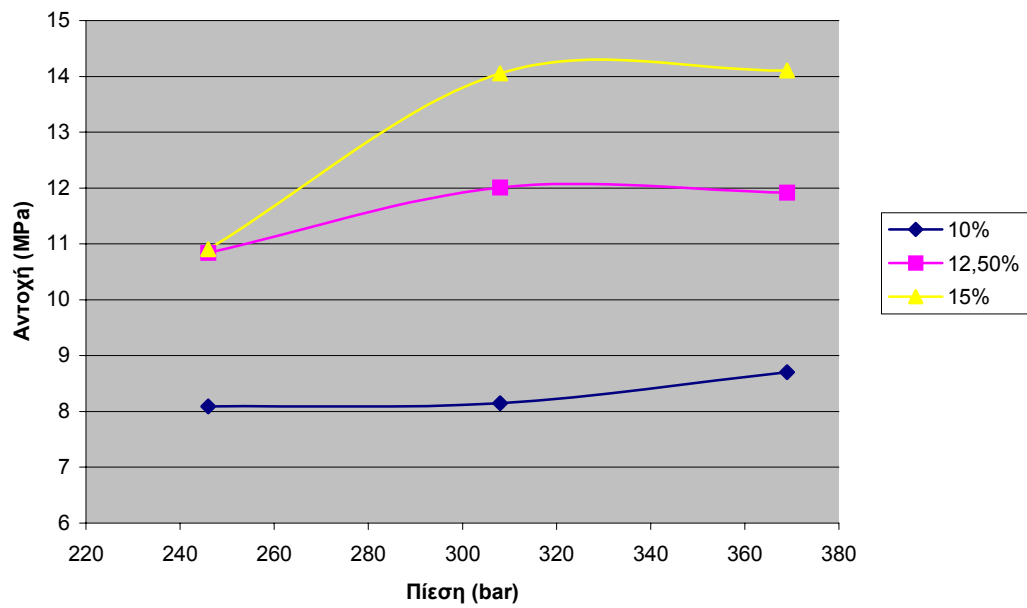


### 5.5. Πειραματικά αποτελέσματα και εφαρμογή παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης Α

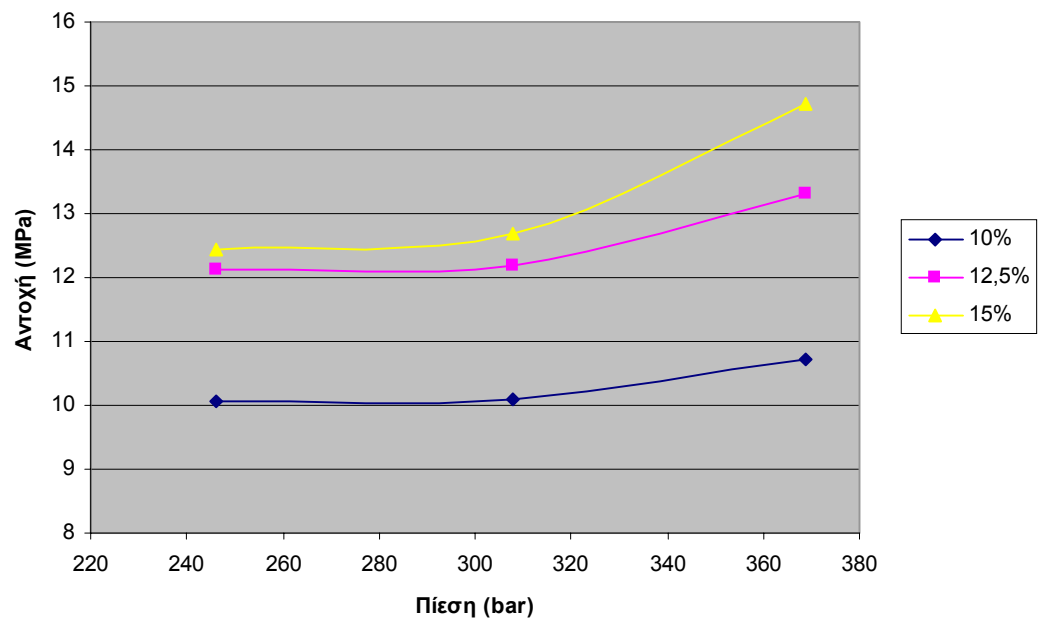
Κατά τη φάση Α παρασκευάστηκαν 2 δοκίμια για κάθε σύσταση και κάθε πίεση, δηλαδή 18 δοκίμια συνολικά. Από κάθε σειρά δοκιμών θραύστηκε 1 δοκίμιο για να προσδιοριστεί η αντοχή του σε θλίψη, ενώ το δεύτερο εμβαπτίστηκε στο νερό για χρονικό διάστημα περίπου 20 ημερών πριν υποβληθεί στη δοκιμή. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές της αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας του Young και η πυκνότητα των ξηρών δοκιμών και η αντοχή σε θλίψη των εμβαπτισμένων δοκιμών της φάσης Α, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα αντοχής – πίεσης μορφοποίησης.

**Πίνακας 5.3.** Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών Α Φάσης.

Κωδικός	Λόγος τσιμέντο/παιπάλη	Πίεση μορφοποίησης (bar)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ξηρών (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Αντοχή σε μον/κή θλίψη εμβαπτισμένων (MPa)
10K40	10%	246	8.08	651	1.76	10.07
10K50	10%	308	8.15	541	1.77	10.10
10K60	10%	369	8.70	4467	1.78	10.73
12K40	12.5%	246	10.84	986	1.74	12.12
12K50	12.5%	308	12.01	641	1.78	13.43
12K60	12.5%	369	11.92	982	1.78	13.33
15K40	15%	246	10.90	797	1.76	12.45
15K50	15%	308	14.05	1232	1.77	12.67
15K60	15%	369	14.11	1095	1.78	14.71



**Διάγραμμα 5.1.** Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την πίεση μορφοποίησης για περιεκτικότητες σε τσιμέντο 10%, 12.5% και 15% (ξηρά δοκίμια).



**Διάγραμμα 5.2.** Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την πίεση μορφοποίησης για περιεκτικότητες σε τσιμέντο 10%, 12.5% και 15% (εμβαπτισμένα δοκίμια).

### 5.5.1. Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού Α φάσης

Κατά την Α φάση παρασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμών και μετρήθηκε η αντοχή τους σε θλίψη, Cs. Καθώς το πρώτο αυτό στάδιο ήταν διερευνητικό, η ανάλυση του πειράματος έγινε για τον μέσο όρο των αντοχών κάθε σειράς δοκιμών. Δημιουργήθηκαν συνολικά 18 συνδυασμοί, ενώ οι παράγοντες που επιδρούν στη μεταβολή της Cs και τα επίπεδά τους φαίνονται στον πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4.** Παράμετροι του πειράματος

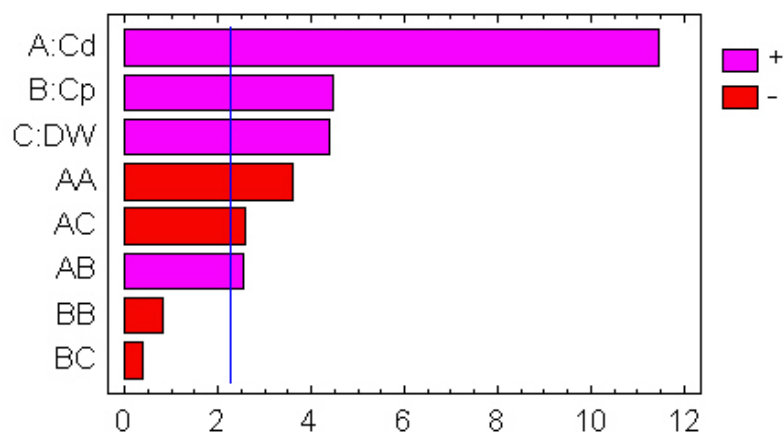
Παράγοντας	Επίπεδο		
	Χαμηλό (-1)	Μέσο (0)	Υψηλό (1)
Cd	10%	12.5%	15%
Cp	40 bar	50 bar	60 bar
DW	Ξηρά δοκίμια	-	Υγρά δοκίμια

**Πίνακας 5.5.** Ανάλυση πειραματικών δεδομένων για τη μεταβλητή Cs

Παράγοντας	Επίδραση	Τυπικό σφάλμα	Κανονικοποιημένες τιμές
A: Cd	3.84	+/- 0.34	11.44
B: Cp	1.51	+/- 0.34	4.48
C: DW	1.21	+/- 0.27	4.39
AA	-2.10	+/- 0.58	3.60
AB	1.05	+/- 0.41	2.54
AC	-0.87	+/- 0.34	2.58
BB	-0.48	+/- 0.58	0.82
BC	-0.13	+/- 0.34	0.39

Στον πίνακα 5.5 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. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.3, τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της μεταβλητής Cs έχει ο παράγοντας A, δηλαδή ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη. Ακολουθούν οι παράγοντες B και C

με μικρότερη επίδραση, ενώ οι αλληλεπιδράσεις έχουν μικρότερες τιμές. Μάλιστα οι αλληλεπιδράσεις BB και BC δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο (μπλε γραμμή).



**Διάγραμμα 5.3.** Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές των επιδράσεων.

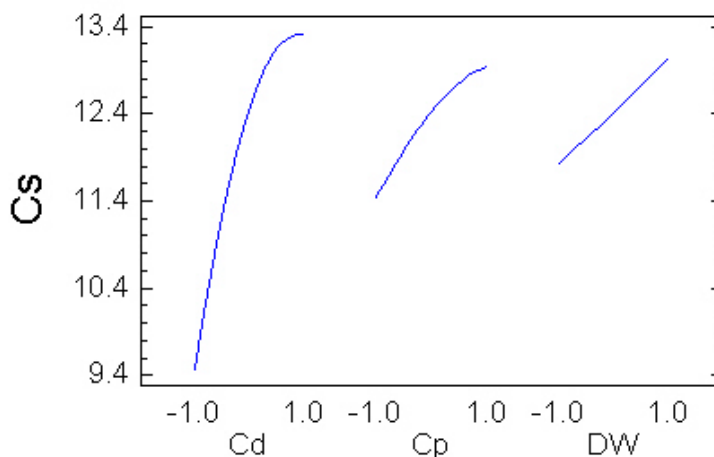
**Πίνακας 5.6.** Ανάλυση μεταβλητότητας (ANOVA)

Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	$F_0$	P-value
A: Cd	44.31	1	44.31	130.88	0.0000
B: Cp	6.81	1	6.81	20.11	0.0015
C: DW	6.54	1	6.54	19.32	0.0017
AA	4.40	1	4.40	12.98	0.0057
AB	2.19	1	2.19	6.48	0.0314
AC	2.25	1	2.25	6.66	0.0297
BB	0.23	1	0.231	0.67	0.4338
BC	0.05	1	0.05	0.15	0.7078
Σφάλμα	3.05	9	0.34		
Σύνολο	69.83	17			

Στη συγκεκριμένη περίπτωση 6 επιδράσεις έχουν τιμή πιθανότητας (P-value) μικρότερη του 0.05, υποδεικνύοντας ότι διαφέρουν σημαντικά από το 0 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  δηλώνει ότι το μοντέλο όπως έχει εφαρμοστεί εξηγεί το 95.64% της μεταβλητότητας του παράγοντα Cs. Ο προσαρμοσμένος συντελεστής συσχέτισης, που είναι καταλληλότερος για σύγκριση μοντέλων με

διάφορους αριθμούς ανεξάρτητων μεταβλητών, είναι 91.76%. Η τυπική απόκλιση των υπολοίπων είναι 0.58 και η μέση τιμή των υπολοίπων είναι 0.33.

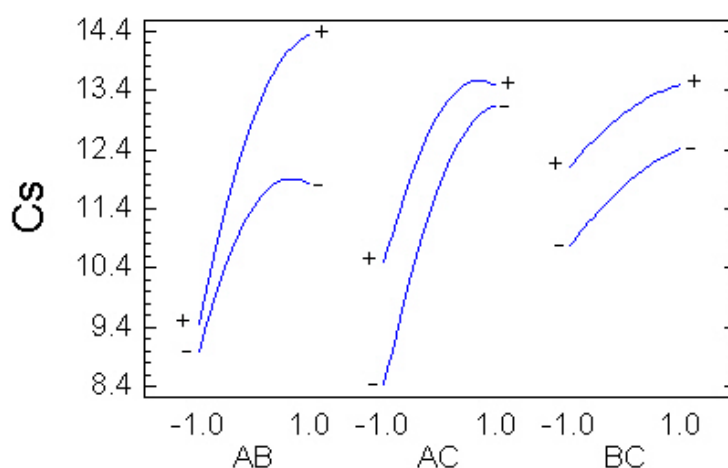
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων (διάγραμμα 5.4) και αλληλεπιδράσεων (διάγραμμα 5.5). Στο διάγραμμα των κύριων επιδράσεων παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Και οι τρεις παράγοντες επιδρούν θετικά στην τιμή της μεταβλητής, με διαφορετικό όμως τρόπο. Ο παράγοντας Cd επηρεάζει την Cs στις χαμηλές τιμές και έχει μεγάλη κλίση, γεγονός που σημαίνει ότι μικρή αύξησή του προκαλεί μεγάλη αύξηση στην τιμή της Cs. Καθώς πλησιάζουμε το υψηλό επίπεδο η κλίση της επίδρασης αλλάζει σημαντικά, υποδηλώνοντας μικρότερη μεταβολή στην Cs. Η επίδραση του παράγοντα Cp έχει παρόμοια μορφή με εκείνη του παράγοντα Cd, παρουσιάζει όμως μικρότερη κλίση και καλύπτει μικρότερο εύρος τιμών της μεταβλητής Cs. Τέλος, η επίδραση του παράγοντα DW είναι μικρότερη από την επίδραση του παράγοντα Cp.



**Διάγραμμα 5.4.** Μεταβολή της Cs συναρτήσει των κυρίων επιδράσεων

Στο Διάγραμμα 5.5 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 B και C δεν παρατηρείται καμία αλληλεπίδραση, αφού η μεταβολή του C ακολουθεί την ίδια μορφή στις χαμηλές και υψηλές τιμές κατά τη μετάβαση του B από το χαμηλό στο

υψηλό επίπεδο. Στην περίπτωση των παραγόντων A και B υπάρχει αλληλεπίδραση καθώς ο παράγοντας B φαίνεται να μην επιφέρει σημαντική διαφορά στις τιμές της μεταβλητής Cs καθώς μεταβαίνει από το χαμηλό στο υψηλό του επίπεδο και ενώ ο A βρίσκεται στο χαμηλό του επίπεδο. Αντίθετα, όταν ο A βρίσκεται στο υψηλό του επίπεδο, ο B προκαλεί σημαντικές αλλαγές στην Cs καθώς αλλάζει επίπεδο. Στην περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων A και C, φαίνεται ότι όταν ο A βρίσκεται στο υψηλό του επίπεδο προκαλεί μικρότερη μεταβολή στην επίδραση του C.



**Διάγραμμα 5.5.** Μεταβολή της Cs συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων (όπου A: Cd, B: Cp, C: DW)

Στον πίνακα 5.7 φαίνονται οι συντελεστές παλινδρόμησης της εξίσωσης που εφαρμόστηκε στα δεδομένα.

**Πίνακας 5.7.** Συντελεστές παλινδρόμησης

Σταθερά	12.4339
A: Cd	1.92167
B: Cp	0.753333
C: DW	0.602778
AA	-1.04833
AB	0.52375
AC	-0.433333
BB	-0.238333
BC	-0.065

Η εξίσωση που προκύπτει από τα δεδομένα είναι η ακόλουθη:

$$Cs = 12.4339 + 1.92167 * Cd + 0.753333 * Cp + 0.602778 * DW - 1.04833 * Cd^2 + \\ + 0.52375 * Cd * Cp - 0.433333 * Cd * DW - 0.238333 * Cp^2 - 0.065 * Cp * DW$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι όλοι οι παράγοντες 1<sup>ης</sup> τάξης και οι αλληλεπιδράσεις που εξετάστηκαν επιδρούν θετικά στην μεταβολή της εξεταζόμενης μεταβλητής δίνοντας τις μέγιστες τιμές όταν βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο. Αλληλεπίδραση υπάρχει ανάμεσα στην περιεκτικότητα του τσιμέντου και την πίεση μορφοποίησης και μεταξύ περιεκτικότητας τσιμέντου και ξηρής ή υγρής κατάστασης των δοκιμίων. Τα εμβαπτισμένα σε νερό δοκίμια εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή σε θλίψη.

#### **5.6. Πειραματικά αποτελέσματα και εφαρμογή παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης B**

Μετά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραμάτων της Α φάσης, όπου παρατηρήθηκε θετική επίδραση των κυρίων παραγόντων αλλά και των αλληλεπιδράσεων, αποφασίστηκε στη Β φάση να γίνουν τροποποιήσεις στους παράγοντες αλλά και στα επίπεδά τους. Ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη πρέπει να είναι τουλάχιστον 12.5% για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή, ενώ πάνω από 15% επιβαρύνεται το κόστος, κι έτσι ο παράγοντας αυτός διατηρήθηκε σε δύο επίπεδα. Επειδή τα εμβαπτισμένα δοκίμια έδωσαν καλύτερες τιμές, επιλέχθηκε στη Β φάση όλα τα δοκίμια να είναι εμβαπτισμένα σε νερό. Η πίεση μεταβάλλεται και πάλι μεταξύ τριών επιπέδων, εγκαταλείφθηκε όμως το επίπεδο των 40bar και προστέθηκε το επίπεδο των 70bar. Τέλος, επιλέχθηκε να εξεταστεί ένας επιπλέον παράγοντας, η λεπτότητα του τσιμέντου, οπότε προέκυψαν δύο σειρές δοκιμίων: μία με κοινό τσιμέντο ως έχει και μία με κοινό τσιμέντο που αλέστηκε για χρονικό διάστημα 200 δευτερολέπτων.

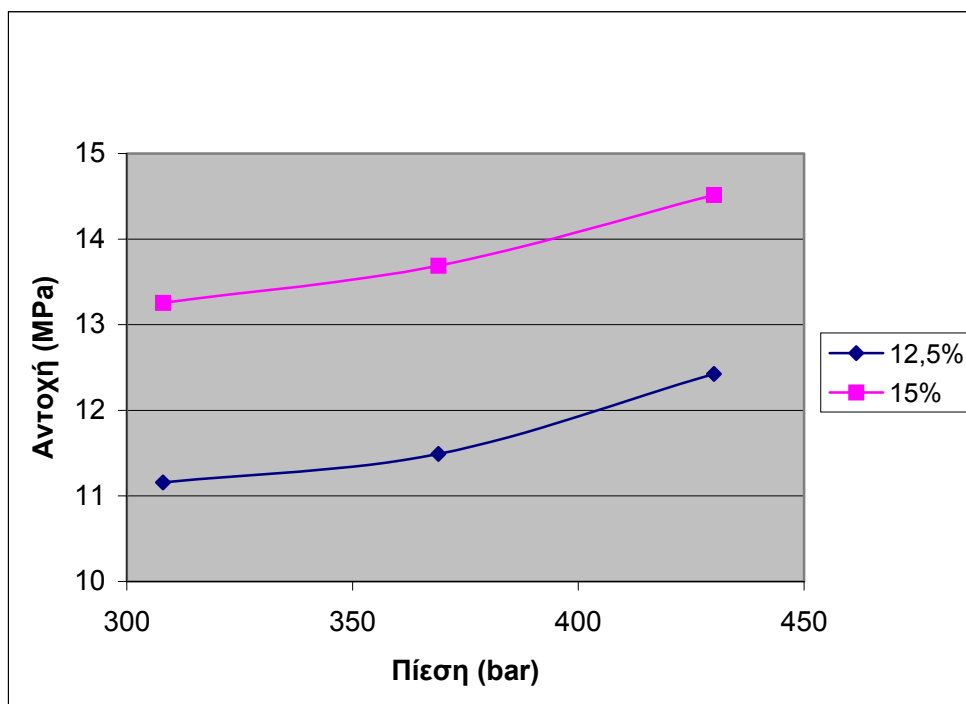
Στον πίνακα 5.9 παρουσιάζονται οι συνθέσεις των δοκιμίων και οι ιδιότητες που μετρήθηκαν και ακολουθούν τα διαγράμματα πίεσης-αντοχής. Κατά την φάση Β παρασκευάστηκαν συνολικά 60 δοκίμια. Για ένα δοκίμιο από κάθε σύνθεση

προσδιορίστηκε η υδατοαπορρόφηση ενώ τα υπόλοιπα υποβλήθηκαν στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

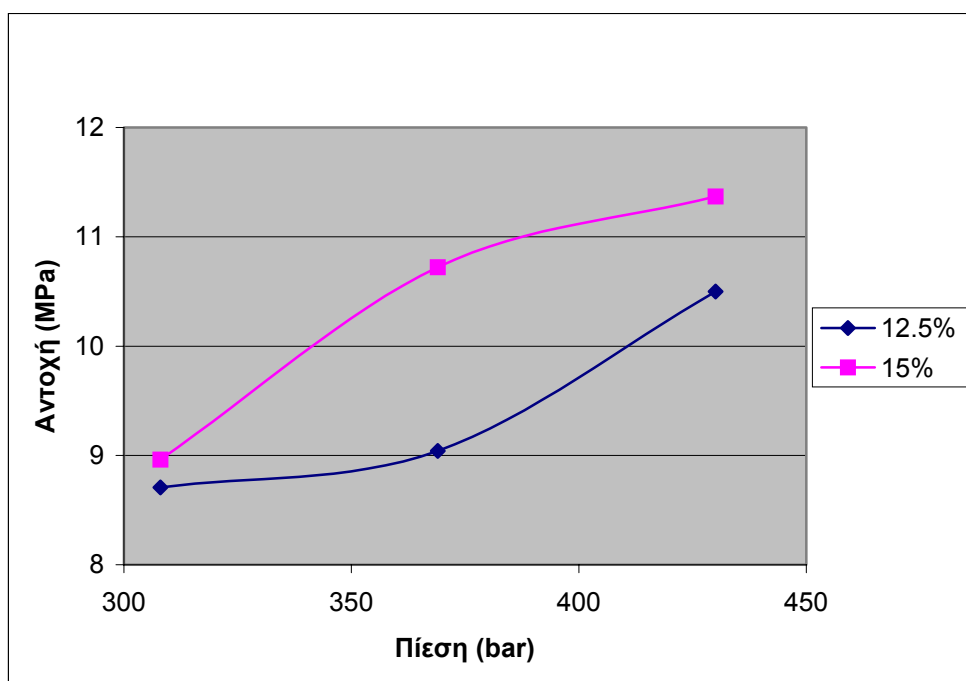
**Πίνακας 5.9.** Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών Β Φάσης.

Κωδικός	Λόγος τσιμέντο/παιπάλη	Πίεση μορφοποίησης (bar)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας Young	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Υδατο-απορρόφηση %
12A50	12.5%	308	11.16	1170	1.78	16.92
12A60	12.5%	369	11.49	1200	1.80	15.70
12A70	12.5%	430	12.42	1340	1.82	15.06
15A50	15%	308	13.25	1960	1.80	16.61
15A60	15%	369	13.69	1280	1.81	16.63
15A70	15%	430	14.51	1430	1.84	16.12
12K50	12.5%	308	8.71	870	1.77	16.99
12K60	12.5%	369	9.04	890	1.77	16.98
12K70	12.5%	430	10.50	810	1.80	16.78
15K50	15%	308	8.96	760	1.79	17.39
15K60	15%	369	10.72	1130	1.80	17.09
15K70	15%	430	11.37	920	1.81	16.92





**Διάγραμμα 5.6.** Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την πίεση μορφοποίησης για περιεκτικότητες σε αλεσμένο τσιμέντο 12.5% και 15%.



**Διάγραμμα 5.7.** Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την πίεση μορφοποίησης για περιεκτικότητες σε κοινό τσιμέντο 12.5% και 15%.

### 5.6.1. Αποτελέσματα παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης Β με εξεταζόμενη μεταβλητή την αντοχή σε θλίψη

Για τη φάση αυτή προέκυψαν συνολικά 12 συνδυασμοί παραγόντων και επιπέδων οι οποίοι εμφανίζονται 4 φορές (όσα και τα δοκίμια που θραύστηκαν για κάθε σύνθεση). Οι παράγοντες που επιδρούν στη μεταβολή της Cs και τα επίπεδά τους φαίνονται στον πίνακα 5.10.

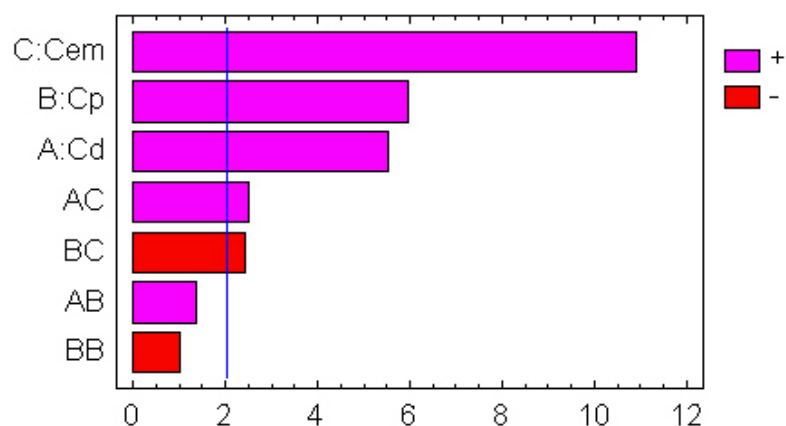
**Πίνακας 5.10.** Παράμετροι του πειράματος

Παράγοντας	Επίπεδο		
	Χαμηλό (-1)	Μέσο (0)	Υψηλό (1)
Cd	12.5%	-	15%
Cp	50 bar	60 bar	70 bar
Cem	Κοινό	-	Αλεσμένο

**Πίνακας 5.11.** Ανάλυση πειραματικών δεδομένων για τη μεταβλητή Cs

Παράγοντας	Επίδραση	Τυπικό σφάλμα	Κανονικοποιημένες τιμές
A: Cd	1.50	+/- 0.27	5.55
B: Cp	1.98	+/- 0.33	5.90
C: Cem	2.95	+/- 0.27	10.90
AB	0.45	+/- 0.33	1.37
AC	0.68	+/- 0.27	2.50
BB	-0.57	+/- 0.57	0.99
BC	-0.80	+/- 0.33	2.42

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.8, τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της μεταβλητής Cs έχει ο παράγοντας C, δηλαδή η λεπτότητα του τσιμέντου. Ακολουθούν οι παράγοντες B και A με μικρότερη επίδραση, ενώ οι αλληλεπιδράσεις έχουν μικρότερες τιμές. Μάλιστα οι αλληλεπιδράσεις AB και BB δεν έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση καθώς βρίσκονται κάτω από το όριο (μπλε γραμμή).



**Διάγραμμα 5.8.** Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές των επιδράσεων

**Πίνακας 5.12.** Ανάλυση μεταβλητότητας

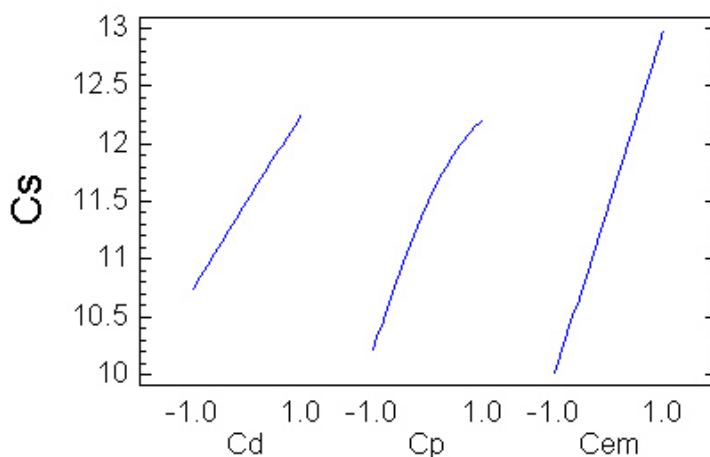
Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F <sub>0</sub>	P-value
A: Cd	27.15	1	27.15	30.77	0.0000
B: Cp	31.43	1	31.43	35.62	0.0000
C: Cem	104.84	1	104.84	118.84	0.0000
AB	1.66	1	1.66	1.88	0.1786
AC	5.54	1	5.54	6.29	0.0167
BB	0.87	1	0.87	0.99	0.3264
BC	5.17	1	5.17	5.86	0.0205
Blocks	1.93	3	0.64	0.73	0.5419
Σφάλμα	32.64	37	0.88		
Σύνολο	211.25	47			

Στη συγκεκριμένη περίπτωση 5 επιδράσεις έχουν τιμή πιθανότητας (P-value) μικρότερη του 0.05, υποδεικνύοντας ότι διαφέρουν σημαντικά από το 0 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  δηλώνει ότι το μοντέλο, όπως έχει εφαρμοστεί, εξηγεί το 84.55% της μεταβλητότητας του παράγοντα Cs. Ο προσαρμοσμένος συντελεστής συσχέτισης είναι 81.84%. Η τυπική απόκλιση των υπολοίπων είναι 0.94, ενώ η μέση τιμή των υπολοίπων είναι 0.66.

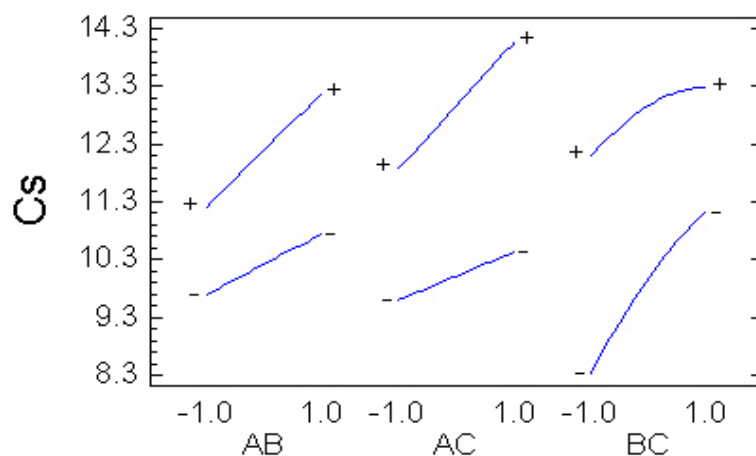
Από το διάγραμμα των κύριων επιδράσεων (διάγραμμα 5.9), φαίνεται ότι ο παράγοντας Cem έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή των τιμών της μεταβλητής Cs. Η επίδρασή του δείχνει ότι όσο μεταβαίνουμε σε μικρότερη κοκκομετρία τσιμέντου τόσο η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται. Την ίδια μορφή εμφανίζει και η επίδραση του παράγοντα Cd, με τη διαφορά ότι επηρεάζει σε μικρότερο εύρος τις τιμές του Cs. Τέλος, η επίδραση του παράγοντα Cp εμφανίζει αλλαγή της κλίσης καθώς πλησιάζει το υψηλό

του επίπεδο, παρουσιάζοντας μικρότερη επίδραση στην περιοχή εκείνη. Το μέγεθος της επίδρασης είναι μικρότερο από εκείνο του παράγοντα Cem και ελαφρώς μεγαλύτερο από εκείνο του Cd.

Στο διάγραμμα 5.10 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 φαίνεται να υπάρχει μικρή αλληλεπίδραση, καθώς οι γραμμές που συμβολίζουν το υψηλό και χαμηλό επίπεδο του B αποκλίνουν ελαφρώς από το να είναι παράλληλες. Λίγο πιο έντονα εμφανίζεται το ίδιο φαινόμενο ανάμεσα στους παράγοντες A και C. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται εντονότερη μεταβολή των παραγόντων B και C όταν αυτοί βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο και ο A μεταβαίνει από το χαμηλό στο υψηλό. Τέλος, εξετάζοντας την αλληλεπίδραση των παραγόντων B και C, παρατηρείται εντονότερη μεταβολή στις τιμές της μεταβλητής όταν ο C βρίσκεται στο χαμηλό του επίπεδο και ο B μεταβαίνει από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο.



**Διάγραμμα 5.9.** Μεταβολή της Cs συναρτήσει των κυρίων επιδράσεων



**Διάγραμμα 5.10.** Μεταβολή της Cs συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων (όπου A: Cd, B: Cp, C: Cem)

Στον πίνακα 5.13 δίνονται οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν από την ανάλυση παλινδρόμησης για τον υπολογισμό της μεταβλητής απόκρισης Cs με πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού.

**Πίνακας 5.13.** Συντελεστές παλινδρόμησης

Σταθερά	11.4963
A: Cd	0.752088
B: Cp	0.991063
C: Cem	1.47792
AB	0.227672
AC	0.33991
BB	-0.286054
BC	-0.402032

Η εξίσωση παλινδρόμησης που προκύπτει από τα δεδομένα είναι η εξής:

$$Cs = 11.4963 + 0.752088 \cdot Cd + 0.991063 \cdot Cp + 1.47792 \cdot Cem + 0.227672 \cdot Cd \cdot Cp + 0.33991 \cdot Cd \cdot Cem - 0.28605 \cdot Cp^2 - 0.402032 \cdot Cp \cdot Cem$$

Η διαδρομή μέγιστης ανόδου από το κέντρο των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζεται για μεταβολές του παράγοντα  $C_d$  σε διαστήματα 1 μονάδας, ενώ ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων είναι όταν όλοι οι παράγοντες εμφανίζονται στο υψηλό τους επίπεδο.

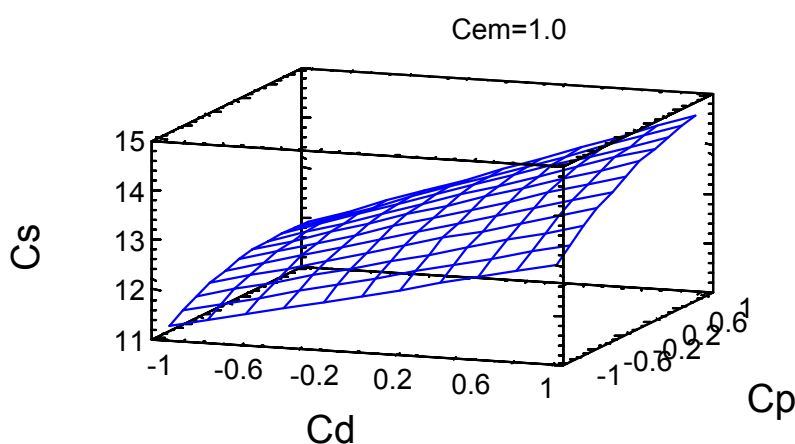
**Πίνακας 5.14.** Διαδρομή μέγιστης ανόδου

$C_d$	$C_p$	Predicted $C_s$ (Mpa)
0.0	0.0	11.4963
1.0	0.586	15.1023
2.0	0.691	18.5922
3.0	0.659	22.7088
4.0	0.562	27.5785
5.0	0.426	33.2541

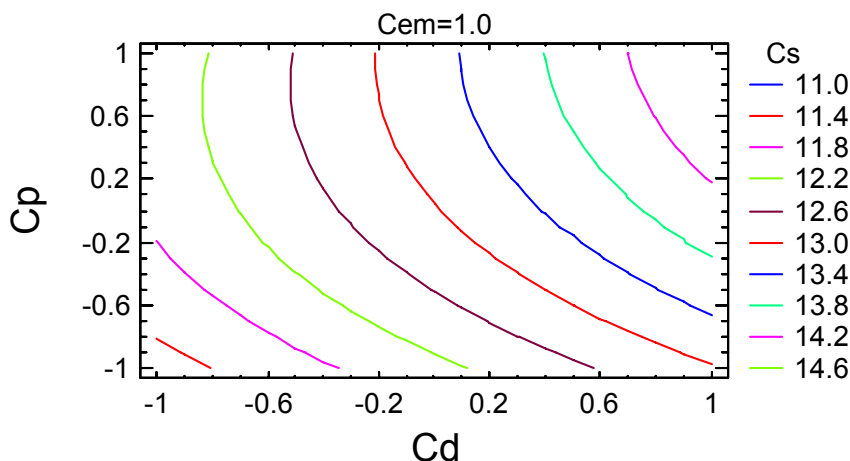
**Πίνακας 5.15.** Βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για την μεγιστοποίηση της  $C_s$

Παράγοντας	Χαμηλό επίπεδο	Υψηλό επίπεδο	Βέλτιστο
$C_d$	-1.0	1.0	1.0
$C_p$	-1.0	1.0	1.0
$C_{em}$	-1.0	1.0	1.0

Η επιφάνεια απόκρισης δείχνει ότι αν ο παράγοντας  $C_{em}$  διατηρηθεί σε ένα μεσαίο επίπεδο τότε παίρνουμε τις μέγιστες τιμές αντοχής όταν οι άλλοι δύο παράγοντες βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο. Οι ισοϋψείς δείχνουν επιπλέον ότι στις χαμηλές τιμές της αντοχής μεγαλύτερη μεταβολή επιφέρει η πίεση ενώ στις υψηλότερες τιμές επιδρούν και οι δύο παράγοντες σχεδόν το ίδιο.



**Σχήμα 5.2.** Επιφάνεια απόκρισης



**Σχήμα 5.3.** Ισότιμες καμπύλες από την επιφάνεια απόκρισης

### 5.6.2. Εφαρμογή παραγοντικού σχεδιασμού για τα δοκίμια της φάσης B με εξεταζόμενη μεταβλητή την υδατοαπορρόφηση

Στη συνέχεια έγινε ανάλυση του πειράματος της B φάσης χρησιμοποιώντας ως τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής τις τιμές της υδατοαπορρόφησης. Οι παράμετροι του πειράματος φαίνονται στον πίνακα 5.16.

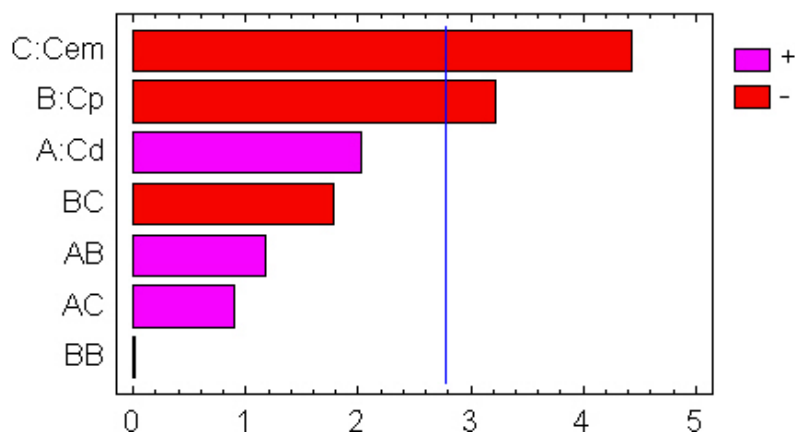
**Πίνακας 5.16.** Παράμετροι του πειράματος

Παράγοντας	Επίπεδο		
	Χαμηλό (-1)	Μέσο (0)	Υψηλό (1)
Cd	12.5%	-	15%
Cp	50 bar	60 bar	70 bar
Cem	Κοινό τσιμέντο	-	Αλεσμένο τσιμέντο

**Πίνακας 5.17.** Ανάλυση πειραματικών δεδομένων για τη μεταβλητή Wa

Παράγοντας	Επίδραση	Τυπικό σφάλμα	Κανονικοποιημένες τιμές
A: Cd	0.38	+/- 0.19	2.02
B: Cp	-0.75	+/- 0.23	3.22
C: Cem	-0.85	+/- 0.19	4.43
AB	0.27	+/- 0.23	1.18
AC	0.17	+/- 0.19	0.89
BB	-0.0025	+/- 0.41	0.006
BC	-0.42	+/- 0.23	1.77

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.11, τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της μεταβλητής Cs έχει ο παράγοντας C, δηλαδή η λεπτότητα του τσιμέντου. Ακολουθούν οι παράγοντες B και A με μικρότερη επίδραση, ενώ οι αλληλεπιδράσεις έχουν μικρότερες τιμές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στατιστικά σημαντική επίδραση έχουν μόνο η λεπτότητα του τσιμέντου και η πίεση.



**Διάγραμμα 5.11.** Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές

**Πίνακας 5.18.** Ανάλυση μεταβλητότητας

Πηγή μεταβλητότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F <sub>0</sub>	P-value
A: Cd	0.45	1	0.45	4.08	0.1136
B: Cp	1.15	1	1.15	10.34	0.0324
C: Cem	2.17	1	2.17	19.61	0.0114
AB	0.15	1	0.15	1.39	0.3040
AC	0.09	1	0.09	0.80	0.4225
BB	0.00000416	1	0.00000416	0.00	0.9954
BC	0.35	1	0.35	3.14	0.1510
Σφάλμα	0.44	4	0.11		
Σύνολο	4.81	11			

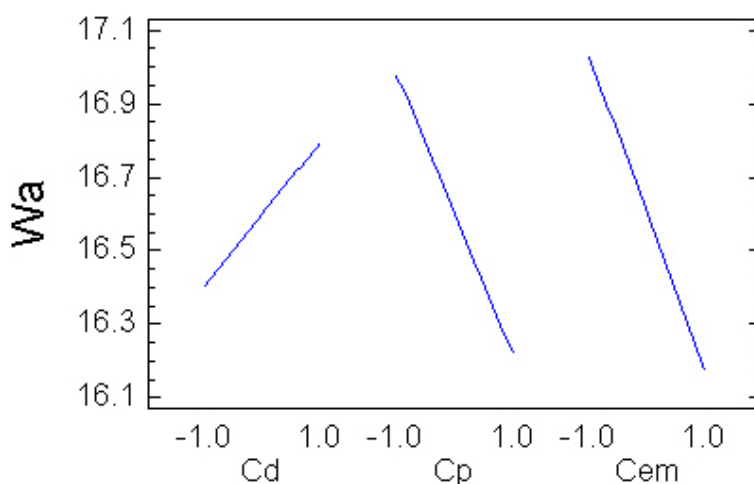
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης μεταβλητότητας που δίνονται στον πίνακα 5.18, φαίνεται ότι δύο μόνο επιδράσεις (Cp, Cem) έχουν τιμή πιθανότητας (P-value) μικρότερη του 0.05, υποδεικνύοντας ότι διαφέρουν σημαντικά από το 0 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  δηλώνει ότι το μοντέλο όπως έχει εφαρμοστεί εξηγεί το 91.77 % της μεταβλητότητας του παράγοντα Cs. Ο προσαρμοσμένος συντελεστής συσχέτισης είναι 74.63 %. Η τυπική απόκλιση των υπολοίπων είναι 0.33, ενώ η μέση τιμή των υπολοίπων είναι 0.17.



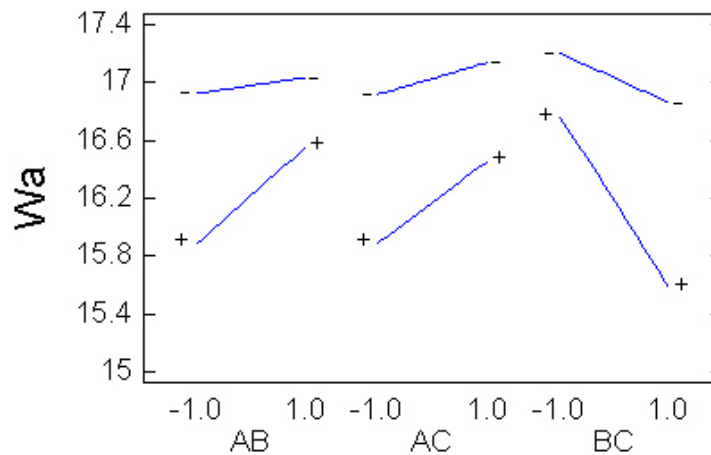
Τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια πρέπει να κρίνονται με επιφύλαξη, επειδή, όπως προέκυψε από την ανάλυση μεταβλητότητας, στατιστικά σημαντικές είναι μόνο οι επιδράσεις της πίεσης μορφοποίησης και της λεπτότητας του τσιμέντου.

Στο διάγραμμα 5.12 παρουσιάζεται η μορφή της επίδρασης κάθε παράγοντα από το χαμηλό ως το υψηλό του επίπεδο. Ο παράγοντας Cd επηρεάζει την  $W_a$  αρνητικά, καθώς όσο μεταβαίνουμε από το χαμηλό στο υψηλό του επίπεδο, τόσο η υδατοαπορρόφηση αυξάνει. Αντίθετα, οι παράγοντες Cp και Cem έχουν θετική επίδραση αφού όσο μεταβαίνουν σε υψηλότερο επίπεδο τόσο η τιμή της  $W_a$  μειώνεται.

Στο διάγραμμα 5.13 παρουσιάζεται η μεταβολή της μεταβλητής  $W_a$  σε συνάρτηση με τις αλληλεπιδράσεις των παραγόντων. Στην περίπτωση των παραγόντων A και B κυρίως παρατηρείται αλληλεπίδραση όταν ο B βρίσκεται στο υψηλό του επίπεδο, ενώ όταν βρίσκεται στο χαμηλό και ο A μεταβαίνει από το χαμηλό στο υψηλό η μεταβολή που επέρχεται στην  $W_a$  είναι πολύ μικρή. Όμοια μεταβολή στην  $W_a$  φαίνεται να προκαλεί και η αλληλεπίδραση των παραγόντων A και C, αυξάνοντας την τιμή της. Αντίθετα η αλληλεπίδραση των παραγόντων B και C προκαλεί μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής, ιδιαίτερα όταν και οι δύο παράγοντες βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο.



**Διάγραμμα 5.12.** Μεταβολή της  $W_a$  συναρτήσει των κυρίων επιδράσεων



**Διάγραμμα 5.13.** Μεταβολή της Cs συναρτήσει των αλληλεπιδράσεων

**Πίνακας 5.19.** Συντελεστές παλινδρόμησης

Σταθερά	16.6
A: Cd	0.194167
B: Cp	-0.37875
C: Cem	-0.425833
AB	0.13875
AC	0.0858333
BB	-0.00125
BC	-0.20875

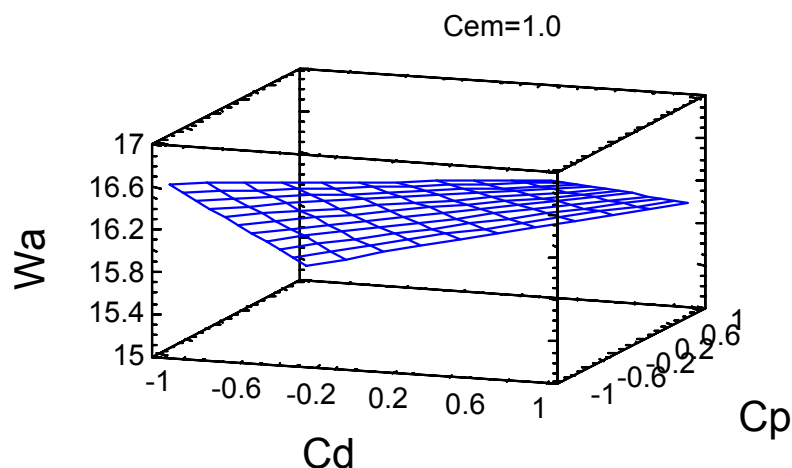
Στον πίνακα 5.19 δίνονται οι συντελεστές παλινδρόμησης της εξίσωσης που προσαρμόστηκε στα δεδομένα. Η εξίσωση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$W_a = 16.6 + 0.194167 \cdot C_d - 0.37875 \cdot C_p - 0.425833 \cdot C_{em} + 0.13875 \cdot C_d \cdot C_p + 0.0858333 \cdot C_d \cdot C_{em} - 0.00125 \cdot C_p^2 - 0.20875 \cdot C_p \cdot C_{em}$$

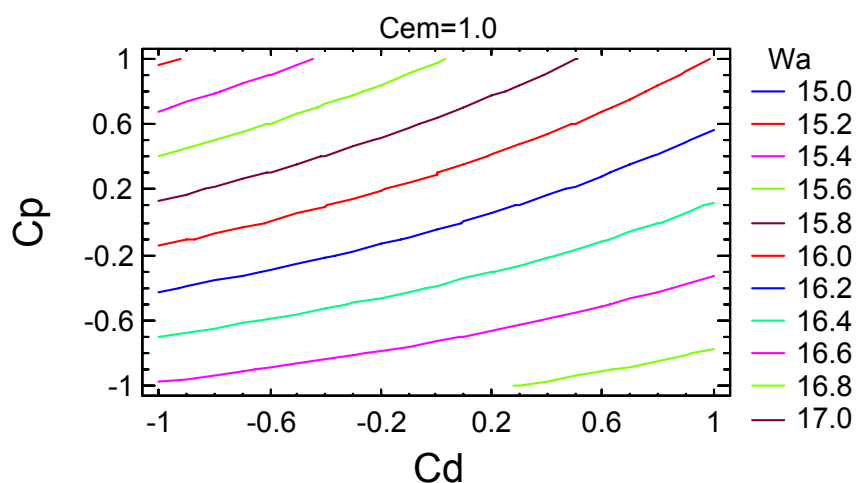
Ο πίνακας 5.20 δείχνει τον συνδυασμό των παραγοντικών επιπέδων που ελαχιστοποιούν την εξαρτημένη μεταβλητή  $W_a$  στην υποδεικνυόμενη περιοχή.

**Πίνακας 5.20.** Βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για ελαχιστοποίηση της  $W_a$

Παράγοντας	Χαμηλό επίπεδο	Υψηλό επίπεδο	Βέλτιστο
Cd	-1.0	1.0	-1.0
Cp	-1.0	1.0	1.0
Cem	-1.0	1.0	1.0



Σχήμα 5.4. Επιφάνεια απόκρισης



Σχήμα 5.5. Ισοτίμες καμπύλες της επιφάνειας απόκρισης

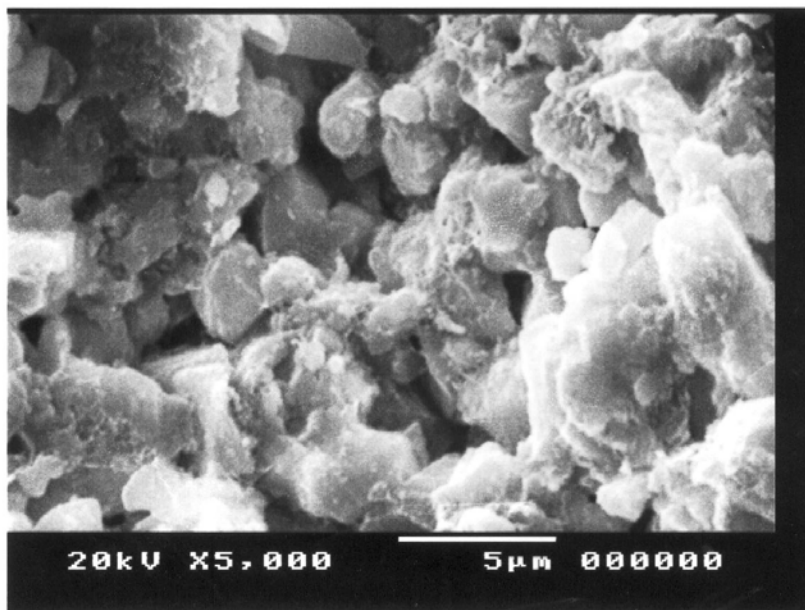
### 5.7 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δύο φάσεων πειραμάτων προκύπτει ότι για την επίτευξη ικανοποιητικής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (μεγαλύτερη από 7 MPa για δομικούς λίθους σύμφωνα με το BS 6073) απαιτείται δημιουργία μίγματος παιπάλης –τσιμέντου με αναλογία τσιμέντου όχι μικρότερη του **12.5%** του βάρους της παιπάλης. Σύμφωνα με το BS 6717 για πλάκες πεζοδρομίου, η αντοχή των δοκιμών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 49 MPa.

Η αύξηση της πίεσης μορφοποίησης αυξάνει την αντοχή σε θλίψη, καθώς το υλικό συμπυκνώνεται και γίνεται καλύτερη διάταξη αδρανών και τσιμεντοκονίας. Προτείνεται ως πίεση μορφοποίησης η υψηλότερη που μπορεί να επιτευχθεί από τις διαθέσιμες στο εμπόριο πρέσες μορφοποίησης. Η τιμή αυτή από έρευνα της αγοράς για τέτοιου είδους εξοπλισμό εκτιμάται της τάξης **350-400 bar**.

Η εμφάνιση των δοκιμίων στο νερό, μετά από παραμονή τους για 5 μέρες στο θάλαμο φύλαξης δειγμάτων, έδειξε ότι τα δημιουργούμενα δοκίμια όχι μόνο **είναι ανθεκτικά σε υγρό περιβάλλον**, αλλά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε θλίψη μετά από 28 ημέρες. Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια σειρά περίπλοκων χημικών αντιδράσεων που διαρκούν μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων αυτών τα συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό και σχηματίζουν ένυδρες κρυσταλλικές ενώσεις. Με την εμφάνιση των δοκιμίων παρέχεται το απαιτούμενο νερό για τις αντιδράσεις κι έτσι αποφεύγεται η συστολή που επέρχεται κατά την ξήρανση του υλικού και επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή των δοκιμίων (Οικονόμου, 1993).

Όσον αφορά στις ιδιότητες της πυκνότητας και της υδατοαπορρόφησης, η μεν πρώτη εμφανίζεται ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με παρόμοια προϊόντα του εμπορίου, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει υψηλότερες τιμές. Η χαμηλή πυκνότητα του υλικού οφείλεται στον λεπτότατο καταμερισμό του που δημιουργεί κενά, με αποτέλεσμα ακόμα και η συμπίεση να μην επιφέρει καλή συμπίκνωση. Έτσι, τα δοκίμια εμφανίζουν σχετικά μικρή πυκνότητα και απορροφούν μεγάλη ποσότητα νερού. Ικανοποιητική θεωρείται η πυκνότητα που πλησιάζει την τιμή  $2.3\text{g/cm}^3$ , ενώ η υδατοαπορρόφηση δεν πρέπει να ξεπερνάει το 4%. Στη βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών μπορεί να συμβάλει η προσθήκη αδρανών κατάλληλης κοκκομετρίας ώστε να γίνεται καλύτερη κατανομή των κόκκων μέσα στο προϊόν. Στην εικόνα 5.6, που προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, φαίνεται ότι, ακόμα και για το δοκίμιο με την καλύτερη σύνθεση (15A70), η διάταξη και το μέγεθος των κόκκων δημιουργεί αρκετά κενά με αποτέλεσμα την χαμηλή πυκνότητα και την αυξημένη υδατοαπορρόφηση.



**Εικόνα 5.6.** Εικόνα δοκιμίου από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

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.

Κατά την Α φάση, οι παράγοντες που επιδρούν στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη, η πίεση μορφοποίησης και η εμβάπτιση ή όχι των δοκιμίων σε νερό. Από την αξιολόγηση της πρώτης πειραματικής φάσης με χρήση του λογισμικού STATGRAPHICS Plus 5, προέκυψε ότι η μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη προκύπτει όταν όλοι οι παράγοντες βρίσκονται στο υψηλό τους επίπεδο. Τη μεγαλύτερη επίδραση στην τιμή της αντοχής έχει ο λόγος

τσιμέντο/παιπάλη και ακολουθούν οι επιδράσεις των άλλων δύο παραγόντων, ενώ οι αλληλεπιδράσεις δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την εξεταζόμενη μεταβλητή.

Κατά τη δεύτερη πειραματική φάση, όπου έγινε εμβαπτισμός όλων των δοκιμίων σε νερό, αύξηση της πίεσης κατά ένα επίπεδο και έλεγχος της επίδρασης της λεπτότητας του τσιμέντου, προέκυψε και πάλι ότι όλοι οι παράγοντες στο επιδρούν θετικά στην αντοχή των δοκιμίων. Παρατηρείται ότι σημαντικότερος παράγοντας είναι η κοκκομετρία του τσιμέντου, επιδρώντας θετικά στην αύξηση της αντοχής και στην μείωση της υδατοαπορρόφησης. Μείωση της υδατοαπορρόφησης επιφέρει και η πίεση, ενώ ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη προκαλεί αύξηση στην τιμή της ιδιότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 6.1 Συμπεράσματα

Η αξιοποίηση της παιπάλης που παράγεται από τα λατομεία αδρανών υλικών μπορεί να λύσει περιβαλλοντικά προβλήματα και να επιφέρει οικονομικά οφέλη. Η ασβεστολιθική παιπάλη που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, με βάση τις ιδιότητές της, δεν μπορεί να απορροφηθεί από βιομηχανίες της Κρήτης χωρίς να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, οπότε το ενδιαφέρον στρέφεται στη δυνατότητα χρήσης της στην παραγωγή δομικών στοιχείων.

Ο παραγοντικός σχεδιασμός αποδεικνύεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον καθορισμό των συνθέσεων των δομικών στοιχείων, καθώς με σταδιακή διεξαγωγή πειραμάτων εντοπίζονται οι σημαντικές επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις των παραγόντων στην εξεταζόμενη μεταβλητή.

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την υδατοαπορρόφηση των δοκιμίων είναι ο λόγος τσιμέντο/παιπάλη, η πίεση μορφοποίησης, η λεπτότητα του τσιμέντου και η εμβάπισή τους ή όχι στο νερό. Οι αλληλεπιδράσεις και οι επιδράσεις 2<sup>ου</sup> βαθμού έχουν μικρή στατιστική σημασία και για τις δύο εξεταζόμενες ιδιότητες.

Από τους κύριους παράγοντες, ως προς την αντοχή σε θλίψη, μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η λεπτότητα του τσιμέντου, ακολουθεί η πίεση μορφοποίησης και η περιεκτικότητα του τσιμέντου, ενώ σημαντική αποδείχτηκε και η εμβάπτιση των δοκιμίων στο νερό. Ως προς την υδατοαπορρόφηση, η λεπτότητα του τσιμέντου και η πίεση μορφοποίησης συμβάλλουν στην μείωση της τιμής της ιδιότητας, ενώ αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου την αυξάνει.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές τα δοκίμια παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή για παραγωγή δομικών λίθων όπου απαιτείται τιμή της ιδιότητας μεγαλύτερη των 7MPa.

Για να επιτευχθούν τιμές μεγαλύτερες από το όριο των προδιαγραφών θα πρέπει η περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι πάνω από 12.5%.

## **6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Προκειμένου να σχηματιστεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν, θα πρέπει να εξεταστούν και άλλες ιδιότητες τους, όπως είναι η συμπεριφορά τους σε περιβάλλον υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας και το πορώδες. Από τα πειράματα που έγιναν ήδη, προέκυψε ότι σημαντικές είναι οι επιδράσεις των κύριων παραγόντων, οπότε η περαιτέρω έρευνα μπορεί να γίνει με κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό, άρα με λιγότερα πειράματα.

Στη συνέχεια προτείνονται κάποιοι τρόποι αξιοποίησης του λεπτόκοκκου ασβεστόλιθου στον τομέα των δομικών υλικών. Πέρα από τα δοκίμια που παρουσιάστηκαν στην εργασία ως τώρα, προτείνεται η διερεύνηση παρασκευής δοκιμίων με δύο στρώσεις, όπου στην ανώτερη θα συμπεριλαμβάνεται ασβεστολιθικό υλικό μεγαλύτερης κοκκομετρίας. Προτείνεται, επίσης, η χρήση της παιπάλης στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, μια νέα σχετικά τεχνολογία που δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη στην Ελλάδα. Τέλος, μια αρκετά διαδεδομένη τεχνική για την αξιοποίηση του λεπτόκοκκου ασβεστόλιθου είναι η μορφοποίησή του σε pellets για χρήση ως τεχνητό αδρανές.

Η πρώτη πρόταση περιλαμβάνει την παρασκευή δομικών στοιχείων δύο στρώσεων διαφορετικού πάχους. Το κατώτερο και μεγαλύτερο στρώμα παρασκευάζεται με μίγμα τσιμέντου και παιπάλης, όπως περιγράφηκε ως τώρα. Το ανώτερο στρώμα είναι λεπτότερο σε πάχος και περιλαμβάνει αδρανή μεγαλύτερης κοκκομετρίας. Τα δύο μίγματα τοποθετούνται διαδοχικά στο καλούπι και με την εφαρμογή της πίεσης προκύπτει ένα συμπαγές δοκίμιο.

Εργαστηριακά παρασκευάστηκαν τέτοια δοκίμια με σύνθεση για το κατώτερο στρώμα παιπάλη με 15% του βάρους της τσιμέντο, ενώ για το ανώτερο στρώμα χρησιμοποιήθηκε το κλάσμα +212 με 30% του βάρους του τσιμέντο. Η πίεση που εφαρμόστηκε ήταν 70 bar. Τα δοκίμια που προέκυψαν (Εικόνα 6.1) φαίνονται αρκετά συνεκτικά, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων τους.





**Εικόνα 6.1.** Δοκίμια δύο στρώσεων

Η επόμενη πρόταση είναι να χρησιμοποιηθεί η παιπάλη ως πληρωτικό σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι το είδος του σκυροδέματος το οποίο δύναται να πληρώσει οποιονδήποτε ξυλότυπο και να αποκτήσει ικανή συμπίκνωση αποκλειστικά μέσω της βαρύτητας και της ρεολογικής του συμπεριφοράς. Κύριο χαρακτηριστικό του ΑΣΣ είναι η ιδιαίτερα αυξημένη ρευστότητα σε συνδυασμό με τη διατήρηση της απαιτούμενης συνεκτικότητας, η οποία αποτελεί μέτρο της αντίστασης διαχωρισμού του αναμίγματος.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι: η αυξημένη παραγωγικότητα (μείωση του χρόνου σκυροδέτησης), η δυνατότητα σκυροδέτησης μελών περίπλοκης γεωμετρίας ή μελών με ιδιαίτερα πυκνό οπλισμό, οι βελτιωμένες εξωτερικές επιφάνειες, η αυξημένη ανθεκτικότητα (ικανοποιητική και ομοιόμορφη συμπίκνωση), το αναβαθμισμένο-ασφαλές περιβάλλον εργασίας (μείωση της ηχορύπανσης και της φυσικής καταπόνησης από τη δόνηση), μείωση στην κατανάλωση ενέργειας (διακοπή χρήσης δονητικών τραpezών), η ανάγκη για μικρότερο ανθρώπινο δυναμικό και η κατασκευή λεπτότερων δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα.

Το ΑΣΣ περιέχει περισσότερη υδραυλική κονία (περίπου  $500 \text{ kg/m}^3$ ) από το συμβατικό, ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική εργασιμότητα και μείωση του κινδύνου διαχωρισμού ή εξίδρωσης. Ωστόσο, για να αποφύγουμε προβλήματα λόγω της μεγάλης θερμότητας ενυδάτωσης, η υδραυλική κονία είναι συνδυασμός από δύο ή τρία εξαιρετικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά, ένα εκ των οποίων μπορεί να είναι και η παιπάλη. Τα άλλα πληρωτικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνων, κ.ά.

Για τη σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ και του συμβατικού σκυροδέματος έχουν γίνει μελέτες τόσο στο εξωτερικό (Holschemacher et al, 2002) όσο και στην

Ελλάδα (Σίδερης et al, 2003). Και στις δύο περιπτώσεις μελετών τα αποτελέσματα είναι παρόμοια και δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική διαφορά στις μηχανικές ιδιότητες των δύο τύπων σκυροδέματος.

Ένας άλλος τρόπος για την αξιοποίηση της παιπάλης είναι να δημιουργηθούν σφαιρικά συσσωματώματα που θα χρησιμοποιηθούν ως αδρανή. Η σφαιροποίηση επιτυγχάνεται με χρήση συνδετικού υλικού τόσο με διεργασίες εν υγρώ, όσο και με ξηρές διεργασίες.

Η διαμόρφωση κόκκων εν υγρώ, όπως φαίνεται και από τον ορισμό, περιλαμβάνει τη χρήση ενός συνδετικού υλικού σε διάλυμα για την επίτευξη της συσσωμάτωσης. Η βασική αρχή της υγρής σφαιροποίησης είναι η εφαρμογή ενός υδατικού παράγοντα πάνω σε ένα ανακινούμενο στρώμα λεπτομερών. Όλο και περισσότεροι κόκκοι παιπάλης συγκολλούνται καθώς εισέρχεται διάλυμα στο ανακινούμενο στρώμα του ασβεστόλιθου και προκύπτουν σφαιρίδια, τα οποία μέσω κοσκίνισης διαχωρίζονται και απομακρύνονται εκείνα με το επιθυμητό μέγεθος. Τα μικρότερου και μεγαλύτερου μεγέθους τεμάχια επιστρέφουν στην ανακινούμενη κλίνη ως υλικό ανακύκλωσης. Συνήθως, η ποσότητα της υγρασίας που απαιτείται για να επιτευχθεί η σφαιροποίηση είναι αρκετά μεγάλη και στη συνέχεια απαιτείται ξήρανση του υλικού πριν αποθηκευτεί (McClellan et al, 2002).

Η κύρια αρχή των ξηρών διεργασιών είναι η εφαρμογή πίεσης σε λεπτόκοκκο υλικό καθώς αναγκάζεται να διέλθει μεταξύ δύο περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Το αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης πίεσης είναι η απομάκρυνση του αέρα από το υλικό και η πύκνωσή του. Ξήρανση και ψύξη δεν απαιτούνται συνήθως. Από τους περιστρεφόμενους κυλίνδρους μπορούν να παραχθούν είτε μπρικέττες είτε ένα σκληρό φύλλο.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. **Αγιουτάντης, Ζ., 1999**, «Μηχανική πετρωμάτων», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ. 122, Χανιά.
2. **Γαλετάκης, Μ., 1991**, «Βασικές αρχές φασματοσκοπίας ακτίνων Χ-Φθορισμού και πρακτική των μετρήσεων», Εργαστηριακές σημειώσεις, σελ. 34, Χανιά.
3. **Κανονισμός Τεχνολογίας σκυροδέματος, 1997.**
4. **Καστανάκης, Ε., 2002**, Κινητικές μελέτες πυρόλυσης βιομάζας, λιγνίτη και μιγμάτων λιγνίτη με βιομάζα, ΜΔΕ, σελ. 71, Χανιά.
5. **Κωστάκης, Γ., 1988**, «Γενική ορυκτολογία», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ. 184, Χανιά.
6. **Κωστάκης, Γ., 1994**, «Εισαγωγή στην αξιολόγηση των βιομηχανικών ορυκτών», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ. 139, Χανιά.
7. **Λογοθέτης, Ν., 1992**, Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας: Από τον Deming στον Taguchi και το SPC, TQM Hellas Interbooks, Αθήνα.
8. **Οικονόμου, Χ.Μ., 1993**, Τεχνολογία του Σκυροδέματος, Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη.
9. **Παπανικολάου, Κ.Γ., Τριανταφύλλου, Α.Χ.,** Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Ανασκόπηση, ιδιότητες και προοπτικές στην Ελλάδα, Πρακτικά 14<sup>ου</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, 2003, σελ.144-155.
10. **Σιαφάκα, Γ., 2000**, «Αξιολόγηση της διαδικασίας παραγωγής αδρανών υλικών και διερεύνηση των χρήσεων και της διάθεσης των λεπτομερών», ΜΔΕ, σελ. 99, Χανιά.
11. **Σίδερης, Κ.Κ., Κυριτσάς, Σ., Χανιωτάκης, Ε.,** Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά, Πρακτικά 14<sup>ου</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, 2003, σελ.187-193.
12. **Σταμπολιάδης, Η., 1995**, «Εμπλουτισμός Ι», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ. 156, Χανιά.
13. **Χριστίδης, Γ., 1999**, «Κοιτασματολογία II: Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελ. 131, Χανιά.
14. **Ταγαράς, Γ., 2001**, Στατιστικός έλεγχος ποιότητας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
15. **Boynton, R., S., 1979**, Chemistry and technology of lime and limestone, Wiley, New York.

16. **Colman, T.B., with contributions from Highley, D.E., Gunn, A.G., Cameron, D.G., Smith, B., 2003**, An assessment of the nature of the waste produced by active mineral workings in the UK, British Geological Survey Commissioned Report, CR/03/157C, pp.48.
17. **Galetakis, M., Raka, S., 2004**, Assessment of limestone quarry dust by using factorial design of experiments, AMIREG, Chania.
18. **European Industrial Minerals Association, 2004**, [www.ima-eu.org](http://www.ima-eu.org)
19. **Holschmacher, K., Klug, Y., 2002**, A Data Base for the Evaluation of Hardened Properties of SCC, LACER, No 7, pp. 123-134.
20. **Kirk, R.E., 1995**, Experimental design: Procedures for the Behavioral Sciences, Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 3<sup>rd</sup> edition.
21. **Kolb, H., 2001**, Aufbereitung von Carbonaten, ZKG INTERNATIONAL, Vo 54, No 5/2001.
22. **Malvern Instruments Limited**, [www.malvern.co.uk](http://www.malvern.co.uk)
23. **McClellan, G.H., Eades, J.L., Fountain, K.B., Kirk, P., Rothfuss, C., 2002**, Research and Techno-Economic Evaluation: Uses of limestone Byproducts, Department of Geological Sciences, University of Florida.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Αναγωγή της αντοχής σε δοκίμια με λόγο ύψος/διάμετρος=2

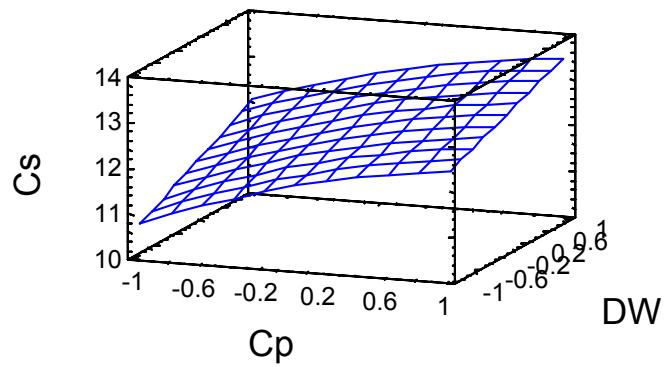
Για τον υπολογισμό της ανηγμένης αντοχής  $C_0$  που αντιστοιχεί σε δοκίμια με λόγο ύψος/διάμετρο=2, χρησιμοποιήθηκε η σχέση που προτείνει ο Prodyakonov,  $C_0=C/(7/8+2/8h/D)$ ,  $C$  η αντοχή που μετρήθηκε,  $h$  το ύψος του δοκιμίου και  $D$  η διάμετρος του. Οι τιμές που προέκυψαν φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Ανηγμένη αντοχή για τα δοκίμια της Β φάσης						
Κωδικός	Αντοχή (Mpa)	Ανηγμένη αντοχή (Mpa)		Κωδικός	Αντοχή (Mpa)	Ανηγμένη αντοχή (Mpa)
15A50-2	14.50	13.64		12A50-2	10.67	10.04
15A50-3	12.41	11.68		12A50-3	11.40	10.72
15A50-4	13.36	12.57		12A50-4	11.54	10.86
15A50-5	13.42	12.63		12A50-5	11.03	10.39
15A60-2	13.27	12.49		12A60-2	11.65	10.97
15A60-3	12.68	11.94		12A60-3	7.71	7.25
15A60-4	13.74	12.94		12A60-4	11.41	10.74
15A60-5	15.06	14.18		12A60-5	11.41	10.74
15A70-2	14.47	13.62		12A70-2	12.01	11.30
15A70-3	14.70	13.85		12A70-3	12.52	11.79
15A70-4	14.32	13.47		12A70-4	12.82	12.07
15A70-5	14.57	13.71		12A70-5	12.34	11.62
15K50-2	8.58	8.07		12K50-2	8.19	7.71
15K50-3	7.90	7.43		12K50-3	7.59	7.14
15K50-4	10.42	9.80		12K50-4	9.36	8.81
15K50-5	6.28	5.91		12K50-5	9.69	9.12
15K60-2	7.60	7.15		12K60-2	9.34	8.79
15K60-3	12.02	11.31		12K60-3	8.05	7.57
15K60-4	11.06	10.41		12K60-4	9.22	8.68
15K60-5	12.21	11.50		12K60-5	9.55	8.99
15K70-2	10.42	9.81		12K70-2	9.83	9.25
15K70-3	11.84	11.14		12K70-3	9.72	9.15
15K70-4	12.09	11.37		12K70-4	11.05	10.40
15K70-5	11.13	10.47		12K70-5	11.39	10.72
Ανηγμένη αντοχή για τα δοκίμια της Α φάσης						
Κωδικός	Αντοχή (Mpa)	Ανηγμένη αντοχή (Mpa)		Κωδικός	Αντοχή (Mpa)	Ανηγμένη αντοχή (Mpa)
10Ξ40	8.08	7.60		10Υ40	10.07	9.47
10Ξ50	8.15	7.67		10Υ50	10.1	9.51
10Ξ60	8.70	8.19		10Υ60	10.73	10.10
12Ξ40	10.84	10.20		12Υ40	12.12	11.41
12Ξ50	12.01	11.30		12Υ50	13.43	12.64
12Ξ60	11.92	11.22		12Υ60	13.33	12.55
15Ξ40	10.90	10.26		15Υ40	12.45	11.72
15Ξ50	14.05	13.22		15Υ50	12.67	11.92
15Ξ60	14.11	13.28		15Υ60	14.71	13.84

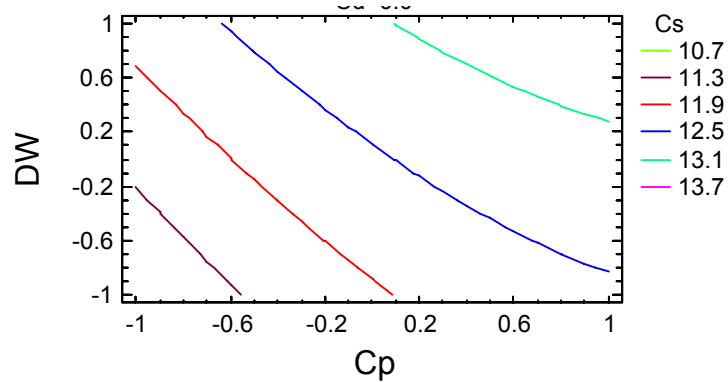
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Συμπληρωματικά διαγράμματα ισότιμων καμπυλών, επιφάνειες απόκρισης  
και διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων

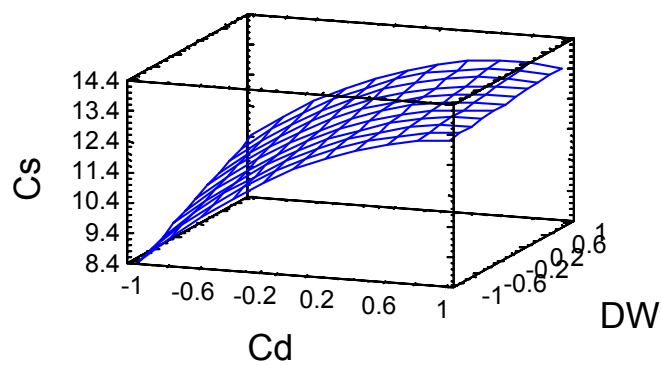
Α φάση με εξεταζόμενη μεταβλητή την αντοχή σε θλίψη,  $C_s$



**Σχήμα Π2.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_d$ .

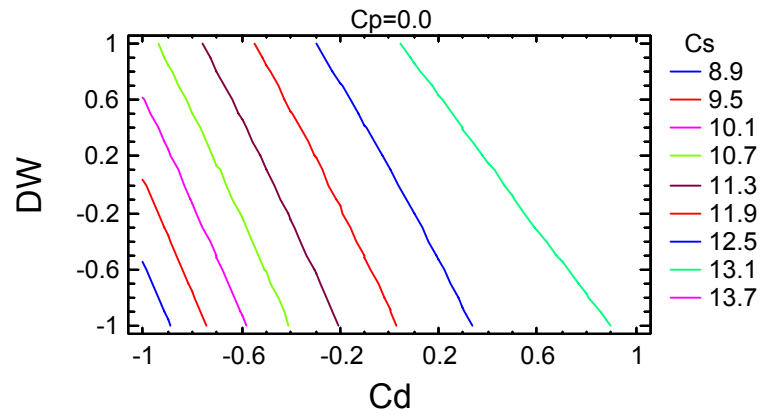


**Σχήμα Π3.** Ισότιμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_d$ .

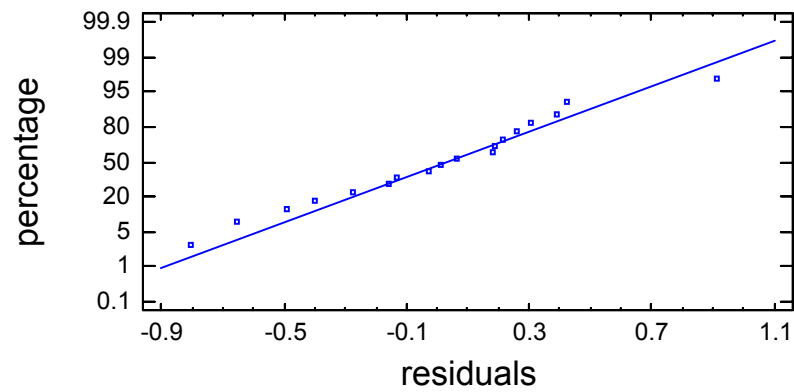


**Σχήμα Π4.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_p$ .



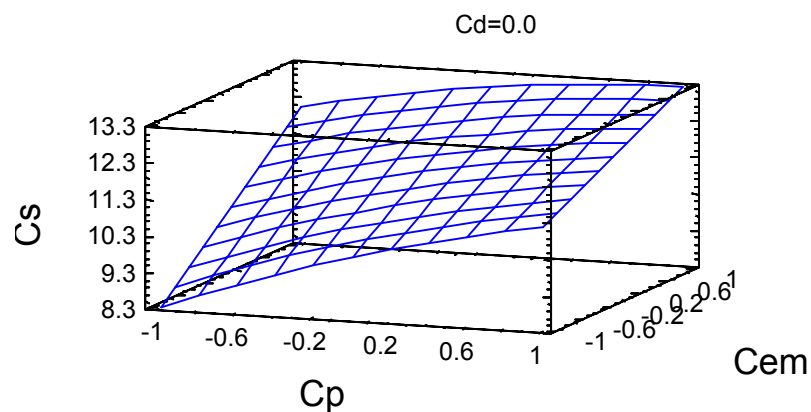


**Σχήμα Π5.** Ισότιμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_p$ .

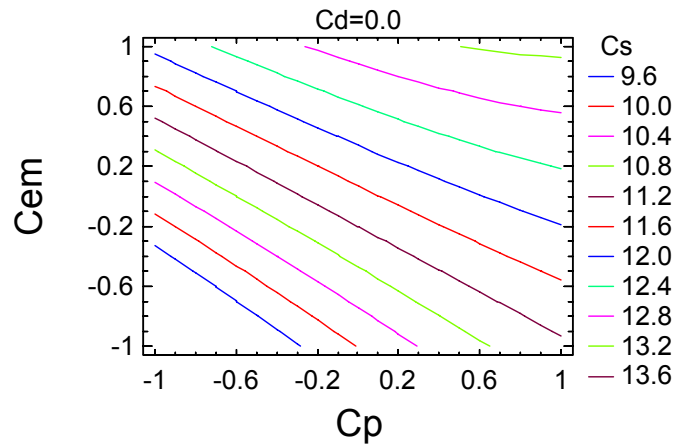


**Σχήμα Π6.** Διάγραμμα ελέγχου υπολοίπων

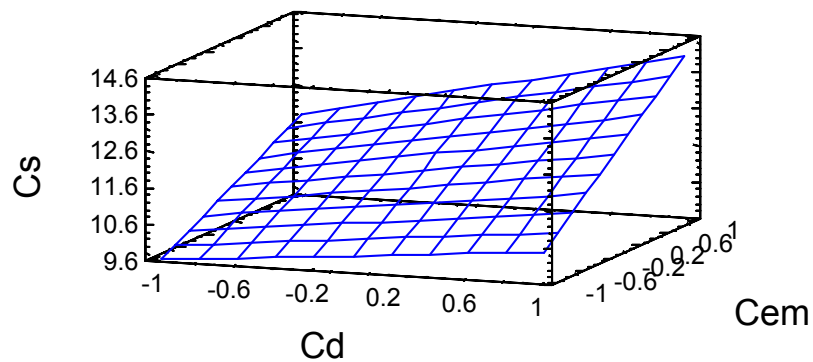
**Β** φάση με εξεταζόμενη μεταβλητή την αντοχή σε θλίψη,  $C_s$



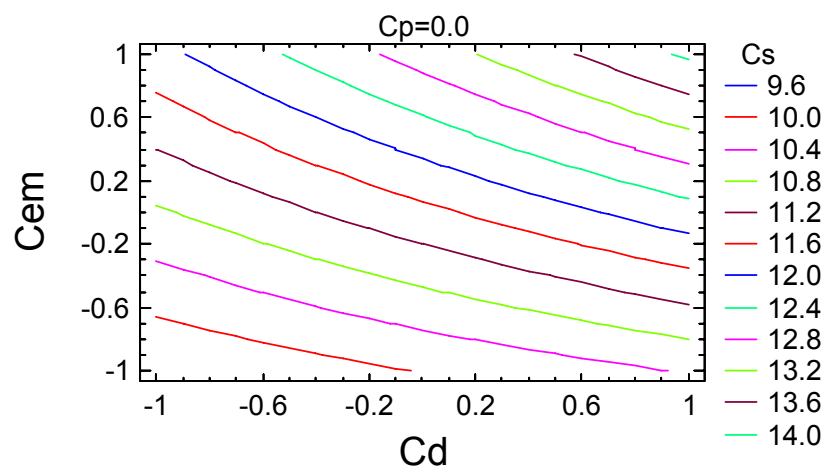
**Σχήμα Π7.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_d$ .



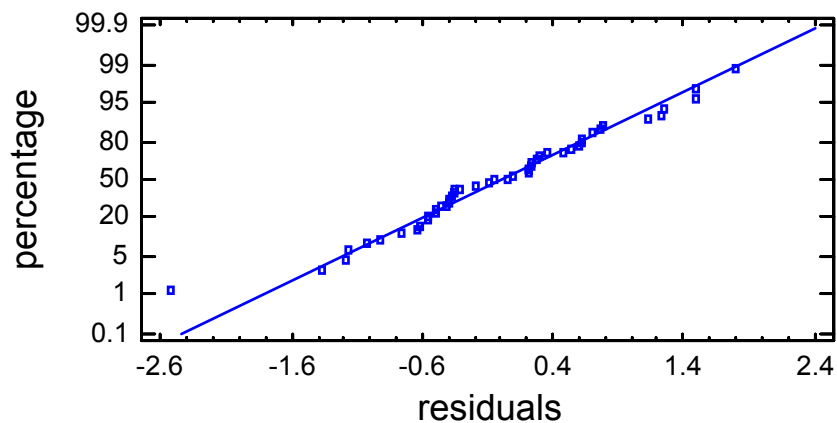
**Σχήμα Π8.** Ισότιμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα Cd.



**Σχήμα Π9.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα Cp.

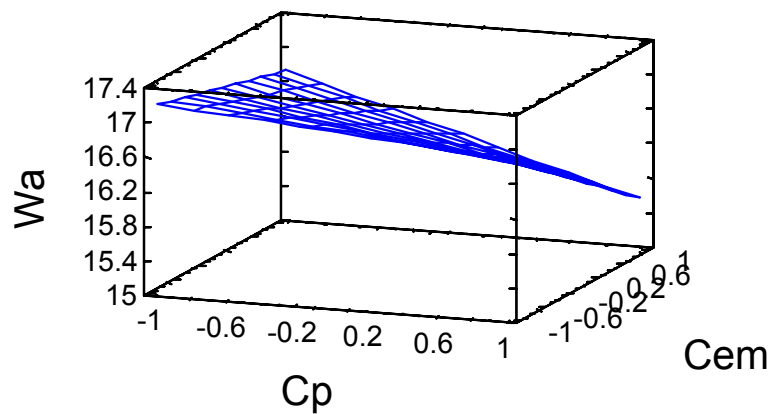


**Σχήμα Π10.** Ισότιμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα Cp.

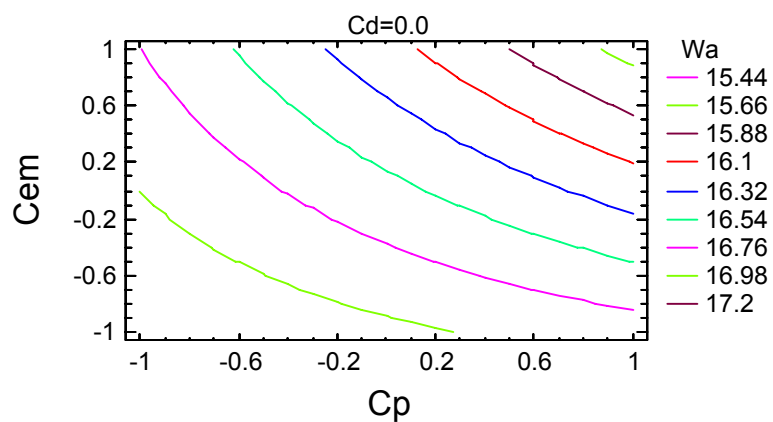


**Σχήμα Π11.** Διάγραμμα ελέγχου υπολοίπων

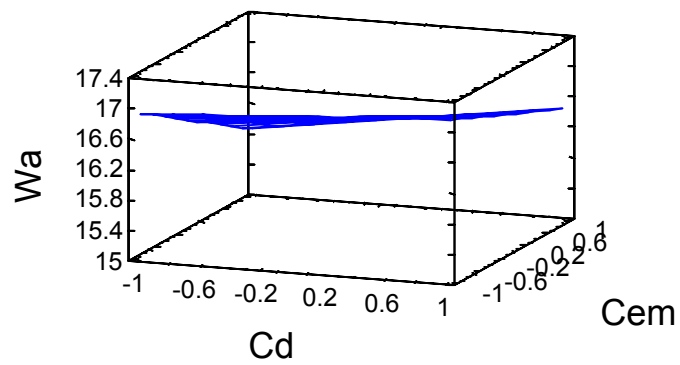
**Β** φάση με εξεταζόμενη μεταβλητή την υδατοαπορρόφηση,  $W_a$



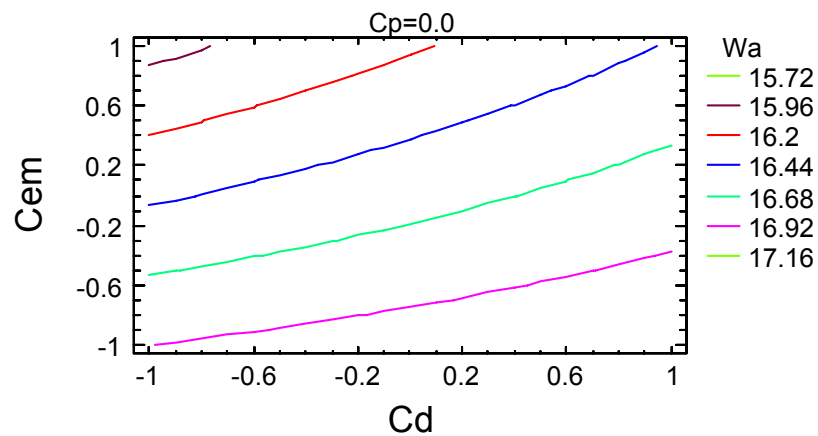
**Σχήμα Π12.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_d$ .



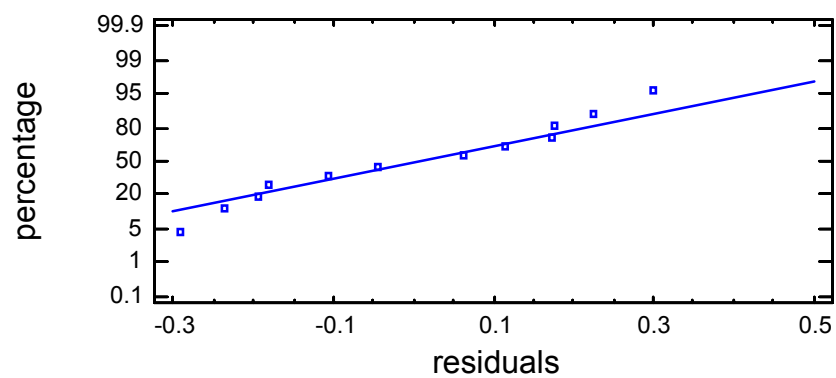
**Σχήμα Π13.** Ισοτίμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_d$ .



**Σχήμα Π14.** Επιφάνεια απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_p$ .



**Σχήμα Π15.** Ισότιμες καμπύλες επιφάνειας απόκρισης με σταθερό στο μηδενικό επίπεδο τον παράγοντα  $C_p$ .



**Σχήμα Π16.** Διάγραμμα ελέγχου υπολοίπων